

Д.О. Невайкин, И.А. Волков, А.С. Рукодельцев
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В МОДУЛЕ ARMWINSTRUCTURE3D

Если детали подвержены действию переменных нагрузок, то при определенных значениях переменных напряжений, возникающих внутри их объема, начинают протекать процессы зарождения и развития трещин, что, в конечном итоге, может привести к внезапному разрушению этих деталей. Зарождение трещин связано с накоплением повреждений, а их количество зависит от числа циклов нагружения детали. Вероятность появления трещины больше там, где выше уровень напряжений, и в этом смысле опасными являются как номинальные, так и местные напряжения.

Процесс зарождения трещины случаен и в сильной степени зависит от размеров зерен. Кроме того, причиной ее возникновения могут быть пластические деформации сдвига, появляющиеся в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах. Следы таких сдвигов можно наблюдать и при малом числе циклов нагружения. Они бывают заметными даже в деталях, отработавших лишь один процент времени от фактической долговечности. Опасным местом зарождения и роста трещины является также поверхностный слой, который из-за наличия шероховатостей и поверхностных напряжений сам является концентратором напряжений. Процесс пластического деформирования вблизи поверхности оказывается более легким, чем в толще материала. Этим можно объяснить тот факт, что почти все трещины, приводящие к разрушению, начинаются с поверхности. Ярким доказательством этого служит периодическая обработка поверхности с целью удаления дефектного слоя, которая приводит к значительному увеличению срока службы детали, работающей в условиях переменного нагружения.

Механизм разрушения детали определяется многими факторами: неоднородностью структуры материала, наличием дефектов кристаллической решетки, примесей, включений и т. п. Возникновение микроскопических трещин, чаще всего связанное с перемещением дислокаций на границу зерна и их объединением, начинается в наиболее напряженных зонах. С течением времени трещины группируются, образуя макроскопические структуры протяженностью $0,1 \div 0,5$ мм. Повреждения таких размеров, являясь дополнительными концентраторами, способны существенно изменить картину распределения напряжений, что значительно ускоряет процесс разрушения.

Скорость процесса роста трещины зависит также от температуры тела. Поскольку в процессе нагружения механическая система поглощает энергию, то ее температура при этом возрастает, что приводит к увеличению подвижности дислокаций и скорости роста трещин. Замедлить этот процесс можно с помощью теплоотвода.

Описанный выше тип разрушений является наиболее частой причиной поломки машин, однако именно он менее всего прогнозируем. Способность металла сопротивляться процессу накопления повреждений, вызванному переменным характером нагружения, называют выносливостью. В основе расчетов на выносливость лежат фундаментальные экспериментальные исследования поведения материалов в условиях их переменного нагружения.

В большинстве случаев смена режимов нагружения происходит периодически (циклически). Это приводит к возникновению таких же переменных напряжений. Для периодического нагружения важной характеристикой является цикл. Под циклом нагружения понимается совокупность переменных напряжений за время, равное одному периоду. За время цикла напряжения меняются в пределах, где $\sigma_{min} \leq \sigma \leq \sigma_{max}$, где

σ_{min} и σ_{max} наименьшее и наибольшее напряжения цикла. Для характеристики цикла можно использовать следующие параметры (рис. 1):

– среднее (постоянное) напряжение цикла

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}; \quad (1)$$

– амплитудное напряжение цикла

$$\sigma_{am} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}; \quad (2)$$

– коэффициент асимметрии

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}; \quad (3)$$

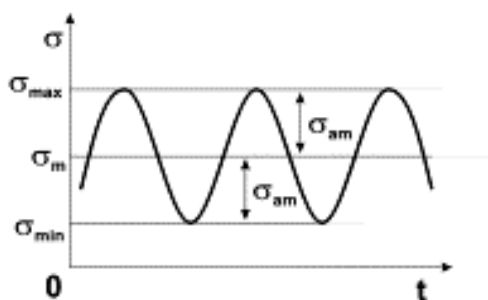


Рис. 1

Рассмотрим несколько важных с практической точки зрения характерных циклов:

