

ЖЕСТКИЙ ЦИКЛ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Описаны опасность усталостного разрушения, механизм развития и трудности диагностики такого разрушения, а также особенности испытаний на усталость, преимущество испытаний при жестком циклическом нагружении и перспективы его применения.

Ключевые слова: жесткое циклическое нагружение, испытания на усталость, петля механического гистерезиса.

Среди механических свойств конструкционных металлических материалов важное место занимают усталостные характеристики, так как в подавляющем большинстве случаев для деталей машин основным видом нагружения являются повторные и знакопеременные нагрузки. При этом усталостное повреждение материалов в элементах конструкций в процессе эксплуатации может привести к снижению расчетного времени эксплуатации и выходу конструкции из строя. Отличительной особенностью усталостного разрушения является его внезапность и непредсказуемость вследствие локального разрушения материала в малом объеме. Поэтому возникает проблема определения момента начала накопления повреждений, когда еще возможно обратить процесс разрушения вспять, т. е. «вылечить» конструкцию.

Различают два вида усталости: многоцикловую и малоцикловую (рис. 1) [1–3]. Многоцикловая усталость – это усталость материала, при которой усталостное повреждение происходит в основном при упругом деформировании в макрообъеме материала и пластическом деформировании в отдельном наиболее повреждаемом микрообъеме материала, а малоцикловая усталость – это усталость материала, при которой усталостное повреждение происходит при упругопластическом деформировании в макрообъеме.

При малоцикловой усталости максимальная долговечность до разрушения составляет $\sim 5 \cdot 10^4$ циклов, при многоцикловой: 10^7 – 10^8 циклов. Основными параметрами циклов являются их форма (рис. 2), амплитуда напряжений или деформаций, коэффициент асимметрии цикла (рис. 3) и частота нагружения [1].

Процесс накопления усталостных повреждений делится на три стадии:

- накопление микроповреждений и распространение коротких трещин в структуре материала;
- развитие микротрещин в конструкции и их слияние в макротрещину;
- развитие макротрещины до критического размера, который приводит к остановке работы конструкции или ее разрушению.

При усталостном нагружении первоначально наблюдается изменение в приповерхностных областях материала, зарождаются микродефекты. При повышении плотности дефектов в процессе циклического деформирования их скопления приводят к зарождению субмикротрещин. В процессе циклического нагружения количество микротрещин увеличивается, постепенно они сливаются и образуют усталостную макротрещину, которая, вырастая до критического размера, приводит к разрушению материала.

Исследование остаточного ресурса работы конструкции на третьей стадии (развитие макротрещины), продолжительность которой составляет 15–20% [1] от общего жизненного цикла материала, осуществляется при наличии видимой трещины. Однако

на ресурс работы значительное влияние оказывают стадии первичного накопления усталостных повреждений и развития микротрещин [4], которые определяют величину остаточного ресурса конструкции и период эксплуатации с допустимым повреждением, и продолжительность которых составляет 80–85% [1] от общего жизненного цикла материала. На рис. 4 изображена энергетическая схема образования дефекта в материале. На участке 1–2 происходит увеличение энергии материала, что соответствует, например, его нагружению. По достижении некоторого критического значения энергии в объеме материала (точка 2) происходит ее «сброс» (участок 2–3), который может проявиться в виде образования новой поверхности (поры или другого дефекта), звуковой или электромагнитной волны и т. д. На участке 1–2 возможно возвращение к исходному состоянию материала (точка 1), например, путем восстановительной термообработки. После точки 3 к материалу продолжает подводиться энергия (продолжение нагружения) до нового «сброса». По такому изменению энергии можно судить о нарушениях сплошности материала, образовании пор и прочих дефектов.

Определение предела накопления усталостных повреждений и предсказание остаточного ресурса эксплуатации и ресурса эксплуатации с допустимым уровнем повреждений являются важными научными проблемами. Для решения этих проблем необходимо проведение испытаний на макроуровне, чтобы исследовать процесс зарождения и развития трещин. При исследовании изменений механических свойств в процессе циклического деформирования используют петлю механического гистерезиса, форма и площадь которой меняются в процессе нагружения (рис. 5) [1]. Это происходит в результате взаимодействия дефектов структуры, имеющихся в металле и возникающих в процессе циклической пластической деформации, а также процессов упрочнения или разупрочнения. Эти изменения структуры зависят от исходного структурного состояния материала и способа нагружения. Ниже предела выносливости петля механического гистерезиса чаще всего «не раскрывается» (см. 4 на рис. 5).

