

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РОСТ ДЕФЕКТОВ КРН

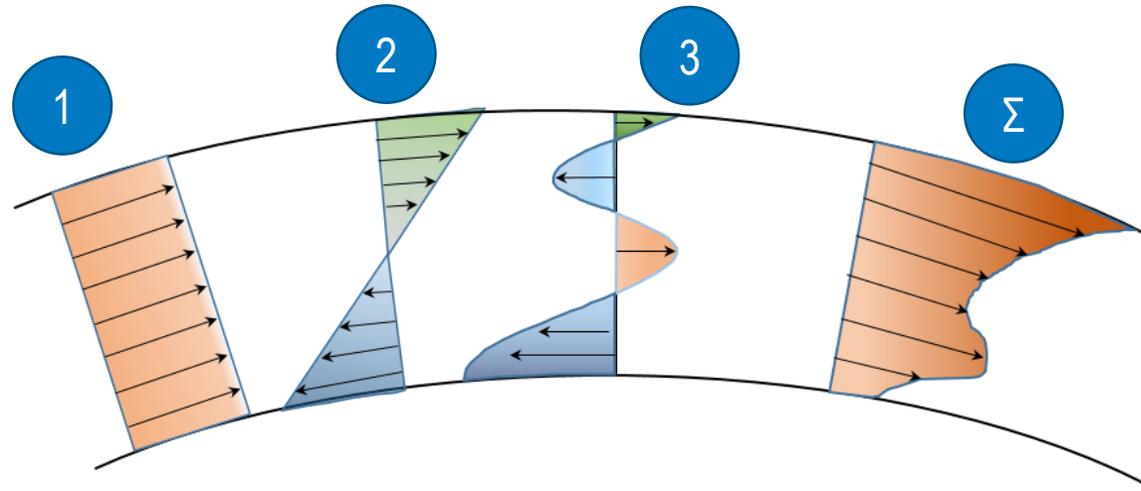
ПОГУЛЯЕВ СТЕПАН ИВАНОВИЧ

Заместитель начальника лаборатории исследования и профилактики разрушения  
производственных объектов

КНТЦ управления техническим состоянием и целостностью ПО

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

# Распределение компонентов НДС в стенке трубы



1

Эксплуатационные

2

Остаточные  
уравновешенные в  
кольцевом направлении

3

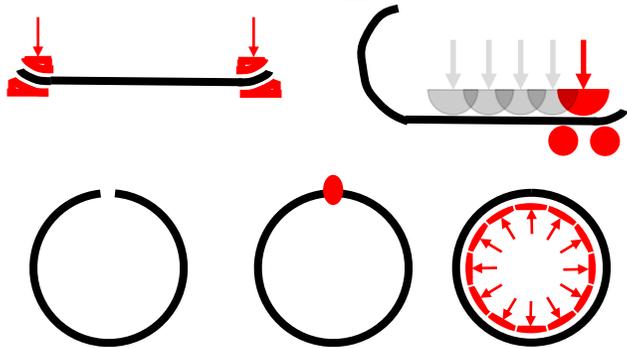
Остаточные  
уравновешенные по  
толщине стенки

