



ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

МАГИСТРА

Тема: Исследование прочности и долговечности
конструкции авиационного датчика вибраций МВ-38

Выполнил: Балобанов В.В., 6055/11
Руководитель: проф. Боровков А.И.
Соруководитель: асс. Клявин О.И.

Оглавление.

1. Описание проблемы. Модель датчика вибрации МВ-38.
2. Описание и результаты вычислительного эксперимента.
3. Определение собственных частот и форм колебаний датчика.
4. Определение пластической зоны перед вершиной трещины.
5. Определение долговечности датчика МВ-38.

Датчик вибраций МВ-38



Датчик вибрации МВ-38 –
компрессионный
пьезоакселерометр с
цилиндрическими
пьезоэлементами из керамики
Синоксаль-49

Технические характеристики:

Диапазон контролируемых частот: 10 – 3000 Гц

Диапазон измерения: 0.1 – 200g

Диапазон рабочих температур: –60 – 250°C

Датчик вибраций МВ-38

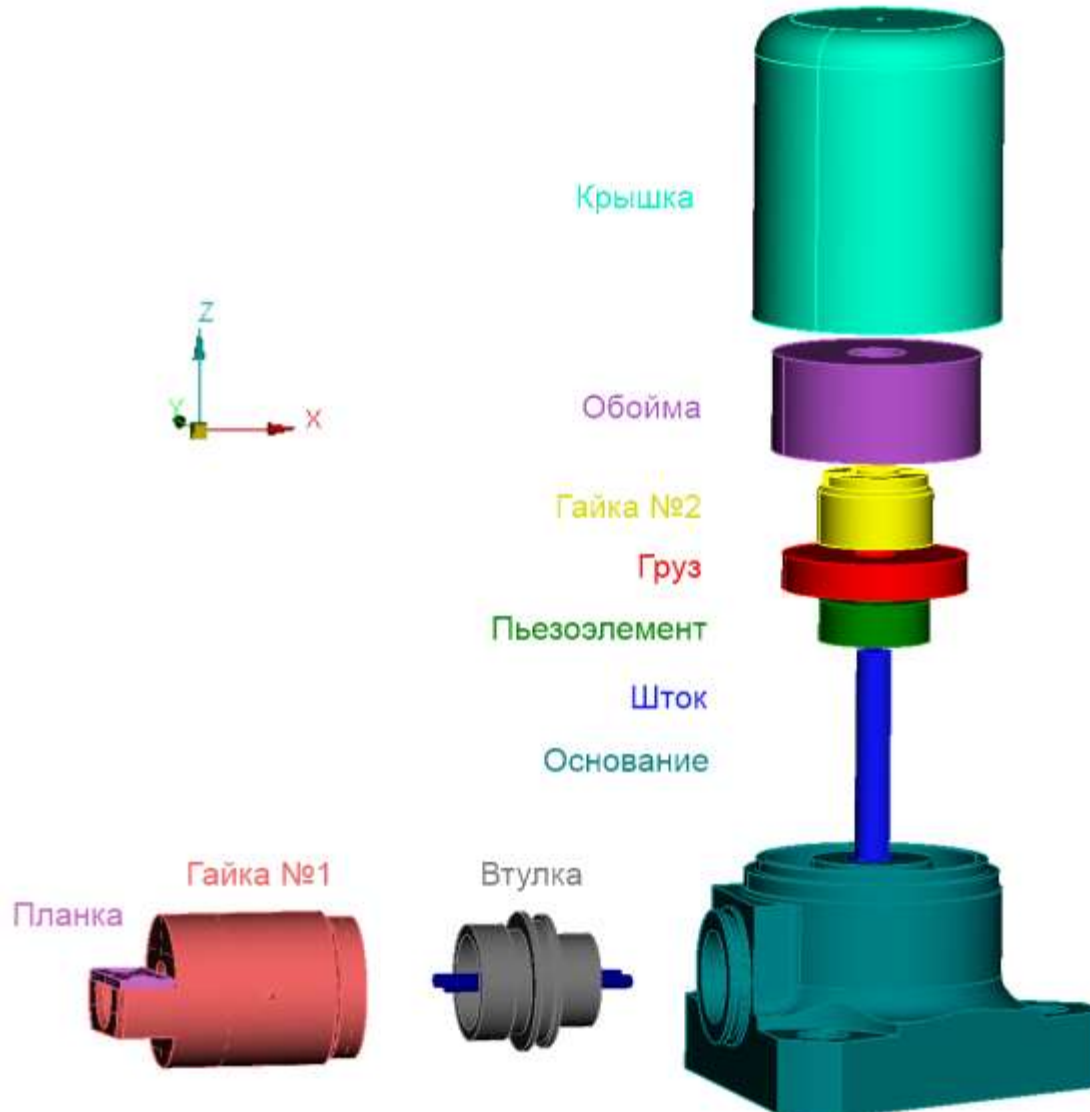


Задача датчика:
Выделение вибраций
малого уровня (до $10g$) из
широкополосного процесса
вибраций.

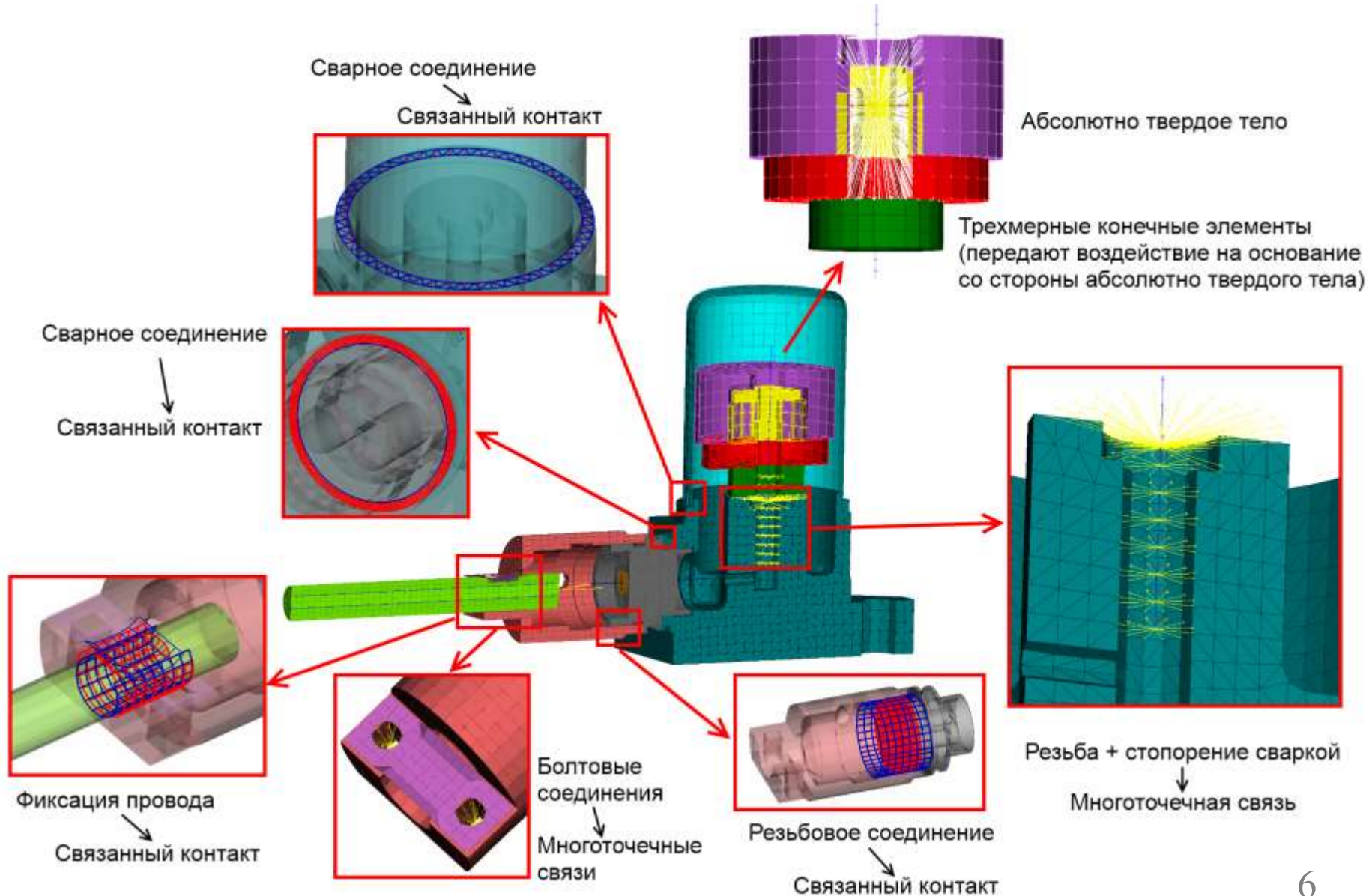
Частоты вибраций в
двигателях – до 12000 Гц.
Рабочая температура на
поверхности – до 400°C .

