

КОНСТРУКЦИОННАЯ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

**Г. А. Околович, С. В. Резниченко, Н. А. Беленко,
К. А. Шульга, М. В. Гертер**

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Конструкционная прочность материалов – комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Циклическая прочность – физический или ограниченный предел выносливости. Характеризует несущую способность материала, т. е. то наибольшее напряжение, которое он способен выдержать за определенное время работы;

Циклическая долговечность – число циклов (или эксплуатационных часов), которые выдерживают материалы до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения при заданном напряжении. Долговечность также может быть неограниченной (при $\sigma_{\max} < \sigma_{-1}$) и ограниченной (при $\sigma_{\max} > \sigma_{-1}$).

Ключевые слова: хрупкое разрушение, эксплуатационная прочность, динамические нагрузки, дислокация, долговечность, упрочнение, трещина, кривые Вёлера, циклическая прочность и долговечность, усталость

STRUCTURAL AND CYCLIC STRENGTH OF MATERIALS

**G. A. Okolovich, S. V. Reznichenko, N. A. Belenko,
K. A. Shulga, M. V. Gerter**

Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Structural strength of materials – mechanical properties, providing reliable performance and long service life of the material under operating conditions.

Cyclic strength – physical or limited endurance limit. Characterizes the bearing capacity of the material, i.e. the maximum stress which it can withstand for a certain time;

Fatigue life – number of cycles (or operating hours) that can withstand the materials before the formation of fatigue cracks of a certain length or until fatigue fracture at a specified voltage. Durability can also be unlimited (if $\sigma_{\max} < \sigma_{-1}$) and limited (if $\sigma_{\max} > \sigma_{-1}$).

Ключевые слова: brittle fracture, operational strength, dynamic load, dislocation, longevity, strengthening, crack, Wohler curves, cyclic strength and dolgovechnost, fatigue

Конструкционная прочность материалов

Комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации. При этом экономические требования сводятся к тому, чтобы материал имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы по возможности должны содержать минимальное количество легирующих элементов. Легирование должно быть обосновано повышением эксплуатационных свойства, так как повышение легированности увеличивает лишь твердость, но снижает механические и техно-

логические свойства сталей. В соответствии с теорией предельного легирования А. П. Гуляева необходимо рациональное усложнение химического состава, когда общая их концентрация не увеличивается или даже снижается для получения высокого комплекса механических свойств.

Рациональное легирование предусматривает введение в сталь и сплавы нескольких элементов при невысокой концентрации каждого с тем, чтобы повысить пластичность и вязкость, т. к. упрочнение при легировании растёт пропорционально концентрации леги-

рующего элемента в твердом растворе и относительной разницы атомных радиусов компонентов. Измельчение зерна осуществляется легированием и термической обработкой.

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его работы. При статических нагрузках критериями прочности являются временное сопротивление σ_B и предел текучести $\sigma_{0.2}$ (σ_T), характеризующие сопротивление материала пластической деформации. Поскольку при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима, то их несущую способность, как правило, определяют по пределу текучести. Характеристики σ_B и $\sigma_{0.2}$ используют также для оценки прочности деталей при кратковременных циклических перегрузках и при малом числе циклов ($<10^3$).

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью (δ , ψ) и ударной вязкостью (КЧУ). Необходимо также учитывать то, что в условиях эксплуатации действуют факторы, дополнительно снижающие их пластичность, вязкость и увеличивающие опасность хрупкого разрушения. Это концентраты напряжений (надрезы), динамические нагрузки, увеличение размеров деталей (масштабный фактор), понижение температуры.

Очагами разрушения высокопрочных материалов служат небольшие трещины эксплуатационного или технологического происхождения (могут возникать при термической обработке), а также трещиноподобные дефекты (неметаллические включения, карбиды, скопления дислокаций и т. п.).

Работоспособность изделия в условиях эксплуатации характеризуют следующие критерии прочности:

1) σ_B ; $\sigma_{0.2}$; $\sigma_{0.02}$; КС; σ_{-1} , которые определяют допустимые Рациональное легирование предусматривает введение в сталь и сплавы нескольких элементов при невысокой концентрации каждого с тем, чтобы повысить пластичность и вязкость, т. к. упрочнение при легировании растет пропорционально концентрации легирующего элемента в твердом растворе и относительной разницы атомных радиусов компонентов.

2) циклическая долговечность (малоцикловая усталость), износостойкость определяет долговечность инструмента.

