

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Электромеханический факультет  
Кафедра теоретической и прикладной механики

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОПРОВОДА

Выполнил: студент гр. 4-33 Рыдзев Д. В.

Руководитель: к. т. н. доц. Шмелева Т. В.

Иваново 2019

**Цель работы:** исследовать напряженно-деформированное состояние противопожарного водопровода с учетом сварного шва.

---

**Задачи:**

1. Провести численный и аналитический расчет напряженно-деформированного состояния трубы пожарного водопровода. Сравнить полученные значения с результатами экспериментального исследования.
2. Создать и рассчитать компьютерные модели сварных труб с различными дефектами сварного шва. Выявить закономерности возникновения напряжений и проанализировать влияние дефектов на прочность конструкции.

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

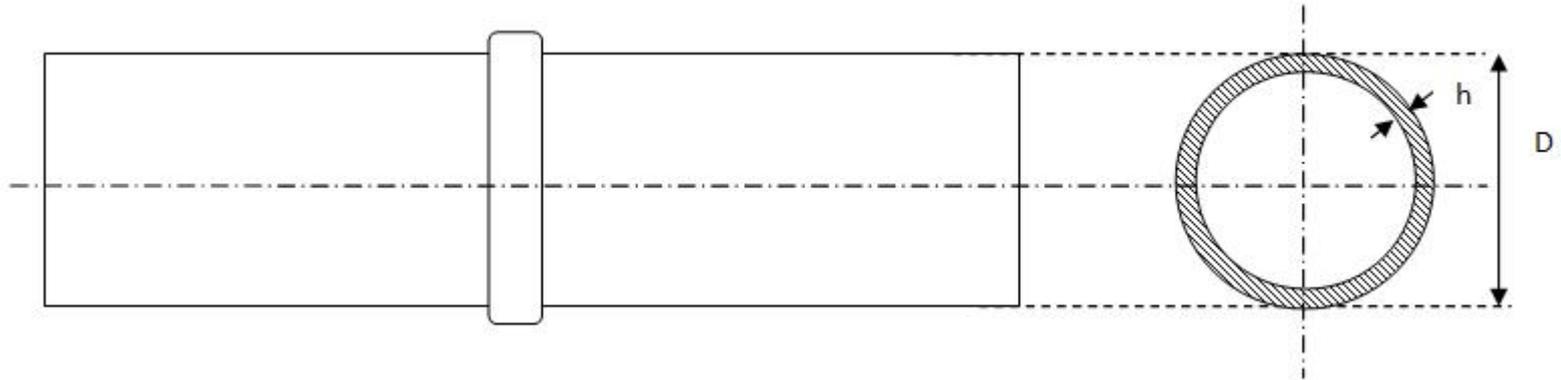


Рис. 1 Расчетная схема

Исходные данные:

Толщина стенки трубы  $h = 4$  мм

Внешний диаметр трубы  $D = 76$  мм

Материал трубы: сталь 20

Внутреннее давление  $P = 10$  атм (1 МПа)

Математическая постановка:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \sigma_{ij} + X_j = 0 \quad (j = 1, 2, 3);$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3);$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \delta_{ij}\lambda\varepsilon_{kk} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ

Внутренний радиус трубопровода

$$R = \frac{D}{2} - h = \frac{0.076}{2} - 0.004 = 0.034 \text{ м}$$

Отсекаем поперечным сечением часть трубопровода и составляем для него уравнение равновесия

$$P = \sigma_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$$

где  $\sigma_m$  – продольные напряжения в трубопроводе, Па;  $R$  – внутренний радиус трубопровода, м;  $h$  – толщина стенки трубопровода, м

Осевая составляющая сил давления

$$P = \pi \cdot R^2 \cdot p$$

где  $R$  – внутренний радиус трубопровода, м;  $p$  – внутреннее давление, Па

Продольные напряжения

$$\sigma_m = \frac{p \cdot R}{2 \cdot h} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0.034}{2 \cdot 0.004} = 4.25 \text{ МПа}$$

Для нахождения кольцевых напряжений воспользуемся известной формулой Лапласа

$$\frac{p}{h} = \frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t}$$

где  $\rho_m$  – радиус кривизны дуги меридиана срединной поверхности, м;  $\rho_t$  – радиус кривизны нормального сечения, м;  $\sigma_t$  – значение кольцевых напряжений, Па

