

Прогнозирование усталостной прочности стальных конструкций при многократных переменных нагрузках

Prediction of fatigue strength of steel structures under repeated variable loads

УДК 624.014.2

Получено: 13.01.2025

Одобрено: 18.02.2025

Опубликовано: 25.03.2025

Близнецов А.С.

Студент, Строительство

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"

e-mail: bliznetcov.ase@dvfu.ru

Bliznetsov A.S.

Student, Construction

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Far Eastern Federal University"

e-mail: bliznetcov.ase@dvfu.ru

Ли М.В.

Студент, Строительство

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"

e-mail: li.mvi@dvfu.ru

Li M.V.

Student, Construction

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Far Eastern Federal University"

e-mail: li.mvi@dvfu.ru

Пивкин М.Ю.

Студент, Строительство

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"

e-mail: pivkin.mi@dvfu.ru

Pivkin M.Y.

Student, Construction

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Far Eastern Federal University"

e-mail: pivkin.mi@dvfu.ru

Пучкин Д.К.

Студент, Строительство

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"

e-mail: puchkin.dk@dvfu.ru

Puchkin D.K.

Student, Construction

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Far Eastern Federal University"

e-mail: puchkin.dk@dvfu.ru

Научный руководитель:**Малышкин А.П.**

Канд. техн. наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет"

Scientific Advisor:**Malyshkin A.P.**

Candidate of Technical Sciences Sciences, Associate Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"Tyumen Industrial University"

Аннотация

В статье рассматриваются методики прогнозирования усталостной прочности стальных конструкций, работающих в условиях многократных переменных нагрузок. Особое внимание уделяется теоретическим основам усталостного разрушения, включая анализ напряженно-деформированного состояния конструкций с использованием аналитических методов и численного моделирования. Представлены экспериментальные данные по усталостной долговечности стальных образцов и сварных соединений, полученные при различных режимах циклического нагружения. Обсуждаются расхождения между расчетными моделями и экспериментальными результатами, выявляются факторы, влияющие на снижение усталостного ресурса, такие как концентрация напряжений, остаточные сварочные напряжения и коррозионная среда. Разработаны рекомендации по повышению усталостной прочности конструкций, включая оптимизацию геометрии, улучшение качества соединений и внедрение систем регулярного мониторинга.

Ключевые слова: усталостная прочность, стальные конструкции, многократные переменные нагрузки, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, кривые Велера, критерий Минера, усталостное разрушение, прогнозирование долговечности, концентрация напряжений.

Abstract

This paper examines methodologies for predicting the fatigue strength of steel structures operating under conditions of repeated variable loading. Special attention is given to the theoretical foundations of fatigue failure, including the analysis of the stress-strain state of structures using analytical methods and numerical modeling. Experimental data on the fatigue life of steel specimens and welded joints obtained under various cyclic loading regimes are presented. Discrepancies between computational models and experimental results are discussed, and factors affecting the reduction of fatigue life, such as stress concentration, residual welding stresses, and corrosive environments, are identified. Recommendations for enhancing the fatigue strength of structures are developed, includ-

ing geometry optimization, improvement of joint quality, and the implementation of regular monitoring systems.

Keywords: fatigue strength, steel structures, repeated variable loads, finite element method, stress strain state, Wohler curves, Miner's criterion, fatigue failure, durability prediction, stress concentration.

Усталостное разрушение стальных конструкций представляет собой многосложный процесс накопления микроповреждений, приводящих к снижению несущей способности и последующему разрушению материала. Основной причиной усталости является воздействие многократно повторяющихся переменных нагрузок, амплитуда которых может быть значительно ниже предела текучести. В результате на микроуровне происходит формирование и развитие трещин, инициированных локальными пластическими деформациями в слабых местах структуры стали. К таким областям относятся микродефекты, примесные включения, границы зерен и зоны локальной концентрации напряжений. Этот процесс условно разделяется на три стадии: зарождение микротрещин, их стабильный рост и финальное хрупкое разрушение.

