

На правах рукописи

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

БОРИС АНАТОЛЬЕВИЧ ЕВСЕЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКТИВНОГО
ШЛАКОПЕНОБЕТОНА С КАНАТНОЙ АРМАТУРОЙ ТИПА КЗх7(3)

(Специальность 05.23.01 - "Строительные конструкции")

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1973

ЧЕЛЯБИНСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена на кафедре железобетонных конструкций Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
А.А.ОАТУЛ.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
Д.В.МАКСИМОВ.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
М.С.ТОРЯНИК;
лауреат Ленинской премии, кандидат
технических наук, старший научный
сотрудник Б.Я.РИСКИНД.

Ведущая организация - ордена Ленина трест "Челяб-
металлургстрой".

Автореферат разослан " ____ " _____ 197__ г.

Защита диссертации состоится 6 июня 1973 года, в 15 час.,
в ауд. 244 на заседании Совета по присуждению ученых степеней
инженерно-строительного факультета Челябинского политехнического
института им. Ленинского комсомола (454044, г. Челябинск-44,
проспект им. В.И.Ленина, 76, главный корпус, тел. 39-39-64).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета
или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверен-
ных печатью.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

доцент, кандидат технических
наук

 (В.В.КАПРАНОВ)

Повышение эффективности сборного железобетона определяется в основном снижением его веса, что может быть достигнуто заменой обычного тяжелого бетона легким на пористых заполнителях. Это уменьшит вес зданий и сооружений на 20-30%, даст экономию стали на 7-15% и значительно снизит стоимость строительства.

Локальное распространение естественных пористых заполнителей в большинстве районов Советского Союза приводит к необходимости ориентироваться на производство искусственных пористых заполнителей. В районах с развитой черной металлургией доменные шлаковые расплавы, являющиеся отходами основного процесса, представляют собой практически неисчерпаемый источник для получения эффективного пористого легкого заполнителя - шлаковой пемзы. В ближайшие годы производство шлаковой пемзы в СССР предусмотрено увеличить до 6 млн. м³, что создаст необходимую основу для дальнейшего повышения объема внедрения конструктивных легких бетонов, изготовленных на ее основе.

Сочетание конструктивного шлакопемзобетона и высокопрочных многопрядных канатов является весьма перспективным средством создания эффективных железобетонных преднапряженных конструкций.

Однако предварительно напряженные конструкции из шлакопемзобетона армированные канатной арматурой не находят в настоящее время широкого применения в виду недостаточной их изученности и отсутствия нормативных рекомендаций по их проектированию.

Основной целью диссертационной работы явилось изучение условий совместной работы конструктивного шлакопемзобетона и трехпрядных канатов КЗх7 в предварительно напряженных элементах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения (выводы и рекомендации). Она изложена на 160 страницах машинописного текста и содержит 57 рисунков и 36 таблиц. В список литературы включены 165 наименований отечественных и зарубежных работ.

Работа была выполнена в 1968-1972 годах на кафедре железобетонных конструкций Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола и была включена в координационный план НИИЖБа Госстроя СССР.

В первой главе излагаются и анализируются основные результаты по применению в железобетонных конструкциях прядевой и канатной арматуры и формулируются цели диссертации.

Приведен обзор и анализ исследований самозаанкеривающихся канатов, применяемых в предварительно напряженных конструкциях из тяжелого бетона при натяжении арматуры на упоры.

Исследования К.В.Михайлова, Г.И.Бардичевского, Л.В.Руфа, И.С.Гаклина, Н.Н.Ковалева, А.А.Оатула, Ю.В.Максимова, Б.В.Соловьева, В.И.Миловидова, Г.И.Пирожкова, Ю.М.Рядько, А.И.Семенова, М.М.Холмянского и др. показали, что сцепление прядей и канатов с бетоном обеспечивается силами склеивания цементного теста, усадочным давлением бетона, зацеплением за раствор микронеровностей боковой поверхности проволок, трением от поперечных деформаций проволоки и каната при отпуске предварительного натяжения эффект Хойера и заклиниванием витков каната (пряди) при его подвижке, возникающей от внешней нагрузки.

Длина зоны передачи усилия зависит от прочности бетона при обжатии и интенсивности предварительного натяжения. При этом изменение шага свивки канатов (прядей) в известных пределах незначительно влияет на длину зоны передачи усилия.

Свивка прядей в канат увеличивает длину эпюры касательных напряжений сцепления на участке передачи усилия и уменьшает его длину, значительно повышает надежность сцепления при работе конструкции под внешней нагрузкой.

Созданные на основе экспериментальных данных эмпирические формулы для определения длины зоны передачи усилия с каната (пряди) на бетон носят в ряде случаев узко-конкретный характер, хотя и дают удовлетворительную сходимость опыта и расчета.