Для трубопровода  $\rho_m = \infty$ ,  $\rho_t = R$ , поэтому

$$\sigma_t = \frac{p \cdot R}{h} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0.034}{0.004} = 8.5 \text{ МПа}$$

Так как элемент  $ABCD$ , выделенный из цилиндрической оболочки, находится в двухосном напряженном состоянии, изображенном на рис. 25, то

$\sigma_1 = \sigma_t$ ,  $\sigma_2 = \sigma_m$ ,  $\sigma_3 = 0$  где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – три главных напряжения (с учетом, что  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )

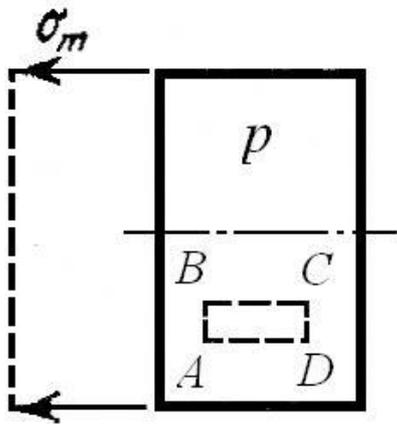


Рис. 2 Схема отсеченной части трубопровода

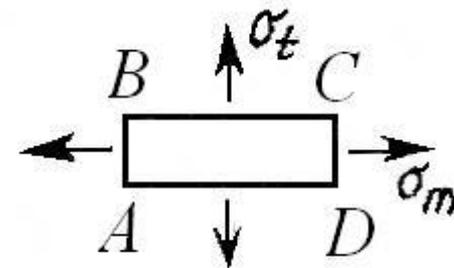


Рис. 3 Выделенный элемент

Эквивалентные напряжения по Мизесу: 
$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} = 7.361 \text{ МПа}$$

