

Компьютерные технологии:
прикладные пакеты

Частотный анализ

Устойчивость

Усталость

Оглавление

| | |
|--|----|
| 1. Частотный анализ..... | 2 |
| 1.1 Частотный анализ камертона | 4 |
| 2. Устойчивость | 7 |
| 2.1 Задача Эйлера | 7 |
| 3. Усталость | 12 |
| 3.1 Кривая нагружения S-N..... | 13 |
| 3.2 Растяжение пластины с отверстием | 15 |

1. Частотный анализ

Собственная частота конструкции (natural frequency) – частота свободных колебаний конструкции (периодические или затухающие), зависящие только от физических характеристик этой конструкции (массы, жесткости и коэффициенты демпфирования).

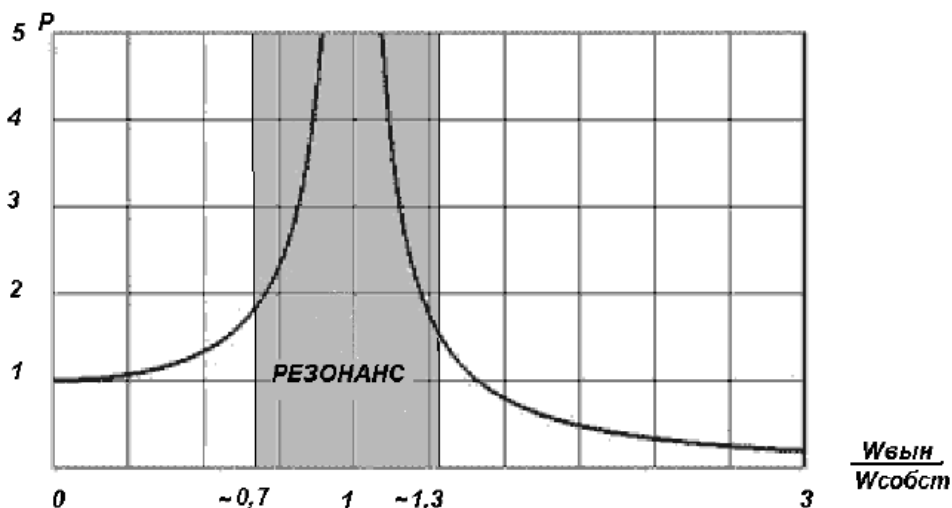
Модуль частотного анализа предназначен для расчёта собственных (резонансных) частот колебаний конструкций и соответствующих им форм колебаний. Задача расчёта собственных частот и соответствующих им форм колебаний возникает во многих практических случаях анализа динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок. Наиболее распространена ситуация, когда при проектировании возникает необходимость убедиться в малой вероятности возникновения в условиях эксплуатации такого механического явления, как резонанс. Как известно, суть резонанса заключается в значительном (в десятки раз и более) усилении амплитуд вынужденных колебаний на определённых частотах внешних воздействий (резонансных частотах). В большинстве случаев возникновение резонанса является нежелательным явлением с точки зрения обеспечения надёжности изделия. Проверка спектральных свойств конструкции на возможность резонансов в рабочем диапазоне частот внешних воздействий на стадии проектирования позволяет внести в конструкцию изменения, способные изменить спектр собственных частот. Это позволит избежать или значительно уменьшить вероятность появления резонансов в процессе эксплуатации. Таким образом, условие виброустойчивости по критерию собственных частот может быть сформулировано так:

Собственные частоты конструкции должны лежать за пределами диапазона частот внешних воздействий:

$$f_i \notin [0,7f_{min}^{возд}; 1,3f_{min}^{возд}]$$

где f_i – i -я собственная частота конструкции. Обычно, наибольшую опасность представляют резонансы на нижних собственных частотах ($i \lesssim 5$), так как именно на них аккумулируются большая часть механической энергии;

$f_{min}^{возд}; 1,3f_{min}^{возд}$ – нижняя и верхняя частоты известного диапазона внешних вибрационных воздействий.



Изменение коэффициента усиления амплитуд в зависимости от отношения частоты собственных колебаний и внешнего воздействия в системе с недостаточным демпфированием

Оценив спектр собственных частот колебаний конструкции на стадии проектирования, можно оптимизировать конструкцию с целью достижения условия частотной виброустойчивости. Для увеличения собственных частот необходимо придать конструкции больше жёсткости и (или) уменьшить её массу. Например, для протяжённого объекта можно повысить жесткость, уменьшив длину или увеличив толщину объекта. Для уменьшения собственной частоты изделия необходимо, напротив, прибавить массу или уменьшить жёсткость объекта.

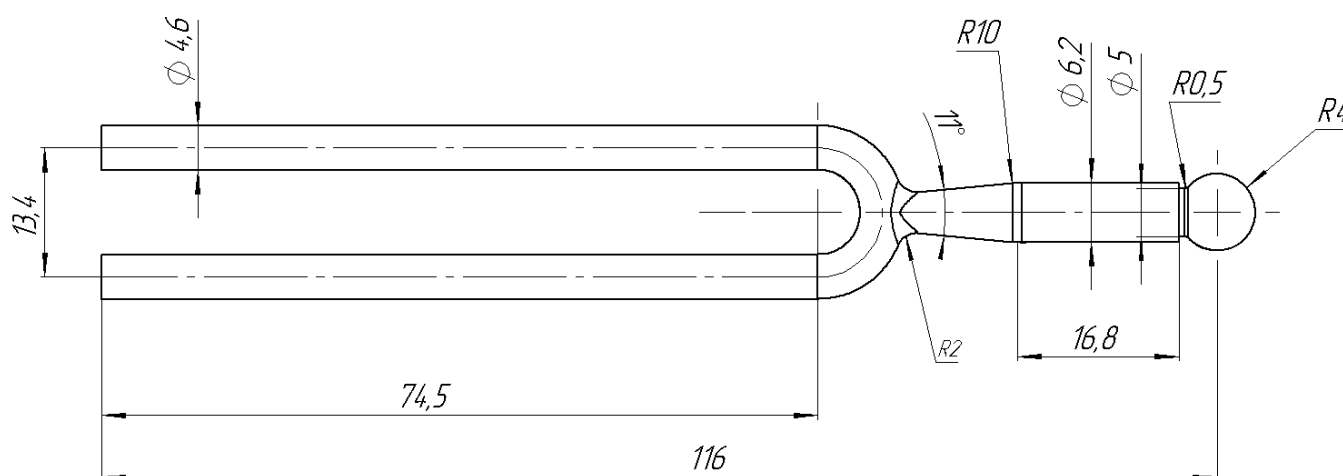
Таким образом, осуществляя с помощью модуля частотного анализа расчёт резонансных частот конструкции на этапе проектирования и оптимизируя массо-жесткостные свойства изделия, пользователь может повысить надёжность разрабатываемой конструкции с точки зрения её виброустойчивости и вибропрочности.

