

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО  
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

АШРАБОВ Ашвар Аббасович

УДК 624.012.4/5:667.973/

ДЕФОРМАЦИИ И ПРОЧНОСТЬ ЛЕГКОГО БЕТОНА  
И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ  
МИКРО-И МАКРОСТРУКТУРНЫХ ТРЕЩИН

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  
доктора технических наук



ет место в оценке сопротивления железобетонных элементов с трещинами в зоне действия поперечных сил.

Недостаточность исследований в этом направлении является серьезным препятствием для повышения надежности и долговечности соответствующих расчетов и спонков, в том числе и ориентированных на использование современных вычислительных комплексов и ЭВМ.

Целью диссертационной работы является: разработка комплекса новых физических представлений о прочности и процессах деформирования и разрушения тяжелых и легких конструктивных бетонов сплошной структуры и их компонентов в рамках дельта-модели теории прикладной теории их сопротивления как общей основы для сопоставления методов расчета бетонных и железобетонных конструкций; научная разработка и экспериментальное обоснование новых физических соотношений, моделей и инженерных методов расчета для бетонных и железобетонных элементов с микро- и макротрещинами, обеспечивающих более правдивую оценку их несущей способности и жесткости на всех этапах работы вплоть до разрушения.

Достижению поставленной цели является теоретическим обоснованием и решением крупной научной проблемы в области расчета, проектирования и производства железобетонных конструкций, направленной на снижение материалоемкости строительства и импозит возмознородноэкономичное значение, поскольку позволяет решить следующую задачу:

- исследовать и обосновать теоретически и экспериментально механизмы и закономерности позитивного трещинообразования и разрушения материала для оценки и прогнозировании прочности и деформаций легкого бетона и его компонентов для одностороннего критического и двустороннего статического нагружения с учетом структуры материала;
- разработать комплекс моделей, основанных на методах механики разрушения, структурно-материального и вероятностно-статистического анализа, описывающих свойства и поведение бетонных и железобетонных элементов, содержащих трещины в микро- и макро-структуре; сформулировать основные принципы и алгоритмы их реализации в практических расчетах;
- создать необходимые приложения для расчета бетонных и железобетонных конструкций, исходя из реальных физических представлений о процессах их деформирования и разрушения, в т.ч. также факти-

ческого распределения напряжений и смещений в сечениях с трещинами;

- выявить и использовать существенные особенности сопротивления и резервы повышения прочности проектируемых бетонных и железобетонных элементов с макротрещинами при поперечном изгибе; повысить достоверность расчетных оценок их напряженно-деформированного состояния с учетом нелинейных свойств и структуры материалов на счет применения теоретически и экспериментально обоснованных физических моделей и расчетных зависимостей взамен установленных частных эмпирических коэффициентов и формул;
- выявить результаты исследований в практику проектирования, расчета и изготовления конструкций;

Сравнительные экспериментальные исследования проводились на отдельных образцах из тяжелых бетонов, конструктивных кермактов бетонов сплошной структуры, а также на образцах из растворной матрицы и цементного камня.

#### Абстракт:

- Результаты и методологию комплексных экспериментальных исследований прочности, деформативности и трещиностойкости конструктивных керамзитобетонов и их компонентов при кратковременном одностороннем и двустороннем, а также длительном одностороннем статическом нагружении с учетом влияния структуры материала;

- Особый подход к прогнозированию прочностных и деформативных свойств и моделированию процессов трещинообразования и разрушения легкого бетона сплошной структуры, основанный на аналитических и феноменологических зависимостях и предельных теории и технологии бетона в сочетании с применением методов линейной упругой механики разрушения неоднородных многокомпонентных композиционных материалов тела бетона, а также многофакторного статистического и структурно-материального моделирования;

- Эффективные приложения экспериментально-теоретической оценки параметров трещиностойкости, а также особенностей процессов развития трещин в микро- и макроструктуре материала, образуемых в условиях деформирования и разрушения легких конструктивных бетонов под нагрузкой;

- уточненные аналитические зависимости для оценки и прогно-

зирования крепкобетонной и длительной прочности и полноты при склейке и растлении керамзитобетона и его компонентов, учитывающие структуру материала, нарастающие его прочности во времени и кинетику встречаемых структурных процессов;

- общие представления о роли и особенностях влияния механизма контактного взаимодействия берегов макротрещины на напряженно-деформированное состояние и сопротивление железобетонных элементов при срезе;

- результаты и методику сравнительных экспериментальных исследований прочности и жесткости при срезе бетонных и железобетонных дисков и балок с трещинами с учетом влияния структуры материала;

- новую диалектическую модель контактного взаимодействия в трещинах железобетонных элементов, основанную на общих физических соотношениях и разрабатываемых уравнениях, отражающих реальное расцепление зависимости между напряжениями и смещениями в трещинах и связующем на полученных и имитируют экспериментальных данных о деформировании бетонных и железобетонных дисков с трещинами при сдвиге;

- иконографный способ определения компонентов сопротивления железобетонных нагруженных элементов премоусловного и таврового сечения допустимо поперечного изгиба;

- расчетные схемы и алгоритмы, отражающие вышесказанный характер работы и форма разрушения железобетонных балок с трещинами на основе использования деформационной модели взаимодействующих балок и принципов распределения энергии в элементах рассматриваемой системы.

Научная новизна работы. Сопокущность приведенных в диссертации научных результатов можно классифицировать как новые научные направления в развитии и совершенствовании бетонных и железобетонных конструкций. Среди них выделяются:

в области теории бетона и железобетона.

- развитие физических основ теории разрушения и деформирования латких бетонных плотной структуры и их компонентов, безупречней на представленных механизмах неоднородных многокомпонентных сред и линейной механики разрушения, в том же на результатах структурно-математического и многофакторного статистического моде-

литологии;

- математические модели и принципы их построения и использования для прогнозирования кратковременной и длительной прочности и деформаций легкого бетона, основанные на сочетании вероятностно-статистических методов с апробированными физическими и феноменологическими предельными и зависящими;

- творческие обоснование оптимальных соотношения и взаимосвязи между напряженными и смещенными берегами в трещинах бетонных и железобетонных элементов при сдвиге;

- разрабатываемые методы склейки и модели контактного взаимодействия берегов трещин в бетоне и железобетоне, учитывающие структурные особенности и прочность бетона, характер армирования и ширину начального раскрытия трещин;

в области методов расчета бетонных и железобетонных конструкций;

- продолжение новой аналитической теории и развития деформации взаимосвязи между деформациями и напряжениями для нагруженного и его компонентов при кратковременном статическом нагружении с учетом влияния микроструктуры материала;

- получение комплекса новых экспериментальных данных о прочностных, деформационных и структурно-механических характеристиках железобетонных различной микроструктуры при одноосном и многоосном кратковременном нагружении и при длительном одноосном статическом сжатии и растяжении;

- оформленные новые подходы и полученные на их основе выражения для оценки и прогнозирования кратковременной и длительной прочности легкого конструкционного бетона плотной структуры и его компонентов при одноосном сжатии и растяжении;

- впервые разработанные функциональные зависимости между напряжениями и смещениями в трещинах бетонных и железобетонных элементов, предназначенные для использования в расчетах их напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов;

- предложенный новый способ расчета прочности на поперечную силу железобетонных балок с разнородным армированием и формой сечения;

в области методов исследования бетонных и железобетонных конструкций;

ных свойств, в также исследовало связания материаломкости бетонов и железобетонных конструкций в результате качественного уточнения их расчетных схем.

Предложенные методы и рекомендации позволяют решить ряд прикладных задач, связанных с решением области комплексного применения легких бетонов в практике строительства, в особенности общестроительных работ. При соответствующем использовании результатов исследований предложены методы позволяющие повысить расчетную несущую способность некоторых видов железобетонных элементов и получать экономию материальных ресурсов в целом по стране и снижению стоимости конструкций, исчисляемой миллионами рублей.

Результаты и методики исследований использовались. Результаты исследований при разработке ГОСТ "Бетон. Методы определения характеристик трещиностойкости" (вызванные разрушениями) при статическом нагружении, стандарта МД "Характеристики трещиностойкости бетонов при кратковременном статическом нагружении" Государственной орденом обеспечения единства измерений Государства СССР, в стандарте СНБ "Бетон. Методы определения механических характеристик при кратковременном нагружении", подготовленных предпринимателям стран - членам СЭВ в рамках тома Б.7 "Движно-магнитические свойства бетона и арматуры" плана координации "С<sub>1</sub>-С<sub>2</sub>" - легкого бетона при кратковременном сжатии, подготавливаемых при ИИЖК Государства СССР, в "Стандартной методике определения прочности и границах макротрещинообразования в бетоне методом структурно-миктационного моделирования", подготовленных НИИСТРИ Государства СССР. Отдельные рекомендации по исследованию поведения в НИИЖ Государства СССР и приняты для использования при разработке новой редакции норм проектирования бетонных и железобетонных конструкций. Результаты исследований нешли практическое применение при научном обосновании расчетов и проектировании рядов железобетонных зданий и сооружений.

Результаты диссертационных работ использованы также при написании учебников "Строительные конструкции" и "Железобетонные и каменные конструкции", учебного пособия "Элементы механики разрушения бетонов", в также при чтении лекций и подготовке методических указаний по спецкурсу "УДБС - Учение-исследования-дальнейшая работа студентов" и лекциями "Строительные конструкции".

- способ, средства изучения и экспериментальные данные, полученные в вышеназванных исследованиях о влиянии структурных особенностей, макро- и микротрещин на прочность и деформацию бетонов при кратковременном и длительном нагружении и соотношении нагружения;

- рекомендации по экспериментальной оценке характеристик трещиностойкости бетонов о расчетной прочности, основанных на практической реализации методов механики разрушения материалов; - общие приемы составления и использования разносторонних расчетных и теоретических моделей, расчетных методов и алгоритмов структурного, многофакторного статистического и миктационного анализа поведения бетонов и железобетонных элементов при нагружении;

- методика экспериментальной оценки сил контактного взаимодействия (взаимодействия) и порожений в трещинах на различных уровнях нагружения бетонных и железобетонных элементов, в том числе и порол разрушениям.

Практическая ценность и общественная работа определяется заслугами производства. На основе комплексных проведенных теоретических и экспериментальных исследований были выявлены определенные закономерности трещинообразования, механизмы прочности и деформации легких бетонов и их компонентов при длительном сжатии и разрушении. Установлены некоторые новые особенности работы бетонных и железобетонных элементов в стадии после образования трещин, позволяющие учесть в определяющих расчетных соотношениях физическую нелинейность и анизотропию, обусловленные смещением бетонов и жесткостью арматуры и бетонов в трещинах. Эти исследования создали основу для дальнейшего развития современной механики деформирования и разрушения бетонов и железобетона, позволяющие выявить резервы несущей способности и повысить надежность элементов напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций. На практике это обеспечивает возможность при одинаковых затратах проектировать более надежные конструкции, а при заданной надежности снизить затраты на создание конструкций.

Результаты разработанных моделей, методов и программ расчета позволяют также получить экономический эффект за счет снижения трудоемкости проектирования, замены некоторых испытательных образцов металлотермометрами и прочими устройствами, позволяющими

дового Южного Замени зещем политическом институте (ДЭПИ, г. Москва) и научной стажировки в Манчестерском университете (г. Манчестер, Великобритания). Автор выражает свою признательность докторам Л. Тулу и П. Монтегю (лаборатория Саймона - Саймона, Селфилд) - Манчестерского университета, П. Ригану (Лондонский Политехнический колледж) и М. Котскому (Альбертский колледж, г. Лондон) за плодотворные и стимулирующие встречи в обсуждении путей и методов развития науки, поставленных в диссертации.

