

3.2 Влияние концентрации напряжений на ресурс деталей

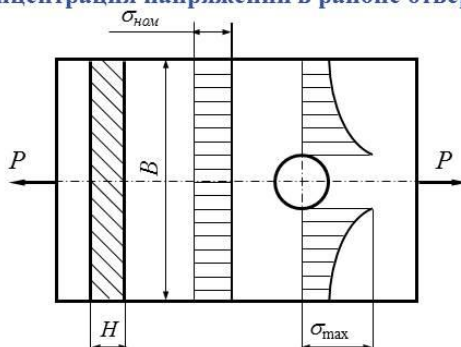
Как мы знаем, циклическая долговечность при переменных нагрузках зависит от их уровня. При постоянном сечении и равномерной нагрузке долговечность детали будет определяться способностью её поверхностного слоя сопротивляться возникновению и развитию усталостного повреждения. В этом случае при определенном уровне действующих напряжений вероятность усталостного разрушения будет одинакова для всех точек детали.

Однако на практике чаще встречаются случаи, когда в деталях приходится предусматривать различные концентраторы напряжений, например, отверстия, вырезы, выточки, галтели и так далее.

3.2 Влияние концентрации напряжений на ресурс деталей

Концентрация напряжений – локальное повышение напряжений по сравнению с номинальными напряжениями в местах изменения формы детали и в зонах контакта соприкасающихся деталей.

Концентрация напряжений в районе отверстия



α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений,

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{ном}}$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение;

$\sigma_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение.

При растяжении/сжатии $\sigma_{\text{ном}} = P / F$ ($F = BH$).

Под **концентрацией напряжений** понимают *локальное их повышение по сравнению с номинальными напряжениями в местах изменения формы детали и в зонах контакта соприкасающихся деталей.*

Концентрацию напряжений можно оценить **теоретическим коэффициентом концентрации**, равным отношению максимального местного напряжения к номинальному напряжению, которое определяют по формулам сопротивления материалов в предположении отсутствия концентрации. Так, в случае растяжения/сжатия номинальное напряжение равно отношению действующей на деталь силы к площади поперечного сечения.

3.2 Влияние концентрации напряжений на ресурс деталей

При определении α_σ материал предполагают упругим. В реальных металлах в зоне концентрации напряжений может возникнуть местная текучесть, которая приведет к срезанию «пика» напряжений.

K_σ – **эффективный коэффициент концентрации напряжений**,

$$K_\sigma = \sigma_{-1} / \sigma_{-1k} = (0,7 \dots 0,9) \alpha_\sigma$$

где σ_{-1} , σ_{-1k} – пределы выносливости образцов без концентрации и с концентрацией напряжений соответственно.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений зависит от материала, напряженного состояния, вида нагружения, базы испытаний, внешней среды, состояния поверхностного слоя.

Производственные или эксплуатационные воздействия можно представить в качестве эффективных концентраторов напряжений.

Технологическая концентрация напряжений – совокупность факторов, появляющихся в процессе обработки деталей и изменяющих их сопротивление зарождению и развитию усталостного повреждения.

Особенности технологических концентраторов напряжений

- могут, как снижать, так и повышать сопротивление усталости
- носят случайный характер
- проявляются в поверхностном слое детали
- не учитываются при расчетах на выносливость

Очевидно, что теоретический коэффициент концентрации напряжений всегда больше единицы. Он зависит только от геометрии детали и вида нагружения, и не зависит от свойств материала, который предполагают упругим, однородным, сплошным и изотропным. Реальные же металлы неоднородны по своему строению и наряду с упругими обладают пластическими свойствами.

Вследствие этого в зоне концентрации может возникнуть местная текучесть, которая приведет к срезанию «пика» напряжений и более равномерному их распределению.

В связи с этим фактическое снижение предела выносливости детали принято оценивать **эффективным коэффициентом концентрации напряжений**, который представляет собой отношение пределов выносливости гладких образцов и образцов с концентрацией.

В связи с локальной пластической деформацией эффективный коэффициент меньше теоретического на 10-30 %. Он физически не характеризует концентрацию напряжений, но позволяет оценить конструкцию при работе на усталость.