Влияние нагрузок на частотный анализ

Нагрузки влияют на модальные характеристики тела. В общем, сжимающие нагрузки снижают резонансные частоты, а нагрузки растяжения увеличивают. Настоящее обстоятельство легко показать посредством изменения натяжения струны скрипки. Больше натяжение, более высокая частота (тон).

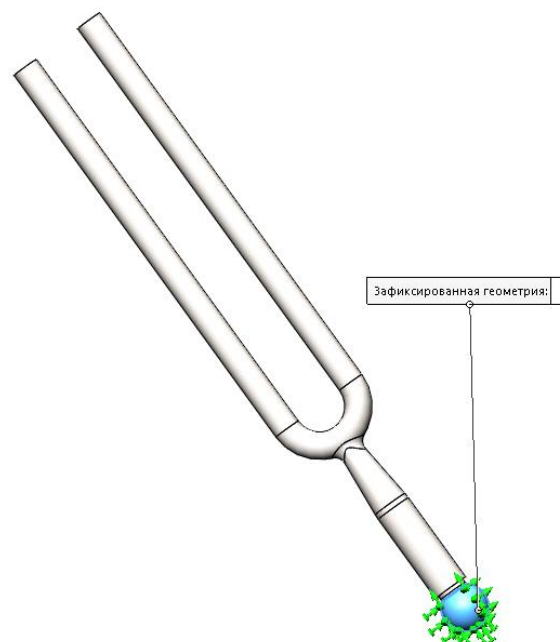
1.1 Частотный анализ камертона

Смоделируйте геометрию **Камертона**, в качестве материала задайте **AISI 304**:

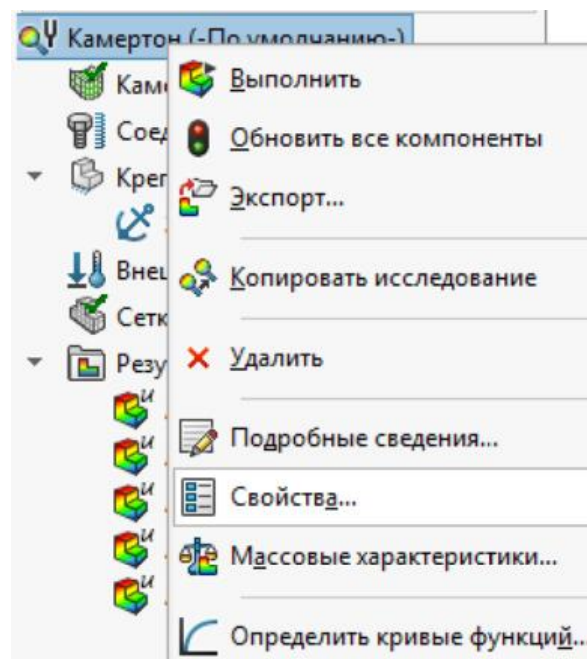


- Теперь перейдите во вкладку Simulation и создайте новое исследование **Частота**.
- Задайте Крепление: **Фиксированная геометрия**, имитирующая фиксацию пальцев руки.
- Задайте стандартную сетку.
- Запустите исследование.
- Просмотрите анимацию всех мод.

Как известно, настроенный инструмент камертон издаёт звук ля 1-ой октавы частотой 440 Гц.



- Теперь перейдите во вкладку Simulation и создайте новое исследование **Частота**.
- В **Дереве исследования** щёлкните правой клавишей по названию исследования и зайдите в свойства анализа.
- Измените количество частот до **10**.
Остальные параметры оставьте по умолчанию.



Частотный

Параметры Эффекты потока/Тепловые эффекты Замечание

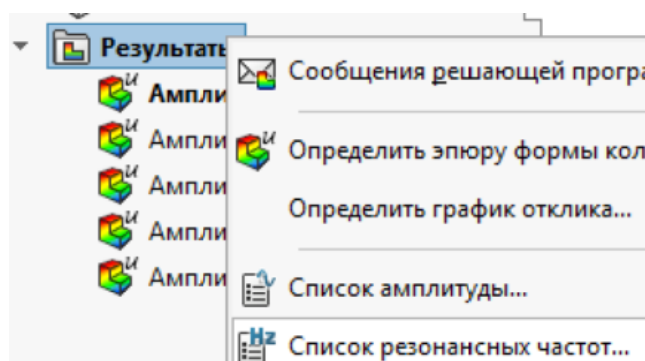
Параметры

☒ Количество частот:

☐ Расчет частот, ближайших к: Герц
(Частотный переход)

☐ Верхний предел частоты: Герц

- Задайте стандартную сетку.
- Запустите исследование.
- Откройте Список резонансных частот



Список режимов

Название исследования: Камертон

| Режим No. | Частотный(Рад/сек) | Частотный(Герц) | Период(Секунды) |
|-----------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0 | 0 | 1e+032 |
| 2 | 0.011827 | 0.0018823 | 531.26 |
| 3 | 0.024062 | 0.0038296 | 261.12 |
| 4 | 0.028355 | 0.0045129 | 221.59 |
| 5 | 0.037167 | 0.0059153 | 169.05 |
| 6 | 0.04248 | 0.0067608 | 147.91 |
| 7 | 2779.1 | 442.3 | 0.0022609 |
| 8 | 4148.9 | 660.33 | 0.0015144 |
| 9 | 8116.1 | 1291.7 | 0.00077416 |
| 10 | 8133.2 | 1294.4 | 0.00077254 |

Заккрыть Сохранить Справка

Однако, колебания на частоте 440 Гц является 4-ой модой, хотя ожидалось, что она будет 1-ой. Перед тем как дать объяснение, сделаем ещё один анализ, но на этот раз без закрепления.

Создайте ещё один анализ. Проще всего будет скопировать существующий анализ и погасить в нём закрепление. Также в свойствах анализа задайте исследование первых 10 колебаний.

После запуска анализа, в таблице частот первые шесть мод имеют частоты колебания около 0 Гц. С чем это связано? Так как камертон не зафиксирован, то он обладает 6-ью степенями свободы: тремя поступательными и тремя вращательными. Таким образом, модуль Simulation определил эти моды как степени свободы и присвоил им частоту колебания 0 Гц. Первая же мода упругих колебаний, отвечающая за моду упругих деформаций, является 7-ой и имеет частоту 440 Гц. Она является основной модой для камертона.

Почему же тогда же частотный анализ с закреплением не показал в качестве первой моды, моду с частотой 440 Гц? На самом деле, первые три моды анализа с закреплением могут существовать лишь при создании условия жёсткого закрепления камертона. В случае упругого закрепления, первые три моды очень быстро затухли бы.

