

05.23.01

30

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи  
УДК 624.012.45.001.4

Демаков Сергей Иванович

ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫЕ ПЛИТЫ ПОКРЫТИЙ  
И ПЕРЕКРЫТИЙ ИЗ ТЯЖЕЛОГО ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО БЕТОНА  
с учетом его прочностных и деформативных свойств

Специальность 05.23.01 - "Строительные  
конструкции, здания и сооружения"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1989

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола

Научный руководитель - заслуженный строитель РСФСР, доктор  
технических наук, профессор ОАТУЛ А.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
ПАХОМОВ В.А.,

кандидат технических наук КУЧЕР Б.В.

Ведущая организация - Киевский НИИСК Госстроя СССР.

Защита состоится 24 января 1990 г., в 10 часов, на заседании  
специализированного совета К.053.13.05 по присуждению ученой  
степени кандидата технических наук в Челябинском политехничес-  
ком институте имени Ленинского комсомола по адресу:  
454044, гор. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 244.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим направить Ваш отзыв по автореферату в двух  
экземплярах по адресу: 454044, гор. Челябинск, пр. Ленина, 76

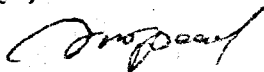
Автореферат разослан "29" декабря 1989 года

Ученый секретарь

специализированного совета

кандидат технических наук,

доцент



Г.В. Трегулов

Актуальность работы. На XXVII съезде КПСС была принята программа по обеспечению жильем к 2000 году всех граждан СССР. Предусмотренный партией и правительством план требует значительного увеличения производства строительных материалов и конструкций.

Одним из эффективных путей реализации намеченных планов является увеличение выпуска железобетонных конструкций из бетонов, позволяющих использовать для их производства отходы различных отраслей промышленности и местные заполнители.

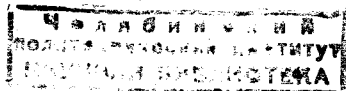
В настоящее время существует обширная сырьевая база для получения вяжущих на основе гранулированных доменных шлаков и различных соединений щелочных металлов, дающих в воде щелочную реакцию. Впервые эти вяжущие и бетоны на их основе получили свое развитие в исследованиях Проблемной НИИЛ грунтосиликатов.

Шлакощелочные бетоны /ШЩБ/, получаемые на основе молотых гранулированных шлаков и щелочных компонентов, обладают рядом положительных свойств. Производство и применение ШЩБ и железобетонных конструкций на их основе обеспечивает экономию цемента, снижение транспортных расходов, стоимости строительства, позволяет утилизировать отходы металлургического и химического производства, улучшая тем самым экологическую обстановку в промышленных регионах.

Однако широкое внедрение конструкций из ШЩБ в практику строительства сдерживается, наряду с иными причинами, недостаточной изученностью вопросов, связанных с назначением расчетных прочностных и деформированных характеристик ШЩБ, поведением железобетонных конструкций из этого материала, особенно при длительном действии нагрузки, влиянием различных видов шлака и щелочных компонентов, состава и условий твердения на физико-механические характеристики ШЩБ и, как следствие, на работу конструкций в целом.

Работа выполнялась по плану научных исследований, проведенных кафедрой железобетонных конструкций Челябинского политехнического института и включена :

- в координационный план научных исследований на 1986-1990 годы НИИЖБ Госстроя СССР по проблемам ползучести и усадки бетона и прикладным задачам железобетона, связанным с длительными процессами;



- в отраслевую союзную научно-техническую программу 0.55.16.264 "Создать и освоить производство шлакощелочных вяжущих, бетонов, железобетонных конструкций и изделий на их основе, в том числе высокопрочных" /задание 03.01, этап С IБ а 3/; 3/; - общесоюзную программу "Разработать и внедрить высокоэффективные строительные материалы и изделия, прогрессивные технологии и оборудования для их производства" /задание 0.35.03/13:02 с II.13/.

Цель работы. Разработать предложения по проектированию и расчету предварительно-напряженных плит покрытия и перекрытия из тяжелого шлакощелочного бетона с учетом специфики его упругопластичных свойств.

Автор защищает Результаты экспериментальных исследований: а/ влияния дозировки составляющих бетонной смеси и режима ТВО на призмную прочность, начальный модуль упругости и структурно-механические характеристики ШЩБ; б/ изменения основных характеристик ШЩБ в течении длительного периода времени; в/ влияния плотности щелочного раствора на усадку и ползучесть ШЩБ; г/ влияния вида шлака на свойства ШЩБ и предварительно-напряженных плит покрытия и перекрытия на его основе при кратковременном и длительном нагружении.

Предложения по проектированию и расчету предварительно-напряженных ребристых плит покрытия и многопустотных плит перекрытия с учетом особенностей упруго-пластических свойств ШЩБ.

