

**МИНОБРНАУКИ РФ**

**ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина**

**Кафедра теоретической и прикладной механики**

# **Моделирование развития трещины в лопатке турбины**

**Выполнил: студент гр. 4-33 Замилев Н.О.**

**Руководитель: доц. каф. ТиПМ, к.т.н., доц. Шилов М.А.**

# Цель и задачи работы

**Цель работы:** определение условий развития трещины лопатки турбины при одноосном растяжении.

- **Задачи:**

- Провести литературный обзор.
- Экспериментально определить физико-механические характеристики материала лопатки турбины.
- Разработать модель разрушения лопатки турбины при одноосном растяжении турбины.

# Описание объекта

Виды лопаток турбины:



Рисунок 1. Пример длинной турбинной лопатки



Рисунок 2. Пример короткой турбинной лопатки

Основные нагрузки на лопатку

На лопатки турбины, определяющие долговечность всего агрегата, действуют центробежные силы, обусловленные их вращением, усилия статического изгиба под действием давления пара, и вибрационные нагрузки.

# РАЗРУШЕНИЕ

**Разрушение** – процесс образования новых поверхностей в сплошном материале в результате, зарождение и развитие трещин. Разрушение может закончиться разделением тела на части с образованием новых поверхностей, которые называют **изломомами**.

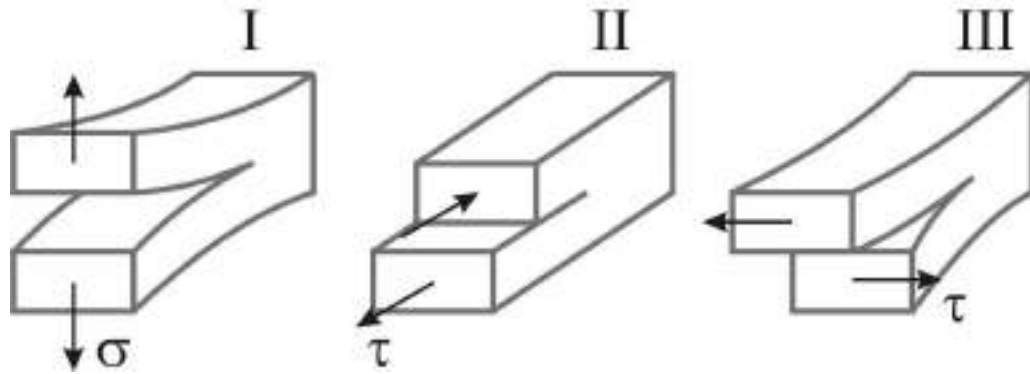


Рисунок.3. Теоретические виды трещин

- I – нормального разрыва,
- II – поперечного сдвига,
- III – продольного сдвига

**Разрушение по типу I** – единственный способ, ведущий к физическому разрушению, поскольку если внешнее напряжение физически не разделяет две поверхности в плоскости скола, то может происходить сращивание этих плоскостей даже при приложенном напряжении.

# Постановка задачи

## Основные уравнения теории упругости

### Уравнения равновесия

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho Y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho Z &= 0\end{aligned}$$

### Геометрические уравнения

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} & \varepsilon_{zx} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

### Уравнения совместности деформаций

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{zx}}{\partial z \partial x} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right) &= \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right) &= \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} \right) &= \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x}\end{aligned}$$

В основе задачи лежат уравнения механики разрушения нормального отрыва

$$\begin{aligned}k &= \sigma \sqrt{\pi l} \\ \sigma_x &= \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{k}{\sqrt{2\pi R}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_z &= v(\sigma_x + \sigma_y)\end{aligned}$$

# Физико-механические свойства стали марки 08X17T

Характеристика	Значения
Модуль упругости, ГПа	$2,06 \cdot 10^{-5}$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7700
Предел прочности при растяжении, МПа	460
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*град))	25

Таблица. 1. Характеристики материала

## Химический состав материала\*

Углерод – до 0,008 %  
Кремний – до 0,8 %  
Марганец – до 0,8 %  
Никель – до 0,6 %  
Сера – до 0,025 %  
Фосфор – до 0,035 %  
Хром – от 16 % до 18 %  
Титан – до 0,8 %  
Медь – до 0,3 %  
Железо – до 79 %

\* ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные.