Бетон и канат на участке активного сцепления образуют сложную статически неопределимую систему, отдельные участки которой находятся в разных стадиях напряженного состояния. Имеющиеся в настоящее время предложения по оценке напряженно-деформированного состояния зоны активного сцепления бетона и витой арматуры дают возможность выяснить лишь качественную сторону явления, однако конкретного расчетного аппарата не дают.

Принятые в настоящее время рекомендации и расчетные характеристики сцепления витой арматуры правильно отражают особенности ее взаимодействия с бетоном, но в отдельных случаях дают завышенные запасы прочности и трещиностойкости опорных участков.

Расчет и проектирование предварительно напряженных железобетонных элементов, армированных двух- трехрядными канатами, работающих под действием кратковременных статических нагрузок, можно с достаточной для практики точностью выполнять по методике СНИП; однако в каждом конкретном случае требуется внесение частных дополнений.

Освещается накопленный опыт проектирования и применения керамзитобетонных, аглопоритобетонных конструкций с предварительным натяжением, а также конструкций на естественных пористых заполнителях.

Конструктивные бетоны на пористых заполнителях применяются в промышленном и гражданском строительстве, в дорожных покрытиях, в мостостроении, судостроении. Широкое внедрение керамзитобетона, аглопоритобетона, бетонов на естественных легких заполнителях связано с важнейшими исследованиями их свойств, проведенными И.Н.Ахвердовым, Г.А.Бужевичем, А.И.Вагановым, Л.С.Власовым, В.Г.Довжиком, И.Г.Ивановым-Дятловым, А.И.Поповым, М.Э.Симоновым, Н.Я.Спиваком и др.

Опыты Б.Б.Вейнера, Н.А.Корнева, А.А.Кудрявцева, В.Г.Коровкина, В.В.Михайлова, А.Н.Феофанова и др. опровергают существующее мнение о том, что сцепление арматуры с легкими бетонами хуже, чем с тяжелыми.

Их исследования убедительно доказывают надежность самозакрепления арматуры в конструктивном керамзитобетоне и аглопоритобетоне; при этом установлено, что за длину зоны передачи усилий с арматуры на бетон решающее влияние оказывает прочность его в момент обжатия. Кроме того, результаты опытов подтвердили предположение о том, что для равнопрочных бетонов длина зоны передачи усилия в легком бетоне меньше, чем в тяжелом.

В работах Л.С.Власова, Я.И.Дрозда, С.Г.Иониняна, А.П.Коровкина, Н.А.Корнева, А.А.Кудрявцева, Г.Б.Колоосова, В.А.Коварева,

В.З.Михайлова, М.З.Симонова особое внимание уделяется вопросам, касающимся деформативности предварительно напряженных изгибаемых элементов из бетонов на керамзите, аглопорите и пемзах естественного происхождения. Анализ их опытов показывает, что деформативные характеристики конструктивных легких бетонов и конструкций из них могут изменяться в широких пределах в зависимости от качества пористого заполнителя, его состава, технологии, марки бетона и т.п.

Это обстоятельство обуславливает различия в существующих предложениях по определению деформативности предварительно напряженных изгибаемых конструкций из конструктивных легких бетонов.

Что же касается шлакопемзобетона, то здесь указания практически отсутствуют.

Сцепление канатов КЗх7 со шлакопемзобетоном в настоящее время не изучено. В действующих СНиП отсутствуют рекомендации по определению длины зоны передачи усилий с канатов на шлакопемзобетон и предлагается ее определять на основании специальных опытов. Отдельные известные сведения о прочности, жесткости и трещиностойкости шлакопемзобетонных конструкций позволяют сделать вывод о недостаточной изученности совместной работы шлакопемзобетона с арматурой в преднапряженных элементах.

В связи с вышесказанным в диссертации были поставлены следующие задачи:

1. Изучить физико-механические свойства Челябинской шлаковой пемзы и бетонов на ее основе.

2. Исследовать сцепление канатов КЗх7(3) со шлакопемзобетоном и на этой основе:

а) определить минимально необходимую длину заделки каната КЗх7(3) в шлакопемзобетоне из условия равнопрочности с канатом.

б) определить длину зоны передачи предварительных напряжений о каната на шлакопемзобетон.

3. Исследовать совместную работу канатов со шлакопемзобетоном в изгибаемых элементах, проверив приемлемость расчетных положений СНиП П-В.1-62^к для шлакопемзобетонных преднапряженных конструкций, армированных канатами КЗх7(3) по прочности, деформативности и трещиностойкости и внести необходимые частные дополнения.

4. Проверить в производственных условиях возможность применения канатов в натурных предварительно напряженных шлакопемзобетонных конструкциях и выяснить их технико-экономические показатели.

