

## ИСПЫТАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН С ИМПЕРФЕКЦИЯМИ

### 1. Характерные виды деградации железобетонных колонн

Железобетонные конструкции после долгого времени эксплуатации могут подвергаться разнообразным повреждениям. Пористость бетона в конструкциях, подвергнутым воздействию атмосферных факторов, может быть причиной повреждений элементов. В зимних периодах замерзавшая вода может привести к разрушению в результате образования трещин. В случае одновременного обводнения и засоления повреждения бетона могут быть более интенсивными [2,3]. Карбонизация бетона приводит к потере защитных свойств по отношению к арматурным стержням, что может способствовать развитию коррозии арматуры [3,4,7]. Коррозия бетона может быть вызвана рядом факторов, таких как: выщелачивания, кислоты, карбонатов, сульфатов [3,7,8]. Испытания, связанные с коррозией бетона и железобетона, проводятся преимущественно в лабораторных условиях, а реальные конструкции подвергаются коррозии в натуральных условиях, в которых кроме химической агрессии действуют напряжения, вытекающие из предназначения конструкций. Коррозия железобетонных конструкций требует междисциплинарных исследований на рубеже химии и строительства.

Испытания коррозии бетона в агрессивной среде на бетонных образцах под длительным действием сжимающих и сгибающих напряжений привёл В. Г. Пяста [6]. Был также исследован модуль упругости бетона. Переменными параметрами в исследованиях были: цемент, заполнитель, степень концентрации агрессивности среды, отношения воды и цемента, возраст бетона.



*Рисунок 1 - Железобетонные колонны, подвергнутые коррозии*



*Рисунок 2 - Железобетонные колонны с механическими повреждениями и перемещенными хомутами*



*Рисунок 3 - Двухветвевая колонна с сильно развитой коррозией*



*Рисунок 4 - Железобетонная колонна после отделения наружного пласта бетона. Хомуты уничтожены коррозией.*

Содержание проектированного размещения армирования в опалубке бывает затруднительным в связи с действием различных технологических факторов. Перемещение каркаса арматуры по отношению к опалубке может влиять на уменьшение или увеличение защитного слоя бетона. Прокладки и хомуты могут переместиться во время бетонирования и уплотнения бетонной смеси. Под влиянием гравитационного воздействия бетонной смеси могут переместиться хомуты, особенно в случае их крепления вязальной проволокой. Деформации арматурного каркаса могут образоваться под влиянием крупных зёрен заполнителя. Добавочными факторами, способствующими перемещениям арматуры, могут быть отклонения при монтаже арматуры и опалубки. Качество железобетонных колонн зависит также от эксплуатационных факторов.

В колоннах, подвергнутых воздействию коррозии, образуются трещины в защитном слое бетона на линии арматурных стержней. В виду увеличения объёма продуктов коррозии и их расклинивающего действия на бетон наступает откалывание фрагментов бетона. В железобетонных колоннах не существует сцепление бетона с арматурой в связи с прослойкой продуктов коррозии, которые отделяют оба материала. Наружный слой бетона характеризуется ничтожной прочностью и недостаточным сцеплением с ядром колонны. Хомуты расположены ближе поверхности, их диаметр меньше по сравнению с диаметром продольной арматуры и потому хомуты первыми выходят из строя. В колоннах, представленных на фотографиях, некоторые хомуты полностью уничтожены коррозией. В колоннах с небольшим расстоянием продольной арматуры легко откалывается наружный слой бетона. На рисунке 3 наружный слой легко откалывается вручную. После отделения наружного слоя деградированного бетона, даже не специалистам, видно предаварийное состояние конструкции. В колоннах, представленных на рисунке 3, видны следы „текущего ремонта”, который состоял в замазывании раствором поврежденных мест. Такие ремонты только успокаивают зрителей, а с ремонтом или подкреплением колонн ничего общего не имеют.

## 2. Польские требования к проектированию железобетонных колонн

Требования, относящиеся к проектированию железобетонных колонн определены в нормах и технической литературе. Польская норма PN-B-03264 [9] рекомендует диаметр продольного армирования в монолитных колоннах применять величиной в  $12 \div 40$  мм, а в сборных минимальная величина диаметра - 10 мм. Диаметр хомутов следует применять не менее 0,2 диаметра продольных стержней и не менее чем 4,5 мм. Размещение хомутов должно быть не меньше чем  $15\varnothing$  (когда процент армирования не больше 3%),  $10\varnothing$  (когда процент армирования больше чем 3%,  $\varnothing$  - диаметр продольных стержней армирования) и не больше меньшего размера поперечного сечения колонны. Суммарная площадь сечения армирования не может быть меньше чем

$$A_{smin} = 0,15 \frac{N_{sd}}{f_{yd}}, \quad (1)$$

$$A_{smin} = 0,003 A_c, \quad (2)$$

где  $N_{sd}$  - продольная расчетная сила,

$f_{yd}$  - расчётный предел пластичности стали,

$A_c$  - площадь поперечного сечения бетона.