В проведении экспериментальных исследований по диссертации принимали участие работники под научным руководством и при научной консультации автора кандидаты технических наук Сулей Абдуллаев, Раупов Ч.С. и инженеры Каванская И.В., Рейзов А.Х., Ражабов Т.В.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом на 1961-1965 гг. Постоянной комиссией по строительству СЗБ по теме Б.7 "Физико-механические характеристики бетонов"; в Координационном плане исследований ИАС Гострой СССР на 1966-1980 гг. по проблемам долговечности и усадки бетона и прикладным вопросам теории железобетона, связанным с длительными процессами; с координационным планом Научного совета АН СССР по строительной механике и теории конструктивных форм по проблеме "Развитие теории расчета бетонных и армированных элементов с использованием методов механики разрушения применительно к проектированию показателей надежности и долговечности конструкций".

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений; включена на 306 страницах машинописного текста в комплект 156 рисунков, 40 таблиц; перечень использованных литературных источников содержит 474 наименования.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемых проблем, изложены цели и задачи диссертационной работы, охарактеризована научная новизна, практическая ценность и эффективность исследований, сформулированы основные положения, выносившиеся на защиту, показаны формы реализации и внедрения полученных результатов.

В первой главе рассмотрены вопросы связи структуры и свойств

и "проектирование железобетонных мостов" для аспирантов, лекции и студентам строительных специальностей.

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов и выводов диссертации обеспечивается достаточным количеством тематичными обоснованными и апробированными расчетными параметрами прочности, деформативности и трещинообразования бетонных и железобетонных элементов; корректной постановкой и решением поставленных задач на основе традиционных допущений, предположений и гипотез; выбором апробированных (с позиций строительной механики, механики разрушения и теории железобетона) расчетных предположений, схем конструкций и моделей прочности и процесса разрушения; применением вероятностно-статистических методов моделирования и обработки результатов исследований.

Апробация работы. Основную материал диссертации кандидатский диссертации одобрили на: научно-технических конференциях ТАДИ в 1976-1991 гг., Ташки в 1979, 1981, 1983, 1986, 1989 гг., ДУСИ в 1984 г., МАКИ в 1984, 1985, 1987 гг., ВЭПИ в 1984-1987 гг.; на совещаниях стран - членов СЗБ по теме: "Физико-механические характеристики бетонов" (Ташкент, 1985 г.); на координационных совещаниях Гострой СССР по прочности и трещиностойкости (Прест, 1984 г.); на III Всесоюзной конференции по долговечности и железобетону (Эриван, 1985 г.); на международном симпозиуме комитета "Евромох-204". "Структура и трещинообразование в композиционных материалах" (Илвапо, 1985 г.); на международной конференции "Механизм разрушения бетонов" (Доминго, 1985 г.); на IX Всесоюзной конференции по бетону и железобетону (Ташкент, 1983 г.); на Всесоюзной конференции "Теория, прогнозность и применение искусственных строительных композитов" (Ташкент, 1985 г.); на I и II Всесоюзных конференциях по механике разрушения бетона и железобетона (Севастополь, 1984 г., 1988 г.); на Всесоюзной научно-технической конференции "Моделирование и оптимизация технологических процессов и элементов конструкций сооружений инженерного назначения" (Днепропетровск, 1989 г.).

Работа включена автором в период 1976-1989 гг. в Ташкентском автомобильно-дорожном институте при научной консультации доктора технических наук, профессора Юлиана Р.В. Часть исследований по диссертации включены автором во время стажировки на должности старшего научного сотрудника на Всесоюзном арсенале Тру-

легких бетонов и их компонентов с прочностными и деформационными свойствами; бетон рассматривается как сложный иерархическая система. Сравнительно представляется о разрушении бетона говорят о том, что оно является на микровывихах, а процессом, развивающимся во времени и тесно связанным с образованием и развитием трещин на каждом структурном уровне системы. Этот процесс неопределяется задолго до завершения конечной способности конструкции и определяется многочисленными начальными дефектами конструкции, наличие которых резко снижает фактическую прочность бетона на по сравнению с теоретической.

В проблеме изучения прочности бетонов выделяются три основных направления: механическое, статистическое и физическое.

Механические теории прочности, объясняющие поведение твердых деформируемых тел на феноменологической основе, получили фундаментальное развитие в трудах Т.А.Базанко, А.А.Гвоздева, Г.А.Гвинера, Н.И.Карпино, В.Н.Киселева, А.И.Колыванского, В.М.Круглова, Д.К.Акули, В.Н.Малыгина, А.В.Шанин, а также Д.Вейля, К.Терсталя, С.Кобали, В.Ковалюк, М.Котовского, Л.Меллер, К.Пьяккья, Д.Ньюмена, Э.Хонингта, Р.Цоммерманга и др.

В работах О.Л.Берга отмечалась отдаленность математических построений этих теорий от физических явлений, обусловленных повышением трещин и разрушения в бетоне. Поиск прогрессивных методов роста конструкций с трещинами привели к созданию механики разрушения материалов и конструкций. Вручей свое начало с теории трещин А.Грэффиса. Впервые методы механики разрушения были применены к бетону в работах М.Каллана, Г.Г.Линкеля и А.Нелинда и развиты в работах Э.Божанго, Ф.Виттманно, С.Медвера, Х.Михаши, К.Пьяккья, И.Петерсона, Р.Стрелована, А.Халлерберга, С.Пахо, Ф.Менгарри и др., в то же время в работах советских ученых Л.А.Алимова, В.М.Баженова, Л.Г.Березинского, П.И.Васильева, В.В.Ворошино, Т.И.Горчакова, И.М.Грушко, Е.А.Гусева, Е.В.Зейцова, Р.О.Красновского, Г.П.Курасовой, Н.Т.Луначка, В.И.Кондратьева, В.Р.Михайлова, Э.Н.Переселкина, А.И.Павла, А.П.Труфановича, В.И.Черевичко, А.А.Храшкова, В.М.Чубракова, В.И.Бутута и др. Необходимо отметить также вопросы механики разрушения нашла в работах Г.И.Беренслага, Л.Бревея, Л.М.Качанова, В.В.Панаскиа, В.Э.Лертмана, Г.В.Робертсона, С.И.Черемных.

Статистические теории прочности структурно-материальных материалов типа бетона сформулированы в работах А.П.Александрова,

В.В.Болотина, С.Д.Васюкова, Л.Т.Седрачина, В.Д.Харлава, М.М.Холмоногова, М.Иуми, К.Каслера и Л.Лотца, Э.Мазарса, П.Михаши и др.

Наиболее эффективными являются физические теории прочности, базирующиеся на оценке свойств и взаимосвязей основных элементов структуры бетона. Они ведут свое начало с работ Абрама, О.Я.Берга, Н.М.Базанова, М.Каллана, Б.Г.Скрябинского, и получили фундаментальное развитие в работах И.Н.Александрова, М.М.Баженова, В.Г.Бетракова, Г.А.Бужарина, Г.И.Герчинова, И.М.Грушко, К.В.Путянина, И.А.Рыбаева, М.З.Сромова, В.И.Соломатова, А.Брандштатта, Р.Бакера, П.Далера, Т.Дансона, В.Кеунга, Р.Смита и др. В рамках этих теорий разработаны ряд структурных моделей материалов, описывающих его поведение под нагрузкой. Существенными шагом вперед в разработке структурных моделей явилось использование методов теории упругости и математической механики для оценки напряженно-деформированного состояния материала с учетом образования и развития в нем трещин. Эти методы нашли свое отражение в работах В.М.Габрица, В.Э.Дубокова, О.Я.Берга, Б.В.Гусева, Е.И.Щербанова, А.В.Давыда, В.В.Зайцова, И.Г.Хусовой, С.Кузнецкой, П.Гробиля, Э.Сейфта, П.Стрелована, Т.Хуу, Шаха и Ман-Гарри и др., которые использовали в последние времена Д.Гудмера, Колосова-Мухомилевича, Нейбера, Саусвелла и Т.П.

Качественно новое научное направление в развитии физической структурной теории прочности, получило отражение в работах В.В.Зейцова, где оформлены основы принципа математического описания процесса образования и развития трещин в бетоне методами механики разрушения.

Высокая степень физической однородности бетонов, особенно легких на пористых заполнителях, наличие сложных крупно-средних связей в системе "состав-структура-свойств" заставляет использовать в исследованиях вероятностно-статистические методы и планирование экспериментов. В работах В.М.Баженова, В.А.Вознесенского, Т.И.Горчакова, В.Г.Домкина, М.М.Заставы, Э.Н.Давыдова, И.Б.Прокшова, Е.Н.Щербанова и др. теоретически обоснованы и разработаны методы многофакторного статистического анализа за таких характеристик бетона как прочность, деформативность, пористость, пластичность, усадка, параметри трендобразованности и т.д. Существенным преимуществом этих методов перед стандартными методами получения линейных регрессионных моделей явля-

его учет реальных физических представлений о поведении и свойствах бетона в формальном аспекте вероятностно-статистических вычислений. В диссертации отмечается, что расширение сферы применения таких методов вышло за некоторые особенности, которыми недостаточно принимаются во внимание. Во-первых, эти методы не учитывают, как правило, предельно собой значения количества параметров, которые лишь косвенно, в совокупности, отражают наличие существенных свойств (факторы) бетона как сложной системы. Во-вторых, эти данные могут быть представлены в разном виде. В-третьих, центральная проблемой является "оживить" видоизмененную "сухую" информацию, которая является реальных данными, не относящихся к сути изучаемого свойства. С другой стороны, если большая масса данных удается предоставить в виде единого, то это говорит о возможности выявления некоторой закономерности, определяющей сушность проявления изучаемого свойства в системе.

В рамках диссертации и активного аксиоматизации в диссертации проведено многофакторное статистическое моделирование прочности и параметров толстой диаграммы "С<sub>т</sub>-С<sub>с</sub>" нормантобетона с учетом влияния технологических факторов. Для получения информативных регрессионных зависимостей было проведено решение задачи построения полной выборки экспериментальных данных по области, внутри которой из которых допускается построение уравнения линейной регрессии. В этих целях использовались фундаментально преобразованные факторные анализы в форме метода главных компонент (МГК), которые позволяют не только минимизировать пространство независимых параметров анализа в форме метода главных компонент (МГК), которые позволяют не только минимизировать пространство независимых параметров анализа в форме метода главных компонент (МГК), но и строить регрессионные модели на главных компонентах как статистически независимых параметров. Для получения статистически эффективных моделей использована история формирования в виде обобщенного массива результатов проведённых испытаний, в том же плане различные факторы по прочности керамзитобетона и расслоениям влияли на нее одинаково структурно-технологических параметров: прочности, хрупкости и расхода керамзита, расхода и активности цемента, расхода воды и песка, плотности песка, хрупкости смеси в возрасте бетона.

