

УДК 624.074

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-27-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-27-44)**И.Г. ОВЧИННИКОВА¹, И.А. ЧЕРНЫЙ^{1,2}, Б.С. СОКОЛОВ^{1,✉}**

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

РАБОТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЛИТ В ТРЕХОСНО НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Аннотация

Введение. В данной работе приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований железобетонных цилиндрических элементов в трехосно напряженном состоянии.

Цель. Основной задачей данной работы явился анализ экспериментальных данных о влиянии различных конструктивных и силовых факторов на напряженно-деформированное состояние предварительно напряженных железобетонных элементов в трехосно напряженном состоянии на всех стадиях их работы, а также разработка методики их расчета.

Материалы и методы. Использованы материалы ранее выполненных экспериментальных исследований на предварительно напряженных железобетонных образцах цилиндрической формы с навитой по боковой поверхности напряженной проволоочной арматурой. Расчеты выполнены методом конечных элементов в физически нелинейной постановке с использованием программного комплекса ATENA.

Результаты. Выполнен анализ экспериментальных данных влияния на несущую способность цилиндрических образцов соотношения их геометрических размеров, прочности бетона, степени бокового обжатия. Рассмотрены особенности характера деформирования под нагрузкой образцов в обойме, поведения при многократном повторном нагружении. Выполнено расчетное конечно-элементное моделирование работы трехосно нагруженных цилиндрических плит на всех стадиях вплоть до разрушения, приведены полученные результаты и сопоставление с экспериментальными данными.

Выводы. Определены рекомендуемые значения геометрических и силовых параметров, обеспечивающие наиболее рациональные конструктивные решения толстых плит, работающих в условиях трехосно напряженного состояния. Разработана методика расчета таких конструкций.

Ключевые слова: железобетон, цилиндрическая плита, преднапряженная арматура, трехосно напряженное состояние, физическая нелинейность, трещинообразование, станина прессы, экспериментальные исследования, конечно-элементный расчет

Для цитирования: Овчинникова И.Г., Черный И.А., Соколов Б.С. Работа железобетонных цилиндрических плит в трехосно напряженном состоянии // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 27–44. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-27-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-27-44). EDN: CDXULK

Вклад авторов

Овчинникова И.Г. – сбор и анализ экспериментальных данных, написание статьи.

Черный И.А. – выполнение и анализ результатов расчетов, написание статьи.

Соколов Б.С. – анализ результатов расчетов, написание статьи.

Финансирование

Исследование финансировалось за счет средств АО «НИЦ «Строительство».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.06.2025

Поступила после рецензирования 12.07.2025

Принята к публикации 17.07.2025

I.G. OVCHINNIKOVA¹, I.A. CHERNYI^{1,2}, B.S. SOKOLOV^{1,✉}

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE CYLINDRICAL SLABS IN A TRIAXIALLY STRESSED STATE

Abstract

Introduction. This paper presents the results of experimental and theoretical studies of reinforced concrete cylindrical elements in a triaxially stressed state.

Aim. The main objective of this work was to analyze experimental data on the influence of various structural and force factors on the stress-strain state of prestressed reinforced concrete elements in a triaxially stressed state at all stages of their operation, as well as to develop a methodology for their calculation.

Materials and methods. The materials of previously performed experimental studies on prestressed reinforced concrete samples of cylindrical shape with stressed wire reinforcement wound along the side surface were used. The calculations were performed by the finite element method in a physically nonlinear formulation using the ATENA software package.

Results. The analysis of experimental data on the effect on the bearing capacity of cylindrical samples of the ratio of their geometric dimensions, concrete strength, degree of lateral compression. The features of the nature of deformation under load of samples in the cage, their behavior during repeated loading are considered. Computational finite element modeling of the operation of triaxially loaded cylindrical slabs at all stages up to destruction is performed, the results obtained and comparison with experimental data are presented.

Conclusions. Recommended values of geometric and force parameters have been determined, providing the most rational design solutions for thick slabs operating in a triaxially stressed state. A method for calculating such structures has been developed.

Keywords: reinforced concrete, cylindrical slab, prestressed reinforcement, triaxially stressed state, physical nonlinearity, crack formation, press frame, experimental studies, finite element analysis

For citation: Ovchinnikova I.G., Chernyi I.A., Sokolov B.S. The behavior of reinforced concrete cylindrical slabs in a triaxially stressed state. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 27–44. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-27-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-27-44). EDN: CDXULK

Authors contribution statement

Ovchinnikova I.G. – collection and analysis of experimental data, writing the article.

Chernyi I.A. – performing and analyzing calculation results, writing the article.

Sokolov B.S. – analysis of calculation results, writing the article.

Funding

The study was funded by JSC Research Center of Construction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 04.06.2025

Revised 12.07.2025

Accepted 17.07.2025

Введение

Экспериментальные исследования двухосно и трехосно напряженного состояния железобетона применительно к станинам прессов и клетям прокатных станов проводились в НИИЖБ с 1957 по 1996 г. под научным руководством д-р техн. наук, проф. И.Г. Людовского.

Рассматривались разные формы станин: цилиндрические, эллиптические и квадратные в плане. Так, для кузнечно-прессового оборудования целесообразным оказалось использовать трехосно преднапряженные железобетонные цилиндрические формы, обеспечивающие станине все необходимые прочностные и деформативные свойства при эксплуатации (рис. 1). Раму станины целесообразно разделять на отдельные элементы – стенки и ригели, а в дальнейшем соединять между собой вертикальными стержнями или проволокой с натяжением на бетон после набора бетоном необходимой прочности.

При действии эксплуатационной нагрузки стенки станин работают на растяжение с некоторым эксцентриситетом. Верхний ригель воспринимает эксплуатационную нагрузку через пирамиду штампов, распределяющих ее до величины, безопасной для железобетона. Усилия натяжения арматуры действуют на бетон постоянно, увеличиваясь в момент работы пресса до максимального значения.

В цилиндрических станинах ригели выполняют в виде круглых железобетонных плит большой толщины, армированных в направлении, перпендикулярном действию усилия пресса. Напрягаемой арматурой обжимают плиту снаружи, что позволяет обеспечить

малые габариты деталей и снижение веса конструкции. Подобные решения применяют также для сильно нагруженных деталей машин, таких как головки растяжных машин, подвижные траверсы, плиты и др., где элементы машин работают как толстые железобетонные плиты, опертые по контуру или по части контура и нагруженные центральной или эксцентрично приложенной многократно повторяющейся нагрузкой.

В ходе экспериментальных исследований определяли влияние основных факторов на несущую способность ригелей на образцах, представляющих собой толстые плиты цилиндрической формы. Напряженное состояние этих плит при изменении основных параметров, влияющих на конструкцию ригеля, изучалось на образцах размером в 2–3 раза меньше натурных размеров ригелей прессов. Всего было испытано до разрушения около 100 образцов.

В поисках рациональных параметров конструкции ригелей методика изготовления и исследования всех образцов была принята одинаковой. На боковую поверхность образцов навивали с натяжением стальную проволоку диаметром 4–5 мм (ГОСТ 7348-55 [1]) в 1–3 слоя, создавая предварительное напряжение сжатия в бетоне. Натяжение арматуры производили через 15–28 дней после изготовления с использованием намоточной машины ДН-5.

Образцы испытывали в прессе усилием 10 000 кН и на горизонтальной машине 15 000/30 000 кН, опирая их на жесткое металлическое кольцо с наружным диаметром, равным диаметру образца. Конструкция образцов и схема нагружения были приняты наиболее простыми и ясными.

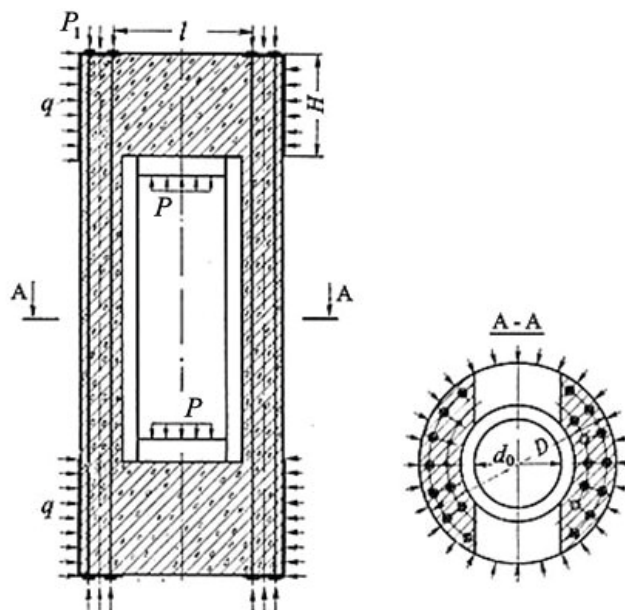


Рис. 1. Схема нагрузок на цилиндрическую станину пресса: P – рабочее усилие; P_1 – давление продольной рабочей арматуры; q – давление поперечной напряженной обоймы

Fig. 1. Diagram of the loads on the cylindrical bed of the press: P is the working pressure; P_1 is the pressure of the longitudinal working reinforcement; q is the pressure of the transverse stressed cage

Для определения напряженного состояния образцов использовали наружные и глубинные тензодатчики, которыми измеряли деформации бетона в аксиальном, радиальном и тангенциальном направлениях. Кроме того, контролировали усилия натяжения арматуры на бетон.