Если процент армирования больше чем 3% или размер сечения больше 450 мм, тогда надо применять двойные хомуты. Влияние гибкости и длительной нагрузки учитывается, если:

$$\left. \frac{l_0}{i} > 20 \text{ или } \frac{l_0}{h} > 6 \right\} \text{ для колонн бетонных,}$$
$$\frac{l_0}{i} > 25 \text{ или } \frac{l_0}{h} > 7 \text{ для колонн железобетонных}$$

и преднапряжённых,

где:  $l_0$  - расчётная длина,

$h$  - высота сечения,

$i$  - радиус инерции сечения.

Норма [9] не определяет минимальных размеров сечения колонн. Минимальный размер сечения колонн определён в монографии [4] и равняется 250 мм, но при хорошем качестве технологии можно принять 200 мм. В сборных колоннах минимальный размер стороны - 80 мм. Согласно Eurocode 2 [10] минимальный размер сечения колонн составляет 200 мм (элементы бетонирования в вертикальном положении) и 140 мм (в горизонтальном). Минимальный диаметр продольных стержней должен быть не менее 12 мм. Диаметр поперечного армирования (хомуты, спиральная арматура) принимать не менее чем 0,25 максимального диаметра продольных стержней и не менее 6 мм. Расстояние поперечного армирования должно быть не меньше 12 минимальных диаметров продольных стержней, меньшей длины грани поперечного сечения колонны и не менее 300 мм.

### **3. Характеристика испытаний и испытываемого образца**

Испытания проводились для трёх видов образцов. В первой серии испытывались бетонные колонны длиной в 930 мм с квадратным поперечным сечением, длина грани которого составляла 200 мм.

Образцы второй серии были таких же размеров, но с продольным армированием в виде четырёх стержней диаметром в 12 мм и хомутами, сделанными с проволоки диаметром в 6 мм с постоянной расстановкой 150 мм. На всей длине продольной арматуры существовало сцепление бетона с арматурой. Площадь сечения арматуры составляла 4,52 см<sup>2</sup>, площадь бетона 395,48 см<sup>2</sup>, а процент армирования - 1,14%. В третьей серии принято такие же образцы, как во второй, со следующими ограничениями: в средней части образца длиной в 600 мм не было хомутов и стержни были отделены от бетона. В средней части образца площадь сечения бетона составляла 375,66 см<sup>2</sup>, а процент армирования - 1,20%. Образцы всех серий были сделаны с бетона Б15, которого проверенная средняя прочность на сжатие равнялась 20 МПа. В торцах колонн были поставлены стальные прокладки толщиной в 5 мм. Прокладки обеспечивали равномерную передачу нагрузки на элемент. Проект образца колонны был разработан при соблюдении требований, представленных в настоящей статье.

Соотношение  $\frac{l_0}{h} = 4,65 < 7$  и потому при определении несущей

способности колонны не учитывалось влияние гибкости и длительной нагрузки.

Запроектированный образец изображал колонну, в которой под влиянием длительного периода эксплуатации образовались повреждения, вызванные коррозией или техническими факторами. При действии коррозии бетона и арматуры образовались отделение защитного слоя бетона, коррозия хомутов насквозь и частичная коррозия продольной арматуры. В результате действия коррозии получаются колонны, в которых на отдельных отрезках нет хомутов, а продольная арматура отделена от бетона продуктами коррозии.

