УДК 624.97.014.2 DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.55-59

# Расчетная оценка усталостной долговечности элементов металлоконструкций антенно-мачтовых сооружений

**Владимир Васильевич ЕВДОКИМОВ**, кандидат технических наук, зам. директора, e-mail: v.evdokimov@stako.ru

**Галина Ростиславовна ШЕЛЯПИНА**, главный специалист ОКСН, e-mail: g.shelyapina@stako.ru

ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 117997 Москва, ул. Архитектора Власова, 49

***Аннотация***. *В статье рассмотрены основные вопросы, связанные с расчетной оценкой долговечности циклически нагруженных элементов конструкций антенно-мачтовых сооружений. Сопоставлены расчетные кривые усталости в российских и европейских нормативных документах, используемые при определении допускаемых чисел циклов переменного нагружения элементов строительных металлоконструкций. Приведены данные о расчетных сопротивлениях усталости, полученные на основании испытаний при циклическом режиме нагружения соединений (узлов) элементов конструкций антенно-мачтовых сооружений. Дано обоснование необходимости разделения пульсационной составляющей ветровой нагрузки на квазистатическую и резонансную часть. Это позволяет определить реальную долговечность циклически нагруженных элементов конструкции. Приведенная в статье информация рекомендована для использования при проектировании новых и расчетной оценке остаточного ресурса безопасной эксплуатации действующих антенно-мачтовых сооружений, имеющих технологические дефекты и эксплуатационные повреждения отдельных элементов конструкции.*

***Ключевые слова***: *антенно-мачтовые сооружения, расчетная оценка долговечности, допускаемые числа циклов переменного нагружения, расчетное сопротивление усталости, разделение пульсационной составляющей ветровой нагрузки.*

## CALCULATED ESTIMATION OF FATIGUE LIFE OF ELEMENTS OF METAL STRUCTURES OF ANTENNA-MAST STRUCTURES

**Vladimir V. EVDOKIMOV**, e-mail: v.evdokimov@stako.ru

**Galina R. SHELYAPINA**, e-mail: g.shelyapina@stako.ru

Melnikov Central Research and Design Institute of Steel Structures, Arkhitektora Vlasova ul., 49, Moscow 117997, Russian Federation

***Abstract***. *The main issues related to the estimation of durability of cyclically loaded members of antenna-mast structures are considered in the article. The calculated fatigue curves in Russian and European normative documents used in determining the permissible number of cycles of variable loading of elements of construction metal structures are compared. Data on design fatigue resistances obtained on the basis of tests at cyclic loading mode of joints (connections) of antenna-mast structures members are provided. The substantiation of the necessity of dividing the pulsation component of the wind load into quasi-static and resonant parts is given. This makes it possible to determine the actual durability of cyclically loaded structural elements. The information provided in the article is recommended for use in the design of new and estimated residual life of safe operation of existing antenna-mast structures that have technological defects and operational damage of individual structural elements*

***Key words***: *antenna-mast structures, estimation of durability, allowed number of variable loading cycles, design fatigue resistance, division of pulsation component of wind load.*

Опыт обследования антенно-мачтовых сооружений (АМС) показал, что практически в каждом сооружении, даже только что смонтированном, существуют различные виды дефектов и повреждений [1, 2]. Оценка влияния таких дефектов и повреждений на эксплуатационную надежность и долговечность АМС должна проводиться с учетом циклического характера нагружения элементов конструкций, обусловленного пульсационным воздействием ветрового потока различной интенсивности. При определенных условиях переменного нагружения в зонах соединений элементов конструкций возможно зарождение усталостных трещин.