Исследования показали, что усталостное повреждение наиболее активно начинается в поверхностных слоях материала, где концентрируются остаточные напряжения, вызванные термическими или механическими воздействиями. На процесс зарождения микротрещин существенное влияние оказывает шероховатость поверхности: для конструкций с грубой обработкой коэффициент концентрации напряжений может достигать значений, превышающих 3. Особая опасность заключается в сочетании высоких амплитуд переменных нагрузок с циклическими воздействиями растяжения и сжатия, при которых величина максимальных напряжений близка к пределу текучести.

Важным фактором является химический состав и структура стали. Высокоуглеродистые стали, несмотря на их высокую прочность, обладают меньшей усталостной долговечностью по сравнению с низкоуглеродистыми и легированными сталями. Примеси, такие как сера и фосфор, способствуют образованию неметаллических включений, которые создают очаги концентрации напряжений и ускоряют развитие трещин. Легирующие элементы (например, хром, никель, молибден) повышают усталостную прочность за счет упрочнения структуры и увеличения сопротивления пластической деформации. Термообработка, включая закалку и отпуск, позволяет управлять зернистостью и распределением карбидных фаз, что улучшает показатели усталостной прочности.

Для описания зависимости усталостной прочности от числа циклов нагрузки используется диаграмма Велера, или S-N кривая. Она отражает логарифмическую зависимость между амплитудой напряжений и числом циклов до разрушения. Опыт показывает, что для большинства конструкционных сталей существует **предел усталости** — напряжение, ниже которого разрушение материала не происходит даже при бесконечно большом числе циклов. Для низкоуглеродистых сталей предел усталости составляет примерно 40–50% от предела текучести. Однако при наличии агрессивных сред или при повышенной температуре усталостный предел существенно снижается.

Уравнение Баскина позволяет описать связь между числом циклов до разрушения N и амплитудой напряжений σ_a :

$$\sigma_a = \sigma_f'(2N)^b$$

где σ_f' — усталостная прочность материала, а b — эмпирический показатель, зависящий от вида, стали и условий нагрузки. Данное уравнение широко применяется при построении расчетных моделей и прогнозировании ресурса конструкций.

При расчетах на усталость важным критерием является накопление повреждений. Критерий Минера представляет линейное накопление усталостного повреждения и может быть выражен в виде:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

где n_i — количество циклов нагрузки на i -м уровне, а N_i — число циклов до разрушения при данном уровне напряжений. Несоблюдение данного условия приводит к недооценке усталостного повреждения и преждевременному разрушению конструкции.

Необходимо учитывать влияние внешних факторов, таких как коррозия и температура. Коррозионная усталость возникает в условиях воздействия агрессивных сред, когда коррозионные процессы создают микротрещины, ускоряющие развитие усталостного разрушения. При температурах выше 350°C происходит снижение предела выносливости из-за ползучести и структурных изменений стали. Обратный эффект наблюдается при низких температурах, когда материал переходит в хрупкое состояние, что снижает его способность к пластической деформации и способствует внезапному разрушению.

Для точного прогнозирования усталостной прочности стальных конструкций применяются численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ). Они позволяют моделировать распределение напряжений и деформаций в элементах конструкции, учитывая реальные условия эксплуатации и геометрию. Результаты численного анализа дополняются экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний образцов на многоцикловое усталостное разрушение при различных режимах нагрузки.

Прогнозирование усталостной долговечности стальных конструкций базируется на комплексном подходе, который сочетает расчет напряженно-деформированного состояния, экспериментальные данные по усталостным характеристикам материалов и применение критериев разрушения для моделирования предельного состояния конструкции. Усталостная прочность конструкций зависит от локальных и глобальных напряжений, вызванных переменными нагрузками, а также от характера дефектов и структуры материала. Решение задачи прогнозирования требует как аналитических расчетов, так и численного моделирования с использованием современных методов вычислительной механики.