Турбореактивный двигатель
АИ-222-25

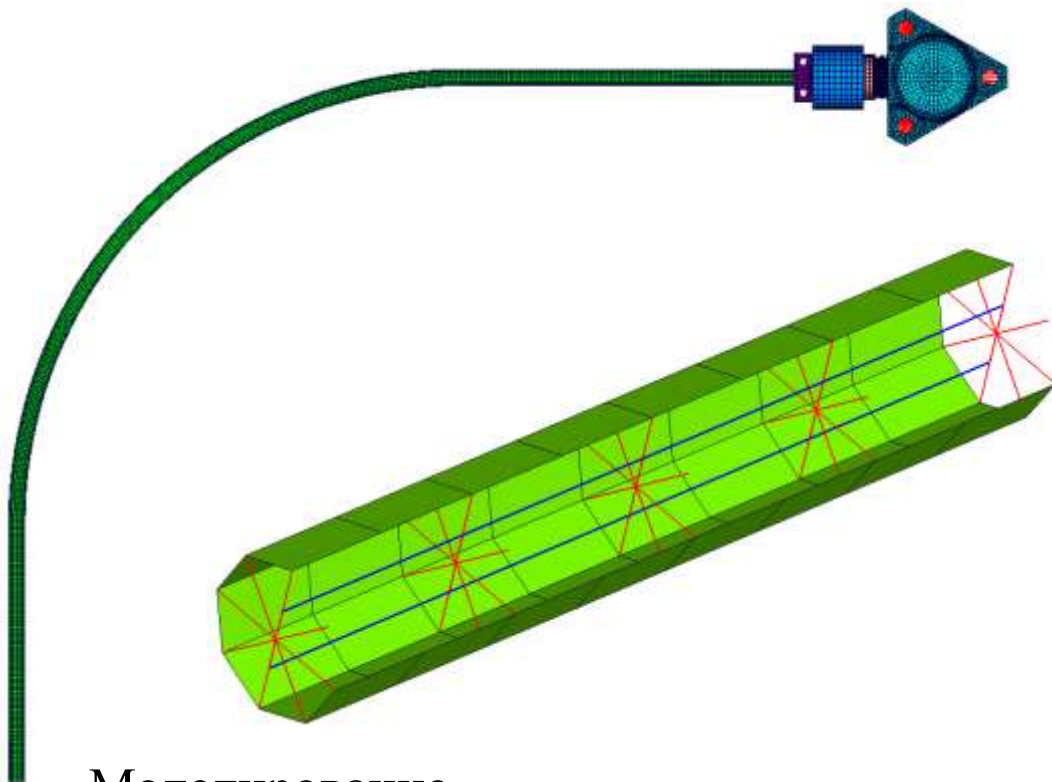
CAD-модель



Конечно-элементная модель

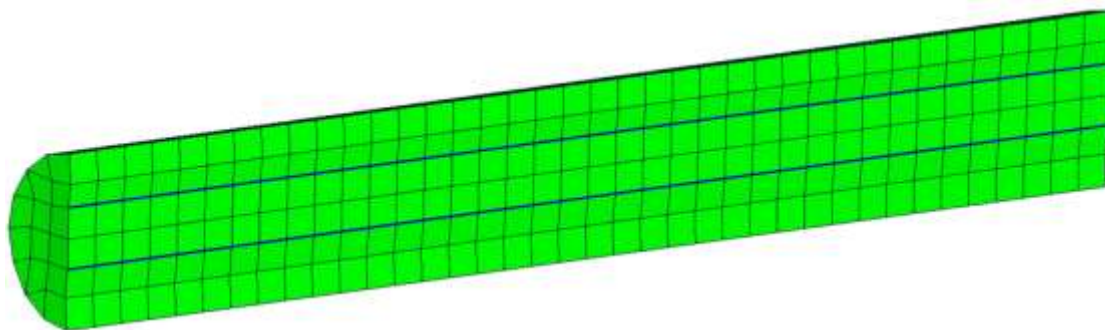


Моделирование провода



Моделирование с помощью оболочечных элементов, через равные промежутки соединяемых жесткими связями с жилами, моделируемыми балочными элементами

Моделирование твердотельными элементами, некоторые из которых имеют общие узлы с балочными элементами жил



Типы и количество элементов, использованных в модели

- **B31** (количество: **1011**) – двухузловые балочные элементы
- **S4R** и **S3R** (количество: **1262** и **52** соотв.) – оболочечные четырех- и трехузловые элементы с пониженным интегрированием
- **C3D8R** (количество: **48098**) – твердотельные гексагональные восьмиузловые элементы с пониженным интегрированием
- **C3B6** (количество: **7448**) – твердотельные шестиузловые элементы в форме треугольных призм
- **C3D4** (количество: **28948**) – твердотельные тетраэдрические четырехузловые элементы
- **SFM3D4R** и **SFM3D3** (количество: **1201**) – мембранные четырех- и трехузловые элементы

Связи:

MPC (количество: **15**) – многоточечные жесткие связи

TIE-contact (количество: **6**) – связанные контакты

Всего:

88020 элементов, **76475** узлов, **233049** степеней свободы

Материалы

Деталь	Материал	Е, ГПа	ν	$\rho, \text{кг/м}^3$
Основание, Хомут	10X18H11БЛ	194	0.28	7900
Втулка	12X18H9Т	180	0.28	7900
Штыри, Шток	36НХТЮ	130	0.28	7900
Изоляция	Стекло	70	0.23	2500
Гайка	ВТ1-0	112	0.32	4505
Планка, Крышка	12X18H10Т	198	0.28	7900
Провод	Из опыта	0.46	0.363	1370
Жилы	Из опыта	0.46	0.28	7900
Кер. шайбы	Керамика Al_2O_3	276	0.22	3600
Наполнитель обоймы	Резина	0.0075	0.45	1500

