

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

На правах рукописи

Аспирант В.В.Скочеляс

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ
БЕТОНА ОТ ЕГО СТРУКТУРЫ НА ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ
МОДЕЛЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИ-
ЧЕСКОГО МЕТОДА

(05.484. Строительные материалы, детали
и изделия)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск - 1971

Работа выполнена в Институте строительства и архитектуры Госстроя БССР.

Научный руководитель -

член-корреспондент АН БССР, доктор
технических наук, профессор
И.Н. АХВЕРДОВ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Ю.М. БАЖЕНОВ,

кандидат технических наук, доцент
Л.К. ЛУКША.

Ведущая организация -

Научно-исследовательский институт
бетона и железобетона НИИЖБ

Защита диссертации состоится " " _____ 1971 г.
на заседании Объединенного Совета по присуждению ученых
степеней по строительным, гидротехническим, строительст-
ву коммунальных сооружений и химико-технологическим спе-
циальностям при Белорусском ордена Трудового Красного
Знамени политехническом институте.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интере-
сующихся темой диссертации, принять участие в заседании
Совета или прислать Ваши отзывы и замечания по работе
(в 2-х экз., заверенных печатью учреждения) по адресу:
г. Минск, 27, Ленинский проспект, 65, ученому секретарю
Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.
Автореферат разослан " " _____ 1971 г.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук, доцент

И.С. Качан

В В Е Д Е Н И Е

Модуль упругости является важной характеристикой бетона. Конструктивный железобетон, представляющий собой сочетание бетона и стали, может в широких пределах изменять свои деформативные свойства при изменении модуля упругости бетона.

К настоящему времени получили распространение в основном два способа оценки величин E_b . Первый способ, порожденный преимущественно экспериментальной методикой исследования физико-механических свойств бетона, основан на эмпирической связи между модулем упругости и прочностью (зависимости первого типа). Этот способ ограничивается чисто формальным установлением бесконечного множества простых количественных зависимостей вида $E_b = f(R_b)$ вместо причинного анализа внутренних механизмов, управляющих их разнородностью. Поэтому зависимости этого типа могут быть названы феноменологическими.

Наиболее известные зависимости первого типа были рекомендованы Графом, Рошем, Уокером, Ричартом, Флуком, А.А. Гвоздевым, а также Г.Н.Писанко и А.Е.Голиковым, В.И.Сытником и Ю.А.Ивановым и рядом других исследователей. Область применения указанных зависимостей для прогнозирования величин модуля упругости бетона ограничена спецификой приемов их установления. Отсутствие связи с параметрами состава бетона обуславливает расхождение расчетных и экспериментальных данных в ряде случаев на $\pm 50\%$.

Второй способ, получивший развитие в последние годы в связи с пристальным изучением свойств структуры бетона, основан на непосредственной связи между E_b и упругими постоянными составляющих, их содержанием в бетоне (зависимости второго типа). В методологическом отношении преимущество этого способа оценки E_b над первым обусловлено признанием важности специфики состава бетона при определении его деформативных свойств. Поэтому зависимости второго типа могут быть названы физическими.

Зависимости этого типа были предложены Данту, Чейфдевиллем, Гансеном, Хирсчем, Хэвином, А.С.Дмитриевым и дру-

гими. Определение E_b по этим зависимостям заметно снизило расхождение между расчетными и экспериментальными данными. Однако указанные зависимости не являются вполне достоверными из-за условности принятых при их выводе допущений. Эти допущения наделяют реальный бетон свойствами фиктивного материала. Сюда относится также и феноменологическая оценка внутренних напряжений, воспринимаемых компонентами бетона. Ни одна из этих зависимостей не учитывает изменения E_b с ростом нагрузки; влияния крупности заполнителя на модуль упругости бетона; не раскрывает кинетики деформирования бетона.

Поскольку модуль упругости бетона определяется как соотношение приращений средних напряжений к соответствующим мгновенным деформациям, поле внутренних напряжений и деформаций на макро- и мезоуровне структуры бетона остается без внимания. Однако именно это поле и накладывает свое влияние на величину модуля упругости бетона. Очевидно, что задача установления связи между параметрами составляющих и величиной E_b не может быть решена без учета физических явлений, определяющих взаимодействие компонентов бетона, без оценки внутреннего поля напряжений.

В настоящей работе предпринята попытка на основании физических явлений, определяющих взаимодействие материалов в системе "матрица-включение" при сжатии, раскрыть кинетику деформирования бетона как многокомпонентного материала.

Цель исследований: получить физически обоснованное уравнение для определения модуля упругости бетона на плотных заполнителях любого состава.

В методологическом отношении задача настоящего исследования решалась следующим путем: от общего представления о неоднородном условно циклическом строении бетонов через изучение внутреннего поля напряжений на моделях с абсолютной (идеальной) циклическостью к эквивалентным циклам реальных материалов, и конечному этапу - прогнозированию упругих свойств бетона, исходя из его материального строения при учете напряжений II рода.

Работе состоит из пяти глав, основное содержание которых изложено ниже.

I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В первой главе дан анализ существующих способов оценки величин модуля упругости бетона как в зависимости от его прочности на сжатие, так и в зависимости от упругих свойств и содержания его составляющих. Показано, что зависимости вида $E \delta = f(R \delta)$ не отражают физических явлений, определяющих деформативность бетона как неоднородного материала. Изменение одних и тех же параметров состава бетона (модулей упругости и содержания компонентов) может различно влиять на его модуль упругости и прочность.

Среди зависимостей $E \delta = f(E_s, E_p, V_s, V_p)$ наибольший интерес представляют формулы:

$$\frac{1}{E \delta} = 0,5 \left[\frac{V_s}{E_s} + \frac{V_p}{E_p} \right] + \left[\frac{1}{V_s E_s + V_p E_p} \right]^{0,5} \quad (1)$$

Дожжилла - Гансена,

$$E \delta = \frac{1}{\frac{K_1 V_s}{E_s} + \frac{K_2 V_p}{E_p}} \quad \text{Хироча.} \quad (2)$$

где

$$K_1 = 1 - \frac{2Z}{\pi} \left[1 - \frac{1}{\frac{E_p}{E_s} (1 - V_s) + V_s} \right]$$

$$K_2 = 1 - \frac{2Z}{\pi} \left[1 - \frac{1}{(1 - V_s) + V_s \frac{E_s}{E_p}} \right],$$

$$E \delta = \frac{E_s E_p}{\sigma_p E_s V_p + \sigma_s E_p (1 - V_p)} \quad (3)$$

А.С.Дмитриева,

где

$$\sigma_3 = \sigma_{\delta} \cdot \frac{E_3}{E_{\delta}} \cdot \frac{E_{\delta} - E_p}{E_3 - E_p} \cdot \frac{1}{1 - V_p}$$

$$\sigma_p = \sigma_{\delta} \cdot \frac{E_p}{E_{\delta}} \cdot \frac{E_3 - E_{\delta}}{E_3 - E_p} \cdot \frac{1}{V_p}$$

$$E_{\delta} = \left[\frac{(1 - V_3) E_p + (1 + V_3) E_3}{(1 + V_3) E_p + (1 - V_3) E_3} \right] E_p$$

Хашина (4)

где E_3 , V_3 и E_p , V_p - модули упругости и относительное содержание заполнителя и растворной части в бетоне, соответственно, K_1 , σ_3 и K_2 , σ_p - для средних нормальных напряжений, воспринимаемых заполнителем и растворной частью бетона.

