

АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН

Михалев О.Н.¹, Янюшкин А.Р.²

¹Москва;

²Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары

Ключевые слова: усталостная прочность, расчеты на сопротивление усталости, автоматизация проектирования, проектирование машин, математическая статистика, машинное обучение.

Аннотация. Усталостное разрушение является частой причиной поломки машин, в связи с чем расчеты деталей на сопротивление усталости являются одними из критически необходимых при создании сложных изделий машиностроения. Математическая модель усталостного растрескивания не до конца раскрыта ввиду сложности процесса и основывается на множестве экспериментальных данных. В связи с чем актуальной задачей является дальнейшее совершенствование и автоматизация данных расчетов для снижения трудоемкости и повышения точности проектирования. Одним из подходов к решению данной задачи является применение современных методов математической статистики и машинного обучения.

FATIGUE STRENGTH ANALYSIS IN AUTOMATED MACHINERY DESIGN

Mikhalev O.N.¹, Yanyushkin A.R.²

¹Moscow;

²Ulianov Chuvash State University, Cheboksary

Keywords: fatigue strength, fatigue resistance calculations, design automation, machine design, mathematical statistics, machine learning.

Abstract. Fatigue failure is a common cause of machine failure, which is why calculations of parts for fatigue resistance are critically important when creating complex mechanical engineering products. The mathematical model of fatigue cracking is not fully disclosed due to the complexity of the process and is based on a variety of experimental data. In this regard, an urgent task is further improvement and automation of these calculations to reduce labor intensity and increase their accuracy. One of the approaches to solving this problem is the use of modern methods of mathematical statistics and machine learning.

Проектирование сложных изделий машиностроения сопровождаются многочисленными расчетами, среди которых особое место занимают расчеты усталостной прочности. От них напрямую зависит долговечность и выносливость проектируемых изделий.

Усталостные разрушения деталей происходят в основном при циклической схеме их нагружения, когда напряжение меняется с некоторым временным шагом. Так при определенных значениях данных напряжений внутри объема материала начинают протекать процессы зарождения развития трещин, что в конечном итоге приводит к внезапному разрушению детали. Появление усталостной трещины носит случайный характер, зависит от множества факторов и может появиться всего при нескольких циклах нагрузки. От этого также различают малоцикловую и многоцикловую усталость, которые имеют свои особенности.

В основе расчетов на выносливость лежат фундаментальные экспериментальные исследования поведения материалов в условиях их попеременного нагружения. Эксперименты проводят с различными величинами напряжений для каждого образца для выявления закономерности изменения числа циклов до разрушения при тех или иных условиях напряжений. В связи с чем требуется большое число испытаний. На основе экспериментальных данных строится кривая усталости (Веллера). А с помощью статистической обработки устанавливаются приблизительные зависимости, например, $\sigma_{-1} = (0,4 \dots 0,5) \sigma_b$, где σ_{-1} – предел усталостной прочности по нормальным изгибным напряжениям для сталей, σ_b – предел прочности материала. В зависимости от типа напряжений, характеристик цикла и других параметров значения предела выносливости будут различными. Поэтому при испытании материала на выявление его предела выносливости указывается характер напряжений за цикл. При снижении напряжений образцы выдерживают до разрушения больше циклов. Параметры

На величину предела выносливости влияют разные факторы, среди которых.

1. Концентраторы напряжений или местные напряжения, возникающие в местах резкого перепада конфигурации детали, например канавки, отверстия, пазы, шлицы и другие элементы, ослабляющие сечения детали. Для учета влияния концентраторов в расчетах сопротивления усталости применяются эффективные коэффициенты концентрации напряжений K_σ , K_τ (σ – нормальные напряжения, τ – касательные напряжения).

2. Размеры детали. С увеличением линейных размеров вероятность появления усталостных трещин увеличивается, поэтому используют масштабный коэффициент $K_{d\sigma}$.

3. Состояние поверхности. Данное влияние учитывается использованием коэффициента качества поверхности $K_{F\sigma}$, $K_{F\tau}$.

4. Ассиметрия цикла. Характеризуется диаграммой предельных амплитуд.

Свое влияние также оказывают такие факторы как: температура, паузы, перегрузки, тренировка [1, 2]. Также необходимо учитывать коэффициент запаса усталостной прочности, что имеет свои особенности, особенно в методиках вероятностных расчетов, в которых определяется вероятность безотказной работы изделия при определенных нагрузках [3].

Таким образом, в данных расчетах используется множество поправочных коэффициентов, выявленных экспериментально, что делает данные расчеты трудоемкими, а в некоторых случаях менее точными.

Современные CAD/CAE-системы для анализа усталостной прочности используют методы конечных элементов [4]. ANSYS, Simcenter 3D, SolidWorks, APM WinMachine, T-Flex и другие системы способны производить различные расчеты усталостной прочности [5]. Данные расчеты становятся более точные, но требуют больших вычислительных ресурсов.