Для повышения циклической прочности и износостойкости важно затруднить деформацию поверхности инструмента. Это достигается технологическими методами поверх-

ностного упрочнения при химико-термической обработке: азотирование, карбонитрация, цементация, осаждение нитридов титана и др.

Долговечность определяется временем зарождения трещины ($\sigma_{изт}$, $\sigma_{0.02}$), а ударная вязкость характеризует работу распространения трещины.

Циклическая прочность

В процессе эксплуатации машин на детали действуют пульсирующие или циклические нагрузки, напряжение от которых вызывает усталостные разрушения. Опыты показывают, что детали длительное время подвергшиеся действию переменных напряжений, разрушаются при напряжениях значительно меньших, чем временное сопротивление σ_B (предел прочности).

Первые наблюдения усталостного разрушения относятся к концу XVIII века, когда у длительно эксплуатируемых дилижансов в Англии и почтовых карет во Франции стали хрупко ломаться оси, изготовленные из ковкого железа, обладающего высокой пластичностью. Специалисты того времени объясняли это явление перерождением материала за счет его усталости в процессе длительной эксплуатации под действием переменных напряжений, возникающих из-за неровностей дороги. С тех пор термин «Усталость материалов», нашёл высокое распространение в инженерных методах расчёта надёжности элементов конструкций.

Современные ученые под усталостью понимают процессы постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящие к изменению его свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, а свойство противостоять усталости – выносливостью (ГОСТ 23207-78).

Наибольший вклад в научную основу проектирования металлических конструкций, подвергаемых повторным напряжениям, внес немецкий инженер Август Вёлер своими классическими опытами с железом и сталью в условиях повторного растяжения-сжатия и изгиба, результаты которых были опубликованы в период 1858 – 1870 гг.

Л. Шпангенберг (1874 г.) впервые графически изобразил результаты исследований, опубликованных А. Вёлером в виде таблиц. С тех пор графическое представление полученной зависимости между амплитудами напряжения цикла σ_a и числом циклов нагружения до разрушения N называют диаграммой Вёлера (рисунок 1).

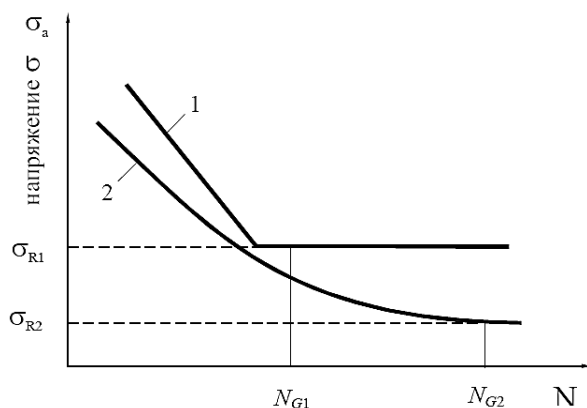


Рисунок 1 – Кривая усталости (кривая Вёлера): 1 – кривая усталости для образцов с физическим пределом выносливости, 2 – кривая усталости без физического предела выносливости

А. Велер ввел понятие о физическом пределе выносливости – максимальном циклическом напряжении, при котором нагрузка может быть приложена неограниченное число раз, не вызывая разрушения. Для металлических материалов, не имеющих физического предела выносливости, предел выносливости σ_R – значение максимальной по абсолютной величине напряжения цикла, соответствующее задаваемой долговечности. Для металлов и сплавов, проявляющих физический предел выносливости, принята база испытаний 107 циклов, а для материалов, ординаты кривых усталости которых по всей длине непрерывно уменьшаются с ростом числа циклов, – 10^8 циклов.

Первый тип кривой особенно характерен для ОЦК-металлов и сплавов, хотя может наблюдаться при определенных условиях у всех металлических материалов с любым типом кристаллической решетки, а второй тип соответствует преимущественно ГЦК-металлам и сплавам (алюминиевые сплавы, медные сплавы и др.).

Усталость материалов является одной из основных причин отказа деталей машин и элементов конструкции, подверженных действию напряжений, циклически изменяющихся во времени. В связи с этим для повышения ресурса и надежности подобных конструкций важное значение приобретают вопросы выбора материала, обоснования режимов технологии производства полуфабрикатов и деталей и организации контроля технологического процесса, обеспечивающие стабильное

и высокое сопротивление элементов конструкций усталостному разрушению [1].