Анализ формул (1-3) свидетельствует о том, что они тождественны и графически представляют одно и то же семейство кривых, выражающих изменение E_{δ} в зависимости от E_3/E_p ; V_3/V_p . Механическую модель, удовлетворяющую этим формулам, можно представить в виде сочленения элементарных параллельно-последовательных моделей структуры бетона. "Половинчатая" роль допущений о равенстве то ли напряжений, то ли деформаций (при выводе формул 1-3) не является условием, достаточным для раскрытия фактических напряжений в компонентах бетона. Неизвестны напряжений, обусловленные взаимовлиянием составляющих.

Тем не менее, выражения (1-4) достаточно точно оценивают величину E_{δ} . Среднее отклонение от экспериментальных данных $\pm 12\%$, максимальное - $\pm 35\%$.

Математическая громоздкость выражений (2-3) создает известную трудоемкость расчета E_{δ} . Для практического пользования в работе предлагается графическая интерпретация указанных зависимостей в виде линий единичных модулей упругости. График, приведенный на рис. I, позволяет устанавливать в первом приближении характеристики исходных материалов для получения тяжелого бетона по требуемому модулю упругости. Величины E_{δ} , определенные из графика,

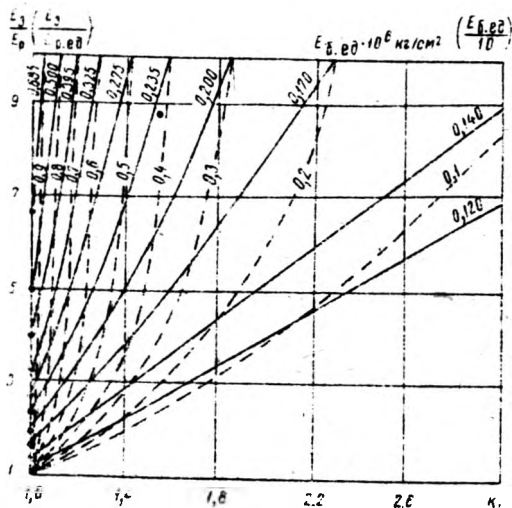


Рис.1. График линий единичных модулей упругости. Штриховые линии - относительное содержание заполнителя в бетоне по объёму V_3/V_δ , а сплошные - единичные модули упругости $E_\delta \text{ ед. } 10^6 \text{ кг/см}^2$ ($E_\delta \text{ ед. } / 10$)

имеет хорошее согласование с экспериментальными данными только в тех случаях, когда исходными параметрами составяющих являются $E_{крз}$, E_p , $V_{крз}$, V_p . При определении модуля упругости раствора (или мелкозернистого бетона) возможно расхождение с результатами эксперимента, так как уменьшение крупности заполнителя ведет при прочих равных условиях к повышению деформативности бетона.

Формулы (2,3) неприменимы при $E_3 = E_p$. Если предположить, что $E_3 = 0$, то (2,3) независимо от величины V_3 дают модуль упругости, равный нулю. Это не соответствует опытным данным. Иная попытка устранить эти недостатки, представив полуэмпирическую формулу:

$$E_\delta = E_p \left(1 + K \frac{V_3}{V_\delta} \right) \quad (5)$$

Эта формула выведена из условия пропорциональности изменения модуля упругости бетона от содержания заполнителя независимо от величины модульного отношения E_3/E_p .

Однако анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что эта пропорциональность сохраняется для бетонов при $1 < E_s/E_p < 2,5$. Если $2,5 < E_s/E_p < 10$ и $V_s/V_b > 0,4$ наблюдается криволинейная зависимость $E_\delta = f(V_s)$. Для сохранения пригодности формулы (5) для практического пользования при определении модуля упругости бетона, включая важнейший случай, когда $E_s = 0$, в настоящей работе предлагается семейство эмпирических кривых K (рис.2), позволяющих учесть все возможные изменения содержания заполнителей в бетоне.

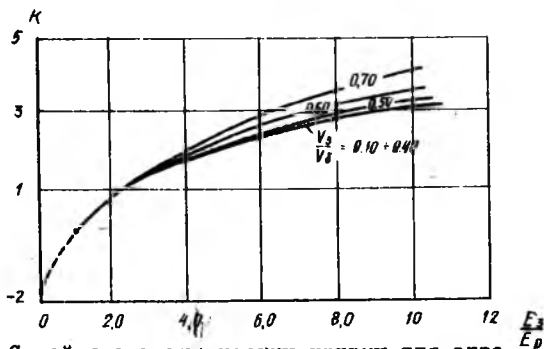


Рис.2. Семейство эмпирических кривых для определения модуля упругости бетона по формуле (5).

Предлагаемые модификации рассмотренных выше зависимостей вида $E_\delta = f(E_s, E_p, V_s, V_p)$ не устраняют их недостатков, из которых наиболее общие для них следующие.

Эти формулы:

- не учитывают изменения E_δ с ростом нагрузки;
- не учитывают влияния крупности заполнителя на упругую деформативность бетона;
- феноменологически оценивают внутреннее поле напряжений в компонентах бетона; неизвестны напряжения, обусловленные взаимовлиянием составляющих.

Поскольку структура бетона на ее макро- и мезоуровне характеризуется условной, нечетко выраженной цикличностью "цементный камень-заполнитель", весьма сложно установить, в какой мере объемное содержание заполнителя и его упру-

гие свойства влияют на величину внутренних напряжений. Это приносит методологические трудности при выборе способа изучения внутренних напряжений на образцах из реального бетона.