Основные параметры диаграммы "С<sub>т</sub>-С<sub>с</sub>", определяющиеся при испытании сжатия выделены R<sub>т</sub>, E, C<sub>т</sub>, C<sub>с</sub> и C<sub>с</sub>, для которых был построен регрессионные зависимости между:

обеспеченностью 0,95. С целью "расширения" базы данных для нормирования расчетов параметров диаграммы "С<sub>т</sub>-С<sub>с</sub>" керамзитобетона был поставлен численный эксперимент в широком диапазоне изменения В/Д, R<sub>т</sub>, C<sub>с</sub>, V<sub>с</sub>, V<sub>с</sub> и V<sub>с</sub>. Программа численного эксперимента разработана А.Н.Вамбурой и Т.Гарзбованом. Результаты программы позволяют получить массив данных, который был разбит на группы с определенной массой керамзитобетона по прочности и плотности. Для каждой из групп получены нормативные и расчетные значения параметров диаграммы "С<sub>т</sub>-С<sub>с</sub>" для ее использования в расчетах нормантобетонных элементов по предельным состояниям первой и второй групп. Связь напряжений с деформациями керамзитобетона представляется выражением в виде подложки второй степени, коэффициенты которого вычислены и проанализированы в зависимости от значений параметров диаграммы.

Далее в диссертации проведён анализ влияния дефектов структуры на напряженно-деформационное состояние и трещинообразование материала в плоской постановке при изменении этих факторов от вершины и включения различной формы и ориентации. Предельно допустимым на основе на пористых заполнителях использованы двухкомпонентной модель структуры в виде нагруженной на бесконечности пластины на растяжной матрицы с порами и включениями различной жесткости, рис. 1а. Учтывалось, что материалы композиции модели излучины, однородны и изотропны. Соответственно, определяющие напряженно-деформационное состояние в принятой модели, получены с использованием решений Н.И.Мусхелишвили и Д.Гудера, и позволяют установить условия появления и расположения первых микротрещин для различных соотношений свойств матрицы и заполнителя, в том числе и для случаев их неполового взаимного сцепления.

Для принятой модели в прямоугольных координатах имеем во включении (при z < R):

$$\sigma_x^0 = \frac{\sigma}{2} (\beta_1 + \delta_1 \cos 2\theta); \quad \sigma_y^0 = [\beta_1 + (\delta_1 \frac{z^2}{R^2} - \delta_1) \cos 2\theta]; \\ \tau_{xy}^0 = \frac{\sigma}{2} (3\beta_1 - \delta_1) \sin 2\theta. \quad (1)$$

в матрице (при z > R):

$$\sigma_x^0 = \frac{\sigma}{2} [1 - \beta_1 \frac{R^2}{z^2} + (1 + 2\beta_1 - \delta_1 \frac{R^4}{z^4}) \cos 2\theta];$$

$$\sigma_2^0 = \frac{q}{2} \left[ 1 - \gamma_2^2 \frac{R^2}{z^2} + (1 - 3\delta^2 \frac{R^4}{z^4}) \cos 2\varphi \right];$$

$$\tau_{rz}^0 = -\frac{q}{2} \left[ 1 - \beta \frac{R^2}{z^2} - \delta \delta_2 \frac{R^4}{z^4} \right] \sin 2\varphi,$$

Здесь:

$$\beta_1 = 2 \frac{\lambda_2(1-\mu_2)}{\lambda_2(3-4\mu_2)}; \quad \delta_1 = \frac{4\lambda_2(1-\mu_2)}{\lambda_2(3-4\mu_2)+1}; \quad \gamma_1 = 0;$$

$$\beta_2 = -2 \frac{\lambda_2-1}{\lambda_2(3-4\mu_2)+1}; \quad \delta_2 = \frac{1}{2} \beta_2; \quad \gamma_2 = \frac{(1-2\mu_2)-\lambda_2(1-2\mu_2)}{\lambda_2+(1+2\mu_2)};$$

$$\lambda_1 = \frac{E_2}{E_1}; \quad \lambda_2 = \lambda_1 \frac{1+\mu_2}{1+\mu_1}.$$

Экспериментальное подтверждение полученной в расчетах картины распределения напряжений получено при испытаниях подорезанно-но-оптического методом прозрачных пластинок мозолей из эпоксидной смолы, содержащих отверстия либо круглые включения различной жесткости.

Качественно аспекты образования трещин микроструктуры и их развитие в трещины макроструктуры, объяснившие различие сил и критерия нестационарного роста трещин рассмотрены с позиций изменения к болевой теории Гурффитса. Энергетический критерий развития трещины А.Гриффитса  $G_c$  в эквивалентный ему силовой критерий Л.Фрэнка  $K_{Ic}$  дает возможность оценки предельного состояния равновесия упругого тела с трещиной. В связи с этим в работе рассмотрены особенности и возможности некоторых других критериев для трещин нормального открытия (в рамках модели Ирвинга, Ласлово-Панасека, Хиллсберга, Ж -микрограна Рейса-Чорнакова и  $R$ -функции) с позиций их применимости к бетону.

На примере ступенчатой модели бетона в вилу упругой пластичности единичной толщины, содержащей два и более неравных круглых отверстия с выходными на их контур двумя косолинейными трещинами различной длины, рассмотрены условия их стационарного и нестационарного роста. Предельные величины напряжений, при котором поддается трещина  $q_{lc}$  в также критического напряжения  $\sigma_{lc}$  и критической длины трещины  $q_{lc}^*$ , при которых происходит их спонтанное сдвиге определены с помощью известных решений А.Гриф-

фитса, В.В.Панасека и И.В.Зейлева. Для случая, когда вместо круговых пор рассматриваются включения с различными параметрами прочности и жесткости, от решения модифицированы на основе предложенного выше анализа поля напряжений и деформаций вокруг выделений с учетом перераспределения этих напряжений в ступенчатой матрице на заполнитель по мере роста длины рассасываемой трещины.

Для углубленного анализа физических процессов, лежащих в основе зарождения и развития микро- и макротрещин в бетоне, а также для выявления характера взаимодействия компонентов структуры в процессе работы бетона под нагрузкой было использовано ступенчатое-матричное моделирование. Необходимо отметить и ряд других для создания вычисленной модели трещинообразования и разрушения базиса на основе принципов линейной упругой механики и разрушения. Модель реализована на примере пластики единичной толщины (рис. 1)  $(40 \times 10 \text{ см})$ , содержащей кругло отверстие (пор) с двумя начальными трещинами на контуре, и многотупольные выщелачивания (заполнители) с различной ориентацией и расположением. Стороны включения имитировали контактную зону, которая характеризуется шириной и условной прочностью. Материал ступенчатой матрицы предполагался однородным и изотропным. Прочностью и деформационными характеристиками матрицы и включения, параметры их деформации незначительно на основании экспериментальных данных. Количество включений и пор принято на основании обозначения статистической предельности и с учетом возможностей программы, составленной для реализации на ЭС ЭМ, т.е.  $N = 50$ . Координаты контур пор и включений приняты как независимые случайные величины, подчиняющиеся равномерному закону распределения по высоте и ширине образца.

Анализ последовательных этапов развития трещин для трех реализаций разрушенной математической модели (с впадинами (ВН), отверстиями (ОС) и впадинами (ВН) с отверстиями (ОС)) показала их поочередное развитие в результате проведенных экспериментов (табл. 1). Характер развития трещин в модели для всех реализаций оказался одинаковым, а разрушение модели определялось образованием максимальной трещины, направленной вдоль осевых усилий и выходившей на контур образца.

За некоего тренду микротрещинообразования  $R_{сст}^0$  приливало значение внешней нагрузки, при которой начались развиваться 5%

от общего числа начальных трещин. За верхнюю границу микродеформирования  $R_{\text{мд}}$  принималось значение внешней нагрузки, при которой произошло обесчужение 5% от общего числа начальных трещин. Подобно определению границ микродеформирования соответствующим физическому смыслу, который был вложен в параметры  $R_{\text{мд}}$  и  $R_{\text{ср}}$  О.И.Вергом, за предельную прочность  $R_{\text{пр}}$  принималась нагрузка, вызывавшая образование макрестрельной трещины, разделяющей модель на две части. Достаточное качественное и количественное соответствие между результатами реального и численного эксперимента свидетельствует о широких возможностях и перспективах применения методов структурно-матричного моделирования для прогнозирования и ретупирования физико-механических свойств разнородных бетонов.

Разработанная структурная модель трещинообразования и разрушения в бетоне использовалась для прогнозирования прочности при сжатии легких бетонов плотной структуры на основе известной функциональной зависимости прочности легкого бетона от прочности разнородной матрицы, предложенной А.И.Богомоловым. Показано, что для разнородных участков кривой этой зависимости характерен свой тип разрушения бетона (рис. 2). На первом, наиболее прямоугольном участке кривой увеличение прочности растворной матрицы ведет к пропорциональному увеличению прочности бетона. В этом интервале прочность бетона определяется прочностью раствора. Процесс разрушения выделочины наблюдается в основном тяжелом бетоне и матричная трещина проходит по матрице (на участке I на участке кривой II в прочность легкого бетона начинает отставать от прочности раствора). После возникновения трещины на контуре заполнителя начинается перераспределение растяжимого усилия в растворной матрице на заполнитель. Если сплюснение заполнителя с матрицей слабое, то при превышении прочности контакта  $R_{\text{ср}}^{\text{мд}}$  трещина обходит заполнитель, что ведет к увеличению ее длины и требователю дополнительных энергетических затрат. Если прочность контактной зоны достаточно велика, то происходит существенное перераспределение напряжений с матрицы на заполнитель. При достижении предела выделочной предела прочности на растяжение трещина делится на макрестрельную линию, определяющей расстояние между выделочными. Разрушение бетонов на участке II в кривой  $R_{\text{пр}} = f(R_{\text{мд}}$  имеет стабильный характер и происходит по матрице и заполнителю. Это обстоятельство наблюдается в легких бетонах с достаточной

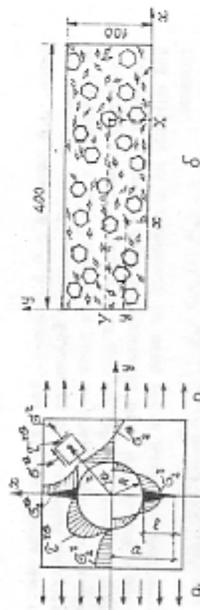


Рис. 1. Расчетная модель структуры (а) и охвата ее деформации (б) в матричном моделировании процесса разрушения легкого бетона

Таблица I  
Результаты реального и численного экспериментов

Серия; образец	Продольная прочность $R_{\text{пр}}$ , МПа	Трещины микродеформирования		Численный эксперимент		Численный эксперимент				
		реальная; высота	$R_{\text{мд}}^{\text{числ.}}$ МПа	$R_{\text{ср}}^{\text{числ.}}$ МПа	$R_{\text{ср}}^{\text{числ.}}$ МПа	$R_{\text{ср}}^{\text{числ.}}$ МПа	$R_{\text{ср}}^{\text{числ.}}$ МПа			
ВН	33,2	26,3	15,9	0,48	26,6	0,80	10,5	0,40	21,3	0,81
ВС	35,9	32,0	18,3	0,51	34,1	0,85	13,0	0,43	28,5	0,89
ВВ	34,3	37,0	15,8	0,46	32,2	0,94	13,0	0,42	27,3	0,80

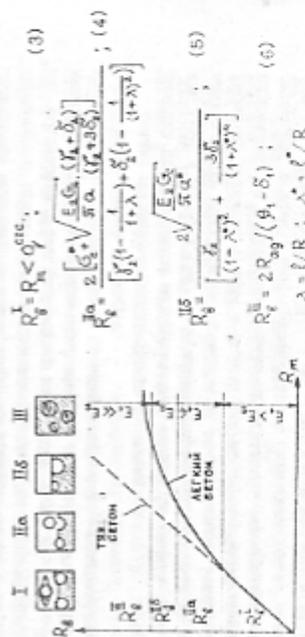


Рис. 2. Зависимость  $R_{\text{пр}} = f(R_{\text{мд}})$  и характерные точки разрушения легких бетонов

ных бетонов различной структуры и конструкций на их основе, совершенствования их свойств и технологии выполнения работ

М. А. Ахмедова, Т. А. Булавичев, А. И. Зеганова, К. И. Вилкова, К. П. Дед-лоса, В. Т. Довжик, И. А. Лыанова, И. Т. Иванова-Дитлова, С. М. Илюкин-ча, О. П. Кавриджко, К. С. Карапетян, К. М. Коча, В. И. Кондаченко, А. А. Курдюшова, Р. А. Малайца, А. Э. Пирадова, И. Т. Пугалева, Н. А. Попова, И. А. Рыбаев, М. Э. Смирнова, Б. Т. Скрамляева, И. П. Стрелак, В. Э. Чиненкова, В. Н. Яковлевского и др.