Определение модуля Юнга провода

Эксперимент: Провод \rightarrow балка круглого сечения

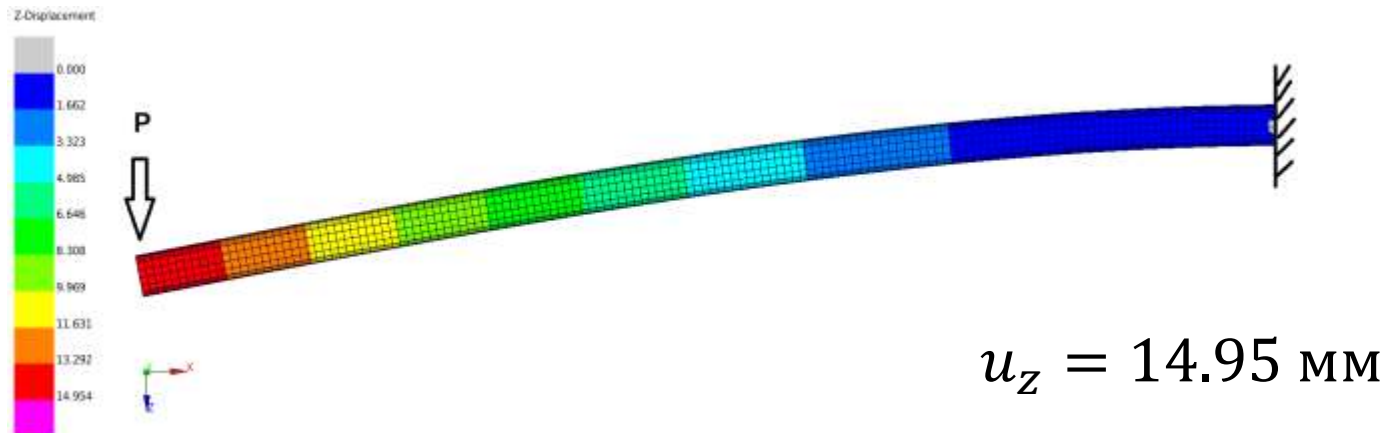
Вес груза: $P = 0.2 \text{ Н}$

Момент инерции $I = \frac{\pi d^4}{64} = 16.773 \text{ мм}^4$

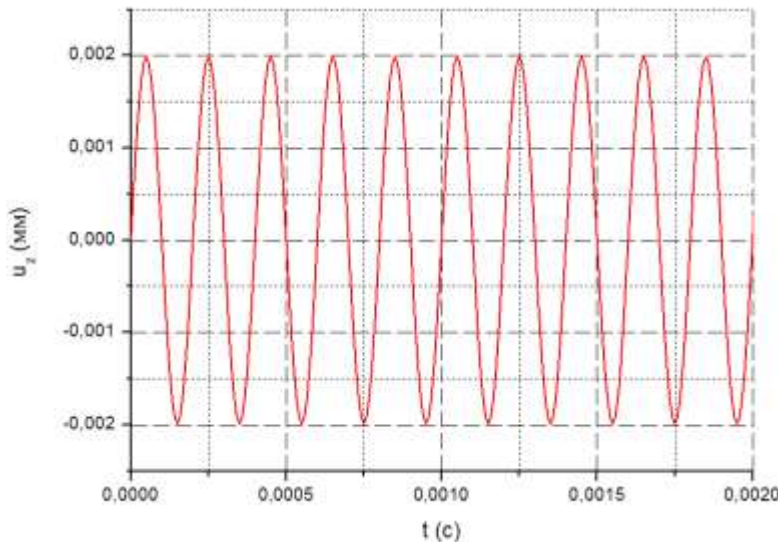
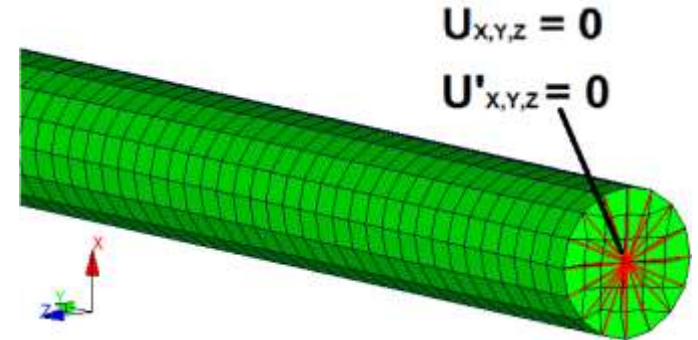
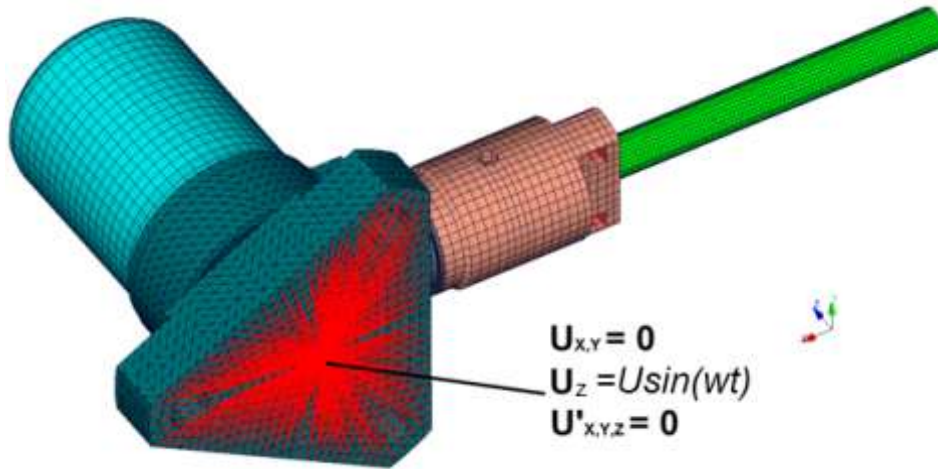
Длина балки $L = 120 \text{ мм}$

Измеренный прогиб: $u_z = 15 \text{ мм} \Rightarrow \sigma_{uz} = 460 \text{ МПа}$

Конечно – элементная постановка



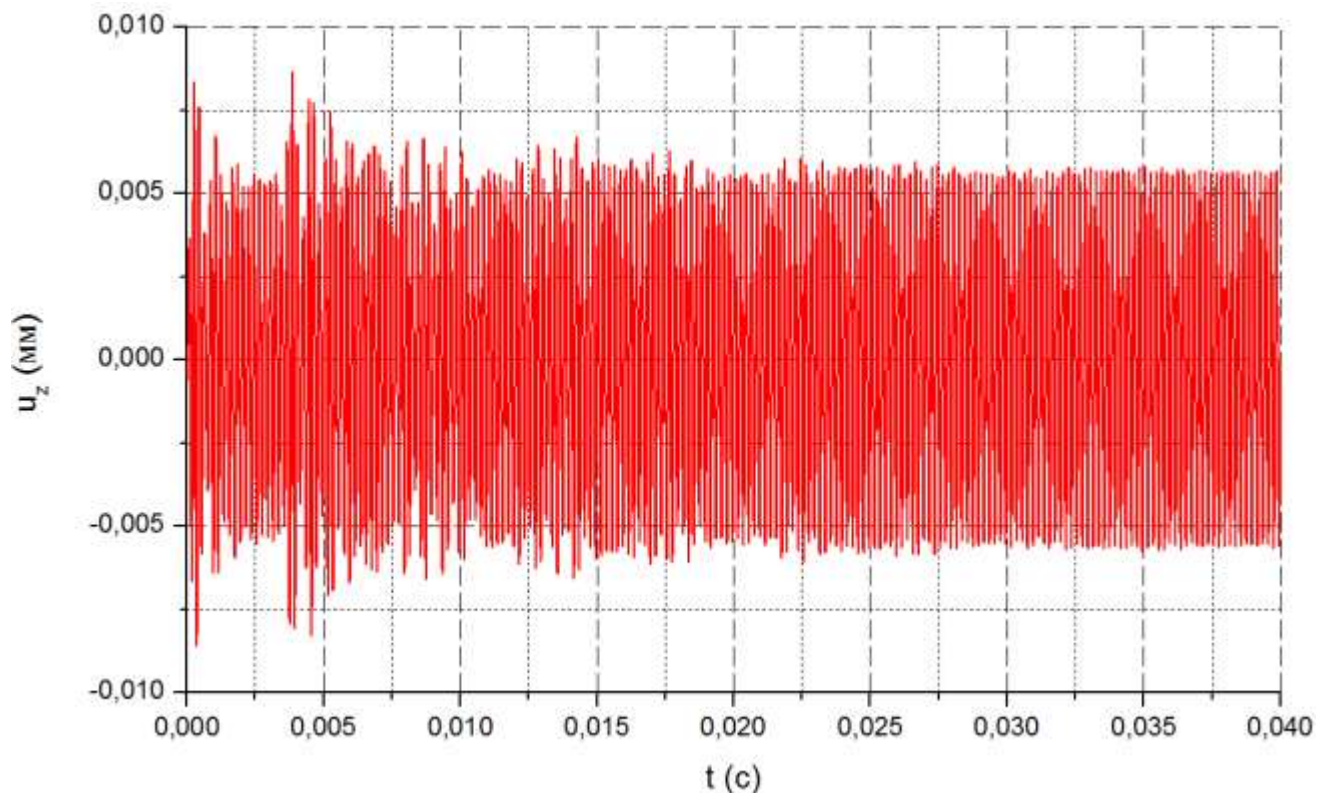
Граничные условия



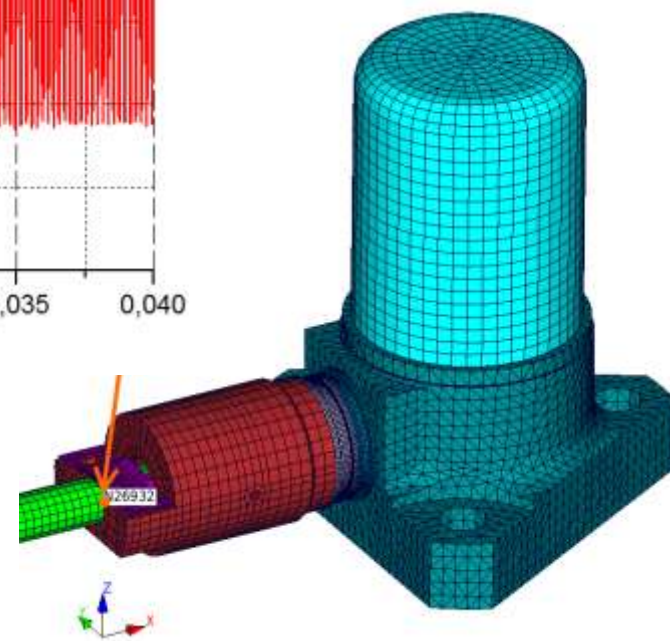
Перемещения U_z подобраны так, чтобы амплитуда ускорений равнялась $A_z = 200g$

