

30X

На правах рукописи

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

ПАНТЕЛЬКИН Иван Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ШЛАКОПЕМЗОБЕТОНА

Специальность 05.23.01 -
"Строительные конструкции"

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

Челябинск 1973

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

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.П.Павлов; кандидат технических наук В.П.Полищук.

Ведущее предприятие - УралНИИСтромпроект, г.Челябинск.

Автореферат разослан "6" апреля 1973 года.

Защита диссертации состоится 7 мая 1973 года, в 15 час.,
в 244 ауд. на заседании Совета по приобретению учёных степеней
инженерно-строительного факультета ЧПИ имени Ленинского комсо-
моля (454044, г.Челябинск-44, проспект им.В.И.Ленина, 76, глав-
ный корпус, тел.89-89-64).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

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

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
доцент, кандидат технических
наук

(*Э.Б.Калранов* - Э.В.Калранов)

Среди главных путей индустриализации строительства, указанных Директивами XXIV съезда КПСС, видное место занимает массовое применение новых эффективных материалов и облегченных конструкций на основе широкого использования местных побочных продуктов производства.

Наиболее действенным путем снижения собственного веса конструктивного железобетона является применение пористых заполнителей.

Одним из таких заполнителей является шлаковая пемза, получаемая в результате переработки доменных шлаков.

Подсчеты показывают, что в районах с развитой чёрной металлургией шлаковая пемза оказывается наиболее экономичным среди других искусственных пористых заполнителей. Её стоимость ниже стоимости гранитного щебня.

Основное количество выпускаемой в настоящее время шлаковой пемзы на Южном Урале применяется для производства крупных стено-вых панелей и блоков жилых и промышленных зданий. Однако наибольшая эффективность использования лёгких бетонов достигается, как известно, при их комплексном применении не только в ограждающих, но и в несущих конструкциях зданий и сооружений.

На основе шлаковой пемзы, вырабатываемой на Челябинском металлургическом заводе получают конструктивные бетоны с прочностью до 400 кг/см² при объёмном весе на 15-20% меньше, чем у бетонов на тяжёлых заполнителях. Это обстоятельство открывает возможность изготовления из шлакопемзобетона несущих конструкций с более высокими технико-экономическими показателями по отношению к подобным конструкциям из тяжёлого бетона.

Эффективность этих конструкций ещё больше повысится, если применять предварительно напряжённую высокопрочную арматуру классов А_т-IV и А_т-У.

Однако в настоящее время работа предварительно напряжённых шлакопемзобетонных несущих конструкций, армированных стержнями периодического профиля класса А_т-У изучена недостаточно.

Целью настоящей диссертации является устранение этого пробела.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, изложенных на 171 странице машинописного текста и содержит 62 рисунка и 51 таблицу. В список использованной литературы входит 122 отечественных и 9 зарубежных наименований.

В первой главе излагаются и анализируются работы других авторов в области конструктивного шлакопембетона и формулируются цели диссертации.

В первом разделе главы приведён обзор и анализ исследований свойств шлакопембетона.

Конструктивный шлакопембетон отличается от тяжёлого бетона повышенным расходом вяжущего, что указывает на возможность проявления больших усадочных деформаций шлакопембетона по сравнению с тяжёлым бетоном.

С другой стороны известно, что заполнитель уменьшает усадку цементного теста и его сдерживающая способность зависит от его деформативных свойств. Поэтому при применении крупного заполнителя с меньшей прочностью и жёсткостью (шлаковая пемза) естественно ожидать увеличение усадки по сравнению с тяжёлым бетоном на прочных заполнителях, так как сдерживающая способность пористого заполнителя в данном случае уменьшается.

Изучению усадки и ползучести конструктивного шлакопембетона посвящены работы А.А.Васильковского, А.Ф.Зеленковой, Л.Л.Сазыкиной, В.П.Полинки, а также исследования, проведённые в НИИЖБ, которые свидетельствуют о том, что усадка и ползучесть шлакопембетона марок 200–400 в пределах 14–40% больше, чем у бетона на гранодиоритовом щебне той же прочности. Замена пористого песка кварцевым песком, уменьшение расхода цемента, а также повышение степени гидратации цемента в результате создания благоприятных условий твердения приводят к снижению усадки и ползучести шлакопембетона.

Бетон на шлаковой пемзе отличается от тяжёлого главным образом тем, что изготавливается на пористом заполнителе, который сообщает ему повышенную проницаемость. Вследствие этого коррозия арматуры в агрессивной среде может протекать более интенсивно.

Поэтому отечественные строительные нормы и правила допускают применять шлаковую пемзу с содержанием серы не более 2% в расчёте на SC_3 , из которых водорастворимых сульфатов должно быть не более 1%.

Исследованием коррозии арматуры в шлакопембетоне занимались различные научно-исследовательские организации: НИИЖБ, ЮжНИИ, ВНИИСтром, ДонНИИ, УралНИИСтромпроект. В результате установлено, что шлакопембетон на Запорожской, Криворожской, Ждановской и Челябинской шлаковых пемзах не агрессивен к арматуре по химическо-

му составу, что подтверждается и натурными исследованиями.

О благоприятном влиянии повышения межзварновой плотности лёгких бетонов на сохранность арматуры свидетельствуют исследования С.Е.Фрайфельда, М.Н.Циокрели.

Исследования С.Д.Лаврентьева показали, что в шлакопемзобетонах плотной структуры специальных мероприятий по защите арматуры от коррозии не требуется.

Таким образом, если обеспечена достаточно плотная структура шлакопемзобетона, остаётся позаботиться о содержании в нём сернистых соединений в допустимых пределах.