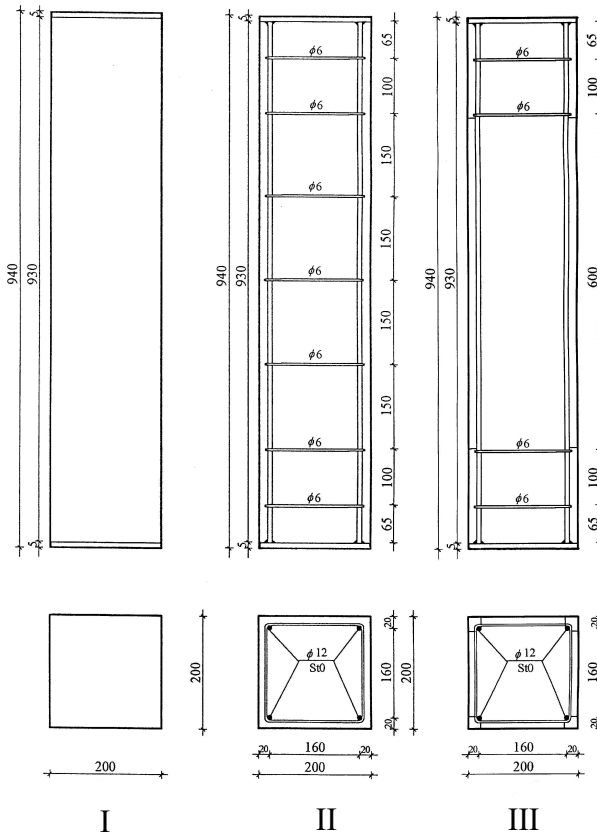
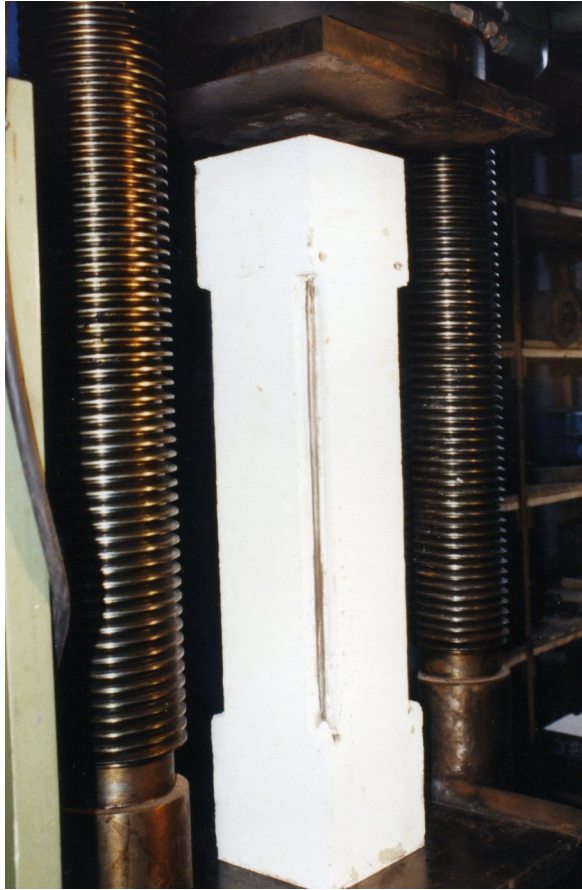


Рисунок 5 - Схемы испытываемых образцов серии I, II, III.





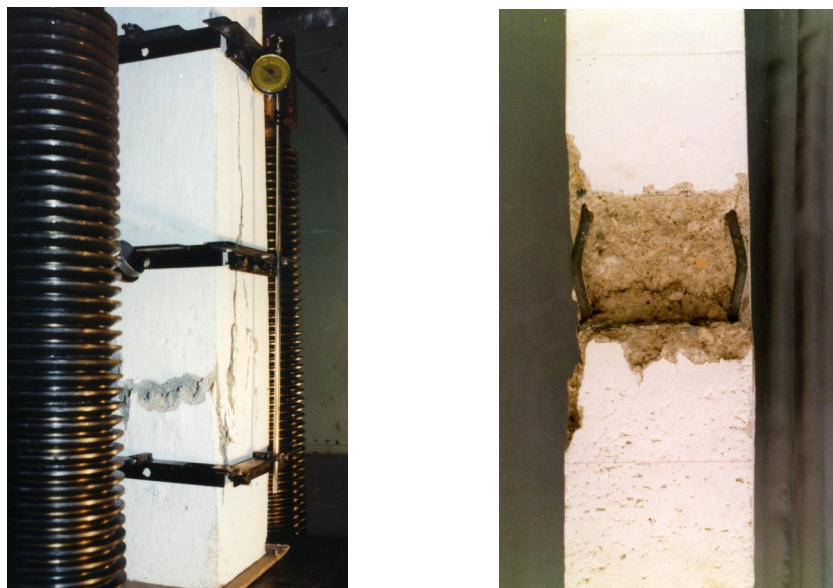
*Рисунок 6 - Образец серии III до испытаний*

Аналогичное техническое состояние может образоваться в тех отрезках колонн, где во время бетонирования переместились вниз хомуты, а в периоде долгой эксплуатации образовалось отделение защитного слоя бетона под влиянием таких механических факторов как, например, случайные удары транспортных средств. Образцы подвергались испытанию на осевое сжатие при поэтапном увеличении нагрузки [1,5]. При продольных гранях колонны измерялись деформации укорочения с помощью индикаторов часового типа с точностью измерения 0,01 мм.