Пример: для частоты $f = 5000$ Гц
 $U = 0.002$ мм

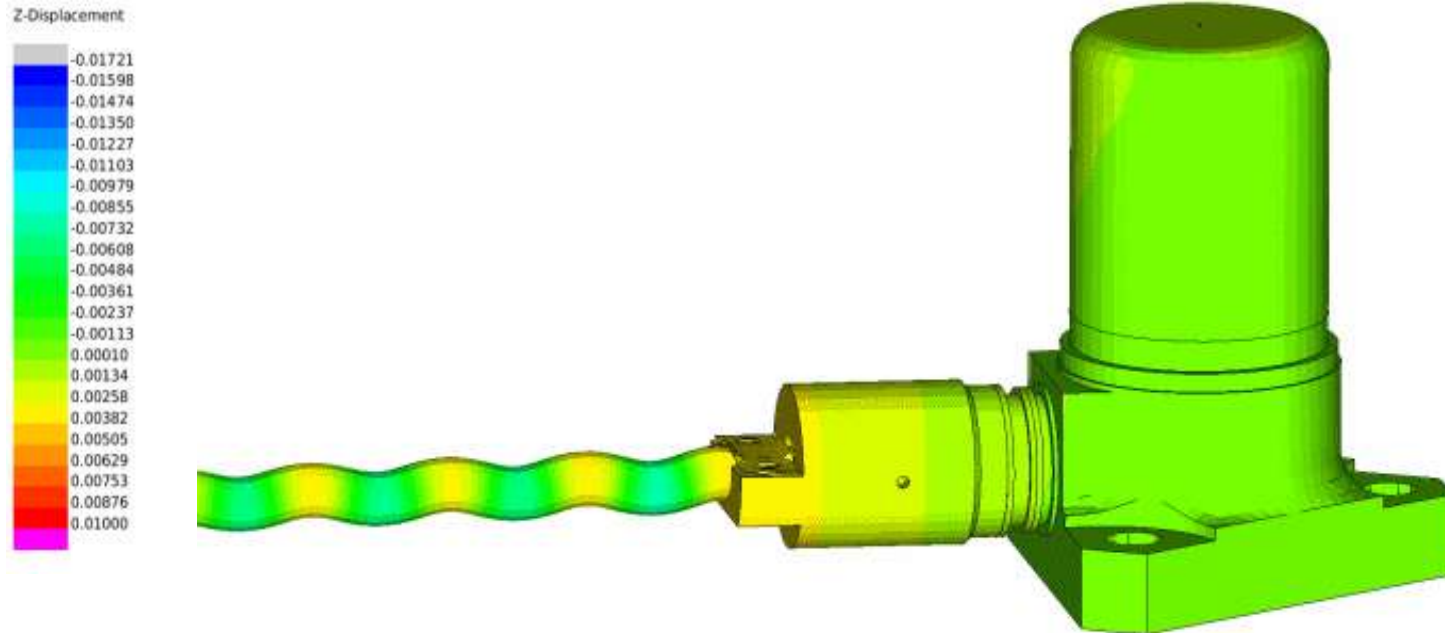
Установившийся режим



Установившийся режим для расчетного случая с частотой $f = 5000$ Гц наступает примерно после 0,03 секунды (150 циклов)

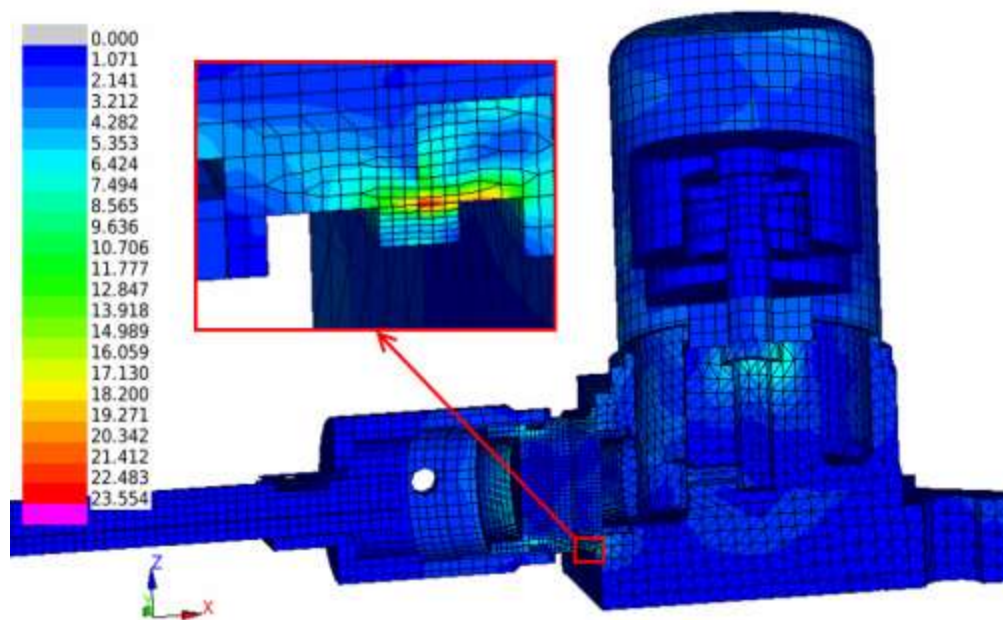


Колебания датчика в установившемся режиме



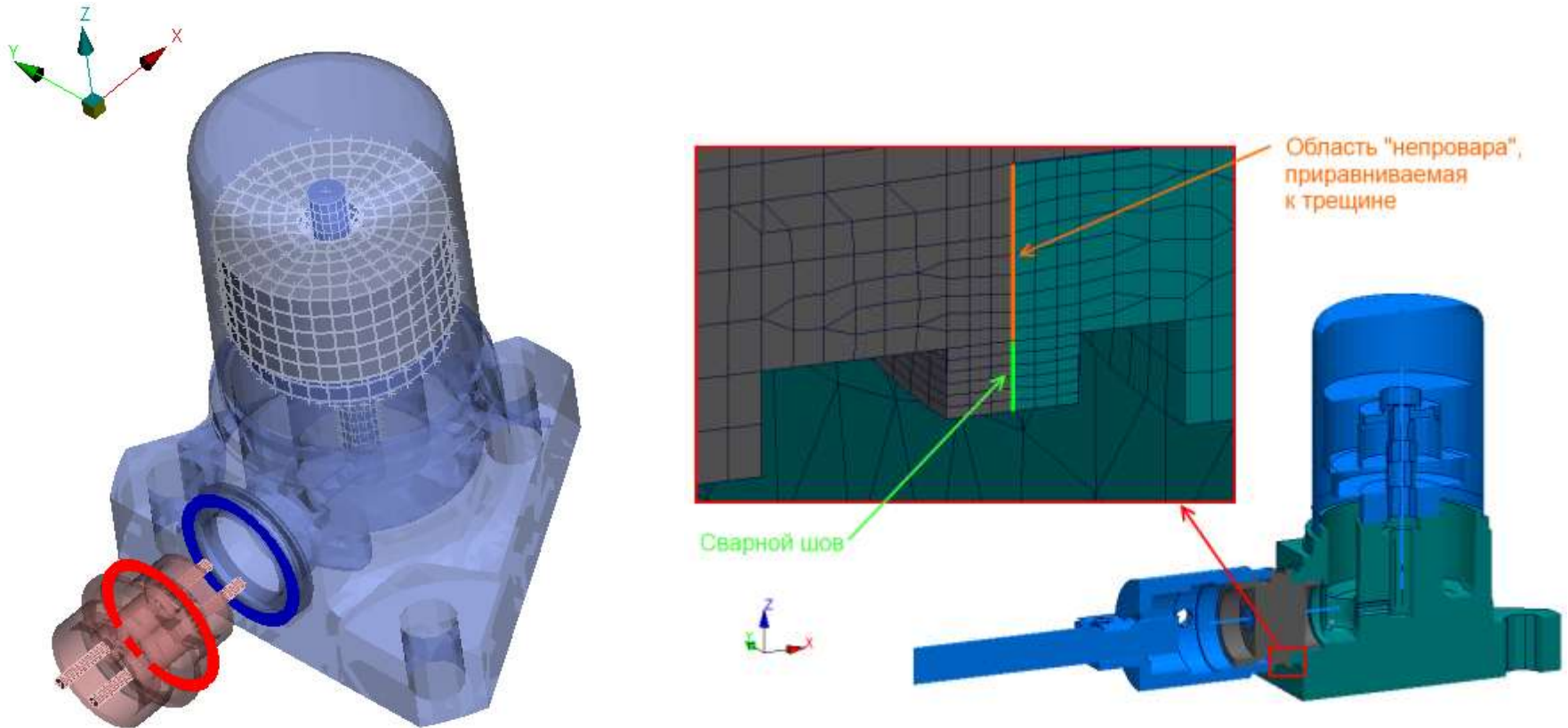
Поле перемещений u_z относительно нижней грани основания (Масштаб 100:1)

Максимальные напряжения, наблюдаемые в установившемся режиме



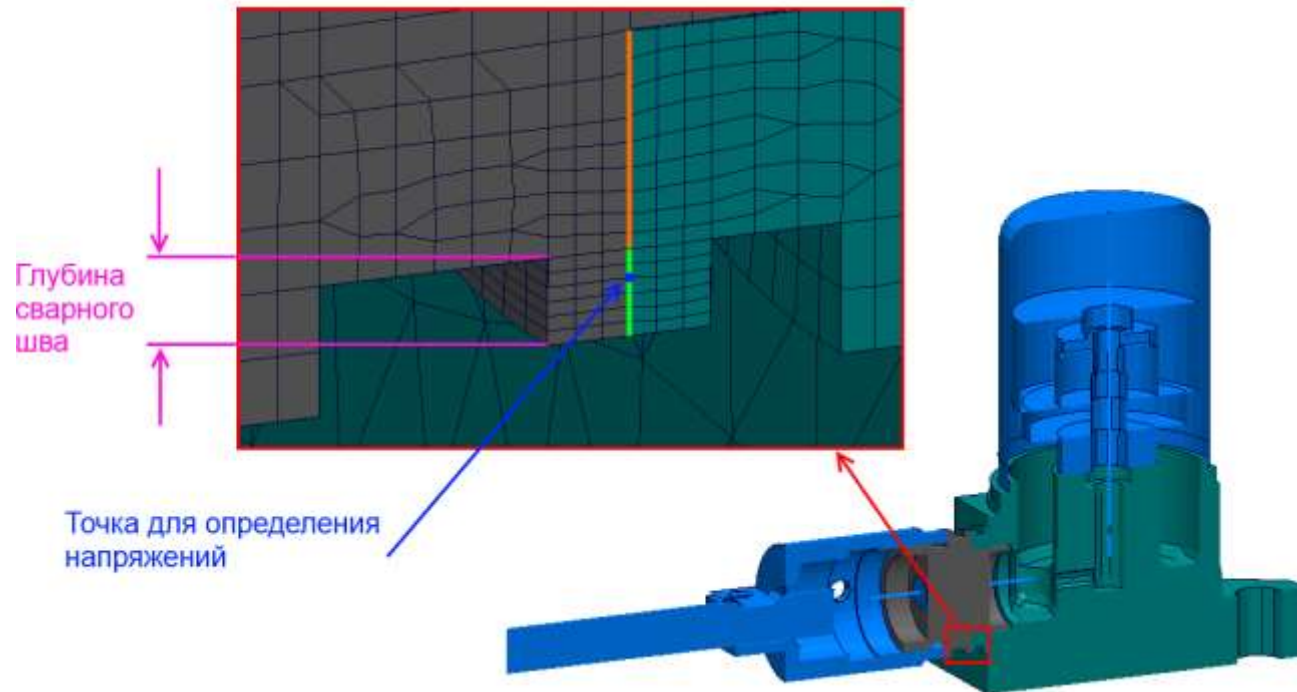
Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения
возникают в нижней части сварного шва