Влияние бокового обжатия цилиндров в зависимости от прочности бетона

Исследования проводили на двух сериях цилиндрических образцов, которые различались размерами. В образцах каждой серии создавали разные величины бокового обжатия. В серии КПО было испытано 27 образцов цилиндрической формы диаметром 50 см, высотой 40 см, установленных на кольцо с внутренним диаметром 30 см, диаметр штампа

составлял 22,5 см. Прочность бетона на момент испытания была 53,5–60,0 МПа (табл. 1, рис. 2).

Для преднапряжения бетона на боковую поверхность в образцах использовали проволоку диаметром 4 мм с фактическим пределом прочности при растяжении 1700 МПа. При натяжении учитывали потери напряжения в арматуре в размере 30,0 МПа. Кроме того, учитывали потери напряжения в арматуре от упругой деформации бетона под витками. По данным [2], эта величина составляла по $0,05P$ от каждого последующего слоя, где P – усилие натяжения проволоки. В серии КПО величины преднапряжения бетона составляли с учетом потерь напряжения 2,5; 5,0; 8,0; 12,0; 17,0 и 25,0 МПа, а объемный коэффициент армирования – 0,025, 0,050 и 0,075.

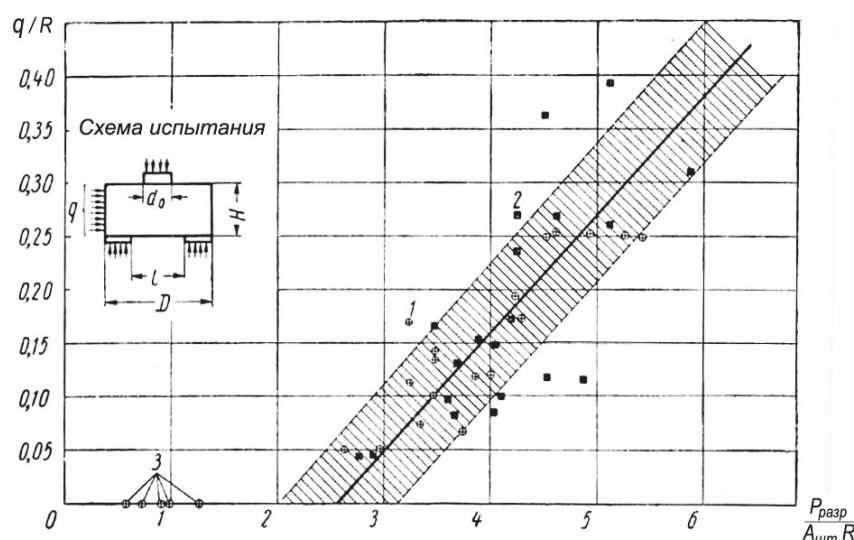


Рис. 2. Разрушающая нагрузка образцов [2] от величины предварительного обжатия: 1 – серии ВП; 2 – серии КПО; 3 – серии ВП без обжимы

Fig. 2. Destructive load of samples [2] from the value of pre-compression: 1 – VP series; 2 – KPO series; 3 – VP series without cage

Таблица 1

Испытания образцов серии КПО [2]

Table 1

Testing of KPO series samples [2]

Шифр образца	Прочность бетона при испытании, МПа	Основные размеры, см			Предварительное напряжение			Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольцо при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Высота, H	Высота обжимы, h	Усилие в проволоке, кН	Число слоев обжимы	Величина обжатия, МПа			
КПО-1	53,5	51,0	40,7	38,0	3	1	2,57	6,70	167,5	53,3
КПО-2	66	51,0	41,0	36,0			2,57	7,99	200,0	63,6
КПО-3	63	51,2	41,0	36,0			2,55	7,59	190,0	60,5

Продолжение таблицы 1

Шифр образца	Прочность бетона при испытании, МПа	Основные размеры, см			Предварительное напряжение			Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольце при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Высота, H	Высота обоймы, h	Усилие в проволоке, кН	Число слоев обоймы	Величина обжатия, МПа			
КПО-4	63	52,0	39,8	37,8	6	1	5,60	7,95	197,5	63,4
КПО-5			42,0	39,5				9,40	235,0	74,8
КПО-6			39,8	37,0				6,75	169,0	53,8
КПО-7	53,5	51,2	40,1	36,1	9	1	8,40	9,00	225,0	71,6
КПО-8	62,7	50,6	40,5	38,0			8,50	10,00	250,0	79,5
КПО-9	62,7	50,9	39,2	37,1			8,45	10,00	250,0	79,5
КПО-10	53,5	51,1	40,8	37,5	2,9	2	5,15	8,40	210,0	66,9
КПО-11	63	52,0	40,0	37,0	3		5,30	10,05	250,0	79,6
КПО-12	63	51,5	41,0	36,5	3		5,35	11,00	275,0	87,6
КПО-13	53,5	51,2	41,0	37,0	3	3	8,00	9,35	234,0	74,5
КПО-14	66	52,5	40,5	36,0			7,80	13,99	350,0	111,5
КПО-15	66	51,5	40,5	37,5			7,90	12,97	325,0	103,2
КПО-16	53,5	51,0	40,7	38,1	6,8	2	12,70	9,90	247,0	78,8
КПО-17	63	51,0	40,0	38,0	6		11,00	11,40	285,0	90,3
КПО-18	66	51,5	40,0	36,0	6		11,00	10,05	250,0	79,6
КПО-19	53,5	50,7	41,0	38,3	6	3	–	9,00	225,0	71,6
КПО-20	63	51,0	40,0	38,0	6	3	16,50	13,91	348,0	110,9
КПО-22	53,5	51,0	40,5	37,0	9	3	16,50	13,67	342,0	108,8
КПО-21	63	51,0	40,0	38,0	6	2	16,80	14,07	352,0	112,0
КПО-23	62,7	51,5	40,5	37,5	9	2	16,80	11,58	290,0	92,2
КПО-24	62,7	51,0	40,0	38,5	9	2	16,80	12,58	315,0	100,0
КПО-25	53,5	51,5	41,0	37,0	9	3	2,55	13,86	347,0	110,2
КПО-26	62,7	51,0	40,0	36,0				13,91	348,0	111,0
КПО-27	66	51,0	41,0	38,5				13,00	326,0	103,5

В серии ВП было изготовлено 32 образца диаметром 120 см. В отличие от образцов серии КПО во время испытания на верхней поверхности образцов имелось еще бетонное кольцо высотой 8 см и шириной 30 см. Таким образом, рабочая высота цилиндров составляла 67 см. Образцы были изготовлены из тяжелых бетонов марок 100 (В7,5), 300 (В22,5), 400 (В30) и 500 (В37,5). Образцы одной марки бетона отличались только величиной предварительного обжатия. Результаты испытаний сравнивали по величине с разрушающей нагрузкой образцов без арматуры.

Преднапряжение бетона в образцах серии ВП создавали гладкой проволокой диаметром 4,0 и 4,5 мм прочностью 1250–1400 МПа, навитой на боковую поверхность в два слоя, не доводя на-

вивку до торцов образца. Предварительное напряжение бетона с учетом потерь составляло 2,2; 5,6; 7,4 и 9,5 МПа. Все образцы этой серии, кроме образцов группы Д, испытывались штампом диаметром 400 мм. Опорное кольцо имело внутренний диаметр 600 мм, образцы группы Д испытывали на сегментных опорах. Во всех образцах группы Д данной серии в бетоне создавалось одинаковое преднапряжение – 5,6 МПа, а переменным являлась прочность бетона в образцах от 10 до 50 МПа (табл. 2, рис. 3).

