

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.

Драган В.И., Пракапович Ю.Л.

Бетон представляет собой сложный искусственный конгломерат, составляющие которого могут иметь различные свойства и в котором имеется большое количество пор и микродефектов, заполненных водой. Основную массу твердой фазы бетона составляют материалы, имеющие кристаллическое строение. Пластические сдвиги и зарождение микротрещин в кристаллических телах при действии нагрузки в настоящее время объясняется наличием и движением дислокаций. Именно процесс разрыхления структуры бетона, образование микротрещин в его твердой фазе при нагружении приводит к разрушению материала. Процесс усталостного разрушения бетона можно разделить на две стадии. Первая стадия – разрыхление материала огромным количеством микротрещин. Вторая стадия – образование в этом разрыхленном материале магистральной трещины. Вопрос разделения усталостного разрушения на стадии является весьма сложным в связи с неопределенностью размера микротрещины, начиная с которого можно считать начало стадии развития усталостной трещины, особенно с учетом того, что микроскопические трещины в локальных объемах возникают на первых циклах нагружения. Применение подходов механики разрушения для оценки долговечности бетонных элементов не представляется в настоящее время возможным. Поэтому при рассмотрении взаимосвязи какой либо характеристики состояния материала и усталостного повреждения наибольший интерес представляет установление взаимосвязи между неупругой деформацией за цикл в бетоне и исчерпанием долговечности. В работе [1] для стальных образцов было установлено, что в области напряжений, превышающих предел выносливости, значение неупругой деформации на стадии стабилизации определяется размерами и числом микротрещин, возникающих при циклическом нагружении. Это позволяет заключить, что циклические неупругие деформации могут быть использованы в качестве меры усталостного рассеянного повреждения на стадии зарождения усталостной трещины.

Методика измерения неупругих деформаций и рассеянной энергии при кручении

Накопление повреждений в материале исследовалось при помощи метода динамической петли гистерезиса, предусматривающего построение петли в координатах напряжение-относительная деформация, который позволяет фиксировать в процессе циклического нагружения энергию, необратимо рассеянную в материале за цикл (площадь петли гистерезиса), и неупругую деформацию за цикл (ширина петли гистерезиса).

Исследования закономерностей неупругого деформирования и усталостного раз-

рушения бетона проводилось при циклическом кручении с частотой 32 Гц. Блок схема установки приведена на рис. 1. Образцы цилиндрической формы диаметрами 55 и 101 мм. клеивались в захваты машины. Крутящий момент оценивается по значения амплитуды отклонения светящейся риски, расположенной на динамометре, которая измеряется при помощи микроскопа. Динамическая петля гистерезиса воспроизводилась на экране электронного осциллографа непосредственно в процессе усталостных испытаний. Приложенная нагрузка и деформации образца измерялись при помощи тензометра, представляющего собой упругие консольные балочки с наклеенными тензодатчиками. Прогиб левой балочки пропорционален углу закручивания динамометра машины, прогиб правой балочки – углу закручивания динамометра и образца. Тензодатчики для измерения деформаций, наклеенные на упругие элементы включены в измерительную схему так, что общий сигнал с двух пар датчиков пропорционален углу закручивания образца. Информация о напряжениях в образце снималась с датчиков, наклеенных на левую балочку. Для исключения влияния люфтов на полученные результаты, деформация балочки не меняет своего знака, что осуществляется путем предварительного ее деформирования на величину, большую максимальной амплитуды деформации образца.

Сигналы с тензометра усиливаются тензоусилителями (ТС), для устранения в измерительной схеме помех, вызванных действием переменных электромагнитных полей от внешних источников, а также для выделения рабочих сигналов фильтруются специальными фильтрами нижних частот (ФНЧ), которые пропускают сигналы в диапазоне частот 0-32 Гц, проходят через фазовращатели (ФВр) для устранения сдвига фаз в аппаратуре и подаются на светолучевой осциллограф. Таким образом, сигнал от тензодатчиков, наклеенных на упругих элементах и фиксирующих изменение усилия, подается на вертикальный канал осциллографа и вызывает отклонение электронного луча по вертикали, а сигнал с датчиков, наклеенных на упругих элементах и фиксирующих деформацию (угол закручивания образца), подается на горизонтальный канал осциллографа и вызывает отклонение электронного луча по горизонтали. В процессе испытания перемещение луча будет непрерывным и на экране осциллографа будет вычерчиваться линия, характеризующая зависимость между усилиями и деформациями.