Сварное соединение между втулкой и основанием



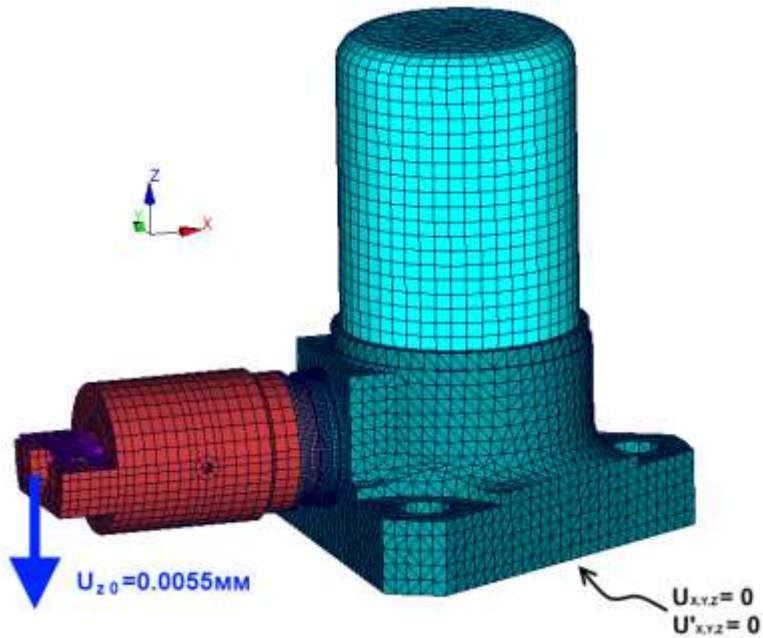
Технология соединения двух деталей с помощью аргонно-дуговой сварки не позволяет создать сварной шов на всей поверхности соприкосновения двух соединяемых деталей. В результате часть соприкасаемых поверхностей превращается в сварной шов, а часть остается свободной, образуя так называемый «непровар».

Исследование сходимости

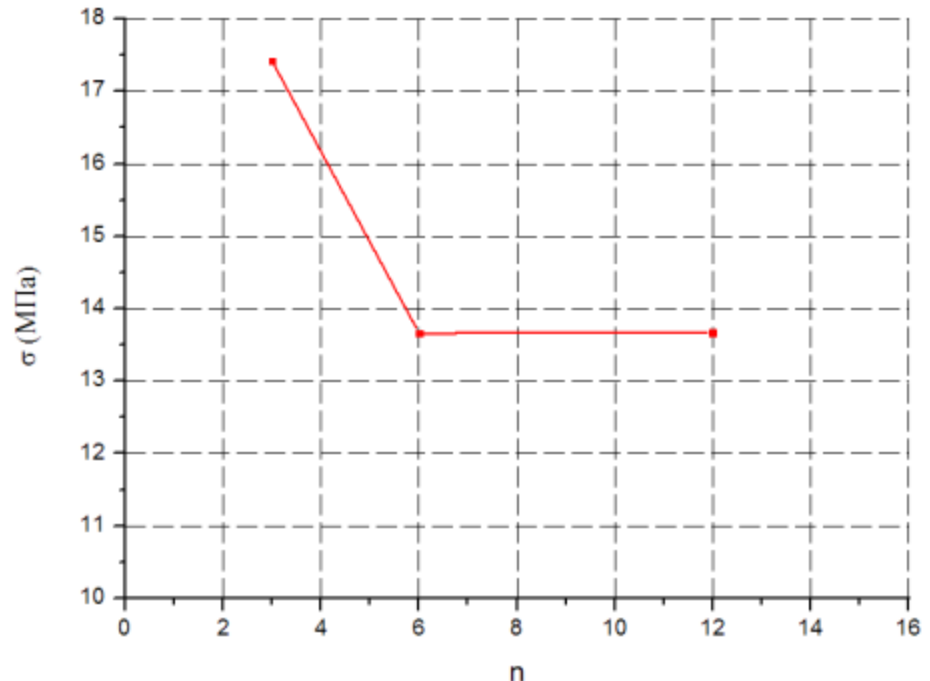


Исследуется сходимость по количеству элементов по глубине сварного шва. В точке, показанной на рисунке синим цветом, определяются эквивалентные по Мизесу напряжения.

Исследование сходимости



Исследование сходимости:
решение ряда статических задач с
разными конечно-элементными
сетками.

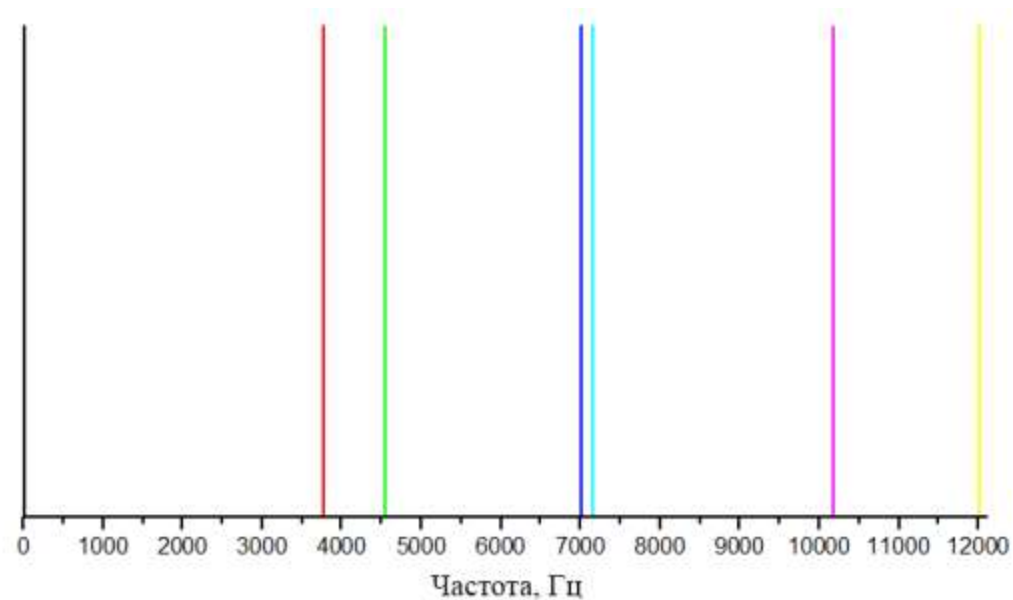
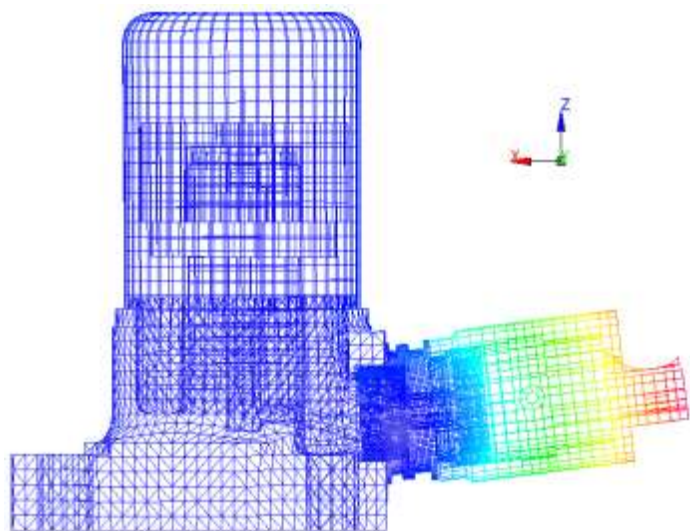


В процессе исследования
обнаружилась довольно быстрая
сходимость по числу элементов вдоль
сварного шва.

Выбрана сетка с шестью элементами.