В бетонных образцах без обоймы наблюдалось пропорциональное увеличение несущей способности лишь при низкой прочности бетона – до 20 МПа. При увеличении прочности бетона образцов происходило отставание несущей способности. При

наличии обоймы прочность трехосно обжатого бетона в цилиндрах возросла в 3,9–5,2 раза по сравнению с необжатыми. Однако в преднапряженных образцах при повышении прочности бетона прирост несущей способности заметно опережал прирост

деформативности и трещиностойкости, что объяснено непропорциональностью роста прочности бетона и роста начального модуля деформаций, а также незначительным изменением сопротивляемости бетона растяжению.

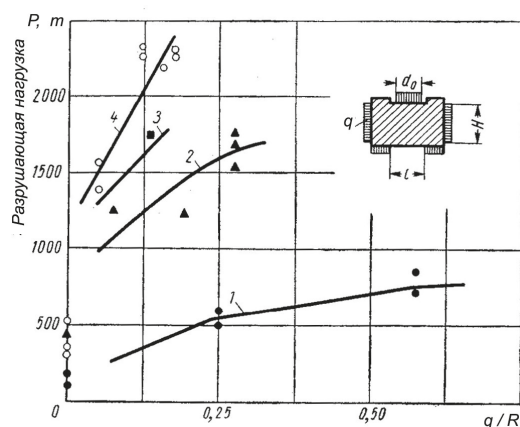


Рис. 3. Разрушающая нагрузка образцов серии ВП [2] от величины предварительного обжатия при бетоне марки: 1 – «100», 2 – «300», 3 – «400», 4 – «500»

Fig. 3. Destructive load of VP series samples [2] on the value of pre-compression in concrete grade: 1 – “100”, 2 – “300”, 3 – “400”, 4 – “500”

Таблица 2

Испытания образцов серии ВП [2]

Table 2

Testing of VP series samples [2]

Шифр образца	Прочность бетона, R , при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см			Диаметр проволоки в обойме, $D_{пр}$, мм	Предварительное напряжение		Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольцо при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Полная высота образца	Расчетная высота, H		Усилие в про-волоке, кН	Величина об-жатия, q , МПа			
А. Влияние прочности бетона										
ВП-16	49	122,5	75,5	68,5	4	7,2	5,6	20	159,5	21,1
ВП-1	46,5	120	75	68	5	9	5,6	22,72	181	29
ВП-2	46,5	120	76	68	5	9	5,6	23,56	187,5	30
ВП-12	40	123	76	70,8	4	7,2	5,7	17,6	140,1	18,5
ВП-13	40	123	81	75	4	7,2	5,5	17,6	140,1	18,5
ВП-5	28,9	120	76	68	5	9	5,6	15,4	123	19,6
ВП-30	10	121,1	76	69,5	4	7,2	5,7	8,61	69	11
ВП-31	10	120	76	69	4	7,2	5,7	7,31	58,3	93,2
ВП-32	10	121,4	75,7	69,7	4	7,2	5,7	7,63	60,7	97,5
Б. Влияние предварительного напряжения для бетона марки «500»										
ВП-11	56	120	76	69	4	11,8	9,5	22,73	1810	23,9
ВП-10	50	120,8	76,3	68,8	4	9	7,6	20*	–	–
ВП-3	42,5	120	77	73	4,5	9	7,4	23	1830	29,4
ВП-14	42,5	122	76	70,5	4	3	2,2	15,72	1250	20
ВП-15	42,5	120,5	77,5	71,2	4	3	2,2	14	1115	18
ВП-23	46,5	120	75	68	–	–	–	5,2	414	6,6
ВП-24	46,5	120	76	68	–	–	–	3,12	249	4
ВП-25	51	120	75	68	–	–	–	4,38	350	5,6

Продолжение таблицы 2

Шифр образца	Прочность бетона, R , при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см			Диаметр проволоки в обойме, $D_{пр}$, мм	Предварительное напряжение		Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольцо при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Полная высота образца	Расчетная высота, H		Усилие в про-волоке, кН	Величина обжатия, q , МПа			
В. Влияние предварительного напряжения для бетона марки «300»										
ВП-4	28,9	120	75	68	4,5	9	7,4	17,74	1412	22,6
ВП-6	29	120	76	70	4,5	9	7,4	16,93	1350	21,5
ВП-7	29	120	77	70	4,5	9	7,4	15,4	1230	19,6
ВП-17	29,5	120	77	70,5	4	3	2,2	12,5	996	16
ВП-18	34	123	77	71	4	3	2,2	16	1275	20,4
ВП-26	28,9	120	75	69,5	—	—	—	4,5	358	5,7
ВП-27	29,5	120	75	67,5	—	—	—	3,5	279	4,5
Г. Влияние предварительного напряжения для бетона марки «100»										
ВП-21	8,75	120,3	75,4	68,9	4	3	2,2	5,97	476	7,6
ВП-22	8,75	118,4	76	68,9	4	3	2,2	5	398	6,4
ВП-28	8,7	120	77	65	—	—	—	1,069	85	1,4
ВП-29	10	121,5	77	—	—	—	—	1,7	135	2,17
Д. Влияние способа опирания										
ВП-10	50	120,8	76,3	68,8	4	9	7,6	20	1395	36,3
ВП-19	40	121	76	70	4	11,8	9,4	18	1431	32,8
ВП-20	36	111,5	75,8	69,6	4	11,8	9,3	16	1274	29,1
ВП-8	10	121,7	77,3	68	—	—	—	1,9	151	2,42
ВП-9	10	121,5	77	68	—	—	—	1,58	126	2
* — образец не доведен до разрушения										

Влияние величины предварительного обжатия q повышается с ростом кубиковой прочности бетона R . Но с увеличением прочности бетона отношение предельного давления под штампом к призменной прочности бетона уменьшается. Заметное снижение деформативности от интенсивности обжатия наблюдается на более поздних стадиях нагружения. Увеличение степени бокового обжатия бетона более всего повышает трещиностойкость в тангенциальном направлении, что наблюдается даже при небольших величинах бокового обжатия — до $0,25R$.

В образцах, в которых боковое давление составляет $0,3–0,5R$, радиальные трещины появляются при нагрузках, близких к разрушающим. Сопротивление бетона срезу повышалось с ростом осевого сжатия до величины, равной $0,5$ фактической прочности бетона.

При предварительном обжатии бетона напряжением q менее $0,2$ прочности бетона разрушающая нагрузка повышается в линейной зависимости от величины обжатия. Если выше этого, то эффективность обжатия начинает снижаться. Установлена эффективность величины обжатия до $0,27$ от прочности бетона.

Для бетона прочностью 10 МПа эффективным является обжатие до значения $0,2R$, при этом разрушающая нагрузка повышалась пропорционально величине обжатия. Для бетона прочностью R выше 10 МПа разрушающая нагрузка $P_{разр}$ увеличивается при повышении q до $0,15R$. Для бетонов более высокой прочности коэффициент пропорциональности снижается, поэтому величина обжатия сверх указанных пределов может считаться нецелесообразной.

По результатам испытания этих серий получено, что независимо от диаметра цилиндров критическими величинами обжатия бетона прочностью выше $40–50$ МПа является q , равная $0,1–0,2$ от прочности бетона. Для бетонов меньшей прочности допустимо принимать q , равной $0,2–0,3$ от прочности бетона.

Влияние высоты образца, диаметра штампа и опорного кольца

При исследовании влияния отношения высоты к диаметру цилиндра и отношения диаметра штампа к рабочему пролету испытания проводили на образцах диаметром 50 см, высотой $10, 20, 30$ и 40 см. Образцы изготавливали из бетона фактической проч-

ностью 49,5–70,9 МПа с навивкой высокопрочной проволоки диаметром 4 мм фактической прочностью от 1740 до 2070 МПа. Натяжение арматуры проводили машиной ДН-5. В проволоке создавалось напряжение 600–630 МПа, при этом в бетоне возникало напряжение 6 МПа (с учетом потерь). Процент армирования составлял 2,5 %. Испытание образцов производили на жестком металлическом кольце с внутренним диаметром 300 мм, принятым за рабочий пролет при нагружении. Отношения высоты образцов к пролету изменялось и составляло 0,33; 0,67; 1,00 и 1,33. Образцы одинаковой высоты испытывали тремя видами жестких штампов, имеющих диаметр 100, 225 и 317 мм, с отношением диаметра штампа к пролету 0,37; 0,75 и 1,05 соответственно. Усилие пресса распределялось по всей поверхности штампа, что исключало изгибающий момент. Несколько образцов высотой 100 мм испытывали штампами диаметром 225 и 317 мм с опиранием их на кольцо с внутренним диаметром 200 мм, моделируя практические случаи, в которых диаметр штампа больше рабочего пролета. Для каждого типа плит испытаны контрольные образцы с исключением трения покрытием парафином опорной поверхности кольца и плоскости штампа.