Естественно, что для решения этой задачи необходимо разработать приемы, которые позволили бы надежно выявить взаимосвязь между физическими параметрами структуры бетона (содержанием и упругими характеристиками составляющих) и величиной внутренних напряжений (напряжениями II рода).

Для этого был применен метод моделирования структуры бетона. Указанная взаимосвязь прослеживалась на двухкомпонентных моделях с регулярно организованной циклическостью "матрица-включение". При этом варьировались соотношения упругих постоянных компонентов модели, размер зерен включений и величина их раздвижки. Исполнение моделей из оптически активных материалов в сочетании с применением поляризационно-оптического метода позволило установить взаимосвязь между параметрами структуры моделей и величиной напряжений II рода.

В соответствии с этим в работе исследовались:

1. Внутреннее поле напряжений в элементах материального цикла "матрица-одиночное включение" при сжатии.
2. Влияние взаиморасположения включений на модуль упругости двухкомпонентных систем и деформации усадки матрицы.
3. Внутреннее поле напряжений (напряжения II-го рода) в двухкомпонентной системе с регулярно организованной циклическостью "матрица-включение" при сжатии.

II. ВНУТРЕННЕЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ "МАТРИЦА-ОДИНОЧНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ" ПРИ СЖАТИИ

Минимальным объемом, отражающим в себе все основные особенности структуры бетона, является материальный цикл "цементный камень-заполнитель". В общем случае деформационный закон циклического материала эквивалентен деформационному закону самого цикла. Это обстоятельство позволяет, изучая свойства материального цикла, использовать их показатели применительно к ожидаемым в циклическом материале,

т.е. по закону поведения идеализированной среды судить о составе закона поведения реального материала.

В соответствии с этим внутреннее поле напряжений изучалось на модели бетона, принятой в виде материальных циклов, различающихся между собой формой и размером элементов одиночных включений (заполнителей) в матрице (среде, имитирующей цементный камень) при $1 < E_b/E_m < 12$ (где E_b и E_m - модули упругости включений и матрицы). Критерием подобия между моделью и натурой служили отношения $E_b/E_m = E_1/E_2 = 1; 2,1; 3,2; 5; 12$, форма и размер включений.

В данной главе изложены: подбор состава пластмасс, использованных в качестве материалов матрицы и включений, и технология изготовления моделей. Во избежание появления остаточных напряжений при конструировании моделей был применен способ раздельного формования. При этом отдельно изготавливались элементы матрицы и включений с последующей вклейкой включений в заранее отформованные отверстия в матрице.

Все модели имели одинаковые геометрические размеры - плоские прямоугольные пластинки 70 x 90 x 5 мм. Выбор указанной геометрии продиктован также существующими габаритами поляризованной части установки ИМАП-КБ-2.

Сжимающая нагрузка передавалась жестким штампом на короткие торцевые поверхности моделей; во избежание возникновения касательных напряжений от трения о поверхность штампа, между торцевыми и опорными поверхностями моделей и штампа вводилась прокладка из тонкой резины.

Испытаниям были подвергнуты три серии моделей: I серия - 6 моделей; II серия - 6; III серия - 2 модели.

Структура моделей I и II серий различалась геометрической формой включений и соотношениями E_b/E_m при неизменном относительном содержании их в матрице $F_b/F_m = Const$. В этих сериях использовались включения в виде диска, квадрата, равностороннего и неравностороннего треугольников и ромбов. Неоднородность структуры моделей по материалам создавалась применением в I серии пластмассовой матрицы и алюминиевых включений с соотношением $E_b/E_m=12$, а во II-ой

серии - пластмассовыми матрицей и включениями при $E_b/E_m = 5; 3,2; 2,1; 1,0$. Структура моделей III серии отличалась от I и II диаметрами включений, принятыми в виде дисков из алюминия, что позволило определить величины концентраций напряжений в матрице при одинаковой форме и различных диаметрах включений.

Величины внутреннего поля напряжений характеризовались безразмерным отношением $\frac{\tau_{ист}}{\tau_{ср}}$ (где $\tau_{ист}$ - истинные касательные напряжения в элементах структуры моделей, $\tau_{ср} = \frac{P}{2F}$ - среднее касательное напряжение в сплошном условно однородном материале тех же размеров и при той же нагрузке). Величины максимальных касательных напряжений $K = \frac{\tau_{max кон}}{\tau_{ср}}$ (коэффициент концентраций) фиксировались в матрице в непосредственной близости от включений (у поверхности раздела "матрица-включение") и во включениях (точках, смежных с наиболее напряженными областями матрицы).

Так как материалы, примененные для моделирования, обладали высокими упругими свойствами, а испытания кратковременными (в течение 5-ти минут производилась зарисовка и фотографирование изохром и изоклин) и нагрузка на модель ($\sigma_{ср} = 30 \text{ кг/см}^2$) не превосходила предела упругости материалов, допускалось, что величина $\frac{\tau_{max кон}}{\tau_{ср}}$ постоянна для каждого вида материального цикла независимо от интенсивности внешних напряжений. В условиях опыта $\tau_{max кон}$ изменялась пропорционально $\sigma_{ср}$, в связи с чем $\frac{\tau_{max кон}}{\tau_{ср}} = \text{Const}$.

Для каждого вида материального цикла (исследовалось 26 видов) определены величины главных касательных напряжений по всему полю моделей как в матрице, так и во включениях, значения главных напряжений σ_1 и σ_2 в местах наибольших концентраций касательных напряжений.

Изменение величин коэффициентов концентраций касательных напряжений в матрице на грани с неоднородностью в зависимости от E_b/E_m , формы и размера включений показано на рис.3.

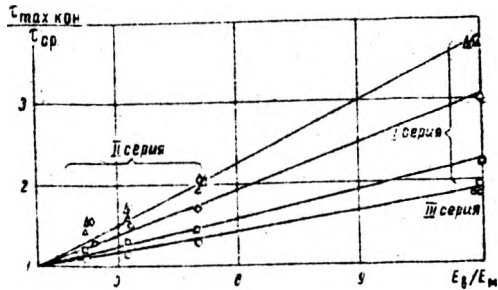


Рис.3. Коэффициент концентраций касательных напряжений в матрице моделей на грани с неоднородностью в зависимости от E_b/E_m , формы и размера включений.

Коэффициент концентраций K при прочих равных условиях зависит от геометрической формы включений; при $E_b/E_m = 3 + 4$, соответствующих соотношению упругих постоянных компонентов тяжелого бетона, коэффициент K для остроугольного заполнителя составляет $1,5 + 1,8$ и окатанного — $1,2 + 1,3$ независимо от его размера; если $\frac{E_b}{E_m} \rightarrow 1$, то $K \rightarrow 1$.