Для контроля отсутствия сдвига фаз в аппаратуре служит переключатель S1. При этом на экране осциллографа должна вычерчиваться прямая линия, если в аппаратуре нет сдвига фаз. В противном случае на экране осциллографа наблюдается петля гистерезиса, раскрытие которой устраняется фазовращателем.

В процессе испытания перемещение луча будет непрерывно и на экране осциллографа вычерчивается линия, характеризующая зависимость между крутящим моментом и углом закручивания образца. затем эта зависимость пересчитывается в координаты напряжение-относительная деформация.

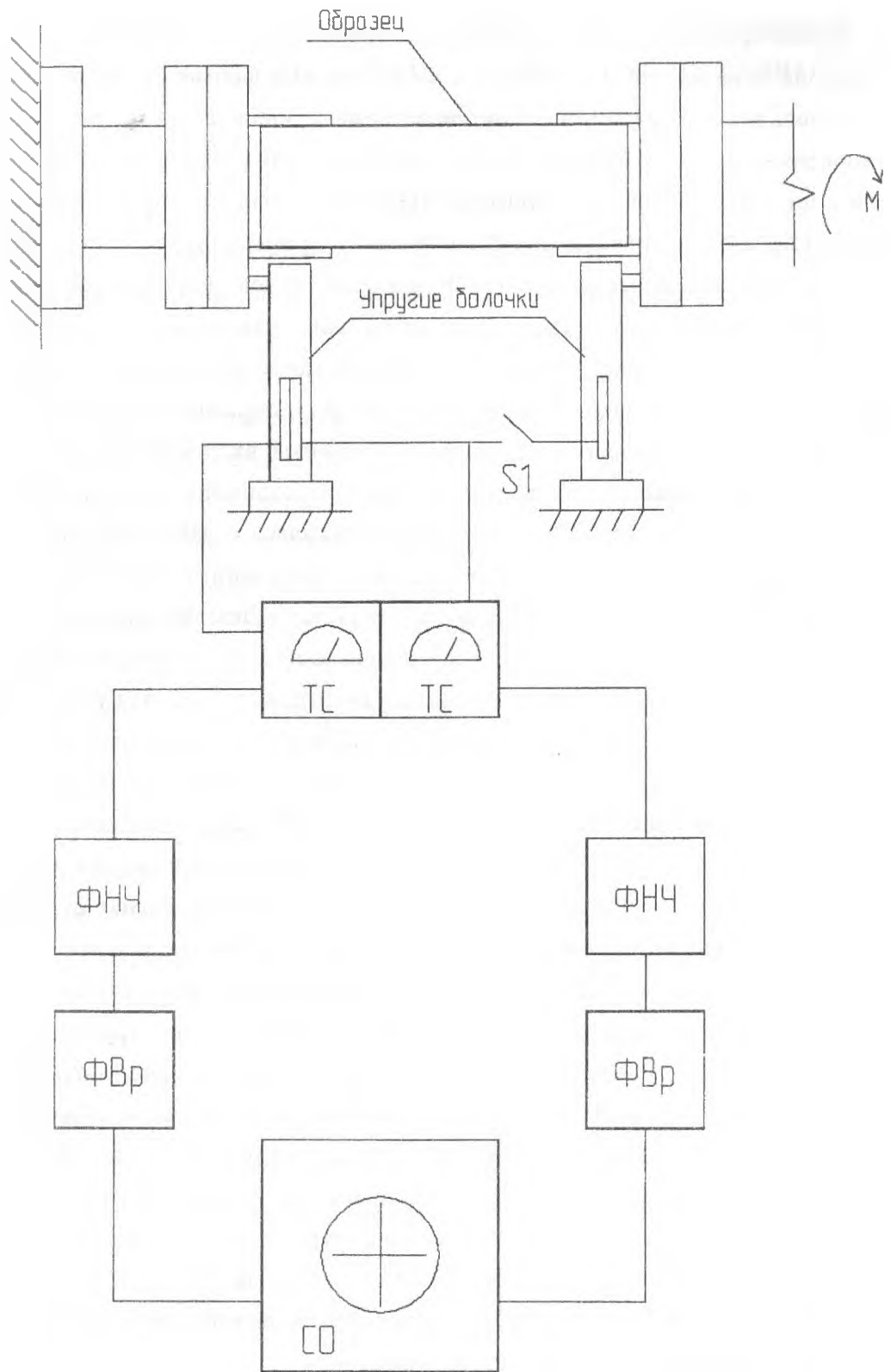


Рис. 1. Узел закрепления образца и блок схема установки для измерения неупругих деформаций за цикл при кручении.

В ходе эксперимента измерялись параметры петли гистерезиса с экрана осциллографа. Неупругие деформации за цикл при кручении определяются по формуле (1):

$$\Delta\gamma_n = \frac{\tau_a}{G \left(\frac{x_a}{\Delta x_n} - 0.5 \right)} \quad (1)$$

где τ_a – амплитуда напряжения;

Δx_n – ширина петли гистерезиса по экрану осциллографа;

x_a – амплитуда отклонения электронного луча осциллографа по горизонтальной оси;

G – модуль упругости при сдвиге.

Результаты испытаний на усталость образцов из мелкозернистого бетона различной прочности приведены на рис. 2. Испытывались образцы в возрасте 50 суток при асимметрии циклов $r = -1$ и $r = 0$. Образцы разрушались в результате развития магистральной трещины в плоскости действия максимальных нормальных напряжений.

