

МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАБОЧЕЙ АРМАТУРЫ КОЛОНН ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Геннадий Ажермачев, Эльмар Меннанов, Николай Шевченко

Национальная академия природоохранного и курортного строительства
г. Симферополь, ул. Павленко 3, к. 302
Shevchenko.niko@mail.ru

Аннотации: Рассмотрены методы определения числа циклов и допускаемые амплитуды напряжений как при жестком так и мягком режиме нагружений. Проанализирована прочность при нестационарных режимах нагружения. Приведены рекомендации по применению коэффициента асимметрии условных упругих напряжений. Выполнен обзор отечественных и зарубежных нормативных документов по данной тематике, а также по влиянию предварительной перегрузки на долговечность конструкций работающих в условиях циклического нагружения.

Ключевые слова: Малоцикловое нагружение, амплитуда нагружений, число циклов нагружений, жесткое нагружение, мягкое нагружение.

ВСТУПЛЕНИЕ

В современных нормах проектирования строительных конструкций [9] рекомендовано для стальных конструкций и их элементов, непосредственно воспринимающих нагрузки с количеством циклов нагружения менее 10^5 , применять такие конструктивные решения, которые не вызывают значительной концентрации напряжений, а в необходимых случаях проверять расчетом на малоцикловую прочность, так как материал в локальных зонах при малоцикловом нагружении конструкций деформируется в условиях развитых пластических деформаций.

В настоящее время в машиностроении, энергостроении, химическом машиностроении разработаны методы расчета элементов конструкций на малоцикловую усталость, которые регламентированы соответствующими нормами: отечественными нормами расчета на прочность элементов энергетического оборудования [6, 7, 8] и нормами американского общества инженеров-механиков [15].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В связи с тем, что сопротивление циклическому разрушению в диапазоне чисел циклов от 1 до 10^5 определяется величиной деформации (жесткое нагружение), а инженерные расчеты прочности традиционно ведутся по напряжениям, в нормах используются условные упругие напряжения σ_a , равные половине произведения размаха деформаций в зоне концентрации на модуль упругости при соответствующей температуре.

Допускаемые числа циклов $[N]$ или допускаемые амплитуды напряжений $[\sigma_a]$ определяются по кривым усталости, полученным в результате испытаний лабораторных образцов в условиях жесткого нагружения (постоянные

амплитуды деформаций) для трех групп материалов - аустенитных нержавеющей, малоуглеродистых и низколегированных сталей; или по уравнениям, основанным на степенной зависимости Лэнжера [12]:

$$[\sigma_a] = \frac{E}{4N_p^{0,5}} \ln \frac{100}{100 - \psi} + \sigma_{-1}, \quad (1)$$

где ψ - относительное сужение поперечного сечения образца при статическом растяжении, выраженное в %.

σ_{-1} - предел выносливости гладкого цилиндрического образца при симметричном цикле растяжения-сжатия.

Первое слагаемое уравнения соответствует амплитуде пластической деформации [11, 1], второе - упругой. На основании уравнения (1) по максимальным значениям амплитуд условных упругих напряжений σ_a , определяемых расчетным или экспериментальным путем для наиболее нагруженных элементов конструкций, может быть рассчитано предельное число циклов нагружения конструкций.

В американских нормах [15] местные деформации в зонах: концентрации напряжений (условные упругие напряжения) вычисляются через эффективные или теоретические коэффициенты концентрации напряжений α_σ в предположении, что в процессе упругопластического деформирования они не меняются с числом циклов.

Отечественные нормы расчета на усталость [6, 7, 8], основанные на работах Серенсена С.В., Шнейдеровича Р.М., Махутова Н.А., Гусенкова А.П. и др. [16] учитывают ряд факторов не нашедших достаточного отражения в американских нормах: одностороннее накопление пластических деформаций в процессе циклического нагружения, зависимость сопротивления деформированию и разрушению от исходных механических свойств стали и температуры, влияние асимметрии цикла

напряжений и деформаций на долговечность в широком диапазоне чисел циклов. Расчет на малоцикловую усталость согласно норм [2, 3, 4] учитывает возможные схемы нагружения материала в конструкциях, предельными для которых являются жесткое (с постоянной амплитудой деформации) и мягкое (с постоянной амплитудой нагрузки) нагружения.