Все образцы разрушались по бетону. Внешними признаками потери несущей способности явились кольцевые и радиальные трещины на опорной и нагружаемой поверхностях, раздробление бетона вокруг штампа и смятие его под штампом, перемещение средней части относительно наружного кольцевого слоя. Величина разрушающей нагрузки

$P_{\text{разр}}$ увеличивалась примерно пропорционально изменению высоты образца, и коэффициент пропорциональности зависел от диаметра штампа. При увеличении отношения штампа к рабочему пролету несущая способность образца также увеличивалась. Так, трехкратное увеличение отношения диаметра штампа к пролету привело к повышению $P_{\text{разр}}$ в образцах высотой 100 мм в 5 раз, а для образцов высотой 200 и 400 мм – в 2 раза.

Цилиндры, нагруженные штампом диаметром больше внутреннего диаметра опорного кольца, разрушались в результате раздавливания бетона при сжатии. В этом случае $P_{\text{разр}}$ возросла примерно в 3 раза по сравнению со случаем, когда диаметр штампа и рабочий пролет были равны между собой.

При устранении сил трения на опорной поверхности образцы в большинстве случаев разрушались при несколько меньшей нагрузке (табл. 3, рис. 4).

Характер деформирования образцов в обойме при нагружении

С ранних этапов нагружения на верхней поверхности образца, по свидетельству расчетных данных, образуются горизонтальные сжимающие напряжения, а на нижней поверхности – растягивающие напряжения, что характерно для изгибающего элемента. По данным испытаний и расчетов деформации под штампом, уже на ранних этапах нагружения носят неупругий характер. Однако местное смятие до определенного момента не влияло на общую упругую деформацию массивного цилиндра.

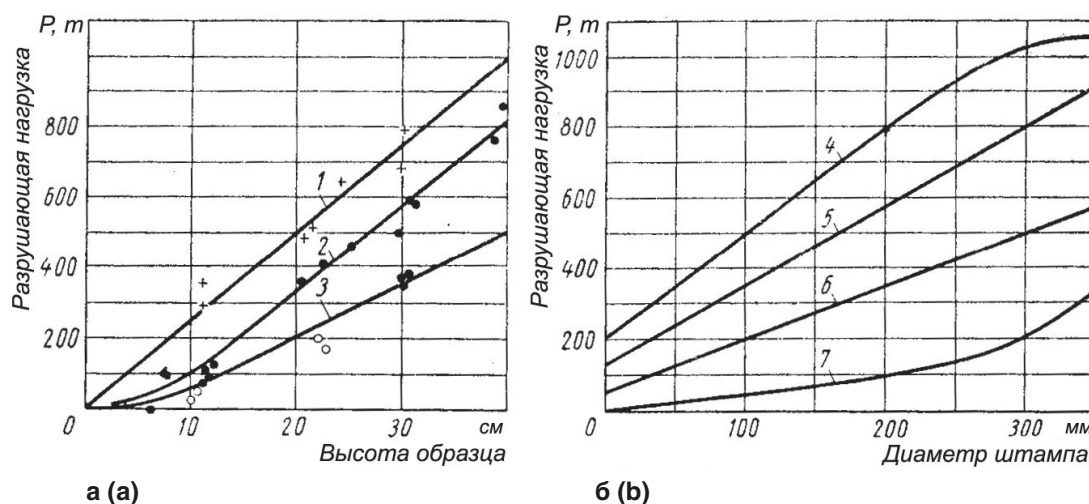


Рис. 4. Разрушающая нагрузка образцов серии КРБ [2] в зависимости от: а – высоты образца; б – диаметра штампа.

1 – $d = 317$ мм, $d/l = 1,05$; 2 – $d = 225$ мм, $d/l = 0,75$; 3 – $d = 110$ мм, $d/l = 0,37$;
4 – $H = 40$ см; 5 – $H = 30$ см; 6 – $H = 20$ см; 7 – $H = 10$ см

Fig. 4. Destructive load of samples of the KRB series [2] depending on: a – the height of the sample; b – the diameter of the stamp.

1 – $d = 317$ мм, $d/l = 1,05$; 2 – $d = 225$ мм, $d/l = 0,75$; 3 – $d = 110$ мм, $d/l = 0,37$;
4 – $H = 40$ см; 5 – $H = 30$ см; 6 – $H = 20$ см; 7 – $H = 10$ см

Таблица 3

Испытания образцов серии КПБ [2]

Table 3

Testing of samples of the KPB series [2]

Пролет, l , см	Шифр образца	Прочность бетона при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см		Условия на опоре	Размеры штампа			Разрушающая нагрузка, $R_{разр}$, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление в кольце при разрушении, МПа
			Диаметр, D	Высота, H		Диаметр, d_0 , мм	Площадь, $см^2$	Высота, h_0 , мм			
30	КПБ-1	53,0	52,0	39,8	Кольцо	225	400	52	7,95	197,5	63,4
	КПБ-2		52,0	42,0		225	400	52	9,40	235,0	74,8
	КПБ-3		52,0	39,8	Кольцо с парафином	225	400	52	6,75	169,0	53,8
	КПБ-4		52,5	40,8		225	400	52	6,75	169,0	53,8
	КПБ-5		51,3	40,0	Кольцо	110	95	78	5,06	534,0	40,4
	КПБ-6		51,5	40,0		110	95	78	4,20	443,0	33,5
	КПБ-7		52,5	40,9	Кольцо с парафином	110	95	78	4,50	475,0	35,9
	КПБ-8		52,3	41,1		110	95	78	4,48	473,0	35,7
	КПБ-9	49,5	51,2	29,8	Кольцо	225	400	52	5,00	125,0	39,8
	КПБ-10		51,0	31,0		225	400	52	5,69	147,0	46,9
	КПБ-11		51,0	31,0	Кольцо с парафином	225	400	52	5,90	147,0	47,0
	КПБ-12		51,0	30,0	Кольцо	317	792	55	7,75	98,0	61,6
	КПБ-13		52,5	30,0		317	792	55	6,82	86,2	54,3
	КПБ-14		52,5	30,5		110	95	78	3,80	400,0	30,3
	КПБ-15		52,5	30,0		110	95	78	3,70	390,0	29,5
	КПБ-16		52,5	31,0		110	95	78	3,69	389,0	29,4
	КПБ-17	51,8	51,0	20,5	Кольцо	225	400	55	3,57	89,3	28,4
	КПБ-18		52,0	22,0		225	400	55	4,12	106,0	32,8
	КПБ-19		52,0	21,6	Кольцо с парафином	225	400	55	3,21	80,3	25,6
	КПБ-20		52,0	22,4	Кольцо	110	95	78	1,75	184,3	13,9
	КПБ-21		52,0	22,0		110	95	78	1,96	206,0	15,3
	КПБ-22		52,0	21,5		317	792	55	5,20	65,7	41,4
	КПБ-23		50,0	22,8		317	792	55	6,32	79,8	50,4
	КПБ-24		50,0	20,6	Кольцо с парафином	317	792	55	4,75	60,0	37,8
	КПБ-25	70,9	52,0	11,5	Кольцо	225	400	55	1,19	29,8	9,5
	КПБ-26		51,2	11,0		225	400	55	0,90	22,5	7,2
	КПБ-27		52,0	11,0	Кольцо с парафином	225	400	55	1,05	26,3	8,4
	КПБ-28		52,0	10,8	Кольцо	110	95	78	0,53	55,8	4,2
	КПБ-29		52,0	10,5		110	95	78	0,50	52,7	4,0
	КПБ-30		51,3	10,0		110	95	78	0,36	37,4	2,8
	КПБ-31		52,0	11,0		317	792	55	3,49	44,2	27,8
	КПБ-32		52,0	11,5		317	792	55	2,88	36,4	22,9

Продолжение таблицы 3

Пролет, l , см	Шифр образца	Прочность бетона при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см		Условия на опоре	Размеры штампа			Разрушающая нагрузка, $P_{разр}$, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление в кольце при разрушении, МПа
			Диаметр, D	Высота, H		Диаметр, d_0 , мм	Площадь, $см^2$	Высота, h_0 , мм			
20	КПБ-33	54,0	50,0	10,5	Кольцо	225	400	55	3,00	75,0	18,2
	КПБ-34		51,0	10,0		225	400	55	2,80	70,0	17,0
	КПБ-35		51,5	11,5	Кольцо с парафином	225	400	55	2,35	58,8	14,3
	КПБ-36		51,0	11,2		225	400	55	2,10	52,5	12,7
	КПБ-37		51,0	11,0	Кольцо	317	792	55	9,00	113,8	54,5
	КПБ-38		51,0	9,8		317	792	55	7,84	99,0	47,5
	КПБ-39	60,0	51,0	10,4	Кольцо с парафином	317	792	55	5,32	67,3	32,2
	КПБ-40		51,5	11,2	Кольцо	110	95	78	0,70	73,7	4,3
	КПБ-41		51,5	11,5	Кольцо	110	95	78	0,75	79,0	4,6
	КПБ-42		51,5	11,0	Кольцо с парафином	110	95	78	0,60	63,1	3,6

При нагрузке, равной $0,14P_{разр}$ в образцах с прочностью бетона 10 МПа на нижней поверхности образца под штампом образовалась первая радиальная трещина. По средним значениям экспериментальных данных четырех образцов с бетоном прочностью 50–53 МПа такая же трещина образовалась при нагрузке $0,4P_{разр}$, что соответствовало границе упругой стадии. Тогда же за счет смятия бетона на верхней поверхности образца вокруг штампа появилась кольцевая трещина.