Кроме геометрии концентратора эффективный коэффициент зависит от целого ряда факторов: марки материала, напряженного состояния, вида нагружения, базы испытаний, влияния внешней среды и состояния поверхностного слоя.

При этом следует отметить, что эффективная концентрация напряжений может проявляться в конструкции и в отсутствии геометрической концентрации, это видно из приведенных ранее примеров влияния условий производства на ресурс.

Таким образом, *производственные или эксплуатационные воздействия можно представить в качестве эффективных концентраторов напряжений* и ввести понятие **технологической концентрации напряжений** как совокупности факторов, появляющихся в процессе обработки деталей и изменяющих их сопротивление зарождению и развитию усталостного повреждения.

Рассмотрим основные особенности технологических концентраторов напряжений.

Во-первых, в отличие от конструктивных технологические концентраторы могут, как снижать, так и повышать сопротивление усталости, т.е. эффективный коэффициент концентрации напряжений технологического происхождения может быть как больше, так и меньше единицы.

Во-вторых, появление технологических концентраторов и их влияние на выносливость конструкции часто носит случайный характер т.к. может быть следствием низкой стабильности технологии.

В-третьих, в большинстве случаев, технологические концентраторы проявляются в поверхностном слое детали.

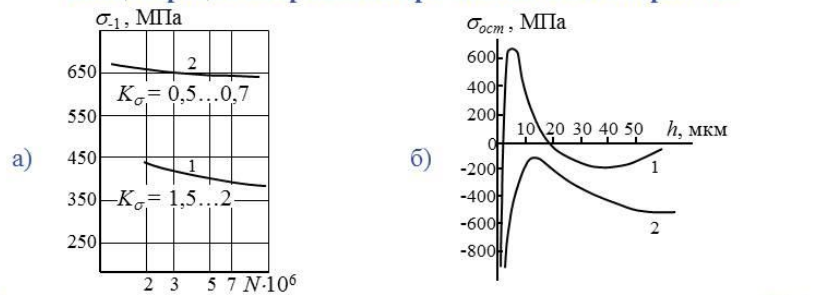
И, в-четвертых, влияние этих концентраторов не всегда возможно учесть при расчетах на выносливость.

Эксплуатационные концентраторы напряжений обладают теми же особенностями, что и технологические, за исключением первого, т.е. соответствующие эффективные коэффициенты не могут быть меньше единицы, т.к. в данном случае возможно только снижение сопротивления усталости.

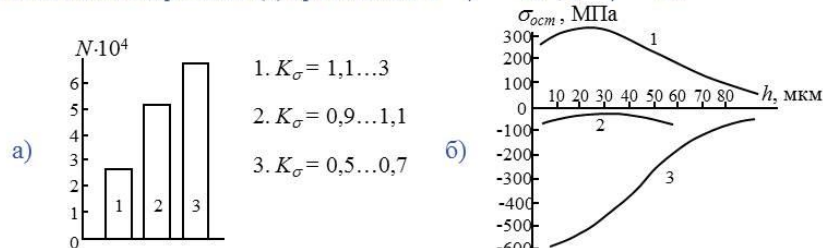
Значение эффективного коэффициента технологической концентрации напряжений определяется изменением предела выносливости образцов, обработанным тем или иным способом, по отношению к образцам со стандартной обработкой. Обычно такая обработка завершается механической полировкой.

3.2 Влияние концентрации напряжений на ресурс деталей

Концентрация напряжений при механической обработке



Влияние переднего угла резца на предел выносливости высокопрочных сталей (а) и остаточные напряжения (б) при точении: 1 – $\gamma = -10^\circ$; 2 – $\gamma = +10^\circ$



Влияние вида обработки на долговечность (а) и остаточные напряжения (б) при шлифовании сплошным (1) и прерывистым кругом (2), чистовом точении (3)

Рассмотрим основные технологические процессы изготовления деталей с точки зрения создаваемой концентрации напряжений и влияния на выносливость.

Механическая обработка формирует поверхностный слой детали, если является окончательной операцией. В данном случае состояние поверхностного слоя будет зависеть от геометрии инструмента, а также режимов и условий обработки.

На рисунке мы видим, что изменение переднего угла резца при точении может оказывать существенное влияние на выносливость стальных образцов.