Шлаковая пемза ЧМЗ содержит серы в переочёте на SO_3 в пределах 0,8-1,3%, что не превышает требования норм по содержанию сернистых соединений. Следовательно, в конструктивных шлакопемзобетонах плотной структуры, приготовленных на Челябинской шлаковой пемзе и содержащих в своём составе цемента не менее 400 кг/м³ защита арматуры от коррозии обеспечена.

Во втором разделе главы дан обзор исследований сцепления стержневой арматуры со шлакопемзобетоном.

Замена обычных заполнителей пористыми приводит, как было указано выше, к изменению свойств бетона; изменяются в том числе и условия совместной работы арматуры и бетона.

Повышенное содержание влажного в шлакопемзобетоне по сравнению с соответствующими марками тяжёлого бетона даёт основание полагать, что силы склеивания (адгезия) с арматурой будут большими, чем у тяжёлого бетона.

Согласно современным представлениям, усадка бетона, вопреки ранее бытовавшему мнению, скорее всего отрицательно сказывается на качестве сцепления. Поэтому применение бетона с большой усадкой, чем у тяжёлого бетона, может привести к иным закономерностям сцепления.

Так, в исследованиях Н.А.Яковлевой установлено уменьшение прочности сцепления при увеличении усадки шлакопемзобетона и что связь между прочностью сцепления и прочностью шлакопемзобетона не всегда прямо пропорциональна.

М.В.Симонов отметил, что о увеличением возраста бетона изменения сопротивления арматуры сдвигу в шлакопемзобетоне к тяжёлому бетону примерно одинаковы; при одинаковых расходах цемента сцепление арматуры с бетоном на пористых заполнителях ниже, чем с тяжёлыми;

уменьшение прочности сцепления вследствие седиментации (осадки) в лёгких бетонах менее вероятно, чем в бетоне на плотных заполнителях.

Опыты А.А.Васильковского показали, что сцепление шлакопемзобетона с арматурой примерно такое же, как и в тяжёлых бетонах.

Обзор исследований сцепления шлакопемзобетона с арматурой показал на недостаточность экспериментальных работ по изучению сцепления высокопрочной стержневой арматуры классов А_т-У-А_т-УІ со шлакопемзобетоном повышенных марок.

В третьем разделе главы приводится обзор исследований конструктивного шлакопемзобетона и конструкций из него. Большие исследования в области лёгких бетонов, в том числе шлакопемзобетона, и конструкций на их основе выполнены в нашей стране Н.А.Поповым, Т.А.Бужевичем, Н.А.Корневым, И.Н.Ахвердовым, А.И.Вагановым, А.А.Васильковским, М.З.Симоновым, Б.Г.Скрамтаевым, Н.Я.Спиваком, М.П.Элинзоном, Г.В.Геммерлингом, В.С.Григорьевым, А.А.Евдокимовым, Б.Ф.Зайончковским, П.М.Зильберфарбом, Н.В.Морозовым, В.И.Овсянкиным, П.С.Семёновым, Я.Ш.Штейном, Г.Д.Цискrellи.

Несмотря на значительный объём выполненных исследований в области конструктивного шлакопемзобетона, остаются, однако, недоработанные вопросы и встречаются противоречивые результаты.

Применимость основных расчётных положений, разработанных для конструкций из тяжёлого бетона, в том числе преднатяжённых, к расчёту конструкций из бетонов на пористых заполнителях была проверена в результате исследований и анализа испытанных изделий и конструкций, изготовленных из различных видов лёгких бетонов.

Однако существующие нормы и рекомендации по проектированию конструкций из лёгких бетонов требуют дальнейших уточнений и дополнений.

На основании изложенного выше в диссертации были поставлены следующие задачи:

1) изучить физико-механические свойства конструктивного шлакопемзобетона, приготовленного на пемзе, вырабатываемой на Челябинском металлургическом заводе;

2) исследовать ползучесть шлакопемзобетона в сравнении с тяжёлым бетоном при сопоставимых условиях;

3) исследовать сцепление высокопрочной стержневой арматуры класса А_т-У с конструктивным шлакопемзобетоном в сопоставлении с

тяжёлым бетоном при кратковременном и длительном действии нагрузки (получить сцепления);

4) исследовать работу изгибаемых предварительно напряжённых балок из шлакопемзобетона, армированных высокопрочной стержневой арматурой класса А_Т-У при кратковременном и длительном действии нагрузки;

5) изучить работу опытных несущих и ограждающих преднапряжённых конструкций из шлакопемзобетона, армированных стержневой арматурой классов А-Ш_В-А_Т-У;

6) внедрить в производство напряжённые конструкции из конструктивного шлакопемзобетона, армированные высокопрочной стержневой арматурой и дать их технико-экономическую оценку;

7) разработать соответствующие предложения для внесения в последующие редакции Строительных норм и правил.

Во второй главе диссертации приведены результаты исследования основных физико-механических свойств конструктивного шлакопемзобетона, изготовленного на челябинской пемзе.

Для изготовления шлакопемзобетона применяли в качестве мелкого заполнителя пемзовый песок фракции 0-5 мм с объёмным весом 1060 кг/м³ или кварцевый песок с модулем крупности 2,2.

В качестве крупного заполнителя - пемзовый щебень фракции 5-20 мм с объёмным весом 769 кг/м³.

Приведены характеристики применяемых цементов и заполнителей. Подбор составов шлакопемзобетона проводили из условия получения наибольшей прочности при минимальном объёмном весе.

Жёсткость смеси изменялась в пределах 20-80 сек.

Для исследований применяли шлакопемзобетон марок 200, 300 и 400 с объёмным весом 1860-2095 кг/м³, при этом расход цемента на 1 м³ шлакопемзобетона находится в пределах 500-600 кг.

Прочностные и деформативные характеристики конструктивного шлакопемзобетона определяли на образцах - кубах размером 10x10x10 см и прismsах 10x10x40 см.