Далее показано, что с увеличением $\frac{E_b}{E_m}$ возрастает величина главных напряжений σ_1 и σ_2 в матрице моделей на грани с неоднородностью. Чем выше градиент местных касательных напряжений, тем больше величина нормальных напряжений. Близость показателей упругих свойств заполнителей и цементного камня способствует снижению концентраций напряжений у поверхности раздела "цементный камень-заполнитель", сглаживанию напряжений, распределенных между составляющими бетона и уменьшению растягивающих напряжений в цементном камне, что приближает эти бетоны к "идеальной" модели.

И. ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОРАСПОЛОЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ НА УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ И ДЕФОРМАЦИИ УСАДКИ МАТРИЦЫ

Путем прямого эксперимента установлено, что изменение ориентации включений по отношению к направлению внешнего нагружения может привести к изменению модуля упругости

двухкомпонентного материала в 3 + 4 раза.

Испытаниям были подвергнуты модели, в которых включениями служили удлиненные параллелепипеды из алюминия, размещенные в матрице из пластмассы параллельно и перпендикулярно направлению внешней нагрузки. Результаты испытаний подтвердили правсмерность выражений Данту-Гансен для определения модулей упругости E_{\parallel} и E_{\perp} подобно составленным двухкомпонентных материалов.

Так как в растворной части бетона зерна заполнителей случайно ориентированы относительно внешней нагрузки, то допуская, что макрообъемы с модулем упругости E_{\parallel} равны макрообъемам с E_{\perp} во всем объеме бетона, а положение макрообъемов с E_{\parallel} перпендикулярно направлению нагрузки, то модуль упругости такого материала может быть определен из формулы (I).

Если предположить, что положение макрообъемов с модулем упругости E_{\parallel} в матрице макрообъемов с E_{\perp} параллельно направлению нагружения, то модуль упругости этого материала можно определить из выражения:

$$E = 0.5 (E_s V_s + E_p V_p) + \frac{0.5}{\frac{V_s}{E_s} + \frac{V_p}{E_p}} \quad (6)$$

Выражению (6) отвечают некоторые виды бетонов на пористых заполнителях, когда $E_s < E_p$.

При сложном напряженном состоянии бетона обращает на себя внимание следующая важная особенность, противоречащая на первый взгляд общепринятым представлениям: усилие в направлении σ_1 , необходимое для разрыва, уменьшается с увеличением поперечного растягивающего напряжения, а с ростом поперечного сжимающего — возрастает до некоторого предела, приблизительно соответствующего напряженному состоянию при чистом сдвиге.

Неоднородная структура бетона, сложное распределение остаточных напряжений, а также случайный характер ориентировки составляющих относительно друг друга и направления действующих напряжений могут как способствовать развитию процессов разрушения, так и замедлять их, корректируя

соответственно конечную величину прочности бетона. Однако наличие в бетоне трещин усадочного происхождения (независимо от влияния других переменных) и центров остаточных напряжений, характеризующихся высоким уровнем их значений, может служить объяснением "аномального" поведения бетона при сложном напряженном состоянии. Для раскрытия общей картины напряженного состояния бетона при его усадке были произведены исследования поляризационно-оптическим методом.

Материалом, имитирующим цементный камень, являлась пластмасса на основе пластифицированной эпоксидной смолы ЭД-6. Изготавливались модели толщиной 5 мм в виде прямоугольных плоских пластин размером 90 x 90 мм с симметрично расположенными дисками из латуни и алюминия (квадратная упаковка), расстояние между которыми составляло 0,1; 0,2 и 0,8 диаметра дисков. Диски воспроизводили зерна заполнителя, а пластмасса - матрицу цементного камня. Так как пластификатор химически не связан с остальными компонентами пластмассы, то постепенный выход его со временем на последней способствовал развитию деформаций матрицы в плоскости модели подобно усадке цементного камня в бетоне при десорбции воды.

Наличие дисков в матрице способствовало появлению в ней радиальных сжимающих и тангенциальных растягивающих напряжений, обусловленных деформациями усадки пластмассы. Причем эти напряжения были тем значительнее, чем меньше расстояние между дисками. При сопоставлении эпюр напряжений (рис. 4) становится очевидным, что сближение дисков ведет к усилению взаимовлияния напряжений в матрице, вызванных присутствием каждого из этих дисков. Это обусловлено тем, что области матрицы, граничащие с дисками А и Б, испытывают чистый сдвиг взаимнопротивоположных знаков. Если вертикальную и горизонтальную оси симметрии для каждого диска принять за систему координат, то в элементах матрицы, находящихся в первом и третьем квадранте, имеет место чистый сдвиг отрицательного знака, а во втором и четвертом - положительного. Взаимно перпендикуляр-

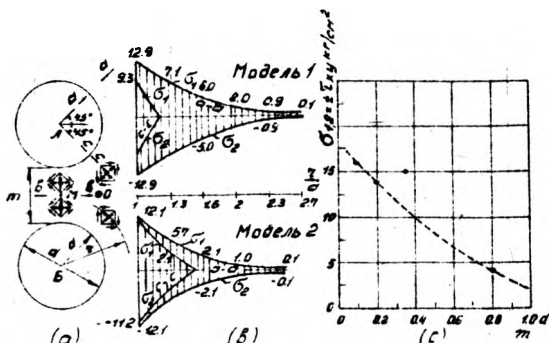


Рис. 4. Фрагмент модели. Положение сечений (а). График изменения напряжений σ_1 и σ_2 по сечениям а-а, с-с моделей 1, 2 (б). Напряжения σ_1 и σ_2 в точке М по сечению г-г в зависимости от расстояния m между дисками (с).

ное положение диагоналей касательных напряжений дает изотропную точку O , в которой $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$. Когда направление касательных напряжений параллельны друг другу или составляют между собой угол менее 90° , происходит взаимосложение проекций касательных напряжений на направление, совпадающее с направлением оси, проведенной через внешнюю и внутреннюю изотропные точки. В условиях опыта наибольшие напряжения растяжения и сжатия в матрице по сечению б-б в точке М (рис. 4) соответствовали расстоянию между дисками, равному $0,1$ диаметра.

