

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ И АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

*В.А. ДРАГАН, П. РАДЗИШЕВСКИ, А.Б. ШУРИН, Н.Н. ШАЛОБЫТА,
Ю.Л. ПРОКАПОВИЧ, БПИ, г. БРЕСТ*

По характеру неупругой деформации за цикл в зависимости от числа циклов мягкого режима нагружения все материалы условно можно разделить на три класса: циклически разупрочняющиеся, для которых при циклическом нагружении наблюдается увеличение неупругих деформаций; циклически стабильные, для которых характерно постоянство неупругой деформации, циклически упрочняющиеся, для которых в процессе нагружения наблюдается уменьшение неупругой деформации.

Для приведенных в статье результатов испытаний материалов были построены диаграммы циклического деформирования с использованием зависимостей $\Delta\gamma_n - N$, $\Delta\varepsilon - N$, полученных при различных уровнях амплитуды напряжения (рис. 1-3).

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 приростом 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.

Так как зависимости $\Delta\gamma_n - N$, $\Delta\varepsilon - N$ для разных материалов имеют различный характер изменения, следует обосновать выбор N , при котором определялась величина неупругой деформации за цикл при заданном уровне амплитуды напряжения. При определении количественных соотношений между циклической неупругой деформацией и амплитудой напряжения, а также между циклической неупругой деформацией и числом циклов до разрушения использовались значения неупругой деформации на стадии стабилизации циклического деформирования. Для тех случаев, когда отсутствовала стадия ста-

билизации неупругой деформации, в качестве таких значений $\Delta\gamma_n$, $\Delta\epsilon_n$ принимались при $N = 0,5N_p$.

С учетом данных, приведенных выше, можно сказать, что диаграммы циклического деформирования, построенные по значениям неупругой деформации на стадии стабилизации, будут характеризовать напряженно-деформированное состояние образцов в момент образования в бетоне магистральной трещины усталости. На рис. 4-6 представлены начальные участки диаграммы деформирования при циклическом растяжении – сжатии и кручении (линии 2). Диаграммы статического деформирования обозначены линией 1.

При построении этих зависимостей были использованы соотношения $\gamma_n = \tau / G + \Delta\gamma_n / 2$; $\epsilon_n = \tau / E + \Delta\epsilon_n / 2$.

Для удобства анализа полученных экспериментальных данных диаграммы циклического деформирования совмещены с кривыми многоциклового усталости в координатах “амплитуда напряжения – число циклов до разрушения”.

Уровень неупругой деформации для мелкозернистого бетона при циклическом кручении на базе $5 \cdot 10^6$ циклов равняется $\Delta\gamma_n = 1,5 \cdot 10^{-5}$ мм/мм, уровень неупругой деформации пенополистиролбетона при циклическом растяжении-сжатии на уровне предела выносливости составил $\Delta\epsilon_n = 1,2 \cdot 10^{-5}$ мм/мм.

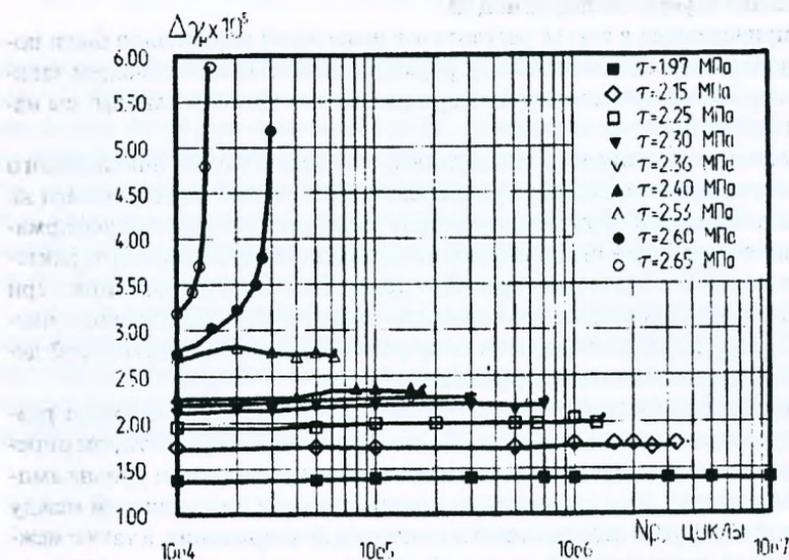


Рис. 1. Зависимость изменения неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения для мелкозернистого бетона $R = 15$ МПа, $R_n = 2,3$ МПа