Создайте ещё третий анализ, в котором будет существовать закрепление и сжимающая/растягивающая нагрузка на рога камертона. Что происходит с частотами и дайте этому объяснение? Нагрузки влияют на модальные характеристики тела. В общем, сжимающие нагрузки снижают резонансные частоты, а нагрузки растяжения увеличивают. Настоящее обстоятельство легко показать посредством изменения натяжения струны скрипки. Больше натяжение, более высокая частота (тон).

2. Устойчивость

Под устойчивостью мы интуитивно понимаем свойство системы сохранять своё состояние при внешних воздействиях. Если система таким свойством не обладает, она называется неустойчивой. В равной мере можно сказать, что неустойчивым является её состояние.

В реальных условиях всегда существуют какие-то причины, по которым может произойти отклонение от исходного равновесного состояния. Следовательно, возможность перехода к новому состоянию в неустойчивой системе всегда реализуется. В этом случае говорят, что произошла *потеря устойчивости*.

Система при потере устойчивости может вести себя по-разному. Обычно происходит переход к некоторому новому положению равновесия, что в подавляющем большинстве случаев сопровождается большими перемещениями, возникновением пластических деформаций или полным разрушением.

Явление потери устойчивости для упругих тел можно наблюдать на целом ряде примеров.

Наиболее простым случаем является потеря устойчивости сжатого стержня. При достаточно большой силе стержень не может сохранить прямолинейную форму и неминуемо изогнётся. Произойдёт потеря устойчивости.

Одной из мер повышения запаса устойчивости системы является увеличение её жесткости.

Для анализа устойчивости необходимо выбрать расчётную схему.

2.1 Задача Эйлера

Рассмотрим задачу на устойчивость упругих систем. Простейшей задачей является исследование устойчивости сжатого стержня. Впервые эта задача была поставлена и решена великим математиком Л. Эйлером в середине XVIII века. Поэтому часто, когда говорят об устойчивости сжатого стержня употребляют выражения: «задача Эйлера» или «устойчивость стержня по Эйлеру».

Положим, что по какой-то причине сжатый стержень несколько изогнулся. Рассмотрим условия, при которых возможно равновесие стержня с изогнутой осью.

Изгиб стержня происходит в плоскости минимальной жёсткости, и поэтому под величиной J понимается минимальный момент инерции сечения.

Для того чтобы стержень сохранял криволинейную форму, необходимо, чтобы сила P принимала определённое значение. Наименьшая сила P , отличная от нуля будет при $n = 1$

$P_{кр} = \frac{n^2 \pi^2 EJ}{l^2}$ — эта сила носит название эйлеровой силы. Она же — критическая.

У сжатого стержня существуют высшие формы равновесия ($n = 2, 3, \dots$), которым соответствуют и большие значения сил. Эти формы в чистом виде не реализуются. Они неустойчивы. Но если стержень снабдить промежуточными равноотстоящими друг от друга опорами, то соответственно числу пролётов n и определяется и критическая сила.

$E = 210$ ГПа (Простая углеродистая сталь)

$a = 50$ mm

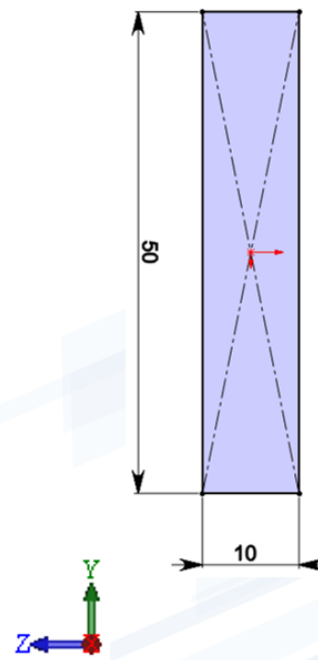
$b = 10$ mm

$L = 5500$ mm

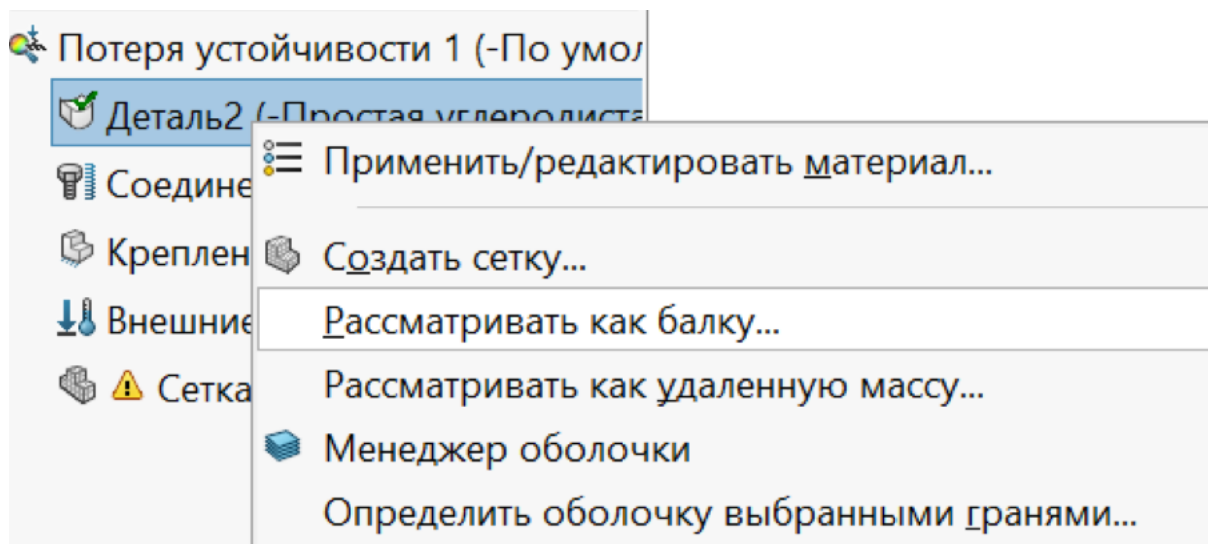
$F = 14000$ N

$$P = \frac{\pi^2 EJ_{y,z}}{L^2} \text{ — Эйлерова сила (критическая)}$$

$$P = F \cdot k_{x,y}, \text{ где } k_{x,y} \text{ — коэффициент нагрузки}$$



Как видно из исходных данных длина стержня значительно превышает размеры сечения. В связи с этим, стоит ввести упрощение для корректного расчёта. Для этого будем рассматривать стержень как балочную конструкцию:



Настройки по креплению и приложению силы смотрите далее.