Испытания подвергались легким бетонам на плотном, керамзитовом и керамзитопесчаном гравии различных составов, которые были разделены на два группы. Первая группа образцов проливалась для проверки разуклонной конструкции модели легких бетонов в целях ее использования в проектировании кратковременной прочности на сжатие с учетом ее нарастания во времени. Исследовались составы бетонов на цементях различной активности с пористыми и пылящими заполнителями различной объемной массы и прочности. На каждый вид заполнителя составлялось по четыре состава бетона с различными расходами цемента, что обеспечивало смесь различным В/Ц при одинаковых расходах воды. Для контроля количества воды подготавливались портландцементным, исходя из водопотребности эталонной смеси тяжелого бетона с расходом цемента 375 кг/м<sup>3</sup> при напряжении кривой триакометрического состава. Для выделительный расход воды, который обеспечивал показатели уплотнения, характерные для эталонной смеси. Использованный подход позволил более точно определить количество воды, требуемое для твердения бетона и гидратации цемента.

Составы керамзитобетоном второй группы предназначались для исследования влияния структуры на прочность, деформативность и триакообразованию в материале. Они подбирались так, чтобы при различных содержаниях в прочности иметь возможно большие вариации в соотношении объемов мелкого и крупного заполнителя. Одновременно были испытаны компоненты бетона в виде образцов из шпательного ящика, раствора и зорен заполнителей. В качестве однокомпонентной структуры рассматривался цементный камень на портландцементе активностью 50 МПа, двухкомпонентной — раствор на кварцевом песке (Мс=2,80) и трехкомпонентной — керамзитобетон на керамзитовом гравии с большим, средним и малым содержанием керамзита. Для испытаний бетонов при осевом сжатии изготавлива-

прочными заполнителями. Широко применяемый во строительстве после образования трещин проанализирован с учетом изменений напряженно-деформационного состояния в его окрестности, выявленного его деформирования и перераспределения напряжений с матрицы на заполнитель в процессе роста трещины.

Последний, третий участок кривой деформации для бетонов, в которых высокопрочная растворная матрица сочетается с низкопрочными заполнителями, что редко встречается на практике. При определенных соотношениях величин поперечной деформации раствора и заполнителя напряжения в последних могут превышать его прочность на растяжение и включение разрушается ранее, чем растворная матрица.

Для каждого участка кривой в диссертации даны выражения (3)...(6), описывающие прочность легкого бетона с учетом влияния разрушения, соотношения деформативных свойств матрицы и включений, а также начальной длины трещины  $\alpha$ , которым определяется при заданных значениях В/Ц, эффективной поперечной энергии  $\delta^*$ , степени гидратации  $\alpha_c$ , влажности  $\Phi$  и пористости цементного камня  $P$ . Выражение прочности, предложенное для последнего участка кривой, рекомендовано для оценки прочности заполнителей в бетоне.

В заключении главы приведены результаты экспериментальных исследований влияния структуры на характеристики триакообразованности бетона  $K_{\text{тс}}$  и  $G_{\text{тс}}$ . Было показано, что сдвиг разрывных образцов с различными размерами дробки на керамзитового и тяжелого бетонов, подвергнутой четырёхточечному изгибу, рассматривая и осевому растяжению. Результаты проведенных исследований говорят о применимости применения к анализу процессов разрушения легких бетонов и их компонентов теории Грейфитса-Ивлина и основанных на характер триакообразованности материала, используемых в рамках линейной упругой механики разрушения. Выявлено, что вязкость разрушения цементного камня ниже, чем для раствора и бетона, причем для раствора и бетона она возрастает по мере увеличения содержания соответственно песка и крупного заполнителя.

Вторая глава содержит результаты исследований прочности, деформативности и триакообразованности легких бетонов и их компонентов при осевом сжатии, осевом сжатии и растяжении с учетом структуры материала. В процессе исследования прочности и деформативности лег-



мость дает результаты, близкие к полученным по известной зависимости В.М. Бойдровича, разработанной с позиций энергетического подхода. Также соответствием свидетельствует о надежности и достоверности принятого подхода для оценки  $R_{сж}$ . Результаты экспериментов показали также, что предел длительной прочности железобетона не зависит от вида напряженного состояния (сжатия и растяжения) и по крайней мере не ниже, чем для теллового бетона.

Сопоставление опытных значений верхней границы микротрещинообразования с пределом длительной прочности при сжатии и растяжении говорит о возможности прогнозирования последнего по направлению, соответствующему экстремуму на диаграмме деформаций составных элементов деформации, определенной по данным измерений в зоне разрушения опытного образца.

Целесообразно также повысить исследованием прочности и жесткости бетонных и железобетонных элементов в трещинах, позволяя хотых при этом определяются силами контактного взаимодействия в трещинах при взаимных сдвигах их бортов.

Исследованиями железобетонных конструкций с учетом особенностей наиболее сложного деформирования и трещин посвящена работа С.В. Александровского, В.Н. Евнина, В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, Л.И. Васильева, Г.М. Власова, А.Д. Годякова, В.В. Зейделя, И.И. Карпенко, А.И. Колотчевского, С.И. Крылова, А.П. Худякова, А.В. Писарева, В.А. Яковлева, И.Б. Прокопюк, А.Р. Ржанавкина, Р.С. Самаринского, Р.Д. Серых, Н.Н. Сказкина, М.М. Хольмистого, Е.Н. Хроша, В.Д. Харламова, В.П. Чернова, А.Ф. Прохорова, Л.И. Юрина, в т.ч. С.В. Зейделя, Д.И. Нагирова, П.Г. Амброзина, Х.Дулатки, А.Игитова, Т.Шубаева, Х.Рейхердта, Р.Тейфоре, Л.Соломина, Р.Фенинга, Дж.Хорфобко, Дж.Хуаза и многих других. Как правило расчеты таких конструкций связаны с оценкой их напряженно-деформированного состояния различными численными методами. Так, для широкого класса конструкций эффективно используется метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий в основу базового количества разработанных программ комплексов и универсальных алгоритмов, реализация которых позволяет автоматизировать все этапы численных расчетов железобетонных конструкций. Теоретическое обоснование и развитие таких расчетов МКЭ связано с исследованиями А.И. Александрова, Л.А. Саломана, В.П. Евнина, Л.В. Бойдрова, Т.М. Воронина, А.С. Горюшечного,

А.А. Боркина, В.Г. Корнева, Б.Л. Давыдинова, О.В. Дужина, А.М. Мясникова, В.Н. Мостачинко, А.А. Петула, Р.А. Розинского, Л.А. Розина, А.С. Сахарова, А.Ф. Сырцова, Н.И. Шапошникова, Дж. Аргириса, К.Исте, Е.Земкевича, А.Нальсона, Д.Ито, А.Сюрджелиса и др.

Учет пластичных свойств железобетона, помимо создания более сложных программ, требует углубленного изучения фундаментальных свойств железобетона с трещинами, определяющих его поведение под нагрузкой вплоть до разрушения. В первую очередь это касается исследования механизма и особенностей передачи отрывных и сдвиговых напряжений через трещину, обусловленных наличием пластично-перехваточной ее структуры и склади заделания в процессе контактного взаимодействия ее бортов. Важным шагом вперед в этом направлении явилась теория деформирования железобетона с трещинами, разработанная в трудах И.И. Карпенко и разработанная известными людьми В.И. Куралева. В ней железобетон рассматривается как физически нелинейный анизотропный материал в положении на его основе взаимосвязи и программы расчета на ЭММ получили широкое экспериментальное подтверждение и распространение в практике проектирования. Если при сжатии и растяжении материала передачи напряжений через трещину имеют достаточное отклонение в ряде работ (Л.М. Загорылова, Н.А. Гусойнов, Е.У. Завков, И.И. Карпенко, Л.И. Мельник, Т.А. Мухомедов, В.П. Роголов, А.Ф. Бродянский и др.), то этот же механизм при сжатии исследован явно недостаточно. О практическом значении учета пластичных сил взаимодействия шнорхловит бортов в микротрещинах говорят и то, что она является основным фактором, обеспечивающим сопротивление и устойчивость рвановонии железобетонных элементов в сечении с трещиной при действии поперечной силы. Предположение о полном сдвигении пластичных смещений в трещинах путем защелкивания их бортов при взаимном контакте не соответствует действительности. Более того, наличие пластичных смещений может служить более точным показателем наличия сдвиговых напряжений в трещинах, чем наблюдение за раскрытием трещины.

Наконец, недооценка роли пластичных сил защелкивания в трещинах при проектировании железобетонных конструкций с относительно большими пластичными деформациями, характерными для оболочек, корбелов, балок, подпорных стен и балок-стенок, сосудов давления и

т.д., базируется на распространенном мнении, что трещино в трещине является величиной переменной и им можно пренебречь в задаче прочности. Однако уже из работ А.А. Гвоздева, Н.И. Корникова, З.Базанты видно ошибочность такого суждения. Дело в том, что при взаимном тангенциальном смещении берегов трещины происходит их нормальное (дilatационное) раскрытие вследствие кинематики перемещений на поверхности трещины, рис. 3 а. Это приводит к возникновению значительных дополнительных напряжений в поясе арматуры, а ширина раскрытия трещины в стадии эксплуатации может оказаться значительно большей, чем предполагается расчетом по действующим нормам.

Таким образом анализ механизма проявления сил заклинивания в трещине и выявление зависимости между подкреплениями и смещениями ее берегов при сдвиге для прогнозирования жесткости и предельного сопротивления конкретного взаимодействия в трещинах является важной проблемой и требует специальных исследований. Подобные анализы должны отражать влияние структурных особенностей бетона, определяющих степень и характер перемещений трещины и учитывать механизм осевой (с учетом сдвигаемых с бетоном) жесткости трещины, пересекшей трещину (как этого требуют "общие положения" расчета плоскостных и изгибных конструкций с учетом подвижных свойств железобетона", введенные в отечественной практике включение в СНиП 2.03.01-84).

Широко используемое и ставшее классическим понятие о ширине раскрытия трещины в железобетоне определяется как взаимное относительное смещение ее берегов в нормальных направлениях. Для общего случая, когда наряду с нормальными берега трещины испытывают еще и тангенциальные взаимные смещения, это понятие можно включить в себя dilatационно, определяемое значение раскрытия в ширине трещины на различных участках по ее длине. При практическом использовании механизма заклинивания необходимо анализе четырех взаимозависимых параметров: касательных и нормальных напряжений ( $\sigma_{\tau}$ ,  $\sigma_{\perp}$ ), соответствующих им смещений берегов трещины ( $\delta_{\tau}$ ,  $\delta_{\perp}$ ).