На рис. 4, 6, 8 приведены зависимости изменения неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения. Полученные зависимости показывают, что весь процесс циклического нагружения, предшествующий разрушению бетона, может быть разделен на три периода. В первом периоде происходит увеличение неупругой деформации за цикл с увеличением числа циклов нагружения. Второй период, характеризуется стадией стабилизации процесса неупругого деформирования. При высоких напряжениях стадия стабилизации отсутствует, с увеличением числа циклов нагружения наблюдается непрерывное увеличение неупругой деформации за цикл вплоть до разрушения образца.

Для средних уровней напряжений до выхода на стадию стабилизации процесса неупругого деформирования происходит разрыхление бетона за счет образования огромного количества микротрещин и увеличения их линейных размеров. На стадии стабилизации неупругой деформации завершается процесс образования микротрещин. Из многочисленных микротрещин дальнейшее развитие получают в основном те, которые достигли до этого момента наибольших размеров. Причем увеличение их размеров происходит вследствие объединения микротрещин магистральной трещиной, а также вследствие их собственного роста. Увеличение неупругой деформации перед разрушением связано с ростом магистральной трещины. Таким образом, регистрируя изменение неупругой деформации за цикл, можно следить за накоплением повреждений и видеть на какой стадии усталостного разрушения находится материал.

На рис. 3, 5, 7 совмещены начальные участки диаграмм кручения при медленном монотонном увеличении нагрузки и в условиях циклического кручения при симметричном цикле и кривая усталости, полученная при этих же условиях циклического нагружения. Начальный участок диаграммы циклического деформирования строился в координатах. Значение амплитуды деформации определялось по формуле:

$$\gamma_a = \gamma_{упр} + \Delta\gamma_n/2 \quad (2)$$

где:

$$\gamma_{упр} = \frac{M_{кр}}{W_p \cdot G}$$

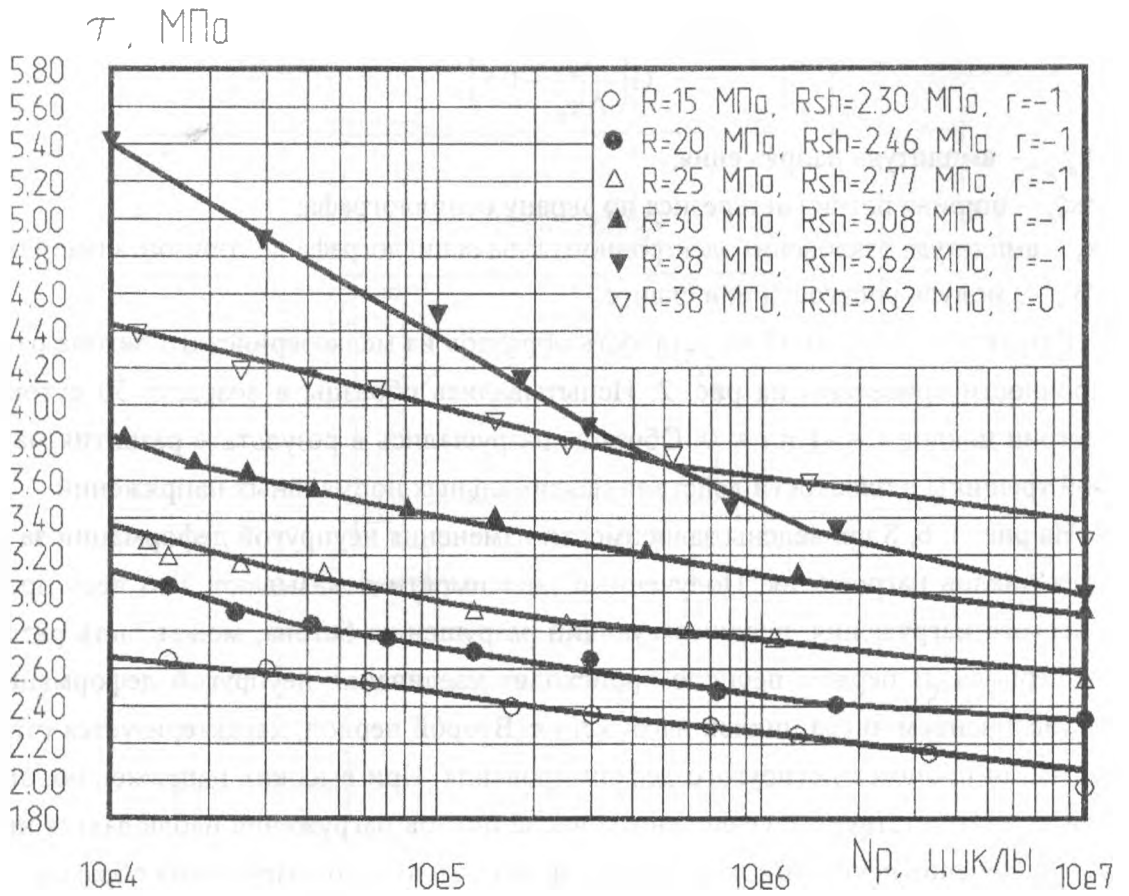


Рис. 2. Кривые усталости для мелкозернистого бетона различной прочности при кручении