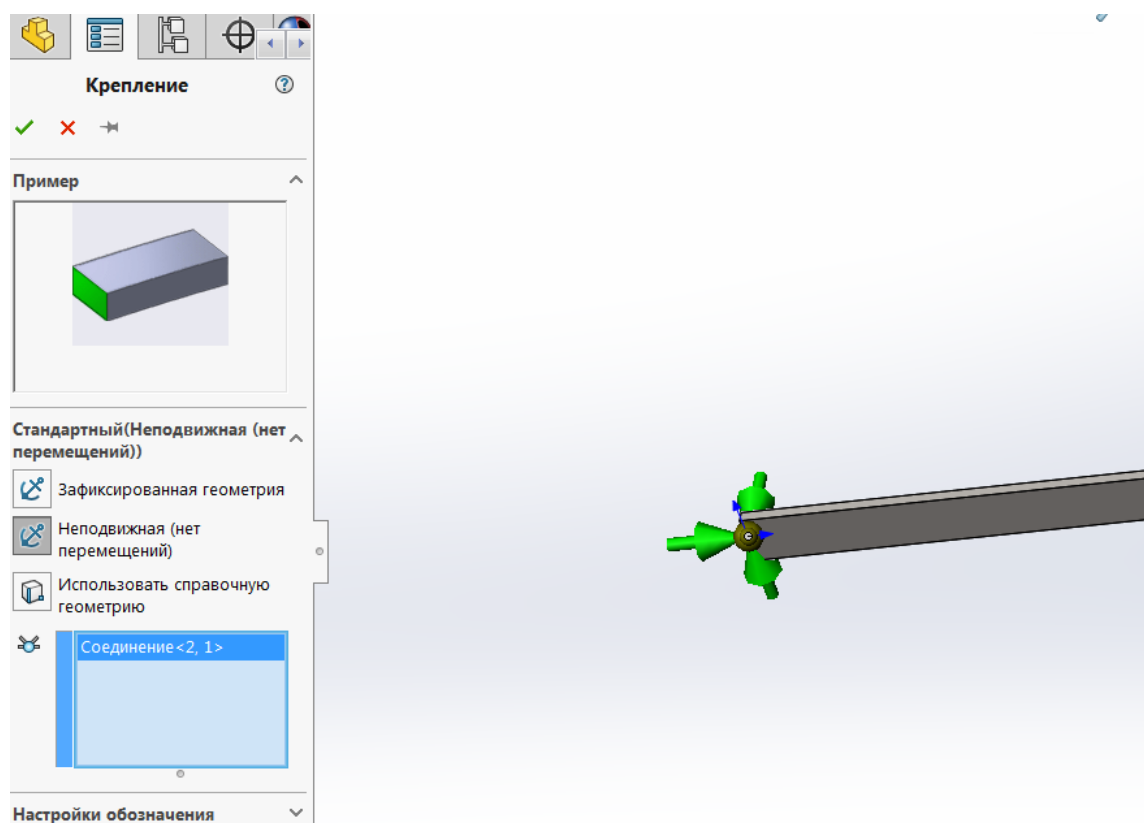


Рисунок 1. Зафиксированное основание по всем направлениям

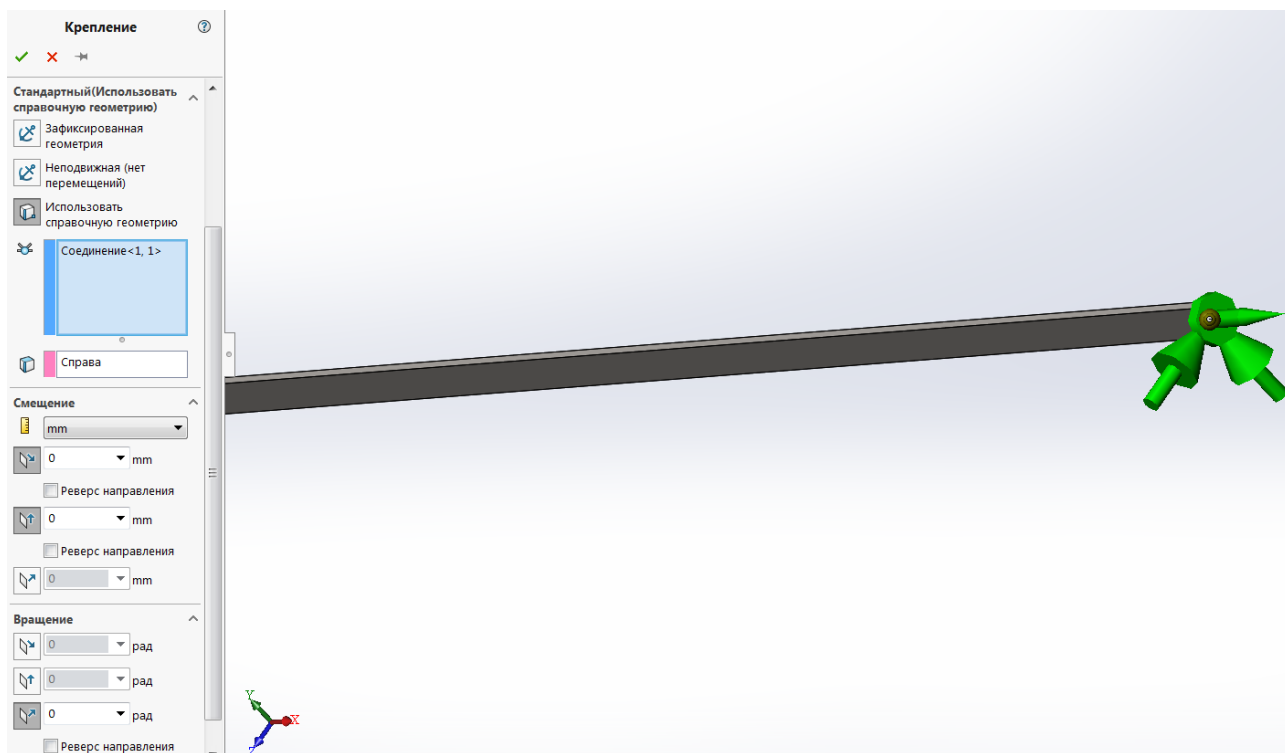


Рисунок 2. Зафиксированный конец стержня вдоль осей Y и X

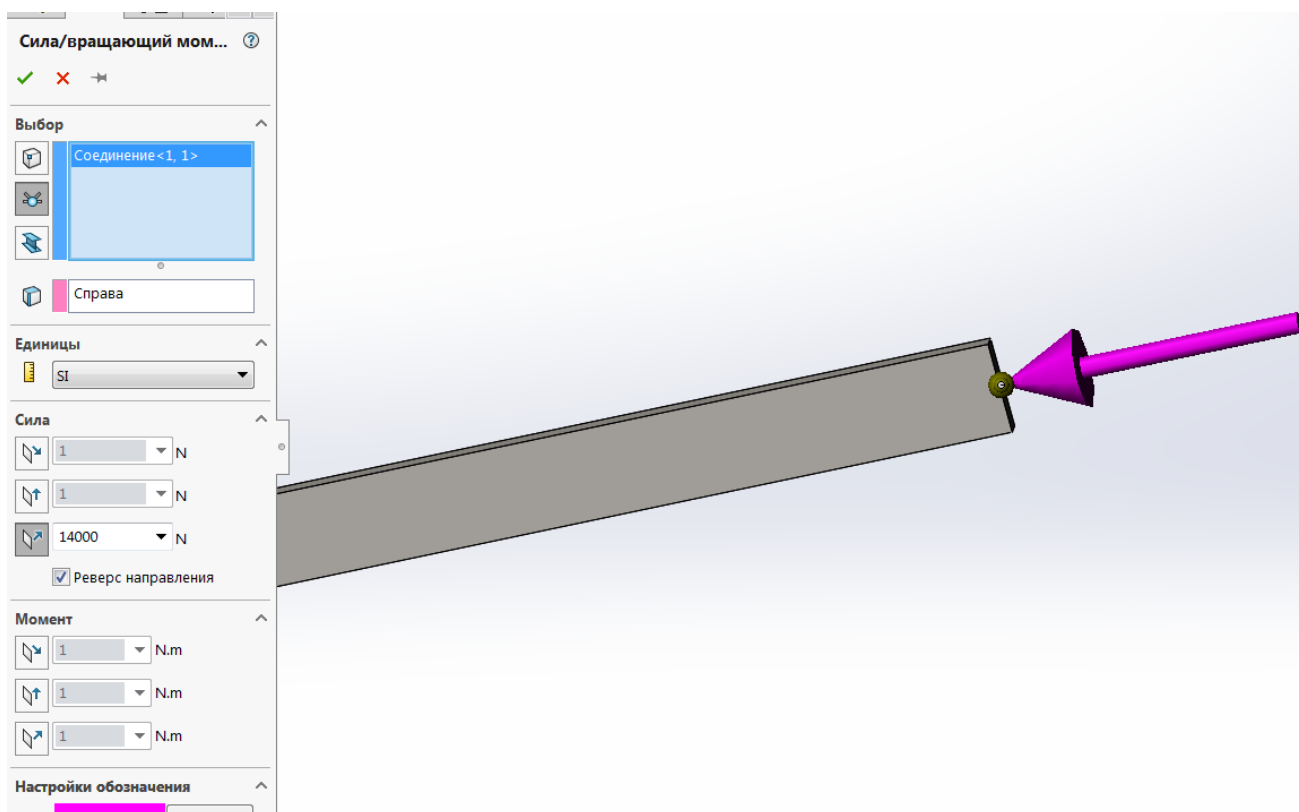


Рисунок 3. Приложенная нагрузка

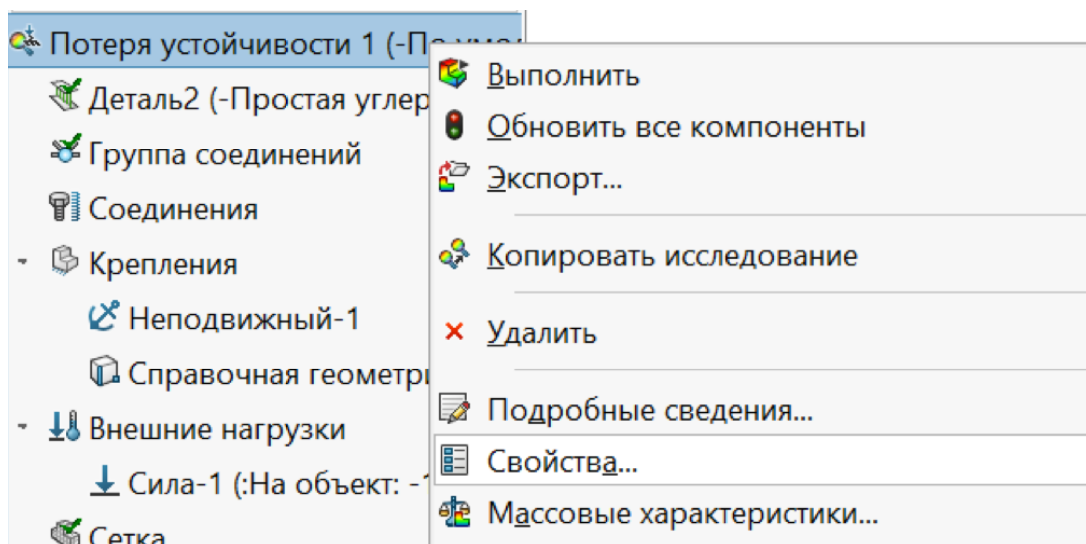