Во второй главе приведены характеристики материалов и описаны технологические приемы, принятые при изготовлении образцов. Определены основные физико-механические свойства высокопрочного шлакопемзобетона: призмная прочность, начальный модуль упругости, прочность при растяжении. Эксперименты проводили на шлакопемзобетоне марок 200-400 разных составов, отличающихся по содержанию мелких и крупных фракций шлаковой пемзы и содержанию кварцевого песка.

Заполнителем служила фракционированная ш. ковая пемза с объемным весом 697-743 кг/м³ Челябинской бассейновой установки. В качестве мелкого заполнителя использовался пемзовый песок фракции 0+5 мм и кварцевый песок. В качестве вяжущего использовали цемент марки 500 Еманжелинского цементного завода.

Результаты проведенных опытов показали практическую возможность получения конструктивных бетонов марок 200-400 на Челябинской шлаковой пемзе при расходах цемента 500-600 кг на 1м³ бетонной смеси с объемным весом 1800-2100 кг/м³.

Призмная прочность $R_{пр}$ конструктивного шлакопемзобетона в среднем на 15-20% выше призмной прочности тяжелого бетона той же марки. Отношение призмной прочности шлакопемзобетона к прочности кубов лежит в пределах 0,78-0,83 и практически не зависит от марки бетона и вида мелкого заполнителя.

Модуль упругости при сжатии высокопрочного шлакопемзобетона E_0 на 17-30% ниже по сравнению с нормируемым для тяжелого бетона. Увеличение модуля упругости на 15% может быть достигнуто при замене пемзового песка кварцевым.

Предел прочности при растяжении шлакопемзобетона, имеющего в качестве мелкого заполнителя пемзовый и кварцевый песок выше нормируемого предела прочности на растяжение тяжелого бетона на 8-10%.

Исследования опытных образцов каната К3х7(3) в агрегатном состоянии показали, что деформация каната состоит из упругой и ос-

таточной частей. Остаточная деформация каната получается в результате конструктивного уплотнения его сечения и пластических деформаций стали. После двух-трех предварительных вытяжек механические свойства стабилизируются. Модуль упругости каната E_k колеблется в пределах 19000-19400 кг/м². Предел прочности колеблется в пределах 184,0 - 192,0 кг/мм². Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ составляет 82 + 92% от предела прочности.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия канатов КЗх7(3) с бетоном на спорных участках элементов, как при передаче усилия обжатия с арматуры на бетон, так и при загрузке внешней нагрузкой.

Методика экспериментальных работ по определению условий совместной работы канатов и шлакопемзобетона выбрана на основе анализа существующих методов исследований сцепления арматуры с бетоном. В главе дано описание опытных образцов, приведены результаты испытаний семи серий основных образцов, общим количеством 22 штуки, отличающихся прочностью бетона при обжатии и характером кооленного армирования.

Исследования проведены в сопоставлении с равнопрочным тяжелым бетоном.

Длину зоны передачи усилия $l_{пу}$ с канатов на шлакопемзобетон определяли на призмах (образцы типа ПН) и балках (образцы типа В).

Призмы имели размеры 120x120x3000 мм, разную прочность бетона при обжатии $R_b = 192-414$ кг/см² и были центрально армированы одним предварительно напряженным канатом. Величина контролируемого напряжения находилась в пределах $\sigma_0 = 11200-11700$ кг/см². Концы призм были снабжены четырьмя поперечными сварными сетками.

Балки имели размеры 120x390x3500 мм, разные проценты армирования и прочности бетона при обжатии $R_b = 295-420$ кг/см². Величина контролируемого напряжения назначалась в пределах $\sigma_0 = 7500 - 11800$ кг/см². Концы балок были снабжены кооленной арматурой, кроме того в пропорных зонах устанавливали поперечную арматуру (хомуты) в виде сварных каркасов.

Для определения $l_{пу}$ применяли 2 способа. По одному из них $l_{пу}$ оценивали по окончанию изменения деформаций бетона вдоль ка-

ната на поверхности образца. С этой целью на боковых гранях образца устанавливали цепочки тензометров.

По другому способу $\epsilon_{пу}$ определяли по окончании изменения деформаций каната. С этой целью на повивочные проволоки каната наклеивали тензодатчики с базой 20 мм.

Деформации бетона и каната, замеренные на концевых участках предварительно напряженных образцов всех серий, были подвергнуты статистической обработке методом наименьших квадратов. Изменения деформаций бетона и арматуры при равных прочностях бетона были аппроксимированы экспоненциальной кривой

$$y = A \cdot (1 - e^{-cx}) , \quad (1)$$

где y - относительная деформация бетона либо арматуры;
 x - абсцисса сечения, считая от торца (см);
 C - опытный коэффициент (1/см).