Результаты опытов показали, что с повышением кубиковой прочности шлакопемзобетона величина относительной призменной прочности его возрастает и её изменение находится в пределах 0,81-0,90 от кубиковой прочности шлакопемзобетона.

Прочность шлакопемзобетона при растяжении определяли на двух

видах образцов: на белочках, которые испытывали на изгиб, и кубиках, испытываемых раскалыванием на ребро.

Для шлакопембетона марок 200-400 кг/см² прочность при растяжении R_p в большинстве случаев несколько превышает значения R_p для тяжёлого бетона и с достаточной степенью точности для практических расчётов может быть вычислена по формуле

$$R_p = 0,5 \sqrt[3]{R^2}. \quad (1)$$

Исследованиями установлено, что шлакопембетон марок 200, 300 и 400 имеет модуль упругости при сжатии в пределах 16-34% меньший, чем тяжёлый бетон соответствующих марок, но значительно больше (16-50%) модуля упругости, рекомендуемого СНиП для лёгких бетонов на искусственных пористых заполнителях с объёмным весом более 700 кг/м³.

Опытные значения E_b конструктивного шлакопембетона хорошо согласуются с величинами E_b , вычисленными в соответствии с рекомендациями пункта 2.30 и табл. II первой редакции новой главы СНиП.

При исследовании ползучести конструктивного шлакопембетона ползучесть бетона оценивали по деформациям, возникающим в процессе длительного приложения нагрузки за вычетом деформаций усадки. При этом ставилась задача сопоставить деформации шлакопембетона различного состава и различной прочности с аналогичными данными тяжёлого бетона.

В качестве критерия сопоставимости шлакопембетона и тяжёлого бетона нами была принята кубиковая прочность бетона.

Условность такого подхода очевидна. Одно из его практическое значение бесспорно, поскольку в наших нормах качество бетона определяется его прочностью.

Усадку и ползучесть бетона исследовали на семи составах, из них четыре состава шлакопембетона с применением в качестве мелкого заполнителя пемзового или кварцевого песка и три состава тяжёлого бетона.

Опыты проводились на призмах 10x10x40 см.

Замер деформаций образцов-призм в процессе нагружения, под длительной нагрузкой, а также усадочных образцов производили индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм и тензометрами Н.А.Аистова на базе 200 мм.

Наблюдения осуществляли на протяжении 603 суток. В течение указанного периода времени температура в помещении лаборатории колебалась от 11° до 24°, а влажность - от 70 до 90%.

Результаты опытов показали, что усадочные деформации шлакопемзобетона на 14-37% больше, чем у тяжёлого бетона в зависимости от прочности бетона. Шлакопемзобетон с увеличенным расходом цементного теста имеет большую усадку.

Установлено, что на усадку шлакопемзобетона оказывает влияние вид мелкого заполнителя. Так, шлакопемзобетон на пемзовом песке показал несколько меньшую усадку, чем шлакопемзобетон на кварцевом песке.

Для исследования деформаций ползучести образцы-приамы нагружали в пружинных установках, при этом усилие обжатия для всех образцов было принято одинаковым и равным 5,0 т ($C_b = 50 \text{ кг}/\text{см}^2$).

Исследованиями установлено, что величина характеристики ползучести φ как для шлаколемзобетона, так и тяжёлого бетона изменяется в одних пределах.

Изменения характеристики ползучести во времени могут быть описаны экспоненциальной зависимостью вида

$$\varphi_t = \varphi_{пред}^{опыт} \cdot (1 - e^{-bt}), \quad (2)$$

где b - опытный параметр, не зависящий от времени и равный 0,023.

Конструктивный шлакопемзобетон на пемзовом песке имеет большую величину меры ползучести (до 21%) по сравнению с тяжёлым бетоном, за исключением шлаколемзобетона марки 400 на кварцевом песке, у которого величина C больше на 40% по сравнению с тяжёлым бетоном. Однако, необходимо отметить, что приёмная прочность тяжёлого бетона в этом случае была значительно выше, чем у шлакопемзобетона.

Отмечено, что с увеличением прочности шлакопемзобетона, относительные деформации ползучести имеют тенденцию к уменьшению.

В результате анализа наших опытных данных установлено, что ползучесть шлакопемзобетона марки 200 в среднем на 20% выше, чем у тяжёлого бетона. Деформации ползучести шлаколемзобетона на пемзовом песке марки 300 и тяжёлого бетона изменяются в одних пределах, в E_n шлакопемзобетона с применением кварцевого песка несколько меньше по отношению E_n тяжёлого бетона соответствующей марки.

Третья глава посвящена исследованиям сцепления шлакопемзобетона и тяжёлого бетона со стержневой арматурой при выдергивании её из призм, опёртых торцом, при кратковременном и длительном действии усилия.

Исследовали влияние состава бетонов, а также длины заделки арматуры на прочность сцепления и на деформации бетона и арматуры.

Поперечное сечение бетонных призм составляло 140x140 мм, а длина их (длина заделки стержня) вариировалась при испытании кратковременной нагрузкой от 140 мм до 420 мм (с градацией в 70 мм), что позволило установить необходимую длину заделки арматурного стержня при различных марках конструктивного шлакопемзобетона.

Полнотость сцепления исследовали на призмах сечением 140x140мм и длиной 140 мм, которые нагружали в пружинных установках.

Для сопоставления были проведены параллельные исследования призм из тяжёлого бетона, которые изготавливали и хранили в тех же условиях, что и образцы из шлакопемзобетона.

Во всех основных образцах применяли арматурные стержни периодического профиля класса Ø 14 A_T-У.

Для предотвращения преждевременного раскола призм, они снабжались косвенным армированием в виде сварных сеток из проволоки Ø 6 А-Ш, расположенных равномерно по высоте призмы с шагом 35 мм.

Всего было испытано 180 образцов, из них 114 призм из шлакопемзобетона и 66 призм из тяжёлого бетона.