Очевидно, это связано с увеличением трения и, как следствие, влияния температурного фактора при точении резцом с положительным передним углом. При таких условиях обработки в поверхностном слое возникают растягивающие остаточные напряжения, что снижает предел выносливости. Эффективный коэффициент концентрации напряжений в данном случае может составлять от 1,5 до 2.

В то же время, обработка с отрицательными передними углами создает остаточные напряжения сжатия и повышает выносливость.

Другой пример иллюстрирует влияние вида обработки на долговечность стальных образцов при изгибе с вращением. Видно, что долговечность в первую очередь определяется величиной и знаком остаточных напряжений.

Эти напряжения являются растягивающими при шлифовании жесткими кругами, близкими к нулю при использовании прерывистых кругов и сжимающими при чистовом точении. Чистовое точение в данном случае повышает долговечность в сравнении со шлифованием в 2...4 раза.

3.2 Влияние концентрации напряжений на ресурс деталей

Концентрация напряжений при механической обработке

При шлифовании стальных деталей значение эффективного коэффициента концентрации напряжений достигает $K_{\sigma} = 3$; титановых сплавов – $K_{\sigma} = 4$. Процессы лезвийной обработки, шлифование прерывистыми кругами, хонингование и т.п. могут как уменьшать, так и увеличивать K_{σ} . Дефекты, возникающие при обработке (риски, подрезы и т.д.) могут существенно влиять на сопротивление усталости и провоцировать коррозионные поражения.

Концентрация напряжений при размерной химической и электрохимической обработке

Значение эффективного коэффициента концентрации напряжений составляет $K_{\sigma} = 1,04...1,3$. При обработке не вносятся остаточные напряжения. Повышение шероховатости существенно не влияет на выносливость т.к. неровности обладают плавными переходами. Дефекты точечного типа или растравливание границ зерен металла могут значительно снизить сопротивление усталости.

Как видно из этого примера, шлифование является наиболее проблемным процессом с точки зрения создания технологической концентрации напряжений.

При обработке стальных деталей шлифование вводит эффективный коэффициент концентрации напряжений, достигающий трех. Еще большее значение данного коэффициента (до четырех) характерно для титановых сплавов. Это объясняется преобладающим влиянием температурного фактора в создании остаточных напряжений в связи с низкой теплопроводностью данных сплавов. После шлифования остаточные напряжения растяжения здесь могут достигать 600 МПа.

Таким образом, процессы механической обработки лезвийным инструментом, а также ряд видов абразивной обработки, таких как шлифование прерывистыми и высокопористыми кругами, хонингование, и полирование могут, как уменьшать, так и увеличивать эффективный коэффициент концентрации напряжений, но достаточно в небольших пределах.

В то же время риски, подрезы и другие дефекты при механической обработке, особенно при ручной зачистке и припиловке не поддаются строгому учету и могут существенно влиять на сопротивление усталости. К тому же, они могут провоцировать коррозию, создающую дополнительную концентрацию напряжений. Поэтому такие дефекты обязательно должны устраняться, поскольку могут вызвать преждевременное усталостное разрушение.

Размерная химическая и электрохимическая обработка, в основном снижает выносливость деталей.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений в данном случае может принимать значения от единицы до 1,3. Размерное химическое травление обычно повышает шероховатость, однако в этом процессе не вносятся какие-либо напряжения, а неровности поверхности обладают плавными переходами. Поэтому влияние шероховатости в данном случае незначительно. Однако дефекты точечного типа от пробоев защитного покрытия при избирательном травлении или растравливание границ зерен металла могут в значительной степени снизить выносливость.

3.2 Влияние концентрации напряжений на ресурс деталей

Концентрация напряжений при формообразовании и правке

В данных процессах возникает неравномерное поле остаточных напряжений. При гибке деталей с ребрами $\sigma_{ост} \sim 0,75\sigma_{0,2}$, что снижает выносливость. $K_{\sigma} \sim 3$. Для снижения негативного влияния применяют гибку с перегибом и искусственное старение.