Рисунок 4. Определите в свойствах исследования 5 форма колебаний

Запустите исследование и нажмите Запас прочности при потере устойчивости.

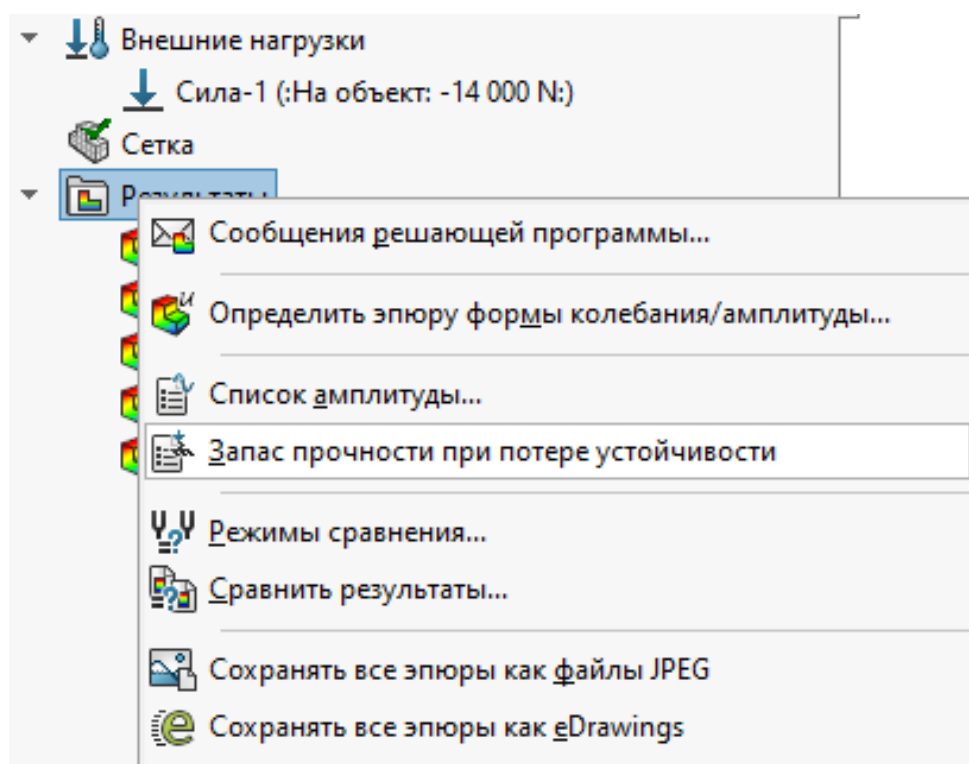


Рисунок 5. Запас прочности по потере устойчивости

Определите для каждой формы колебания критические силы и сравните с аналитическими значениями.