В диссертации проведен анализ методов оценки сил заклинивания в трещинах, а также механизмов исследований раскрытого пояса трещины в железобетонных элементах, которые условно были разделены на следующие пять групп: трещины с фиксированной, постоянной

шириной раскрытия; трещины с контролируемым нормальным смещением  $\delta_{\perp}$ ; трещины, испытывающие действие нормальных напряжений  $\sigma_{\perp}$ ; трещины с контролируемым относительным  $\delta_{\tau}/\delta_{\perp} = \text{const}$ .

Анализ исследований показал, что нормально раскрытые трещины является ключевым фактором в механизме передачи касательных сил заклинивания через трещины. Они преодолеваются интенсивностью нормального обжатия и поперечной нагрузкой. Сдвиговое смещение, наоборот примерно пропорционально нагрузке, перед разрушением резко увеличивается. Сдвиговая жесткость в трещине растет с увеличением процента армирования и тем больше, чем выше прочность бетона и лучше его сцепление с арматурой. Отмечается, что положение образцов при машин "армировании" трещины или высоких значениях  $\delta_{\tau}$  не отличается от поведения образцов без трещины.

В связи с этим при экспериментальном исследовании механизма передачи напряжений через трещины необходимо внимание было уделено именно виду армирования, прочности бетона, ширины трещины, толщине  $\delta_{\tau}$  и процента поперечного армирования. Спирально армированные с индустриальной трещиной заготовлялись на карамельбетоне и тяжелого бетона и испытывались на сдвиг, рис. 3 б. Включены сдвиговых и нормальных взаимных смещений образцов на каждой ступени нагрузки определялась по специально разработанным методике. К первой серии отнеслись образцы со свободными нормальными смещениями берегов трещины. Вторая серия образцов испытывалась при фиксированных значениях начальной ширины трещины, которая регулировалась выкатами на стальных титках с контролируемым нормальным расщепляющим напряжением. Третья серия образцов армировалась хомутами на стержнях класса А-I, А-II и А-IV диаметром 6 мм и 8 мм.

Длинина ядра бетона на стержнях шероховатости трещины локализована на профилотрещинах шероховатостей разрушения образцов, полученных на специально изготовленном профилотрещине до и после их испытания на срез.

Результаты испытаний показали, что вид бетона влияет на поведение на предельном сопротивлении сдвигу, но и на деформационное поведение образцов. В целом образцы из тяжелого бетона оказались жестче и прочнее карамельбетонных. Несмотря на различное поведение под нагрузкой каждая вид бетона имеет свой предел сдвиговой прочности, который у карамельбетона значительно ниже, чем



обусловленной выступами из чистил запломбировали, превращают над макрошероховатостью определенной ориентацией плоскости трещины. Трещины деформаций слезки проявляются за счет шлицевидной деформации чистящего камня на поверхности его контакта с пластмассой запломбирователя. Трещиноватая заплата контактного взаимодействия слезки с двухуровневой, позволяющей рассматривать срез материала различной толщины. Контурное изображение контактных формальных и структурных напряжений использованы в условиях равновесия усилий, действующих на поверхность наннмного контакта:

$$T_{\text{сис}} = \sigma_{\text{сис}}(A_x + A_y + A_z); \sigma_{\text{сис}} = \sigma_{\text{сис}}(A_x + A_y + A_z). \quad (12)$$

Здесь значения  $\sigma_{\text{сис}}$  и коэффициенты трения чистящего камня о запломбирователь  $\mu_{\text{сис}}$  подбирались тем же образом, чтобы (12) давало соответствующим данным испытаний образцов второй серии ( $\mu_{\text{сис}} = 0,40$  и  $\sigma_{\text{сис}} = (6,3 \dots 6,5) \sqrt{P_x}$ ). Проведения площади  $A_x$  и  $A_y$  равны объему контакта в ортогональных направлениях для данного типа и для створчатого содержания запломбирователя является функцией  $\sigma_{\text{сис}}$  и  $\delta_{\text{сис}}$ . Для структурного анализа поверхности трещины в объеме использованы модель структуры материала с включениями, которые рассредоточены и ориентированы в матрице случайным образом.

Моделью статистического анализа вычисляется вероятностное число частиц определенной крупности, которые пересекнутся трещиной на единичной длине. Возможное распределение размеров поровых элементов  $\alpha_{\text{сис}}$ , являясь непрерывной функцией, рассматривается по основе экспоненциальной кривой рассеяния для его оценки используются функции плотности вероятности. Подобное поведение осадку линии контактного взаимодействия можно получить путем интегрирования по всему интервалу изменения диаметров распределенных выделений. Интегрирование полученных выражений для  $A_x$  и  $A_y$  производится по специальной программе, реализуемой на ЕС ЭВМ.

Полученная модель контактного взаимодействия позволила провести численный эксперимент по оценке влияния трещины между пластмассовым камнем и запломбирователем и выявить зависимость крупности запломбирователя на взаимосвязь  $T_{\text{сис}} = f(\sigma_{\text{сис}}, \delta_{\text{сис}})$ .

Для использования в практических расчетах предложено выражение для профиля сдвигаемого опломбирования в трещине, базирующееся на упругоэластической схеме порочности бортов трещины, идеализированной набором оллимохных треугольных выступов, рис. 55. Выражения для  $\sigma_{\text{сис}}$  и  $T_{\text{сис}}$  записываются в виде:

$$\sigma_{\text{сис}, H} = (R_{\text{конт}} \sin \alpha) \cos \alpha; \sigma_{\text{сис}} = (R_{\text{конт}} \sin \alpha) \sin \alpha. \quad (13)$$

Подобрав (13) и подставляя  $\sin^2 \alpha = \sigma_{\text{сис}} / R_{\text{конт}}$  получим:

$$T_{\text{сис}, H} = \sigma_{\text{сис}} \sqrt{R_{\text{конт}} / \sigma_{\text{сис}}} - 1. \quad (14)$$

Принимая  $\sigma_{\text{сис}} \alpha \approx 2$ , получаем из (13) условие  $\sigma_{\text{сис}, H} \approx 2 \delta_{\text{сис}}$ .

Величина  $R_{\text{конт}}$  определяется прочностью фетона и площадью контакта, т.е.:

$$R_{\text{конт}} = \sin \alpha \cdot R_f = R_f / \sqrt{1 + \sigma_{\text{сис}}^2} > \sigma_{\text{сис}}. \quad (15)$$

Подставляя в (14)  $\sigma_{\text{сис}} \alpha = R_f / \sqrt{1 + \sigma_{\text{сис}}^2}$ , получим:

$$T_{\text{сис}, H} = \sigma_{\text{сис}} \sqrt{R_f / \sigma_{\text{сис}}} - 1. \quad (16)$$

Выражения (14) и (16) удовлетворительно аппроксимируют данные испытаний второй и третьей серий образцов, рис. 56.

Исход. В работе Удаль последние исследования сопротивления макрообработанных флюк в стадии работы после образования трещин с учетом мылящего механизма контактного взаимодействия в трещинах при поперечном изгибе. Проблема сопротивления макрообработанных элементов действия поперечных сил, несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований, остается дилеммой от решения. Эти исследования интенсивно продолжают по причине опасной природы мезомасштабного разрушения и в целях дальнейшего расширения познаний физических аспектов проблемы. Методы расчета прочности макрообработанных элементов при действии поперечных сил, исключаясь различно подходам в виде равнообразных геометрических элементов, статистических моделей, в такие методы, основанных на равновесии продольных усилий в сечении последних работы Г.С. Милова, Р.А. Милова, А.К. Артемьева, В.Н. Байкова, В.М. Баталева, И.К. Едодорова, Г.И. Бордюковского, М.С. Бурилянского, П.И. Васильева, К.И. Виктора, Г.М. Власова, А.А. Гвоздева, А.Б. Голышева, Л.А. Дорощанова, А.С. Залесова, В.В. Зайцева, А.С. Зорича, Ч.В. Шиталевичева, В.А. Навола, О.Ф. Иванова, А.П. Кузнецова, А.А. Кузнецова, Р.Л. Пыльцова, В.И. Митрофанова, А.В. Носовцева, А.Б. Шереметьева, Г.И. Николаева, В.А. Светлаурская, М.С. Торшаква, М.М. Холминакова, Э.П. Черкова, Г.П. Чуваева, Р. Валтера, Э. Кани, С. Леонгарта, Э. Мерцеля, Л.Р. Митана, Х.Рихта, Х.Тойгора и многих других. Широко практикуемое применение метода метод расчета, разработанный вои русо-

проявлялись по условиям равновесия усилит в монофигурной "троянчатой" схеме К.Юли, учитываемый действия касательных напряжений заключены по бортам трещин, ориентированных боковой балки и наклонных под углом  $\alpha$  к ее оси. Вторым компонентом определена черта заделки смещений  $Q_{csc}$  и  $S_{csc}$  бортов трещин в зависимости, использованных в предыдущей главе для оценки сдвигающей жесткости контактного взаимодействия в трещинах. Как правило эти смещения, замеренные на наиболее характерных трещинах изменялись с ростом нагрузки прямо пропорционально приросту продольного армирования. Это говорит о том, что по мере роста увеличивалось. Это говорит о том, что по мере роста нагрузки сила заделки в трещинах балок также возрастает.

Значения  $Q_{csc}$  в рассматриваемом сечении балки с трещиной рассчитывались путем интегрирования по высоте балки выражения:

$$Q_{csc} = \int_{y=0}^{y=(h/2) \sin \alpha} \int_{y=0}^{y=(h/2) \sin \alpha} k \left( \frac{v_{csc}}{a_{csc}} \right) dy \cdot (17)$$

Здесь как и в (8) вычитая  $K = 1,2 \text{ Н/мм}^2$  для титалевого и  $K = 0,4 \text{ Н/мм}^2$  для легкого бетона подбирались такие значения, чтобы сохранялось статическое равновесие сечения.

Начальный эффект спланировал выделенной усилие  $Q_{cs}$ , при котором образовались продольная трещина на уровне продольных стержней от отрыва и проваливания бетона азальтного слоя и связанного с ним перемещения  $y_s$  оси продольной арматуры. Для экспериментальной оценки величин  $Q_{cs}$  и  $Q_s$  проведено испытание дополнительной серии балок таких же размеров но с различной длиной наискосок от отрыва, через которые проделывались надрезы на продольную арматуру балки. В результате испытаний проделывания модифицирование зависимости Т.Буземана, отразились также на  $Q_s$  виде и прочности бетона, диаметра, количества и расположения стержней:

$$Q_s / Q_{cs} = 2 \left( y_s / 0,08 \right) - \left( y_s / 0,08 \right)^2 ; \quad (18)$$

$$Q_{cs} = 4,12 d^2 \cdot \beta_{нт} \sqrt{R_b} ; \quad (19)$$

где  $\beta_{нт} = b - \sum d$  - ширина балки без учета диаметров арматуры.

Процентное соотношение основных компонентов сопротивляемости сжатию балок из керамзитобетона и титалевого бетона составила в

возлежом А.С.Зелюкова в НИИЭ Госстрой СССР, в котором отражены основы нового перспективного направления решения указанной проблемы. В этом походе на основе анализа напряженного состояния балки особым омет построения теории расчета железобетонных элементов по наклонным сечениям и предложен метод для наиболее распространенных в практике случаев работы железобетонных конструкций.

