

М. Н. СТЕПНОВ, А. В. ЗИНИН

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИК  
СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ  
МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИЙ**



ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

**М. Н. СТЕПНОВ,  
А. В. ЗИНИН**

---

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИК  
СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ  
МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИЙ**

---

МОСКВА  
«ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
2016

УДК 539.4  
ББК 30.121  
С 79

*Рецензенты:*

ведущий конструктор ОАО «АК Рубин» канд. техн. наук **В.В. Мозалев**,  
начальник отдела науки и информационных коммуникаций Электро-  
стальского политехнического института, филиала Университета маши-  
ностроения **А.Н. Лисин**.

**Степнов М. Н., Зинин А. В.**

С 79 Прогнозирование характеристик сопротивления устало-  
сти материалов и элементов конструкций. М.: Иннова-  
ционное машиностроение, 2016. — 392 с.: ил.  
ISBN 978-5-9907308-0-9

Монография содержит систематическое изложение существующих расчетных методов оценки характеристик сопротивления усталости традиционных конструкционных и новых композитных материалов на основе полимерной матрицы, а также методов расчета выносливости типовых элементов высоконагруженных конструкций.

Методология расчетных методов определения характеристик выносливости основана на использовании статистических данных о характеристиках механических свойств материалов при кратковременном нагружении и экспериментально обоснованных моделях учета влияния различных факторов на несущую способность конструкций при циклическом нагружении. Показано, что применение предлагаемых расчетных методов обеспечивают достаточно высокую точность оценки характеристик сопротивления усталости, не уступающую показателям точности экспериментальных исследований.

Особое внимание уделено вопросам возможности оценки характеристик усталости полимерных композитных материалов в зависимости от их структурных параметров и особенностей механического поведения и механизмов усталостного разрушения.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторских и технологических бюро, лабораторий механических испытаний, научных сотрудников, аспирантов и студентов механических специальностей.

