

НИИЖБ

Прочность, структурные изменения и деформации бетона

МОСКВА

СТРОЙИЗДАТ 1978

**Госстрой СССР
Научно-исследовательский институт бетона
и железобетона
(НИИЖБ)**

ПРОЧНОСТЬ, СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. А. А. Гвоздева

**Москва
Стройиздат
1978**

Рекомендовано к изданию решением секции теории железобетона Ученого совета НИИЖБ Госстроя СССР.

Авторы: А.А.Гвоздев, А.В.Яшин, К.В.Петрова, И.К.Белобров, Е.А.Гузеев.

Прочность, структурные изменения и деформации бетона. Под ред. А.А.Гвоздева. М., Стройиздат, 1978. 299 с. (Госстрой СССР. Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона НИИЖБ). Авт. А.А. Гвоздев, А.В. Яшин, К.В. Петрова и др.

В монографии обобщены результаты экспериментально-теоретических исследований прочности, структурных изменений и деформаций бетона в процессе нагружения. Эти вопросы рассматриваются при кратковременных, длительных и многократно-повторных воздействиях при различных напряженных состояниях бетона.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.

Табл. 18, рис. 67, список лит. 299 назв.

В монографии обобщены результаты экспериментально-теоретических исследований прочности, структурных изменений и деформаций бетона при нагружении и при воздействии среды, выполненных за последние годы в нашей стране и за рубежом.

Прочность, структурные изменения и деформации бетона в процессе нагружения рассматриваются при различных воздействиях: кратковременных, исчисляемых долями секунд, минутами и часами; длительных, продолжающихся в течение многих лет и многократно повторяющихся. При этом рассматриваются различные напряженные состояния бетона: осевое сжатие и растяжение, внецентренное сжатие и неоднородные (сложные) напряженно-деформированные состояния с учетом влияния на рассматриваемые свойства бетона ряда факторов: внешней среды, температурно-влажностных воздействий, формы и размеров (масштаба) образцов, скорости нагружения и др.

Обобщение накопленных данных об основных механических свойствах преимущественно тяжелого бетона на портландцементе (рассматриваются также некоторые свойства и керамзитобетона) имеет целью прежде всего способствовать более полному использованию полученных результатов исследований в практике строительства, главным образом в проектировании.

Результаты обширных экспериментальных исследований были использованы при подготовке СНиП II-21-75 и в дальнейшем будут способствовать совершенствованию железобетонных конструкций, объем применения которых в капитальном строительстве в соответствии с задачами, поставленными XXV съездом КПСС, в десятой пятилетке значительно увеличится.

Гл. I написана А.А.Гвоздевым, гл. II — А.А.Гвоздевым и А.В.Яшиным, гл. III и IV — А.В.Яшиным, гл. IY — К.В.Петровой, гл. V — И.К.Белобровом, гл. VI — Е.А.Гузеевым. Общее редактирование книги выполнено при участии И.К.Белоброва.

Все замечания по монографии просьба направлять в НИИЖБ по адресу: 109389, Москва, Ж-389, 2-я Институтская ул., д. 6.

Дирекция НИИЖБ
Госстроя СССР

СТРУКТУРА БЕТОНА И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Структура бетона грубо неоднородна. Крупный заполнитель и растворная часть бетона различаются как по прочности, так и по упругим и реологическим характеристикам. Кроме того, преимущественно при бетонных смесях подвижной консистенции, осадка свежеуложенного бетона, т.е. седиментация его твердых частиц, сопровождаемая отжатием воды кверху, приводит к образованию под зернами крупного заполнителя скоплений воды, а при ее удалении — небольших пустот, создающих некоторую анизотропию материала [151].

В свою очередь различны прочностные и деформативные характеристики песка и цементного камня, образующих растворную часть.

Хотя и цементный камень неоднороден за счет содержащихся в нем непрореагировавших зерен клинкера, а также пор, образованных вовлеченным воздухом и незаполненной новообразованиями частью объема, ранее занятого водой затворения, однако, как показано ниже, его неоднородность проявляется по-иному. К "врожденной" неоднородности бетона добавляется с развитием усадочных явлений появление трещинок в растворной части между зернами камневидной [266].