Следовательно, чем больше величина напряжений в матрице, тем большее сопротивление оказывает та или иная система дисков развитию собственных деформаций усадки матрицы. Вместе с этим, повышенные напряжения σ_1 и σ_2 в этих местах создают благоприятные условия для образования трещин. Заполнитель, препятствуя развитию собственных деформаций усадки цементного камня, уменьшает их величину в бетоне. Чем больше величина напряжений, тем меньше деформации усадки. Эти напряжения повышают вероятность появления трещин в радиальном направлении между близко расположенными зернами заполнителя. Подтверждение этому мы находим в опытах Сью, где в реальной модели бетона указанное направление возможного трещинообразования совпадает с действительным.

При значительном расстоянии между зернами заполнителя собственная усадка цементного камня проявляется в большей мере и зависит от плотности упаковки зерен цемента, толщины и плотности реакционных каемок гидратных новообразований.

Уменьшение объемной деформации усадки бетона, достигаемое обычно применением тяжелого заполнителя при максимально возможном его содержании, снижает трещиностойкость цементного камня в бетоне. В случае применения пористых заполнителей с деформативными свойствами, близкими цементному камню, трещиностойкость бетона возрастает, однако деформация усадки увеличивается.

Итак, анализ напряженного состояния бетона при его усадке на модели указывает на наличие больших растягивающих и сжимающих напряжений в цементном камне, снижающих его трещиностойкость, что, в свою очередь, является причиной "аномального" поведения бетона при сложном напряженном состоянии. Так как усадочная трещиностойкость легких бетонов при прочих равных условиях выше чем у тяжелых, то следует ожидать, что в случае легкого бетона боковое обжатие

σ_2 не принесет эффекта повышения прочности на растяжение, как это имеет место в тяжелом бетоне.

IV. ВНУТРЕННЕЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ БЕТОНА С РЕГУЛЯРНО ОРГАНИЗОВАННОЙ ЦИКЛИЧНОСТЬЮ "МАТРИЦА-ВКЛЮЧЕНИЕ" ПРИ СЖАТИИ

В главе даны характеристики внутреннего поля напряжений в модели бетона, представленной в виде систем регулярно организованных материальных циклов, характеризующих физическую гетерогенность бетона как по содержанию его компонентов, так и соотношению упругих постоянных "цементный камень-заполнитель".

Преимущество такой модели по сравнению с моделью материального цикла заключалось в возможности анализа внутреннего поля напряжений на уровне периодически повторяющейся структуры. Внутреннее поле напряжений в модели материального цикла изучалось при условии, что имеется взаимодействие только между его структурными элементами "матрица-вклю-

чение", в взаимодействие с элементами соседнего материального цикла - отсутствует, т.е. допускалось, что включения находятся в бесконечной среде, или расстояние между ними настолько велико, что их взаимовлияние исключено. В моделях, изученных в настоящей главе, организация неоднородностей такова, что помимо влияния на внутреннее поле напряжений параметров структуры E_3/E_m , формы и размера включений проявлялось также взаимовлияние включений (взаимодействие их через прослойку смежной матрицы).

Испытаниям были подвергнуты четыре серии моделей: UI серия - 3 модели; UII серия - 4; UIII серия - 4; IX серия - 3 модели. Неоднородность структуры моделей по материалам достигалась применением для матриц и включений пластмасс с различными упругими характеристиками. Соотношения между упругими постоянными изменялись в пределах $1 < E_3/E_1 < 3,6$, что соответствовало E_3/E_m или E_3/E_1 для реальных бетонов. Совершенно четкое изменение цикличности структуры моделей достигалось насыщением фрагмента матрицы включениями в виде дисков путем варьирования как их диаметров, так и интервалов повторяемости включений в матрице. В совокупности эти факторы изменяли содержание включений F_n/F_{mod} от 23% до 74% (где F_n и F_{mod} - площадь, занимаемая включениями и площадь фрагмента матрицы модели, насыщенного ими).

Геометрические размеры моделей соответствовали размерам моделей I-III серий. Технология изготовления моделей и методики их испытания - те же, что и принятые для моделей с одиночными включениями. При испытаниях фиксировались величины внутреннего поля напряжений, как характеризующиеся отношением $\frac{\tau_{max}}{\tau_{cp}}$ по всему полю моделей.

Выявлено (рис.7а), что участки матрицы, обозначенные индексом "m" (между дисками в направлении приложенных напряжений), испытывают напряжения $\tau_{max\text{ мкм}}$, величины которых превышают средние τ_{cp} , в области матрицы, граничащие с боковыми поверхностями дисков (обозначенные индексом "l") разгружены и напряжения в них ниже средних. При этом уменьшение расстояния между дисками включений способствовало усилению взаимовлияния их через прослойку смежной матрицы, что, соответственно, повышало величину

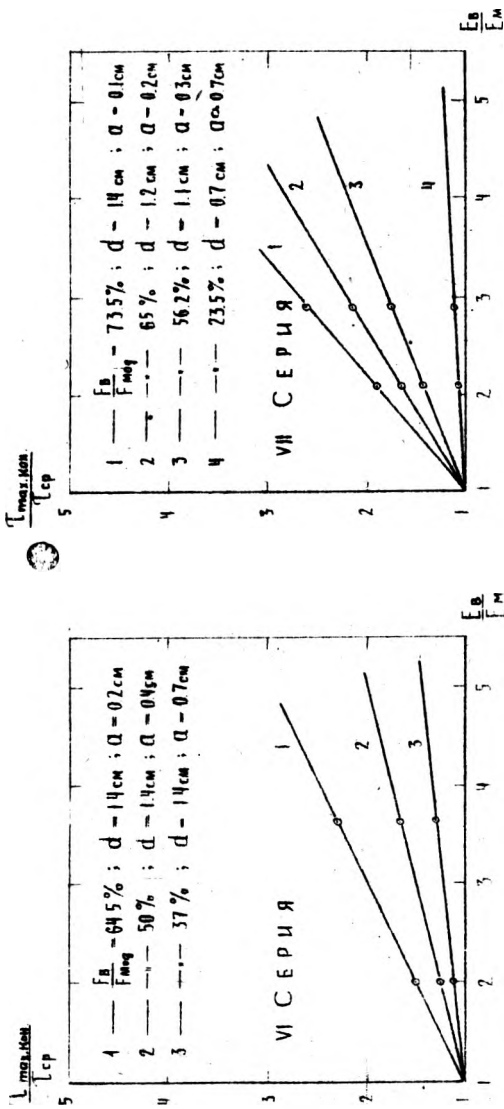


Рис. 5. Коэффициент концентрации насыщенных напряжений (выражающий взаимовлияние впадоений) в матрице моделей У1-УП серий в зависимости от $\frac{E_{в}}{E_{м}}$ и $F_{во}$.