Образцы распалубливали через 2-3 суток, а затем до момента испытания нагрузкой хранили в камере нормального температурно-влажностного режима ($t = +20^{\circ}\text{C}$, влажность $W = 90\%$), а образцы, предназначенные для постановки под длительную нагрузку находились в условиях лаборатории.

В процессе испытания образцов нагрузкой замеряли взаимное смещение арматуры и бетона на нагруженном торце призмы Δ_0 , сдвиг ненагруженного конца арматурного стержня Δ_L , удлинение арматуры на участке её заделки в бетоне Δ_{ab} , удлинения свободной арматуры Δ_a и укорочения бетона призм в контактном слое Δ_b .

Результаты оценивали по следующим предельным состояниям.

1. Усилие P_{o1} , при котором смещение ненагруженного конца арматурного стержня достигало величины 0,1 мм.

2. Усилие P_{prod} , при котором стержень продёрнулся.

3. Усилие P_{break} , при котором стержень разрывался.

В качестве критерия прочности заделки принято усилие $P_{\text{прог}}$ ($P_{\text{разр}}$), а в качестве критерия деформативности - усилие $P_{\text{дл}}$.

Величина усилия $P_{\text{дл}}$ у образцов из шлакопемзобетона приближается к $P_{\text{прог}}$, что свидетельствует о более хрупком характере разрушения образцов из шлакопемзобетона.

Результаты опытов показали, что усилие $P_{\text{дл}}$ у образцов из шлакопемзобетона больше в 1,2-1,6 раза, чем у образцов из тяжёлого бетона и длины заделки.

Применение кварцевого песка несколько улучшает анкерующие свойства шлакопемзобетона, о чём свидетельствуют большие значения условных касательных напряжений $T_{\text{макс}}^{\text{разр}}$ по сравнению со шлакопемзобетоном на пемзовом песке.

Установлено, что величина усилия $P_{\text{разр}}$ с ростом прочности шлакопемзобетона при малой длине заделки возрастает примерно прямо пропорционально длине заделки. Пропорциональность нарушается при усилиях, вызывающих пластические деформации арматуры (при $L \geq 28$ см), при этом выдёргивающая сила с ростом L увеличивается незначительно и достигает величины, соответствующей временному сопротивлению арматуры на разрыв.

Перемещения нагруженного и ненагруженного концов арматуры δ_0 и δ_L у образцов из шлакопемзобетона значительно меньше соответствующих величин у образцов из тяжёлого бетона при равной длине заделки.

Очевидно, это можно объяснить большей деформативностью бетона призма из шлакопемзобетона (начальный модуль упругости для шлакопемзобетона меньше, чем E_f равнопрочного тяжёлого бетона), в то время как у призма из тяжёлого бетона рост величины δ_0 и δ_L в большей степени определяется скольжением стержня в бетоне.

Проведённые опыты показали, что в общем деформативность заделки у образцов из шлакопемзобетона ниже, чем у образцов из тяжёлого бетона, что можно объяснить также большей склеивающей способностью растворной части шлакопемзобетона с арматурой за счёт повышенного расхода вяжущего.

Исследованиями удалось установить оптимальный случай, когда при длине заделки равной $L = 21$ см и прочности шлакопемзобетона $R = 383-429 \text{ кг}/\text{см}^2$ смещение ненагруженного конца арматуры составило $\delta_L = 0,1$ мм и было достигнуто предельное состояние по прочности арматуры.

Сцепление стержневой арматуры со шлакопемзобетоном при длительном действии усилия (ползучесть сцепления) исследовали также в сопоставлении с тяжёлым бетоном.

Величина предельного усилия $P_{\text{пред}}$, определённая для каждого состава бетона при кратковременной испытании образцов из серии длительных, послужила основой для назначения величины длительно действующего вытягивающего усилия P_d , которое принималось равным $0,5 P_{\text{пред}}$. Этим самым в образцах разных составов было создано одинаковое напряжённое состояние.

Отсчёты по приборам снимали на протяжении 755 суток. В течение этого промежутка времени температура в лаборатории колебалась от $11,5^{\circ}$ до $23,0^{\circ}$, а влажность от 77 до 94%.

Наблюдения показали, что перемещения стержней в образцах из тяжёлого бетона больше, чем в образцах из шлакопемзобетона за счёт больших "мгновенных" перемещений, однако характеристики ползучести φ_0 и φ_t для образцов из шлакопемзобетона значительно больше.

Полученные в наших опытах кривые нарастания характеристик ползучести φ_0 и φ_t во времени удовлетворительно описываются экспоненциальной зависимостью вида:

$$\varphi_{(t)} = \varphi_{(t)}^{\text{пред}} \cdot (1 - e^{-bt}), \quad (3)$$

где $\varphi_{(t)}^{\text{пред}}$ и b — опытные параметры, численные значения которых зависят от вида и прочности бетона.

Деформации задолванного в бетон участка арматуры $\Delta_{ab}(t)$ несколько возрастают в первые 30–60 суток, а затем остаются практически постоянными в течение всего периода наблюдений. Основное влияние на характер их изменения оказали температурные колебания среды, о чём свидетельствуют аналогичные деформации усадочных образцов.

В четвёртой главе рассматривается совместная работа стержневой арматуры класса А_T-У со шлакопемзобетоном в изгибаемых элементах, характер взаимодействия арматуры со шлакопемзобетоном в прислонирных участках балок при передаче усилий обжатия, а также величина потери предварительного напряжения от усадки и ползучести конструктивного шлакопемзобетона.

Получены данные о характере образования и раскрытия трещин, жёсткости и несущей способности опытных балок при кратковремен-

ном действии нагрузки, а также данные о поведении балок из шлако-пемзобетона при длительно действующей нагрузке в сопоставлении с балками из тяжёлого бетона.