Испытания на малоцикловую усталость бывают двух типов: с жестким циклом нагружения (управление по деформации) и мягким циклом нагружения (управление по напряжению). При мягком циклическом нагружении входными параметрами являются: тип цикла (форма колебаний напряжений), частота цикла, коэффициент асимметрии напряжения, максимальное напряжение (см. рис. 2 и 3). В результате испытаний можно получить зависимость числа циклов до разрушения от величины максимального напряжения, но для удобства трактовки результатов их преобразовывают в кривую Велера (зависимость максимального напряжения разрушения от количества циклов). При жестком циклическом нагружении входными параметрами являются: тип цикла (форма колебаний деформации), частота цикла, коэффициент асимметрии деформации, максимальная деформация. В результате испытаний можно получить зависимость числа циклов до разрушения от величины максимальной деформации, но для удобства трактовки результатов их преобразовывают в кривую зависимости максимальной деформации от количества циклов.

Результаты могут быть представлены также в виде петли гистерезиса: испытание при жестком цикле нагружения (рис. 6). Видно, что для стали 14Г2 при постоянной деформации с увеличением числа циклов наблюдается падение напряжения, которое соответствует текущей несущей способности материала, т. е., если ввести в данную диаграмму третью координату (продолжительность или число циклов нагружения), то можно определить момент, в который в испытываемом материале зарождаются микродефекты, приводящие к падению прочности вследствие «разрыхления» материала.

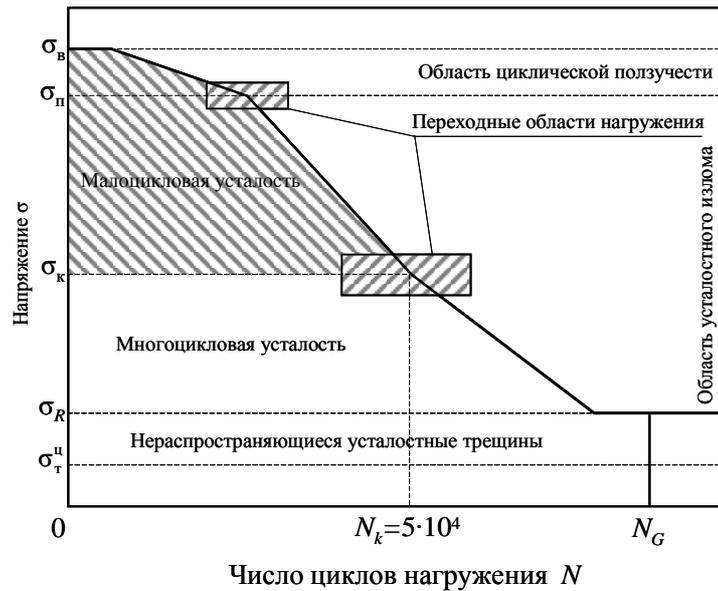


Рис. 1. Схема кривой усталости:

N_k – максимальная долговечность при разрушении при малоциклового усталости; N_G – базовое число циклов; σ_b – временное сопротивление (прочность, предел прочности) при растяжении; σ_p – напряжение перехода от одного вида разрушения к другому при малоциклового усталости; σ_k – пороговое циклическое напряжение; σ_R – напряжение предела выносливости; σ_t – циклический предел текучести