3. Усталость

Замечено, что повторяющиеся операции приложения нагрузки и разгрузки со временем приводят к ослаблению объектов, даже если возникшие напряжения намного меньше, чем те, при которых материал начинает течь либо разрушаться. Настоящее явление называется **усталостью материалов**. Каждый цикл колебания напряжений в некоторой степени ослабляет объект. После некоторого количества циклов объект становится таким непрочным, что он разрушается. Усталость является основной причиной выхода из строя многих объектов, особенно изготовленных из металлов. Примеры отказа вследствие усталости материалов включают: вращающееся машинное оборудование, болты, крылья самолетов, товары широкого потребления, морские платформы, суда, автомобильные валы, мосты и кости.

Результаты статического, нелинейного или динамического исследования модальной временной диаграммы могут использоваться в качестве базиса для определения исследования усталости. Количество циклов, требуемое для усталостного разрушения, зависит от материала и колебаний напряжения. Настоящая информация для определенного материала обеспечивается кривой, называемой S-N кривая.

Разрушение от усталости происходит в три стадии:

1. В материале образуются одна или несколько трещин. Трещины могут образовываться в любом месте материала, но обычно появляются на граничных поверхностях вследствие больших колебаний напряжения. Также причинами возникновения трещин являются: несовершенство микроскопической структуры материалов, поверхностные царапины и т.д.
2. В результате продолжительных нагрузок трещины накапливаются в материале.
3. Наступление разрушения, вследствие снижения несущей способности материала.

Однако, существуют методы, позволяющие бороться с усталостью материала. Это упрочнение поверхности материала методом азотирования.

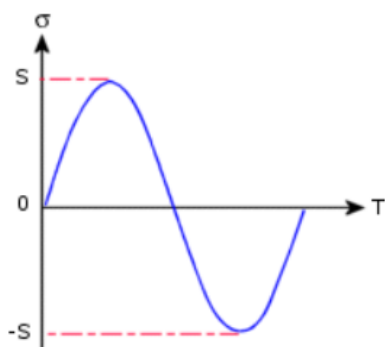
Определения:

Предел усталости – наибольшее знакопеременное напряжение, которое не приведёт к усталостному разрушению. Другими словами, если знакопеременное напряжение равно или меньше предела усталости, число циклов напряжения, вызывающих разрушение становится очень большим (практически бесконечным).

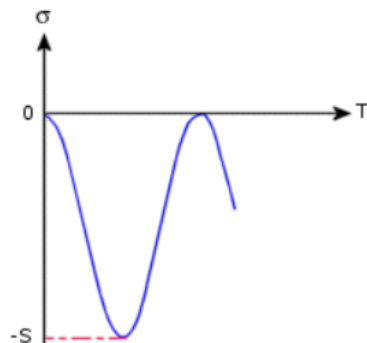
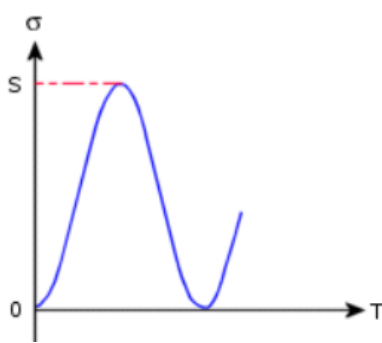
Коэффициент напряжения (R - коэффициент) –

коэффициент $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$, где σ_{max} и σ_{min} – максимальное и минимальное напряжение соответственно.

$R = -1$



$R = 0$



Усталостная долговечность – количество циклов, при котором происходит разрушение.

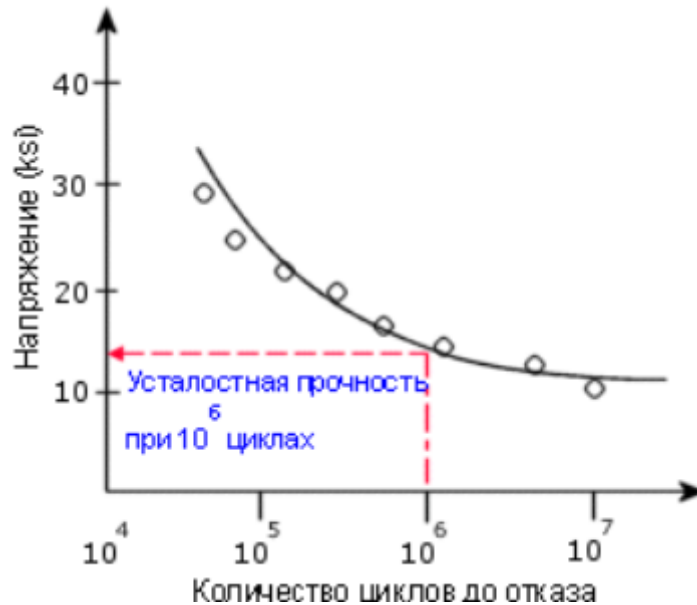
Неограниченный срок службы – количество циклов, при котором усталостная прочность перестает уменьшаться. Другими словами, количество циклов напряжения, необходимое для разрушения, практически бесконечно.

Усталостная прочность – напряжение, при котором происходит усталостное разрушение после данного количества циклов нагрузки.

3.1 Кривая нагружения S-N

Усталостная прочность определяется путем применения к отдельным испытательным образцам разных уровней циклического напряжения и измерения количества циклов для разрушения. Графическим представлением точек данных усталости является соотношение амплитуды циклического (или

переменного) напряжения (S — вертикальная ось) и количества циклов для разрушения (N — горизонтальная ось). Усталостная прочность определяется как напряжение, при котором усталостное разрушение происходит при заданном количестве циклов. Ниже показана типичная кривая S-N.