В данной главе приведены результаты испытаний 18 лабораторных балок двух серий из шлакопемзобетона с проектными марками от 200 до 400 кг/см².

Балки второй серии в количестве 6 штук были испытаны длительно действующей нагрузкой (3 балки из ШПБ и 3 - из ТБ при прочности бетона 400 кг/см²).

Опытные балки имели следующие проектные размеры: длина 324 см, $h = 22,0$ см, $b = 10,0$ см с расчётным пролётом 300,0 см.

В качестве рабочей арматуры использованы арматурные стержни периодического профиля класса Ø 14 А_т-У.

В зоне сечения, растянутой от действия предварительного обжатия была установлена напрягаемая стержневая арматура класса Ø 8 А-Ш_в. Эта арматура отсутствовала в балках, предназначенных для испытания длительной нагрузкой. Кроме того, балки имели сварные плоские каркасы.

Изготовление балочных образцов производилось в инвентарных металлических формах на силовом стенде с натяжением арматуры на упоры. Твердение бетона естественное. Прочность шлакопемзобетона при обжатии составляла 189-403 кг/см², а тяжёлого бетона 362-378 кг/см².

После отпуска натяжения балки хранились в помещении при температуре воздуха $t = 12-20^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $W = 74-89\%$ в течение 44-143 суток до испытания внешней нагрузкой. К этому времени прочность шлакопемзобетона составила 204-405 кг/см², а тяжёлого бетона 397-445 кг/см².

Для выявления изменения напряжённого состояния при обжатии бетона и в процессе испытания внешней нагрузкой балки были оснащены приборами. Тензометры ТА-2, установленные на припорных участках и по высоте сечения балки в зоне чистого изгиба, позволили замерить продольные деформации бетона, а также деформации нижних и верхних крайних волокон бетона. Индикаторами, установленными на базе 700 мм, замеряли суммарные деформации бетона в зоне чистого изгиба на уровне верхней и нижней арматуры. Втягивание арматурных стержней относительно торца балки замеряли индикаторами, установленными на концах арматуры.

Приборы, поставленные для измерения деформаций в процессе отпуска натяжения, были оставлены и для испытания внешней нагрузкой. Это позволило проследить за развитием деформаций после обжатия балок до момента приложения внешней нагрузки, а также за изменением во времени выгиба балок.

Длину зоны передачи усилий ℓ_{pu} определяли по характеру распределения укорочений бетона на поверхности образцов вдоль оси арматурного стержня, которые замеряли тензометрами системы Н.Н.Аистова на базе 100 мм, установленными на приопорных участках балок.

Исследованиями установлено, что значение ℓ_{pu} при прочности шлакопемзобетона от 232 до 400 кг/см² независимо от вида мелкого заполнителя целесообразно вычислять по формуле (4), предложенной М.И.Додоновым с введением корректирующего коэффициента α :

$$\ell_{pu} = \left[2,5 + \frac{\Delta \sigma_a}{6250} \cdot \left(7 + \frac{1500}{R_o} \right) \right] \alpha, \quad (4)$$

где $\Delta \sigma_a$ - передаваемое напряжение в арматуре в кг/см²;

R_o - кубиковая прочность шлакопемзобетона в момент отпуска предварительного напряжения в кг/см²;

$\alpha = E_{шпб}/E_{тв}$ - коэффициент, численное значение которого равно отношению начальных модулей упругости ШПБ и ТВ.

Значения ℓ_{pu} , вычисленные по формуле (4) удовлетворительно согласуются с опытными значениями (расхождение составляет от -8,3 до +11,1%).

Результаты опытов показали, что потери от усадки и ползучести шлакопемзобетона следует определять по "Рекомендациям по проектированию конструкций из лёгких бетонов", причём, потери от ползучести с применением в качестве мелкого заполнителя пемзового песка следует определять с введением в формулу по определению потерь от ползучести корректирующего коэффициента равного 0,9 вместо ранее принятого 0,8.

Опытные суммарные величины потерь от усадки и ползучести шлакопемзобетона марок 200,300 превышают потери, вычисленные по "Рекомендациям", в среднем в 1,10 раза, а для шлакопемзобетона марок 300,400 в кварцевом песке оказались практически равными теоретическим.

Сопоставление опытных значений выгибов балок от усилий обжатия до приложения внешней нагрузки с их теоретическими значениями, вычисленные по рекомендациям СНиП II-В.1-62*, показало значительное расхождение между результатами опыта и расчёта.

Лучшее совпадение наблюдается при вычислении теоретического выгиба по значению кривизны, определяемой по формуле (5), предложенной С.А.Дмитриевым и Ю.Ф.Бирулиным, с введением в формулу корректирующего коэффициента K_0 :

$$\frac{1}{P} = \frac{N_{ot} \cdot e_{ot}}{K_0 \cdot E_f \cdot J_n} + \frac{\sigma_{nt} - \sigma'_{nt}}{E_a \cdot (h_o - a')} , \quad (5)$$

где N_{ot} , e_{ot} - соответственно, равнодействующая усилий в напрягаемой арматуре и её эксцентриситет относительно центра тяжести сечения в момент времени t ;

K_0 - коэффициент, учитывающий снижение жёсткости сечения по времени (для шлакопемзобетона марки 200

$K_0 = 0,75$, а для марок 300, 400 $K_0 = 0,80$);

σ_{nt} , σ'_{nt} - потери предварительного напряжения, соответственно в нижней и верхней арматуре, вызванные усадкой и ползучестью шлакопемзобетона.

Значения выгибов, вычисленные по кривизне в соответствии с формулой (5) хорошо согласуются с опытными значениями выгибов, которые превысили расчётные величины в среднем в 1,10 раза.

Опытные балки испытывали на изгиб в специальной установке двумя равными сосредоточенными силами, расположенными в трёх пролёта (как при кратковременном, так и длительном приложении нагрузки).