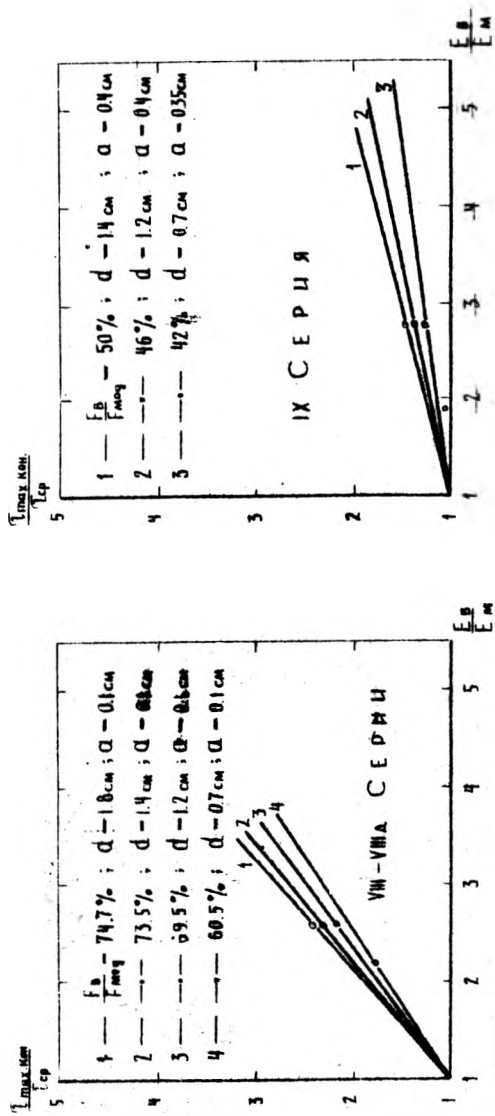


Рис. 6. Коэффициент концентрации касательных напряжений в матрице моделей VII-IX серии в зависимости от E_b/E_m и F_b/F_{m0} .

коэффициента концентраций $\frac{\tau_{\max \text{ кон.}}}{\tau_{\text{ср.}}}$ в матрице. На рис. 5, 6 показано изменение величин коэффициента концентрации K в матрице моделей в зависимости от E_3/E_m и $\frac{F_3}{F_{\text{мод}}}$ при различном диаметре дисков. Кроме того, в работе даны характеристики $\frac{\tau_{\text{уст.}}}{\tau_{\text{ср.}}}$ в области матрицы "л" и во включениях.

У. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ НА УПРУГОСТЬ ДЕФОРМАТИВНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БЕТОНА

Установление законов распределения внутреннего поля напряжений на модели бетона позволило оценить степень влияния этого поля на величину модуля упругости бетона при известных характеристиках его составляющих.

Полагая, что применительно к бетону $\frac{E_3}{E_m} = \frac{E_3}{E_n}$ или $\frac{F_3}{F_m} = \frac{E_3}{E_p}$ и $\frac{F_3}{F_{\text{мод}}} = \frac{V_3}{V_3^*}$; то для усредненных значений $\tau_{\text{уст.}}$ в области матрицы "л" и в самом заполнителе построена графическая интерпретация зависимостей

$$\tau_{\text{уст.}, 1, 3} = f \left(\frac{E_3}{E_n}; \frac{V_3}{V_3^*} \right) \quad \text{или} \quad \tau_{\text{уст.}, 1, 2} = f \left(\frac{E_3}{E_p}; \frac{V_3}{V_3^*} \right)$$

На рис. 7б по оси ординат отложены значения $\frac{E_3}{E_n}$ или $\frac{E_3}{E_p}$, а по оси абсцисс - относительные величины $\frac{\tau_{\text{уст.}, 1, 2}}{\tau_{\text{ср.}}}$. Положение кривых, выражающих объемное содержание заполнителей V_3/V_3^* в бетоне, определяет значения относительных величин напряжений $\frac{\tau_{\text{уст.}, 1}}{\tau_{\text{ср.}}} < 1$ в цементном камне (или в растворной части) при данных характеристиках $\frac{E_3}{E_n}$ или $\frac{E_3}{E_p}$ и в заполнителе - $\frac{\tau_{\text{уст.}, 3}}{\tau_{\text{ср.}}} > 1$.

Величины напряжений, воспринимаемые областью матрицы "м" цементного камня (или растворной части) для каждого значения E_3/E_m или E_3/E_p и V_3/V_3^* можно найти из графика (рис. 8а). По оси ординат отложены значения $\frac{\tau_{\max \text{ к.}}}{\tau_{\text{ср.}}}$, а по оси абсцисс - соотношения E_3/E_m или E_3/E_p . $\tau_{\max \text{ к.}}$ является средней величиной касательных напряжений с учетом концентрации их.

Допускается, что область матрицы "м" ограничена объемом тела вращения, радиусом, равным $\frac{d}{4}$ (где d - диаметр заполнителя) и высотой h , равной величине

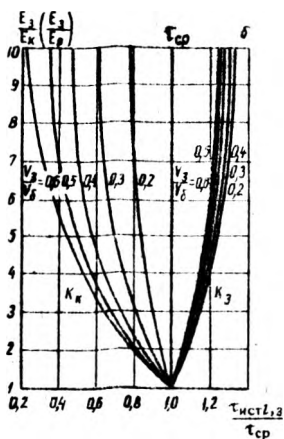
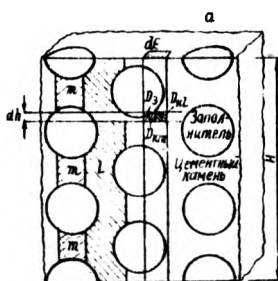


Рис. 7. Идеализированная модель бетона (а) и коэффициенты связи между напряжениями I и II рода K_k, K_3 в зависимости от параметров структуры бетона E_3/E_k (E_3/E_p) и V_3/V_b (б).

раздвижки зерен заполнителей. С уменьшением их крупности и при постоянной раздвижке объем матрицы "м" уменьшается, однако относительное содержание этих объемов возрастает. Увеличение раздвижки зерен при постоянной их крупности ведет к увеличению суммарного объема матрицы "м" с одновременным снижением величины $\tau_{\text{max.к}}$.

График на рис. 8б показывает изменение относительного объема матрицы цементного камня (или растворной части), подверженного действию $\tau_{\text{max.к}}$ при различных содержаниях заполнителя в бетоне и соотношениях $d/B = 0,2 \pm 0,05$ (где B - наибольший размер сечения бетонного образца).