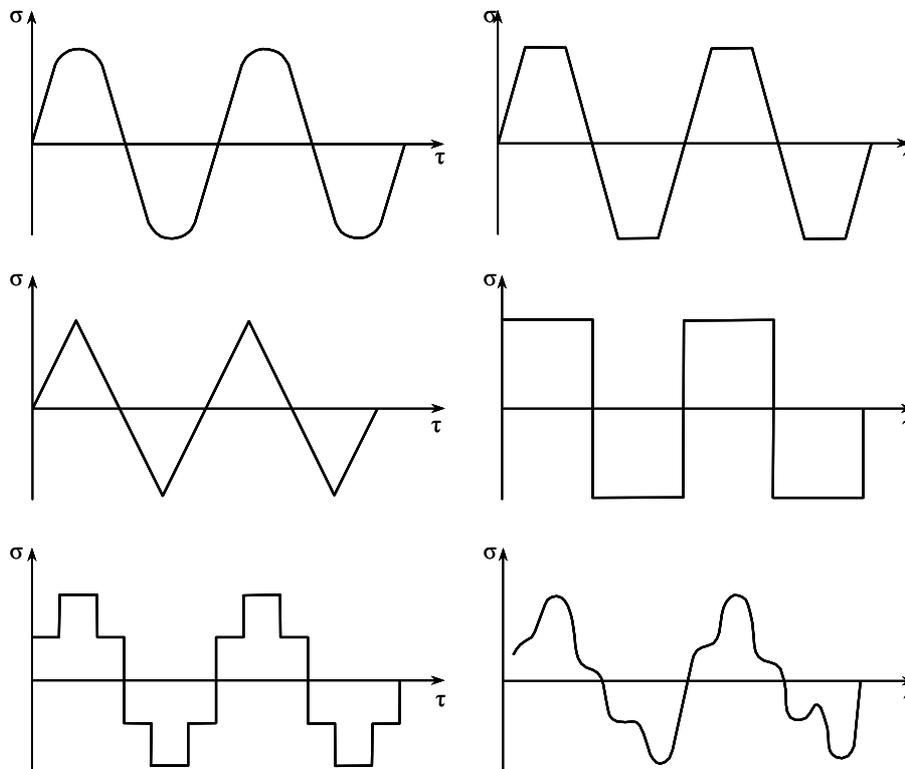


Рис. 2. Различные формы циклов напряжений:

σ – напряжение цикла; τ – продолжительность циклического нагружения

При мягком цикле нагружения о падении несущей способности можно судить лишь косвенно по виду петли деформирования. Сужение петли гистерезиса свидетельствует об упрочнении материала, а расширение – о разупрочнении.

Таким образом, при установлении момента начала образования микрповреждений (которые затем накапливаются и по достижении критического количества сливаются и образуют трещину) и природы образующихся дефектов возможно «вылечивание» материала, восстановление его исходной структуры при помощи термообработки.

Аналогичные сведения можно получить и при мягком цикле нагружения, однако по сравнению с жестким циклом он имеет ряд недостатков. Помимо вышеупомянутого косвенного получения результатов при мягком цикле (особенно при высоких частотах нагружения) при испытании большую сложность представляет получение петли гистерезиса, так как при высоких частотах увеличивается скорость деформирования и петля может не успеть раскрыться, поэтому для «снятия» петли гистерезиса и получения ее четкого изображения необходимо прервать испытание при высоких частотах и «снимать» данные при более низких частотах для того, чтобы снизить скорость деформирования и добиться раскрытия петли гистерезиса.

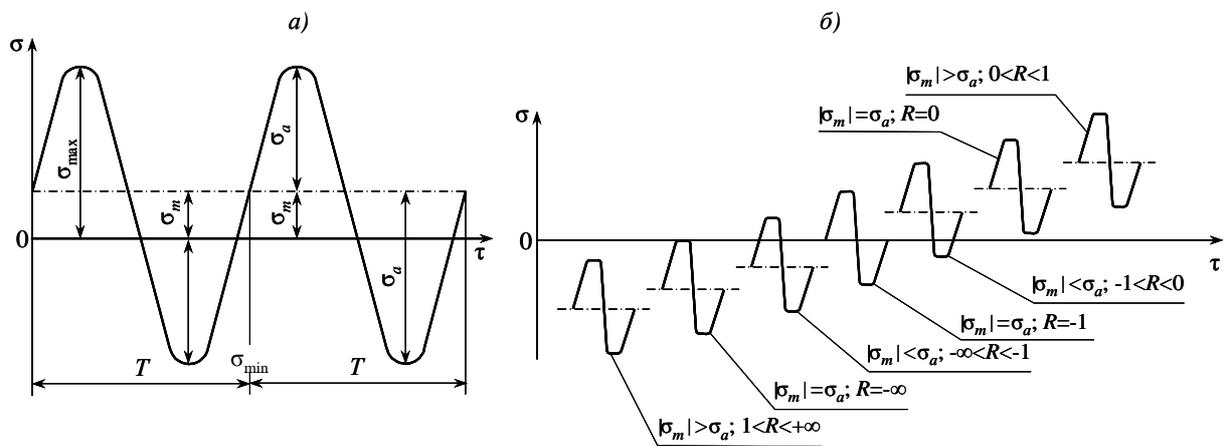


Рис. 3. Основные параметры цикла при усталостных испытаниях (σ – напряжение цикла; τ – продолжительность циклического нагружения; σ_a – амплитуда напряжений цикла; σ_m – среднее напряжение цикла; σ_{\min} , σ_{\max} – наименьшее и наибольшее напряжение цикла; T – период цикла):

a – схема напряжений; *б* – циклы напряжений и соответствующие им значения коэффициента асимметрии цикла R