Анализ условий равновесия усилит, действующих в наклонном сечении, проведенный в специализированных экспериментальных исследованиях у нас в стране и за рубежом показал, что уравнения равновесия продольных и поперечных сил во многом не соблюдаются из-за наличия дополнительных усилит от взаимного зацепления бортов трещины и нагельного сопротивления продольной и поперечной арматуры. Учитывая между науковость, как в количественном так и в качественном отношении, механизмы проявления этих усилит в трещинах и их заделки на основе поведения бетонных и железобетонных элементов под нагрузкой было признано целесообразным провести специальное исследование.

Опытные образцы представляли собой балки из титалевого и керамзитового бетона двух видов: прямоугольного сечения без поперечной арматуры и титалевого сечения с комутами. В балках первого вида маркировались пролет срез  $Q_1 / \ell = 3,57$  и  $5,60$  и типичность продольного армирования в виде двух стержней класса А-III и А-IV путем изменения их диаметра (12, 16 и 20 мм). В балках второго вида применялось армирование путем изменения шага комутации в середине пролета сосредоточенной нагрузки.

По результатам испытаний были выявлены: свойства бетона и арматуры, уровень разрушающей нагрузки, характер разрушения; форма формирования в бетоне по высоте сечения и трещины балок; относительные деформации в продольной и поперечной арматуре; деформационные и сдвигающие смещения бортов трещин по специально разработанным методикам; деформации сжатия в наклонных бетонных полосках ребер титалевого балок.

Анализ результатов испытаний балок прямоугольного сечения без комутации проведен с учетом того, что их прочность в наклонных сечениях обеспечивается суммарным сопротивлением сразу бетона сжатой зоны  $Q_s$ , касательными силами заделки  $Q_{csc}$  и нагельным эффектом продольных стержней  $Q_s$ . Оценка первой компоненты

орднам соответственно : для  $Q_{\text{св}}$  - 41% и 36%; для  $Q_{\text{свс}}$  - 34% и 44%; для  $Q_3$  - 26% и 19%.

Наряду с выделением особенностей образования и развития трещин, характера деформирования и разрушения был проведен анализ напряженного состояния припояной зоны балки методом конечных элементов в рамках модели Э.Канни с учетом мостовых напряжений и защелкивания в трещинах. Распределение максимальных напряжений в сквапной зоне можно описать квадратной параболой либо, для упрощения принять по треугольной форме. По высоте трещины эти напряжения определялись с использованием опытных зависимостей

$\sigma_{\text{свс}} = f(\sigma_{\text{свс}}^0, \sigma_{\text{свс}})$ , предложенных в предыдущей главе. Величина концентратора сил напряжения, прокатывающегося в наклонных трещинах, определялась с учетом характеристик оплывчатой жесткости контактного взаимодействия бортов трещин, вычисляемых по результатам прикладных инженерных железобетонных дисков с трещинами на сдвиг.

Анализ усталой и долговременного состояния в балках, раздельных системной трещины на олонки, проанализирован по "требуемой" схеме. Кроме усталой  $Q_{\text{свс}}$  и  $Q_3$  на консолидный блок действует усилие  $\Delta T$  на уровне продольной арматуры, рис. 6а. Под действием этой системы сил в точке "а" консоли наступил разрушение, если приложено напряжение  $\sigma_{\text{свс}}$  равно:

$$\sigma_{\text{свс}}^0 = \frac{\Delta T}{\delta c} \left[ \frac{Q(h_c x)}{z_0} - (Q_3 + Q_{\text{свс}}) \right] \quad (20)$$

В связи с трудностью прямого определения величин  $\sigma_{\text{свс}}$  и тем, что она определяется сравнительно малой разницей больших величин в квадратичных скобках, вместо условия равенства усталой расклевки в условиях совместности деформаций. Принято, что предельная относительная деформация растяжения  $\epsilon_{\text{свс}}^0$  в точке "а" достигается при нагрузке, вызывающей деформацию арматуры и раскрытия трещин, достаточные для необходимого взаимного перемещения ее бортов. Тогда (20) преобразуется в вид:

$$Q = \left( \frac{1}{\delta} \epsilon_{\text{свс}}^0 c + Q_3 + Q_{\text{свс}} \right) z_0 \quad (21)$$

Деформационные эквиваленты величин  $\sigma_{\text{свс}}$ ,  $Q_3$  и  $Q_{\text{свс}}$  определяются методами теории упругости на величине задела о деформации бетонной консоли (1), складывающейся из оплывчатой (II) и логарифмической (III) деформаций, рис. 6б. Нормальные вертикальные перемещения  $u^0$  в точке "а" и нормальная относительная деформация  $\epsilon_{\text{свс}}^0$  в точке "а" связаны выражением:

$$\epsilon_{\text{свс}}^0 = -u^0 \delta / 6 h_{\text{свс}} - c^2 (4 - 5M) ; u^0 = \int \epsilon_{\text{свс}}^0 dx = \xi \cdot \epsilon_{\text{свс}}^0 \quad (22)$$

где  $M$  - коэффициент Пуассона;  $\xi = - [ \int h_{\text{свс}} - c^2 (4 + 5M) ] / 6 h_0$ . Однако увеличение величины  $u^0$  и  $\epsilon_{\text{свс}}^0$  в трещине в процессе сдвига от опоры можно предположить как:

$$\Delta l = \int_{x=0}^{x=x_0} \epsilon_{\text{свс}} dx = \int_{x=0}^{x=x_0} A_3 E_3 z_0 = Q \alpha^2 / 2 A_3 E_3 z_0 \quad (23)$$

либо суммируя ширину всех "а" в трещине в процессе сдвига "в":

$$\Delta l = \sum \alpha_{\text{свс}} = n \cdot \alpha_{\text{свс}} = \alpha \cdot \alpha_{\text{свс}} / 2 \quad (24)$$

Из (23) и (24) получим:

$$\alpha_{\text{свс}} = Q \alpha \cdot c / A_3 E_3 z_0 \quad (25)$$

Величины  $\sigma_{\text{свс}}$  и  $\epsilon_{\text{свс}}^0$  связаны в продольной створке оплывчатой областью  $\sigma_{\text{свс}} = \epsilon_{\text{свс}}^0 E_3$ . Распределение  $\sigma_{\text{свс}}$  по высоте трещины предположено в виде эллипса на рис. 6в. Используя (17) и принимая  $\sigma_{\text{свс}} = 2u^0 / \delta$  и  $\lambda = 0,4$  получим площадь эллипса  $T_{\text{свс}}$  и величину  $Q_{\text{свс}}$ :

$$A_{\text{свс}} = \frac{2u^0 \delta}{\alpha_{\text{свс}}} k h_0 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 h_{\text{свс}} \left( \frac{Q_3 - 2u^0}{\delta} k \right) = 0,8 k h_{\text{свс}} \frac{2u^0 \delta}{\alpha_{\text{свс}}} + \quad (26)$$

$$+ 0,2 h_{\text{свс}} \frac{Q_3}{\alpha_{\text{свс}}} ; Q_{\text{свс}} = \delta h_{\text{свс}} (1,6 k u^0 / \alpha_{\text{свс}} + 0,2 \delta / \delta) \quad (27)$$

Используя предельные значения перемещений  $u^0$  и  $\alpha_{\text{свс}}$  в таблице (18), (21), (25) и (27), после преобразований получим выражение прочности балок по поперечной силе в виде:

$$Q = 1,75 \left[ 0,8 \delta h_0 E_3 (1,77 k \frac{A_3 E_3 / E_3}{\delta Q \delta / h_0} + 4,12 \delta \frac{\delta}{\delta} \delta_{\text{свс}} \sqrt{R_0} \right] \quad (28)$$

$$x = \frac{\delta}{\delta} h_0 ; z = \frac{\delta}{\delta} h_0 ; h_0 x = \frac{\delta}{\delta} h_0 ; 2c = \frac{h_0}{2} ; \epsilon_{\text{свс}}^0 = 120 \cdot 10^{-6}$$

Как видно в (28) содержится параметр, характеризующий геометрию балки, свойства бетона и арматуры, пролет срезав, сечение арматуры и оплывчатую жесткость контактного взаимодействия. В литературе при этом указано, что учет последнего фактора позволяет определять в основном сопротивление срезу балок без хомута.

Разлетка критических наклонных трещин в тавровых балках существенно отличается от такового в балках прямоугольного сечения и имеет характерную особенность, связанную с размером срезов полки. Методы расчета таких балок, регламентированные действующими нормами, по существу базируются на экспериментальных данных

для элементов прямоугольного сечения и носят условный характер.

Полученные после поштатной тавровой балки результаты говорят о следующем: все поперечные стержни, пересекаясь кричически наклонные трещины, достигли предела текучести до разрушения оплитных балок; как правило, напряжения в хомутах корнатуробетонных балок были выше, чем в балках из тяжелого бетона, что говорит об их меньшей способности передавать силы защемления через трещину. Получена полная картина дилатационных смещений: во всех трещинах балок наблюдалось смещение поперечного армирования бетонной балки с минимальным процентом поперечного армирования и наименьшей величиной единичной жесткости в трещинах. На начальных ступенях приложения нагрузки наклонно трещины сначала расширяются, а затем сходятся. Осведа следует, что если заделаны в первых крутых наклонных трещинах выйдет на условия совместности в остальной части рабры еще до распространения трещин на наиболее высокие уровни нагружения. Подразумевается, что главное, достигнувше направление, способствующие локализации наклонных трещин, должны быть равномерно распределены в направлении перпендикулярном траектории трещин. Следовательно, ясно что наклонно трещины должны распространяться от плиты до уровня продольной арматуры почти перпендикулярно и направлению главных растягивающих напряжений в аналитической мере не должно совпадать с траекторией, известными из теории упругости.

Для оценки несущей способности тавровых балок, в отличие от балок прямоугольного сечения, требуется более сложная модель, позволяющая в рассмотрении хомуты и наклонные бетонные полосы рабры. Такой анализ требует сложных геометрических построений и привлечение ряда не проверенных допущений, которые могут привести к недостаточному отрогу условиям равновесия и совместности. В связи с этим был использован энергетический подход на основе рассмотренной модели балки в виде уточненной модификации формальной аналитики, принятой в современных рекомендациях ЕМ-501, рис. 7.

Используя теорему Энгессера-Кротти о дополнительной энергии в наклонных стержневых системах для элементов рассматриваемой формы можно записать

$$dU_{\text{ген}}/dt = 0; U_{\text{ген}} = \int \frac{1}{2} \frac{p^2}{EA} dx; t = \frac{c}{2} = c_0 \phi; \quad (29)$$

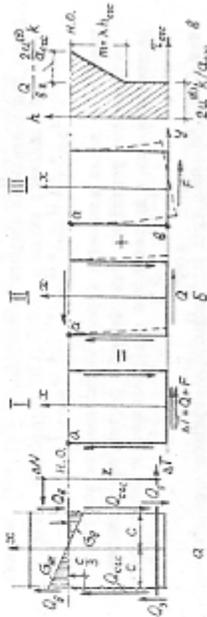


Рис. 6. Равновесие усилий (а) и деформация (б) в консольном олове балки, (в) — эпюра  $\epsilon_{\text{сск}}$  в сечении с трещиной.

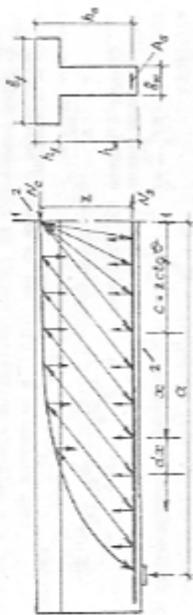


Рис. 7. Схема внутренних усилий в форменной аналитике тавровой балки.