$\Sigma$

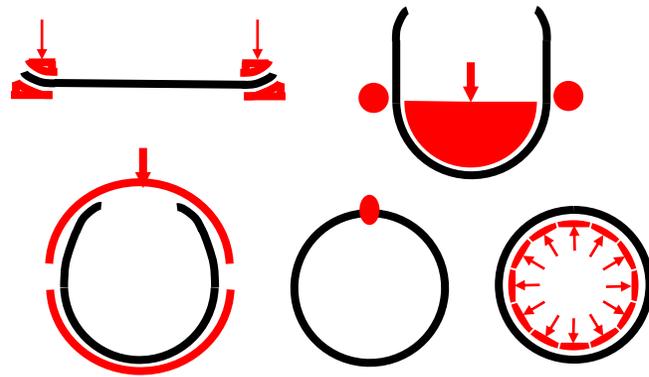
Суммарные напряжения

# Методы формовки сварных труб

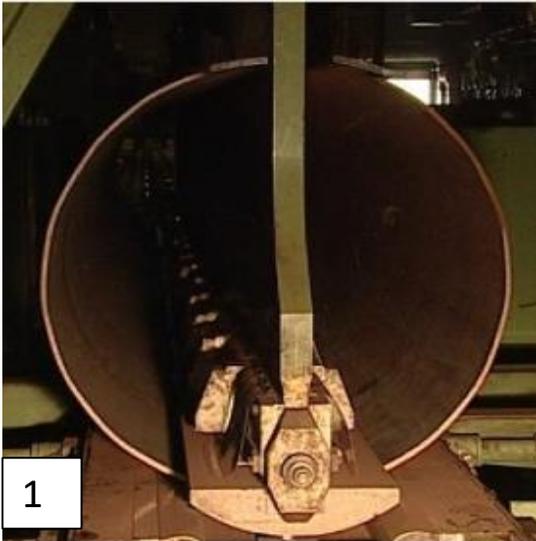
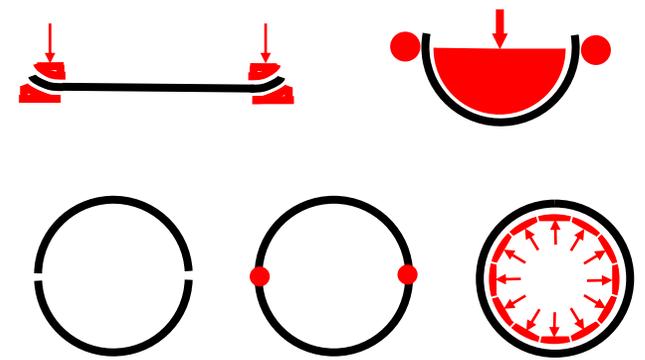
JCOE



UOE



2C



1



2



3

1 - Мокроусов, В. И. Прочность стальных труб при дефекте внешней фаски продольного сварного шва/ В. И. Мокроусов. // Молодой ученый. — 2015. — № 20 (100). — С. 44-49.

2,3 - Боклаг Н.Ю. Совершенствование процесса и оборудования для повышения качества формообразования труб большого диаметра на прессе предварительной формовки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09. - Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина Екатеринбург, 2017 - 128 с.