Необходимо отметить, что усталость металла, отличается от биологической усталости. Если живой организм во время отдыха восстанавливается, то у деталей усталость накапливается и как следствие этот процесс не обратим.

Процесс накопления усталости носит сложный характер.

Проблему усталости сформулировал американский профессор Джон Коллинз:

- оценка долговечности менее точна, чем расчеты на прочность:

- характеристики долговечности не могут быть получены из механических свойств, их необходимо измерять непосредственно;

- материалы и конфигурации конструкции должны подбираться из условий обеспечения медленного распространения трещин и возможности обнаружения их до достижения опасных размеров;

- результаты разных тождественных испытаний могут отличаться друг от друга, поэтому необходима обработка и анализ статистических данных.

Разрушение от усталости по сравнению с разрушением от статической нагрузки имеет ряд особенностей.

1. Оно происходит при меньших, чем при статической нагрузке (меньших предела текучести или временного сопротивления).

2. Разрушение начинается на поверхности (или вблизи от нее) локально, в местах концентрации напряжений (деформации). Локальную концентрацию напряжений создают повреждения поверхности в результате циклического нагружения либо надрезы в виде следов обработки, воздействия среды.

3. Разрушение протекает в несколько стадий, характеризующих процессы накопления повреждений в материале, образования трещин усталости, постепенное развитие и слияние некоторых из них в одну магистральную трещину и быстрое окончательное разрушение.

4. Разрушение имеет характерное строение излома, отражающее последовательность процессов усталости. Излом состоит из очага разрушения. Зону усталости формирует последовательное развитие трещины усталости. В этой зоне видны характерные бороздки, которые имеют конфигурацию колец, что свидетельствует о скачкообразном продвижении трещин усталости. Зона усталости развивается до тех пор, пока в уменьшающемся рабочем сечении напряжения воз-

КОНСТРУКЦИОННАЯ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

растут настолько, что вызовут его мгновенное разрушение. Эту последнюю стадию разрушения характеризует зона долома.

О способности материала работать в условиях циклического нагружения судят по результатам испытаний образцов на усталость (ГОСТ 25.502-79). Их проводят на специальных машинах, создающих в образцах многократное нагружение (растяжение – сжатие, изгиб, кручение).

Образцы испытываются последовательно на разных уровнях напряжений, определяя число циклов до разрушения. Результаты испытаний изображают в виде кривой усталости, которая в логарифмических координатах: максимальное напряжение цикла σ_{max} , число циклов нагружений N состоит из участков прямых линий (рисунок 2).

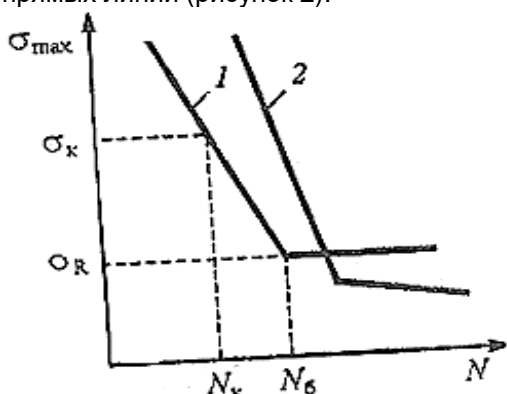


Рисунок 2 – Кривые усталости для стали (1) и цветных сплавов (2)

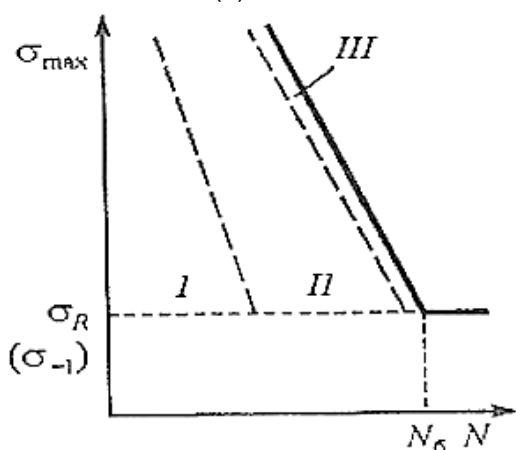


Рисунок 3 – Обобщенная диаграмма усталостного разрушения: I – стадия постепенного накопления повреждений до возникновения трещины усталости; II – стадия распространения трещины; III – стадия долома

Горизонтальный участок определяет напряжение, которое не вызывает усталостного разрушения после неограниченно больш

шого или заданного (базового N_σ) числа циклов. За базу испытаний N_σ принимают 10^7 циклов для стали и 10^8 циклов для цветных металлов. На графике за базу испытаний N_σ принимают точку начала горизонтального участка кривой или точку перегиба. Это напряжение представляет собой физический предел выносливости σ_R (R – коэффициент асимметрии цикла), при симметричном цикле σ_{-1} . Наклонный участок кривой усталости характеризует ограниченный предел выносливости, равный напряжению σ_K , которое может выдержать материал в течении определенного числа циклов N_K .

