

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ВЫНОСЛИВОСТИ И ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

**В.Г. Сазыкин**, старший преподаватель, ассистент

**К.В. Коновалова**, ассистент

**А.С. Манаенкова**, ассистент

**А.В. Ляшенко**, магистрант

**Воронежский государственный технический университет**  
(Россия, г. Воронеж)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-10-2-89-92

**Аннотация.** В статье рассматриваются подходы к оценке выносливости и циклической трещиностойкости элементов металлических конструкций. Отмечено, что в национальных и международных нормативных документах по проектированию стальных конструкций и по оценке технического состояния стальных элементов производственных зданий и сооружений, которые эксплуатируются, отсутствует соответствующая методика расчета. Выявлено, что в некоторых строительных нормах и правилах фрагментарно отражены подходы к предварительной оценке выносливости с количеством циклов нагрузки более 10<sup>5</sup> (многоцикловая усталость), но без учета в отдельных случаях качественного изменения характера накопления повреждений. Отдельное внимание уделено квазистатической усталости, малоциклового усталости, живучести стальных конструкций. Подробно рассмотрены методики расчета различной усталости металлических конструкций.

**Ключевые слова:** металл, трещиностойкость, выносливость, усталость, оценка, повреждения.

Современное развитие строительства предусматривает использование передовых технологий, рациональных технологических решений и усовершенствованных методов расчета как при возведении новых, так и в процессе реконструкции уже существующих сооружений. В этом смысле во многом прогрессивным стало внедрение новых конструктивных решений металлических элементов, которые позволяют обеспечить нужную форму, размеры и несущую способность.

В настоящее время металлические конструкции нашли свое широкое распространение для возведения общественных и промышленных зданий, инженерных сооружений или отдельных конструктивных элементов (покрытий, перекрытий и т.д.). Их активное применение обусловлено тем, что они обладают повышенной надежностью при местном разрушении. Это позволяет наиболее рационально использовать физико-механические характеристики материала при его работе на растяжение или сжатие [1]. В тоже время, обосновывая

назначение ресурса металлических конструкций и последствий усталости металла, целесообразно еще на этапе проектирования выполнять расчеты элементов таких конструкций на устойчивость к циклическим нагрузкам - расчеты на квазистатическую, малоцикловую, многоцикловую усталость, на циклическую трещиностойкость и на сопротивление хрупкому разрушению. При этом следует отметить, что в национальных и международных нормативных документах по проектированию стальных конструкций и по оценке технического состояния стальных элементов производственных зданий и сооружений, которые эксплуатируются, отсутствует соответствующая методика расчета. В некоторых строительных нормах и правилах фрагментарно отражены подходы к предварительной оценке выносливости с количеством циклов нагрузки более 10<sup>5</sup> (многоцикловая усталость), но без учета в отдельных случаях качественного изменения характера накопления повреждений.

Таким образом, вопросы повышения технического уровня объектов из металлических конструкций требуют разработки более точной методики определения их выносливости и трещиностойкости, что и обуславливает выбор темы данной статьи.

Определению действительного состояния металлических конструкций с учетом дефектов посвящены работы Никулина С.А., Рогачева С.О., Белова В.А., Шплиса Н.В., Задорожного М.Ю., Манжулы К.П., Сундера Р.

Над разработкой физической и расчетной модели определения несущей способности металлической конструкции трудятся такие авторы как: Матлин М.М., Казанкин В.А., Кусков К.В., Сызранцева К.В., Приймак Е.Ю. В тоже время, несмотря на имеющиеся публикации, в данной предметной плоскости остается ряд нерешенных вопросов. Так, отдельного внимания

заслуживает проблематика обеспечения безаварийной эксплуатации сварных ферм при циклических нагрузках. В более глубокой проработке нуждается формализация зависимости между отдельными частичными коэффициентами надежности металлических конструкций.

Таким образом, цель статьи заключается в проведении анализа подходов к оценке выносливости и циклической трещиностойкости элементов металлических конструкций.