УДК 539.4  
ББК 30.121

ISBN 978-5-9907308-0-9

© М.Н. Степнов, А.В. Зинин, 2016

# Оглавление

|   |           |
|---|-----------|
| Предисловие .....   | 6         |
| <b>ГЛАВА 1. Характеристики сопротивления усталости конструкционных материалов, используемые в расчетах на прочность при многоцикловом нагружении .....</b>                      | <b>11</b> |
| 1.1. Циклы напряжений и их характеристики .....   | 11        |
| 1.2. Характеристики сопротивления усталости при регулярном нагружении .....   | 14        |
| <b>ГЛАВА 2. Краткие сведения о статистических методах анализа, используемых для расчета характеристик сопротивления усталости .....</b>   | <b>23</b> |
| 2.1. Элементы корреляционного анализа .....   | 24        |
| 2.2. Линейный регрессионный анализ .....  | 38        |
| 2.3. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена .....   | 53        |
| 2.4. Критерий принадлежности двух или нескольких независимых выборок единой генеральной совокупности .....  | 55        |
| <b>ГЛАВА 3. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости при отсутствии концентрации напряжений .....</b>  | <b>65</b> |
| 3.1. Расчет предела выносливости материала при симметричном цикле напряжений .....  | 65        |
| 3.2. Расчет предельной амплитуды цикла напряжений для конструкционных материалов при асимметричном цикле нагружения .....   | 78        |
| 3.3. Расчетный метод построения кривых многоциклового усталости для гладких образцов .....  | 82        |
| 3.4. Построение диаграммы предельных амплитуд и пределов выносливости (предельных максимальных напряжений цикла) .....  | 91        |
| 3.5. Расчетный метод определения коэффициента чувствительности материала к асимметрии цикла напряжений .....  | 96        |
| 3.6. Оценка точности экспериментального метода определения коэффициента чувствительности к асимметрии цикла напряжений ..   | 111       |
| 3.7. Оценка влияния абсолютных размеров поперечного сечения образцов на сопротивление усталости. Расчетный метод построения кривых усталости для образцов больших сечений ..... | 117       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>ГЛАВА 4. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости с учетом концентрации напряжений</b> . . . . .   | <b>137</b> |
| 4.1. Расчетный метод оценки эффективного коэффициента концентрации напряжений . . . . .  | 138        |
| 4.2. Расчет предела выносливости детали при симметричном цикле нагружения с учетом технологических и конструктивных факторов. Метод В. П. Когаева . . . . .      | 147        |
| 4.3. Расчетный метод построения диаграммы предельных амплитуд при наличии концентрации напряжений . . . . .  | 149        |
| 4.4. Расчетный метод оценки коэффициента чувствительности к асимметрии цикла напряжений с учетом их концентрации . . . . .                                       | 160        |
| 4.5. Расчет коэффициента запаса прочности при циклическом нагружении . . . . .   | 171        |
| 4.6. Расчетный метод построения кривой многоциклового усталости при наличии концентрации напряжений . . . . .  | 176        |
| 4.7. Построение кривых многоциклового усталости для деталей с учетом совместного действия концентрации напряжений и масштабного фактора . . . . .                | 191        |
| 4.8. Вероятностные закономерности применительно к коэффициенту масштабного фактора при многоциклового усталости углеродистых и легированных сталей . . . . .     | 210        |
| <b>ГЛАВА 5. Методы ускоренных и форсированных испытаний на усталость</b> . . . . .   | <b>229</b> |
| 5.1. Ускоренный метод Про для оценки медианы предела выносливости . . . . .  | 230        |
| 5.2. Ускоренный метод испытания на усталость Энотомо . . . . .   | 235        |
| 5.3. Оценка предела выносливости методом Локати . . . . .  | 237        |
| 5.4. Оценка параметров уравнения кривой усталости по результатам форсированных испытаний . . . . .   | 240        |
| 5.5. Оценка параметров уравнения кривой усталости по результатам испытаний с возрастающей амплитудой цикла напряжений . . . . .                                  | 251        |
| <b>ГЛАВА 6. Оценка характеристик рассеяния усталостных свойств на основании результатов испытаний на усталость форсированным и ускоренным методами</b> . . . . . | <b>254</b> |
| 6.1. Некоторые эмпирические закономерности рассеяния характеристик усталости . . . . .   | 255        |
| 6.2. Законы распределения вероятностей для характеристик усталостных свойств . . . . .   | 261        |
| 6.3. Оценка коэффициента вариации предела выносливости по результатам испытаний на высоких уровнях амплитуды цикла напряжений . . . . .                          | 292        |
| 6.4. Ускоренный метод оценки дисперсии предела выносливости . . . . .  | 296        |
| 6.5. Построение кривой распределения предела выносливости по результатам испытаний на усталость с возрастающей амплитудой цикла напряжений . . . . .             | 300        |

---

|  |     |
|--|-----|
| ГЛАВА 7. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости полимерных композиционных материалов .....                                  | 307 |
| 7.1. Структурные особенности композитов как конструкционных материалов .....   | 307 |
| 7.2. Уравнения кривых усталости композиционных материалов .....  | 311 |
| 7.3. Косвенная оценка предела выносливости композиционных материалов при симметричном цикле по характеристикам статической прочности ..... | 321 |
| 7.4. Расчетная оценка характеристик сопротивления усталости композиционных материалов при асимметричном цикле напряжений .....             | 334 |
| 7.5. Методы определения характеристик усталости с учетом концентрации напряжений .....   | 351 |
| ГЛАВА 8. Вероятностные методы расчета на прочность при действии циклических напряжений .....   | 369 |
| 8.1. Расчет на прочность при регулярном нагружении .....   | 370 |
| 8.2. Расчет на усталость при нерегулярном нагружении .....   | 375 |
| Список литературы .....  | 380 |