Далее местные деформации под штампом продолжали резко распространяться на глубину примерно одной трети высоты образца. Однако поперечное обжатие бетона существенно препятствовало развитию среза сердечника.

До границы упругой работы деформации бетона развиваются линейно. Сверх этого начинается небольшая потеря линейности деформаций в бетоне, появляются пластические деформации и первые микротрещины. Границей упругопластической стадии принята точка перехода к развитию значительных деформаций, ведущих к разрушению образца.

При переходе в упругопластическую стадию волосные трещины в нижней части образца начали постепенно множиться, особенно в зоне, близкой к оси образца. Внутри опорного кольца после появления радиальных трещин начинали развиваться кольцевые трещины. Но до границы упругопластической зоны они не оказывали практического влияния

на упругую работу образца в целом. В нижних рядах проволоки к моменту достижения упругопластической границы отмечено увеличение деформаций в 5–6 раз. При этом проволока продолжала работать по диаграмме, близкой к линейной, поскольку в ней отсутствовала площадка текучести.

В процессе нагружения в бетоне и обойме верхней части цилиндра развивалось два противоположных вида деформаций и напряжений: сжатие от изгибающего момента и растяжение от расклинивающего действия бетона под штампом. До тех пор пока в бетоне под штампом не развились значительные неупругие деформации, горизонтальные растягивающее усилие были невелики. В этот период преобладают условия сжатия от изгиба. При высоком уровне напряжения под штампом (более $4R_{bn}$) горизонтальные усилия растяжения превысили суммарные усилия от преднапряжения и изгиба. Это содействовало началу выдавливания сердцевин в верхней зоне и дополнительному растяжению обоймы.

Одновременно при дальнейшей нагрузке характер напряженно-деформированного состояния образца с трещинами менялся. Если до нагрузки $0,6P_{разр}$ радиальные трещины распространялись снизу на небольшую высоту цилиндра, то по мере увеличения нагрузки они быстро распространились по высоте и на последних этапах доходили до нагружаемой поверхности. По всей высоте цилиндра происходило увеличение объема образца.



Рис. 5. Трещины в образце при нагрузках $0,75P_{разр}$
Fig. 5. Cracks in the sample at loads of $0.75P_{destr}$



Рис. 6. Выдавленная сердцевина при разрушении образца
Fig. 6. The core extruded during the sample destruction

При нагрузках, составляющих $0,75P_{разр}$, деформации цилиндра имели выраженный неупругий характер. На границе упругопластической зоны возникли косые трещины, идущие от сердечника к внутреннему диаметру опорного кольца (рис. 5). Сверх границы упругопластической зоны деформации обоймы начали резко возрастать. На нижнем основании цилиндра в пролете появились множественные радиальные и кольцевые трещины, что с увеличением ширины их раскрытия привело образец к разрушению. Полное разрушение образцов сопровождалось выдавливанием сердцевин вниз. При обследовании этих сердцевин установлено, что верхняя треть имеет цилиндрическую форму диаметром, равным диаметру штампа, и поверхность бетона соответствует разрушению при срезе. Нижняя часть приобрела

конусообразный вид и имеет поверхность, соответствующую разрыву бетона (рис. 6).

Исследование работы образцов в обойме расчетным путем

Для оценки процессов, происходящих внутри тела образцов (деформаций, напряжений, раскрытия трещин), использован программный комплекс ATENA, реализующий метод твердотельного моделирования с триангуляцией на конечные элементы. В программном комплексе используются законы нелинейного деформирования и прочности материала – закон развития трещин и работы материала с трещинами Уильяма Ранкина и поверхности разрушения (критерий прочности) Менетрея – Виллама (Menetrey – Willam) [3].

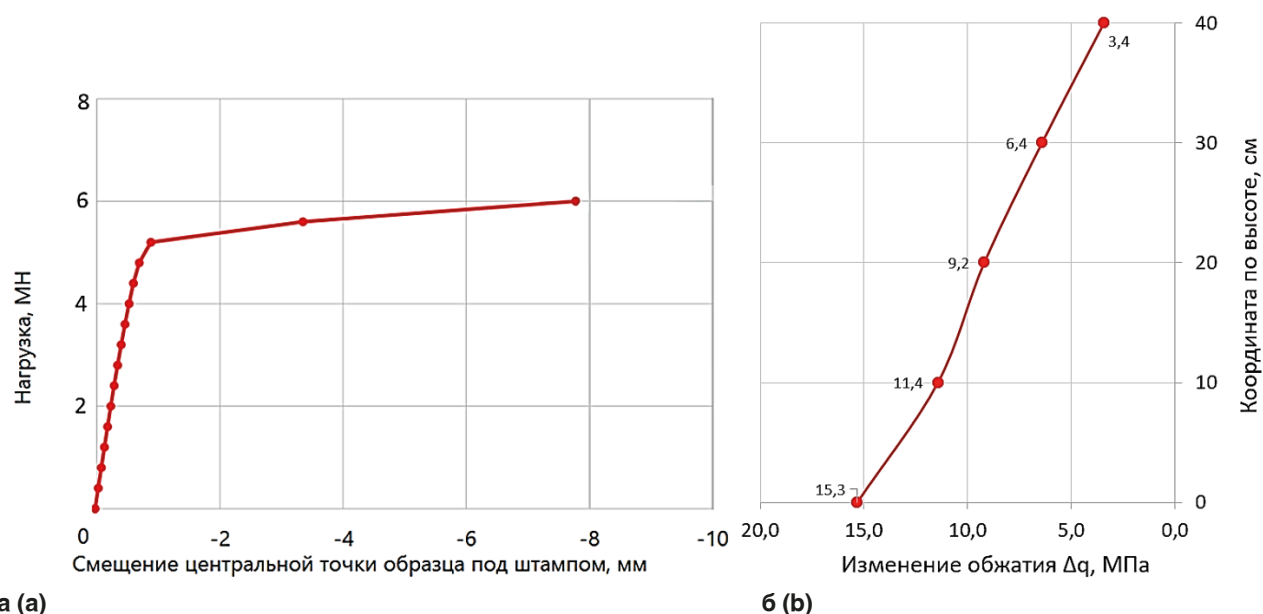


Рис. 7. Графики расчетных испытаний образца диаметром 50 см, высотой 40 см и пролетом 30 см без учета трения на опоре: а – перемещение точки образца под центром штампа; б – изменение обжатия бетона напрягаемой проволокой по высоте образца
Fig. 7. Graphs of design tests of a sample with a diameter of 50 cm, a height of 40 cm and a span of 30 cm without taking into account friction on the support: а – movement of the sample point under the center of the stamp; б – change in compression of concrete by a tensioned wire along the height of the sample

Таблица 4
Сопоставление экспериментальных и расчетных границ характера работы конструкций
Table 4
Comparison of experimental and calculated limits of the nature of the work of structures

Наименование	Характеристики	Нагрузка, кН				
		$P_{\text{разр.э}}$	$P_{\text{упр.э}} \approx 0,4P_{\text{разр.э}}$	$P_{\text{упр.расч}}$	$P_{\text{упр-пл.э}} \approx 0,6P_{\text{разр.э}}$	$P_{\text{упр-пл.расч}}$
КПБ-1,2	$D = 50$ см, $H = 40$ см, с трением	8700	3480	3900 (+12 %)	5220	6400 (+22 %)
КПБ-3,4	$D = 50$ см, $H = 40$ см, без трения	6750	2700	3200 (+19 %)	4050	5000 (+23 %)
ВП-10	$D = 120$ см, $H = 70$ см, без трения	20 000	8000	9500 (+19 %)	12 000	14 500 (+21 %)

Моделирование выполнено на $\frac{1}{4}$ части образца с учетом его симметрии. Рассмотрено 5 образцов с геометрическими параметрами и характеристиками используемых материалов, аналогичными исследованным при натурных испытаниях. Использовано два типоразмера образцов: диаметром 50 см, высотой 40 см, диаметром штампа 22,5 см и пролетом 30 см (и один образец с опиранием на сплошную пластину без пролета) с учетом и без учета трения на опоре при обжатии 6 МПа; диаметром 120 см, высотой 70 см, диаметром штампа 40 см и пролетом 30 см без учета трения на опоре при обжатии 7,6 и 15,2 МПа. Кубиковая прочность бетона в расчетной модели принята 50 МПа.