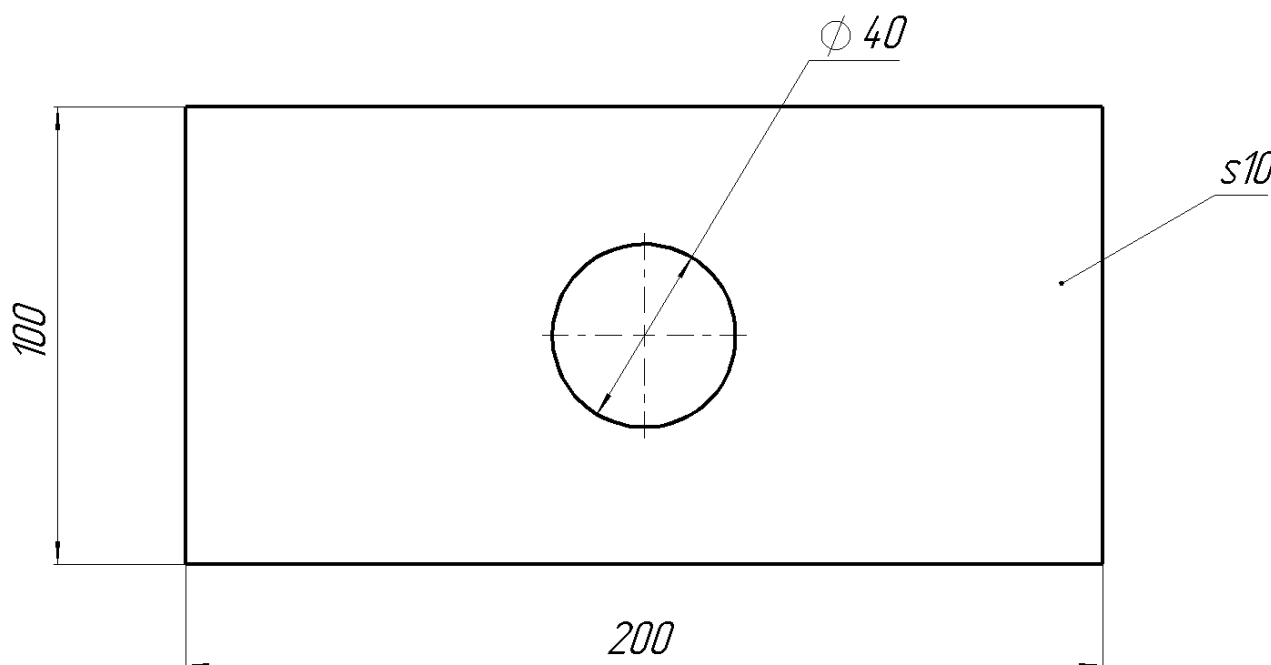
Как правило, вместо N используется логарифм N с основанием 10 вследствие обычно больших значений в диапазоне N . В *SOLIDWORKS Simulation* можно выбрать одну из трех схем интерполяции, чтобы найти промежуточные точки данных на кривой S-N: Двойная логарифмическая, Полулогарифмическая и Линейная.

Образцы испытываются при уменьшающихся уровнях нагрузки до тех пор, пока разрушение не исчезает в пределах выбранного максимального количества циклов (обычно 10 млн. циклов). Близкий к горизонтальному участок кривой определяет усталость, т. е. задает предел усталости тестируемого материала. Если амплитуда примененного напряжения ниже предела усталости материала, считается, что образец имеет неограниченный срок службы. Однако для многих металлов и сплавов, не содержащих железа, например, для алюминиевых, магниевых и медных сплавов, не будет определенного предела усталости и часть кривой для низкого напряжения не будет стремиться к горизонтальной линии. Для этих материалов наблюдается постоянно убывающая кривая S-N.

Кривая S-N для материала определяет соотношение амплитуды циклического напряжения (или переменного напряжения) и количества циклов, необходимых для разрушения при заданном коэффициенте напряжения R. Коэффициент напряжения R определяется как отношение минимального циклического напряжения к максимальному. Для полностью реверсивной нагрузки $R = -1$. Если нагрузка применяется и снимается (не реверсивная), $R=0$.

3.2 Растяжение пластины с отверстием

Откройте существующий проект статического анализа пластины с отверстием (Задача Кирша).



Левый торец зафиксирован, а на правый приложена растягивающая сила $F = 11 \cdot 10^4$ Н.

Прежде чем провести анализ на усталость, запустите Статический анализ.

Затем создайте Новое исследование – Усталость.

Примените данные усталости из библиотеки материалов SolidWorks (см. ниже).

solidworks materials

- Сталь
 - 1023 Листовая углеродистая сталь (SS)
 - 201 Отожженная нержавеющая сталь
 - A286 Суперсплав на основе железа
 - AISI 1010 Сталь, горячекатанная по
 - AISI 1015 Сталь, холоднотянутая (SS)
 - AISI 1020
 - AISI 1020 Сталь, холоднокатаная
 - AISI 1035 Сталь (SS)
 - AISI 1045 Сталь, холоднотянутая
 - AISI 304**
 - AISI 316 Отожженная нержавеющая с
 - AISI 316 Нержавеющая сталь, лист (SS)
 - AISI 321 Отожженная нержавеющая с
 - AISI 347 Отожженная нержавеющая с
 - AISI 4130 Сталь, отожженная при 865
 - AISI 4130 Сталь, нормализованная при
 - AISI 4340 Сталь, отожженная
 - AISI 4340 Сталь, нормализованная
 - AISI Тип 316L нержавеющая сталь
 - AISI Тип A2 Инструментальная сталь
 - Легированная сталь
 - Легированная сталь (SS)
 - ASTM A36 Сталь
 - Литая легированная сталь
 - Литая углеродистая сталь
 - Литая нержавеющая сталь
 - Хромистая нержавеющая сталь

Свойства **Таблицы и кривые** **Кривые усталости SN** **Внешний вид** **Штриховка** **Настройка** **Данные прс**

Источник

Интерполяция: Дважды логарифмиче

Определить: Кривая-0(R=-1)

☒ Получить из модуля упругости материала

☒ На основе ASME Кривые аустенитной стали

☐ На основе ASME Кривые углеродистой стали

Задать уравнение устойчивости S-N (для анализа устойчивости к нерегулярной вибрации)

Предварительный просмотр

Просмотреть все

Данные таблицы

Коэффициент напряжений (R): -1

Единицы измерения: Н/м²

| Точки | N | S |
|-------|---------|-------------|
| 1 | 100 | 1752296820 |
| 2 | 200 | 1349469965 |
| 3 | 500 | 993639576 |
| 4 | 1000 | 798939929.3 |
| 5 | 2000 | 651236749.1 |
| 6 | 5000 | 510247349.8 |
| 7 | 10000 | 429681978.8 |
| 8 | 20000 | 372614841 |
| 9 | 50000 | 310848056.5 |
| 10 | 100000 | 273922261.5 |
| 11 | 200000 | 241024735 |
| 12 | 500000 | 208127208.5 |
| 13 | 1000000 | 190000000 |
| 14 | | |

Файл Вид Сохранить

Источник:

Применить Закрыть Сохранить Конфигурация... Справка

Добавьте событие на основе проведенного статического анализа.

