

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УСИЛЕННЫХ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.Н.Лазовский¹, Д.О. Глухов², Е.Д. Лазовский³

*¹Д.т.н, профессор, профессор кафедры строительных конструкций
УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк, Беларусь,
e-mail : d.lazovski@psu.by*

*²Канд.техн.наук, доцент, доцент кафедры вычислительных систем и сетей
УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк, Беларусь,
e-mail : dzmitry.hlukhau@outlook.com*

*³Канд.техн.наук, доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций
УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк, Беларусь,
e-mail : y.lazowski@gmail.com*

Реферат

В статье приведены результаты экспериментальной проверки методики расчета параметров напряженно-деформированного состояния сжатых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой.

Ключевые слова: сжатые железобетонные элементы, напряженно-деформированное состояние, усиление путем наращивания дополнительными бетоном и арматурой, усиление под нагрузкой

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

D.N. Lazouski, D.O. Hlukhau, E.D. Lazouski

Abstract

The article presents the results of an experimental verification of the methodology for calculating the parameters of the stress-strain state of compressed reinforced concrete elements, reinforced under load.

Keywords: compressed reinforced concrete elements, stress-strain state, reinforcement by building up additional concrete and reinforcement, reinforcement under load

Введение. Усиление сжатых бетонных и железобетонных конструкций с целью обеспечения несущей способности, эксплуатационной пригодности и живучести производится изменением параметров конструкции путем увеличения

поперечного сечения дополнительным бетоном и арматурой с обеспечением их совместной работы с усиливаемой конструкцией [1 монограф].

Совместную работу дополнительного бетона с бетоном усиливаемых конструкций обеспечивают устройством на контактирующей поверхности в бетоне усиливаемой конструкции поперечных шпонок (насечки) и (или) установкой поперечных связей, пересекающих зону контакта, в виде арматурных стержней (скоб), соединяющих дополнительную арматуру усиления с арматурой усиливаемой конструкции.

Расчет несущей способности и параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) на любом этапе деформирования бетонных и железобетонных конструкций, усиленных путем увеличения поперечного сечения, производят методом сечений на основе деформационной модели из общего условия метода предельных состояний в рассматриваемом поперечном сечении

$$E_d \leq R_d, \quad (1)$$

где E_d – внутреннее усилие, вызванное расчетным воздействием на конструкцию; R_d – расчетное предельное усилие, воспринимаемое конструкцией.

Для расчета параметров напряженно-деформированного состояния усиленной железобетонной конструкции под нагрузкой в соответствии с общей деформационной расчетной моделью сопротивления для поперечных сечений расчет выполняют в две [1-3] или три стадии [4]. Первая стадия – расчет параметров напряженно-деформированного состояния усиливаемой конструкции на воздействия в момент усиления, вторая стадия – расчет параметров напряженно-деформированного состояния усиленной конструкции на воздействия во время усиления (усадка бетона усиления при твердении), третья стадия - после усиления. Допускается выполнять расчет параметров напряженно-деформированного состояния усиленной железобетонной конструкции под нагрузкой в два этапа (без учета усадки бетона усиления) [5].

Цель работы: разработка и экспериментальная проверка методики расчета параметров напряженно-деформированного состояния сжатых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой.

Моделирование НДС усиленных сжатых железобетонных элементов.

При действии продольной силы N_z системы разрешающих уравнений с учетом условия совместности деформаций имеют вид:

а) на первой стадии расчета:

$$\begin{cases} \sum_n E'_{cn} A_{cn} \varepsilon_{zn[1]} + \sum_k E'_{sk} A_{sk} \varepsilon_{zk[1]} - N_z = 0; \\ \varepsilon_{zn[1]} = \varepsilon_{zk[1]} = \frac{N_z}{\sum_n E'_{cn} A_{cn} + \sum_k E'_{sk} A_{sk}}; \end{cases} \quad (2)$$

где E'_{cn} , E'_{sk} – текущие значения секущих модулей упругости для элементарных площадок бетона и арматуры усиливаемой конструкции соответственно;

A_{cn} , A_{sk} – площадь сечения элементарных площадок бетона и арматуры усиливаемой конструкции соответственно;

$\varepsilon_{zn[1]}, \varepsilon_{zk[1]}$ — относительные деформации от продольного усилия N_z по направлению оси z в элементарных площадках бетона и арматуры усиливаемой конструкции соответственно;