Структура бетона таким образом изобилует "дефектами", определяющими в значительной мере его пове-

дение под влиянием нагрузок, а также разнообразных физических и химических воздействий. Однако неоднородной структурой бетона определяются не только известные слабые стороны его, но и некоторые ценнейшие свойства, так что слово "дефекты" надо в самом деле ставить в кавычки.

Степень неоднородности разных бетонов далеко не одинакова. Она зависит и от наибольшей крупности заполнителя, от гранулометрии, от механических свойств камневидной и песка, от прочности, упругости и ползучести цементного камня. Тем не менее, если идет речь о бетоне, будь он крупнозернистый или мелкозернистый (т.е. без крупного заполнителя), неоднородность его структуры играет большую или меньшую, но всегда существенную роль.

Если некоторый объем бетона, например в форме правильного параллелепипеда, подвергается действию сил, равномерно распределенных по двум его противоположным граням и нормальных к ним, то траектории напряжений, отвечающие этой нагрузке, не прямолинейны и не параллельны друг другу, как это было бы в идеально однородном теле. Они обходят более крупные и мелкие пустоты, сгущаются в более жестких включениях, разрезаются в более податливых, т.е. эмяются и искривляются.

При этом траектории напряжений, как веревочные кривые, тогда только могут быть искривлены, когда по нормалям к ним действуют соответствующие силы, обеспечивающие их равновесие. Отсюда следует, что в рассматриваемом бетонном параллелепипеде, в отличие от такового из идеально однородного материала, возникнут напряжения на площадках, нормальных к загруженным граням. Равнодействующая напряжений на любой плоскости, перпендикулярной к загруженным граням, равна, разумеется, нулю. Но на небольших частях такой плоскости напряжения окажутся то растягивающими, то сжимающими, а также касательными разных направлений.

Можно условно говорить о первичных напряжениях,

отвечающих идеально однородному телу, и о вторичных, представляющих собой разность между фактическими и первичными. Не следует думать, что вторичные напряжения всегда много меньше первичных. В этом убеждает уже рассмотрение некоторых задач теории упругости.

Если в идеально однородном упругом теле имеется малая по сравнению с его генеральными размерами сферическая полость и на большом расстоянии от нее напряжения одноосны и равномерны, то в окрестности полости напряжения изменяются, как показано на рис. 1.1. В направлении действующей нагрузки по соседству с полостью имеются зоны, где вторичные напряжения обратны по знаку первичным и достигают 50% их абсолютной величины.

Абсолютно жесткое цилиндрическое включение в идеально упругом теле, находящемся в условиях плоской деформации и испытываемом на достаточном расстоянии от включения равномерное сжатие в одном из направлений, перпендикулярных к оси цилиндра, вызывает в его ближайшей окрестности напряженное состояние, показанное на рис. 1.2. Наибольшее растягивающее напряжение составляет в этом случае 38% сжимающего напряжения, действующего вдали от включения. Оно возникает на площадке, образующей угол около 20° с направлением действия нагрузки.

В бетоне возмущения напряженного состояния, вызванные его неоднородностями, не изолированы, как в рассмотренных выше случаях, а расположены вблизи друг от друга, так что воздействия их перекрываются и взаимодействуют. Это ясно показано, например, в исследованиях проф. А.Е.Десова [87], изучавшего взаимодействие под влиянием усадки и сжимающей нагрузки четырех круглых симметрично расположенных включений из оптически активного материала в цементном растворе. В реальном бетоне возникающее напряженное состояние, разумеется, еще много сложнее, чем в упомянутой модели.

Поскольку сопротивление растяжению бетона, раст-

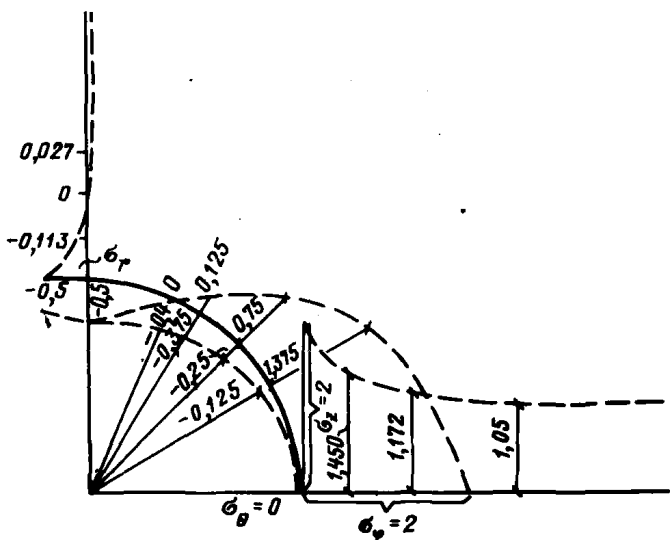


Рис. 1.1. Напряжения вблизи сферической полости в упругом материале, сжимаемом в вертикальном направлении при напряжении вдали от полости, равном единице. Коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$, σ_r и σ_z — в цилиндрических координатах; σ_φ и σ_θ — в сферических координатах