Определение допускаемых амплитуд $[\sigma_a]$ или чисел циклов $[N]$ по критерию малоциклового разрушения при жестком нагружении производится с использованием уравнений:

$$[\sigma_a] = \frac{2,3E^t}{n_\sigma \left(4[N]^m + \frac{1+r^*}{1-r^*} \right)} \lg \frac{100}{100-\psi^t} + \frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma \left(1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \frac{1+r^*}{1-r^*} \right)}, \quad (2)$$

$$[\sigma_a] = \frac{2,3E^t}{4 \left(n_N [N]^m + \frac{1+r^*}{1-r^*} \right)} \lg \frac{100}{100-\psi^t} + \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \frac{1+r^*}{1-r^*}}, \quad (3)$$

n_σ, n_N - коэффициенты запаса по напряжениям и долговечности, принимаются равными $n_\sigma = 2, n_N = 10$,

r^* - коэффициент асимметрии условных упругих напряжений,

E^t, ψ^t, σ_B^t - характеристики механических свойств материала при заданной температуре, d

m_1 - постоянная материала, зависящая от асимметрии цикла напряжений.

Определение $[\sigma_a]$ или $[N]$ при мягком нагружении (с учетом возможного накопления односторонних пластических деформаций) производится с помощью уравнений:

$$[\sigma_a] = \frac{1,15AE^t}{n_\sigma [N]^{m_1}} \cdot \frac{1-r_\sigma}{2} \cdot (\alpha_\sigma)_{np}^2 \cdot \lg \frac{100}{100-\psi} + \frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma \left(1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma} \right)}, \quad (4)$$

$$[\sigma_a] = \frac{1,15AE^t}{(n_N [N])^{m_1}} \cdot \frac{1-r_\sigma}{2} \cdot (\alpha_\sigma)_{np}^2 \cdot \lg \frac{100}{100-\psi} + \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \frac{1+r_\sigma}{1-r_\sigma}}, \quad (5)$$

r_σ - коэффициент асимметрии по напряжениям,

$(\alpha_\sigma)_{np}$ - приведённый коэффициент концентрации напряжений:

$$(\alpha_\sigma)_{np} = \frac{\sigma_a}{(\sigma_a)_{np}},$$

A - характеристика материала (параметр диаграммы циклического деформирования, $A = 1,0-3,55$),

ψ_B - коэффициент равномерного сужения поперечного сечения образца (при напряжениях равных пределу прочности):

$$m_1 = \left(1,2 \frac{\sigma_{0,2}^t}{\sigma_B^t} - 0,35 \right) \frac{1-r_\sigma}{2}.$$

Согласно норм за допускаемые следует принимать наименьшие из четырех значений $[\sigma_a]$ и $[N]$, определенных по формулам (1) – (5).

В нормах приведены рекомендации для определения некоторых из указанных параметров. Предел усталости принимается равным: $\sigma_{-0,1}^t = 0,4\sigma_B^t$ при $400 \text{ МПа} < \sigma_B^t \leq 700 \text{ МПа}$ и $\sigma_{-0,1}^t = (0,54 - 2 \cdot 10^{-3} \sigma_B^t)$ при $700 \text{ МПа} < \sigma_B^t \leq 1200 \text{ МПа}$.

Коэффициент асимметрии условных упругих напряжений r^* в формулах (2) и (3) рекомендуется вычислять по формуле:

$$r^* = \frac{(\sigma_{\max} - 2\sigma_a)}{\sigma_{\max}}, \quad (6)$$

где σ_{\max} и σ_a - соответственно максимальное местное условное напряжение цикла и амплитуда местных условных напряжений.

При $\sigma_{\max} < \sigma_{0,2}$ коэффициенты асимметрии r_σ и r^* условно принимаются равными, а при $\sigma_{\max} < \sigma_{0,2}$ или $|\sigma_{\max} - 2\sigma_a| > \sigma_{0,2}$ коэффициент

асимметрии по напряжениям r_σ вычисляют по формуле

$$r_\sigma = \frac{(\sigma_{0,2} - 2\sigma_a)}{\sigma_{0,2}}. \quad (7)$$

При $\sigma_a > \sigma_{0,2}$. Если оказывается, что $r_\sigma < -1$, то в расчете следует принимать $r_\sigma = -1$.

При возникновении в зонах концентрации напряжений упруго-пластических деформаций коэффициент концентрации условных упругих напряжений K_σ в нормах [6, 7, 8] определяется из соотношения Нейбера:

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma^2}{K_{\sigma_{yup}}}, \quad (8)$$

где $K_{\sigma_{yup}}$ - коэффициент концентрации напряжений в упругопластической области. Величина $K_{\sigma_{yup}}$, входящая в (8) вычисляется по формуле

$$K_{\sigma_{yup}} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_n}. \quad (9)$$

В нормах оговорено, что формула (8) и (9) применима при $\alpha_\sigma \leq 3,5$.

Необходимо отметить также, что в нормативных документах [6, 7, 8, 11] предусмотрено проведение приемочных испытаний готовых конструкций или их элементов. При этом величина предварительного нагружения в 1,25 раза превышает расчетный уровень нагрузки.