б) на второй стадии расчета:

$$\begin{cases} \sum_n E'_{cn} A_{cn} \varepsilon_{zn} + \sum_m E'_{cm,ad} A_{cm,ad} \varepsilon_{zm,ad} + \sum_k E'_{sk} A_{sk} \varepsilon_{zk} + \sum_i E'_{si,ad} A_{si,ad} \varepsilon_{zi,ad} - \\ -(N_z + N_{z,ad}) = 0; \\ \varepsilon_{zn} = \varepsilon_{zn[1]} + \varepsilon_{zn,ad}; \varepsilon_{zk} = \varepsilon_{zk[1]} + \varepsilon_{zk,ad}; \\ \varepsilon_{zn,ad} = \varepsilon_{zk,ad} = \frac{N_{z,ad}}{\sum_n E'_{cn} A_{cn} + \sum_k E'_{sk} A_{sk} + \sum_m E'_{cm,ad} A_{cm,ad} + \sum_i E'_{si,ad} A_{si,ad}}; \end{cases} \quad (3)$$

где $E'_{cm,ad}, E'_{sk,ad}$ — текущие значения секущих модулей упругости элементарных площадок бетона и арматуры усиливающих элементов соответственно;

$A_{cm,ad}, A_{si,ad}$ — площадь сечения бетона и арматуры элементарных площадок усиливающих элементов соответственно;

$\varepsilon_{zn,ad}, \varepsilon_{zk,ad}$ — относительные деформации по направлению оси z элементарных площадок соответственно бетона и арматуры усиливаемой конструкции от воздействий, приложенных после усиления;

$\varepsilon_{zm,ad}, \varepsilon_{zi,ad}$ — относительные деформации по направлению оси z элементарных площадок соответственно бетона и арматуры усиливающих элементов от воздействий, приложенных после усиления;

$\varepsilon_{Nz,ad}$ — относительные деформации по направлению оси z в элементарных площадках бетона и арматуры усиливающих элементов от дополнительного продольного усилия $N_{z,ad}$.

Пример графического представления результатов моделирования напряженно-деформированного состояния сжатого железобетонного элемента, усиленного под нагрузкой наращиванием дополнительным бетоном и арматурой представлен на рисунке 1.

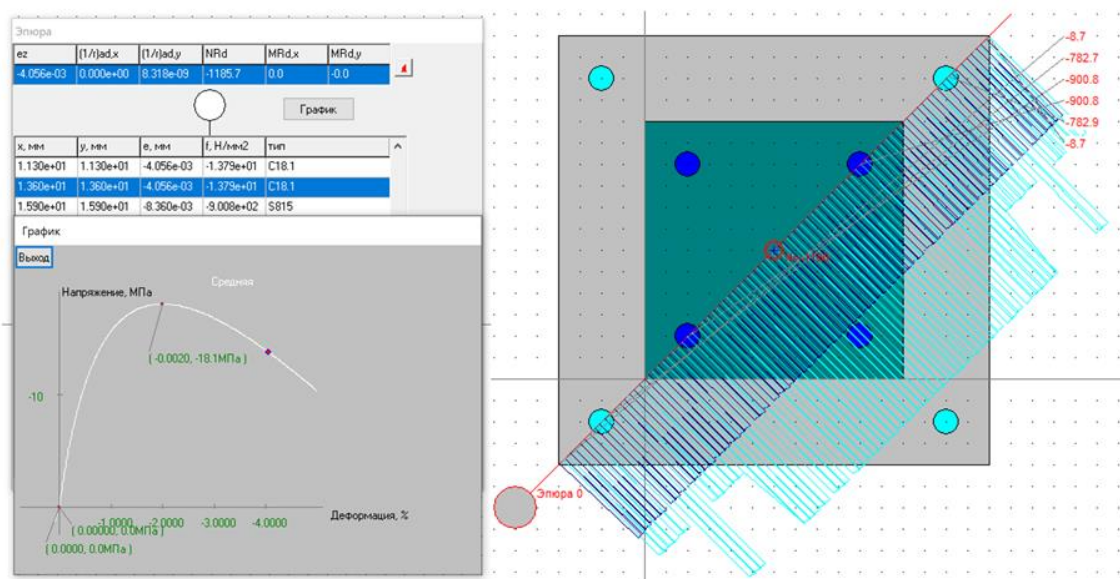


Рисунок 1 - Моделирование напряженно-деформированного состояния сжатого железобетонного элемента, усиленного под нагрузкой наращиванием дополнительным бетоном и арматурой

Экспериментальная проверка. Экспериментально-теоретическое исследование сжатых железобетонных Элементов, усиленных увеличением поперечного сечения наращиванием дополнительным бетоном и арматурой, включало испытание опытных образцов и теоретические расчеты.