# Материал и методы испытаний.

Для испытаний были изготовлены пять одинаковых образцов из листа стали марки 08X17Т. Все образцы должны быть вырезаны вдоль проката

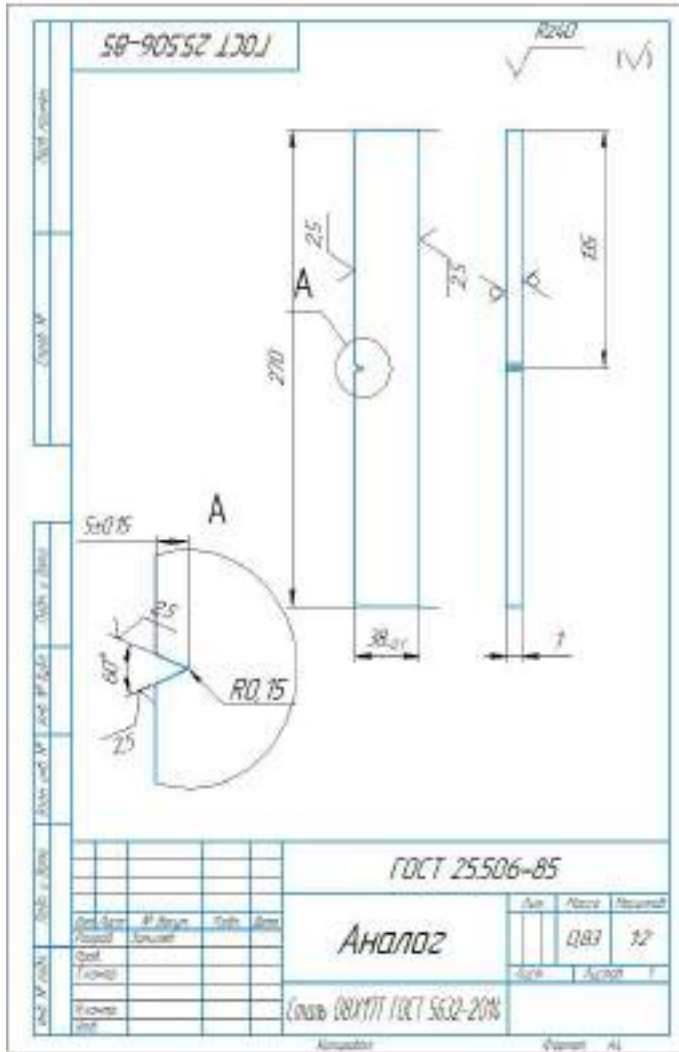


Рисунок 4. Чертеж образца.



Рисунок 5. Пример изготовленного образца.

# Материал и методы испытаний.



Рисунок 6. Разрывная машина UTC-111.2-50-32

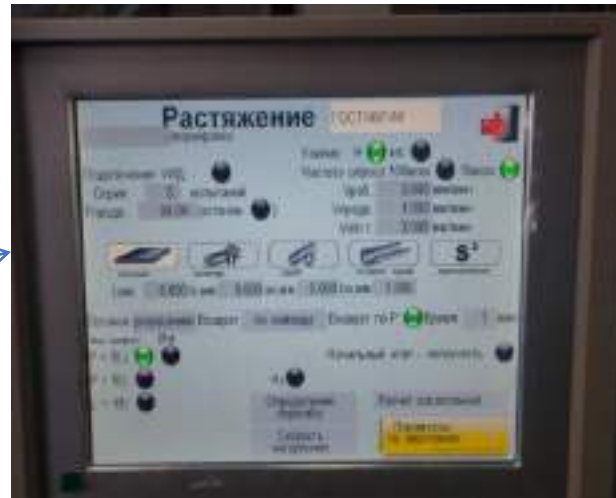


Рисунок 7. Панель с заданными условиями



Рисунок 8. Образец, установленный в разрывную машину.