При кратковременном испытании нагрузку прикладывали ступенями, составляющими 0,05-0,06 от предполагаемой величины разрушающей нагрузки.

Теоретический момент трещинообразования подсчитывали по формуле СНиП (152), а также по так называемым точным формулам, выведенным при треугольной эпюре напряжений в сжатой зоне и прямоугольной в растянутой зоне бетона. Среднее расхождение между опытными и теоретическими значениями момента трещинообразования составило +5,1% при сопоставлении опытных моментов с M_{tr} .

численных по точным формулам и -10,1% при сопоставлении с M_{12} , вычисленных по формуле СНиП. При этом необходимо отметить, что прочность при растяжении шлаконемзобетона принимали по СНиП как для тяжёлого бетона, соответствующей прочности.

Тензометры, установленные на нижней грани балки в середине пролёта, позволили замерить предельную растяжимость шлаконемзобетона, которая колебалась в пределах 0,17-0,35 мм/м.

Максимальная ширина раскрытия трещин непосредственно перед разрушением составляла 0,2-0,3 мм.

Известно, что при вычислении прогибов от кратковременного действия нагрузки изгибную жёсткость балок СНиП рекомендует определять по формуле

$$B_k = K_0 \cdot E_f \cdot I_p , \quad (6)$$

где K_0 - коэффициент, учитывающий снижение жёсткости сечения за счёт развития неупругих деформаций при кратковременном нагружении, принимаемый равным 0,85.

Нами определено значение этого коэффициента для балок из шлаконемзобетона. Его вычисляли, приравняв теоретический прогиб опытному.

Установлено, что хорошая сходимость опытных и теоретических прогибов балок достигается при прочности шлаконемзобетона $R = 199-204 \text{ кг}/\text{см}^2$ при среднеарифметическом значении $K_0 = 0,75$, а для прочности $R = 263-403 \text{ кг}/\text{см}^2$ при среднеарифметическом $K_0 = 0,80$ на всех этапах нагружения до момента, близкому к трещинообразованию.

Фактическое разрушение балок, т.е. полное исчерпание несущей способности, произошло по нормальному сечению в зоне чистого изгиба от раздробления бетона сжатой зоны.

Испытание балок до разрушения позволило сопоставить фактические предельные моменты с теоретическими, последние вычислялись по формуле СНиП (41), при этом R_i принимали равным фактической кубиковой прочности шлаконемзобетона. В соответствии с рекомендацией новой главы СНиП II-В нами были вычислены также теоретические предельные моменты при замене R_i шлаконемзобетона его применённой прочностью R_{pr} .

В качестве предельного состояния по прочности было принято то, при котором напряжения в рабочей арматуре достигали условного предела текучести $\sigma_{0,2}$.

Теоретические предельные моменты для большей части балок оказалось несильно ниже опытных. Среднее же расхождение между опытными и теоретическими моментами, вычисленными при $R_u = R$ и при $R_u = R_{np}$ соответственно составило 3,9% и 7,5%.

Испытания балок из шлакопембетона длительной нагрузкой в сопоставлении с аналогичными балками из тяжелого бетона, показали, что характер нарастания во времени прогибов балок для обоих видов бетона одинаков, при этом прогибы балок от длительной нагрузки увеличились во времени в 1,5 раза как для балок из шлакопембетона, так и тяжелого бетона.

В пятой главе приведены результаты работ автора диссертации по проектированию, изготовлению и испытанию опытных, предварительно напряженных натурных конструкций из шлакопембетона, в том числе несущих конструкций для одноэтажных производственных зданий и технико-экономические показатели их применения.

Опытные образцы конструкций были изготовлены в 1966-1971 годах на Комбинате строительных материалов и изделий треста "Челябинскметаллургстрой" на челябинской пемзе, вырабатываемой заводом ЧМЗ.

Плоские сплошные предварительно напряженные панели перекрытия жилых зданий были запроектированы из конструктивного шлакопембетона марки 250 кг/см², которые армировались стержневой арматурой классов А_T-IV и А_T-У.

Параллельно были изготовлены аналогичные панели из тяжелого бетона с проектной маркой 300 кг/см².

Размеры плит в плане составляли 586x170 см.

В качестве продольной рабочей арматуры в панелях $h = 140$ мм использовали арматурные стержни Ø 16 А_T-IV, а в панелях $h = 120$ мм - арматурные стержни Ø 14 А_T-У.

Для восприятия раскалывающих усилий, возникающих в момент отпуска предварительного натяжения в опорной зоне панелей устанавливали сетки, а также в верхней зоне по всей её площади.

Прочность шлакопембетона при отпуске натяжения составляла 187-206 кг/см², а тяжелого бетона - 298-392 кг/см².

После отпуска натяжения в панелях толщиной $h = 120$ мм в защитном слое бетона были обнаружены трещины раскола, идущие от торца вдоль арматурных стержней. Длина трещин составляла 20-30 см, а максимальная ширина их раскрытия - 0,15 мм.

При испытании кратковременной нагрузки панель нагружали равномерно распределённой нагрузкой в виде чугунных грузов весом по 20,5 кг.

При нормативной нагрузке прогибы панелей из шлаконемзбетона при $h = 140$ мм в среднем оказались практически равными или несколько превышали прогибы панелей из тяжёлого бетона при $h = 120$ мм.

Критерием разрушения для всех испытанных панелей послужило достижение прогиба, равного $I/50$ пролёта. Разрушение сжатой зоны не наблюдалось. При этом значение коэффициента C колебалось в пределах 1,61-2,10.

Три панели из шлаконемзбетона $h = 140$ мм находились под длительной нормативной нагрузкой в течение десяти месяцев. Начальный прогиб за время выдержки увеличился в среднем в 3,1 раза. В процессе всего наблюдения появление трещин не обнаружено: при этом, к концу выдержки средняя относительная величина прогиба оставила $I/190$ пролёта.