Научную новизну работы составляют:

- аналитические и графические зависимости, позволяющие прогнозировать основные механические характеристики ШЩБ в широком диапазоне варьирования составляющих бетонной смеси и режима тепло-влажностной обработки;
- рекомендации по оптимизации состава бетона и режима ТВО с учетом желаемого сочетания показателей свойств;
- экспериментальные данные: о влиянии плотности раствора СШП и условий твердения на характер изменения механических характеристик шлакощелочного бетона во времени; о влиянии плотности раствора СШП на усадку и ползучесть ШЩБ;
- результаты исследований несущей способности, трещиностойкости и деформативности предварительно-напряженных ребристых плит покрытия и многопустотных плит перекрытия из тяжелого ШЩБ при кратковременном и длительном нагружении;
- рекомендации по расчету по второй группе предельных состоя-

ний плит с учетом особенностей упруго-пластических свойств ШЩБ.

Практическое значение работы. На основе полученных аналитических и графических многофакторных зависимостей разработаны рекомендации по подбору состава ШЩБ и выбору режима ТВО с учетом оптимального сочетания физико-механических свойств бетона. Разработаны способы сценки деформаций железобетонных изгибаемых элементов с учетом специфики упруго-пластических свойств ШЩБ на кислых и основных доменных шлаках.

Внедрение результатов исследования. Результаты работы использованы при проектировании и внедрении предварительно-напряженных плит покрытия и многопустотных плит перекрытия из ШЩБ на предприятиях Главжуралстроя, что позволило на 5 тыс. тонн в год снизить дефицит портландцемента. Экономическая эффективность применения ШЩБ на заводе-изготовителе только за счет снижения себестоимости изделий составила 15 тысяч рублей в год.

Апробация работы. Основные результаты выполненной работы докладывались и получили одобрение:

- на третьей Всесоюзной научно-практической конференции "Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции", состоявшейся в г.Киеве 25-27 октября 1989 года;
- на Республиканских научно-технических конференциях "Опыт применения конструкций на основе местных строительных материалов", состоявшихся в г.Севастополе 2-4 февраля и 13-14 апреля 1987 года;
- на Всесоюзных семинарах "Опыт организации производства и перспективы применения шлакощелочных вяжущих, бетонов и конструкций", организованных ИИСИ и УДНП Главжуралстроя в г.Челябинске 1984-1986г.г.;
- на научных конференциях профессорско-преподавательского состава Челябинского политехнического института в 1984-1989г.г.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, списка литературы из 92 наименований, приложения. Работа изложена на 171 странице, содержит 134 страницы машинописного текста, 37 рисунков, 32 таблицы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации и приведена краткая аннотация работы, ее научной новизны, а также основных положений, вынесенных на защиту.

В первой главе изложен краткий анализ современного состояния экспериментальных и теоретических исследований прочности и деформативности шлакощелочных бетонов и предварительно-напряженных железобетонных конструкций на их основе. Приводится обоснование цели и задач исследования.

Исследования прочностных и деформационных свойств шлакощелочных бетонов проводили в Киевском инженерно-строительном институте, НИИЖБе, НИИСИе, Криворожском горнорудном институте, Симферопольском филиале Днепропетровского инженерно-строительного института и др. Анализ выполненных ранее работ показал, что многообразие сырьевых, рецептурных и технологических факторов, а также методика подбора состава бетонной смеси по требуемой прочности готового бетона приводят к существенным различиям в оценке его деформативных свойств. Различный подход в оценке показателей деформативных свойств ШЩБ нашел свое отражение в документах, нормирующих эти показатели, что не позволяет с уверенностью их использовать в практических расчетах.

Результаты кратковременных испытаний конструкций из тяжелого ШЩБ показали, как правило, их повышенную прочность и трещиностойкость по отношению к теоретическим значениям, рассчитанным по методике СНиПа. При этом опытные прогибы в одних случаях были выше, в других ниже, но в целом сопоставимые с расчетными величинами.

Испытания конструкций на длительное действие нагрузки показали как повышенную, так и пониженную по отношению к расчетной их деформативность. Очевидно, причиной этому явились различия в оценке деформативных свойств ШЩБ, используемых при изготовлении опытных образцов, которые не были учтены в расчете.

Таким образом, существующие данные экспериментальных исследований конструкций из тяжелого ШЩБ, в том числе предварительно-напряженных, не позволяют с уверенностью применять положения норм без их корректировки с учетом особенностей прочностных и деформативных свойств различных ШЩБ.

В соответствии с поставленной целью экспериментальные и теоретические исследования были направлены на решение следующих задач:

1. Установление зависимостей механических характеристик ШЩБ от расхода составляющих бетонной смеси и режима тепловлажностной обработки /ТВО/.

2. Разработку рекомендаций по оптимизации состава бетона и режима ТВО с учетом наилучшего сочетания его характеристик.

3. Определение влияния плотности раствора ШЩ на усадку и ползучесть ШЩБ.