Экспериментальные исследования включали в себя 6 опытных железобетонных элементов длиной 850 мм квадратного поперечного сечения размером 120x120мм, усиленных путем устройства наращивания со стороны всех граней. Были также предусмотрены эталонные элементы, которые испытывались без усиления (КЭ-1 и КЭ-2). Размеры опытных элементов определялись мощностью имеющихся пружинных установок для создания длительной нагрузки, имитирующей нагрузку при усилении.

Опытные элементы изготавливались из тяжелого бетона, прочностные и деформационные характеристики которого определялись при испытании кубов, призм, балочек и составляли: $f_c=17.5...21.0\text{МПа}$, $f_{ct}=1.71...1.9\text{МПа}$, $E_c=(29.3...31.0)\cdot 10^3\text{МПа}$.

В качестве рабочей продольной арматуры опытных элементов использовалась горячекатаная термически упрочненная стержневая арматура периодического профиля диаметром 12мм. Прочностные и деформационные характеристики арматуры определялись испытанием на растяжение и составляли: $\sigma_y=815\text{МПа}$, $\sigma_u=935\text{МПа}$, $E_s=1.93\cdot 10^5\text{МПа}$.

До момента усиления опытные железобетонные элементы выдерживались в нормальных условиях в течение 3-х месяцев. Совместная работа дополнительного бетона при увеличении поперечного сечения усиливаемых опытных образцов обеспечивалась: для опытных колонн - насечкой поверхности образцов глубиной до 20мм. Толщина дополнительного бетона усиления для наращивания в опытных элементах составляла 40мм. Наращивание со стороны боковых граней при устройстве усиления опытных элементов армировалось дополнительной горячекатаной термически упрочненной стержневой продольной арматурой диаметром 12мм с вышеназванными прочностными и деформационными характеристиками.

Для опытных элементов варьировали продольным усилием N в момент усиления при следующих соотношениях N/N_u (0; 0.4; 0.75) с тем, чтобы, проследить основные закономерности работы усиленных путем увеличения поперечного сечения сжатых железобетонных элементов в процессе нагружения и установить влияние основных факторов на параметры напряженно-деформированного состояния в их поперечном сечении. Длительная нагрузка на период усиления под нагрузкой опытных создавалась с помощью тарированных пружинных установок. Испытание усиленных опытных элементов производилось по истечении 28сут. после бетонирования. Значения предельного продольного усилия N_u рассчитывали по фактическим характеристикам опытных элементов. Номенклатура и характеристики материалов опытных элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Номенклатура и характеристики бетона опытных элементов

Шифр элемента	Бетон опытного элемента			Бетон наращивания			Степень нагружения
	f_c МПа	f_{ct} МПа	$E_c \cdot 10^3$ МПа	$f_{c,ad}$ МПа	$f_{ct,ad}$ МПа	$E_{c,ad} \cdot 10^3$ МПа	N/N_u
1	2	3	4	5	6	7	8
КЭ-1	17.5	1.71	29.3	-	-	-	-
КЭ-2	18.1	1.73	30.4	-	-	-	-
К-1	17.5	1.71	29.3	11.3	1.21	24.1	0
К-2	21.0	1.90	31.0	10.9	1.18	23.5	0
К-3	21.0	1.90	31.0	10.3	1.18	23.5	0.4
К-4	18.4	1.81	30.4	10.9	1.18	23.5	0.4
К-5	18.4	1.81	30.4	11.1	1.21	24.1	0.75
К-6	18.1	1.73	30.4	10.2	1.18	23.5	0.75

Испытание опытных образцов производилось при сжатии центрально приложенным продольным усилием с помощью гидравлического пресса ПР-500. При этом нагрузка при усилении передавалась на основную часть опытных элементов, а после усиления на их основную и дополнительную часть в виде наращивания усиленных колонн без разгрузки перед испытанием. При испытании нагружением кратковременной нагрузкой пружинная установка со стороны пружин расклинивалась двумя половинами стальной трубы, разрезанной по образующей. Конструкция опытных элементов, схема их испытания и расположения приборов показана на рисунке 2.