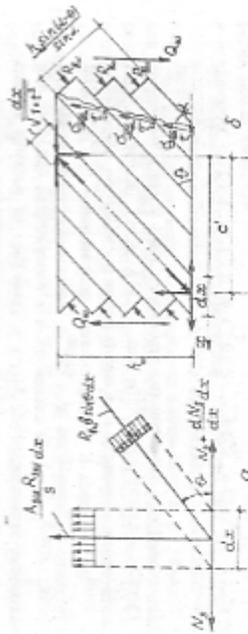


Рис. 8. К определению условий равновесия на уровне продольной арматуры (а) и в ребре балки (б).

Общая дополнительная энергия ферри равна:

$$U_{\text{фер}}^{\text{общ}} = \sum (U_{\text{фер}1} + U_{\text{фер}2} + \dots + U_{\text{фер}N}), \quad (30)$$

где  $N$  - число элементов ферри, локализованных энергии.

Изменение усилий по длине ферри и расстоянию в светом поперек взаимосвязывается в пределах зон с различными и параллельными тропинками:

$$\Delta N_{\text{фер}}^{\text{FL}} = \Delta N_{\text{фер}}^{\text{FI}} + c \text{tg} \theta \int_0^x \frac{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}}{S} dx = \frac{1}{2} \frac{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}}{S} (c \text{tg} \theta)^2; \quad (31)$$

$$N_{\text{фер}}^{\text{FI}} = N_{\text{фер}}^{\text{FI}} \frac{Q_0 \alpha}{2} - \frac{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}}{S} c \text{tg} \theta (\alpha + \frac{\alpha}{2}); \quad 0 < x < (\alpha - c). \quad (32)$$

Условия равновесия на уронные растянутой арматуры и в ребре бочки представляются охватами на рис. 6а,б и запишутся так:

$$\frac{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}}{S} = R_{\text{фер}} \beta_3 \sin^2 \theta; \quad \frac{Q_0}{h} c \text{tg} \theta = R_{\text{фер}} \beta_3 \alpha r^2 \theta. \quad (33)$$

Опуская с учетом (32) получим:

$$N_{\text{фер}}^{\text{FI}} = N_{\text{фер}}^{\text{FI}} \frac{Q_0 \alpha}{2} - \frac{Q_0}{h} (x + \frac{x}{2}); \quad 0 < x < (\alpha - c). \quad (34)$$

Половая растянутого и светлого полюсов определяются как:

$$A_3 = \beta_3 \cdot \beta_1 \cdot h_0; \quad A_c = \beta_3 (\frac{\Delta}{f}) z; \quad \lambda = \frac{h_1 k}{h_1 \omega}; \quad \xi = \frac{z}{h_1} \cdot h_1 (\frac{h_1}{f}) z. \quad (35)$$

Далее в дисперсия на основе (29) получены уравнения для оценки калого из скелетных в (30), представляющих локализованную энергию, локализованную в элементарной модели:  $N_{\text{фер}1}$ ,  $N_{\text{фер}2}$  - в растянутом и светом поперек;  $N_{\text{фер}3}$  - в наклонных бочонках полюсов ребра;  $N_{\text{фер}4}$  - контактное взаимодействие в трещинах;  $N_{\text{фер}5}$  - в поперечной арматуре. В общей форме эти уравнения можно представить в виде  $N_{\text{фер}} = k \cdot f(t)$  или  $N_{\text{фер}} = \partial U_{\text{фер}} / \partial t = k f(t)$ . Используя (29) в виде  $\sum \partial U_{\text{фер}} / \partial t = 0$  получено его решения в виде полинома:

$$C_1 t^n + C_2 t^{n-1} + C_3 t^{n-2} + \dots + C_n = 0, \quad (36)$$

где  $C_1$  - степень полинома, зависящая от решений указанных уравнений;

$C_1, \dots, C_n$  - константы для соответствующего урона нагружения.

Показано, что основное влияние на  $t$  оказывает энергия  $N_{\text{фер}1}$  и  $N_{\text{фер}5}$ . Используя (31), (35), а также схему на рис. 6а, получим:

$$c \text{tg} \theta = \frac{d N_{\text{фер}} / dx}{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}} / S}, \quad (37)$$

$$\text{т.е.} \quad d N_{\text{фер}} / dx = \beta_3 \Delta \epsilon_3; \quad \frac{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}}{S} = \gamma_3 \epsilon_3; \quad \gamma_3 = \frac{A_3 E_3}{d S}; \quad \gamma_3 = \frac{A_{\text{фер}} E_{\text{фер}}}{S} \quad (38)$$

$\Delta \epsilon_3, \epsilon_3$  - соответственно разницы двух размеров деформаций поперечной арматуры в пределах пролета бочки и деформация в хому-тах.

Тогда (36) запишется в виде

$$C \text{tg} \theta = \gamma_3 \frac{\Delta \epsilon_3}{\epsilon_3}, \quad \gamma_3 = \gamma_3' / \beta_3', \quad (39)$$

По размерам  $\epsilon_3, \alpha, \epsilon_{\text{кк}}, \delta_{\text{кк}}$  и рис. 7 в можно записать:

$$T_{\text{кк}} = k \frac{\delta_{\text{кк}}}{\Delta \alpha_{\text{кк}}} = \frac{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}}{\beta_3' S} \frac{\sin(\alpha - \theta) \cos(\alpha - \theta)}{\sin^2 \theta}$$

Используя тригонометрические преобразования его можно пролотить как квадратное уравнение:

$$A (c \text{tg} \theta)^2 + B c \text{tg} \theta + C = 0, \quad (40)$$

где  $A = 1, B = \text{tg} \alpha - c \text{tg} \alpha, C = -[1 + k \frac{\Delta \delta_{\text{кк}}}{\Delta \alpha_{\text{кк}}} \frac{\beta_3 \omega S}{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}} (\text{tg} \alpha + c \text{tg} \alpha)]$ .

Решение (40) имеет вид  $c \text{tg} \theta = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$  или:

$$c \text{tg} \theta = \frac{1}{2} [(c \text{tg} \alpha - c \text{tg} \alpha)^2 + 4 [1 + k \frac{\Delta \delta_{\text{кк}}}{\Delta \alpha_{\text{кк}}} \frac{\beta_3 \omega S}{A_{\text{фер}} R_{\text{фер}}} (c \text{tg} \alpha + c \text{tg} \alpha)]]^{1/2} (c \text{tg} \alpha - c \text{tg} \alpha). \quad (41)$$

Экспериментальные оценки значения  $\theta$  с ростом нагрузки по (41) для исследованных бочек близко соответствуют решениям в рамках энергетического подхода, что не только отражает их реальную работу, но и показывает преобладающее влияние контактного взаимодействия в трещинах на эту работу. Проведенные расчеты показали, что при нагрузках, указанных в таблицах в хомутах ве-

личины  $k \cdot \Delta \delta_{\text{кк}} / \Delta \alpha_{\text{кк}}$  могут быть приняты для твёрдого бетона -

1,9  $\text{Н}/\text{мм}^2$ , а для керамзитобетона - 1,1  $\text{Н}/\text{мм}^2$ . Тогда при  $\alpha = 45^\circ$

выражение (41) принимает вид:

$$\operatorname{ctg} \phi = (1 + 2k \frac{\Delta \sigma_{\text{сж}} \rho_{\text{сж}} \cdot s}{\Delta \sigma_{\text{сж}} \rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}})^{\frac{1}{2}} = (1 + \frac{\psi}{\rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}})^{\frac{1}{2}}, \quad (42)$$

где  $\psi = 3,8 \text{ Н/мм}^2$  для тяжелого бетона;

$\psi = 2,2 \text{ Н/мм}^2$  для керамзитобетона.

Из (33) и рис. 7 можно показать, что:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{A_{\text{сж}} R_{\text{сж}}}{\rho_{\text{сж}} s} \frac{\sin(\phi - \delta)}{\sin \phi}; \quad \sigma_{\text{сж}} = \frac{A_{\text{сж}} R_{\text{сж}}}{\rho_{\text{сж}} s} \left[ \frac{\sin(\phi - \delta)}{\sin \phi} \right]^2. \quad (43)$$

Подставляя (43) в (10) и используя преобразования, получим уравнение:

$$A (\operatorname{ctg} \phi)^2 + B \operatorname{ctg} \phi + C = 0, \quad (44)$$

решением которого для блока из тяжелого бетона будет:

$$\operatorname{ctg} \phi = \frac{1}{2} \left[ (400 + \frac{2 \cdot 40}{\rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}})^{\frac{1}{2}} - 7 \right]; \quad A = 0,3; \quad B = 1,4; \quad C = (7 + \frac{8}{\rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}}), \quad (45)$$

а для блока из керамзитобетона:

$$\operatorname{ctg} \phi = \frac{1}{2} \left[ (400 + \frac{2 \cdot 20}{\rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}})^{\frac{1}{2}} - 3 \right]; \quad A = 0,7; \quad B = 0,6; \quad C = (3 + \frac{4}{\rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}}). \quad (46)$$

Продольное сопротивление блока сразу складывается из: сопротивления сжатой зоны, приведенного по Рисунку к виду:

$$Q_{\text{сж}}^{\text{дл}} = 0,27 \sqrt[3]{R^2} (\rho_{\text{сж}} + 1,5 \lambda h_1) h_1 \quad (47)$$

при  $\lambda = 1$  если  $\rho_{\text{сж}} - \rho_{\text{сж}} < 3 h_1$  и  $\lambda = (\rho_{\text{сж}} - \rho_{\text{сж}}) / 3 h_1$  если  $\rho_{\text{сж}} - \rho_{\text{сж}} > 3 h_1$

- сопротивления ребра блока с учетом (45) и (46) по формуле:

$$Q_{\text{сж}}^{\text{дл}} = \rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}} \cdot \rho_{\text{сж}} h_1 \cdot \operatorname{ctg} \phi. \quad (48)$$

Анализ зависимости между углом наклона сетовых полос  $\phi$  и усилием  $\rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}$  в холмах показал существенное различие в поведении блока. Так для одинаковых значений  $\rho_{\text{сж}} R_{\text{сж}}$  угол в керамзитобетонных блоках значительно больше, чем для блока из тяжелого бетона, что объясняется относительно лучшей способностью последних к передаче напряжений через трещины. Результаты расчетов по (47) и (48) близко согласуются с данными испытаний опытных блоков.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Демонстрационная работа является комплексным исследованием, представляющим теоретический анализ и экспериментальные обоснования новых физических соотношений, моделей и предположений о прочности и процессах деформирования и разрушения, используемых для развития теории и совершенствования инженерных методов расчета балочных и железобетонных конструкций. Полученные научные результаты характеризуются практической значимостью и могут быть кратко сформулированы следующим образом:

1. На основании проведенных исследований уточнены закономерности трещинообразования, деформирования и разрушения легкого бетона сплошной структуры и его компонентов на основе предельно-линейной и нелинейной механики неоднородных многокомпонентных сред и механики трещин. Получены комплексные экспериментальные данные и аналитические выражения по прочности, деформации и трансформированию керамзитобетона и его компонентов при критическом одноосном и многосном, а также длительном одноосном статическом нагружении с учетом структурных и технологических факторов. Определены экспериментальные значения параметров трещинообразования для керамзитобетонной массы и структуры трещинообразования, позволяющей реализовать структуру легкого бетона, позволивший реализовать разработанный алгоритм расчетов структурных напряжений в многокомпонентном керамзитобетонном массиве процессов образования и развития трещин и материала при одноосном сжатии.