В разделе 12 СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» содержится указание, что для конструкций высоких сооружений (типа мачт, башен и т.п.), которые подвергаются воздействиям резонансного вихревого возбуждения согласно СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия», следует выполнять расчет на усталость. К образованию усталостных трещин в узловых соединениях элементов конструкции АМС может приводить также воздействие пульсаций скорости ветра в диапазоне частот собственных колебаний сооружения при скоростях ветра

© ЕВДОКИМОВ В. В., ШЕЛЯПИНА Г. Р., 2020

значительно меньше расчетной скорости, принятой при выполнении прочностных расчетов. Однако методика расчета на усталость, приведенная в СП 16.13330, не может быть использована для АМС по ряду причин, основными из которых являются:

• отсутствие данных о расчетных сопротивлениях усталости $R_v$ для многих видов соединений элементов стальных конструкций, характерных для АМС;

• отсутствие рекомендаций по учету влияния различных скоростей ветра в спектре эксплуатационного нагружения на накопление усталостных повреждений в элементах конструкций;

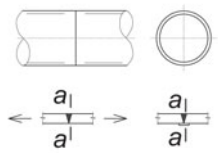
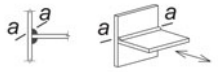
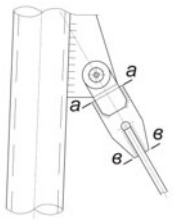
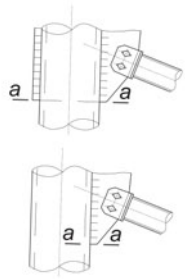
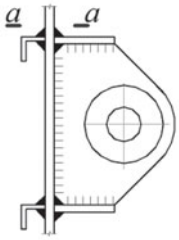
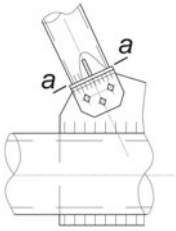
• ограниченный диапазон чисел циклов нагружения $N$ ($10^5 \leqslant N \leqslant 3{,}9 \cdot 10^6$), в пределах которых может быть выполнен расчет, что не соответствует реальному спектру ветровых нагрузок, повторяемость которых за расчетный срок службы АМС дополнительно соответствует диапазонам малоциклового ($N < 10^5$) и многоциклового ($N > 4{,}0 \cdot 10^6$) нагружения.

В нормах EN 1993-1-9:2005 [3] приведены зависимости, позволяющие выполнить расчет на усталость для более широкого диапазона циклов нагружения ($10^4 \leqslant N \leqslant 10^8$), содержится указание по учету реального спектра нагружения элементов конструкции в процессе эксплуатации. При этом отсутствуют данные о расчетных сопротивлениях усталости для многих видов соединений элементов стальных конструкций, характерных для АМС.

В этой связи в ЦНИИПСК им. Мельникова выполнены исследования усталостной долговечности различных видов соединений элементов строительных металлоконструкций, включающие в себя:

• экспериментальные исследования усталостной прочности и долговечности различных видов соединений элементов строи-

***Характеристики сопротивления усталостному разрушению некоторых видов соединений элементов стальных конструкций антенно-мачтовых сооружений***

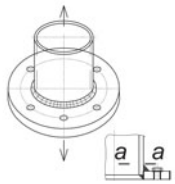
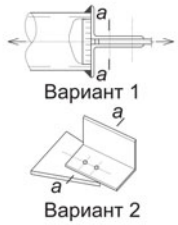
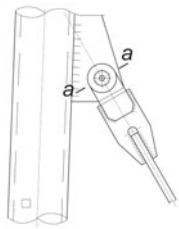
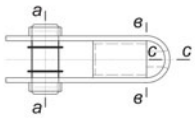
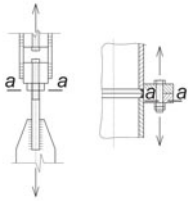
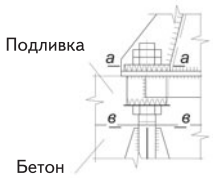
| Схема соединения и расположение расчетных сечений | Характеристика соединения | $R_v$, МПа | $m_1$ для сталей | |
|---|---|---|---|---|
| | | | С235... С255 | С345... С390 |
|  | Стыковые сварные соединения труб с полным проплавлением корня шва и плавным переходом от шва к основному металлу | 60 | 6 | 4,5 |
|  | Тавровые сварные соединения при отсутствии разделки кромок | 30 | 4,5 | 3,5 |
|  | Сварные соединения с фланговыми угловыми швами:<br>• нахлесточные сварные соединения (усталостное разрушение по сечению а—а)<br>• сварное соединение раскоса из кругляка с фасонкой пояса (усталостное разрушение по сечению в—в) | <br><br>27<br><br>27 | <br><br>4,5<br><br>4,5 | <br><br>3<br><br>3 |
|  | Приварка узловой фасонки к трубе пояса:<br>• прорезная фасонка<br>• фасонка, пристыкованная к стенке трубы | <br>24<br>36 | <br>4,5<br>4,5 | <br>3<br>3 |
|  | Приварка лобовым швом конструктивного элемента к несущему | 45 | 4,5 | 3,5 |
|  | Сварное соединение трубы с фланцевой заглушкой:<br>• при наличии ребра у фланцевой заглушки;<br>• при отсутствии ребра | <br>22<br>12 | <br>4,5<br>4,5 | <br>3,5<br>3,5 |