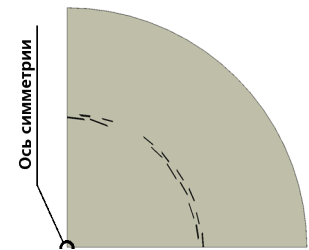
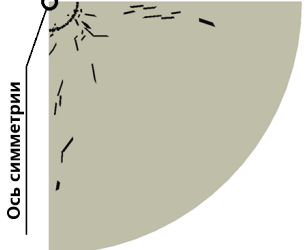
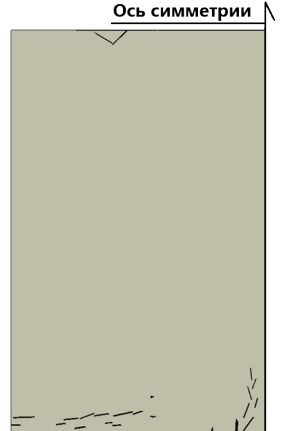
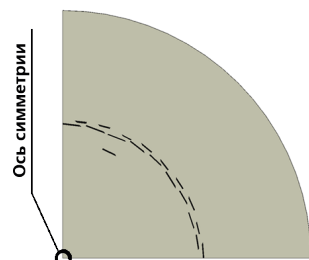
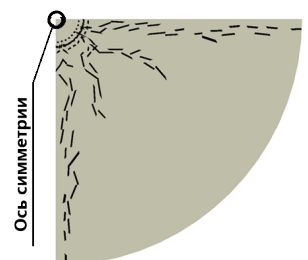
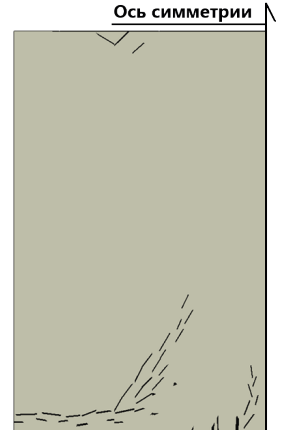
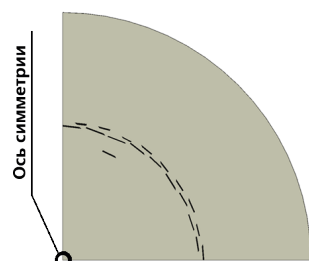
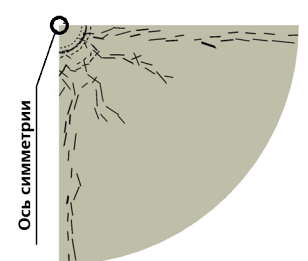
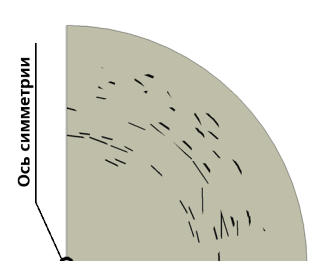
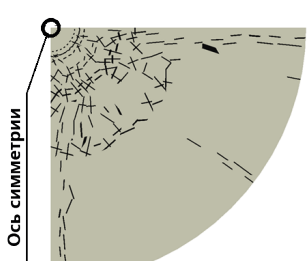
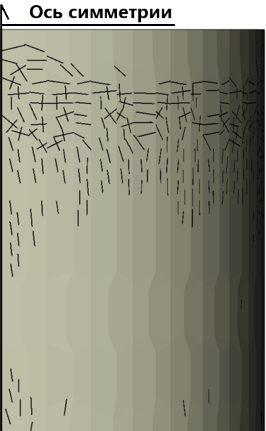
Для анализа деформаций в конструкции при этапном нагружении выбрана центральная точка образца на верхней его поверхности – под штампом (рис. 7а). На графиках хорошо видна граница упругой работы материала, составляющая около $0,70-0,75P_{\text{разр.э}}$. Также установлена картина изменения обжатия бетона напрягаемой арматурой по высоте образца (рис.7б). Аналогичные результаты были получены в работе [4]. Программный комплекс позволяет получить не только оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции, но и картину развития и ширину трещин внутри бетона. Из анализа НДС конструкции и характера развития трещин можно определить границу упругой и упругопластической работы материала (табл. 4).

Таблица 5

Этапы развития трещин по результатам расчетов

Table 5

Stages of cracks development based on calculation results

Нагрузка, кН	Иллюстрации			
	Радиальный разрез	Вид сверху	Вид снизу	Наружная поверхность
2800				
3200				
4000				
5200				

В ходе нагружения образца диаметром 50 см, высотой 40 см, с пролетом 30 см без учета трения на опоре можно выделить следующие этапы, характеризующиеся возникновением трещин (табл. 5):

$P = 2800$ кН – возникновение радиальных трещин на нижней поверхности образца и кольцевых трещин у краев штампа по верхней поверхности образца;

$P = 3200$ кН – проявление радиальных трещин на наружной поверхности образца снизу; **расчетная граница упругой зоны;**

$P = 4000$ кН – возникновение конусообразной трещины внизу образца;

$P = 5200$ кН – нарастание нелинейных деформаций; появление радиальных трещин на наружной поверхности в верхней и средней частях образца, а также радиальные трещины за пределами действия штампа; **расчетная граница упругопластической зоны.**

По иллюстрациям табл. 5 видно, что первыми трещинами в образцах являются радиальные на опорной поверхности образца и тангенциальные по контуру штампа при нагрузке около $0,4P_{разр,э}$ (рис. 8а). С ростом нагрузки при $0,6P_{разр,э}$ возникает почти вертикальная трещина, создающая в пролете образца усеченный конус (рис. 8б). Волосная трещина быстро развивается и приостанавливает свой рост примерно на середине образца по высоте. Ширина раскрытия трещин при этом незначительна – менее 0,1 мм.

После зоны упругопластической работы образца при нагрузке порядка $0,7-0,75P_{разр,э}$ раскрытие трещин начинает стремительно увеличиваться. При этом возникают радиальные и тангенциальные трещины в верхней части образца за пределами штампа, отсекающие верхнюю кромку образца. Радиальные трещины снизу и сверху образца соединяются, образуя сплошные радиальные трещины по всей

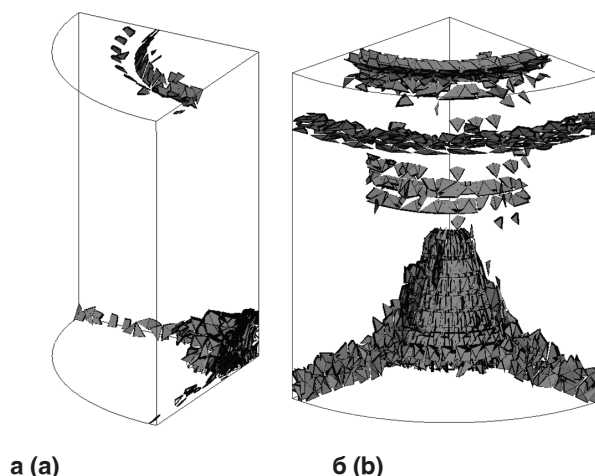


Рис. 8. Образование трещин в расчетной модели в толще образца при нагрузке: а – $0,4P_{разр,э}$; б – $0,6P_{разр,э}$
Fig. 8. Crack formation in the calculated model in the sample thickness under load: а – $0,4P_{разр,э}$; б – $0,6P_{разр,э}$