Испытания проведены на базе предприятия ООО «Тестсистемы»



# Результаты испытаний.

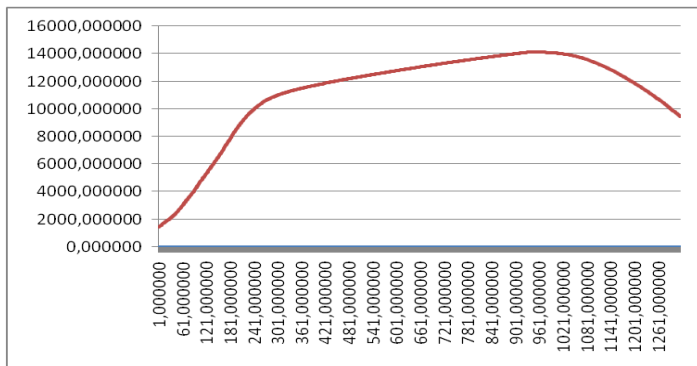


Рисунок 9. График зависимости смещений от усилия для образца №1. Максимальные усилия для образца №1 равны 14125 Н

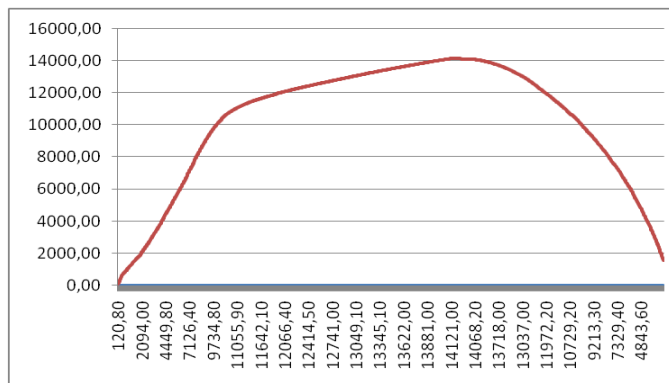


Рисунок 10. График зависимости смещений от усилия для образца №2. Максимальные усилия для образца №2 равны 14136 Н

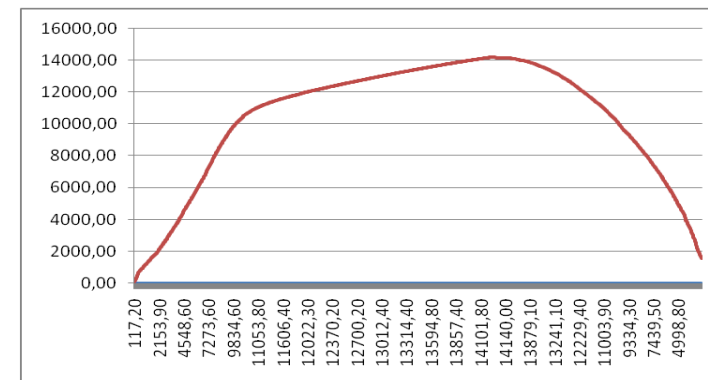


Рисунок 11. График зависимости смещений от усилия для образца №3. Максимальные усилия для образца №3 равны 14203 Н

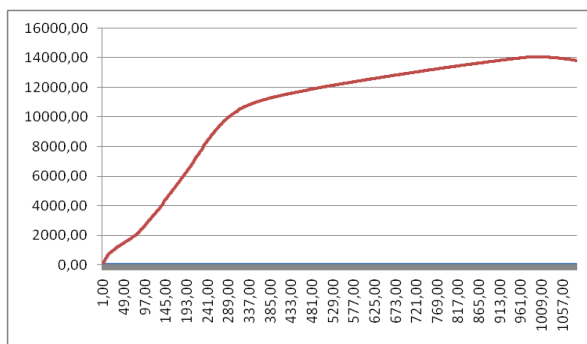


Рисунок 12. График зависимости смещений от усилия для образца №4. Максимальные усилия для образца №4 равны 14054 Н