Так как внутреннее поле напряжений (напряжения II рода) в бетоне оценивалось в сопоставлении со средними напряжениями I рода на основе функциональных зависимостей между физическими параметрами E_3/E_k или E_3/E_p , V_3/V_b и соотношениями $\frac{\tau_{\text{ист.з}}}{\tau_{\text{сп}}} = K_3$, $\frac{\tau_{\text{ист.л}}}{\tau_{\text{сп}}} = K_k$, $\frac{\tau_{\text{max.к}}}{\tau_{\text{сп}}} = K_m$, то представляется возможным выявить взаимосвязь между модулем упругости бетона и указанными параметрами.

Для этого рассмотрим элементарный объем бетона, опре-

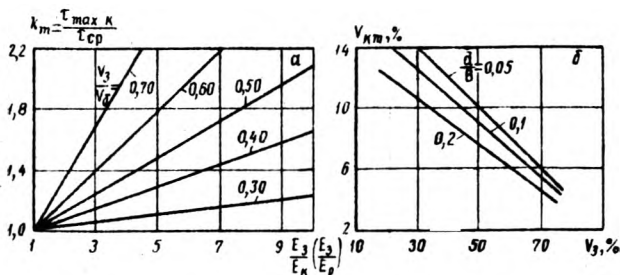


Рис. 8. Коэффициент связи между напряжениями I и II рода K_m (а) и изменение объема матрицы цементного камня (или растворной части бетона) V_{km} в зависимости от относительной крупности заполнителя и его содержания в бетоне (б).

деляемый площадью dF и высотой dh (рис. 7а).

Деформации этого объема будут равны:

$$D \delta = D_{ист.з} + D_{ист.т} + D_{max k}, \quad (6)$$

где $D \delta$, $D_{ист.з}$, $D_{ист.т}$, $D_{max k}$ — соответственно деформации бетона; заполнителя; цементного камня, разгруженного присутствием заполнителя и испытывающего перенапряжения из-за взаимодействия между заполнителями.

Полагая, что в пределах упругой стадии работы бетона нормальные напряжения σ_{cp} , $\sigma_{ист.з}$, $\sigma_{ист.т}$, $\sigma_{max k}$ пропорциональны соответствующим касательным τ_{cp} , $\tau_{ист.з}$, $\tau_{ист.т}$, $\tau_{max k}$, деформации по компонентам можно записать следующим образом:

$$\frac{\tau_{cp} H}{E \delta} = \sum_0^{h_3} \frac{\tau_{ист.з} \cdot \Delta h_3}{E_3} + \sum_0^{h_{kl}} \frac{\tau_{ист.т} \cdot \Delta h_{kl}}{E_k} + \sum_0^{h_{km}} \frac{\tau_{max k} \cdot \Delta h_{km}}{E_k} \quad (7)$$

Разделив левую и правую части уравнения (7) на τ_{cp} и рассматривая объем бетона как сумму бесконечно малых объемов, получим:

$$E \delta = \frac{1}{\frac{V_3}{E_3} \cdot K_3 + \frac{V_{kl}}{E_k} \cdot K_k + \frac{V_{km}}{E_k} \cdot K_m}, \quad (8)$$

где V_{kl} и V_{km} — относительное содержание цементного камня (или растворной части) в бетоне, испытывающие соответственно минимальные и максимальные напряжения и деформации, при этом $V_k = V_{kl} + V_{km}$.

Интенсивность внутреннего поля напряжений характеризуется величинами коэффициентов связи напряжений I и II рода - K_z, K_k, K_m .

Взаимодействие заполнителей через прослойку смежной матрицы цементного камня (или раствора), создающее в последнем очаги максимальных напряжений, учитывается в уравнении (8) слагаемым $\frac{V_{км}}{E_k} \cdot K_m$. Концентрации напряжений, а также большое различие между напряжениями в заполнителе и матрице (разгруженной присутствием заполнителя) - $\frac{K_z}{K_k}$ являются потенциальным источником образования микротрещин. В совокупности эти факторы и служат тем связующим звеном между деформированием и разрушением, которые позволяют рассматривать разрушение как процесс постепенного развития микротрещин.

С возникновением первых микротрещин (по достижению $R_{т}^*$) теряется пропорциональность между напряжениями I и II рода, исчезает понятие средних максимальных напряжений и превалируют концентрации напряжений, которые достигают весьма высоких значений в устье микротрещин. С увеличением внешней нагрузки τ_{max} к растет более интенсивно, чем $\tau_{ср}$, и коэффициент концентраций $K \rightarrow \infty$. При $K_m \rightarrow K \rightarrow \infty$, согласно уравнению (8), $E_b \rightarrow 0$. Это экспериментально подтверждается явно выраженной дивергенцией кривой "напряжение-деформация" к горизонтали после микротрещинообразования.

Сопоставление расчетных величин модуля упругости бетона, вычисленных по уравнению (8), с экспериментальными данными показывает, что среднее расхождение между ними не превышает $\pm 5 + 6\%$, а максимальное - $\pm 11\%$.

Хотя принятая нами методика исследований не предусматривала изучение изменения напряженного состояния структуры бетона при микротрещинообразовании (перераспределение усилий) и разрушение, тем не менее она позволила выявить, что характер распределения внутренних усилий (упругое взаимодействие элементов структуры бетона) накладывает свое влияние на величину предельных напряжений при микротрещинообразовании. Как установлено на моделях, под воздействием внешней нагрузки в бетоне возникает некоторая цикличность

в величинах внутреннего поля напряжений, экстремальные значения которых в верхнем пределе соответствуют максимальным концентрациям напряжений, зависящих от E_3/E_k , объемного содержания и формы заполнителей. Отсюда следует, что физический смысл коэффициента $K = f\left(\frac{E_3}{E_k}; \frac{V_3}{V_8}\right)$ (выражающего эти концентрации) заключается в том, что он характеризует потенциальную способность бетона при определенных соотношениях $\frac{E_3}{E_k}$, объемном содержании и форме заполнителя к трещиностойкости, если $K = 1$, и микротрещинообразованию, если $K > 1$. Величина коэффициента концентраций напряжений, установленная в упругой стадии, является как бы наследственным фактором, предопределяющим значения предельных напряжений при трещинообразовании бетона R_T^0 .