# Моделирование напряженно-деформированного состояния в трубах

---

# Моделирование JCOE формовки трубы

Подгибка кромок

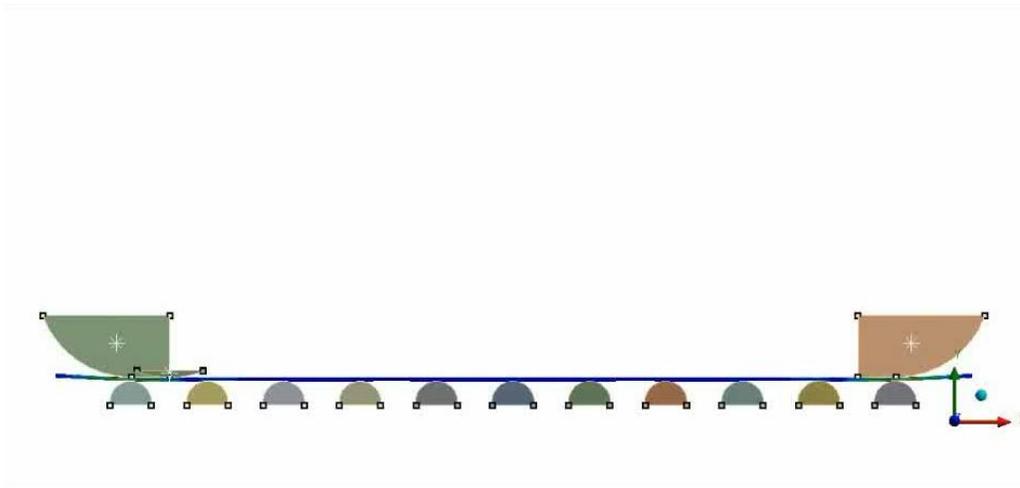
10 шагов гибки  
листа

Удаление зазора и  
сварка

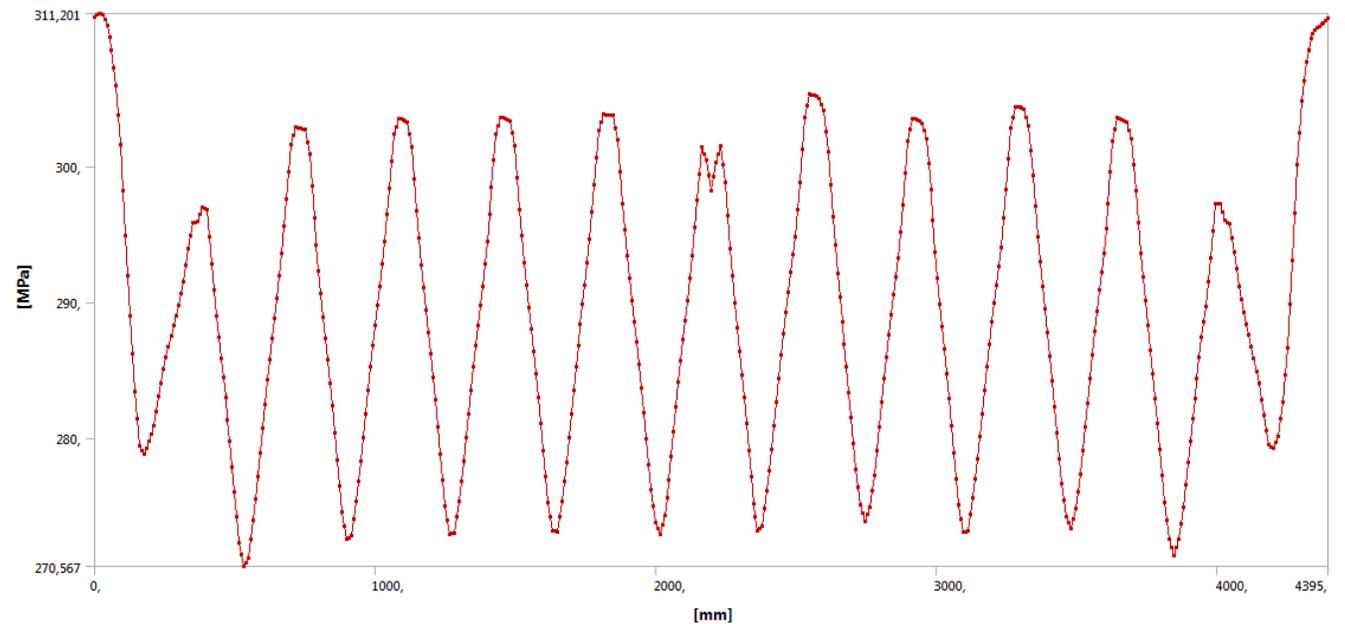
Экспандирование

Нагрузка  
внутренним  
давлением

Визуализация формовки



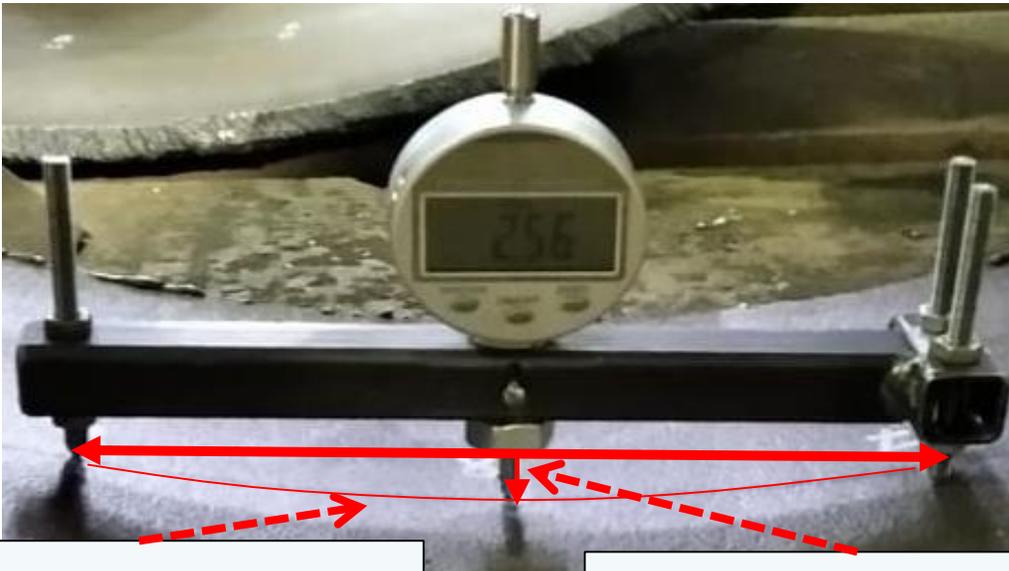
Распределение нормальных напряжений у  
наружной поверхности трубы при нагружении  
внутренним давлением



# Локальная кривизна стенки трубы

Измерена кривизна с шагом по окружности со стороны внутренней поверхности

Кривизномер



L – база кривизномера

Δ – стрелка кривизны

Локальный радиус кривизны

$$\rho = \frac{L^2}{8 \cdot \Delta}$$

Изгибные напряжения

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{E \cdot t \cdot \Delta}{2 \cdot (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{н}}) \cdot (1 - \mu^2)}$$