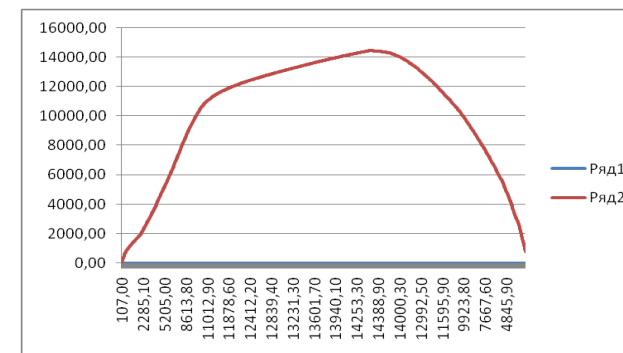


Рисунок 13. График зависимости смещений от усилия для образца №5. Максимальные усилия для образца №5 равны 14435 Н.

# Результаты испытаний.

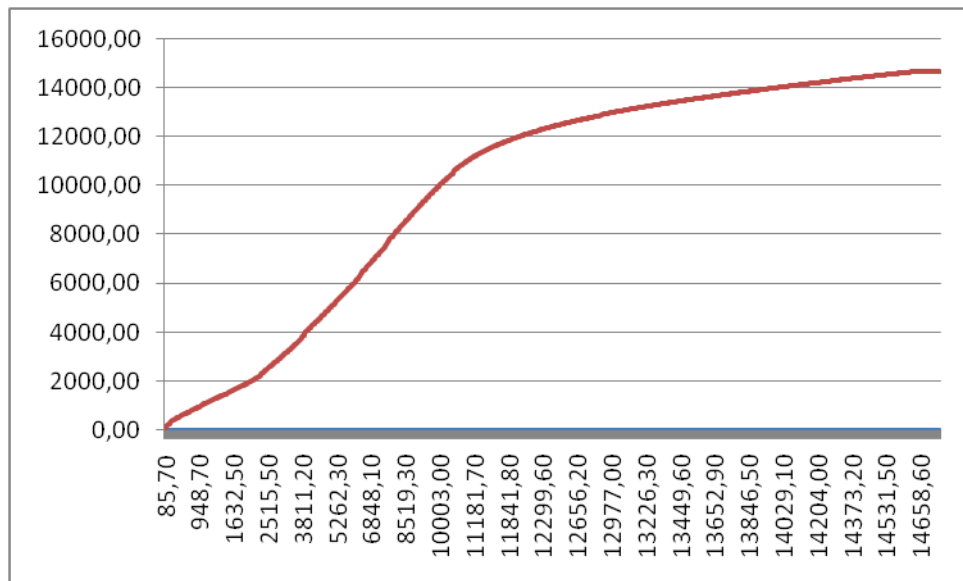


Рис. 14. Момент образования трещины на образце.

Усилия, необходимые для образования трещины 14660 Н



Рис. 15. Начало зарождения трещины на образце

# Обработка результатов испытаний.

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{true} = \varepsilon - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (4)$$

Номинальные напряжения (Па)	Реальные напряжения	Номинальные смещения (мм)	Реальные смещения
11064.70	920.117	2.16	0.000
12234.40	1178.000	2.66	0.146
12442.90	1244.000	2.80	0.184
13101.80	1507.000	3.37	0.324
13517.50	1722.000	3.84	0.426
13774.20	1878.000	4.18	0.494
13920.70	1971.000	4.38	0.532
14069.40	2070.000	4.59	0.570
14258.30	2203.000	4.87	0.619
14619.90	2485.000	5.46	0.715
14644.40	2582.000	5.70	0.751

Таблица 2. Перевод номинальных значений напряжений и смещений в реальные.

# Создание 3D модели



Рисунок 16. Лопатка,  
покрытая специальным  
составом



Рисунок 17. 3D  
сканер  
RangeVision PRO



Рисунок 18.  
Панель для  
калибровки



Рисунок 19.  
Лопатка на стенде  
для сканирования



Рисунок 20. САД-  
программы

# Создание конечно-элементной модели разрушения в программном комплексе Simulia ABAQUS

- Для расчетов был выбран встроенный в ABAQUS метод EXPLICIT.