Стеновая панель была запроектирована из шлаконемзбетона марки 400.

В качестве рабочей арматуры приняты: арматурные стержни класса А-III_в ($G_s = 4950$ кг/см²).

В момент отпуска натяжения прочность шлаконемзбетона составила $R = 808$ кг/см².

Испытание панели производили в рабочем (вертикальном) положении.

При испытании панели, работающей в двух плоскостях и опёртой в четырёх точках, была обеспечена свобода поворота на опорах и перемещения опор в плоскости панели.

Нагружение панели от первого до пятого этапов осуществляли одновременно горизонтальной и вертикальной нагрузками, после чего панель постепенно нагружали только горизонтальной нагрузкой и доводили до разрушения.

Критерием разрушения явилось достижение предельного горизонтального прогиба, равного 24,6 см, что составляет $I/50$ пролёта.

Разрушающая нагрузка при испытании составила 1,2 от контрольной разрушающей нагрузки, а по отношению к расчётной $C = 2,0$.

В процессе испытания наблюдалось надёжное сцепление арматуры со шлаконемзбетоном: смещение (втягивание) арматуры в опорных зонах панели не происходило.

Опытная плита покрытия ПНО-22/3х12 из шлакопембетона была изгото-
влена по агрегатно-поточной технологии. Проектная марка -
 $400 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Ненапрягаемая арматура и закладные детали, в том числе заклад-
ные детали, предохраняющие торцы продольных рёбер от раскола, вы-
полнены в соответствии с типовым проектом.

Продольные рёбра плиты армированы предварительно напряжённой
арматурой класса А-Ш_В ($\sigma_0 = 4850 \text{ кг}/\text{см}^2$).

Прочность бетона при отпуске напряжения составила $356 \text{ кг}/\text{см}^2$,
а к моменту испытания внешней нагрузкой - $420 \text{ кг}/\text{см}^2$.

В качестве условного разрушения принято состояние, при котором
прогиб достиг $25,3 \text{ см}$ (т.е. $1/48$ пролёта), а ширина раскрытия тре-
щин составила $1,5 \text{ мм}$ с одновременным приращением прогиба от по-
следней ступени нагружения на величину большую, чем суммарная ве-
личина прогиба от пяти первых этапов нагружения.

Отсутствие втягивания стержневой арматуры в опорных сечениях
продольных рёбер плиты и раскола здесь бетона свидетельствует о на-
дёжном заанкеривании арматуры класса А-Ш_В в шлакопембетоне при
принятом в данном случае армировании.

Опытная двухскатная балка ИБ4-И2-8 из шлакопембетона была за-
проектирована под третий класс нагрузки по альбому рабочих чертежей
серии ПК-О1-06 выпуск 8*.

Напрягаемая арматура выполнена из стержней периодического про-
филя класса А-Ш_В диаметром 25 мм ($\sigma_0 = 4950 \text{ кг}/\text{см}^2$).

Прочность шлакопембетона при отпуске напряжения арматуры со-
ставляла $302 \text{ кг}/\text{см}^2$ при испытании балки нагрузкой - $401 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Балку испытывали в рабочем положении по "пролётной схеме" дву-
мя сосредоточенными силами.

Разрушение балки произошло вследствие раздавливания бетона
скатой зоны при $C = 1,70$.

После разрушения балки по "пролётной схеме" часть балки, не
имевшая существенных повреждений, была испытана по "опорной схеме".

Разрушение балки в этом случае произошло также в результате
раздавливания бетона скатой зоны. Отношение опытной разрушающей
нагрузки к расчётной составило $3,06$, а к теоретической разруша-
щей - $2,52$. Смещение арматурных стержней относительно бетона на
торце балки вплоть до разрушения не наблюдалось.

Технико-экономический анализ показал, что даже при некотором перерасходе цемента в шлакопемзобетоне (в пределах 20-35%), применение его при изготовлении железобетонных конструкций приводит к снижению плановой себестоимости по отдельным видам изделий на 8,5-8%.

Как известно, в качестве решающего показателя при оценке экономической эффективности железобетонных конструкций принимаются приведённые затраты, которые были определены как сумма сравнительной стоимости конструкций "в деле" и капитальных вложений в строительство предприятий по производству железобетонных конструкций и материалов для них по формуле

$$\Pi_i = C_i + E_n K_i , \quad (7)$$

где $E_n = 0,12$ - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений в строительство.

В результате сопоставления сравнительных экономических показателей применения конструкций из шлакопемзобетона и тяжёлого бетона установлено, что применение предварительно напряжённых конструкций из шлакопемзобетона даёт снижение приведённых прямых затрат по сравнению с конструкциями из тяжёлого бетона в расчёте на одно изделие в пределах 9-17% в зависимости от вида и назначения конструкции.

Под руководством и участии автора диссертации было выполнено экспериментальное проектирование здания цеха компрессии кислорода № 2 на заводе ЧМЗ с применением несущих и ограждающих конструкций из шлакопемзобетона, что привело к снижению сметной стоимости строительства объекта на 1,5% по отношению к стоимости строительства с применением конструкций из тяжёлого бетона.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Несмотря на наличие определённых недостатков челябинской шлаковой пемзы, на её основе можно практически получать конструктивный шлакопемзобетон марок 200, 300 и 400 с объёмной массой на 15-20% меньше, чем у тяжёлого бетона.