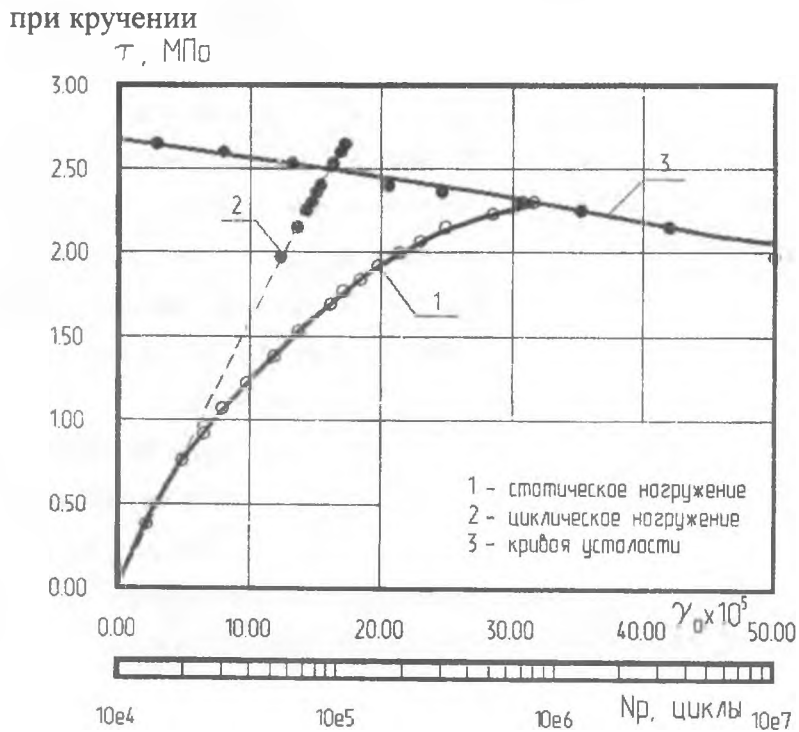


Рис. 3. Диаграммы деформирования и кривая усталости для мелкозернистого бетона R=15 МПа, Rsh=2.3 МПа

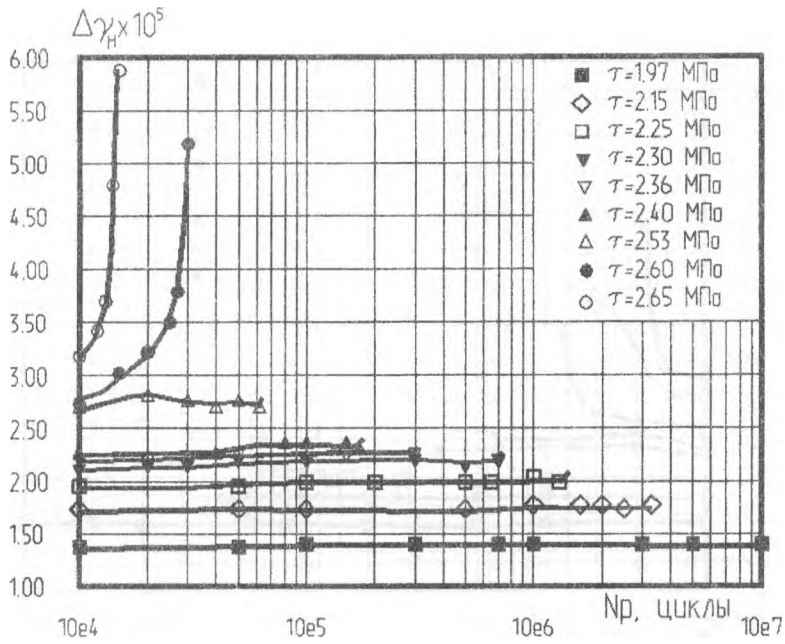


Рис. 4. Зависимость изменения неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения для мелкозернистого бетона $R=15$ МПа, $R_{sh}=2.3$ МПа