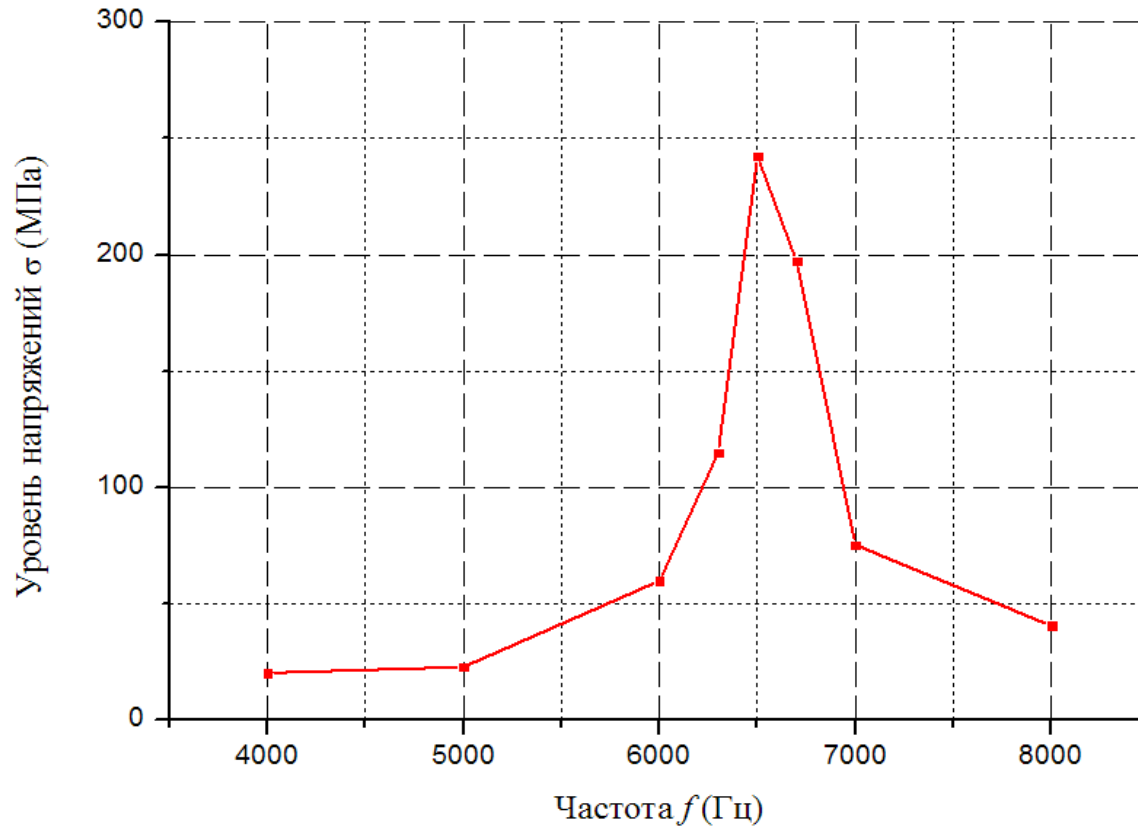
Определение собственных частот

Алгоритм Ланцоша



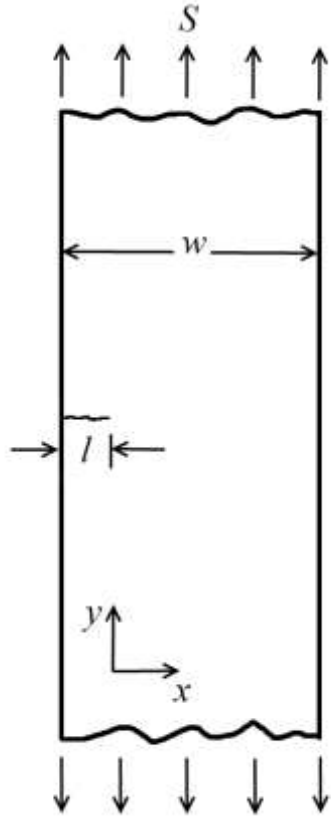
Собственная форма колебаний,
совпадающая с рабочим режимом.
Соответствующая собственная
частота $f = 7008$ Гц

Амплитудно-частотная характеристика



Пик напряжений соответствует частоте 6500 Гц

Определение зоны пластичности (модельная задача)



Плоское деформированное состояние:

$$r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_T^2} (1 - 2\nu)^2$$

Формула Ирвина для определения зоны пластичности вдоль трещины

K_I – коэффициент интенсивности напряжений первого типа

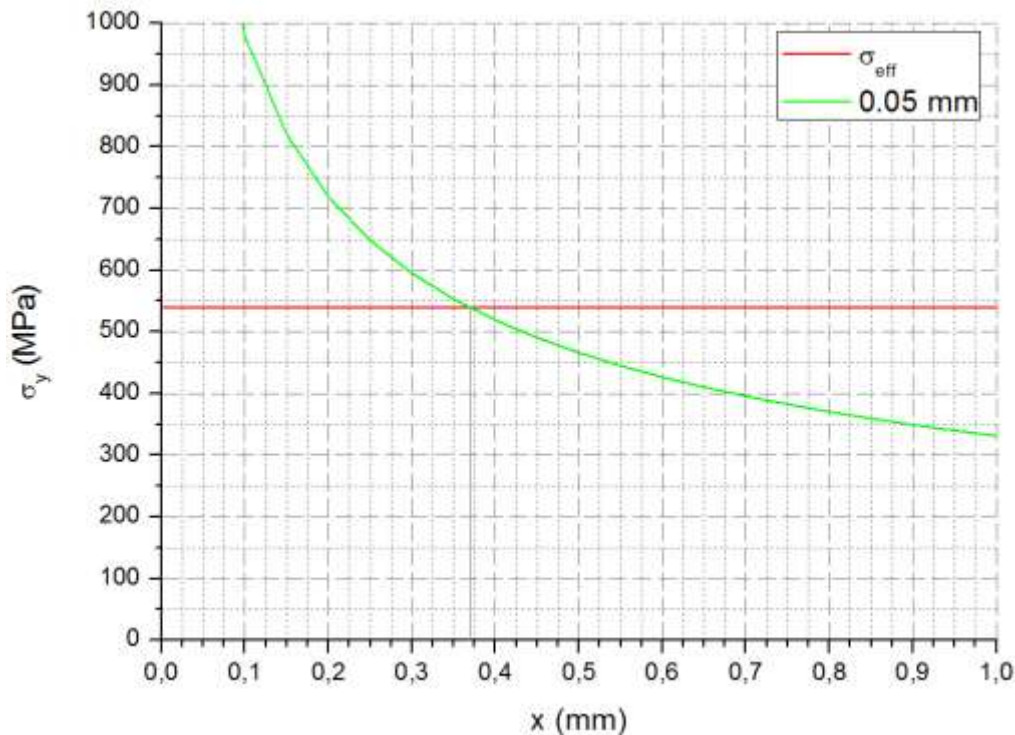
K_I определяется двумя способами:

- Аналитическим, с использованием справочных формул

$$K_I = 833.69 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$

- Конечно-элементным, с использованием метода аппроксимации и экстраполяции на вершину трещины

$$K_I = 848.31 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$



Определение длины зоны
пластичности с
помощью графика:

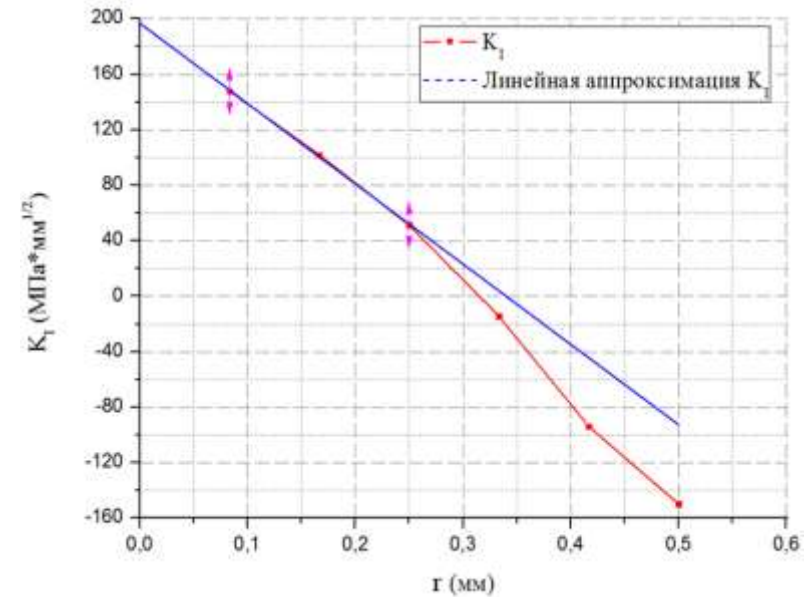
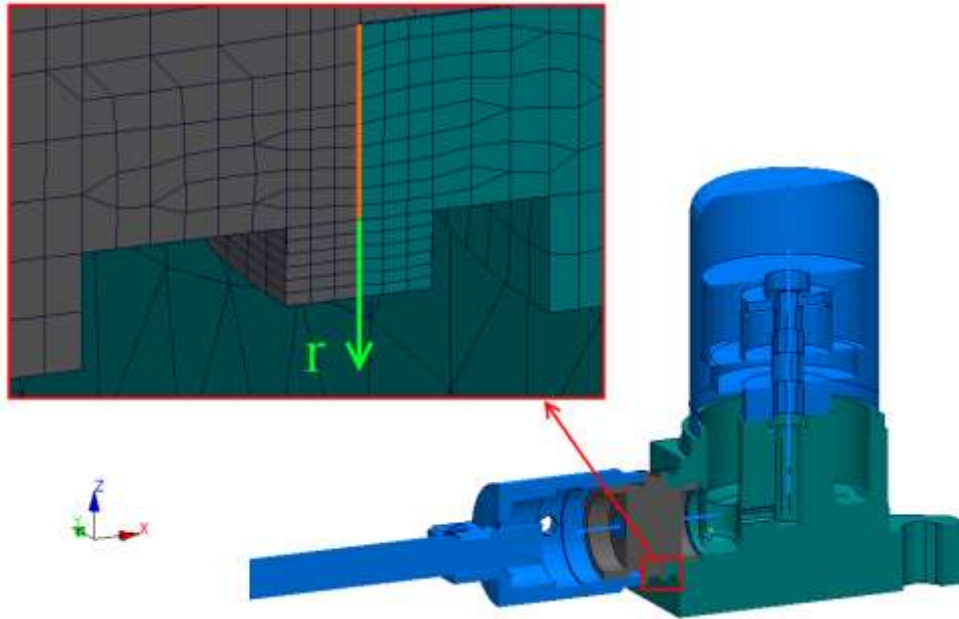
$$\sigma_{eff} = \sigma_T \chi$$