Поэтому, если сопоставить значения $R_{пр\ рас\т\ в}$ и R_T^0 бетона, изготовленного на этом же растворе, то отношение

$\frac{R_{пр\ рас\т\ в}}{R_T^0}$ будет характеризовать влияние параметров макроструктуры бетона $\frac{E_3}{E_p}$ и $\frac{V_3}{V_8}$ на его трещиностойкость. Другими словами, величина этого отношения определяет возможность установления косвенным путем значения суммарного коэффициента концентраций K_c . K_c представляет собой сумму коэффициентов ($K_y + K$), где K_y - коэффициент концентраций напряжений в растворной части, вызванный усадкой цементного камня в бетоне; K - коэффициент концентраций напряжений в растворной части из-за взаимодействия заполнителей при внешнем нагружении.

Анализ экспериментальных результатов из работ В.И.Сытника и Ю.А.Иванова подтверждает правомерность характеристики K_c при оценке влияния того или иного вида и количества заполнителей в бетоне на величину предельных напряжений при микротрещинообразовании. Это, в свою очередь, указывает на возможность прогнозирования величины R_T^0 , исходя из K_c и $R_{пр\ рас\т\ в}$ при оценке зависимостей:

$$\frac{R_{пр\ рас\т\ в}}{R_T^0} \left(\text{или } \frac{R_{пр\ камн\ я}}{R_T^0} \right) = f\left(\frac{E_3}{E_p(E_k)}; \frac{V_3}{V_8}\right)$$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализ существующих способов оценки модуля упругости тяжелого бетона показывает, что зависимости первого типа $E_s = f(R_s)$ и второго $E_s = f(E_s, E_p, V_s, V_p)$ не отражают физических явлений, определяющих деформативность бетона. Ни одна из этих зависимостей не раскрывает кинетики деформирования бетона, не учитывает изменения E_s с ростом нагрузки, а также влияния крупности заполнителя на модуль упругости бетона.

2. На основании уравнения Хирсча предлагается графо-аналитический метод определения E_s , исходя из параметров составляющих бетона $E_{крз}$, E_p , $V_{крз}$. Этот метод дает возможность широкого выбора исходных материалов для проектирования состава бетона на плотных заполнителях по требуемому модулю упругости.

3. На модели бетона, принятой в виде материальных циклов, различающихся между собой формой и размером одиночных включений (заполнителей) в матрице (среде, имитирующей цементный камень) при $1 < E_p/E_m < 12$ установлены закономерности изменения коэффициентов концентраций касательных напряжений в матрице на грани с неоднородностью.

4. Наличие растягивающего напряжения σ_1 в матрице модели материального цикла, обусловленное различием деформативных свойств компонентов, подтверждает гипотезу о разрушении бетона от разрыва. Близость показателей упругих свойств цементного камня и заполнителей способствует снижению концентраций напряжений и уменьшению растягивающих напряжений в цементном камне.

5. На оптически активной модели бетона выявлено, что между близко расположенными зернами заполнителя имеет место растягивающие и сжимающие напряжения, обусловленные деформацией усадки матрицы. Эти напряжения создают в цементном камне условия, благоприятные для образования трещин. Наличие их в бетоне может служить объяснением "аномального" поведения бетона при сложном напряженном состоянии.

6. На модели бетона с регулярно организованной циклическостью "матрица-включение" установлены закономерности изменения коэффициента концентраций касательных напряжений в зависимости от параметров ее структуры $\frac{E_B}{E_M}$ и $\frac{E_B}{E_{\text{мод}}}$. Выявлены области матрицы, испытывающие соответственно минимальные и максимальные напряжения.

7. На основании закономерностей изменения напряжений II рода, установленных на идеализированных двухфазных материалах, физически эквивалентных реальным бетонам в зависимости от E_3 , E_K (или E_P), V_3 , V_K (или V_P), предложено уравнение для определения модуля упругости тяжелого бетона, которое позволяет учесть влияние относительной крупности заполнителя на E_δ и раскрывает кинетику деформирования бетона.

$$E_\delta = \frac{1}{\frac{V_3}{E_3} \cdot K_3 + \frac{V_{K\delta}}{E_K} \cdot K_K + \frac{V_{KM}}{E_K} \cdot K_M}$$

Параметры, входящие в уравнение, могут служить связующим звеном между стадиями упругого деформирования и микротрещинообразования бетона.

8. Показано, что параметр структуры бетона $K = f\left(\frac{E_3}{E_K}; \frac{V_3}{V_\delta}\right)$ характеризует потенциальную способность бетона к трещиностойкости, если $K = 1$, и микротрещинообразованию, если $K > 1$.

9. Величину суммарного коэффициента концентраций для бетона заданного состава определяет соотношение $\frac{R_{\text{пр растб}}}{R_{T\delta}^0}$. Установление зависимостей вида

$$\frac{R_{\text{пр растб}}}{R_{T\delta}^0} \left(\text{или} \frac{R_{\text{пр камня}}}{R_{T\delta}^0} \right) = f\left(\frac{E_3}{E_P(E_K)}; \frac{V_3}{V_\delta}\right)$$

позволит предсказать нижнюю границу микротрещинообразования бетона с учетом специфики его состава.

10. В практическом отношении преимущество предложенного уравнения для определений модуля упругости тяжелого бетона перед существующими заключается в том, что оно позво-

воляет достаточно надежно установить E_s , исходя из параметров составляющих бетона. Среднее расхождение между расчетными и экспериментальными данными $\pm 5 + 6\%$, а максимальное — не превышает $\pm 11\%$. Указанная зависимость может быть использована для проектирования состава бетона по требуемому модулю упругости.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. И.Н.Ахвердов, В.В.Скочеляс. Моделирование напряженного состояния бетона при объемной деформации усадки. Доклады АН БССР, т.ХІУ, № 6, Минск, 1970.
2. И.Н.Ахвердов, В.В.Скочеляс. Исследование концентраций напряжений в бетоне при сжатии на моделях из оптически активных материалов. Доклады АН БССР, т.ХІУ, № 7, Минск, 1970.
3. И.Н.Ахвердов, В.В.Скочеляс. Графо-аналитический метод определения модуля упругости бетона на плотных заполнителях. Доклады АН БССР, т.ХІУ, № 10, Минск, 1970.
4. И.Н.Ахвердов, В.В.Скочеляс. Оценка величин модуля упругости тяжелого бетона при учете напряжений II рода. Доклады АН БССР, т.ХІУ, № 11, Минск, 1970.
5. В.В.Скочеляс. К оценке величин модуля упругости тяжелого бетона при учете внутреннего поля напряжений на макроуровне его структуры. Тезисы докладов на ІУ конференции молодых ученых Прибалтийских республик и Белорусской ССР (в печати).