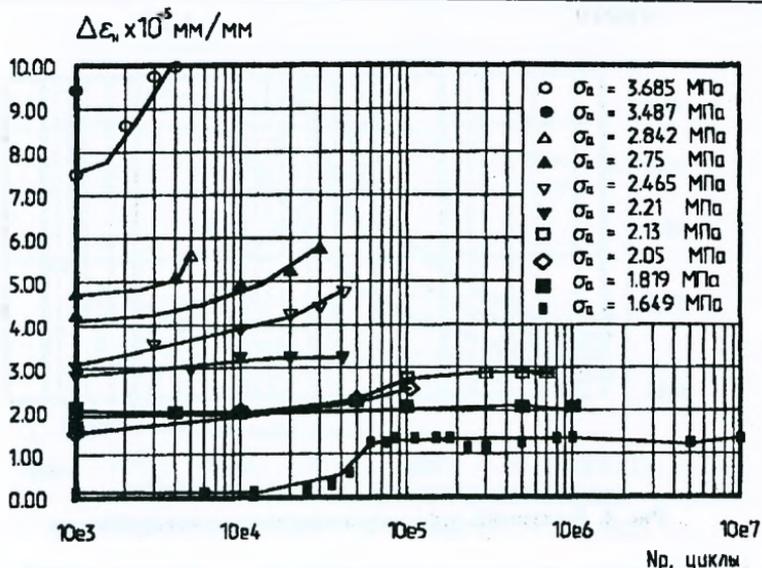


Рис. 2. Зависимость изменения неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения для пенополистиролбетона

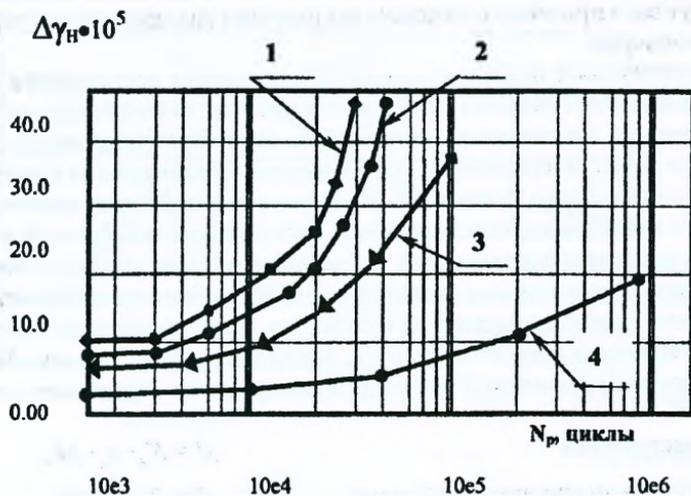


Рис. 3. Зависимость изменения неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения для асфальтобетона:

1 - $\tau = 0,881 \text{ МПа}$, 2 - $\tau = 0,778 \text{ МПа}$, 3 - $\tau = 0,724 \text{ МПа}$, 4 - $\tau = 0,554 \text{ МПа}$

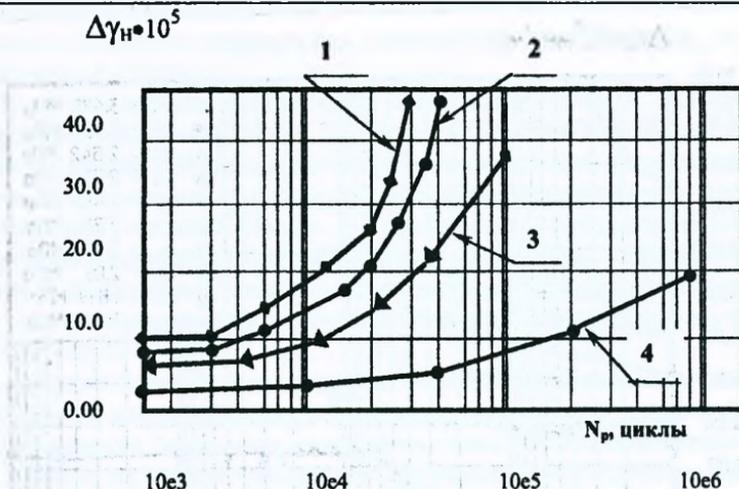


Рис. 4. Диаграммы деформирования пенополистиролбетона

Начальные участки диаграмм циклического деформирования расположены выше диаграммы статического деформирования. На основании этого экспериментального результата можно сделать вывод, что исследованные бетоны ведут себя при многоцикловом нагружении как циклически упрочняющиеся материалы.