#### 4. Характерные виды разрушения

Сжимаемые бетонные неармированные образцы первой серии разрушались в виде косо́го среза или образования продольных трещин на боковых стенках. Характер разрушения бетонного образца подтверждает примеры с научно-технической литературы [1,5]. В образцах второй серии, под влиянием сжимающей силы, образовались вертикальные трещины вдоль главных арматурных стержней с последственным местным отрывом защитного слоя бетона. Продольные трещины возникали при нагрузке равной около 0,85 разрушающей. При дальнейшем росте нагрузки откалывались с треском пласты наружного слоя бетона.



*Рисунок 7 - Образцы после испытаний: А - серии I, В - серии II*

В зоне отрыва пластов обнаруживались выпученные арматурные стержни и деформированные хомуты. Разрушение колонн сопровождалось крошением бетона в его ядре и понижением сжимающей силы. Наблюдались два вида разрушения сжимаемой колонны: откалывание поочередных слоев бетона ядра в зоне между хомутами или косой срез ядра, также между хомутами. Совершенно другой вид разрушения образовался в колоннах третьей серии.



*Рисунок 8 - Образцы серии III после испытаний.  
Два вида разрушения*

При росте сжимающей силы наблюдались два вида деформации продольной арматуры в средней зоне, где не было сцепления и защитного слоя бетона. В некоторых образцах в меру роста нагрузки увеличивалось постоянное выпучивание стержней. Во второй группе образцов в меру увеличения нагрузки в продольных стержнях не замечалось деформации выпучивания, а при определённой величине нагрузки наступала резкая деформация арматурных стержней. При дальнейшем увеличении нагрузки наступило разрушение бетонного ядра образца и дальнейшая деформация арматуры.

## **5. Результаты испытаний**

Самые высокие значения разрушающей силы получились для образцов серии II, а самые низкие для бетонных образцов без армирования (серия I). Непосредственное сравнение разрушающих сил является затруднительным в связи с разными значениями поверхности поперечного разреза бетона в образцах всех серий.

Результаты образцов серий I, II являются основой сравнения по отношению к результатам образцов серии III. С результатов серии III вытекает, что при свободном отрезке арматуры (без хомутов и защитного слоя) арматура участвует в несущей способности колонн, но её участие зависит от гибкости. Очевидно, что при изменении длины свободного участка стержня, его критическая сила будет меняться. Определение критической силы в стержнях будет зависеть от принятой модели закрепления стержня. Во время испытания образцов измерялись продольные деформации образцов, а их средние значения представлены в таблице 2 и рис. 9.

Коррозия арматуры в колоннах вызывает повреждение наружного слоя бетона, которого несущая способность близка нулю. Это вызывает значительное относительное уменьшение поперечного сечения колонны. При размере поперечного сечения колонны 200x200 мм и толщине деградации 30 мм относительное уменьшение поперечного сечения колонны (бетона) равно 50%.

**Таблица 1** - Сжимающие разрушающие силы

Серия	Номер образца	Разрушающая сила		Поперечное сечение $A_c$ - бетона $A_s$ - арматуры
		кН	средняя, кН	
I	1	792,50	800,50	$A_c = 400 \text{ см}^2$ $A_s = 0$
	2	810,50		
	3	798,50		
II	1	943,00	936,67	$A_c = 395,48 \text{ см}^2$ $A_s = 4,52 \text{ см}^2$
	2	957,50		
	3	909,50		
III	1	791,50	776,17	$A_c = 375,66 \text{ см}^2$ $A_s = 4,52 \text{ см}^2$
	2	782,00		
	3	755,00		