Кольцевые напряжения

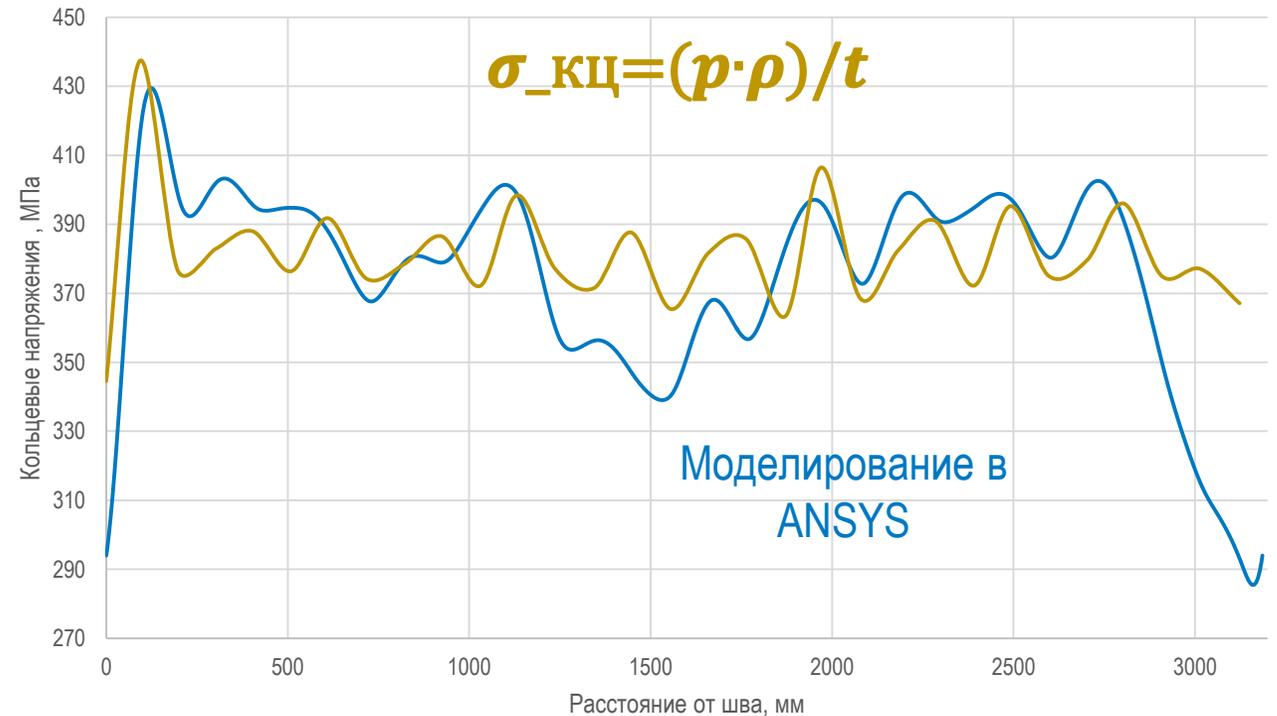
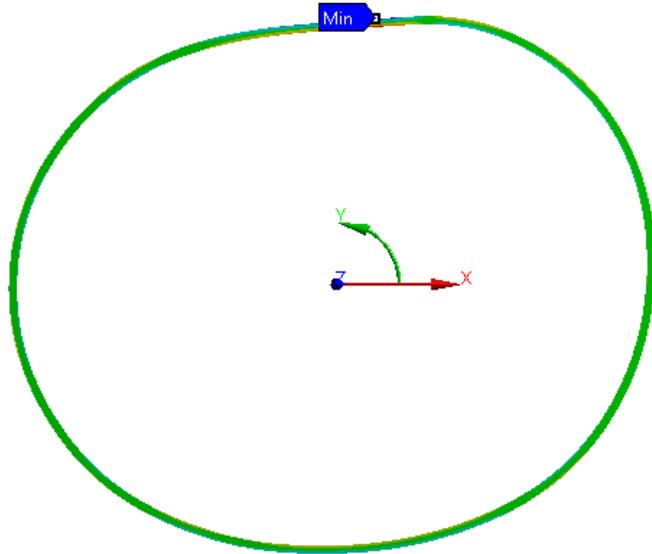
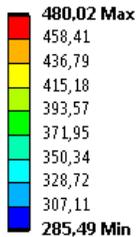
$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{p \cdot \rho}{t}$$