# РАСЧЕТ В ANSYS



Рис. 4 Геометрия в ANSYS

Рис. 5 Граничные условия

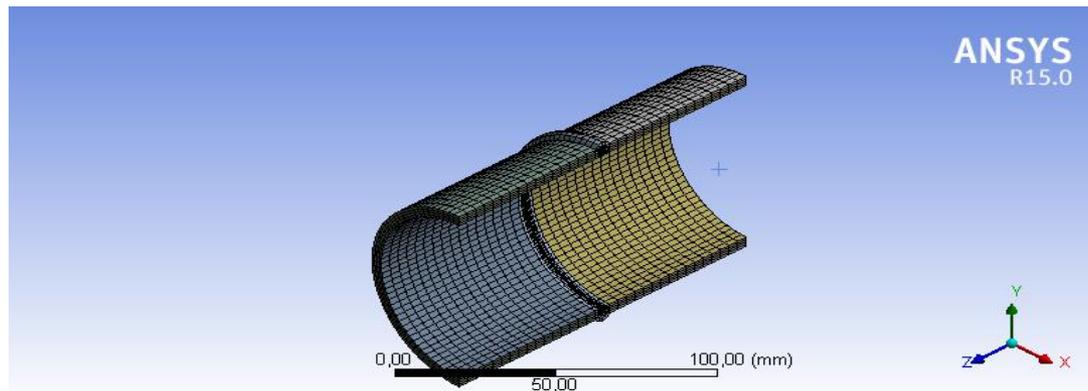


Рис. 6 Конечно-элементная сетка

# РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЕТА В ANSYS

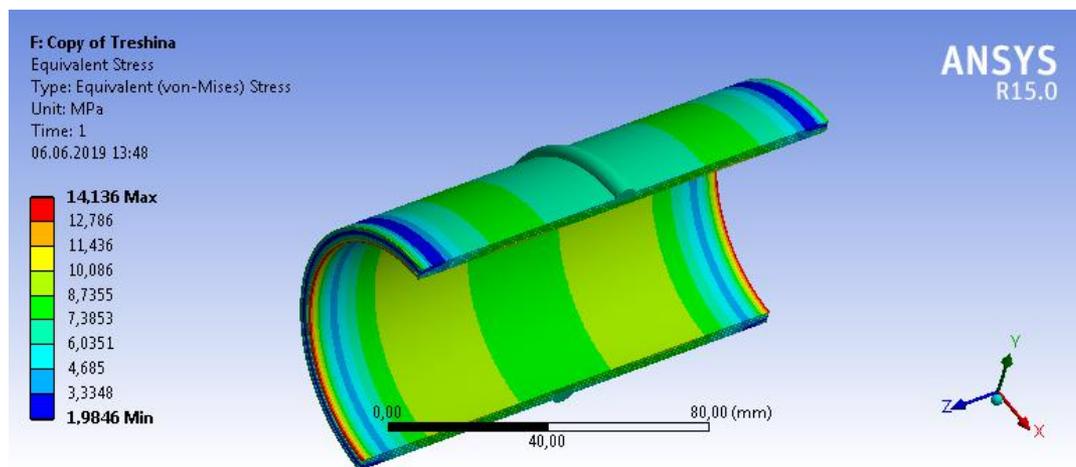


Рис. 7 Напряжения, возникающие в конструкции

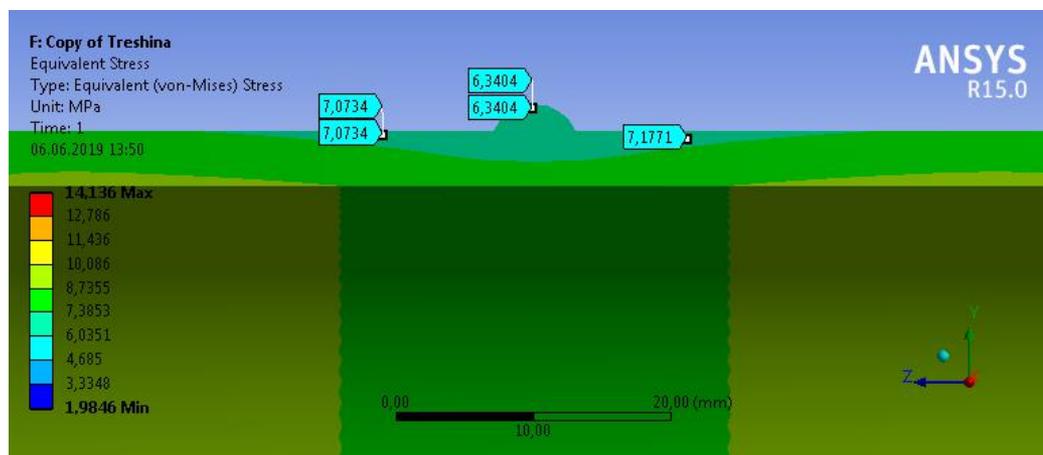


Рис. 8 Напряжения, возникающие возле сварного шва

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



Рис. 9 Вид установки

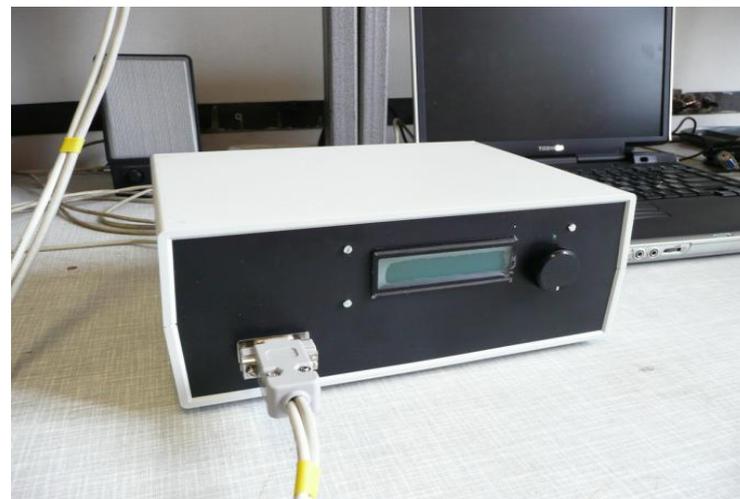


Рис. 10 СИТОН ТЕСТ



Рис. 11 Установка с измерительным оборудованием

# СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

	Аналитический расчет	Численный расчет в ANSYS	Результаты экспериментального исследования
Напряжения на поверхности сварного шва, МПа	–	6.3	12
Напряжения на расстоянии 10 мм от сварного шва, МПа	–	7.1	8

# ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ ШВОВ

---



Рис. 12 Непровар

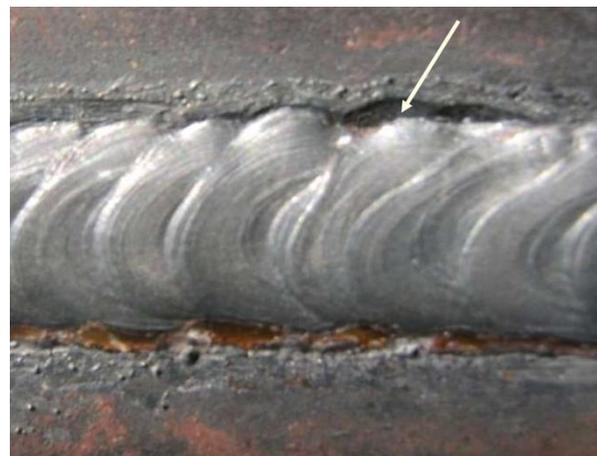


Рис. 13 Подрезы



Рис. 14 Прожог



Рис. 15 Трещина

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФФЕКТОВ В ANSYS

## 1. Н е п р о в а р

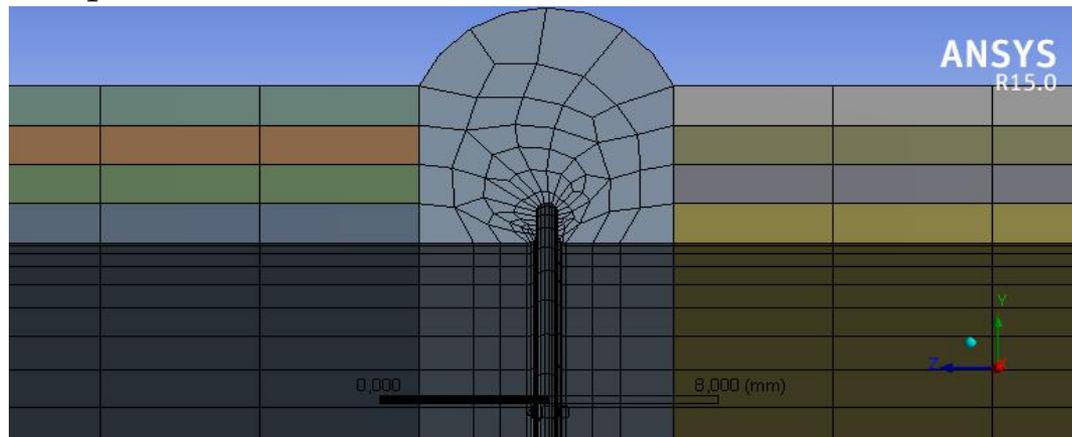


Рис. 16 Сетка в области непровара

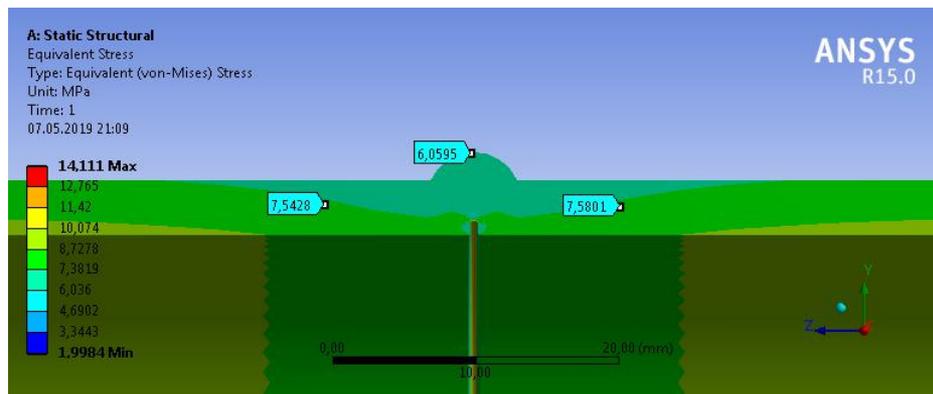


Рис. 17 Напряжения в области сварного шва

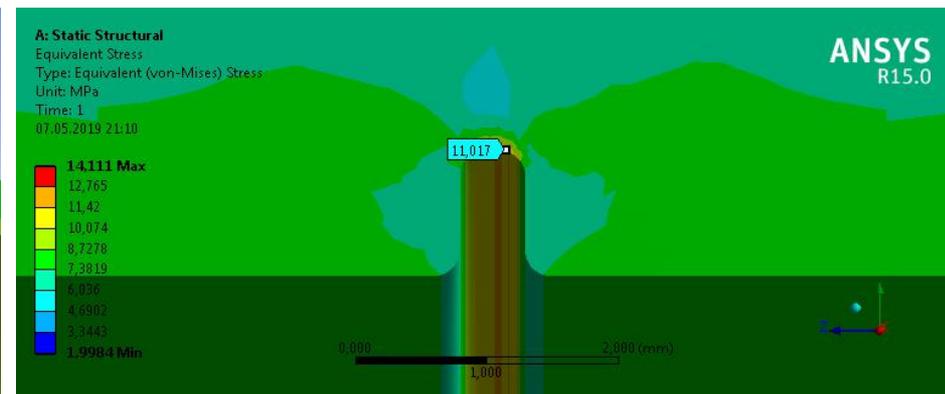