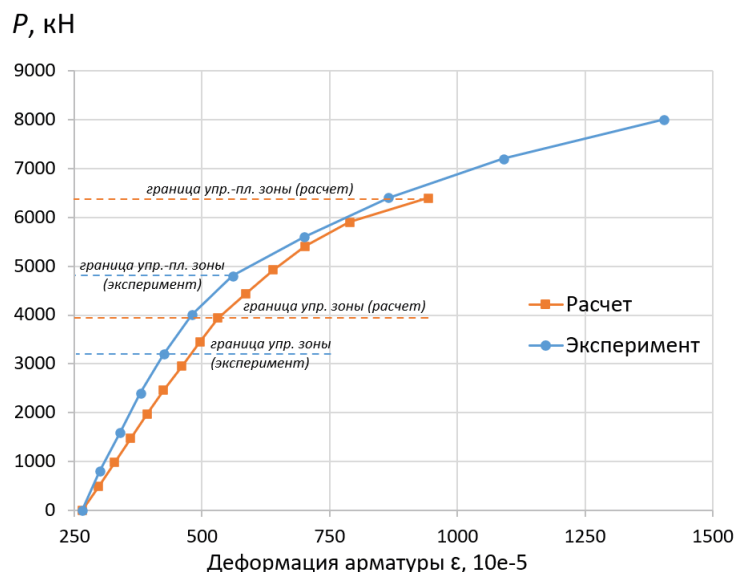


Рис. 9. Графики деформаций проволоки у опорной поверхности образца по результатам эксперимента и расчета
Fig. 9. Graphs of wire deformations at the sample support surface based on experimental and calculated results

высоте, ширина раскрытия которых снизу достигает 0,4 мм, на порядок превышая ширину раскрытия трещины вверху образца.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных деформации проволоки вблизи опоры для образца диаметром 50 см, высотой 40 см и пролетом 30 см без учета трения на опоре приведено на рис. 9. Графики деформации арматуры сопоставимы и имеют хорошую корреляцию вплоть до границы упругопластической зоны расчетной модели. Следует отметить, что в эксперименте относительная деформация арматуры при разрушающей нагрузке ($P_{\text{разр.э}} = 8000 \text{ кН}$) составляет $\approx 1400 \times 10^{-5}$, что намного больше нормируемой предельной деформации 850×10^{-5} использованной проволоки прочностью 1700 МПа. При расчетном моделировании предельная деформация проволоки достигается на верхней границе упругопластической зоны работы.

Сопоставительные графики деформаций напрягающей проволоки у опорной поверхности образцов диаметром 120 см при изменении числа слоев обоямы (увеличения величины обжатия с 7,6 до 15,2 МПа) приведены на рис. 10. Границы упругой и упругопластической зон работы образца не увеличились кратно увеличению величины обжатия, при этом характер и моменты возникновения трещин в образцах совпадают.

Выполнено также расчетное исследование влияния величины обжатия на величину нагрузки на границе упругопластической зоны. На рис. 11 представлен график изменения нагрузки на границе упругопластической зоны в зависимости от величины обжатия (в долях от кубиковой прочности бетона образ-

ца диаметром 50 см). Получена высокая сходимость результатов при малых значениях величины обжатия (менее $0,2q/R$), однако при повышении величины обжатия графики постепенно расходятся.

По средним значениям экспериментальных данных пяти образцов серии КПО граница упругой стадии соответствовала 0,4 от разрушающей нагрузки, а граница упруго-пластической деформации – 0,6 от разрушающей нагрузки, соответственно 320 и 480 т. Значения экспериментальных и расчетных усилий на этих границах были близки между собой (рис. 9).

Выносливость образцов в обойме при многократном повторном нагружении

Для испытания на выносливость [2] были использованы образцы диаметром 50,5 см. Обжатие бетона с учетом потерь составило 6 МПа. При испытании цилиндры устанавливали на опорное кольцо с внутренним диаметром 300 мм, металлическая плита, лежащая на бетоне, имела диаметр 225 мм и толщину 35 мм. Деформации в бетоне измеряли тензодатчиками на опорной поверхности образца и на обжимающей арматуре в трех уровнях по высоте. Перед началом пульсации образец нагружали статической нагрузкой усилием, равным заданному верхнему пределу многократно повторяющейся нагрузки. При этом деформации бетона и арматуры измеряли при статическом нагружении через каждые 200–250 тыс. циклов. Верхние пределы пульсации принимали равными 0,9; 0,8 и 0,7 от статической разрушающей нагрузки. Нижние пределы устанавливали в зависимости от технической возможности пульсатора, они

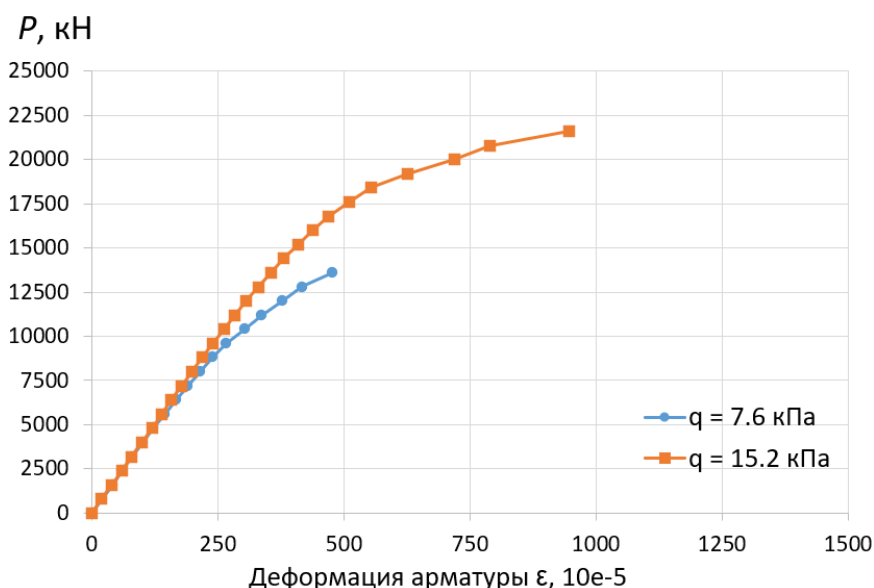


Рис. 10. Графики деформаций проволоки у опорной поверхности образцов диаметром 120 см с различной степенью обжатия q
 Fig. 10. Graphs of wire deformations at the support surface of samples with diameters of 120 cm with varying degrees of compression q

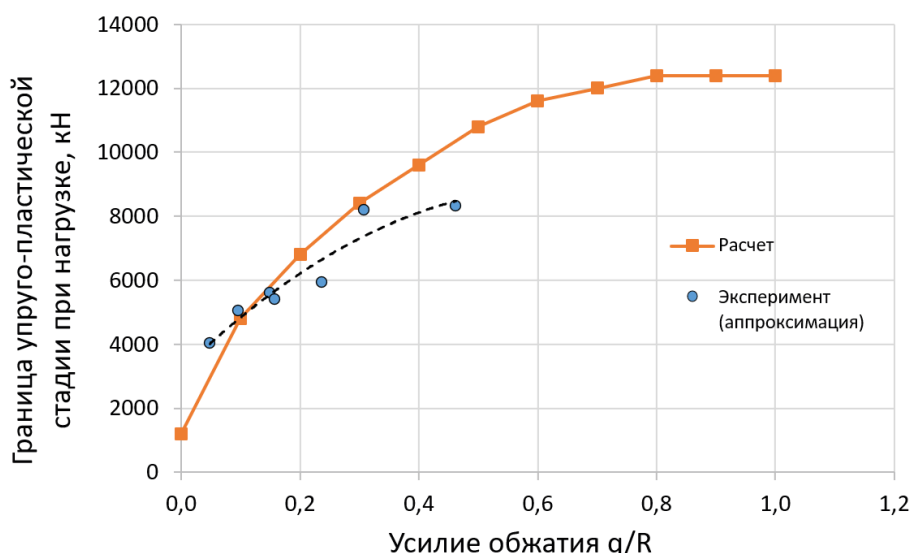


Рис. 11. График зависимости величины нагрузки, соответствующей границе упругопластической стадии, от усилия обжатия в долях от прочности бетона образца

Fig. 11. Graph of the dependence of the load value corresponding to the boundary of the elastoplastic stage on the compression force in fractions of the strength of the concrete sample

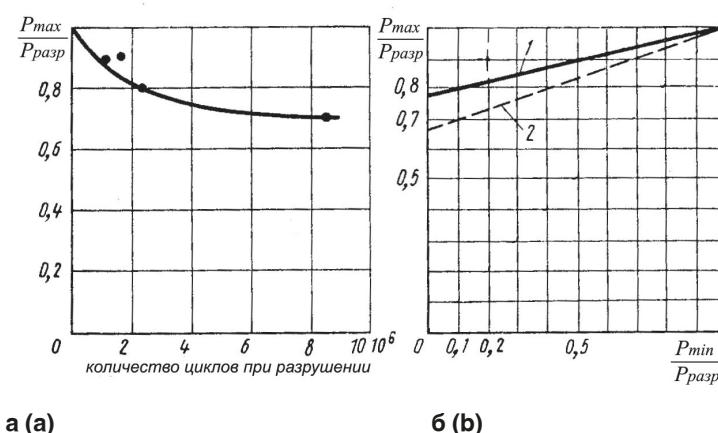


Рис. 12. Результаты испытания образцов при многократно повторяемом нагружении: а – зависимость предела выносливости плит от количества циклов при разрушении; б – пределы выносливости: 1 – круглой предварительно напряженной в двух направлениях плиты; 2 – бетонной призмы при одноосном сжатии