В качестве A принимали максимально зафиксированную величину деформаций бетона, а при обработке деформаций каната - стабилизировавшиеся его деформации в середине образца.

В диссертации приведены необходимые данные для назначения коэффициентов A и C в различных условиях.

На всех образцах замеряли вытягивание канатов g_0 , происходящее у торцов образца при отпуске натяжения. Во всех ответах отпуск натяжения производили плавно.

Исследования позволили сделать следующие выводы:

а) при нормальных задатных слоях определение длин зоны передачи усилия с каната на бетон можно производить как по деформациям бетона, замеряемым по поверхности образца, так и по деформациям самого каната. Оба способа дают практически одинаковые результаты,

б) при одинаковых напряжениях в канате в момент отпуска натяжения ($R_0 = 11200-11700 \text{ кг/см}^2$) длина зоны передачи усилия зависит от прочности бетона в момент обжатия: так, при $R_0 = 398-414 \text{ кг/см}^2$ длина $\epsilon_{пу}$ составляет 32 см (16 d_k); при $R_0 = 308-316 \text{ кг/см}^2$ $\epsilon_{пу} = 36$ см (18 d_k) при $R_0 = 192 \text{ кг/см}^2$ $\epsilon_{пу} = 52$ см (26 d_k).

В равнопрочном шлакопемзобетоне и тяжелом бетоне величины $l_{пу}$ практически совпадают.

Опытные значения $l_{пу}$ хорошо согласуются с формулой

$$l_{пу} = \frac{2,9958}{2,2 \cdot 10^{-7} E_{\delta} + 0,023} \quad , \text{ (в см)} \quad (2)$$

где E_{δ} - модуль упругости шлакопемзобетона при обжатии (в кг/см²).

Для практических рекомендаций величины $l_{пу}$, полученные при $\sigma_0 = 11200 - 11800$ кг/см² отнесены к прочности шлакопемзобетона R_0 , умноженной на коэффициент 0,85 (строка 3 в таблице I).

Таблица I

Длина зоны передачи усилия (в см), определенная по формуле (2) и результаты эксперимента

№ п/п	Условия применения	Кубиковая прочность бетона в момент его обжатия в кг/см ²				
		200	250	300	350	400
1.	Длина зоны передачи усилия по формуле (2)	50	42	37	36	34
2.	Опытные величины длины зоны передачи усилия	51	43	38	36	34
3.	Длина зоны передачи усилия по рекомендациям автора	58	49	46	43	41

в) для оценки напряженно-деформированного состояния концевых участков опытных образцов типа ПН были вычислены величины условных касательных напряжений сцепления, возникающих по условной боковой поверхности каната по длине участка передачи усилия по формуле:

$$\tau = \frac{F_a}{U} \cdot \frac{d\sigma_a(x)}{dx}, \quad (3)$$

где F_a - площадь поперечного сечения каната КЗх7(3);
 $U = 2,5\pi d$ - периметр поперечного сечения
каната КЗх7(3);
 σ_a - напряжения в канате.

Опыты показали, что в сечениях, расположенных вблизи торца, сравнительно рано преодолеваются силы сцепления бетона с канатом.

При одинаковых начальных нагружениях в канате $\sigma_0 = 11200 - 11700 \text{ кг/см}^2$ и различных прочностях бетона в момент отпуска, при большей прочности бетона возникают большие условные касательные напряжения (и меньшее $\ell_{пу}$). По длине зоны передачи усилия образцов с прочностью бетона при обхвате $R_0 = 398-414 \text{ кг/см}^2$, $308-312 \text{ кг/см}^2$, 192 кг/см^2 максимальные условные касательные напряжения, соответственно, равны $\tau_{\text{макс}} = 118 \text{ кг/см}^2$, 100 кг/см^2 , 85 кг/см^2 .

г) для разных прочностей бетона ($R_0 = 410-192 \text{ кг/см}^2$) и практически постоянных величин σ_0 ($11200-11700 \text{ кг/см}^2$) вытягивание каната g_0 у торца элемента в момент отпуска напряжения составило от 0,63 до 1,47 мм. При этом параметр λ , характеризующий распределение напряжений в арматуре и в бетоне по длине зоны передачи усилия (в смысле Гийона) изменяется в пределах от 2,08 до 3,3. Среднее значение λ по всем опытным сериям равно 2,61.

Влияние длины заделки и прочности шлакопемзобетона на анкерование каната КЗх7(3) в бетоне исследовали путем вытягивания каната из призм опертых торцом. Канат не имел предварительного напряжения. Длина образцов сечением $120 \times 120 \text{ мм}$ изменялась от 280 мм до 520 (с градацией 80 мм), а прочность шлакопемзобетона - от 212 кг/см^2 до 405 кг/см^2 .