Усталость 1 (-По умолчанию)

- Деталь1 (-ASME аустенитная ст
- Нагрузка (Постоянная амплитуда)
- Пара
- Резул

Добавит событие (конста... ?)

Сообщение

Результаты зависят от взаимодействий событий и других настроек. Нажмите правой кнопкой мыши на исследовании и выберите Свойства, чтобы указать необходимые свойства

Нагрузка

10000

Полностью реверсировано

| Но | Исследован | Масш | Шаг |
|----|------------|------|-----|
| 1 | Статически | 1 | N/A |

Удалить все Копировать

Запустите исследование и получите эпюры Повреждений и Срока службы:

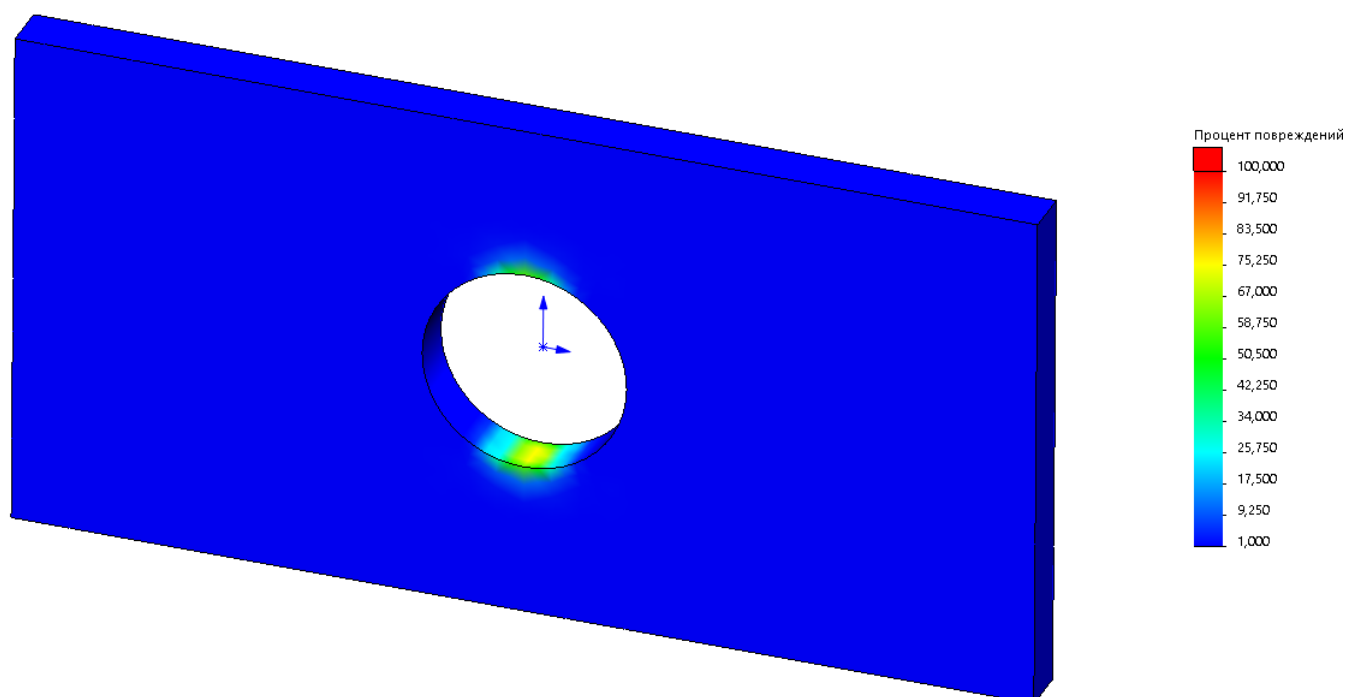


Рисунок 6. Эпюра повреждений

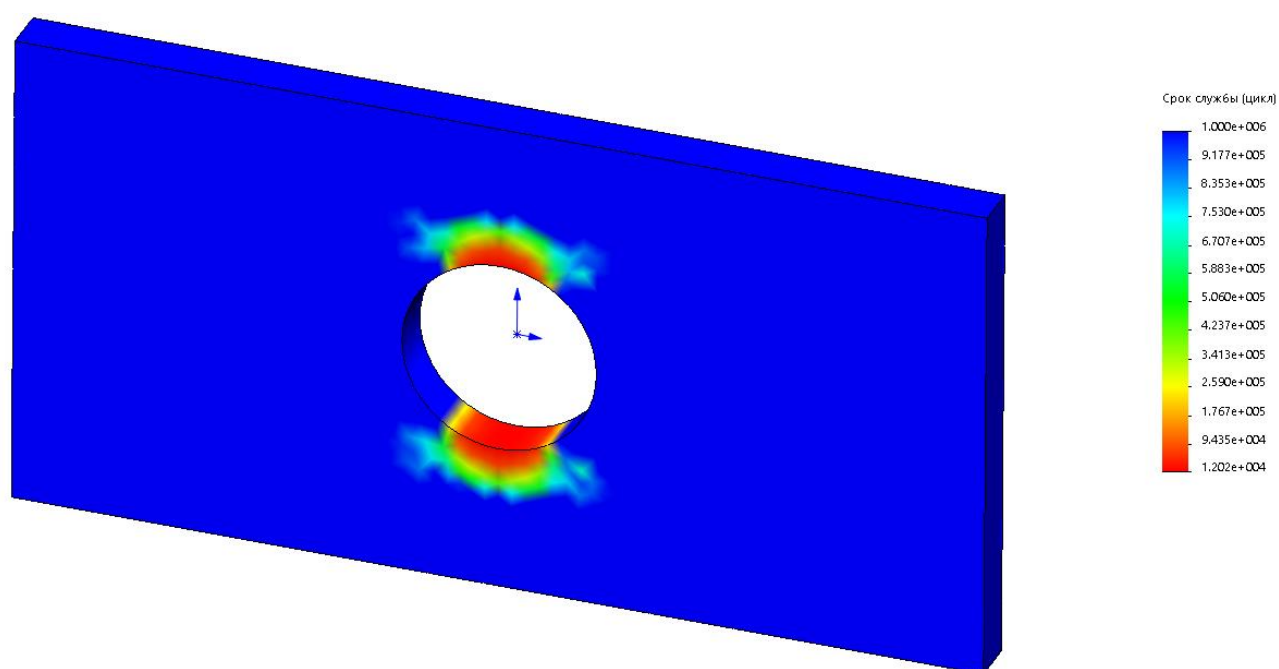


Рисунок 7. Эпюра срока службы