Энергетический подход к описанию накопления усталостного повреждения и разрушения является наиболее общим при решении задач прочности материалов при циклическом нагружении. В литературе имеется большое количество работ, посвященных исследованию энергетических критериев усталостного разрушения материалов. Используя энергетические модели, можно установить взаимосвязь между уровнем действующих напряжений и числом циклов до зарождения усталостной трещины и на основе этого получить уравнение кривой усталости, а следовательно, найти предел выносливости.

Уровень энергии, рассеянной в бетоне за цикл, определяли по площади петли гистерезиса в координатах $\sigma - \epsilon$. Между неупругой деформацией $\Delta\epsilon_n$, $\Delta\gamma_n$ и необратимо рассеянной энергией D имеют место следующие соотношения [1]:

$$\text{при растяжении} \quad D = K_\phi \cdot \sigma_n \cdot \Delta\epsilon_n \quad (3)$$

$$\text{при кручении сплошного образца} \quad D = K_\phi \cdot \tau_n \cdot \Delta\gamma_n \quad (4)$$

где K_ϕ – коэффициент формы петли гистерезиса, принимаем для петли в виде эллипса $K_\phi = 1,57$.

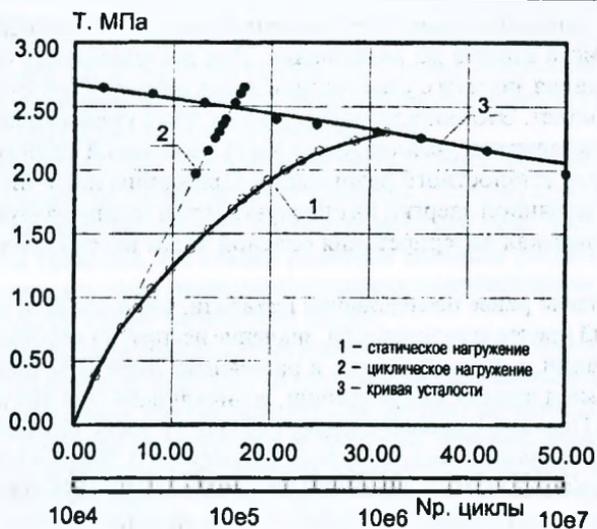


Рис. 5. Диаграммы деформирования для мелкозернистого бетона $R = 15$ МПа, $R_{сж} = 2,3$ МПа (1 – статическое нагружение, 2 – циклическое)