Рис. 18 Напряжения в области непровара

## 2. Подрезы

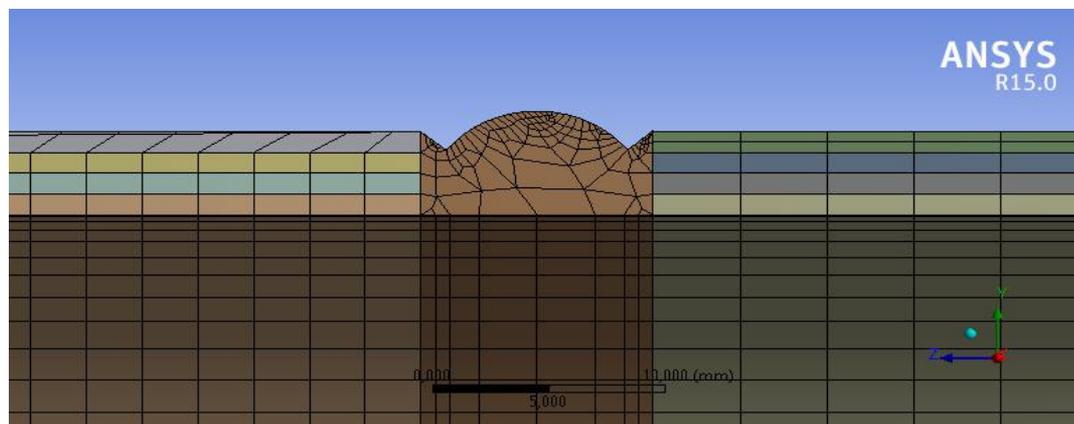


Рис. 19 Сетка в области подрезов

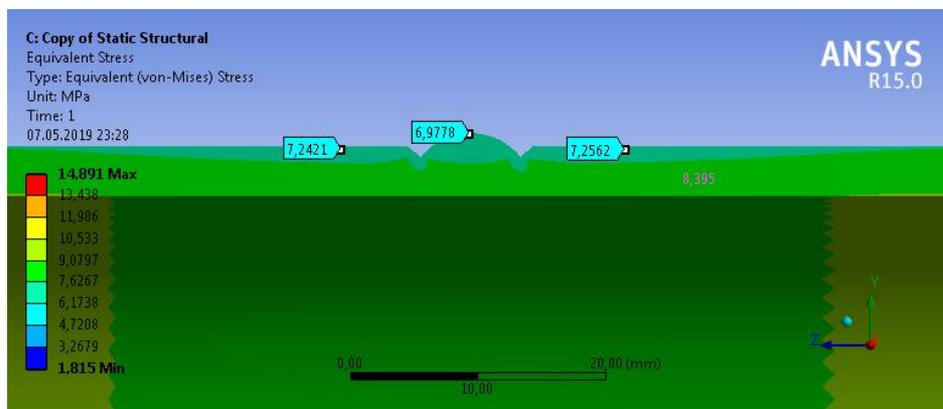


Рис. 20 Напряжения в области сварного шва

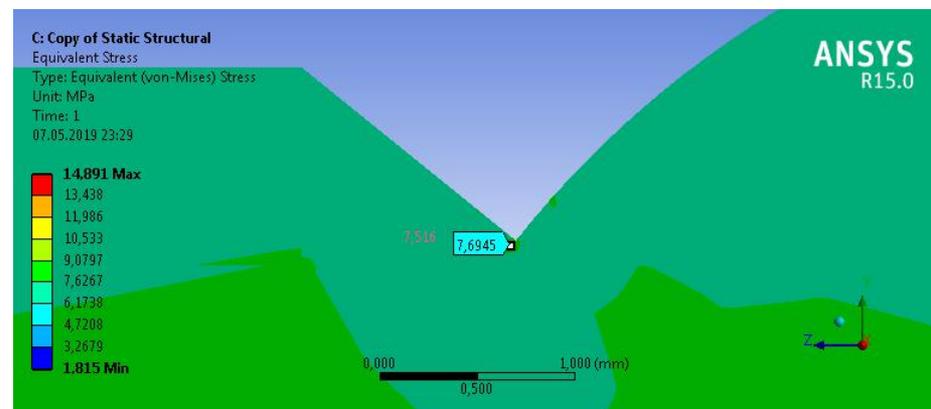


Рис. 21 Напряжения в области подреза

### 3. П р о ж о г

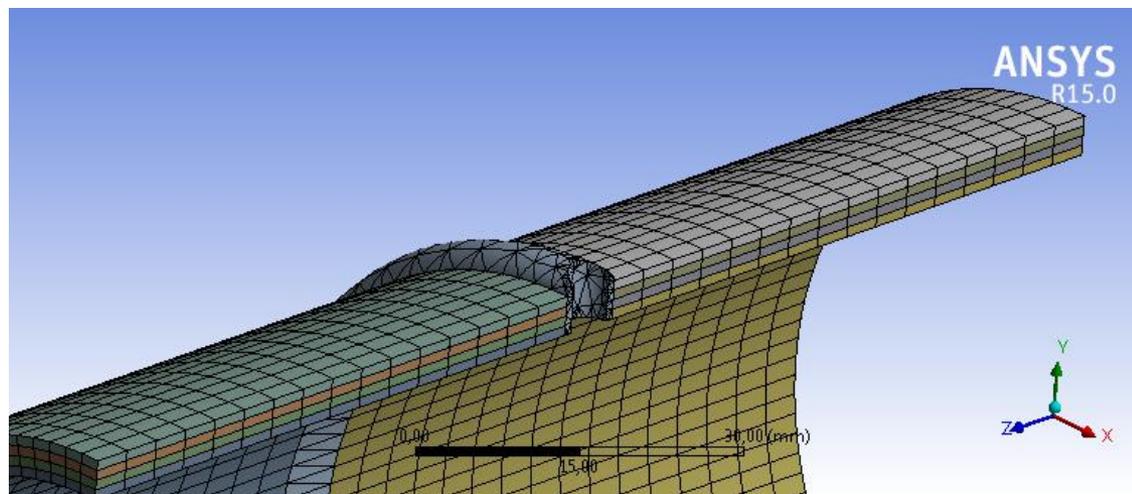


Рис. 22 Сетка модели с прожогом

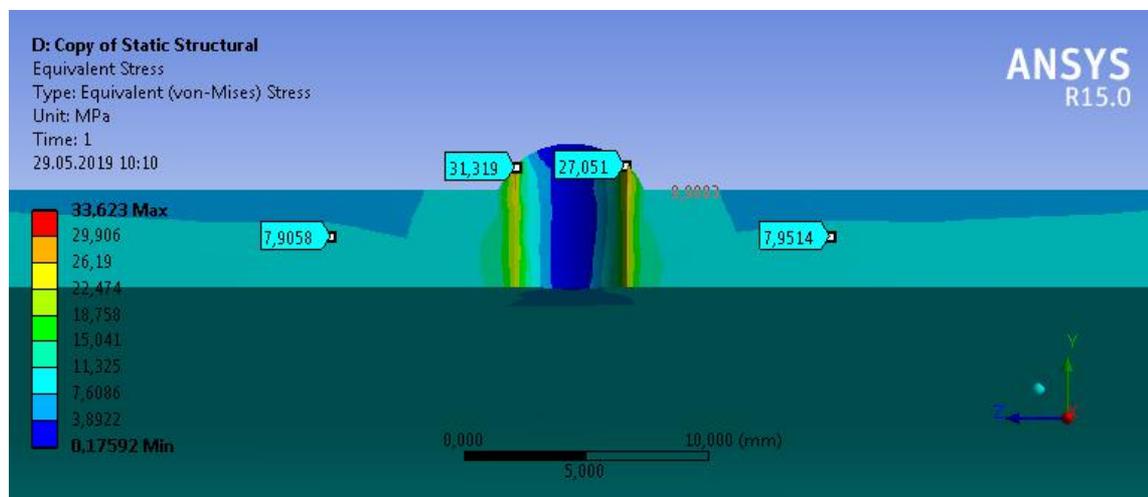