Современный подход к анализу усталостной прочности все больше сосредотачивается на применении алгоритмов машинного обучения (МО), таких как нейронные сети, регрессия и другие, при этом отмечается высокая точность нейросетевого подхода [6, 7]. Прогнозирование осуществляется на основе

свойств материала, условий нагрузки и других факторов [8]. Система ANSYS для высокоточного предсказания распространения усталостной трещины также использует и анализ временных рядов, для чего также могут применяться алгоритмы МО [9]. Обучение подобных моделей требует больших вычислительных ресурсов, и чаще всего выполняется в облаке, поэтому для проектирования машин с точным учетом усталостной прочности перспективными являются облачные САПР [10].

Для точного анализа усталостной прочности необходимо и более точное установление всех видов нагрузок и их значений, действующих на изделие во время эксплуатации. В сложных деталях, работающих в условиях с множеством неопределенностей выявить все напряжения не просто. Для этого возможно применение отдельных алгоритмов и специальных программ [11]. Также возможно их создание в виде специальных библиотек для CAD/CAE-систем [12].

В условиях цифровизации подобные расчеты необходимо проводить с помощью цифровых двойников в виртуальном окружении, где учитывается одновременное воздействие множества факторов на изделие. Это требует дальнейших исследований и совершенствования САПР.

Большое значение в анализе усталостной прочности является дальнейшее изучение самой природы подобного разрушения, которая не до конца раскрыта и математически смоделирована. Данный тип поломки достаточно сложен и менее прогнозируем. Основные концепции, модели, вероятностные методики и оценки надежности разработаны несколько десятилетий назад, которые сегодня продолжают совершенствоваться.

Выводы

Анализ усталостной прочности проектируемых изделий позволяет оптимизировать их конструкцию, сделать их более долговечными, выносливыми, надежными, экономичными и конкурентоспособными. Что является актуальной задачей в самых различных отраслях машиностроения. Одним из главных вопросов является точность и достоверность данного анализа. Применение алгоритмов МО позволяет сделать анализ усталостной прочности более точным, а также снизить трудоемкость и сроки прочностных расчетов и всего этапа проектирования изделий, что положительно отразится и на экономической эффективности предприятий. В тоже время большой эффект может дать дальнейшее изучение самого механизма усталостного разрушения и совершенствование его математического моделирования.

Список литературы

1. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. – М.: Изд-во АПМ. – 472 с.
2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 736 с.
3. Сызранцева К.В., Черная Л.А. Оценка надежности валов по критерию усталостной прочности при случайном режиме нагружения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 5. – С. 34-38.
4. Aprianur Fajri, Aditya Rio Prabowo, Eko Surojo, Fitriani Imaduddin, Jung Min Sohn, Ristiyanto Adiputra. Validation and Verification of Fatigue Assessment using FE Analysis: A Study Case on the Notched Cantilever Beam // Procedia Structural Integrity. 2021, vol. 33, pp. 11-18. doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.003.

5. АПМ. Усталостный расчет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://apm.ru/fatigue-calculation>.
6. Jianqiang Zhang, Jiakai Zhu, Wei Guo, Wanlin Guo. A machine learning-based approach to predict the fatigue life of three-dimensional cracked specimens // International Journal of Fatigue. 2022, vol. 159, p. 106808. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106808.
7. Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Шатагин Д.А., Киселев А.В., Колчин П.В. Прогнозирование усталостной прочности металлов при низких температурах на основе искусственного интеллекта // Вестник машиностроения. – 2021. – № 11. – С. 11-14.
8. Negi P. Application of Machine Learning in Predicting the Fatigue behaviour of Materials Using Deep Learning // Computer and Mathematics Education. 2018, vol. 9(2), pp. 541-553. doi.org/10.17762/turcomat.v9i2.13858.
9. Михалев О.Н., Янюшкин А.С., Янюшкин А.Р. Анализ временных рядов в разработке и производстве сложных технических изделий машиностроения // Научные технологии машиностроения, авиации и транспорта: сборник трудов XVI МНТК (г. Ростов-на-Дону, 24-29 сентября 2024 года). – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2024. – С. 119-128.
10. Михалев О.Н., Янюшкин А.С. Большие объемы данных в системах автоматизированного проектирования // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2023. – №15. – С. 36-38.
11. Савкин А., Горобцов А., Андроник А. Оценка прочности и усталостной долговечности конструктивных элементов автомобиля // САПР и графика. –2012. – № 8(190). – С. 93-96.
12. Михалев О.Н., Янюшкин А.Р. Повышение эффективности технического проектирования в автоматизированных системах // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий. Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 232-235.

Сведения об авторах:

Михалев Олег Николаевич – к.т.н.;

Янюшкин Андрей Романович – аспирант.