При оценке ресурса нестационарность силовых и температурных нагрузок при эксплуатации на различных режимах учитывают [6, 7, 8] на основе линейного суммирования повреждений по формуле

$$\sum_{j=1}^n \frac{N_j}{[N_j]} = a, \quad (10)$$

где N_j - число циклов нагружения на j-том режиме в эксплуатации с напряжениями σ_{aj} ,

$[N_j]$ - допускаемое число циклов нагружения, определяемое по расчетной кривой усталости при уровне напряжений σ_{aj} j-го режима,

n - число режимов нагружения.

Условие прочности при нестационарных режимах нагружения:

$$\sum_{j=1}^n \frac{N_j}{[N_j]} = a < a_N,$$

где a - накопленное усталостное повреждение; a не должно превышать 1,0 ($a_N = 1$).

Для увеличения долговечности сооружений работающих в условиях циклического нагружения допустимо применять предварительные перегрузки.

Эксплуатационные режимы нагруженности ряда ответственных конструкций, работающих в области ограниченной долговечности при сравнительно небольших числах нагруженности, содержат перегрузки, вызывающие значительные пластические деформации.

Первые работы, посвященные изучению влияния перегрузок на долговечность элементов металлических конструкций относились к области многоциклового усталости. Форрестом [18] впервые было показано благоприятное влияние предварительной растягивающей нагрузки, превышающей рабочий уровень и приводящий к появлению в местах концентрации напряжений пластических деформаций, на долговечность образцов с надрезом. Предварительное нагружение, уровень которого составлял $\sigma_{пер} = 0,75\sigma_B$, значительно повысило долговечность образцов из алюминиевого сплава, особенно в области чисел циклов $N > 10^5 - 10^6$ и повысило предел усталости в два раза.

Многочисленные исследования [3, 5, 19, 23, 2], подтвердили положительное влияние предварительной растягивающей перегрузки на усталостную прочность элементов металлических конструкций в области многоциклового усталости.

В СССР было выполнено большое число работ посвященных изучению влияния воздействия предварительной перегрузки на долговечность элементов металлических конструкций в области малоциклового усталости [10, 13, 16], которые позволяют утверждать, что предварительное нагружение в контролируемых условиях повышает долговечность элементов металлических конструкций в области малоциклового усталости. Вместе с тем, в ряде работ [4, 22] отмечается снижение эффекта воздействия перегрузок на условия зарождения усталостных трещин в результате релаксации остаточных сжимающих напряжений под действием последующего пластического деформирования при циклическом нагружении. В связи с этим встает вопрос об оптимальном уровне предварительных перегрузок, приводящих к максимальному увеличению ресурса металлических конструкций в области

малоцикловой усталости при заданных условиях эксплуатации.

Как известно, перегрузка, приводящая к появлению локальных пластических деформаций растяжения в зонах концентрации напряжений, способствует возникновению в этих местах после ее снятия остаточных (начальных) напряжений сжатия, наличием которых, в большинстве случаев, и объясняется повышение долговечности элементов. Однако перегрузки всегда связаны с большей или меньшей пластической деформацией, влияние которой также необходимо учитывать.

Для количественного описания влияния перегрузки на усталостную долговечность элементов металлических конструкций обычно исходят из предположения, что основную роль в повышении долговечности элементов играют остаточные сжимающие напряжения и, что остаточные напряжения оказывают такое же влияние на усталостную долговечность, как и средние напряжения

ВЫВОДЫ:

1. В существующих нормах не учитывается тот факт, что в большинстве конструкций вследствие предварительных перегрузок материал зон концентрации испытывает значительные пластические деформации, которые приводят к появлению остаточных начальных напряжений. Оба эти фактора (предварительная деформация и начальные напряжения) оказывают существенное влияние на малоцикловую долговечность металлических конструкций.

2. В нормах нет рекомендаций для расчета конструкций, подвергающихся нагружению с коэффициентами асимметрии $r_\sigma < -1$.

3. Отсутствуют данные о поведении арматурного проката А500С при циклическом нагружении. В публикациях встречается только статический расчет. [14, 20, 21]

4. Коэффициенты запаса, рекомендуемые нормами для определения допускаемых величин $[\sigma_a]$ и $[N]$, являются постоянными и не зависят от сроков службы конструкции, режима эксплуатации, дисперсии механических характеристик материала. Между тем известно, что несущая способность элементов в значительной степени зависит от указанных факторов.

5. При оценке ресурса конструкций, подверженных нерегулярному нагружению, используется правило линейного суммирования повреждений. Однако, после предварительных перегрузок выражение, используемое в нормах для оценки накопления повреждений перестает соответствовать фактическому.