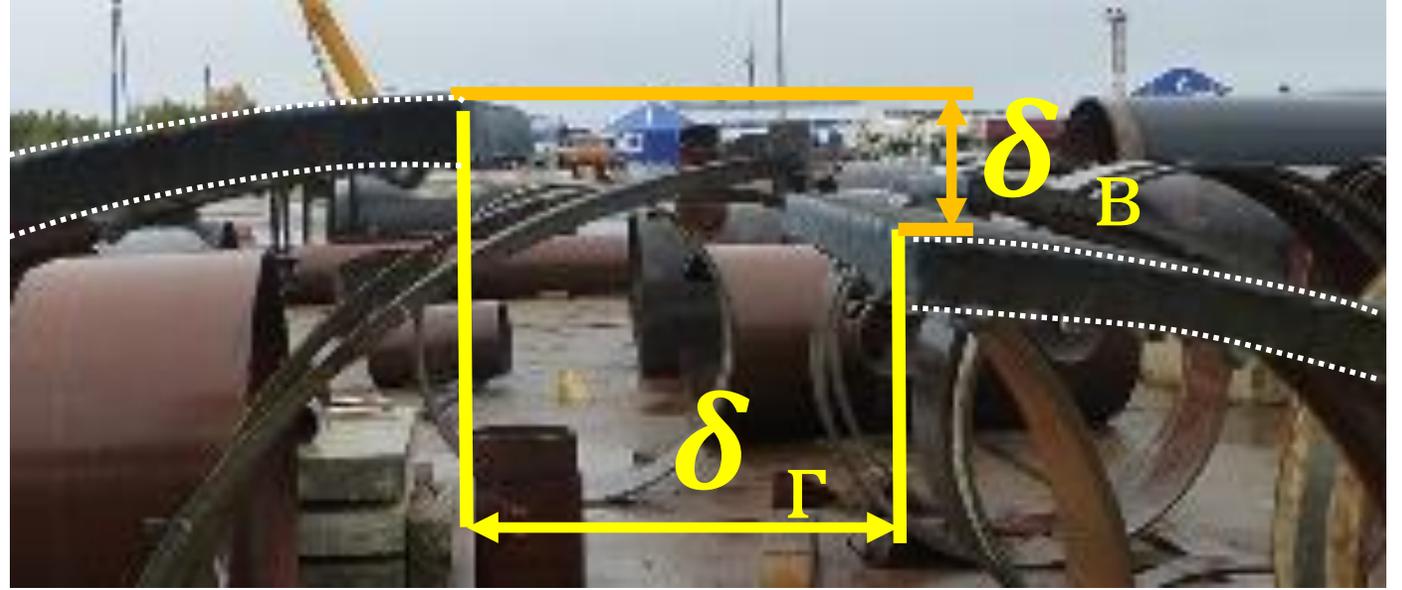
# Моделирование напряженного состояния по данным измерений локальной кривизны



Утрированная форма трубы после нагружения

16.10.2022 15:22





$$\sigma_{\text{ост}}^{\text{ср}} = \frac{E \cdot t}{(1 - \mu^2) \cdot 2 \cdot R_0^2 \cdot \pi} \left( \frac{\delta_{\Gamma}}{2} - \delta_{\text{В}} \sin(\alpha_{\sigma}) \right)$$

$\sigma_{\text{ост}}^{\text{ср}}$  - средние по окружности изгибные остаточные напряжения, МПа

$\delta_{\Gamma}$  – горизонтальное расхождение кольца, м

$\delta_{\text{В}}$  – вертикальное расхождение кольца, м

$E$  – модуль Юнга, МПа

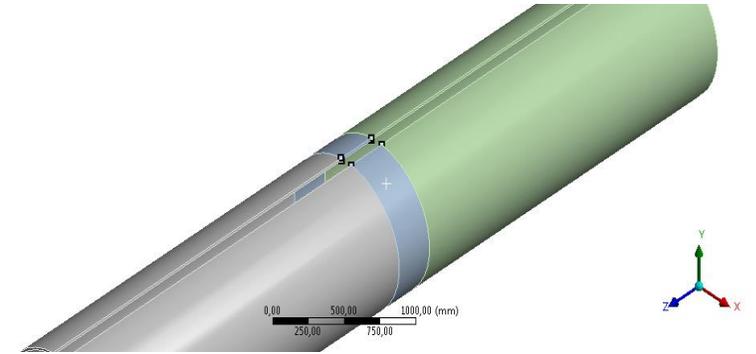
$t$  – толщина стенки трубы, м

$R_0$  - радиус серединой поверхности разрезанного кольца, м

Выполнен конечно-элементный анализ на стадии смыкания кромки труб, вырезки кольца из трубы и его разрезки

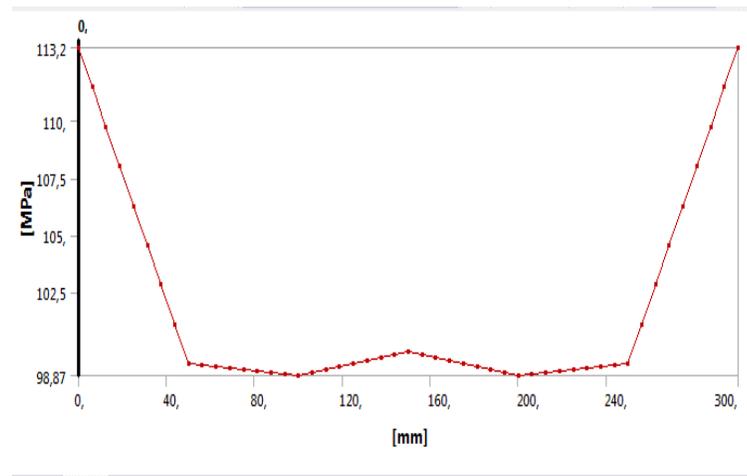
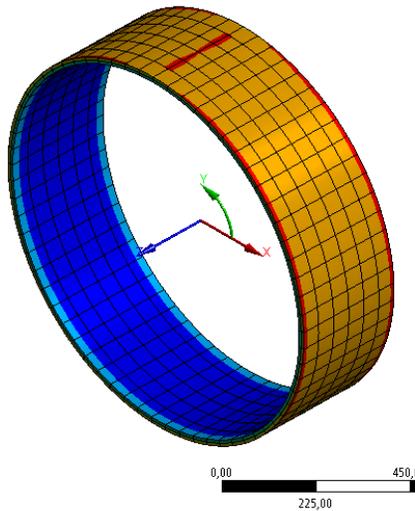
Подтверждена расчетная зависимость