**Таблица 2 - Продольные деформации сжимаемых образцов**

Сжимаю- щая сила кН	Продольные средние деформации					
	Абсолютные $\Delta l \times 0,001$ для образцов серии			Относительные $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ , ‰ для образцов серии		
	I	II	III	I	II	III
1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0
50	15,3	16,0	21,0	0,026	0,027	0,035
100	31,8	29,0	42,3	0,053	0,048	0,071
150	54,3	58,0	67,6	0,091	0,097	0,113
200	77,8	77,7	92,2	0,130	0,130	0,154
250	101,2	99,7	118,8	0,169	0,167	0,198
300	125,3	121,7	144,4	0,209	0,203	0,241
350	156,5	147,3	173,5	0,261	0,246	0,289
400	182,2	172,0	200,0	0,304	0,287	0,333
450	212,7	196,3	234,1	0,355	0,327	0,390
500	246,5	222,7	261,8	0,411	0,371	0,446
550	276,5	252,3	308,0	0,461	0,421	0,513
600	312,5	282,3	341,2	0,521	0,471	0,569
650	355,8	320	386,0	0,593	0,533	0,613
700	401,2	345,0	426,2	0,669	0,575	0,710
750	453,8	384,3	471,4	0,756	0,641	0,786
800	505,8	425,0	509,8	0,843	0,705	0,850
850		470,7	max 594		0,785	
900		518,3			0,864	
950		564,5				
		694,0				

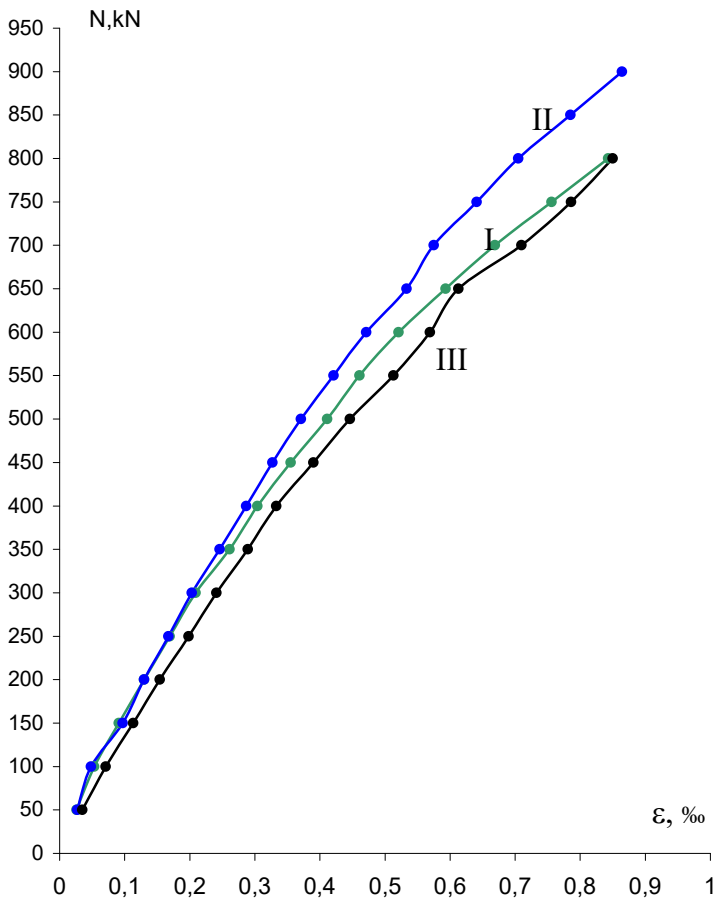


Рисунок 9 - Зависимость относительных укорочений от сжимающей силы

## Выводы

В колоннах с повреждённым наружным слоем бетона и коррозией арматуры разрушение может произойти мгновенно без предупреждений. Выход из строя наружного слоя бетона, возбуждённого коррозией арматуры вызывает большое относительное уменьшение поперечного разреза колонны.

При местном отсутствии хомутов в железобетонных колоннах несущая способность уменьшается, а разрушение образуется в той же зоне.

## **Литература**

**1. Budownictwo betonowe**, t. VIII. Badanie materiałów, elementów i konstrukcji. Praca zbiorowa pod red. W. Kuczyńskiego. Arkady, Warszawa 1972.

**2. Fagerlund G.:** Trwałość konstrukcji betonowych. Arkady. Warszawa 1997.

**3. Gruener M.:** Korozja i ochrona betonu. Arkady. Warszawa 1983.

**4. Kobiak J., Stachurski W.:** Konstrukcje żelbetowe. t. 1. Arkady. Warszawa 1984.

**5. Nagrodzka-Godycka K.:** Badanie właściwości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych. Arkady. Warszawa 1999.

**6. Piasta W. G.:** Korozja siarczanowa betonu pod obciążeniem długotrwałym. Politechnika Świętokrzyska. Kielce 2000.

**7. Ściślewski Z.:** Ochrona konstrukcji żelbetowych. Arkady. Warszawa 1999.

**8. Wieczorek G.:** Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2002.

**9. PN-B-03264: 2002.** Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statystyczne i projektowanie.

**10. Eurocode-2:** Projektowanie konstrukcji żelbetowych i sprężonych. Cz. 1. Reguły ogólne i reguły projektowania budynków.