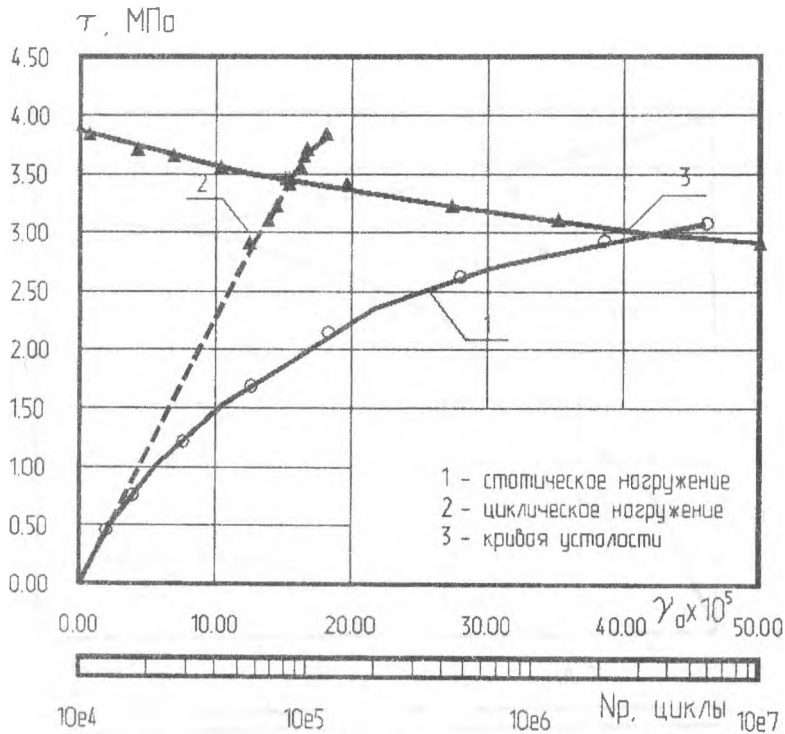


Рис. 5. Диаграммы деформирования и кривая усталости для мелкозернистого бетона $R=30$ МПа, $R_{sh}=3.08$ МПа

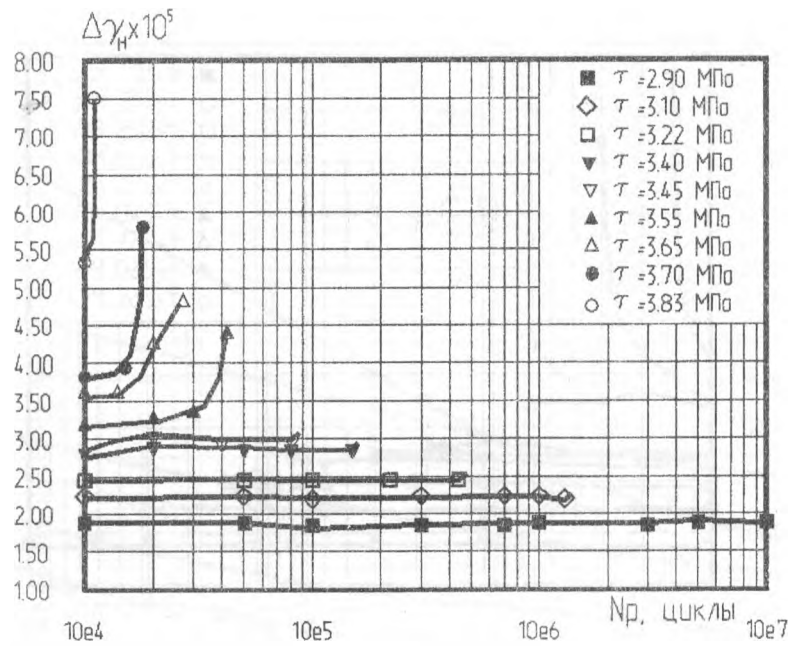


Рис. 6. Зависимость изменения неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения для мелкозернистого бетона $R=30$ МПа, $R_{sh}=3.08$ МПа