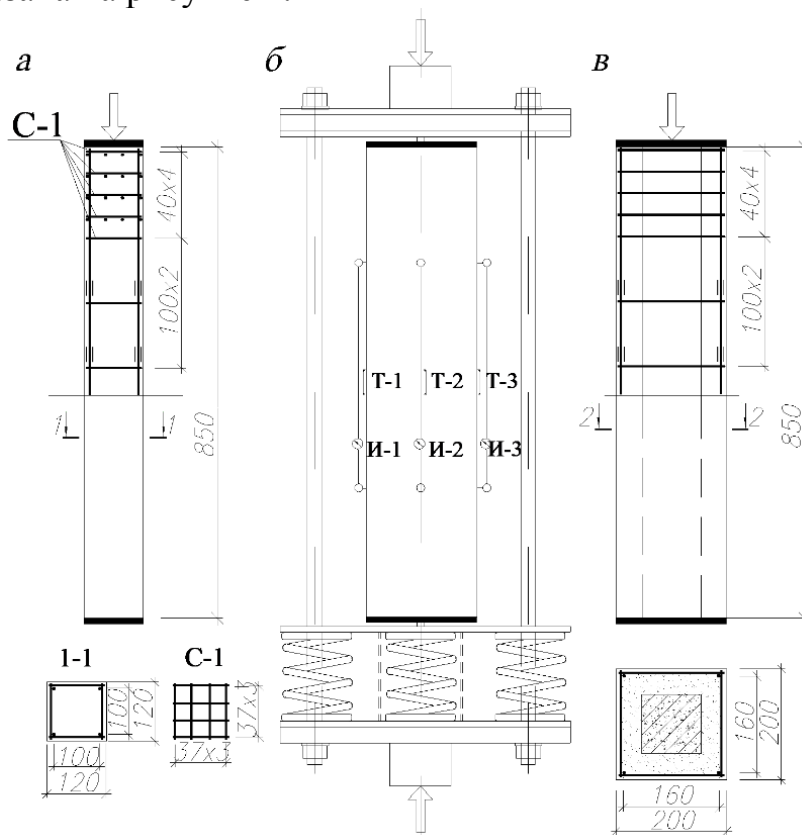


Рисунок 2 - Экспериментальное исследование сжатых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой: а) конструкция опытных элементов; б) схема установки для длительного нагружения при усилении и испытании с расположением приборов; в) конструкция опытных элементов после усиления

Напряженно-деформированное состояние бетона и продольной рабочей арматуры опытных элементов исследовалось с помощью тензорезисторов, механических тензометров, индикаторов часового типа.

Разрушение опытных железобетонных элементов, усиленных путем наращивания дополнительным бетоном и арматурой, происходило в результате раздробления бетона в средней части колонн с последующим выпучиванием продольной арматуры на участке между хомутами. На всех этапах нагружения деформирование бетона основного элемента и бетона наращивания происходило совместно. Характер разрушения опытных элементов представлен на рисунке 3.

Для эталонных опытных железобетонных элементов (КЭ-1, КЭ-2), а также элементов, усиленных наращиванием без предварительного нагружения (К-1, К-2) разрушение происходило при относительных деформациях не менее $(283...325) \cdot 10^{-5}$.

В опытных элементах, усиленных под нагрузкой (К-3...К-6), разрушение происходило при более высоких значениях относительных деформаций не менее $(370...395) \cdot 10^{-5}$ с появлением в арматуре основного сечения пластических деформаций. Это объясняется перераспределением усилий с бетона не только на арматуру основного элемента, но и на бетон и арматуру наращивания, включающиеся в совместную работу на заданном этапе нагружения. Сопротивление сжатию составляющих наращивания разгружают основной элемент, что позволяет работать его бетону на нисходящей ветви диаграммы деформирования.