По длине призм были установлены поперечные сварные сетки из

стержней периодического профиля Φ 6 мм класса А III (сталь 35ГС) с ячейкой 30x30 мм. Сетки располагались с шагом 40 мм от торца образца. Процент армирования по объему составлял $\mu = 4,3\%$.

Параллельно с испытанием образцов из шлакопемзобетона испытывали равнопрочные идентичные образцы из тяжелого бетона.

Во время испытания замеряли разгибание незагруженного g_0 и загруженного g_1 концов каната, деформации каната на участке заделки в бетоне $\Delta_{a\delta}$ и на участке, свободном от бетона Δ_a , угол поворота незагруженного конца каната β , а также следили за выходом на поверхность образцов трещин раскола.

Результаты оценивали по:

1. Усилию $P_{\text{прог.}}$, при котором происходил непрерывный рост смещений незагруженного конца каната вследствие нарушения сцепления по всей длине заделки в бетоне (усилие продергивания).

2. Усилию $P_{0,1}$, при котором смещение незагруженного конца каната достигало 0,1 мм.

3. Усилию $P_{\text{разр.}}$, при котором канат разрывался.

Эти ответы показали, что:

а) длина заделки каната КЭх7(3), оценивается предельным усилием проскальзывания $P_{\text{прог.}}$, и зависит от прочности бетона. Нарушение сцепления каната с бетоном происходит по всей длине заделки и канаты проскальзывают при прочности бетона

$$R < 300 \text{ кг/см}^2 \text{ и длине заделки } \ell_2 \leq 28 \text{ см.}$$

При длине заделки $\ell_2 > 28$ см и прочности бетона

$R > 300 \text{ кг/см}^2$ канат разрывается за пределами участка заделки и полного нарушения сцепления не происходит.

б) при марке бетона 400 кг/см² оптимальная длина образца, когда одновременно достигается предельное состояние по прочности каната и предельное состояние по деформативности сцепления составляет 40-50 см.

в) усилие $P_{0,1}$, при котором незагруженный конец каната получает смещение, равное 0,1 мм, зависит от длины заделки и прочности бетона. При равных условиях (ℓ_2 и R) усилие $P_{0,1}$ больше для образцов из шлакопемзобетона, но окончательное усилие продергивания $P_{\text{прог.}}$ в образцах из шлакопемзобетона меньше, чем в таких же образцах из тяжелого бетона.

В четвертой главе приведены результаты исследований прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых предварительно напряженных шлакопемзобетонных элементов при кратковременном действии нагрузки.

Испытывалось 5 серий балок (по три балки-близнеца в каждой серии) прямоугольного сечения 120x340 длиной 3500 мм. Расчетный пролет балок составлял 3300 мм. Три серии балок имели верхнюю и нижнюю напрягаемую арматуру (один канат К3x7(2) и 2 каната К3x7(3), соответственно), а две серии - только нижнюю напрягаемую арматуру (один канат К3x7(3)). В балках всех серий имелась поперечная арматура (хомуты) на крайних третях пролета.

После отпуска натяжения все образцы хранились в лаборатории при температуре воздуха $t = 12-22^{\circ}\text{C}$ и относительной его влажности 55-75% вплоть до испытания внешней нагрузкой.

При обжатии бетона, а также до испытания балок внешней нагрузкой в каждом элементе измеряли деформации свободной от бетона растянутой арматуры вне образца, деформации бетона на верхней грани образца и на оси нижней арматуры, деформации бетона по высоте сечения балки тензодатчиками с базой 100 мм и тензомерами ТА-2 на базе 100 мм.

Замеренные деформации арматуры и бетона использовались для определения потерь предварительного напряжения в верхней и нижней напрягаемых арматурах.

Опытные потери предварительного напряжения арматуры от суммарного воздействия усадки и ползучести бетона определяли по методике НИИЖБ по формуле

$$\sigma_{st} = \epsilon_t E_a - n_t \sigma_{st} \quad , \quad (4)$$

где ϵ_t - величина замеренных полных деформаций каната с момента начала обжатия бетона к моменту времени t ;
 σ_{st} - напряжение в бетоне на уровне арматуры от равнодействующей сжимающих остаточных усилий во всей напрягаемой арматуре, вычисленное по упругому расчету.

По этой же методике производили выделение потерь от неупругих деформаций бетона $\sigma_{по}$, проявившихся в процессе обжатия. Они составляют 17-28% от деформаций, замеренных при отпуске натяжения.

Опытные потери предварительного напряжения от суммарного воздействия ползучести и усадки бетона сравнивали с результатами, подсчитанными по рекомендациям, составленным в развитие главы СНиП Пв I-62* в части проектирования конструкций из легких бетонов. Результаты расчета и опыта расходятся не более, чем на 16%.