тельных металлоконструкций натурной толщины в диапазоне малоциклового и многоциклового нагружения, в том числе характерных для АМС соединений, изготовленных на Челябинском и Нижне-Исетском заводах металлоконструкций;

• сопоставление и анализ результатов аналогичных исследований, выполненных отечественными и зарубежными специалистами.

Результаты этих исследований позволили с достаточной степенью точности определить зависимость допускаемых чисел циклов нагружения $[N]$ для различных видов соединений элементов конструкций от параметров циклического нагружения (максимальное напряжение в цикле $\sigma_{max}$ и асимметрия цикла $\rho$), расчетного сопротивления усталости $R_v$ этих соединений и параметра $m$, характеризующего интенсивность снижения усталостной прочности при увеличении числа циклов нагружения в диапазоне малоциклового $m_1$ и многоциклового $m_2 = 15$ нагружения [4]. Данная зависимость использована при разработке методики расчета усталостной долговечности циклически нагруженных стальных строительных конструкций в рамках стандарта организации СТО 02494680-0049-2005 [5]. Согласно этому документу расчет усталостной долговечности может быть выполнен для различных циклически нагруженных конструкций, эксплуатируемых в широком диапазоне циклов нагружения: $10^2 \leqslant N \leqslant 2{,}0 \cdot 10^8$.

*Окончание таблицы*

| Схема соединения и расположение расчетных сечений | Характеристика соединения | $R_v$, МПа | $m_1$ для сталей | |
|---|---|---|---|---|
| | | | С235...С255 | С345...С390 |
|  | Сварное соединение трубы пояса с прорезным фланцем | 27 | 4,5 | 3,5 |
|  Вариант 1 Вариант 2 | Болтовые соединения раскосов с фасонками поясов: | | | |
| | • вариант 1 | 36 | 4,5 | 3,5 |
| | • вариант 2 | 27 | 4,5 | 3,5 |
|  | Шарнирное соединение раскосов с фасонками поясов (зазор в проушине не более 6 мм и несоосность отверстий не более 1 мм) | 36 | 4,5 | 3,5 |
| | Шарнирное соединение в лацменных узлах | 36 | 4,5 | 3,5 |
|  | Канатные втулки | 15 | 3 | |
|  | Болты и шпильки, работающие на растяжение | 36 | 3,5 | |
|  Подливка Бетон | Анкерные болты | 27 | 4,5 | |

Следует отметить, что сопоставление расчетных кривых усталости, приведенных в EN 1993-1-9:2005 [3] и СТО 02494680-0049-2005 [5], по которым определяется допускаемое число циклов $[N]$ элемента конструкции, дает удовлетворительные результаты только в ограниченном диапазоне $10^5 \leqslant N \leqslant 4{,}0 \cdot 10^6$. При этом в диапазоне малоциклового нагружения ($N < 10^5$) для элементов конструкции из низкоуглеродистых сталей классов прочности С235...С255 по ГОСТ 27772—2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия» расчетное определение $[N]$ в соответствии с EN 1993-1-9:2005 дает результаты не в запас прочности. Однако в многоцикловой области нагружения ($N > 4{,}0 \cdot 10^6$) расчет $[N]$ по методике EN 1993-1-9:2005 дает излишние запасы по долговечности (до 7 раз при числах циклов нагружения на уровне $10^8$) [6].

Характеристики сопротивления усталостному разрушению для некоторых видов соединений элементов конструкций АМС, используемых при расчетном определении $[N]$ согласно СТО 02494680-0049-2005, приведены в *таблице*.