Рис. 23 Напряжения в области прожога

#### 4. Трещина

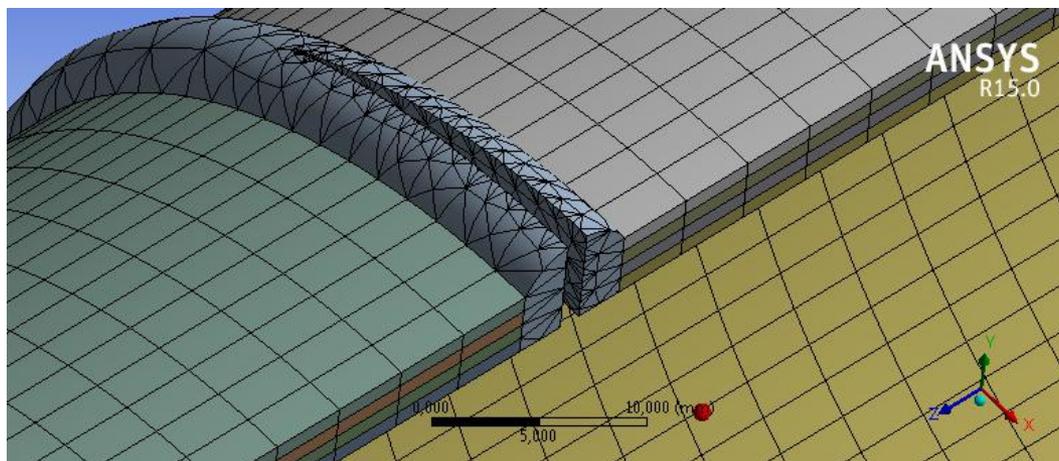


Рис. 24 Сетка модели с трещиной

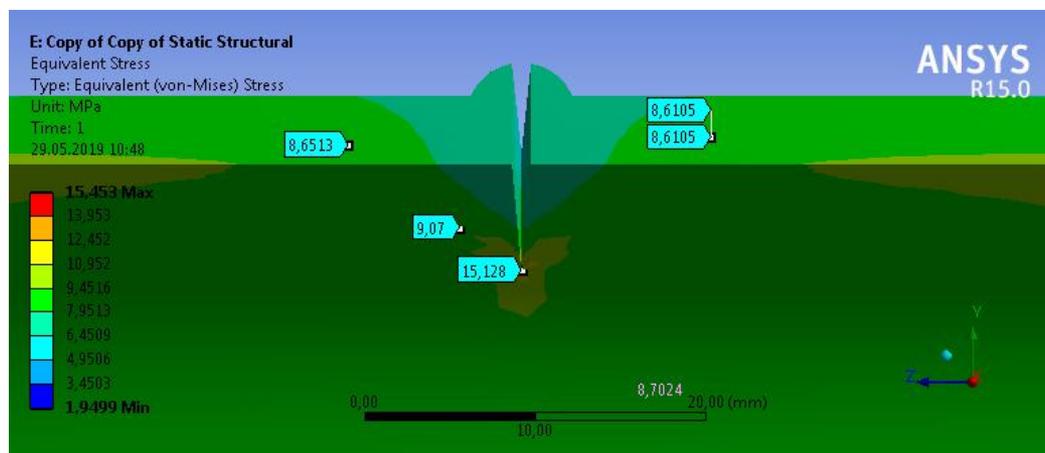


Рис. 25 Напряжения в области трещины

# ВЫВОДЫ

---

- Сварной шов без дефекта создает область упрочнения конструкции, в которой не концентрируются напряжения.
- Различия в аналитическом и численном решениях объясняются тем, что аналитика не учитывала влияние сварного шва.
- Аппаратура СИТОН ТЕСТ не очень подходит для определения эксплуатационных напряжений, так как ее первоочередное назначение – фиксация остаточных напряжений.
- Дефекты сварного шва могут оказывать очень значительное влияние на прочность конструкции. Наиболее опасными являются сквозные дефекты, такие как прожог и трещина.
- Большую опасность представляют трещины. Под действием напряжений скорость их распространения может быть соизмерима со скоростью звука. А это зачастую приводит к разрушению конструкции.