Преимущества этого метода:

- является вычислительно эффективным для анализа больших моделей с относительно коротким временем динамического отклика и для анализа чрезвычайно прерывистых событий или процессов;
- позволяет определить очень общие условия
- использует последовательную теорию больших деформаций - модели могут претерпевать большие вращения и большие деформации;
- можно использовать геометрически линейную теорию деформаций — деформации и вращения считаются малыми;
- позволяет использовать автоматическое или фиксированное приращение времени

# Граничные условия

$$U_1 = 0$$

$$U_{r1} = U_{r2} = U_{r3} = 0$$

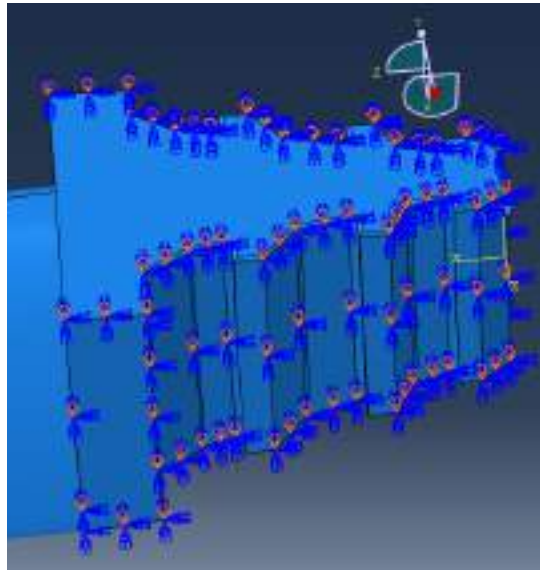


Рисунок 21. Граничные условия модели лопатки по оси X

$$U_2 = 0$$

$$U_{r1} = U_{r2} = U_{r3} = 0$$

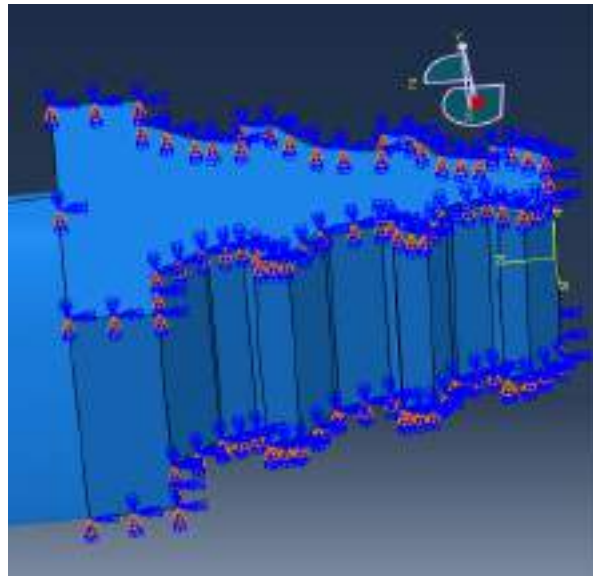


Рисунок 22. Граничные условия модели лопатки по оси Y

$$U_3 = 0$$

$$U_{r1} = U_{r2} = U_{r3} = 0$$

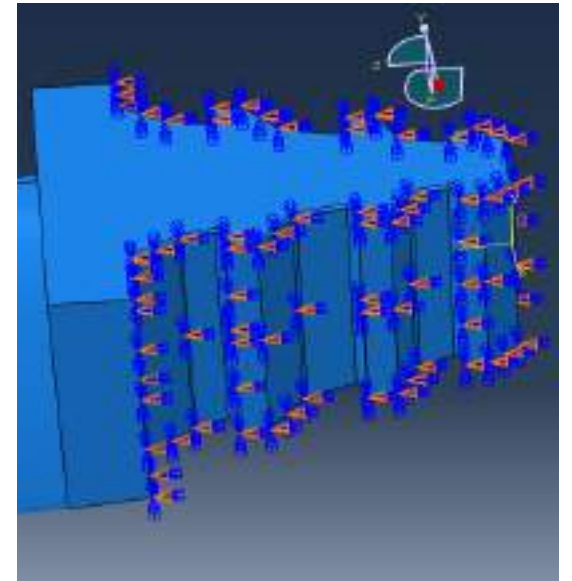


Рисунок 23. Граничные условия модели лопатки по оси Z

# Нагрузки

Перемещения действуют только в направлении оси Z.  
Перемещение достигает значения 5 мм в секунду