4. Экспериментально-теоретические исследования процессов трещинообразования, деформирования и разрушения предварительно-напряженных ребристых плит покрытия и многослойных панелей перекрытия из тяжелых ШЩБ на кислых и основных доменных шлаках при кратковременном и длительном нагружении.

5. Разработка рекомендаций по проектированию и расчету плит с учетом особенностей свойств ШЩБ на различных гранулированных доменных шлаках.

Во второй главе обосновывается методика проведения экспериментов, дается характеристика материалов, опытных образцов, приборов и оборудования, методов изготовления и испытания опытных образцов.

В качестве вяжущего для приготовления бетона использовали доменные гранулированные шлаки Челябинского и Магнитогорского металлургических комбинатов /ЧМК/ и /ММК/ и водный раствор сухой смеси содщелочного шлага /ШЩ/ Тольяттинского химкомбината.

По химическому составу шлаки ЧМК относятся к кислым, а шлаки ММК к основным.

Тонкость помола шлаков ЧМК и ММК контролировалась по прибору ПСХ-2 и составляла 300...310 м<sup>2</sup>/кг.

В качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок Федоровского карьера с модулем крупности, равным 2,19. В качестве крупного заполнителя использовали гранитный щебень фракцией 5-20 Смоленского карьера.

Исследование влияния дозировки составляющих бетонной смеси и режима тепловлажности обработки на механические свойства ШЩБ на шлаке ЧМК проводили с использованием метода математического планирования эксперимента. Планирование эксперимента осуществлялось с использованием некомпозиционного плана с варьированием пяти факторов в трех уровнях. Варьируемыми факторами были приняты:  $X_1$  - расход молотого шлага;  $X_2$  - расход содщелочного шлага /ШЩ/;  $X_3$  - расход песка;  $X_4$  - время предварительной выдержки;  $X_5$  - время изометрического прогрева. Область определения факторов:  $X_1$  - от 275 до 550 кг/м<sup>3</sup>;  $X_2$  - от 170 до 220 л/м<sup>3</sup>;  $X_3$  - от 540 до 800 кг/м<sup>3</sup>;  $X_4$  - от 1 до 6 часов;  $X_5$  - от 0 до 7 часов. Минимальному и максимальному значениям факторов присвоены код соотв.

ответственно - I и + I. Среднему значению фактора из заданной области определения присвоен код - 0.

Для реализации плана испытано 25 серий опытных образцов-призм размером 100x100x400 мм. Каждая серия состояла из трех образцов. Призмы испытывали в возрасте 120-ти суток.

Для определения призмной прочности, начального модуля упругости и структурно-механических характеристик использовали стандартные методики.

Для ШЩБ на основных шлаках ММК исследовали влияние плотности раствора содощелочного плава /СЩП/ и режима ТВО на механические характеристики бетона. Исследования проводили на 6-ти сериях опытных образцов призм, одинаковых по составу бетона.

В первых трех сериях варьировали плотность раствора СЩП, равную соответственно 1100 кг/м<sup>3</sup>; 1150 кг/м<sup>3</sup>; 1200 кг/м<sup>3</sup> при одинаковом режиме ТВО. Во второй, четвертой и пятой сериях варьировали режим ТВО при одинаковой плотности раствора СЩП, равной 1150 кг/м<sup>3</sup>. Шестая серия образцов не подвергалась тепловой обработке и хранилась в естественных условиях.

Образцы подвергали кратковременным испытаниям в различном возрасте от I-х до 360-ти суток. В результате определяли призмную прочность  $R_{\beta}$ , начальный модуль упругости  $E_{\beta}$ , нижний и верхний уровни микротрещинообразования  $\eta_{\text{сн}}$  и  $\eta_{\text{св}}$ .

Для определения характеристик усадки и ползучести ШЩБ, а также для выявления степени влияния плотности раствора СЩП на величины этих характеристик, длительным испытаниям подвергались три серии неизолированных призм размером 100x100x400 мм. Каждая серия состояла из трех загруженных и трех незагруженных образцов-близнецов. В сериях варьировалась плотность водного раствора СЩП. Для серий 1, 2 и 3 она равнялась соответственно 1100 кг/м<sup>3</sup>; 1150 кг/м<sup>3</sup> и 1200 кг/м<sup>3</sup>.

Продольные деформации ползучести определяли путем испытаний призм длительно действующей нагрузкой в пружинных установках. Загружение призм производилось в возрасте одних суток с таким расчетом, чтобы интенсивность обхатия бетона в призмах соответствовала уровню сжимающих напряжений, равному 0,3 от  $R_{\beta}$ .

Исследования предварительно-напряженных ребристых плит покрытия размером 1,5 x 6 м из тяжелого шлакощелочного бетона на доменном шлаке Челябинского металлургического комбината и много-



пустотных плит перекрытия размером 1,2 x 6 м из ШЩБ на доменном шлаке Магнитогорского металлургического комбината проводились на лабораторной базе Челябинского металлургического института и кафедры железобетонных конструкций ЧПИ.