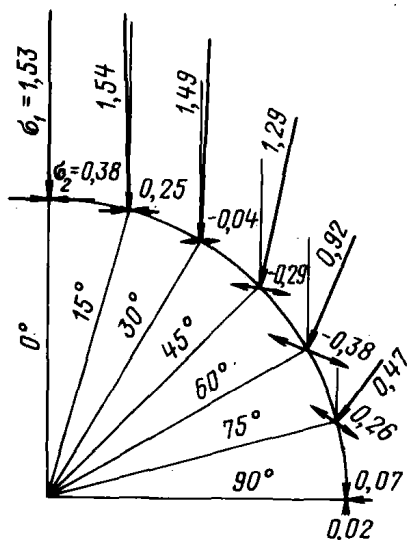


Рис. 1.2. Направления и значения главных напряжений вблизи жесткого цилиндрического включения в упругом материале, сжимаемом в вертикальном направлении, при напряжении сжатия вдали от включения, равном единице. Коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$

вора и цементного камня на порядок ниже их сопротивления сжатию, а прочность сцепления цементного камня с заполнителем может быть и того меньше, вторичные растягивающие напряжения в сжатом бетоне, еще далеко от исчерпания прочности, достигают местами предельных значений и приводят к образованию микротрещин. Первоначально микротрещины развиваются преимущественно по границам между заполнителем и цементным камнем, либо по цементному камню. С ростом нагрузки микротрещины умножаются, повышая неоднородность материала, постепенно объединяются в более или менее протяженные макротрещины, пролегающие как по границам зерен заполнителя, так и через цементный камень и крупный заполнитель, и приводят, наконец, к разрушению бетона [266].

Процесс разрушения бетона длительно и обстоятельно изучала школа проф. О.Я.Берга [15, 16, 20, 26]. Несмотря на обилие дефектов структуры бетона и на наличие в нем внутренних напряжений, вызванных кристаллизационным давлением и усадкой еще до приложения нагрузки, начальные стадии нагружения при одноосном сжатии вплоть до некоторого уровня первичных напряжений, обозначаемого R_T^0 , не вызывают образования новых микротрещин, которые можно было бы наблюдать под микроскопом или рентгеноскопически на тонких пластинках, выпиленных из образца [266], либо обнаружить косвенно путем измерения поперечных и продольных деформаций или скорости распространения ультразвуковых импульсов.

Отношение ν поперечных деформаций к продольным при этом не возрастает, а скорость прохождения ультразвуковых импульсов поперек образца увеличивается, свидетельствуя об уплотнении материала. Рост величины ν и замедление скорости распространения ультразвука служат признаком начала нового микротрещинообразования, т.е. превышения уровня R_T^0 . При дальнейшем нагружении развитие микротрещин постепенно ускоряется. Поперечные деформации растут быстрее

продольных, так что уменьшение объема сжимаемого образца замедляется, а скорость прохождения ультразвуковых импульсов поперек образца убывает. Другой характерной, "параметрической" точкой является уровень напряжений, обозначаемый R_T^V , которому отвечает минимум объема сжимаемого тела. Поскольку относительное изменение объема по сравнению с первоначальным равно $\epsilon_1 + 2\epsilon_2$ (где ϵ_1 — продольная, ϵ_2 — поперечная деформации), минимуму объема отвечает условие: $\Delta\epsilon_1 + 2\Delta\epsilon_2 = 0$ или $\frac{\Delta\epsilon_2}{\Delta\epsilon_1} = -0,5$. Условие это нередко используется для определения уровня напряжений R_T^V . Достаточно подробный исторический обзор развития представлений о процессе разрушения бетона дан в 1-й главе монографии В.М.Москвина и др. [150].