χ – коэффициент стеснения
пластической деформации:

$$\chi = \frac{1}{1 - 2\nu} = 2.5$$

Метод	r_p , мм	Отличие от аналитического решения, %
Аналитический метод	0.38	-
Графический метод	0.37	0.03
Метод с аппроксимацией коэффициента интенсивности	0.39	0.03

Определение зоны пластичности, возникающей в сварном шве

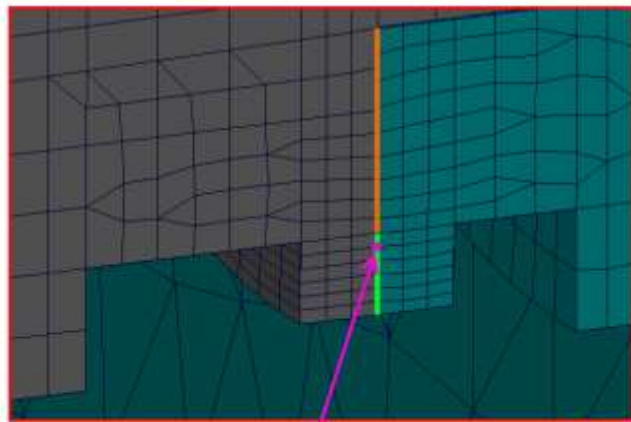
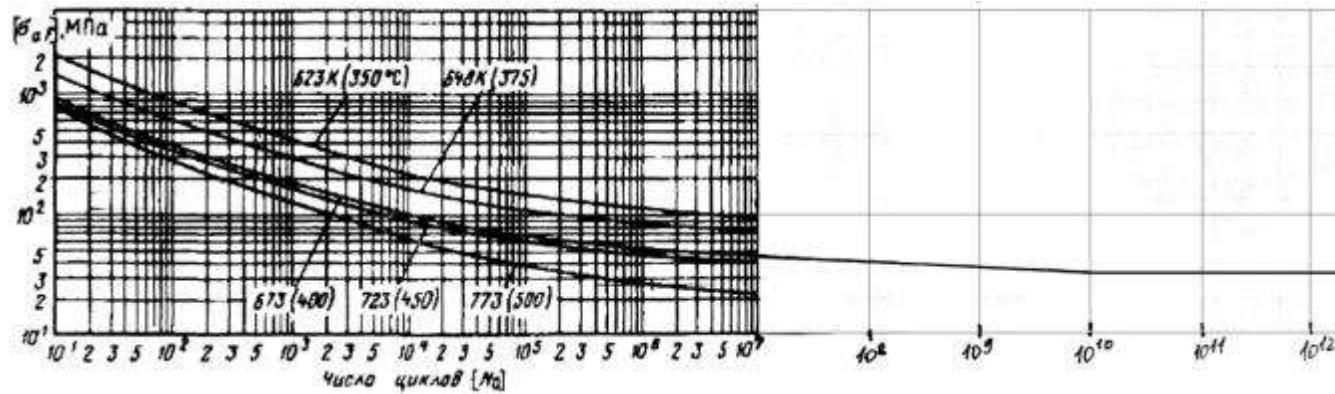


Коэффициент интенсивности $K_I = \sigma_x \sqrt{2\pi r}$

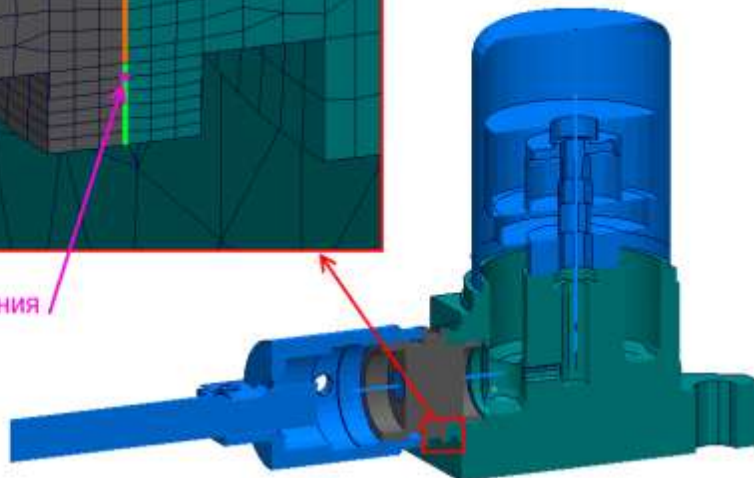
Длина пластической зоны за вершиной трещины вдоль ее оси $r_p = 0.021$ мм

Длина зоны пластичности меньше размеров одного элемента (0.083 мм), следовательно пластические деформации локализованы около вершины трещины и использование линейной упругой теории допустимо.

Оценка ресурса работы датчика по кривой усталости



Узел для определения
результатов



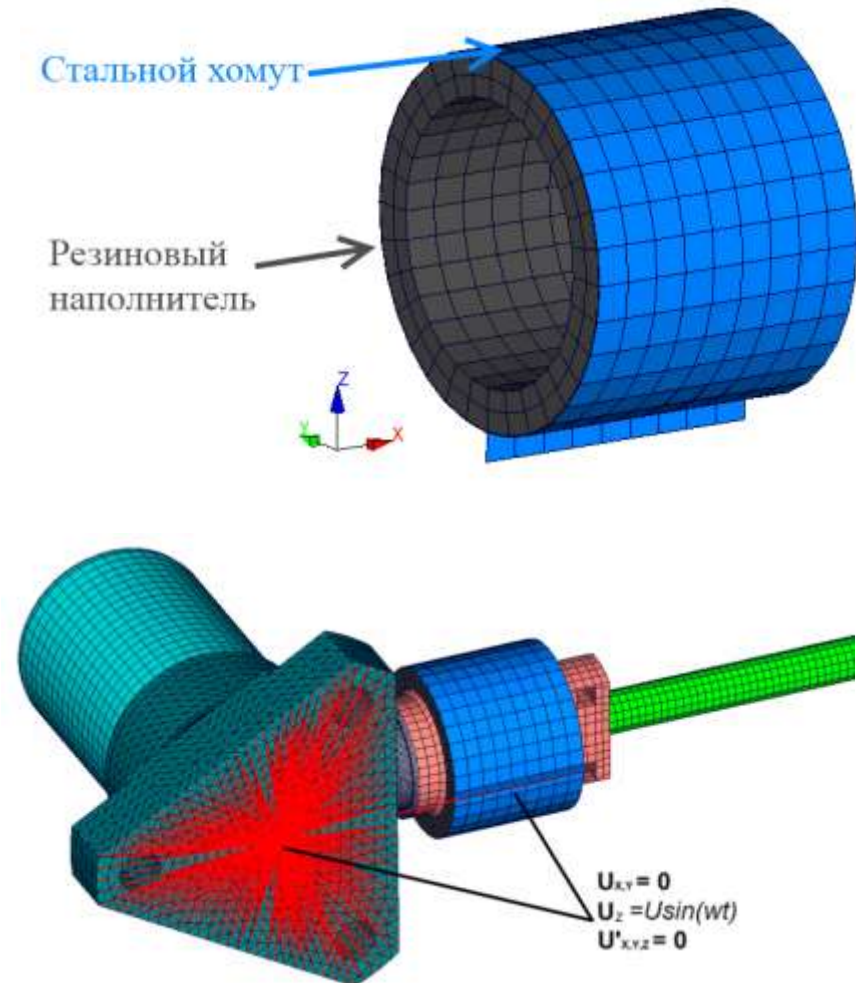
Эквивалентные по Мизесу
напряжения $\sigma = 175.6$ МПа