2. Конструктивный шлакопемзобетон обладает следующими основными физико-механическими свойствами:

в) модуль упругости при сжатии шлакопембетона в пределах 16-84% меньше, чем E_f тяжёлого бетона. Для определения E_f шлакопембетона можно использовать эмпирическую зависимость, предложенную в пункте 2.30 и табл. II первой редакции новой главы СНиП П-В.1;

б) прочность при растяжении по результатам опыта удовлетворительно описывается зависимостью

$$R_p = 0,5 \sqrt[3]{R^2}$$

В практических расчётах R_p рекомендуется принимать по СНиП как для тяжёлого бетона;

в) приизменная прочность шлакопембетона находится в пределах 0,8-0,85 от R независимо от вида мелкого заполнителя.

3. Ползучесть конструктивного шлакопембетона марок 200-400 в условиях проведённых опытов выше ползучести тяжёлого бетона, но не более, чем в среднем на 20%.

4. Результаты исследований сцепления конструктивного шлакопембетона со стержневой арматурой класса А_т-У при кратковременном и длительном действии усилия свидетельствуют о надёжном самозаанкеривании высокопрочных стержней периодического профия в шлакопембетоне. При этом деформативность заделки для образцов из шлакопембетона ниже и проявляется за счёт меньшей податливости бетона - контактного слоя - Δ_f ; в то время, как у тяжёлых бетонов рост величины Δ_f определяется в большей степени общим скольжением стержня (за счёт большей, по сравнению с образцами из шлакопембетона величины Δ_L). Эти же свойства проявляются и при длительном нагружении.

5. Установлено, что длина зоны передачи усилий при отпуске напряжения стержневой арматуры на шлакопембетон зависит от прочности бетона, величины предварительного напряжения и может быть определена по формуле (4).

6. В опытах выявлено, что потери предварительного напряжения арматуры от усадки и ползучести шлакопембетона следует определять по указаниям "Рекомендаций по проектированию конструкций из лёгких бетонов" с учётом изложенных в диссертации рекомендаций.

7. Установлено, что опытные значения выгибов балок от усилий обжатия превышают их теоретические значения, вычисленные в соответствии с рекомендациями СНиП П-В.1-62* в 1,20-1,37 раза.

По данным наших опытов величина выгибов балок из шлакопембетона может быть определена по значению кривизны, определяемой по формуле (5).

8. Расчёт и проектирование предварительно напряжённых изгибаемых элементов из конструктивного шлакопембетона, армированных стержневой арматурой и работающих на действие кратковременных нагрузок, можно с достаточной степенью точности в практических расчётах производить по формулам СНиП П-В.1-62^{*} как для тяжёлого бетона с учётом изложенных в диссертации специфических дополнительных рекомендаций.

Испытания опытных натурных конструкций из шлакопембетона показали, что по прочности, трещиностойкости и жёсткости они удовлетворяют требованиям ГОСТ 8826-66 и подтвердили надёжную совместную работу арматурной стали с конструктивным шлакопембетоном на всех стадиях работы конструкции вплоть до разрушения при достаточном косвенном армировании.

9. На основании результатов длительных испытаний опытных лабораторных балок, а также натурных образцов сплошных панелей перекрытия из шлакопембетона, армированных стержневой арматурой классов А_T-IV-А_T-У можно утверждать, что при эксплуатации шлакопембетонных конструкций под длительными нагрузками нет оснований ожидать каких-либо существенных особенностей по сравнению с конструкциями из тяжёлого бетона.

10. Применение шлакопембетона при изготовлении предварительно напряжённых конструкций приводит к снижению стоимости их по приведённым прямым затратам на 9-17% по отношению к подобным конструкциям из тяжёлого бетона. Однако необходимо добиваться дальнейшего снижения себестоимости челябинской шлаковой пемзы как заполнителя, себестоимость которой в настоящее время остаётся пока ещё относительно высокой по сравнению с себестоимостью её производства на других заводах Союза.

11. Проведённые исследования, а также экспериментальное проектирование здания "Цеха компрессии кислорода № 2" на заводе ЧМЗ с применением несущих и ограждающих конструкций из шлакопембетона подтвердили целесообразность организации производства в широком масштабе предварительно напряжённых конструкций из высокопрочного шлакопембетона, армированных арматурными стержнями периодического профиля.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Стеновая панель 2,4x12 м из шлакопемзобетона. Сборник трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону" № 78, Челябинск, 1969 г. (соавтор Б.А.Евсеев).

2. Исследование плоских сплошных панелей для перекрытий жилых домов серии ТКБу. Сборник трудов ЧПИ: "Исследование по бетону и железобетону", № 78, Челябинск, 1969 г. (соавтор В.П.Чирков).

3. Плита покрытия 3x12 м из шлакопемзобетона, армированная канатами КЗх7(3). Сборник трудов ЧПИ: "Исследования по бетону и железобетону" № 78, Челябинск, 1969 г. (соавтор Б.А.Евсеев).

4. Исследование работы предварительно напряжённых балок из шлакопемзобетона, армированных стержневой арматурой класса А_т-У. Сборник трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону" № 96, Челябинск, 1971 г. (соавтор А.А.Оатул).

5. Плита покрытия 8x12 м из шлакопемзобетона, армированная стержневой арматурой класса А-Ш₃. Сборник трудов ЧПИ: "Исследования по бетону и железобетону" № 96, Челябинск, 1971 г.

6. Испытание предварительно напряжённой балки пролётом 12 м из шлакопемзобетона. Сборник трудов УралНИИСтропроекта: "Железобетонные конструкции", вып.6, Челябинск, 1972 г. (соавтор А.А.Оатул).

7. Сцепление стержневой арматуры класса А_т-У о тяжёлом бетоном и бетоном на шлаковой пемзе. Сборник трудов УралНИИСтропроекта: "Железобетонные конструкции", вып.6, Челябинск, 1972 г. (соавторы В.М.Цехистров, А.А.Оатул).

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

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на XXV научной конференции Ленинградского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института (г.Ленинград, февраль 1970 г.), на XXI, XXII, XXIII и XXIV научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, проходивших в 1969-72 гг.