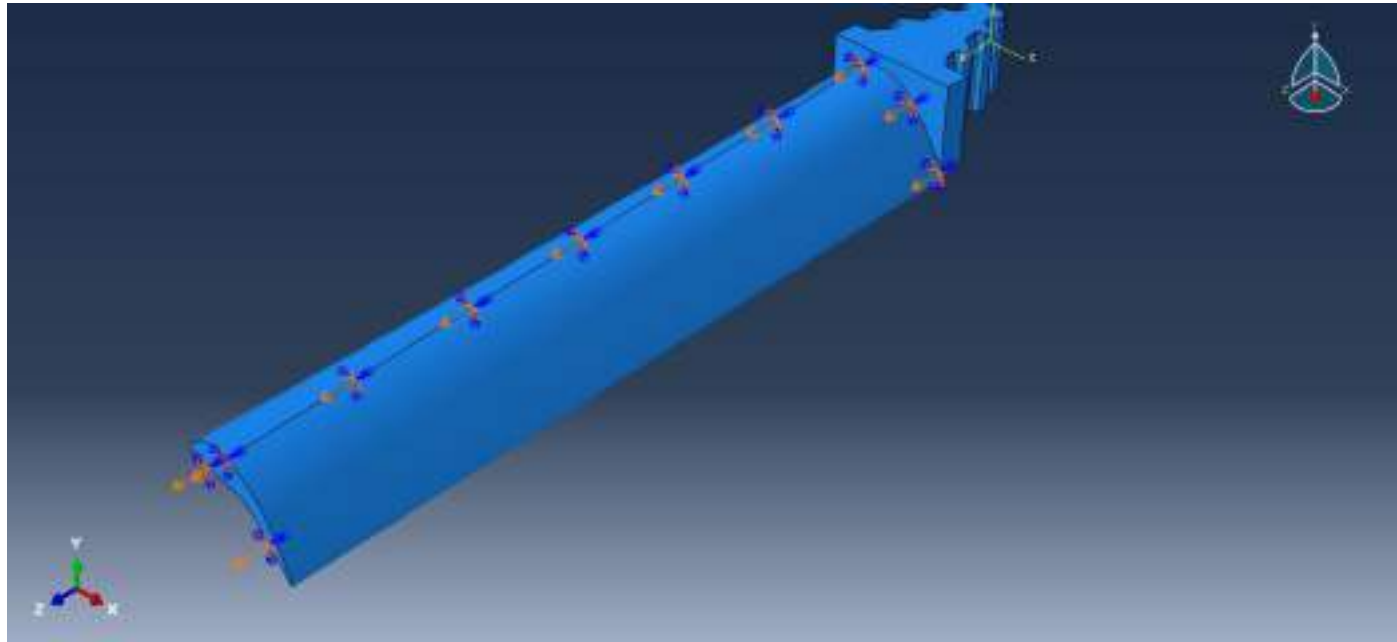


Рисунок 24. Нагрузка

# Верификация

Верификация – это процедура проверки правильности выполнения расчета МКЭ

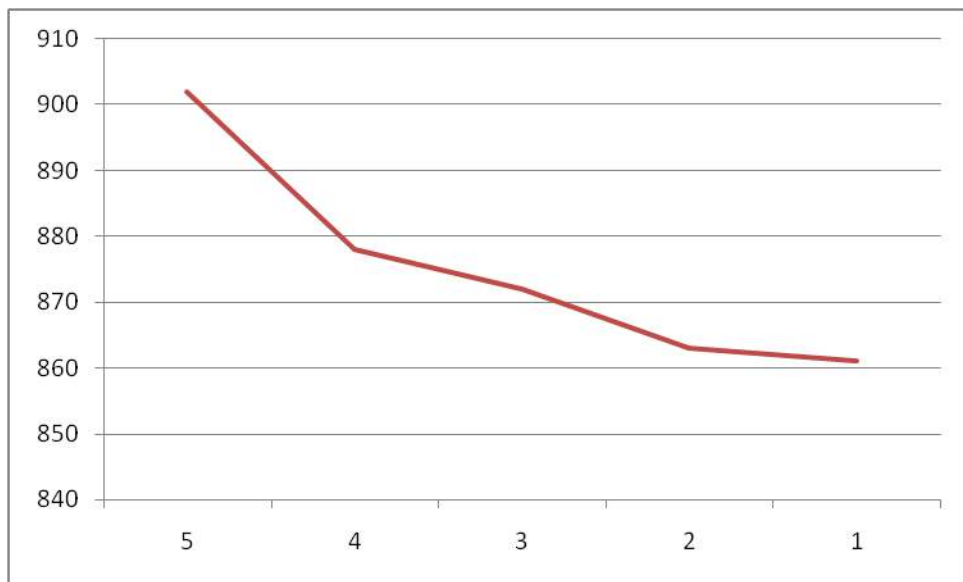


Рисунок 25. График зависимости эквивалентных напряжений по Мизесу от размера элемента.

№	Размер конечного элемента, мм	Экв. Напряжение по Мизесу, МПа
1	5	902
2	4	878
3	3	872
4	2	863
5	1	861

Таблица № 3 . Полученные значения после изменения размера конечного элемента.



# Конечно-элементная сетка

По отсканированной 3D модели была построена конечно-элементная модель, состоящая из 433764 элементов и 79341 узлов. Сетка лопатки состоит из тетрадных элементов (C3D4)