– симметричный (рис. 2а) $\sigma_{am} = \sigma_{max} = -\sigma_{min}$, $\sigma_m = 0$, $R = -1$;

– асимметричный (рис. 2б) $abs(\sigma_{max}) \neq abs(\sigma_{min})$;

– пульсирующий положительный (рис. 2в) $\sigma_{min} = 0$, $\sigma_{am} = \sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2}$, $R = 0$;

– пульсирующий отрицательный (рис. 2г) $\sigma_{max} = 0$, $\sigma_{am} = -\sigma_m = -\frac{\sigma_{min}}{2}$, $R = -\pm\infty$;

– постоянный

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} = \sigma_m, \sigma_{am} = 0, R = 1. \quad (4)$$

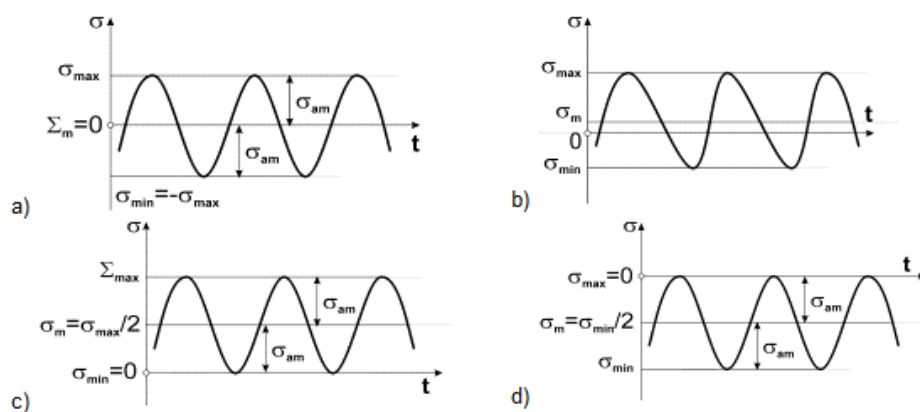


Рис. 2

На практике наиболее просто реализовать случай симметричного нагружения (рис. 2а). В этом смысле он является базовым и лежит в основе исследований на выносливость.

Экспериментально построенная кривая, определяющая зависимость допустимого напряжения σ от числа циклов нагружения N , называется кривой выносливости. Чаще всего она строится по результатам испытания цилиндрических образцов на изгиб при их вращении. Следует отметить, что число циклов до разрушения – непостоянная величина, а потому корректное построение кривой выносливости требует довольно большого числа испытаний с последующей статистической обработкой полученных значений. В качестве примера на рис. 3 приведена кривая, отражающая данные эксперимента для образцов из углеродистой стали в условиях симметричного нагружения.

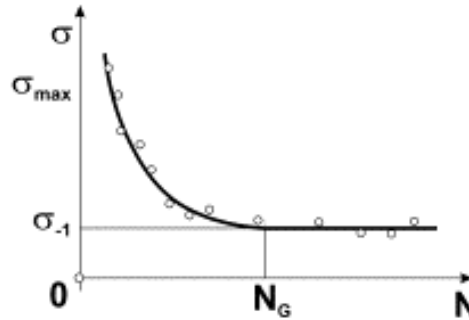


Рис. 3

Аналитическое уравнение этой кривой может быть записано в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma^m \cdot N &= const, & N \leq N_\sigma \\ \sigma &= \sigma_{-1} = const, & N > N_\sigma \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь m – показатель степени, зависящий от материала и термообработки. Если нет более достоверных сведений, то величину показателя степени m можно оценить с помощью формулы

$$m = 5 + \frac{\sigma_b}{80}, \quad (6)$$

где σ_b – предел прочности.