Сопоставление замеренных в опыте выгибов балок от усилия обжатия до приложения внешней нагрузки с их теоретическими значениями, вычисленными по рекомендациям СНиП Пв I-62*, показало значительное расхождение между результатами опыта и расчета.

Лучшая сходимость результатов расчета и опыта наблюдается при пользовании формулой

$$\frac{1}{\rho} = \frac{N_{от} \cdot e_{от}}{B} + \frac{\sigma_{нат} - \sigma'_{нат}}{E_a \cdot (h_0 - a')} \quad (5)$$

где $N_{от}$, $e_{от}$ - соответственно, равнодействующая усилий в напрягаемой арматуре и ее эксцентриситет относительно центра тяжести сечения в момент времени ;
 B - жесткость балки, вычисляемая по формуле:

$$B = K \cdot E_a \cdot J_n = 0,79 \cdot E_a \cdot J_n \quad (6)$$

Величина коэффициента $K = 0,79$ в формуле (6) была установлена на основании опытных значений прогибов по формуле

$$K = \frac{S \cdot l^2 \cdot M}{J \cdot E_a \cdot J_n} \quad (7)$$

Коэффициент K изменялся в пределах от 0,9 до 0,71. При значениях изгибающего момента $M = (0,3 + 0,9) M_T$ его среднеарифметическое значение составило 0,79, т.е. ниже рекомендуемого нормами $K = 0,85$.

Балки испытывали по схеме однопролетной свободнолежащей балки, симметрично загруженной двумя сосредоточенными силами.

Нагружение производили гидравлическим домкратом грузоподъемностью 35 т. Нагрузку повышали этапами, составляющими 1/15-1/20 от ожидаемой разрушающей нагрузки.

Теоретические значения моментов трещинообразования подсчитывали по двум методикам:

1. По так называемым точным формулам (M_{T1}), выведенным при треугольной эпюре напряжений в сжатой зоне и прямоугольной в растянутой зоне бетона (R_p) с учетом фактических потерь напряжений в арматуре и фактических свойств бетона.

2. По формуле ядровых моментов M_{T2} .

Потери от релаксации напряжений в канате и податливости зажимов и стэнда в расчетах по обеим методикам не учитывали, так как канаты подвергали предварительной вытяжке, а усилие в канате при изготовлении балок контролировалось образцовым манометром насосной станции и по показаниям индикаторов, установленным на свободном участке каната.

Моменты трещинообразования, определенные по двум методикам, удовлетворительно совпадали с опытными моментами трещинообразования (в первом случае расхождение составляло 2-7%, во втором 7-15%). Относительные деформации удлинения бетона перед образованием трещин достигали величины $(2,16 + 2,19)10^{-4}$. Эпюры распределения деформаций бетона сжатой зоны на момент трещинообразования были близки к треугольной.

Все испытанные балки разрушались на участке с постоянным моментом от раздробления бетона сжатой зоны. Минимальная величина относительной высоты сжатой зоны составила $\xi = 0,16+0,18$. Проскальзывание канатов у опор не наблюдалось.

Сопоставление опытных разрушающих моментов с расчетными, определенными по СНиП IIВ. 1-62* с введением фактических характеристик материалов, показывало удовлетворительную их сходимость.

Относительные деформации предельной сжимаемости крайнего волокна бетона сжатой зоны достигали величины $(2,5+3,0)10^{-3}$.

До появления трещин в растянутой зоне бетона при кратковременном действии нагрузки прогибы опытных предварительно напряженных

балок из шлакопемзобетона марок 300-400 близко соответствовали теоретическим, определяемым по СНиП П.В I-62^н с учетом изменения выгиба образцов в процессе выдержки до приложения внешней нагрузки. Жесткость балок при этом определяли по формуле (6).

В пятой главе рассмотрены результаты проектирования, изготовления и испытания опытных натуральных конструкций балок, фермы и плит покрытия из шлакопемзобетона, армированных канатами КЗх7(3), и дана технико-экономическая оценка их применения.

Проекты стропильных балок пролетом 18 м с канатной арматурой ИБ-18-3К (образцы БД1 и БД2) и ИБД-18-4К (образец БДВ) были составлены на основе серии ПК-01-06 вып. 8^н.

В поперечном сечении балок ИБД-18-3К были размещены 22 каната КЗх7(3) и 14 канатов в поперечном сечении балки ИБД-18-4К. Канаты балок БД1 и БД2 были натянуты до $\sigma_0 = 13600 \text{ кг/см}^2$, 13300 кг/см^2 соответственно, а балки БДВ - до $\sigma_0 = 12800 \text{ кг/см}^2$.

Проектная марка бетона 400.

Поперечная и конструктивная арматуры и опалубочные размеры балок не отличались от типового проекта.