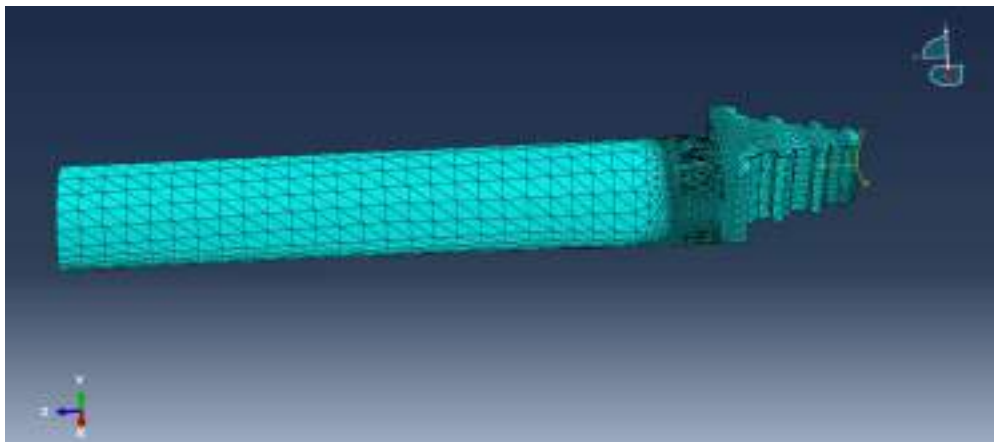


Рисунок 26. Конечно - элементная сетка лопатки

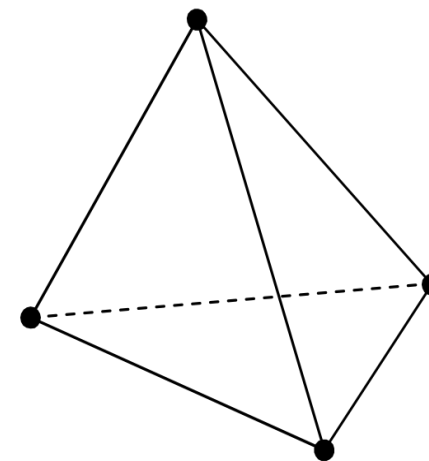


Рисунок 27. Вид тетрадного элемента

# Результат моделирования

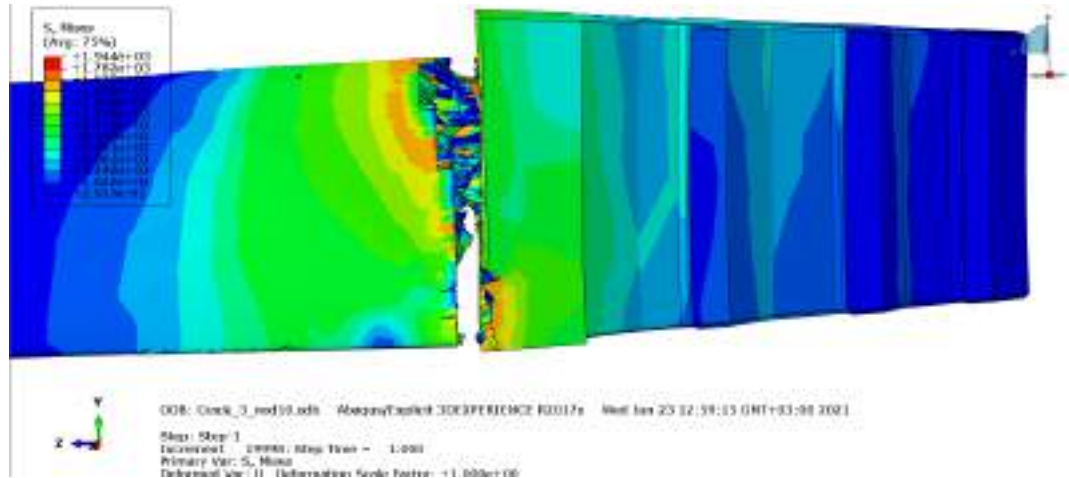


Рисунок 28. Трещина в конце расчета.

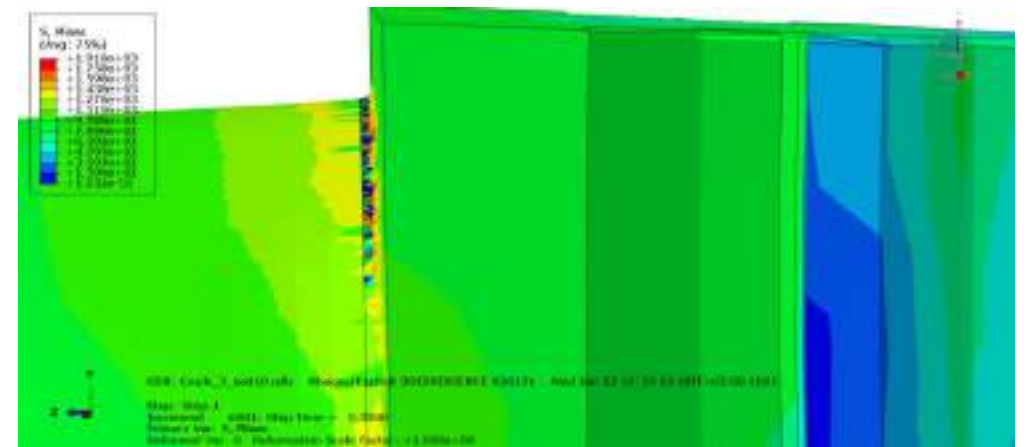


Рисунок 29. Начало появления трещины.

## Выводы:

- Представлен аналитический обзор строения лопаток турбин, его геометрических параметров, видов и причин разрушения при одноосном растяжении.
- Экспериментально определены физико-механические характеристики материала лопатки турбины.
- Зона пластичности: 2,157 – 5,698 мм.
- Получена конечно-элементная модель разрушения лопатки газотурбины в программном комплексе Simulia ABAQUS. Определены опасные места лопатки газотурбины, в которых возможно возникновение трещины.