Исследования включали кратковременные / две плиты покрытия и две перекрытия / и длительные испытания / одна плита покрытия и одна перекрытия /. Испытания проводили по схеме свободно опертой плиты, равномерно распределенной нагрузкой. Величину длительной нагрузки принимали равной половине разрушающей, полученной при кратковременном испытании.

Опалубочные размеры и армирование опытных плит покрытия и перекрытия соответствовали типовым сериям 1.465-7, вып.3, марки /ПАТ-V-I, 5 x 6 / - 3 и 1.141, вып.58, марки ПК8-60,12 из цементного бетона.

Плиты изготавливались на заводе КСМИ ПСМО Челябинского металлургического института по существующей технологии для аналогичных плит из цементных бетонов.

В процессе испытаний плит определяли: прогибы в середине и третях пролета; осадку опор; вытягивание стержней в бетон на торцах плит; деформации бетона в средней части наружных боковых граней плит; ширину раскрытия трещин.

Механические характеристики бетона плит определяли по результатам кратковременных испытания кубов и призм, изготовленных совместно с плитами. Кубы и призмы подвергали испытаниям в различном возрасте от 1-х до 390 суток по три образца на каждый срок испытаний.

В третьей главе излагаются результаты исследования влияния технологических факторов на прочностные и деформативные свойства шлакощелочного бетона.

По данным спланированного эксперимента выведены зависимости механических характеристик ШЩБ от принятых варьируемых факторов.

Например: зависимость призмной прочности

$$R_B = 22,2 + 8,7X_1 - 3,2X_2 - 0,27X_3 - 0,44X_4 + 2,6X_5 + 4,4X_1^2 - 1,07X_1X_2 - 1,4X_1X_3 + 0,12X_1X_4 - 0,65X_1X_5 - 0,45X_2^2 - 0,7X_2X_3 - 0,16X_2X_4 - 1,2X_2X_5 + 3,1X_3^2 + 1,81X_3X_4 + 0,46X_3X_5 + 3,9X_4^2 + 0,94X_4X_5 - 4,8X_5^2 \quad /I/$$

Зависимость начального модуля упругости

$$E_B = 19,76 + 1,95X_1 - 4,2X_2 + 0,15X_3 + 0,9X_4 + 1,48X_5 - \\ - 1,84X_1^2 - 0,68X_1X_2 + 0,22X_1X_3 - 0,33X_1X_4 - 0,74X_1X_5 + \\ + 2,7X_2^2 - 0,53X_2X_3 - 0,71X_2X_4 + 0,43X_2X_5 + 2,02X_3^2 + \\ + 1,46X_3X_4 + 0,36X_3X_5 - 1,75X_4^2 - 0,6X_4X_5 - 2X_5^2 \quad /2/$$

Подставляя в уравнения /1/ и /2/ значения факторов  $X_1 \dots X_5$  в кодированном виде, получим значения  $R_B$  в МПа и  $E_B \cdot 10^{-3}$  МПа.

Полученные уравнения /1/ и /2/ представляют собой интерполяционные модели, которые позволяют определять с заданной погрешностью величины  $R_B$  и  $E_B$  проектируемого состава ШЩБ в принятых интервалах варьирования факторов.

На основе уравнений построены номограммы по определению механических характеристик бетона.

По номограммам и уравнениям можно получать целую гамму шлакощелочных бетонов с разнообразными сочетанием показателей его механических свойств.

Однако полученные уравнения и номограммы не позволяют проводить оптимизацию по всем исследованным характеристикам бетона /откликам/ одновременно. Для решения этой задачи был использован метод свертки откликов к обобщенной функции желательности, изложенный в работах Адлера Ю.П. Обобщенная функция желательности  $D$  является некоторым абстрактным построением. Ее можно рассматривать как модель психологической оценки пригодности бетона с данным набором свойств для использования его в заданных условиях /например, в конструкции плиты покрытия/.

В основе построения функции желательности лежит преобразование натуральных значений частных откликов  $R_B, E_B, \eta_{отс}^0$  и  $\eta_{отс}^y$  в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности /табл. I/.

Таблица I

Шкала желательности

Желательность	Значения желательности	Значения откликов			
		$R_B, \text{ МПа}$	$E_B \cdot 10^{-3} \text{ МПа}$	$\eta_{отс}^0$	$\eta_{отс}^y$
Очень хорошо	1,00-0,80	37,0	35,0	0,50	0,90
Хорошо	0,80-0,63	35,5	30,0	0,46	0,83
Удовлетворительно	0,63-0,37	28,5	25,1	0,40	0,75
Плохо	0,36-0,20	12,0	13,0	0,30	0,60
Очень плохо	0,20-0,00	8,5	10,0	0,18	0,50

Шкала желательности /таб. I/ является психофизической шкалой. Ее назначение - установление соответствия между физическими и психологическими значениями откликов. Физические значения откликов  $R_{\theta}$   $E_{\theta}$ ,  $\eta_{\text{сж}}^{\circ}$ ,  $\eta_{\text{сж}}^{\text{в}}$  /таб. I/ преобразовали в безразмерные величины функции  $d_i$ , называемой частной функцией желательности.