Число циклов работы датчика
до разрушения ~ 2000 , время
работы – около 0.3 секунды

Принятие мер по уменьшению уровня напряжений

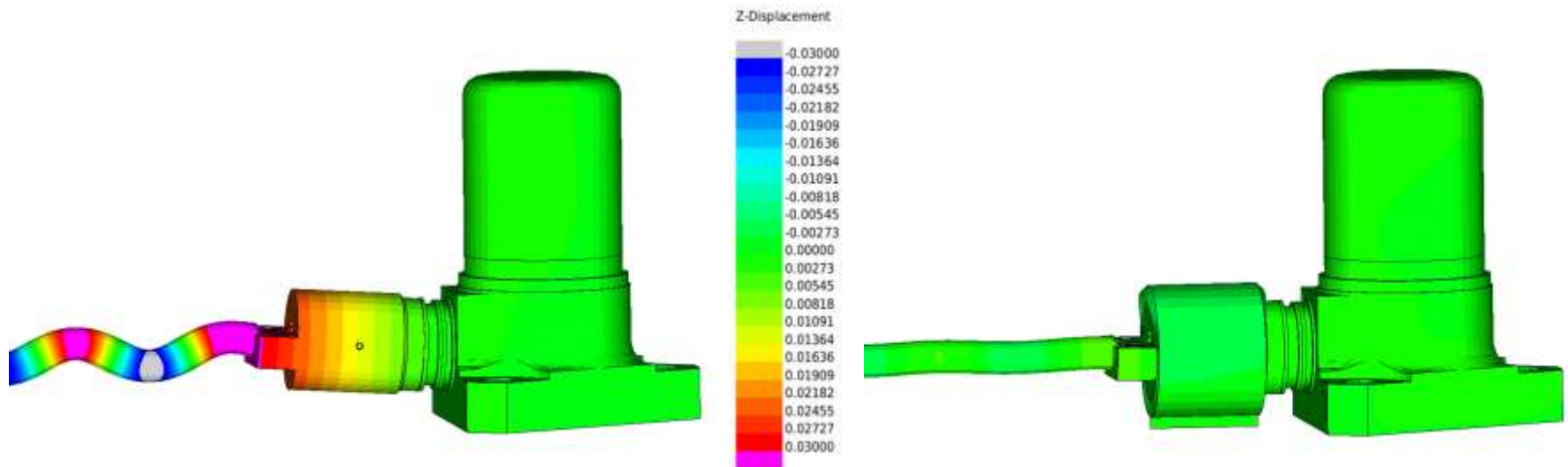
Для уменьшения напряжений необходимо снизить колебательные перемещения провода и гайки относительно основания датчика, не внося изменений в конструкцию. Для этих целей была использована обойма, представляющая собой стальной хомут с резиновым наполнителем, который одевается на гайку.

Хомут своей нижней частью крепится на ту же поверхность, что и основание датчика. В КЭ постановке на узлы нижней части хомута накладываются те же граничные условия, что и на нижнюю грань основания



Сравнение модели датчика с обоймой и без неё

Поле перемещений u_z относительно нижней грани основания
(Масштаб 50:1):



Напряжения в сварном шве

175.6 МПа

7.6 МПа

Время работы согласно кривой усталости

менее 1с

Значение лежит ниже кривой усталости \Rightarrow
разрушения не произойдет

Оценка ресурса работы датчика по Пэрису

Формула Пэриса для скорости роста трещины: $v = \frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m$

$\Delta K = K_{I_{max}} - K_{I_{min}}$ – размах коэффициента интенсивности в цикле

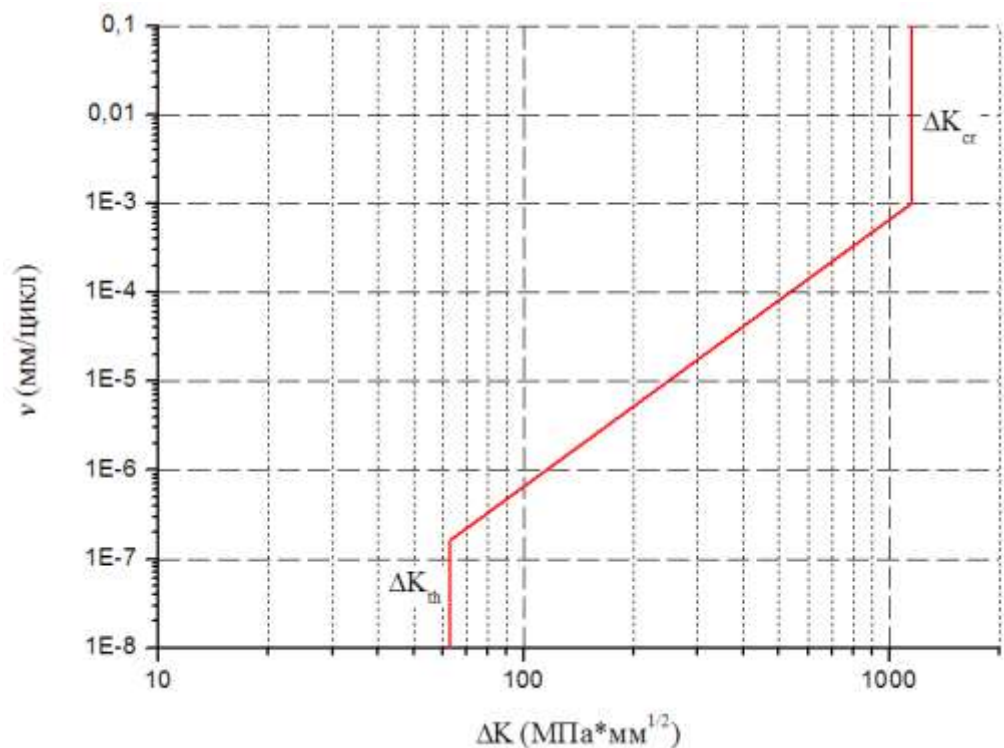
Значения коэффициентов:

$$m = 3$$

$$C = 5.21 \cdot 10^{-13} \left(\frac{E_{rt}}{E_{et}} \right)^3 = 6.52 \cdot 10^{-13}$$

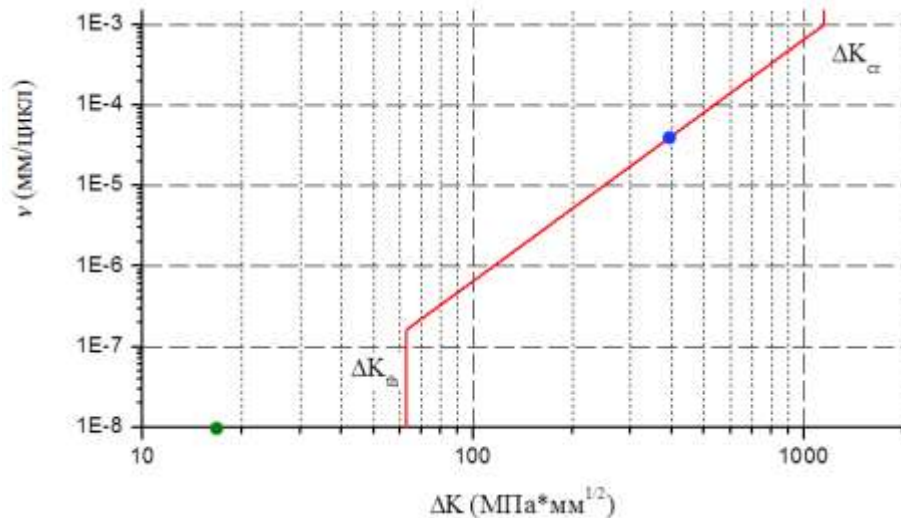
$$\Delta K_{th} = 63 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$

$$\Delta K_{cr} = 1154 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$



Оценка ресурса работы датчика по Пэрису

	Модель датчика без обоймы	Модель датчика с обоймой
Размах коэффициента интенсивности ΔK_I , МПа · $\sqrt{\text{мм}}$	396.31	17.62
Отношение к пороговому размаху коэффициента интенсивности $\Delta K_I / \Delta K_{th}$ $\Delta K_{th} = 63 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$	6.29	0.28



- Размах коэффициента интенсивности для модели датчика без обоймы
- Размах коэффициента интенсивности для модели датчика с обоймой



Итоги

- В ходе проведения работы была создана подробная конечно-элементная модель датчика вибраций МВ-38.
- Поставлен и решен ряд динамических вибрационных и статических задач.
- Проведено определение собственных частот и амплитудно-частотной характеристики, выявлена наиболее опасная резонансная частота.
- Определены размеры зоны пластичности в окрестности сингулярной точки, доказана возможность применимости упругих свойств материалов без учета пластических, а так же линейной механики разрушений.
- Проведена оценка ресурса работы датчика вибраций двумя способами.
- Предложены эффективные меры по снижению напряжений, возникающих в сварном шве, не вносящие изменений в конструкцию серийно выпускаемого устройства.



Спасибо за внимание!