2. Предложен вариант двухкомпонентной модели структуры легкого бетона, позволивший реализовать разработанный алгоритм расчетов структурных напряжений в многокомпонентном керамзитобетонном массиве процессов образования и развития трещин и материала при одноосном сжатии.

3. Теоретически обоснована и экспериментально проверена модель метода прогнозирования кратковременной прочности по сжатию легких бетонов сплошной структуры, учитывающий вторичные процессы деформирования и нарушения прочности во времени в основаниях на использовании исходной массы структуры легкого бетона и реализации моделей структурно-материального математического моделирования процесса трансформирования и разрушения. Предложена новая методика расчета оценки прочности пористого армированного в бетоне.

4. Получены новые экспериментальные данные поведения керамзитобетона и его компонентов при трехосном шпалерчатом сжатии. Выявлено влияние интенсивности бокового сжатия на процесс разрушения при трехосном сжатии с шпалерчатыми тентажом надрезе-

ний с трещинами, расположенных в пролете срезу балки. Показано, что механика изгибающей силы через трещины является основой фактором в опирании срезу балок без поперечной арматуры и при поперечном изгибе.

9. Получены новые экспериментальные данные о поведении трещин в балках из легкого и тяжелого бетона с различными поперечными армированиями. Установлено, что результирующий вектор сдвига бетона трещина в чаше балок в большей степени зависит от соотношения статических моментов, чем от влияния ее нормального раскрывания. Установлено логичное влияние сил зацепления в трещинах на ее траекторию, что позволило дать расчетную оценку угла наклона трещины к оси балки. Разработаны новые теоретический подход, позволяющий использовать энергетические приемы в рамках модифицированной формальной выкладки теоремы балки с трещинами, показавшая удовлетворительно соответствие такого подхода с экспериментальными данными о характере наклона трещины.

#### Сопоставление и результаты экспериментальной работы на балках с армированием в различных разрезах:

1. К вопросу исследования влияния влажности и температуры на прочность, долговечность бетона. Тезисы 19 Девятой международной конференции по использованию искусственной и автоклавированной дорог в условиях жаркого климата и высокогорья. - Ташкент, 1971.
2. Исследование влияния температурно-влажностного режима среды на прочность и работу бетона. Тезисы 19 Девятой международной конференции по использованию искусственной и автоклавированных дорог в условиях жаркого климата и высокогорья. - Ташкент, 1971.
3. Исследования напряженно-деформационного состояния армированных бетонных элементов с учетом длительных процессов // Строительство и архитектура Узбекистана. - 1972. - № 9. - С. 27-34. (в соавторстве).
4. Длительная деформация сваях напорнобетонных элементов Сборник материалов по итогам НИЕ ГАИ за 1971 г. - Вып. 86. - Ташкент, 1973.
5. Влияние температурно-влажностных условий среды на деформационные свойства тяжелых бетонов. Материалы I сесс. кооп. совещания по проблеме "Реалитизация бетонных работ в условиях сухого жаркого климата". - Ташкент: Узбекстан, 1974.
6. Прочность и долговечность бетонов железобетонных конструкций зданий. В кн.: Прочность железобетонных конструкций многоэтажных зданий. - Ташкент: Узбекстан, 1980. - С. 75-103 (в соавторстве).
7. Элементы механики разрушения бетона. В кн.: Прочность железобетонных конструкций многоэтажных зданий. - Ташкент: Узбекстан, 1980. - С. 75-103 (в соавторстве).
8. Исследования особенностей развития трещин в бетоне. Сборник материалов по итогам НИЕ ГАИ, Ташкент, Вып. 147. - Ташкент, 1980.

ний типа  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ .

5. Известно, что радиостат мэр полноты при растяжении и сжатии, расположенные в основу сопряженных теорий полноты бетона, для неразрушенности экспериментально не подтверждается. Ввиду различия отношения меры полноты при растяжении к мере полноты при сжатии изменяется во времени и зависит от структуры материала. Установлена граница усиленно-аномальной и нелинейной части части нормального бетона. Предложены практические рекомендации по нормированию и расчетная зависимость для прогнозирования предельной деформации прочности легких конструктивных бетонов при одноосном статическом сжатии и растяжении.

6. Обсуждаются основные положения теории контактных взаимодействий в трещинах железобетонных элементов, позволяющей выявить возможности проявления касательных сил сцепления и установить область функционально-структурного взаимодействия между выделенными, переопределяется через трещину и разнородными элементами ее бетона. Выявлено, что контактное взаимодействие в трещинах не может быть выражено простыми зависимостями теории трещины и существенно зависит от структуры бетона, определяющей площадь поверхности и степень шероховатости бетов трещины. Установлено, что для данного вида бетона величина жесткость контактного взаимодействия - от условий, действующих непосредственно к жесткости трещины. Для практического использования в инженерных расчетах предложены простые зависимости для оценки сдвигающей жесткости и прочности в трещинах, базированные на характеристиках прочности бетона и модифицированных трещиноподобных критериях.

7. Построена структурно-матричная модель механизма взаимодействия армирования в трещинах. Реализация модели на ЭМ компьютере ее хорошее соответствие опытным данным, а также возможность ее эффективного использования в нелинейных расчетах напряженно-деформационного состояния конструкций численным методом.

8. Разработана новая методология экспериментальной и расчетной оценки основных компонентов сопротивления срезу балок прямоугольного сечения без поперечной арматуры. Исходя из условий равновесия внутренних усилий получены аналитические выражения, описывающие зависимость жесткости в трещинах балок путем использования опытных величин пластических моментов их бетов. Это позволило опровергнуть распространение касательных напряжений по высоте сече-

9. Элементы механики деформируемых бетонов (монография). - Ташкент: Улутуви, 1964. - 236 с. (в соавторстве).
10. Изучение основных физико-механических свойств бетона методиками статического анализа. В кн.: Повышение эффективности строительства бетонов и железобетона. Тез. докл. IX Всесоюз. конференции по бетону и железобетону. - Ташкент, 1963. - С. 255-262 (в соавторстве).
11. Об условиях взаимодействия структурных трещин в процессе разрушения легких бетонов. В кн.: Повышение эффективности и качества бетона и железобетона. Тез. докл. IX Всесоюз. конференции по бетону и железобетону. - Ташкент, 1963. - С. 207-216 (в соавторстве).
12. Влияние развитых структурных трещин на прочность и характер разрушения легких бетонов. В кн.: Повышение эффективности и качества бетона и железобетона. Тез. докл. IX Всесоюз. конференции по бетону и железобетону. - Ташкент, 1963. - С. 219-223.
13. Исследование прочности и водонепроницаемости легких бетонов при многоосном сжатии. В кн.: Справочные данные элементов железобетонных конструкций и расчеты стержневых и двутавровых конструкций. Сб. трудов МАИ, Ташкент, 1964 (в соавторстве).
14. К методике определения сил заполнения в трещинах железобетонных элементов при действии попеременных сил. В кн.: Вопросы долговечности мостовых конструкций. Труды АН УЗСР, Ленинград, 1964. - С. 62-66 (в соавторстве).
15. Основание механического характера керамзитобетона при сжатии с учетом подвешивания калюлю и крупного заполнителя. Докл. по НИИЖТ Госстроя СССР. № 4594. - М., 1964. - 9 с. (в соавторстве).
16. Основания механические характеристики керамзитобетона при растяжении с учетом структуры материала. Докл. по НИИЖТ Госстроя СССР. № 4596. - М., 1964. - 7 с. (в соавторстве).
17. Исследования прочности и трещинообразования легких бетонных бетонов методом металлографии разрушения. В сб. научных трудов МАИ, Ташкент, Изд. 149. - Ташкент, 1964. - С. 51-63.
18. Экспериментальное исследование пластичности легких бетонных бетонов. В кн.: Повышение эффективности железобетонных конструкций. Тезисы докладов их изготовления в условиях сухого жаркого воздуха. Труды Координационного совещания. - Буера, 1966. - С. 41-42 (в соавторстве).
19. Моделирование структурных напряжений и оценка трещинообразности легких бетонов методом механики разрушения. В кн.: Тезисы, программа и применение конгрессов в воздухоплавательном строительстве. Тез. докл. Всесоюз. конф. - Ташкент, 1965. - С. 23-24. (в соавторстве).
20. Моделирование развитых трещин в бетоне развитых структур при растяжении напряженных соединений (на англ. яз.). Сборник докл. Международного молодежного комитета "Европа-204" на тему: "Структура и трещинообразование в композиционных материалах". - Москва, 1965. - С. 50-62 (в соавторстве).
21. Моделирование прочности и деформации легких бетонов развитой структуры на основе методов механики разрушения. В кн.:

- Развитие производства и применение легких бетонов и конструкций из них. Труды В. Веселен, конф. - М.: Стройиздат, 1965. - С. 87-88 (в соавторстве).
22. Развитие методов механики разрушения для моделирования трещинообразования и деформаций легких бетонов на паритетных моделях (на англ. яз.). Труды Международной конференции "Механика разрушения бетонов". - Лос-Анжелес, 1965. - С. 1164-1171 (в соавторстве).
23. Исследование влияния структуры на прочность и деформативность керамзитобетона при сжатии и растяжении. - Строительство и архитектура Узбекистана. - 1966. - № 11. - С. 27-30 (в соавторстве).
24. Получение конструкционного керамзитобетона с учетом содержания микроскопического заполнителя. В кн.: Сборник трудов НИИЖТ Госстроя СССР. - М., 1966. - С. 101-103 (в соавторстве).
25. Строительная конструкция (на узб. яз.). - Ташкент: Улутуви, 1967. - 305 с. (в соавторстве).
26. Влияние содержания керамзита на механические свойства конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии. В кн.: Сборник научных трудов УЗСР. - 1967. - С. 26-29 (в соавторстве).
27. Энергосберегающая технология подготовки изготовления мостовых железобетонных конструкций в Узбекистане. НИИЖТ. Автомобильные дороги. - Москва, 1967. - С. 22-25 (в соавторстве).
28. Легкий бетон и железобетон для индустриального строительства. - Ташкент: Улутуви, 1968 (монография). - 262 с.
29. Моделирование свойств и процессов разрушения легкого бетона в железобетоне. - Ташкент: Фан, 1968. - 146 с. (монография).
30. Железобетонные и железные конструкции. - Ташкент: Улутуви, 1968. Учебник для студентов вузов строительных специальностей. - 280 с. (в соавторстве).
31. Исследования качественных сил заполнения в трещинах железобетонных элементов без хомута. В кн.: Современное строительство конструкций и развитие методов их расчета. Сб. научных трудов МАИ. - М., 1991. - С. 28-31.
32. Влияние сил заполнения в трещинах на сопротивление железобетонных элементов попеременной нагрузке. Тезисы докладов к научной конференции МАИ. - Ташкент, 1990. - С. 51.
33. Экспериментальное исследование контактного взаимодействия в трещинах железобетонных элементов // Строительство и архитектура Узбекистана. - 1992. - № 7.
34. Оценка надольного эффекта продольной впадины при сжатии-растяжении железобетонных элементов // Строительство и архитектура Узбекистана. - 1992. - № 8.

*Shayz*

Р — Подписки в честь 8.09.92

Формат: 60x90/4 Обложка: С/ч.

Тираж: 600. Заказ: 1183

Издательство ИЛТНПО им. Н.С.Симо

Тираж: 100000 экз. Рабочий, 10.