Шкала частной функции желательности имеет интервал от нуля до единицы. Значение  $d_i = 0$  соответствует абсолютно неприемлемому уровню данного свойства, а значение  $d_i = 1$  - самому лучшему значению свойства.

После преобразования физических значений в частные функции желательности определили значения обобщенной функции желательности  $D$  по формуле, предложенной Харрингтоном:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \quad /3/$$

На основе полученных значений выведена зависимость  $D$  от принятых влияющих факторов

$$D = 0,517 + 0,119X_1 - 0,075X_2 + 0,03X_3 + 0,013X_4 + 0,045X_5 + 0,01X_7 - 0,01X_1X_2 - 0,002 X_1X_3 - 0,017X_1X_4 - 0,011X_1X_5 - 0,015X_2^2 + 0,003X_2X_3 + 0,004X_2X_4 + 0,007X_2X_5 - 0,024X_3^2 + 0,023X_3X_4 + 0,008X_3X_5 + 0,009X_4^2 + 0,002X_4X_5 - 0,052X_5^2,$$

где  $X_1 \dots X_5$  - значения факторов в кодированном виде.

По наибольшему значению  $D$  определяется наилучшее сочетание факторов, которое обеспечивает оптимизацию с одновременным учетом всех откликов.

Обобщающие данные по структурно-механическим характеристикам, полученные автором для ШЩБ на кислом шлаке /ЧМК/, показывают, что при нагружении образцов сжимающей продольной нагрузкой микротрещины появляются при уровне напряжений  $\eta_{\text{сж}}^{\circ} = 0,18 \dots 0,46$ , а прогрессирующее микротрещинообразование происходит на уровне  $\eta_{\text{сж}}^{\text{в}} = 0,5 \dots 0,83$ .

Для всех серий образцов из ШЩБ на доменном шлаке ММК произошло нарастание призмной прочности  $R_{\theta}$  во времени. Увеличение плотности раствора ШЩБ в бетонной смеси при прочих равных условиях приводит к увеличению  $R_{\theta}$ . Призмы с плотностью раствора ШЩБ, равной  $1200 \text{ кг/м}^3$ , имели большую прочность соответственно на 30% и 10%, чем призм с плотностью раствора ШЩБ  $1100 \text{ кг/м}^3$  и  $1150 \text{ кг/м}^3$ . Наибольшей  $R_{\theta}$  обладают образцы, пропаренные по режиму с плавным подъемом и опусканием температуры в камере. Для всех серий образ-

цов отмечено снижение значений  $E_B$  с возрастом бетона. При этом отмечалось, что снижение значений  $E_B$  для образцов с минимальной плотностью раствора ШЩП прекратилось после 240-ка суток, а для образцов из ШЩБ с плотностью  $1200 \text{ кг/м}^3$  продолжали снижаться вплоть до 360-ти суток. В среднем для всех серий снижение  $E_B$  составило 20%.

На следующий день после ТВО структурно-механические характеристики ШЩБ на шлаке ММК для всех серий образцов характеризуются высокими значениями, которые изменялись в пределах:  $\eta_{сис}^0$  от 0,43 до 0,7;  $\eta_{сис}^v$  от 0,76 до 0,97. Затем отмечалось снижение значений  $\eta_{сис}^0$  и  $\eta_{сис}^v$  ШЩБ с возрастом образцов. Структурно-механические характеристики ШЩБ, полученные в результате испытаний призм в возрасте 360-ти суток, изменялись в пределах:  $\eta_{сис}^0$  от 0,2 до 0,44;  $\eta_{сис}^v$  от 0,6 до 0,65.

Наименьшее снижение уровней микротрещинообразования и начального модуля упругости с возрастом этого бетона может быть достигнуто путем снижения плотности раствора ШЩП в бетонной смеси и использования "мягких" режимов тепловлажностной обработки с плавным подъемом и снижением температуры.

На основании проведенных длительных испытаний призм установлено, что наименьшими предельными значениями деформаций усадки обладали призмы, изготовленные из шлакощелочного бетона с наименьшей плотностью раствора ШЩП. Предельные значения деформации усадки

$\epsilon_{shu}$  призм, изготовленных из ШЩБ с плотностью раствора ШЩП, равной  $1150 \text{ кг/м}^3$  достигли в среднем величины  $64 \times 10^{-5}$ , что в 2,3 раза превысило среднюю величину  $\epsilon_{shu} = 27 \times 10^{-5}$  призм, изготовленных из ШЩБ с плотностью раствора ШЩП, равной  $1100 \text{ кг/м}^3$ .