6. Ни в одних из указанных норм не учитывается неоднородность материала и рассеяние его механических характеристик.

В силу того, что известные нормы расчета не полностью отражают реальные условия работы конструкций, следует рассмотреть и проанализировать основные факторы, влияющие на долговечность элементов, подверженных повторному нагружению, а именно:

- влияние предварительной перегрузки на стадии зарождения усталостных трещин,
- закономерности накопления усталостных повреждений и методы обработки процессов нагружения при нерегулярном силовом воздействии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Manson S.S. 1965. Fatigue complex subject - some simpl approximations. - Experimental Mechanics, N 7.
2. Watson P., Topper T.H. 1972. Fatigue - damage Evaluation for Mild Steel Incorporating Mean Stress and Overload Effects, - Experimental Mechanics, N 1.
3. Бондарович Л.А., Злочевский А.Б., Шувалов А.Н. 1982. Повышение циклической долго-вечности элементов конструкций созданием благоприятных остаточных напряжений. М.
4. Вандышев В.П. 1987. О влиянии нестационарного нагружения и концентрации напряжений на сопротивление сталей 45 и 40Х.-В сб. "Общие проблемы машиностроения", Наука, М.
5. Влияние предварительной деформации на свойства металлов и сплавов. Сб. статей, Алма-Ата, Наука, 1971.
6. ГОСТ 25.502-79* Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М., Государственный комитет СССР по стандартам, 1986.
7. ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М., Государственный комитет СССР по стандартам, 1983.
8. ГОСТ 25.505-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении. М., Государственный комитет СССР по стандартам, 1986.
9. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. К., Мінбуд України, 2011 г., 220 с.
10. Злочевский А.В., Бондарович Л.А., Шувалов А.Н. 1979. Влияние интенсивной перегрузки на кинетику роста усталостной трещины. Физико-механическая механика материала, №6.
11. Коффин Л.Ф., Тавернелли Д.Ф. 1962. Экспериментальное подтверждение обобщенного уравнения для оценки усталости при малом числе циклов. - Техническая механика, т.84.
12. Лэнджер В.Ф. 1962. Расчет сосудов давления на малоцикловую долго- прочность. Техническая механика. Труды АОИМ, русск. пер. сер.Д, т.8.

13. Махутов Н.А., Щербак А.М. 1970. Сопротивление малоцикловому нагружению стали после искусственного старения. В ж-ле "Проблемы прочности", №4.
14. Меннанов Эльмар. 2010. К вопросу надежности и долговечности сварных соединений строительных конструкций / Эльмар Меннанов, Геннадий Ажермачев, Азиз Абдурахманов, Эльдар Меннанов // MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin, — Vol. 12D.
15. Нормы американского общества инженеров-механиков. ЦДИИАТОМИНФОРМ, Вып.4, разд.3, М., 1974.
16. Серенсена С.В. 1975. Прочность при малоцикловом нагружении., М., Наука.
17. СНИП III-18-75. 1976. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции. М., Стройиздат.
18. Форрест П. 1968. Усталость металлов. М., Машиностроение.
19. Харрисон Т.О., Фирнехаф Ж.Д. 1972. Влияние предварительного нагружения на хрупкое разрушение деталей, содержащих острые дефекты.
20. Шевченко Н.Н. 2009. Исследование работы сварных стыковых соединений арматурного проката класса А500С с уменьшенными боковыми накладками / Николай Шевченко, Эльмар Меннанов // MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin, — Vol. 11B.
21. Шевченко Н.Н. 2012. Усиление сварных соединений арматуры класса А500С выполненных на стальной скобе / Эльмар Меннанов, Азиз Абдурахманов, Николай Шевченко // MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin, — Vol. 14, № 1.
22. Шлюшенков А.П. 1974. Накопление усталостных повреждений при действии пиковых перегрузок выше предела текучести. В сб. "Расчет и конструирование машин".
23. Шур Д.М., Ивченко Л.Ф. 1972. Влияние предварительного нагружения на сопротивление сварных соединений хрупкому разрушению. "Сварочное производство", №2.

METHODS OF CALCULATING THE WORKING REINFORCEMENT FOR COLUMNS CONCRETE STRUCTURES WORKING UNDER CYCLIC LOADING

Summary: The methods for determining the allowable number of cycles and the amplitude of the voltage at both hard and soft mode of loading. Analyzed the strength of non-stationary loading conditions. The recommendations for the use of the asymmetry of conditional elastic stresses. A review of domestic and foreign regulations on the subject, as well as on the effect of pre-congestion on the durability of structures operating under cyclic loading.

Key words: low-cycle loading, the amplitude of loading, the number of loading cycles, hard loading, soft loading.