Fig. 12. Results of testing of samples under repeated loading: а – dependence of the endurance limit of plates on the number of cycles during fracture; б – endurance limits: 1 – round plate prestressed in two directions; 2 – concrete prism under uniaxial compression

составляли $0,1-0,2P_{\text{разр}}$. Коэффициенты асимметрии цикла соответственно составляли 0,222; 0,125 и 0,140 (серия КПМ). Задавая параметры испытания, учитывали данные испытаний, полученные Т.С. Каранфиловым (НИИЖБ) и Н.С. Карпухиным (МИИТ) [5–9], о том, что коэффициент асимметрии, равный 0,10–0,25, незначительно влияет на выносливость бетона, а главным является уровень верхней границы цикла пульсации в зависимости от разрушающей нагрузки при статическом нагружении.

На рис. 12 показаны результаты испытания образцов при коэффициенте асимметрии 0,125–0,222 в зависимости от уровня верхнего предела пульсации.

В пределах изменения его значения от 1,0 до 0,7 даже при незначительном уменьшении нагрузки резко возрастает возможность увеличения количества циклов. При отношении верхнего уровня пульсации к статической разрушающей, равном 0,7, кривая переходит в линию, почти параллельную оси абсцисс. При указанном коэффициенте асимметрии усталостные явления практически не проявлялись и при 8,5 млн циклов.

Из сопоставления с аналогичными испытаниями на призмах, проведенными без предварительного напряжения О.Я. Бергом [10, 11], двухосное предварительное напряжение бетона повышало предел выносливости примерно на 15 %. Разрушение образцов

наступало при появлении усталостных явлений в бетоне. Форма разрушения образцов была везде одинакова и мало зависела от изменения параметров. В проволоке на боковой поверхности образца возникало дополнительное напряжение, величина которого вблизи опорной поверхности составляла 0,5–1,0 от начальной величины обжатия. Эти испытания явились еще одним подтверждением упругой работы цилиндров в целом при наличии местных неупругих деформаций и трещин. Испытание на многократно повторную нагрузку при $\rho = (0,122–0,22)$ и отношении $P_{\max}/P_{\text{разр}} = 0,7$ показало, что деформации оставались упругими на всем протяжении испытания до 9,5 млн циклов при соотношениях $H/L > 0,4$ и $d_0/L > 0,4$ и предельной величине трещинообразования $0,6P_{\text{разр}}$, где L – рабочий пролет, d_0 – диаметр штампа.

Выводы

1. Использование в объемных железобетонных конструкциях (например, ригелей станин прессов) толстых цилиндрических плит, предварительно напряженных с боковой поверхности спирально натянутой проволокой, при вертикальной нагрузке позволяет многократно повысить прочность элементов по сравнению с плитами без преднапряжения.

2. По экспериментальным исследованиям на несущую способность круглых толстых плит в основном влияют высота плиты, прочность бетона, величина предварительного обжатия. Несущая способность плит находится в линейной зависимости от этих факторов.

3. Боковое обжатие плит интенсивностью более 0,2–0,3 от прочности бетона применять не рекомендуется.

4. Наибольшая прочность конструкции достигается при использовании соотношения диаметра плиты к диаметру штампа не более 2.

5. По результатам экспериментальных и расчетных исследований на диаграмме деформаций плиты с преднапряжением отмечены две границы, имеющие практическое значение. Первая – на уровне 0,4 от разрушающей нагрузки – граница упругой зоны работы бетона, когда деформации развиваются линейно, а в бетоне отсутствуют трещины. Вторая – на уровне 0,6 от разрушающей нагрузки – граница упругопластической зоны, когда в плите появляются волосные трещины, но они не отражаются на работе конструкции в целом. В эксплуатируемых конструкциях более высокие напряжения не допустимы.

6. По результатам выполненных экспериментальных исследований круглые толстые плиты в обойме обладают повышенной выносливостью. Однако этот вывод требует подтверждения в более обширных исследованиях конструкций на многократно повторяющуюся нагрузку.

7. Полученные результаты исследований и разработанная методика расчета железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях трехосно напряженного состояния, открывают возможность для эффективного использования преднапряженного железобетона в машиностроении и ряде других отраслей.

Список литературы

1. ГОСТ 7348-55. Проволока из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Технические условия. Москва: Госстандарт СССР, 1955.
2. Браиловский М.И., Астрова Т.И. Экспериментальное исследование элементов железобетонных станин цилиндрической формы для кузнечно-прессовых машин и другого оборудования. В: Применение железобетона в машиностроении. Москва: Издательство Машиностроение, 1964.
3. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague, 2021.
4. Людковский И.Г. Основы расчета и конструирования опытных железобетонных конструкций (несущие элементы машин, высоконапорные сосуды) [диссертация]. Москва, 1968.
5. Каранфилов Т.С. Выносливость и деформативность при воздействии многократно повторной нагрузки. В: Труды Гидропроекта. № 13. Москва: Энергия, 1966.
6. Каранфилов Т.С., Волков Ю.С. Работа железобетонных конструкций на многократно повторную нагрузку. В: Применение железобетона в машиностроении. Москва: Издательство Машиностроение, 1964.
7. Каранфилов Т.С. Волков Ю.С. Расчет сопротивления бетона на выносливость. ЦИНИС, реферативный сборник. 1970. № 1.
8. Карпухин Н.С. Исследование выносливости железобетонных балок при воздействии многократно приложенной нагрузки // Труды МИИТ. Вып. 152. Москва: Трансжелдориздат, 1962.
9. Карпухин Н.С. Исследование выносливости бетона под воздействием многократно приложенной растягивающей нагрузки // Труды МИИТ. Вып. 153. Москва: Трансжелдориздат, 1963.
10. Берг О.Я. О выносливости железобетонных конструкций // Труды ЦНИИС. Вып. 36. Москва: Трансжелдориздат, 1960.
11. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Москва: Госстройиздат, 1962. 96 с.

References

1. State Standard 7348-55. Carbon steel wire for reinforcement of prestressed concrete constructions. Specifications. Moscow: Gosstandart of the USSR, 1955. (In Russian).

2. Brailovsky M.I., Astrova T.I. Experimental study of elements of reinforced concrete cylindrical frames for forging and pressing machines and other equipment. In: Application of reinforced concrete in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. (In Russian).
3. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague, 2021.
4. Lyudkovsky I.G. Fundamentals of calculation and design of experimental reinforced concrete structures (load-bearing elements of machines, high-pressure vessels) [dissertation]. Moscow, 1968. (In Russian).
5. Karanfilov T.S. Endurance and deformability under the influence of repeated load. In: Proceedings of Hydroproject. No. 13. Moscow: Energy Publ., 1966. (In Russian).
6. Karanfilov T.S., Volkov Yu.S. Performance of reinforced concrete structures under repeated load. In: Application of reinforced concrete in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. (In Russian).
7. Karanfilov T.S., Volkov Yu.S. Calculation of concrete resistance for endurance. TsINIS, abstract collection. 1970, no. 1. (In Russian).
8. Karpushin N.S. Study of endurance of reinforced concrete beams under the influence of repeatedly applied load. *Proceedings of MIIT*. Issue 152. Moscow: Transzheldorizdat, 1962. (In Russian).
9. Karpushin N.S. Study of endurance of concrete under the influence of repeatedly applied tensile load. *Proceedings of MIIT*. Issue 153. Moscow: Transzheldorizdat, 1963. (In Russian).
10. Berg O.Ya. On the endurance of reinforced concrete structures. *Proceedings of TsNIIS*. Issue 36. Moscow: Transzheldorizdat, 1960. (In Russian).
11. Berg O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete. Moscow: Gosstroyizdat Publ., 1962, 96 p. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Гавриловна Овчинникова, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Irina G. Ovchinnikova, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Иван Александрович Черный, инженер, лаборатория тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; магистрант, НИУ МГСУ, Москва

Ivan A. Chernyi, Engineer, Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Master's degree student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

Борис Сергеевич Соколов✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: moo-shell@mail.ru

Boris S. Sokolov✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author