$$\sigma_{\text{ост}}^{\text{ср}} = \frac{E \cdot t}{(1 - \mu^2) \cdot 2 \cdot R_0^2 \cdot \pi} \left( \frac{\delta_{\Gamma}}{2} - \delta_{\text{В}} \sin(\alpha_{\sigma}) \right)$$

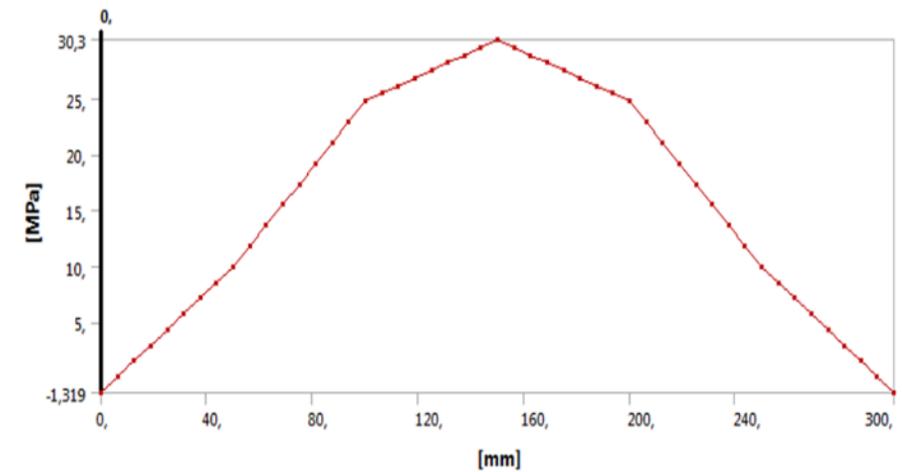


D: Труба-Кольцо у торца  
Кольцевые  
Type: Normal Stress(Y Axis)  
Unit: MPa  
Coordinate System  
Time: 3  
16.10.2022 14:46

116,17 Max  
110  
81,489  
52,978  
24,467  
-4,0441  
-32,555  
-61,066  
-89,577  
-118,09 Min