Стропильная ферма пролетом 24 м с канатной арматурой ФС-24-3К была запроектирована на основе серии ПК-01-129 вып. 3. Нижний пояс фермы армировался семью канатами КЗх7(3), которые натягивали до $\sigma_0 = 12200 \text{ кг/см}^2$.

Прочая арматура и опалубочные размеры были приняты по типовому проекту. Проектная марка бетона 400.

Проект плит покрытия (ПП1 и ПП2) размером 3х12 м марки ПНК-22 с канатной арматурой КЗх7(3) был составлен на основе 3х12

типовой серии И3-93 вып. 3.

В ребре плиты размещены три каната КЗх7(3) в растянутой зоне и один канат КЗх7(3) в сжатой зоне бетона.

Канаты плит ПП1 и ПП2 были натянуты до $\sigma_0 = 12400 \text{ кг/см}^2$, 12100 кг/см^2 соответственно.

Опалубочные размеры и вся другая арматура соответствует типовой серии. Проектная марка бетона 400.

Опытные конструкции с канатами КЗх7(3) изготавливали на существующем стендовом оборудовании и по технологии, применяемой для

заготовления конструкции с прядями П7(5). Для анкеровки канатов в захватах натяжных устройств применяли клиновые зажимы.

Исследования образцов проводили в два этапа: в момент отпуска натяжения и при испытании внешней нагрузкой.

При отпуске натяжения втягивания каната в бетон не превышали значений, полученных на опытных лабораторных балках.

Испытания показали, что балки, ферма и плиты покрытия обладают необходимой прочностью, жесткостью и трещиностойкостью.

Коэффициент трещиностойкости для балок БД1, БД2, БД3 составил соответственно $C_T = 1,28; 1,18; 1,32$. Для фермы $C_T = 1,18$, а для плит покрытия ПП1, ПП2 - $C_T = 1,14; 1,11$, соответственно.

При испытании конструкций внешней нагрузкой, соответствующей $C = 1,6$, разрушение не произошло.

С целью проверки надежности анкеровки канатов в опорных узлах балок БД1 и БД3 испытания были продолжены по специальным схемам ("опорные схемы"), оставившие опорные участки в невыгодные условия.

В этих испытаниях при смещении каната на 0,1 мм коэффициент C составил 2,73 для балки БД1 и 2,05 для балки БД3.

В главе приведен технико-экономический расчет, который свидетельствует об эффективности и целесообразности применения высокопрочного шлакопемзобетона и канатов КЭх7(3). Облегчение веса конструкций позволяет снизить стоимость погрузо-разгрузочных и транспортных работ. Производство шлакопемзобетона требует меньших капитальных вложений в сопряженные отрасли промышленности, чем производство тяжелого бетона. Облегчение несущих конструкций снижает разгрузки на основания и фундаменты, позволяет укрупнить сборные элементы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Шлаковая пемза - искусственный пористый материал - по своим качествам является одним из эффективных заполнителей для легких бетонов, изготавливаемых на местных отходах металлургической промышленности. Малый объемный вес, достаточная прочность в бетоне, относительно низкая стоимость выгодно отличает ее даже от легких природных заполнителей.

2. Прочностные и деформативные свойства конструктивного шлакопемзобетона изменяются в широких пределах в зависимости от качества шлаковой пемзы, вида мелкого заполнителя и расхода вяжущего. Для исследованных шлакопемзобетонов марок 200-400 отношение $R_{пр}/R$ на 15-17% выше, а значение модуля упругости на 17-30% ниже по сравнению с нормируемыми для тяжелого бетона. Увеличение модуля упругости на 15-20% может быть достигнуто при замене пемзового песка кварцевым.

3. Шлакопемзобетон может успешно применяться в предварительно напряженных конструкциях как самостоятельный материал, позволяющий существенно облегчить на 15-20% вес зданий и конструкций.

4. Канаты КЗх7(3) можно и следует применять в качестве напрягаемой арматуры в предварительно напряженных шлакопемзобетонных конструкциях первой и второй категории трещиностойкости. Канаты КЗх7(3) являются концентрированными самозаанкеривающимися арматурными элементами. По суммарной несущей способности они превосходят почти в 3 раза исходную семипроволочную прядь и благодаря развитой рифленной поверхности надежно заанкериваются в бетоне.

5. В лабораторных испытаниях при нормальных защитных слоях определение длины зоны передачи усилия с каната на бетон можно производить как по деформациям бетона, замеренным по поверхности образца, так и по деформациям самого каната. Оба способа дают практически одинаковые результаты.

6. В сопоставимых условиях (при одинаковой величине предварительного напряжения в канате σ_0 и прочности бетона в момент

обжатия R_0) длина зоны передачи усилия в шлакопемзобетоне и тяжелом бетоне практически одинакова. При постоянных напряжениях в канате на момент отпуска натяжения длина зоны передачи усилия зависит от прочности бетона и может быть определена по формуле 2 и таблице I.