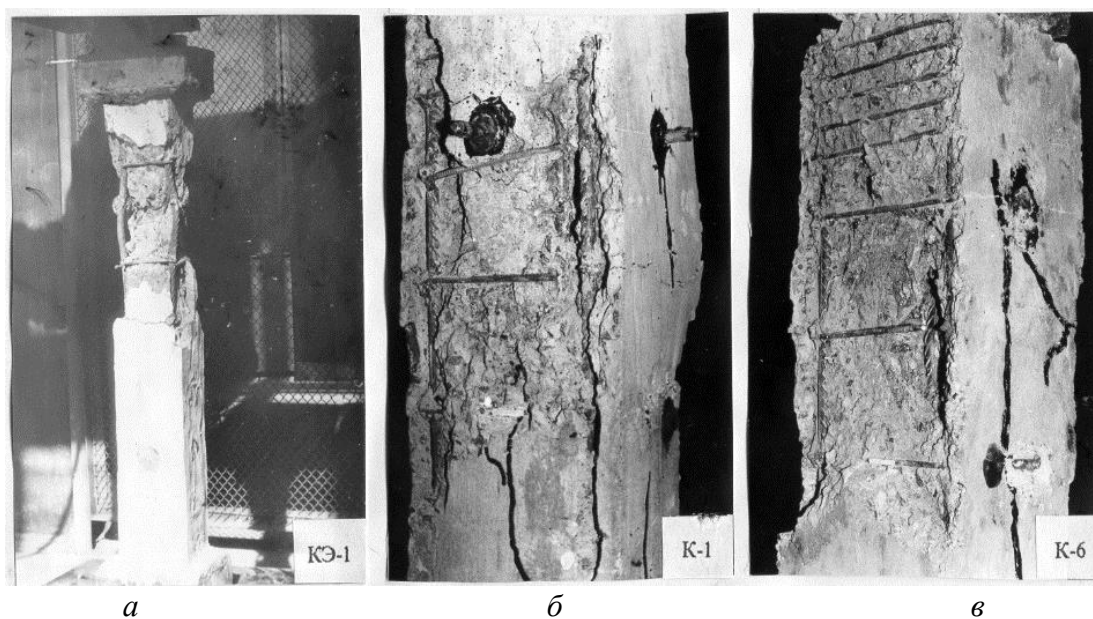


Рисунок 3 - Общий вид разрушения опытных железобетонных элементов

Варьирование величиной предварительного нагружения опытных элементов показало, что увеличение нагрузки на элемент при его усилении, при выбранном в эксперименте бетоне и армировании вызвало уменьшение разрушающего усилия (рисунок 4,а) и относительных деформаций бетона наращивания при увеличении относительных деформаций бетона усиливаемого элемента (рисунок 4,б).

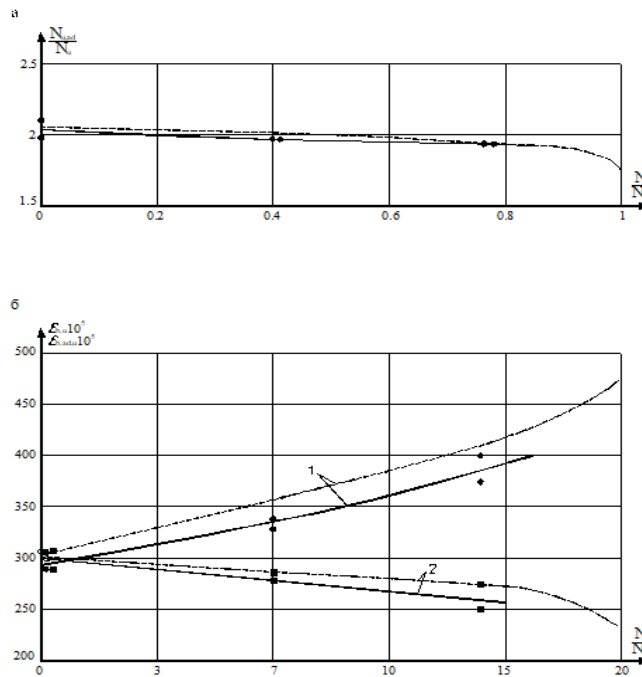


Рисунок 4 - Зависимость разрушающей нагрузки (а) и относительных деформаций опытных элементов от уровня нагружения при усилении: 1 – бетона элемента; 2 – бетона наращивания; _____ - опытная; - - - - - расчетная

При анализе результатов испытаний производилось сопоставление усилий, воспринимаемых каждым составляющим в отдельности: бетоном основной конструкции, арматурой основной конструкции, бетоном и арматурой наращивания со значениями, полученными на основе опытных относительных деформаций. Напряжения в каждом составляющем определялись по фактическим диаграммам бетона на восходящей ветви, расчетным диаграммам бетона на нисходящей ветви и фактической диаграмме растяжения арматуры (рисунки 5-8). Аналогичные зависимости получены по результатам расчета усиленных конструкций на основе метода по расчетным диаграммам бетона и арматуры.