При расчете узлов АМС сложной геометрической формы, для которых в нормативных документах и технической литературе отсутствуют данные $R_v$, допускаемое число циклов нагружения $[N]$ можно определять по методике, основанной на критерии местной прочности и используемой для расчета на усталость элементов конструкций атомных энергетических установок [7]. Согласно этой методике число циклов нагружения до зарождения усталостных трещин в элементе конструкции определяется по расчетной кривой усталости металла в зоне возможного зарождения трещин на основе данных об амплитуде местных переменных напряжений в цикле нагружения в зоне потенциального трещинообразования. Расчет местных напряжений в зонах возможного зарождения усталостных трещин должен основываться на применении метода конечных элементов и учитывать фактическую геометрию узла и сварных швов.

При выполнении поверочных расчетов долговечности АМС по критерию образования усталостных трещин в элементах конструкции (узлах) необходимо рассматривать весь спектр ветровых нагрузок и их повторяемость за расчетный срок службы сооружения. При этом расчет следует выполнять для элементов конструкции, имеющих низкие значения расчетного сопротивления усталости $R_v$ или в которых действуют наиболее высокие размахи напряжений (разница между наибольшим и наименьшим напряжением в цикле нагружения). Расчетный ресурс усталостной долговечности $D$, годы, таких элементов конструкции следует определять по формуле

$$D_j = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{\kappa} \frac{n_1^{(i)}}{[N]_i},$$

где $n_1^{(i)}$ — число циклов нагружения элемента конструкции за один год при скорости ветра в $i$-том интервале спектра нагружения, $n_1^{(i)} = \frac{315360\eta}{T}$; $\eta$ — дифференциальная повторяемость различных скоростей ветра с градацией 2—5 м/с (% от общего числа измерений за год) для района расположения сооружения; $T$ — период основной собственной формы колебаний конструкции АМС, с; $[N]_i$ — допускаемое число циклов нагружения элемента при скорости ветра в $i$-м интервале; $\kappa$ — число интервалов ветрового нагружения элемента конструкции, при которых происходит накопление усталостных повреждений в металле.

Данные по вероятностям различных скоростей ветра приведены в справочнике «Климат России» [8]. Более точные значения $\eta$ могут быть получены исходя из данных метеостанций, расположенных в районе строительства высотного сооружения. При отсутствии сведений о повторяемости скоростей ветра, близких к расчетной, необходимо построить номограмму повторяемости скоростей ветра в процентах от общего числа случаев наблюдений по методике [9]. При этом дифференциальная повторяемость расчетной скорости ветра, превышаемой один раз в 50 лет, составляет $\eta = 0{,}00137$ %.

При расчете допускаемого числа циклов нагружения элемента конструкции АМС при скорости ветра в $i$-том интервале $[N]_i$ принципиальное значение имеет то, каким образом определена переменная составляющая напряжений от ветровой нагрузки. Согласно СП 20.13330 ветровая нагрузка на высотные сооружения $w$ разделяется на среднюю (статическую) $w_m$ и пульсационную (динамическую) $w_p$ составляющие. При этом усилия от всего спектра пульсаций ветра в широком интервале частот и соответственно периодов колебаний отнесены к резонансной частоте сооружения. В европейских нормах EN 1991-1-4: 2005 [10] и EN 1993-3-1:2006 [11] существует методика разделения реакции сооружения на пульсации скорости ветра на квазистатическую и резонансную части.

Сравнительные расчеты для башни высотой 180 м (четырехгранная решетчатая ферма с крестовой решеткой в гранях), построенной для III ветрового района, тип местности В в соответствии с СП 20.13330, показали, что резонансная часть ветровой нагрузки согласно [10, 11] составляет 30,3 % пульсационной составляющей $w_p$, определяемой по СП 20.13330. Таким образом, использование методики разделения пульсационной составляющей ветровой нагрузки на квазистатическую и резонансную части дает возможность специалистам оценить реальную долговечность рассматриваемого элемента конструкции и сооружения в целом.