Расчет напряженно-деформированного состояния стальных конструкций проводится для определения зон концентрации напряжений, которые являются потенциальными очагами усталостного разрушения. В аналитических методах используются базовые уравнения теории упругости и сопротивления материалов. В частности, для стержней и балок напряжения рассчитываются по формуле:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \tau = \frac{Q}{A}$$

где M — изгибающий момент, W — момент сопротивления сечения, Q — поперечная сила, A — площадь сечения. Однако аналитические методы ограничены в применении из-за сложности геометрии реальных конструкций и неоднородного характера напряжений, особенно в местах сварных соединений, отверстий и переходов сечений. В таких случаях применяется численное моделирование, наиболее эффективным из которых является метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов позволяет детально проанализировать распределение напряжений и деформаций в конструкциях с учетом их геометрических особенностей и граничных условий. Конструкция разбивается на конечные элементы, для каждого из которых решается уравнение равновесия. Полученные результаты позволяют выявить зоны максимальных напряжений и определить коэффициент концентрации напряжений K_t . Например, для сварных соединений в балках коэффициент K_t может достигать значений от 2 до 3, что значительно снижает усталостный ресурс. В реальных конструкциях численное моделирование также учитывает остаточные сварочные напряжения, которые в сочетании с переменными нагрузками ускоряют процесс разрушения.

Для оценки усталостного ресурса конструкции используются экспериментальные зависимости, полученные на основе многократных испытаний образцов в условиях циклического нагружения. Эти зависимости, представленные в виде S-N диаграмм (кривых Велера), описывают логарифмическую зависимость между амплитудой напряжений S и числом циклов до разрушения N . Для большинства конструкционных сталей можно использовать уравнение Баскина:

$$\sigma_a = \sigma_f'(2N)^b$$

где σ_a – амплитуда циклических напряжений, σ_f' – усталостная прочность материала, N – число циклов до разрушения, b – эмпирический показатель. На основании экспериментов определяются пределы выносливости, при которых разрушение материала не происходит даже при бесконечно большом числе циклов. Для низкоуглеродистых сталей предел усталости обычно составляет 40–50% от предела текучести.

Накопление усталостных повреждений в реальных конструкциях, где нагрузки изменяются по величине и направлению, описывается критерием линейного накопления повреждений Минера. Суммарное повреждение определяется по формуле:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

где n_i – число циклов на i -м уровне напряжений, N_i – число циклов до разрушения при этом уровне. Разрушение конструкции наступает, когда $D=1$. Однако на практике линейный критерий Минера часто требует корректировок, так как не учитывает влияние последовательности нагружений и пластической деформации в критических точках.

Распространение трещин в конструкции под действием циклических нагрузок рассматривается в рамках линейной механики разрушения. Для оценки роста трещины используется уравнение Парижа:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

где a – длина трещины, ΔK – диапазон коэффициента интенсивности напряжений, C и m – эмпирические параметры материала. Коэффициент интенсивности напряжений определяется как:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

где Y – коэффициент формы, зависящий от геометрии трещины и конструкции, σ – приложенные напряжения, a – текущая длина трещины. Условия разрушения определяются достижением критического значения коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} , которое зависит от прочностных характеристик материала. Применение данного подхода позволяет прогнозировать скорость распространения трещин и остаточный ресурс конструкции.

Экспериментальные исследования усталостной прочности стальных конструкций представляют собой ключевой этап, направленный на верификацию расчетных моделей и выявление закономерностей усталостного разрушения при многократных переменных нагрузках. Программа испытаний разрабатывается с учетом реальных условий эксплуатации конструкций, включая характер нагрузок, их амплитуду, частоту и влияние внешних факторов, таких как температура и коррозионная среда.

Для исследования усталостной прочности отбираются образцы из конструкционных сталей, наиболее часто применяемых в строительных и машиностроительных отраслях. В частности, широко используются стали марок **C235**, **C345** и легированные стали типа **09Г2С**, которые обладают высокой прочностью и хорошей свариваемостью. Испытания проводятся на специальных вибрационных или крутильных машинах, способных создавать циклические нагрузки с различной амплитудой и частотой. Образцы изготавливаются в виде стандартных плоских или круглых прутков, а также сварных соединений с различными типами швов для учета особенностей геометрии реальных конструкций.