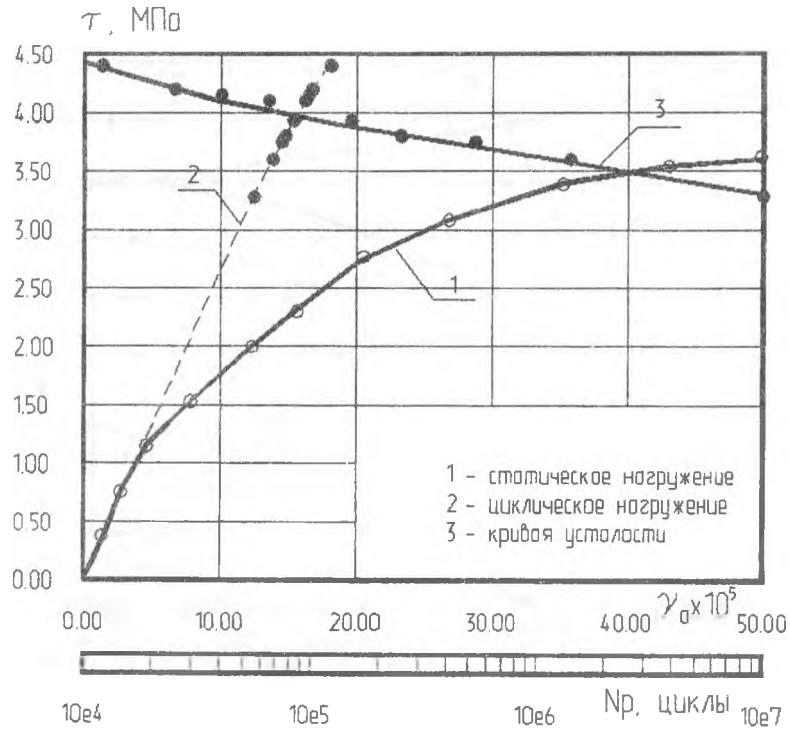


Рис. 7. Диаграммы деформирования и кривая усталости для мелкозернистого бетона $R=38$ МПа, $R_{sh}=3.62$ МПа

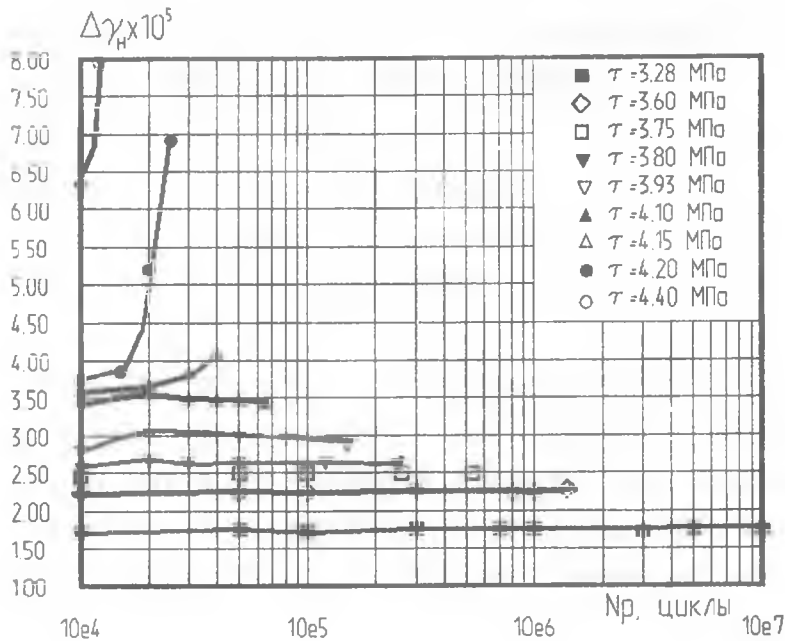


Рис. 8 Зависимость изменения неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения для мелкозернистого бетона $R=38$ МПа, $R_{sh}=3.62$ МПа

Здесь использовано значение неупругой деформации за цикл на стадии стабилизации, а при отсутствии таковой – для числа циклов равного половине числа циклов до разрушения.

Кривая многоциклового усталости бетона на базе 10^7 циклов лежит в области напряжений неупругого деформирования при циклическом нагружении. Так как кривая циклического деформирования находится выше кривой статического деформирования, то бетон ведет себя как циклически упрочняющийся материал.

Таким образом неупругая деформация за цикл является важной характеристикой бетона при циклическом нагружении, по изменению которой можно судить о процессе накопления повреждений в материале. Уровень неупругой деформации на стадии стабилизации определяет циклическую долговечность бетона.

Список литературы

1. Трощенко В.Т., Драган В.И. Исследование закономерностей неупругого деформирования и усталостного разрушения металлов при кручении. Проблемы прочности. - 1982. - N 5. - с. 3-10.
2. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. - Киев: Наук. думка, 1981 -344 с.