Кольцевые напряжения вдоль образующей



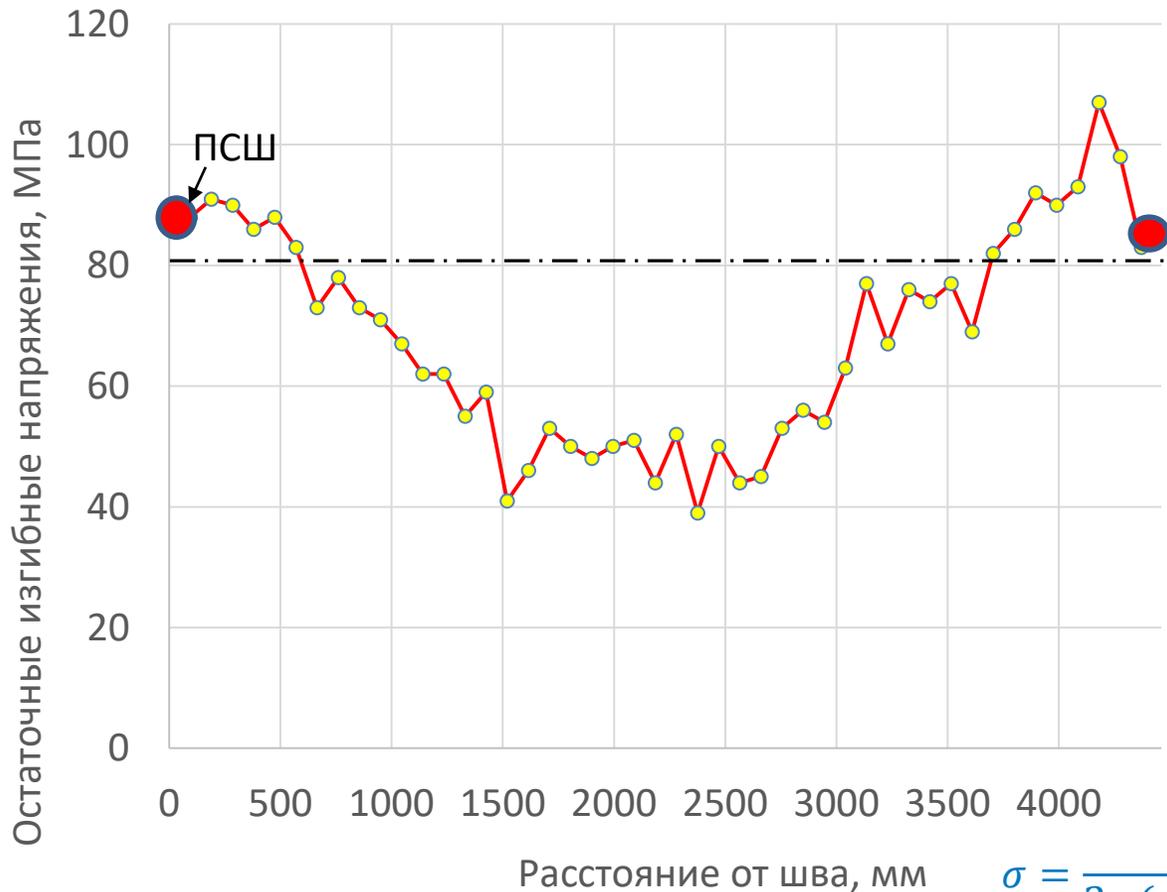
Продольные напряжения вдоль образующей

# Экспериментальная проверка

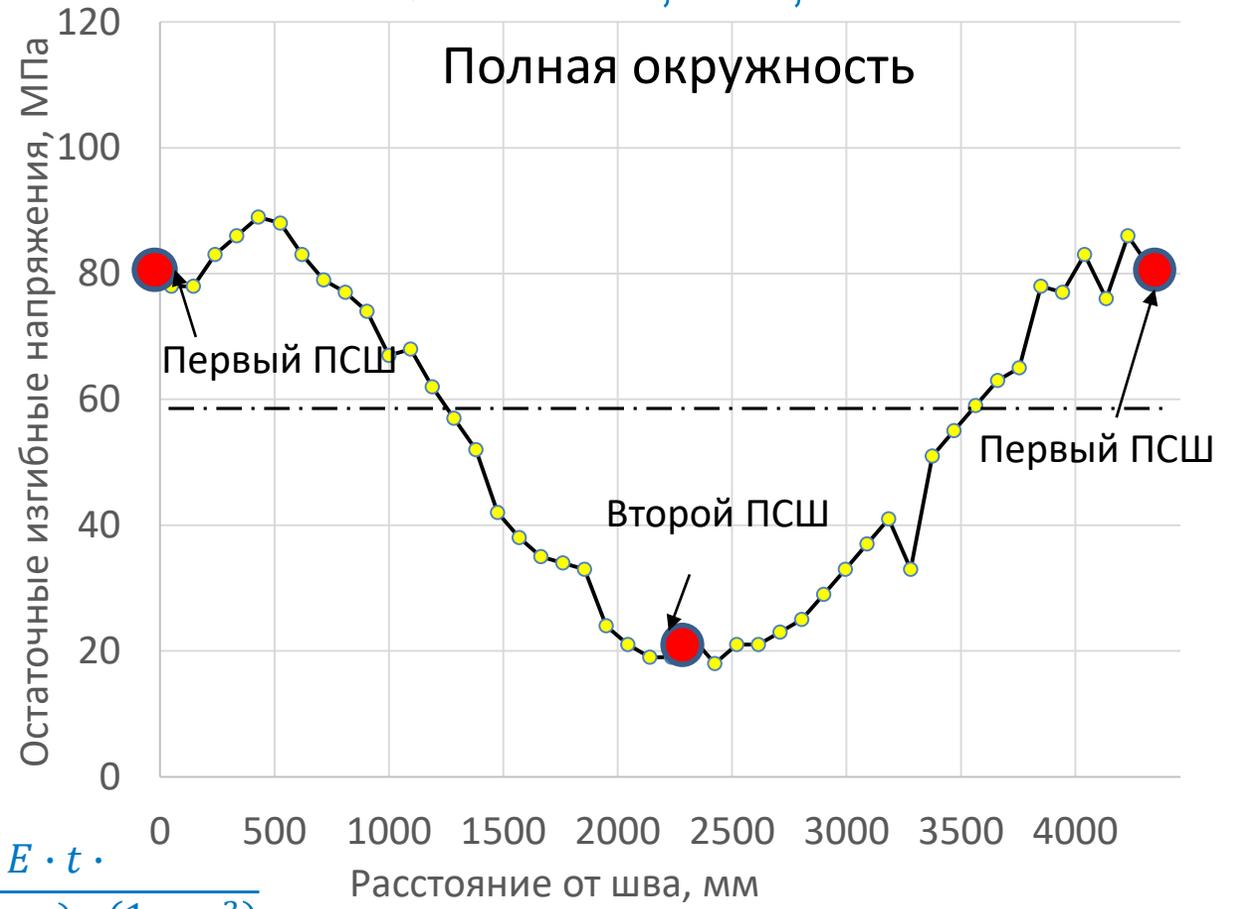
---

# Оценка остаточных изгибных напряжений

Одношовные трубы  
 Ø1420×16,5 мм, Mannesmann



Двухшовные трубы  
 Ø1420×16,5 мм, ХТЗ