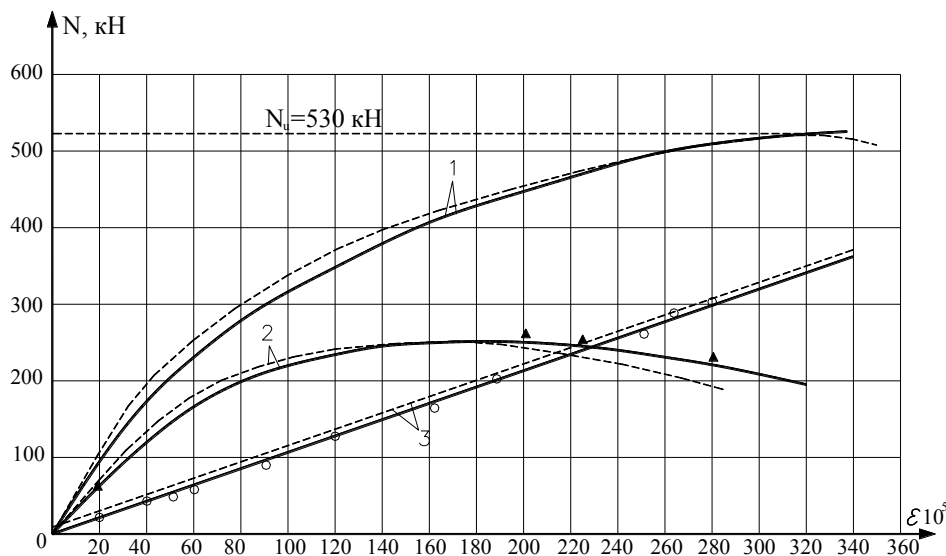


Рисунок 5 - Зависимость усилий, воспринимаемых железобетонным элементом (1), бетоном (2) и продольной арматурой (3) от относительных деформаций при нагружении опытного элемента КЭ-1: _____ - по опытным значениям; - - - - - по расчетным значениям

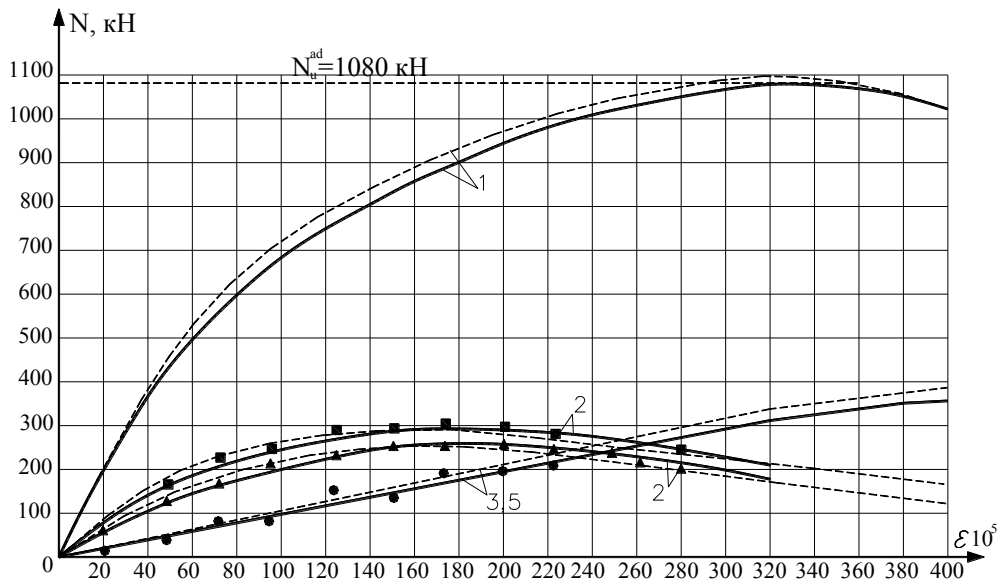


Рисунок 6 - Зависимость усилий, воспринимаемых опытным элементом (1), бетоном (2) и продольной арматурой (3) усищаемого элемента, бетоном (4) и арматурой (5) наращивания от их относительных деформаций при нагружении опытного элемента К-1 : _____ - по опытным значениям; _____ - по расчетным значениям