7. Канаты КЗх7(3) являются распорной арматурой и поэтому необходимо на концевых участках предварительно напряженных элементов устанавливать не менее 4 сварных сеток на участке длиной не менее 10 диаметров каната. Первую сетку следует устанавливать на расстоянии 20 мм от торца элемента. Сетки должны иметь ячейки не более 60 мм и должны быть сварены из стержней периодического профиля диаметром не менее 8 мм.

8. Длина заделки канатов КЗх7(3), оцениваемая предельным усилием проскальзывания $P_{\text{прег}}$, зависит от прочности бетона. Нарушение сцепления каната КЗх7(3) с бетоном происходит по всей длине заделки и канаты проскальзывают при прочности бетона

$$R < 300 \text{ кг/см}^2 \text{ и длине заделки } l_3 < 28 \text{ см.}$$

При длине заделки $l_3 > 28$ см и прочности бетона

$R > 300 \text{ кг/см}^2$ канат разрывается за пределами участка заделки и полного нарушения сцепления не происходит.

9. Требуемая (оптимальная) длина заделки каната КЗх7(3) при $R = 400 \text{ кг/см}^2$ составляет 40-45 см или 20-22 α_k ; при этом достигается предельное состояние каната по прочности и предельное состояние по деформативности сцепления ($g_k = 0,1 \text{ мм}$).

10. Расчет и проектирование предварительно напряженных элементов из шлакопемзобетона, армированных канатами КЗх7(3), работающих на действие кратковременных статических нагрузок, можно с достаточной для практики точностью выполнять по формулам СНиП П-В. I-62^к при учете выявления в данной диссертации особенностей шлакопемзобетона.

11. Результаты испытаний кратковременной и длительной нагрузкой предварительно напряженных конструкций натуральной величины показали их достаточную прочность, жесткость, трещиностойкость и подтвердили возможность использования методики СНиП П-В. I-62^к для расчета с учетом изложенных в диссертации дополнительных рекомендаций.

12. Применение конструкций покрытия (плит и балок пролетом 12-18 м) из шлакопемзобетона, армированных канатом КЗх7(3), взамен аналогичных конструкции из тяжелого бетона, армированных прядями П7(5), во всех случаях экономически целесообразно и позволяет снизить:

- а) расход высокопрочной проволоки на 12%;**
- б) заводскую себестоимость на 7%;**
- в) стоимость в деде на 8%;**
- г) приведенные затраты на 7-9%;**
- д) собственный вес конструкций до 20%.**

13. Проведенные исследования и предварительно организованные работы создали предпосылки и полную целесообразность организации широкого производства конструкций из шлакопемзобетона, армированных трехпрядными канатами КЗх7(3).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Стеновая панель 2,4х12 м из шлакопемзобетона. Сборник трудов ЧПИ: "Исследования по бетону и железобетону", № 73, Челябинск, 1969 г. (соавтор И.И.Пантелькин).

2. Плита покрытия 3х12 м из шлакопемзобетона, армированная канатами КЗх7(3). Сборник трудов ЧПИ: "Исследования по бетону и железобетону", № 73, Челябинск, 1969 г. (соавтор И.И.Пантелькин).

3. Изгибаемые предварительно напряженные балки из шлакопемзобетона, армированные канатами КЗх7(3). Сборник трудов ЧПИ: "Исследования по бетону и железобетону", № 96, Челябинск, 1971 г. (соавтор А.А.Оатул).

4. Разработка предварительно напряженных конструкций ограждений и покрытий одноэтажных промышленных зданий из шлакопемзобетона. Сборник рефератов НИР № 5, ВНИИЦ, 1970 г. (соавтор А.А.Оатул).

5. Сборно- и сборно-монолитные конструкции для объектов черной металлургии, в том числе с канатной арматурой. Сборник рефератов НИР № 5, ВНИИЦ, 1972 г. (соавтор А.А.Оатул).

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на XXVI научной конференции Ленинградского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института (г. Ленинград, февраль 1970 г.), на XXII, XXIII, XXIV и XV научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, проходивших в 1969 - 1972 гг.

**ЕВСЕЕВ
БОРИС АНАТОЛЬЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОБЕСТНОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКТИВНОГО
ИЛКОПЕМЗОБЕТОНА С КАНАТНОЙ АРМАТУРОЙ ТИПА КЗх7(3)**

Техн. редактор Л.С. Заварухина

ФБ 10133. 16/IV-73 г. Сдано в печать 16/IV-73 г. Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 1,25 п.л. Отпечатано на ротационной ЧП. Тираж 120 экз. Заказ № 129/426.