Влияние плотности раствора ШЩП на ползучесть проявляется в той же мере, что и на усадку. При приблизительно одинаковых прочности и возрасте призм в момент загрузки значения мер и характеристик ползучести образцов из шлакощелочных бетонов с плотностью  $1100 \text{ кг/м}^3$  в среднем на 20% ниже, чем образцов с плотностью  $1200 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, предельные значения деформаций усадки и ползучести ШЩБ рекомендуется определять с учетом плотности вводимого в бетонную смесь щелочного раствора.

В четвертой главе приводятся результаты исследований прочностных и упругоэластичных свойств шлакощелочного бетона при кратковременных нагрузках.

Коэффициент вариации прочности кубов, подвергнутых тепловлаж-

ной обработке и испытаниях в возрасте 1-х и 28-ми суток, равнялся соответственно 0,09 и 0,07, а кубов нормального твердения -- 0,164.

Коэффициент вариации призмной прочности пропаренного ШЩБ равнялся 0,18, что в два раза превысило значение коэффициента вариации кубиковой прочности. При этом объем выработки образцов призм в три раза был меньше объема выборки образцов кубов. Повышенный по сравнению с кубиковой прочностью разброс призмной прочности объясняется, по-видимому, дополнительным фактором, связанным с точностью центровки призмы в прессе.

Коэффициент перехода к стандартным кубам  $\gamma$  для исследуемого ШЩБ составил 0,94, что несколько ниже значения коэффициента  $\gamma$  для тяжелых цементных бетонов, равного 0,95.

По результатам испытания кубов и призм и ШЩБ построена корреляционная зависимость  $R_B = f(R)$ , которая дает значение коэффициента призмной прочности, равное  $K_B = 0,68$ .

Для определения прочности ШЩБ на растяжение  $R_{st}$  проведены испытания балочек на изгиб двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета. В процессе испытания определяли деформации бетона на растянутой и сжатой гранях образца в зоне чистого изгиба. При определении  $R_{st}$  исходили из следующих положений: сечения при изгибе остаются плоскими; в бетоне растянутой зоны развиваются неупругие деформации, эпюра нормальных напряжений прямоугольная; в бетоне сжатой зоны деформации приняты упругими, эпюра нормальных напряжений треугольная. В расчете использовались экспериментальные значения предельных деформаций бетона в сжатой и растянутых зонах, равные  $\epsilon_{всж} = 0,00030$ ,  $\epsilon_{стж} = 0,00035$ . Из уравнений равновесия внутренних и внешних силовых факторов в предельном состоянии определили: высоту сжатой зоны:  $X = 0,47h$ ; коэффициент, характеризующий упруго-пластическое состояние бетона в растянутой зоне  $\eta_{st} = 0,4$ ; прочность бетона на растяжение  $R_{st} = 2,45$  МПа.

Упругопластичный момент сопротивления  $W_{pl}$  нормального сечения относительно растянутой кромки образца равен  $8h^2/13,25$ . Коэффициент  $L$ , характеризующий соотношение упругопластического и упругого моментов сопротивления сечения, равен 1,85. Полученные значения  $\eta_{st}$ ,  $W_{pl}$  и  $L$  позволяют сделать вывод о том, что ШЩБ обладают повышенной по отношению к цементному бетону пластической деформативностью при растяжении.

В результате проведенных исследований установлено, что предельная сжимаемость пропаренного тяжелого ШЩБ характеризуется повышенными значениями по отношению к тяжелому бетону на портландцементе.

Предельные деформации ШЩБ на доменном шлаке ММК при нормальных температурно-влажностных условиях хранения образцов увеличились за год в 1,5-2 раза.

На основании экспериментальных данных получены формулы для расчетного определения предельной сжимаемости бетона  $\Delta \delta_{сш}$  в мм/м в зависимости от возраста  $\tau$  /5/, для ШЩБ на шлаке ММК и зависимости от призмочной прочности  $R_g$  /6/ - для ШЩБ на шлаке ЧМК:

$$\Delta \delta_{сш} = 1,42 + 0,44 \lg \tau ; \quad /5/$$

$$\Delta \delta_{сш}(R_g) = \frac{65}{0,44 R_g + 9,72} \quad /6/$$

В пятой главе приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований предварительно-напряженных ребристых плит покрытия из ШЩБ на доменном шлаке ЧМК и предварительно-напряженных многопустотных плит перекрытия из ШЩБ на доменном шлаке ММК.

Установлено, что разрушение плит перекрытия происходит по нормальному сечению по растянутой зоне при плавном увеличении прогиба, а ребристых плит покрытия по наклонному сечению от действия поперечных сил, при этом разрушение носило хрупкий характер. Из анализа опытных и теоретических данных следует, что расчет прочности изгибаемых предварительно-напряженных элементов из тяжелого шлакощелочного бетона можно производить по методике норм с учетом прочностных показателей этих бетонов.