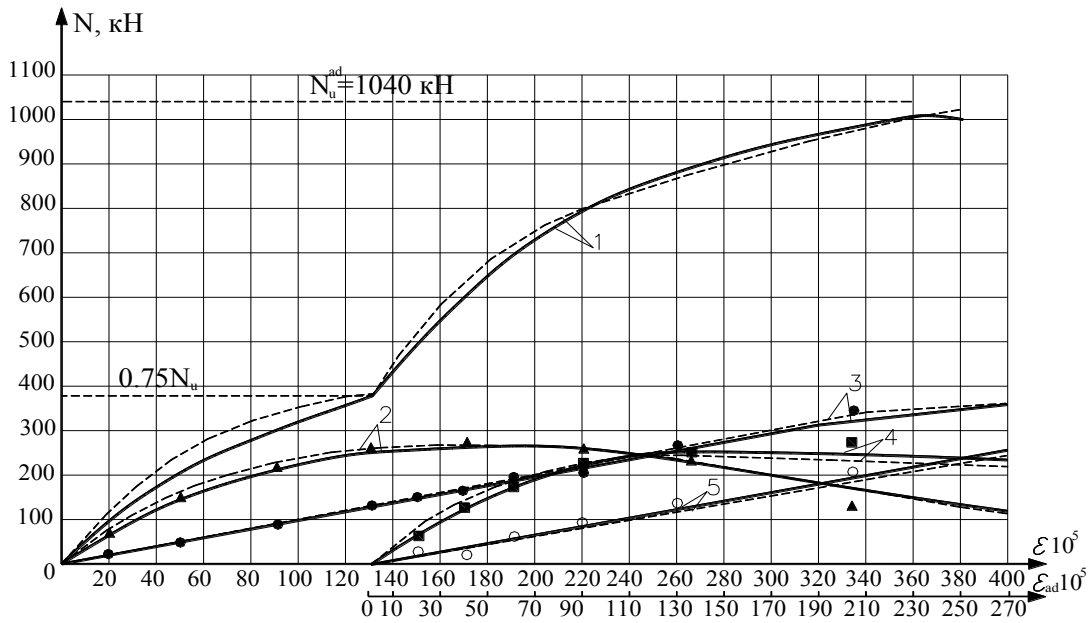


Рисунок 7 - Зависимость усилий, воспринимаемых усиленным опытным элементом (1), бетоном (2) и арматурой (3) усищаемого элемента, бетоном (4) и арматурой (5) наращивания от их относительных деформаций при нагружении опытного элемента К-4 : _____ - по опытным значениям; _____ - по расчетным значениям

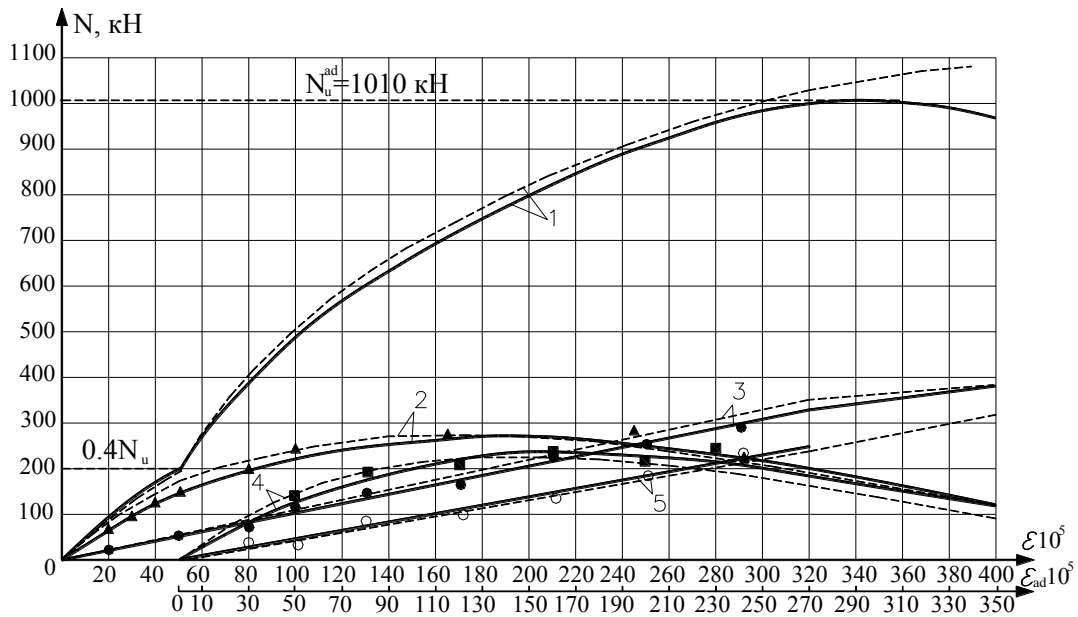


Рисунок 8 - Зависимость усилий, воспринимаемых усиленным опытным элементом (1), бетоном (2) и арматурой (3) усиливаемого элемента, бетоном (4) и арматурой (5) наращивания от их относительных деформаций при нагружении опытного элемента К-6 : _____ - по опытным значениям; _____ - по расчетным значениям

Сопоставление опытных и расчетных значений разрушающего усилия, относительных деформаций бетона усиливаемого железобетонного элемента и бетона наращивания при разрушении опытных железобетонных элементов приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сопоставление разрушающего усилия, относительных деформаций бетона основного и дополнительного сечения опытных железобетонных элементов