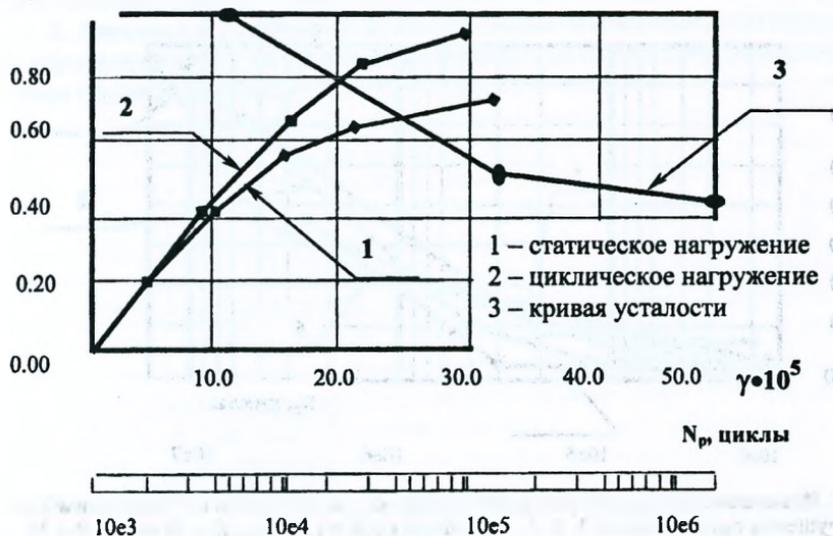


Рис. 6. Диаграммы деформирования для асфальтобетона

На рис. 7 показано изменение суммарной рассеянной энергии $D_{\text{сум}}$ в зависимости от числа циклов до разрушения. Для исследованных бетонов суммарная рассеянная энергия с увеличением числа циклов до разрушения существенно возрастает. Это свидетельствует о том, что с уменьшением величины переменных напряжений увеличивается часть рассеянной энергии, не связанной с процессом усталостного разрушения. Принципиальное значение имеет разложение рассеянной энергии на опасную с точки зрения разрушения и неопасную и физическая интерпретация опасной части необратимо рассеянной энергии.

Приведенные ранее исследования показали, что в области напряжений, превышающий предел выносливости, значение неупругой деформации на стадии стабилизации, а следовательно, и рассеянная энергия за цикл определяются размерами и числом микротрещин, возникающих при циклическом нагружении [2]. Поэтому опасной следует считать ту часть накопленной энергии, которая связана с накоплением рассеянного повреждения. После завершения процесса образования микротрещин дальнейшее развитие получают в основном те, которые достигли до этого момента наибольших разме-

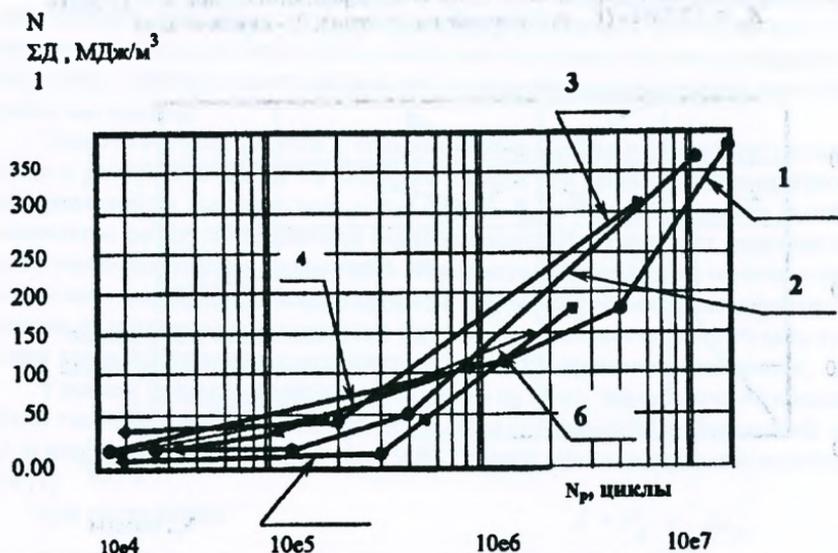


Рис. 7. Изменение суммарной рассеянной энергии в зависимости от числа циклов до разрушения при кручении: 1, 2, 3 – для бетона с $R = 15$ МПа, $R = 30$ МПа, $R = 38$ МПа; 4 – асфальтобетона при растяжении–сжатии; 5 – пенополистиролбетона и 6 – пенополистиролбетона с добавлением полипропиленовых волокон

ров. Число таких трещин зависит от уровня приложенных напряжений и материала. Причем увеличение их размеров происходит вследствие объединения микротрещин магистральной трещиной, а также вследствие собственного роста. Такое протекание процесса разрушения не влияет на уровень неупругой деформации и рассеянной за цикл энергии.

Чем ниже напряжения, тем большую часть усталостного разрушения занимает время развития магистральной трещины. Поэтому суммарную рассеянную в бетоне энергию следует рассматривать как критерий зарождения магистральной трещины. На стадии развития трещины рассеянная энергия будет определяться только ранее накопленными повреждениями, и суммирование этой энергии теряет физический смысл.

Анализ полученных зависимостей изменения суммарной энергии от числа циклов до разрушения показывает ее постоянство для начальной стадии усталостного разрушения, где происходит накопление рассеянного повреждения и деформирование магистральной трещины. Уровень суммарной энергии для стадии зарождения усталостной трещины для исследованных бетонов составляет 50 МДж/м³.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Троценко В.Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.
2. *Троценко В.Т., Драган В.И.* Исследование закономерностей неупругого деформирования и усталостного разрушения металлов при кручении/Проблемы прочности. – 1982. – № 5. – с. 3 – 10.