Образование микротрещин задолго до разрушения свойственно, как известно, и другим материалам, в частности конструкционным сталям. Эти микротрещины не опасны, пока ограничиваются размерами зерен металла. Однако, перерастая в макротрещины, они могут начать стремительно разрастаться, что приводит иногда к серьезнейшим авариям (судов, емкостей и т.п.). При известных условиях для распространения макротрещины в стальном листе достаточно много меньшего напряжения, чем для ее зарождения. Зарождению же макротрещины в стали способствуют концентраторы напряжений в виде острых надрезов, а также технологические факторы, снижающие способность стали к локальному деформированию.

Бетону, к счастью, не свойственны разрушения, подобные упомянутому, и это — несмотря на множество внутренних концентраторов, присущих его структуре. В чем же причина? Что мешает распространению возникающих трещин? Давно уже отмечалось [255], что трещина, развивающаяся в бетоне, встречая зерно заполнителя, должна его разрушить или обойти, а это тормозит ее рост. Также, встречая поры или пустоты в теле бетона, конец трещины перестает быть острым. Наконец, благодаря неоднородности бетона в нем имеются очень слабо напряженные области или облас-

ти с характером напряжений, неблагоприятным для образования трещины. Все это мешает их самопроизвольному распространению.

Таким образом, неоднородность бетона, порождая возникновение микротрещин, задерживает их перерастание в опасные макротрещины, а наличие концентраторов напряжений в самой структуре материала делает его малочувствительным как к внешним концентраторам, так и к вновь возникшим внутренним. Такие представления, как показано ниже, подтверждаются опытом.

Представляет большой интерес сопоставление данных о поведении под нагрузкой образцов из цементного камня, мелкозернистых и крупнозернистых бетонов различной прочности и на разных заполнителях.

В.И.Сытник и Ю.А. Иванов [198] не обнаружили у образцов из цементного камня зрелого возраста, испытанных на сжатие, параметрических уровней R_T^0 и R_T^y вплоть до разрушения. Только в образцах 28-дневного возраста они отмечают по замедлению прохождения ультразвуковых импульсов границу $R_T^0 = 0,64 R_{пр}$. С.П.Шах и С.Чандра [290] испытывали на сжатие призмы из цементного камня с разными значениями В/Ц. Коэффициент поперечных деформаций ν изменялся в незначительных пределах и неединообразно для разных образцов. Только при наибольшем В/Ц (0,57) обнаружено отчетливо возрастание коэффициента ν , начиная с напряжения, составлявшего около 90% временного сопротивления. Что касается объема образцов, то на протяжении всего опыта и для всех В/Ц он непрерывно уменьшался. Относительное изменение объема достигло к моменту разрушения 2% при В/Ц = 0,4 и около 4%/оо для В/Ц = 0,47 и 0,54. Продольные укорочения достигли соответственно 4,5 и 7%/оо. Диаграммы σ - ϵ были сильно искривлены и обращены вогнутостью в сторону оси деформаций, что, вероятно, объясняется быстро натекающей ползучестью цементного камня. Таким образом, разрушение цементного камня происходит внезапно. Параметри-

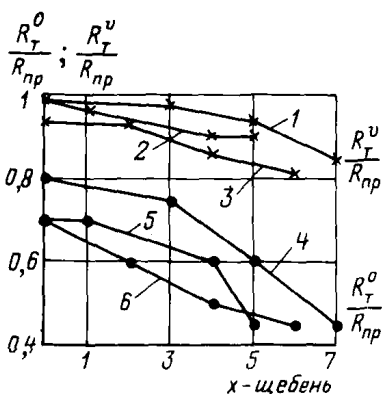
ческие уровни R_T^o и R_T^y для него зачастую не наблюдаются.

В упомянутой работе Сытника и Иванова минимальные величины параметрических уровней для мелкозернистых бетонов составили: $R_T^o/R_{np} = 0,71$ и $R_T^y/R_{np} = 0,98$, тогда как для разных бетонов с крупным заполнителем они лежали в пределах от 0,39 до 0,64 — для R_T^o/R_{np} и от 0,53 до 0,8 — для R_T^y/R_{np} . Шах и Чандра приводят данные об уровнях R_T^o и R_T^y для ряда бетонов, в которых при постоянном цементно-песчаном отношении и постоянном В/Ц изменялось в широких пределах содержание крупного заполнителя. Данные эти, подытоженные нами на рис. 1.3, показывают, что наличие и повышение содержания крупного заполнителя снижает оба характерных уровня микротрещинообразования. Они отмечают также, что с ростом концентрации крупного заполнителя при постоянном В/Ц модуль упругости, определенный при напряжении $0,3 R_{np}$, существенно возрастает (например, в 1,5 раза при переходе от состава 1:3:0:0,54 к составу 1:3:6:0,54), хотя прочность меняется незначительно.