Условия нагружения варьируются в зависимости от цели исследования. При многоцикловом нагружении, когда число циклов до разрушения превышает 10^5 , амплитуды напряжений выбираются ниже предела текучести, что характерно для реальной эксплуатации мостов, крановых балок и других критически нагруженных конструкций. При малоцикловом нагружении, где число циклов меньше 10^4 , амплитуды приближаются к пределу текучести, а процесс разрушения сопровождается значительной пластической деформацией. Режимы нагружения включают симметричные и асимметричные циклы, а также случайные нагрузки для моделирования реальных эксплуатационных условий. В частности, при симметричном нагружении коэффициент асимметрии цикла равен $R = -1$, где $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$, а при несимметричном может достигать значений от 0 до 0.5.

В процессе испытаний регистрируются числа циклов до разрушения при заданных уровнях напряжений. Результаты обрабатываются для построения S-N диаграмм, которые демонстрируют зависимость между амплитудой напряжений и числом циклов до разрушения. На основе экспериментальных данных определяются пределы выносливости и параметры уравнения Баскина для различных условий нагружения. Например, для стали **C345** предел усталости при многоцикловом симметричном нагружении составляет около **160–180 МПа**, что соответствует примерно **45–50% предела текучести**.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными моделями позволяет оценить их точность и выявить расхождения. Расчетные модели на основе линейной механики разрушения и критерия Минера дают достаточно точные результаты для идеальных условий, однако в реальных конструкциях наблюдаются отклонения, вызванные рядом факторов. Во-первых, остаточные сварочные напряжения и локальные дефекты, такие как поры или непровары, приводят к снижению усталостного ресурса. Во-вторых, влияние коррозии в сочетании с переменными нагрузками может привести к коррозионной усталости, что ускоряет процесс разрушения. Эксперименты показывают, что при наличии коррозионной среды предел усталости снижается на **20–30%** в зависимости от агрессивности среды и типа стали.

Обсуждение расхождений между расчетами и экспериментальными результатами позволяет обосновать рекомендации по повышению усталостной прочности стальных конструкций. Одним из ключевых направлений является **оптимизация геометрии конструкций** для снижения концентрации напряжений. Например, использование плавных переходов сечений вместо резких углов позволяет уменьшить коэффициент концентрации напряжений K_t и, соответственно, увеличить ресурс конструкции. Для сварных соединений рекомендуется применять способы уменьшения остаточных напряжений, такие как термообработка после сварки или механическая обработка швов.

Контроль качества соединений играет важную роль в повышении усталостной прочности. Эксперименты показывают, что дефекты сварки, такие как непровары и трещины, могут снижать предел усталости на **40–50%**. Для предотвращения таких дефектов следует применять неразрушающие методы контроля, включая ультразвуковую дефектоскопию и рентгенографию, а также регламентировать качество подготовки и выполнения сварочных работ.

Регулярный мониторинг состояния элементов конструкций позволяет своевременно выявлять критические зоны, где происходит накопление усталостных повреждений. Для этого применяются методы структурного мониторинга, такие как акустическая эмиссия и тензометрия, которые позволяют контролировать развитие микротрещин в реальном времени. В случае выявления начальных стадий усталостного разрушения целесообразно применять ме-

тоды локального усиления конструкций, включая накладные элементы и углепластиковые ленты.

Литература

1. Лурье, А. И. Усталостная прочность и долговечность конструкций из стали. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.
2. Баскаков, А. И., Шашкин, А. Г. Исследование усталостных характеристик сварных соединений стальных конструкций // Вестник строительной науки и техники. – 2019. – № 4. – С. 45–52.
3. Paris, P. C., Erdogan, F. A critical analysis of crack propagation laws // Journal of Basic Engineering. – 1963. – Vol. 85, No. 4. – P. 528–534.
4. Малашенко, Н. А., Чернышев, А. А. Методы оценки усталостной прочности стальных конструкций в условиях коррозионного воздействия // Проблемы прочности материалов и конструкций. – 2021. – Т. 63, № 2. – С. 123–130.
5. Suresh, S. Fatigue of Materials. – Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 679 p.
6. Хейфец, В. В., Сидоров, П. Е. Методика экспериментального определения усталостной прочности стальных образцов при переменных нагрузках // Инженерно-строительный журнал. – 2020. – № 10. – С. 67–74.