Рассмотрим металлическую пластину, ослабленную криволинейной трещиной длиной  $L_0$ , которая находится под действием высокой температуры  $T_0$  (температура, при которой происходит высокотемпературная ползучесть), длительной статической нагрузки  $P$  и водорода  $H_2$ , создающего у вершины трещины концентрацию  $C_0$  (рис. 1).

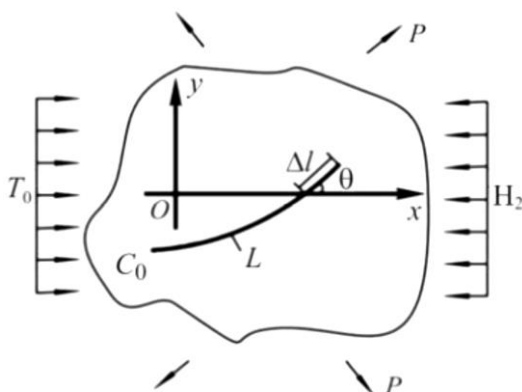


Рис. 1. Схема нагружения пластины с трещиной

Трещина макроскопическая, нагрузки растяжения приложены произвольно. После образования макротрещины происходит ее циклический рост от начальной ( $L_0$ ) до критической длины ( $L_k$ ). Когда трещина достигнет критической длины может произойти хрупкое разрушение конструкции.

Рассмотрим более подробно методики расчета различной усталости металлических конструкций.

**Квазистатическая усталость.** Для квазистатических циклических нагрузок характерным является накопление необратимых пластических деформаций, остающихся после нагрузки и разгрузки стальных конструкций [2]. Квазистатические повреждения определяются следующей зависимостью:

$$\alpha_{T1} = \frac{\gamma_{s1} \cdot 2 \Sigma \Delta \varepsilon_1}{\ln \left( \frac{1}{1 - Z_c} \right)} \leq 1$$

где  $\gamma_{s1}$  – коэффициент запаса прочности основного материала или материала зоны сварного соединения в расчетах на долговечность или расчетах, связанных с обоснованием ресурса конструкции для определения квазистатических повреждений;  $\Delta\varepsilon_1$  – размах пластических деформаций  $i$ -го цикла нагрузки;  $Z_c$  – наименьшее гарантированное значение  $Z$  ( $Z$  – относительное

сужение образца после разрыва, в долях единицы).

**Малоцикловая усталость (малоцикловая выносливость).** Для малоцикловой усталости характерно накопление необратимых пластических деформаций, разрушающих структуру стали. Повреждения, вызванные малоцикловой усталостью, можно вычислить по следующей формуле:

$$\alpha_{T1} = \frac{\gamma_{s2} \cdot 2^2 \Sigma \Delta\varepsilon_1^2}{\ln\left(\frac{1}{1-Z_c}\right)} \leq 1$$

где  $\gamma_{s2}$  – коэффициент запаса прочности основного материала или материала зоны сварного соединения в расчетах на долговечность или обоснование ресурса конструкции для определения малоцикловых повреждений.

В расчетах на долговечность  $\gamma_{s1} = \gamma_{s2} = 1$ , а в расчетах на обоснование ресурса  $\gamma_{s1} = 1,1$ ;  $\gamma_{s2} = 1,2$ .

Если проверка ресурса или долговечности стальной конструкции заключается в определении критического количества циклов нагрузки до ее отказа, целесообразно использовать зависимость Коффина [3]:

$$N^* = \frac{\gamma_{s2} [0,5 \left( \ln \frac{1}{1-Z_c} \right)]^2}{\left( K_\varepsilon \Delta\varepsilon - \frac{2R_{уп}}{E_s} \right)^2}$$

где  $K_\varepsilon$  – коэффициент концентрации деформаций;  $\Delta\varepsilon$  – размах пластических деформаций на одном цикле нагрузки;  $E_s$  – модуль упругости стали.