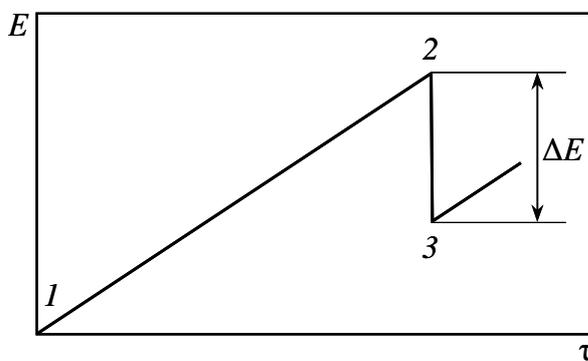


Рис. 4. Энергетическая схема образования дефекта (E – энергия, передаваемая материалу; τ – продолжительность подвода энергии к материалу; 1–2 – увеличение энергии материала; 2–3 – «сброс» энергии)

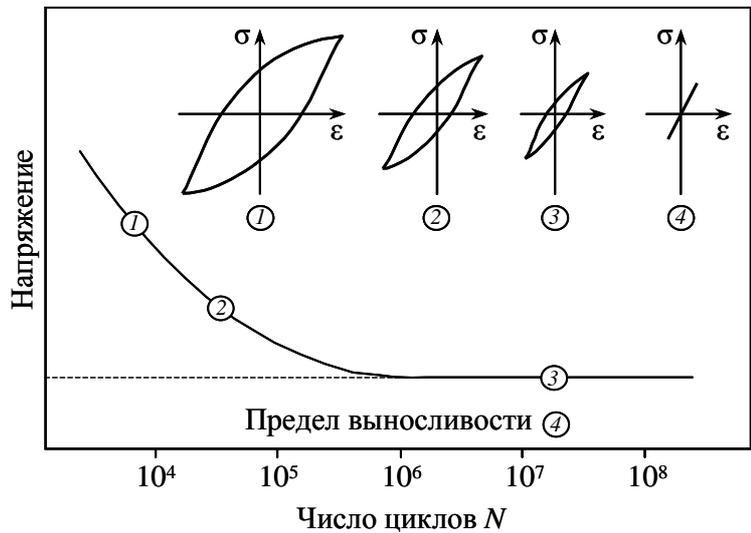


Рис. 5. Изменение параметров петли механического гистерезиса (1–4 – варианты «раскрытия» петли гистерезиса) в зависимости от уровня циклического напряжения σ (ϵ – деформация)