Анализ экспериментальных и теоретических данных о трещиностойкости ребристых плит и панелей показал, что расчет по методу норм на 10-30% занижает фактическую трещиностойкость этих конструкций и подтвердил необходимость разработки более точной методики их расчета по образованию трещин.

Учитывая повышенную по отношению к цементному бетону пластическую растяжимость ШЩБ, при расчете момента образования нормальных трещин рекомендуется наибольшее относительное удлинение крайнего растянутого волокна бетона принимать равным  $2,5 R_{цт} / E_b$ .

При кратковременном нагружении, опытные прогибы конструкций до появления трещин в растянутой зоне / в диапазоне 0,5-0,6 от

разрушающей  $R_u$  / удовлетворительно совпадают с теоретическими, рассчитанными по формулам СНиПа. На стадиях кратковременного нагружения от  $0,6 R_u$  вплоть до  $R_u$  расчет по деформациям следует производить с учетом корректировки коэффициента  $\nu$ . Установлено, что расчет кривизны  $1/r$  / по формуле /160/ СНиП без учета снижения коэффициента  $\nu$  на стадии нагружения, близкой к разрушающей, приводит к занижению значений теоретических прогибов примерно в 1,5 раза.

В работах Гвоздева А.А. зависимость коэффициента  $\nu$  от уровня нагружения для изгибаемых элементов из тяжелого бетона рекомендуется принимать в виде  $\nu = f(\sigma_c / R_c)$ . Данная зависимость характеризуется уменьшением значений  $\nu$  с ростом уровня напряжений  $\sigma_c$  в скатой зоне бетона  $\sigma_c / R_c$ . Однако данная зависимость не может быть получена непосредственно из опыта, так как в настоящее время отсутствуют надежные способы определения напряжений прямыми измерениями. Поэтому о величине  $\sigma_c / R_c$  можно судить только на основе теоретических построений. Для практического применения, по нашему мнению, удобнее пользоваться зависимостью коэффициента  $\nu$  от уровня нагружения в виде  $\nu = f(M / M_{кр})$ . Данная зависимость характеризуется уменьшением значений  $\nu$  с увеличением соотношения моментов  $M$  и  $M_{кр}$ .

Из анализа сопоставления опытных и рассчитанных прогибов коэффициент  $\nu$ , характеризующий упруго-пластическое состояние бетона скатой зоны, рекомендуется определять в зависимости от соотношения  $M / M_{кр}$  по формуле

$$\nu = -0,4 (M / M_{кр})^2 + 0,9 (M / M_{кр}) - 0,05 \quad /7/$$

Пределы изменений  $M / M_{кр}$  от 1 до 2.

В процессе длительной выдержки опытный прогиб ребристой плиты покрытия оказался на 25% меньше, а многолустотной панели - на 27% больше теоретического, рассчитанного по рекомендациям норм.

Столь значительное расхождение в теоретической оценке деформативности данных конструкций объясняется, на наш взгляд, различием деформативных свойств шлакощелочных бетонов, из которых они были изготовлены. За период длительных испытаний ребристой плиты покрытия призмочная прочность  $R_b$  на доменном шлаке ЧМК возросла с 18,5 МПа до 26,7 МПа, а начальный модуль упругости  $E_b$  увеличился с  $18,4 \times 10^3$  МПа до  $21,5 \times 10^3$  МПа.

За период длительных испытаний многолустотной плиты перекрытия  $R_b$  ШБ на доменном шлаке ЧМК возросла с 27,7 МПа до 33,0 МПа, а  $E_b$  снизился с  $26,1 \times 10^3$  до  $16 \times 10^3$  МПа.

0195865

Снижение упругой характеристики с возрастом ШЩБ на доменном шлаке ММК, отмеченное также в третьей главе диссертации, является его отличительной особенностью по отношению к ШЩБ на доменном шлаке ЧМК и по отношению к цементным бетонам.

Из сопоставительного анализа теоретических и экспериментальных данных следует, что при расчете плиты перекрытия по методу норм не был учтен дополнительный прогиб от увеличения во времени упругих деформаций в ШЩБ на шлаке ММК, который составил в данном случае около 30% от прогиба, обусловленного длительной ползучестью бетона.

На основании проведенных исследований, расчет кривизны изгибаемых элементов из тяжелого ШЩБ на шлаках ММК и ЧМК от постоянных и длительных временных нагрузок рекомендуется производить по формуле

$$(1/2)_2 = \frac{(4\beta_2 + 4\beta_3) \cdot M}{4\beta_1 \cdot E_B \cdot J_{red}} \quad , \quad 18/$$

здесь  $4\beta_3$  - коэффициент, учитывающий влияние модуля упругости на деформации элемента без трещин и принимаемый равным для шлакощелочных бетонов: на молотом шлаке ММК - 0,25; на молотом шлаке ЧМК - 0;  $E_B$  - модуль упругости бетона в возрасте 120 суток. Коэффициенты  $4\beta_1$  и  $4\beta_2$  определяются согласно п.4.24 СНиПа.