**Вывод**

Рассмотренные в статье вопросы позволяют решить проблему проверки усталостной долговечности элементов металлоконструкций АМС, подверженных в процессе эксплуатации воздействию ветровой нагрузки различной интенсивности. Это наиболее актуально при расчетном определении остаточного ресурса безопасной эксплуатации АМС, имеющих различные технологические и эксплуатационные дефекты, которые выявлены при обследовании элементов конструкции. Приведенная в статье информация будет полезна для инженеров-проектировщиков и для специалистов, занимающихся обследованием АМС, находящихся в эксплуатации в течение длительного периода времени.

*Л И Т Е Р А Т У Р А*

1. *Закурдаева О. Н., Голиков А. В.* Повреждаемость антенно-мачтовых сооружений сотовой связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 4(67). С. 72–85.
2. *Давыдов И. И., Чабан В. П.* Проблемы диагностики и подходы к расчету стальных конструкций антенно-мачтовых сооружений для мобильной связи // Вісник Придніпровськоп державноп академіп будівництва та архітектури. 2008. № 10. С. 28–34.
3. EN 1993-1-9:2005. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-9. Усталостная прочность.
4. *Евдокимов В. В.* Методика расчетной оценки долговечности циклически нагруженных стальных строительных конструкций на стадии проектирования // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 5. С. 32–34.
5. СТО 02494680-0049-2005. Конструкции стальные строительные. Основные принципы расчета на прочность, устойчивость, усталостную долговечность и сопротивление хрупкому разрушению / ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», М., 2005. 31 с.
6. *Евдокимов В. В.* Совершенствование метода расчетной оценки усталостной долговечности элементов стальных строительных конструкций на основе сопоставления российских и европейских норм // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 17–19.
7. ПНАЭ Г-7-002-86. Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М. : Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
8. Климат России. URL: http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik- (дата обращения: 10.09.2020).
9. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М. : Стройиздат, 1978. 216 с.
10. EN 1991-1-4:2005. Еврокод 1. Воздействие на строительные конструкции. Ч. 1-4. Общие воздействия. Ветровые нагрузки.
11. EN 1993-3-1:2006. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 3-1. Башни и мачты.

*R E F E R E N C E S*

1. Zakurdaeva O. N., Golikov A. V. Damageability of antenna and mast constructions of cellular communication. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*, 2018, no. 4(67), pp. 72–85. (In Russian).
2. Davydov I .I., Chaban V. P. Diagnostic problems and calculation approaches steel structures of antenna-mast structures for mobile communication. *Visnik Pridniprovs'koп derzhavnoп akademiп budivnitstva ta arkhitekturi*, 2008, no. 10, pp. 28–34. (In Russian).
3. EN 1993-1-9:2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-9. Fatigue strength.
4. Evdokimov V. V. Methodology for calculating the durability of cyclically loaded steel building structures at the design stage. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2005, no. 5, pp. 32–34. (In Russian).
5. STO 02494680-0049-2005. Konstruktsii stal'nye stroitel'nye. Osnovnye printsipy rascheta na prochnost', ustoychivost', ustalostnuyu dolgovechnost' i soprotivlenie khrupkomu razrusheniyu [Basic principles of strength, stability, fatigue life and brittle fracture resistance analysis]. Moscow, TSNIIPSK im. Melnikov Publ., 2005. 31 p. (In Russian).
6. Evdokimov V. V. Improvement of the method for calculating the fatigue life of elements of steel building structures based on a comparison of Russian and European standards. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 12, pp. 17–19. (In Russian).
7. PNAE G-7-002-86. Pravila i normy v atomnoy energetike. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [Rules and regulations in nuclear power. Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 525 p. (In Russian).
8. Available at: http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-/ (accessed 10.09.2020). (In Russian).
9. Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystvie vetra [Guidelines for the calculation of buildings and structures for wind]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 216 p. (In Russian).
10. EN 1991-1-4: 2005. Eurocode 1. Impact on building structures. Part 1-4. General influences. Wind loads.
11. EN 1993-3-1: 2006. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 3-1. Towers and masts.



Для цитирования: *Евдокимов В. В., Шеляпина Г. Р.* Расчетная оценка усталостной долговечности элементов металлоконструкций антенно-мачтовых сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 55–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.55-59.

For citation: Evdokimov V. V., Shelyapina G. R. Calculated Estimation of Fatigue Life of Elements of Metal Structures of Antenna-Mast Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 10, pp. 55–59. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.55-59.