Шифр элемента	N_u^{exp} кН	N_u^{th} кН	$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$	$\varepsilon_{b,u} \cdot 10^5$		$\varepsilon_{b,u}$		$\varepsilon_{b,ad,u}$		$\varepsilon_{b,ad,u}$	
				$\varepsilon_{b,u}^{exp} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{b,u}^{th} \cdot 10^5$	$\frac{\varepsilon_{b,u}^{exp}}{\varepsilon_{b,u}^{th}}$	$\varepsilon_{b,ad,u}^{ex} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{b,ad,u}^{th} \cdot 10^5$	$\frac{\varepsilon_{b,ad,u}^{ex}}{\varepsilon_{b,ad,u}^{th}}$		
КЭ-1	530	536	0.99	308	312	0.96	-	-	-	-	-
КЭ-2	550	575	0.96	298	320	0.93	-	-	-	-	-
К-1	1080	1115	0.97	295	324	0.97	316	324	0.97		
К-2	1150	1185	0.97	308	331	0.93	308	331	0.93		
К-3	1050	1105	0.95	330	349	0.95	276	281	0.98		
К-4	1010	1100	0.95	342	358	0.96	287	305	0.94		
К-5	1020	1080	0.94	395	403	0.98	270	275	0.98		
К-6	1040	1085	0.94	379	401	0.94	252	275	0.92		

Заключение. Сопоставление полученных экспериментальных и расчетных зависимостей показывает, что принятая физическая модель правильно отражает характер и величину перераспределения усилий в поперечном сечении центрально нагруженных элементов, усиленных путем увеличения их поперечного сечения наращиванием дополнительным бетоном и арматурой. Перераспределение усилий в сечении усиленного элемента зависит не только от деформационных свойств бетона, количества продольной арматуры, но и от величины деформаций железобетонного элемента при усилении.

Список цитированных источников

1. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. - Новополоцк: Изд-во Полоцкого гос. ун-та – 1998, 245с.
2. Пецольд Т.М., Лазовский Д.Н. Расчет усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. - Бетон и железобетон. - 1998, №6, (начало).
3. Пецольд Т.М., Лазовский Д.Н. Расчет усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. - Бетон и железобетон. - 1999, №1,(окончание).
4. Лазовский Д.Н., Тур В.В., Глухов Д.О., Лазовский Е.Д. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели. - Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Технические науки (строительство, машиностроение, геоэкология). Экономические науки. 2021г., №2(125), С.7-12.
5. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Лазовский Е.Д. Общий метод расчета прочности и деформаций на основе нелинейной деформационной модели косо сжатых колонн, усиленных железобетонной обоймой. -Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки.- 2021г., №16(30).-С.72-79.

References

1. Lazovskiy D.N. Usileniye zhelezobetonnykh konstruksiy ekspluatiruyemykh stroitel'nykh sooruzheniy.- Novopolotsk: Izd-vo Polotskogo. un-ta – 1998, 245s.
2. Petsol'd T.M., Lazovskiy D.N. Raschet usileniya zhelezobetonnykh konstruksiy ekspluatiruyemykh stroitel'nykh sooruzheniy.- Beton i zhelezobeton. - 1998, №6, (nachalo).
3. Petsol'd T.M., Lazovskiy D.N. Raschet usileniya zhelezobetonnykh konstruksiy ekspluatiruyemykh stroitel'nykh sooruzheniy. - Beton i zhelezobeton. - 1999, №1,(okonchaniye).
4. Lazovskiy D.N., Tur V.V., Glukhov D.O., Lazovskiy Y.D. Uchet polzuchesti i usadki be-тона po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstruksiy na osnove defor-matsionnoy raschetnoy modeli. - Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni-versiteta. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki (stroitel'stvo, mashinostroyeniye, geoekologiya). Ekonomicheskkiye nauki. 2021g., №2(125), S.7-12.
5. Lazovskiy D.N., Glukhov D.O., Lazovskiy Y.D. Obshchiy metod rascheta prochnosti i de-formatsiy na osnove nelineynoy deformatsionnoy modeli koso szhatykh kolonn, usilennykh zhelezo-betonnoy oboymoy. -Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnyye nauki.- 2021g., №16(30).-S.72-79.

УДК 624.21.03

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО НОРМАМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В. Н. Дедок¹

*¹Старший преподаватель кафедры «Геотехника и транспортные коммуникации»
УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail : vladzimir@dziadok.com*

Реферат

В статье приведены результаты сравнительного анализа основных положений проведения диагностики и оценки технического состояния и эксплуатационной надежности мостовых сооружений, установленных нормативно-технической документацией в Республике Беларусь и Российской Федерации.