В исследованиях О.Я.Берга и его сотрудников установлено, что для обычных крупнозернистых тяжелых бетонов границы R_T^o и R_T^y повышаются с ростом призмочной прочности. Для их определения предложены усредненные зависимости: $R_T^o/R_{np} = 0,35 \lg R_{np} - 0,15$; $R_T^y/R_{np} = 0,35 \lg R_{np} + 0,175$. Здесь R_{np} выражено в МПа.

Влияние на параметрические уровни зернового состава и прочности бетонов можно объяснить с единой точки зрения как результат большей или меньшей неоднородности их структуры. Чем выше концентрация заполнителя и его наибольшая крупность, тем более неоднородна структура. Чем прочнее цементный камень в бетоне, тем меньше он отличается по прочности и упругим свойствам от плотной камневидной, применяемой в тяжелых бетонах. В этом смысле бетоны на пористых заполнителях, прочность и жест-

Рис. 1.3. Величины R_T^0 и R_T^v при разном составе бетонов Ц:П:Ш:В/Ц
 1 - 1:4:Х:0,8; 2 - 1:2:Х:0,54; 3 - 1:3:Х:0,65;
 4 - 1:4:Х:0,8; 5 - 1:2:Х:0,54; 6 - 1:3:Х:0,65



кость которых ближе к соответствующим характеристикам цементного камня, оказываются более однородными, чем бетоны на плотных заполнителях, и следует ожидать, что параметрические уровни для них должны лежать относительно выше. Это действительно подтверждается данными М.М.Израелита и Г.С. Галузо для аглопорита [96] и Г.Я.Почтовика и Р.О.Красновского для керамзитобетона [175].

Среди факторов, влияющих на отношение $R_T^0/R_{пр}$ и $R_T^v/R_{пр}$, необходимо упомянуть также сцепление цементного камня с заполнителем.

В упомянутой уже статье Шаха и Чандра описан следующий опыт с испытанием призм на сжатие. При сохранении остальных исходных данных постоянными заполнители в одной группе призм были особо тщательно очищены, в другой — применены в состоянии поставки, а в третьей — покрыты очень тонким (порядка 0,07 мм) составом, практически сводившим к нулю сцепление заполнителя с цементным камнем. Нарушение сцепления снизило прочность бетона, примерно в 10 раз, а величина $R_T^v/R_{пр}$ составила всего 0,15. Иными словами, увеличение видимого объема началось при чрезвычайно низких напряжениях. При немом заполнителе $R_T^v/R_{пр} = 0,74$, а при тщательно очищенном $R_T^v/R_{пр} = 0,84$.

В этой работе производилось также сопоставление между достигнутым уровнем нагрузки и степенью развития трещин. Для этого ряд образцов-близнецов разгружали с разных уровней нагрузки, распиливали алмазной пилой и обследовали для установления суммарной длины трещин. Оказалось, что трещины по границам заполнителя и в цементном камне, существовавшие до нагружения, практически не удлинялись, пока не был достигнут уровень R_T^0 . Они возрастали очень ощутимо с приближением нагрузки к уровню R_T^V , а с превышением этого уровня еще умножались объединяясь в трещины большой протяженности.

С уровнями микротретинообразования связан и характер кривых $\sigma-\epsilon$, получаемых при кратковременных испытаниях бетона. Если параметрические уровни лежат высоко в связи со значительной прочностью бетона — с его мелкозернистостью или с применением пористых заполнителей, кривая $\sigma-\epsilon$ выпрямляется, а отношение деформаций, отвечающих уровню R_T^V , к предельным деформациям повышается.