Для растягивающих напряжений в интервале  $R_{уп} < \sigma_{max,i} < R_{ун}$  размах деформаций на  $i$ -м цикле нагрузки равен:

$$\Delta\varepsilon_i = (\sigma_{max,i} - R_{ун}) ctg\alpha$$

где  $\sigma_{max,i}$  – амплитуда напряжений для  $i$ -го цикла нагрузки, МПа;  $ctg\alpha = \frac{(\varepsilon_k - \varepsilon_{02})}{(R_{ун} - R_{уп})}$ ;  $\varepsilon_k = \ln \frac{1}{1-Z_c}$  – действительная остаточная информация;  $\varepsilon_{02}$  – деформация, равная 0,2.

**Циклическая трещиностойкость.** Под живучестью стальных конструкций с трещиной понимают долговечность от момента зарождения первой макроскопической трещины усталости в зоне сплавле-

ния металла размером от 0,2-0,5 мм и возможный дальнейший ее рост до критической длины ( $L_k$ ), при которой происходит окончательное разрушение сварного соединения (хрупкое разрушение). В расчетах на долговечность или по второй группе критических состояний условие хрупкого неразрушения элемента конструкции с трещиной определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} K_1 &\leq K_{C1}, K_{11} \leq K_{C11}, K_{111} \leq K_{C111} \\ ((K_1/K_{C1})^2 + (K_{111}/K_{C111})^2)^{0,5} &\leq 1 \\ ((K_{11}/K_{C11})^2 + (K_{111}/K_{C111})^2)^{0,5} &\leq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & ((K_1/K_{c1})^2 + (K_{11}/K_{c11})^2)^{0,5} \leq 1 \\ & ((K_1/K_{c1})^2 + (K_{11}/K_{c11})^2 + (K_{111}/K_{c111})^2)^{0,5} \leq 1 \end{aligned}$$

где  $K_1, K_{11}, K_{111}$  – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно для трещин нормального отрыва, поперечного и продольного сдвига;  $K_{c1}, K_{c11}, K_{c111}$  – характеристические значения предельных коэффициентов интенсивности напряжений соответственно для трещин нормального отрыва, поперечного и продольного смещения.

Таким образом, в статье изложены различные подходы к расчету выносливости и циклической трещиностойкости элементов металлических конструкций. Рассмотренные методики могут использоваться для определения начальных технологических несовершенств при проектировании новых конструкций, а также в ходе выполнения работ по обследованию уже существующих.

#### Библиографический список

1. Манжула К.П., Сундер Р. Масштабный эффект при циклическом нагружении сварных соединений // Деформация и разрушение материалов. – 2022. – № 5. – С. 11-18.
2. Бурчик В.В. Строительство производственных зданий с использованием металлических конструкций // Перспективы науки. – 2023. – № 2. – С. 60-63.
3. Молоков К.А., Новиков В.В., Антоненко С.В. Повреждаемость судовых конструкций и основы построения математической модели оценки трещиностойкости конструкционных сталей // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2022. – № S1. – С. 46-54.

#### ANALYSIS OF APPROACHES TO ASSESSING FACILITY AND CYCLIC CRACK RESISTANCE OF METAL STRUCTURE ELEMENTS

V.G. Sazykin, Senior Lecturer, Assistant

K.V. Konovalova, Assistant

A.S. Manaenkova, Assistant

A.V. Lyashenko, Graduate Student

Voronezh State Technical University

(Russia, Voronezh)

**Abstract.** The article discusses approaches to assessing the endurance and cyclic crack resistance of metal structural elements. It is noted that in national and international regulatory documents on the design of steel structures and on assessing the technical condition of steel elements of industrial buildings and structures that are in operation, there is no corresponding calculation methodology. It has been revealed that some building codes and regulations fragmentarily reflect approaches to the preliminary assessment of endurance with a number of load cycles of more than 10<sup>5</sup> (high-cycle fatigue), but without taking into account in some cases the qualitative change in the nature of damage accumulation. Special attention is paid to quasi-static fatigue, low-cycle fatigue, and survivability of steel structures. Methods for calculating various fatigue levels of metal structures are discussed in detail.

**Keywords:** metal, crack resistance, endurance, fatigue, assessment, damage.