Колебания модуля упругости ШЩБ происходят наиболее интенсивно в первые 120 суток, поэтому в формулу /12/ рекомендуется вводить значение  $E_B$  для возраста бетона, равного 120 суткам.

В шестой главе приводится краткая характеристика объекта внедрения и расчет экономической эффективности от внедрения разработанных конструкций. Результаты исследований прошли промышленную проверку и внедрены на комбинате строительных и монтажных изделий ПСМО Челябинского металлургического завода. Годовой экономический эффект только в сфере производства конструкций составил 15 тыс. рублей.

Основные выводы по результатам работы. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили получить следующие теоретические и прикладные результаты:

1. Получены зависимости основных механических характеристик ШЩБ на шлаке ЧМК от состава бетонной смеси по массе и режима тепловлажностной обработки, которые позволяют прогнозировать данные характеристики в широком диапазоне варьирования технологических факторов;

2. Получена математическая модель по оптимизации состава и ре-



жима тепловлажностной обработки с учетом желаемого сочетания показателей свойств ШЩБ по шкале ЧМК.

3. Получены данные об изменении механических характеристик пропаренного шлакощелочного бетона на доменном шлаке Магнитогорского металлургического комбината с возрастом бетона. Установлено, что за I год хранения образцов в нормальных условиях переменная прочность бетона  $R_B$  возрасла в среднем на 20%, при этом значения характеристик  $E_B$ ,  $\sigma_{ср}$  и  $\sigma_{сж}$  снизилась соответственно на 20%, 30%, 60%, а предельная снижаемость образцов  $\Delta_{всн}$  возрасла в 1,5-2 раза. Наиболее интенсивное изменение перечисленных выше характеристик происходило в возрасте бетона до 120 суток. Поэтому возраст шлакощелочного бетона, равный 120 суток, рекомендуется принимать в качестве базового, для которого определяются показатели свойств данного бетона.

4. Установлено, что увеличение плотности раствора ШЩ в бетонной смеси с  $1100 \text{ кг/м}^3$  до  $1200 \text{ кг/м}^3$ , при прочих равных условиях, приводит к увеличению деформаций усадки в 2,3 раза, а деформаций ползучести в 1,2 раза.

5. Повышенная по отношению к цементному бетону пластическая растяжимость ШЩБ увеличивает момент трещинообразования изгибаемых элементов на его основе, поэтому при расчете трещиностойкости нормальных сечений таких элементов по методу норм рекомендуем наиболее относительное удлинение крайнего растянутого волокна бетона принимать  $2,5 R_B / E_B$ .

6. Отмечены существенные колебания значений начального модуля упругости у равнопрочных шлакощелочных бетонов, которые отличались по составу бетонной смеси и условиям твердения. Исходя из этого, при проектировании конструкций из ШЩБ особое внимание следует уделять нормированию значений  $E_B$ .

7. Расчет на прочность предварительно-напряженных плит покрытия и перекрытия из тяжелого ШЩБ рекомендуется производить по методике норм.

8. Расчет кривизны изгибаемых элементов из ШЩБ от длительного действия нагрузки следует производить с учетом влияния модуля упругости на деформации элемента.

Разработанные на основе проведенных исследований рекомендации по расчету деформаций таких элементов, позволяют учитывать особенности упруго-пластических свойств ШЩБ на кислых и основных доменных шлаках.

9. Полученные в работе результаты использованы при проектировании и расчете предварительно-напряженных плит покрытия и перекрытия из тяжелых бетонов на шлакощелочном вяжущем. Опыт внедрения таких конструкций показал высокую эффективность и целесообразность их применения.

Список научных трудов

1. Миловидов В.И., Демаков С.И. Экспериментальное определение параметрических уровней напряжений в шлакощелочном бетоне // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям. - Челябинск: ЧПИ, 1985.

2. Демаков С.И., Миловидов В.И., Горбунов Н.И. Проектирование состава и режима тепловлажностной обработки с оценкой прочностных и деформативных характеристик шлакощелочного бетона // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям. - Челябинск: ЧПИ, 1986.

3. Миловидов В.И., Демаков С.И. и др. Исследования предварительно-напряженной ребристой плиты покрытия из шлакощелочного бетона // Экономия топливно-энергетических ресурсов в промышленности сборного железобетона / Материалы семинара. - Челябинск, УДНП, 1985. - с 14-16.

4. Демаков С.И., Миловидов В.И., Оатул А.А. Предварительно-напряженные конструкции из тяжелых шлакощелочных бетонов // Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции. / Тезисы докладов Всесоюзной конференции. - Киев: КИСИ, 1989. - с 121-122.