При испытании бетона на сжатие в особо жестких прессах или с дополнительными приспособлениями, воспринимающими на себя часть создаваемого усилия, удается деформируя образец с постоянной скоростью обнаружить нисходящую ветвь диаграммы $\sigma-\epsilon$. Это еще дополнительный показатель длительности процесса разрушения, продолжающегося при испытаниях такого рода и за пределами временного сопротивления материала. По-видимому, падение нисходящей ветви происходит тем резче, чем выше располагаются параметрические уровни третинообразования, чем прямолинейнее диаграмма $\sigma-\epsilon$ в ее восходящей части. Все эти признаки характеризуют более хрупкий материал.

При обычных испытаниях бетона на растяжение разрушение наступает внезапно при удлинениях порядка 0,2% и многие авторы полагают, что момент разрушения совпадает с началом микротретинообразования. Кривая $\sigma-\epsilon$ нередко мало отличается от прямой.

Однако издавна известно, что при испытании бетонных балок на изгиб прочность бетона на растяжение, подсчитанная по формуле сопротивления материалов, оказывается примерно на 70% выше, чем найденная для того же бетона из опыта на чистое растяжение. Это дало основание заменять при изгибе треугольную эпюру в растянутой зоне на трапецевидную или (в целях упрощения) на прямоугольную.

Исследованием, осветившим по-новому вопрос о растяжимости бетона, был выполненный проф. В.В.Михайловым [144] эксперимент по испытанию бетонной балки в металлическом кондукторе. Балка была забетонирована между двумя швеллерами, обращенными полками внутрь (рис. 1.4), и испытывалась первоначально на изгиб совместно с ними. В зазоре между швеллерами измерялись удлинения бетона цепочкой тензометров. По достижении некоторой нагрузки показания тензометров стали резко неравномерны: в то время как большинство приборов показывало удлинения порядка $0,2^0/_{\infty}$, некоторые из них зарегистрировали удлинения в 5–8 раз большие, т.е. резко превышавшие обычно принимаемую в расчет растяжимость бетона. После этого балку разгружали, освобождая от швеллеров и она оказывалась целой. При вторичном испытании, уже без кондуктора, она разрушалась именно там, где при первом испытании наблюдались необычно большие удлинения, но выдерживала практически тот же изгибающий момент, как и балка-близнец, прошедшая испытания в кондукторе. Этот тщательно проконтролированный опыт приводит к следующим заключениям:

1. При изгибе в кондукторе, т.е. когда с ростом ривизны за известным пределом момент, воспринимаемый бетонной балкой, может уменьшаться (рис. 1.5), деформации удлинения бетона могут достигать значений, значительно больших, чем наблюдаемые при обычных испытаниях.

2. Зависимость между удлинениями бетона и растягивающими напряжениями имеет нисходящую ветвь.

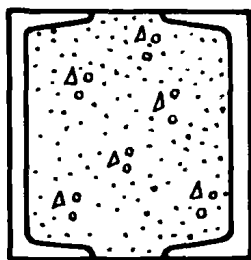


Рис. 1.4. Схема поперечного сечения бетонной балки в кондукторе из стальных швеллеров

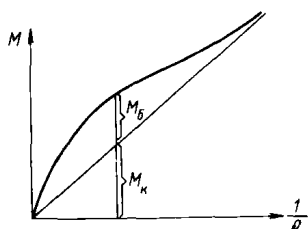


Рис. 1.5. Распределение изгибающего момента на доли, воспринимаемые бетонной балкой и стальным кондуктором

M_b — момент, воспринимаемый бетонной балкой; M_k — то же, стальным кондуктором; $1/\rho$ —

кривизна оси испытываемой бетонной балки с кондуктором

3. В бетоне изгибаемой балки возникают в процессе ее нагружения поверхностные микротрещины, носящие, возможно, обратимый характер.

Выводы эти, или по крайней мере их большая часть, подтверждены недавно рядом зарубежных экспериментов. В институте "Инчерк" (Румыния) были испытаны балки, в которых на некотором участке бетон был заменен пакетом горизонтально расположенных алюминиевых пластинок с наклеенными на них тензорезисторами. Вертикальные грани пластинок были приклеены к бетону так, что могли восприниматься усилия растяжения. Этот метод, представляющий собой видоизменение (применительно к растянутой зоне) методики, ранее разработанной и примененной для сжатой зоны О.Я.Бергом и его сотрудниками [20, 86], показал, что с приближением к моменту трещинообразования распределение напряжений в растянутой зоне все более удаляется от линейного. Эпюра растягиваю-