Концентрация напряжений в твердых покрытиях

При хромировании высокопрочных сталей $K_{\sigma} = 1,3...1,5$ в малоцикло-вой, $K_{\sigma} \sim 2,5$ в многоцикловой области. При анодировании алюминиевых сплавов $K_{\sigma} = 1,5...3,1$. При хромировании этих сплавов $K_{\sigma} = 0,8$. Твердые покрытия имеют более низкую сопротивляемость растяжению. В них раньше возникают трещины, распространяющиеся в основной металл. Если прочностные свойства таких покрытий выше чем у материала деталей выносливость повышается.

Концентрация напряжений в мягких покрытиях

Плакирование алюминиевых сплавов и обезуглероживание сталей снижают долговечность в многоцикловой области $K_{\sigma} \sim 2,5$. Мягкие слои имеют хорошее сцепление с основным металлом, их прочность ниже, а пластичность выше. Усталостные трещины возникают в поверхностном слое и распространяются вглубь. При высоких напряжениях влияние мягких слоев практически отсутствует в связи с релаксацией напряжений при пластической деформации.

В таких процессах, как **формообразование и правка**, выполняемых методами холодной гибки, возникает неравномерное поле остаточных напряжений.

Влияние данных напряжений на выносливость может быть существенным и, как правило, приводит к её снижению.

Особенно это характерно для подкрепленных ребрами деталей, при гибке которых на вершинах ребер могут образоваться значительные остаточные растягивающие напряжения с созданием эффективного коэффициента концентрации, близкого к трем.

При разработке технологии формообразования деталей методами гибки следует принимать меры, направленные на минимизацию растягивающих остаточных напряжений.

Известен такой прием, как гибка с перегибом, которая выполняется в два перехода: на первом получают прогиб на 30-50 % превышающий требуемое значение, а на втором выполняют гибку в противоположную сторону до требуемой кривизны.

Этот прием дает возможность снизить растягивающие остаточные напряжения, и даже поменять их знак на сжимающие, что повышает сопротивление усталости.

Для стабилизации напряженного состояния деталей после гибки также применяют искусственное старение с фиксацией деталей в полученном контуре. Это позволяет снизить нежелательные остаточные напряжения примерно на 40 %.

Твердые хрупкие пленки и диффузионные слои, появляющиеся в результате нанесения покрытий хромированием, анодированием и т.д., а также при термической и химико-термической обработке могут, как повышать, так и снижать сопротивление усталости.

Так, хромирование высокопрочных сталей вызывает появление эффективного коэффициента концентрации напряжений в малоцикловой области, достигающего 1,5.

В области многоцикловой усталости, т.е. при значительных нагрузках данный коэффициент уже близок к 2,5.

В случае анодирования алюминиевых сплавов значение эффективного коэффициента концентрации напряжений доходит до трех и более.

Это связано с тем, что твердые покрытия в силу особенностей своего строения могут иметь более низкое сопротивление растягивающим нагрузкам, чем основной металл.

Поэтому в них при определенном уровне нагружения уже на начальных циклах возникают трещины, перпендикулярные направлению нагрузки. При увеличении нагрузки эти трещины распространяются в основной материал, снижая сопротивление усталости.

В то же время, если прочностные свойства покрытий выше, чем у материала деталей, они могут повысить выносливость.

Так, хромирование алюминиевых сплавов снижает эффективный коэффициент концентрации до 0,8.

На сопротивление усталости влияют также и **мягкие поверхностные слои**. Они, создаются при плакировании алюминиевых сплавов, т.е. при нанесении слоя чистого алюминия в процессе прокатывания листов, а также при обезуглероживании поверхности стальных деталей,

которое является следствием химического взаимодействия углерода с атмосферой при нагреве.

Эти слои снижают долговечность в области многоциклового усталости на порядок и более и вводят эффективный коэффициент концентрации напряжений, достигающий до 2,5. В области же малоциклового усталости данный коэффициент близок к единице.

Это объясняется тем, что мягкие слои имеют хорошее сцепление с основным металлом, их прочность значительно ниже, а пластичность в несколько раз выше. Поэтому влияние данных слоев проявляется при малых амплитудах напряжений. Усталостные трещины возникают в менее прочном поверхностном слое и в связи с его хорошим сцеплением с основным металлом распространяются вглубь, что снижает сопротивление усталости.

При высоких напряжениях влияние мягких слоев практически отсутствует в связи с тем, что их более ранняя пластическая деформация приводит к релаксации напряжений.