Как следует из рисунка, кривая выносливости делится на два участка. На первом степенная зависимость оказывается ярко выраженной, а на втором наблюдается асимптотическое стремление функции к пределу $\lim_{N \rightarrow \infty} \sigma = \sigma_{-1}$.

Уровень напряжений, соответствующий этому пределу и характеризующий усталостную прочность, называется пределом выносливости и обозначается σ_R , где нижний индекс равен коэффициенту асимметрии цикла. Так, в данном случае обозначение σ_{-1} говорит о том, что напряжение определяется для случая симметричного нагружения, для которого $R = -1$. Число циклов нагружения N_G , соответствующее границе перехода от первого участка ко второму, называется базовым числом циклов.

В области малых значений чисел циклов напряжения ограничены пределом прочности σ_b . Под малым значением чисел циклов следует понимать диапазон, для которого нет необходимости учитывать переменный характер режима нагружения. Область $10^2 < N < 10^3$ соответствует малоцикловой усталости. Числа циклов, принадле-

жащие диапазону $10^3 < N < \infty$, составляют область многоциклового усталости. Следует отметить, что режим нагружения с малым числом циклов $N = 10^2 \div 10^3$, на практике встречается редко и поэтому здесь не рассматривается. Все дальнейшие выводы относятся к области многоциклового усталости.

Параметры кривой выносливости определяются экспериментально, но для практического применения можно использовать приближенные зависимости, полученные с помощью обработки результатов огромного количества испытаний. Установлено, например, что предел усталостной прочности по нормальным изгибным напряжениям для сталей лежит в пределах $\sigma_{-1} = (0,4 \div 0,5) \sigma_b$, где σ_b – предел прочности материала. Более точная зависимость описывается выражением

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001\sigma_b) \sigma_b.$$

Предел прочности снижается, если кроме основных (номинальных) напряжений в образце возникают напряжения местного характера, превосходящие основной уровень (рис. 4). Местные напряжения появляются в областях резкого изменения конфигурации детали, которые называются концентраторами. В качестве концентраторов могут выступать галтели, канавки, отверстия, шпоночные пазы, шлицевые участки и т.д. Отметим, что разделение напряжений на номинальные и местные несколько условно. Современные численные методы расчета напряженно – деформированного состояния детали позволяют определить напряжения в любой точке, включая и местные напряжения, не разделяя их по признакам (рис. 5).

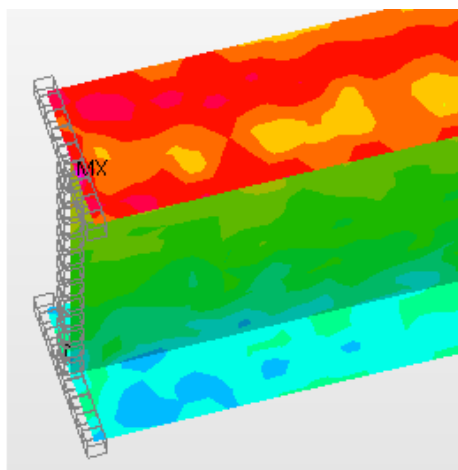


Рис. 4

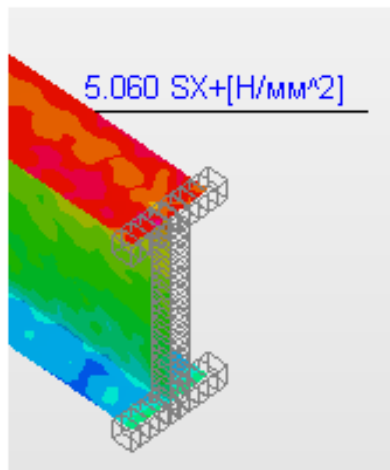


Рис. 5

Список литературы:

- [1] Снитко Н.К. Сопротивление материалов. Учебное пособие. Л., Изд-во Ленингр. ун-та., 1975. 368 с.
- [2] Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APMStructure3D. – М.: Издательство АПМ. 2006. – 288 с.