Выводы:

Кривые усталости позволяют определить следующие критерии выносливости:

Циклическую прочность – физический или ограниченный предел выносливости. Характеризует несущую способность материала, т. е. то наибольшее напряжение, которое он способен выдержать за определенное время работы;

Циклическую долговечность – число циклов (или эксплуатационных часов), которые выдерживают материалы до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения при заданном напряжении. Долговечность также может быть неограниченной (при $\sigma_{max} < \sigma_{-1}$) и ограниченной (при $\sigma_{max} > \sigma_{-1}$).

Кривые выносливости в области ограниченной долговечности определяют на основе статистической обработки результатов испытаний. Это связано со значительным разбросом долговечности из-за ее высокой чувствительности к состоянию поверхности образцов.

Кривые усталости характеризуют стадию разрушения и не отражают процессы, ему предшествующие. Более показательна обобщенная диаграмма усталости (рисунок 3). Она содержит дополнительные линии (штриховые), выделяющие в процессах усталости три стадии.

Обобщенная диаграмма позволяет установить дополнительные критерии выносливости. Из них наиболее важное значение имеет живучесть, определяемая скоростью роста трещины усталости (СРТУ). Живучесть характеризует способность материала работать в поврежденном состоянии после образования трещины (в области II). Живучесть (СРТУ) – критерий надежности материала, с помощью которого прогнозируют работоспособность детали, рассчитанную на циклическую прочность по ограниченному пределу

выносливости. При высокой живучести (малой СРТУ) можно своевременно путем дефектоскопии обнаружить трещину, заменить деталь и обеспечить безаварийную работу конструкции.

Решения проблемы повышения ресурса и надёжности машин обуславливает разработку и внедрение вероятностных методов расчёта на прочность при переменных напряжениях, учитывающих случайный характер действующих нагрузок и вариацию характеристик сопротивления усталости материалов и деталей.

Характеристики сопротивления усталостному разрушению материала и изделий определяются в результате испытаний на усталость образцов, моделей, натуральных деталей и конструкций в целом, что требует больших материальных затрат и весьма длительного времени, которого, как правило, не хватает конструктору на стадии проектирования и доводки конструкции. В связи с этим ученые многих стран ведут поиски расчётных (косвенных) методов оценки характеристик сопротивления усталостному разрушению и методов ускоренных и форсированных испытаний на усталость.

На данный момент моделирование всех фаз усталостного разрушения еще не завершено. В связи с этим, расчеты на долговечность и надежность следует считать приближенными, и носят вероятностный характер.

Список литературы

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.:Металлургия, 1975, 455 с.
2. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985, 229 с.

3. Панин В.Е., Елускова Т.Ф. Синергетика и усталостное разрушение металлов. М.: Наука, 1989. С.113-118.

4. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов, М.:Наука, 1992, 158 с.

5. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. 61 с.

6. Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г. Механические свойства металлических материалов при статическом нагружении: Учеб. пособие. – Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та. 1998. – 80 с.

7. ГОСТ 23.207–78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.

8. Горицкий В.М., Терентьев В.Ф. Структура и усталостное разрушение. М.: Металлургия, 1980. – 280 с.

9. Терентьев В.Ф. Предел выносливости металлов и сплавов. Журнал «Материаловедение и термическая обработка металлов», 2008. № 2 (632). С.47-55.

- 10.Гаф Г.Дж. Усталость металлов / Пер. с англ. М.-Л.:ОНТИ НКТП, Главная редакция литературы по черной металлургии, 1935. 304 с.

- 11.Терентьев В.Ф. Процессы микро- и макроскопической деформации металлических материалов ниже предела выносливости // металлы 2003. № 5. С. 73-80.

*Околович Геннадий Андреевич – д.т.н., профессор
Резниченко С. В.
Беленко Н. А.
Шульга К. А.
Гертер М. В.*

*ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»
(АлтГТУ), г. Барнаул, Россия*