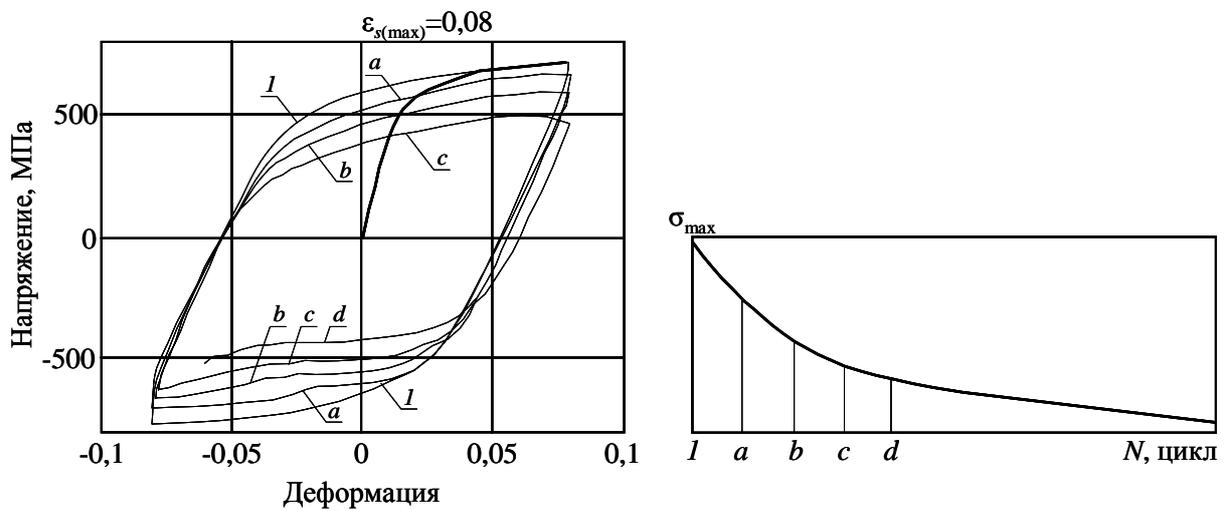


Рис. 6. Петля гистерезиса для стали 14Г2 при жестком цикле усталостного испытания ($\epsilon_{s(\max)}$ – максимальная полная (упругая+пластическая) амплитуда деформации) на стадии разупрочнения: 1 – первый цикл нагружения; a, b, c, d – последующие циклы нагружения ($1 < a < b < c < d$)

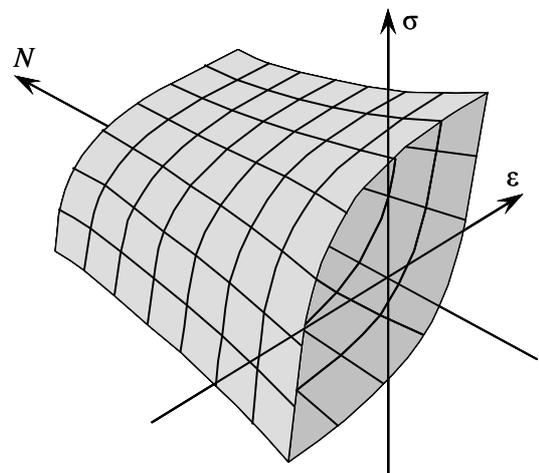


Рис. 7. Трехмерная модель (σ – напряжение; ϵ – деформация; N – количество циклов) представления результатов при испытании на усталость с жестким циклическим нагружением

Результаты испытаний на усталость при жестком цикле нагружения можно использовать в первую очередь при исследованиях и разработках для ранжирования материалов по способности сопротивляться усталости, для выбора ресурса эксплуатации, после которого материал при усталостном нагружении сохраняет способность к восстановлению исходных свойств, а также для получения информации по совершенствованию структуры и состава материалов при их эксплуатации в условиях усталостного нагружения. Результаты программ усталостных испытаний при жестком цикле нагружения могут быть использованы при выработке эмпирических зависимостей между параметрами цикла напряжения, полной деформации, пластической деформации и усталостной выносливостью согласно ASTM E 606-04. Эти зависимости можно использовать при сопоставлении кривых циклической деформации или напряжения с долговечностью или циклического напряжения с циклической пластической деформацией, полученных из петель гистерезиса за некоторый период времени. Исследование циклической кривой напряжение–деформация дает полезную информацию относительно циклической устойчивости материала, например, будут ли предел текучести и прочность, показатель упрочнения и модуль пластичности возрастать, падать или останутся неизменными, т. е. будет ли материал упрочняться, разупрочняться или находится в неизменном состоянии вследствие циклического пластического деформирования.

Представляет интерес также выявление взаимных зависимостей между жестким и мягким циклическим нагружением, так как при эксплуатации реальные конструкции подвержены постоянным нагрузкам, т. е. работают в условиях мягкого цикла. Установление закономерностей осуществляется путем проведения испытаний при мягком цикле и сравнении поведения материала при том же напряжении в жестком цикле, что позволит, используя все преимущества испытания при жестком цикле, перенести полученные результаты непосредственно на реальные конструкции.

Основным методом испытания на усталость является испытание образцов с концентратором напряжений, что, с одной стороны, позволяет приблизить испытания к условиям нагружения реальной конструкции, а с другой – исследовать только небольшой участок материала в районе концентратора, тогда как при жестком цикле нагружения можно исследовать поведение материала в большом объеме.

Петли гистерезиса, получаемые при испытании на усталость, с введением в диаграмму третьей координаты – количества циклов – дают возможность от плоских кривых перейти к трехмерным поверхностям, позволяющим получать полную информацию о зависимости изменения напряжения и/или деформации от количества циклов. Такое представление результатов является более наглядным, чем плоское изображение, и легко осуществимо при помощи современных технологий 3D-моделирования (рис. 7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
2. Терентьев В.Ф. Полная кривая усталости металлов и сплавов //Технология металлов. 2004. №6. С. 12–16.
3. Степнов М.Н., Чернышев С.Л., Ковалев И.Е., Зинин А.В. Характеристики сопротивления усталости. Расчетные методы оценки. М.: Технология машиностроения. 2010. 256 с.