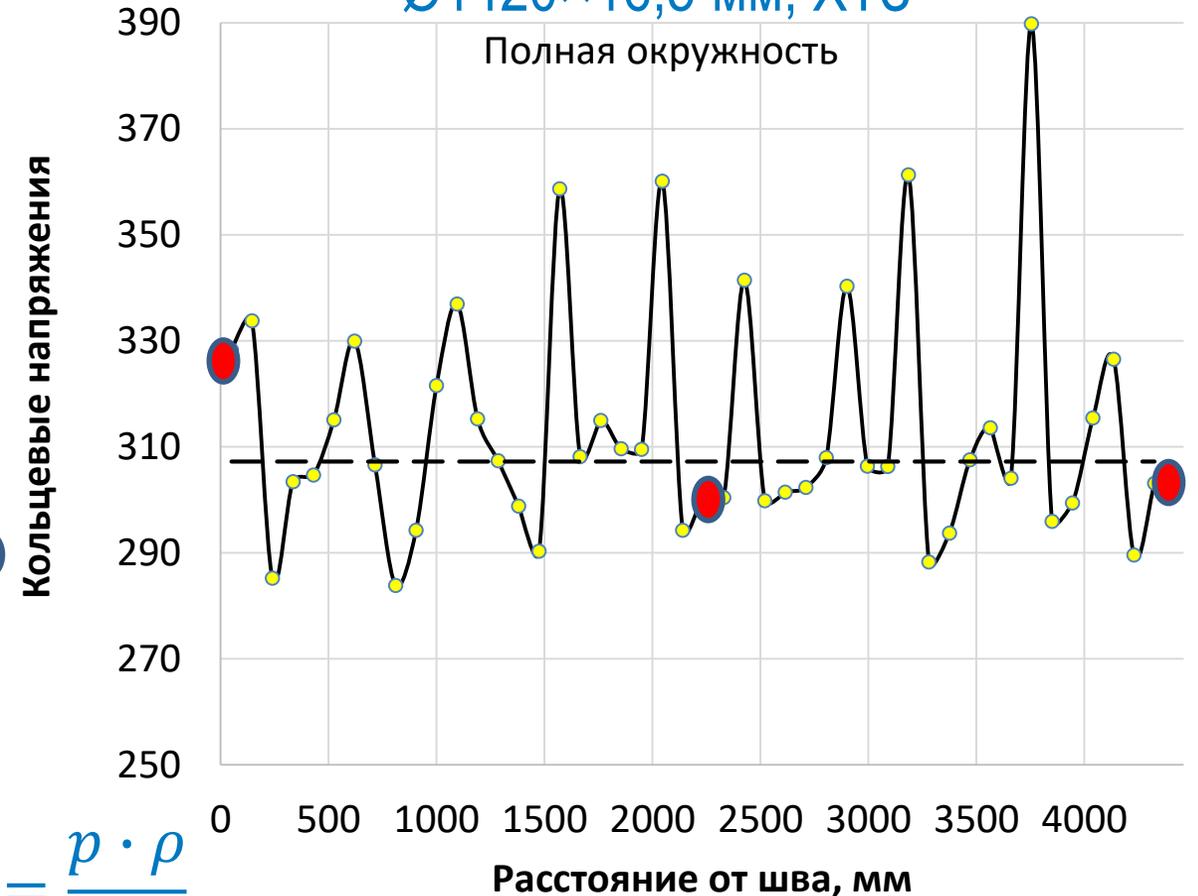
$$\sigma = \frac{E \cdot t \cdot \epsilon}{2 \cdot (\rho_K - \rho_H) \cdot (1 - \mu^2)}$$

# Оценка эксплуатационных кольцевых напряжений

Одношовные трубы  
 Ø1420×16,5 мм, Mannesmann



Двухшовные трубы  
 Ø1420×16,5 мм, ХТЗ



$$\sigma_{кц} = \frac{p \cdot \rho}{t}$$

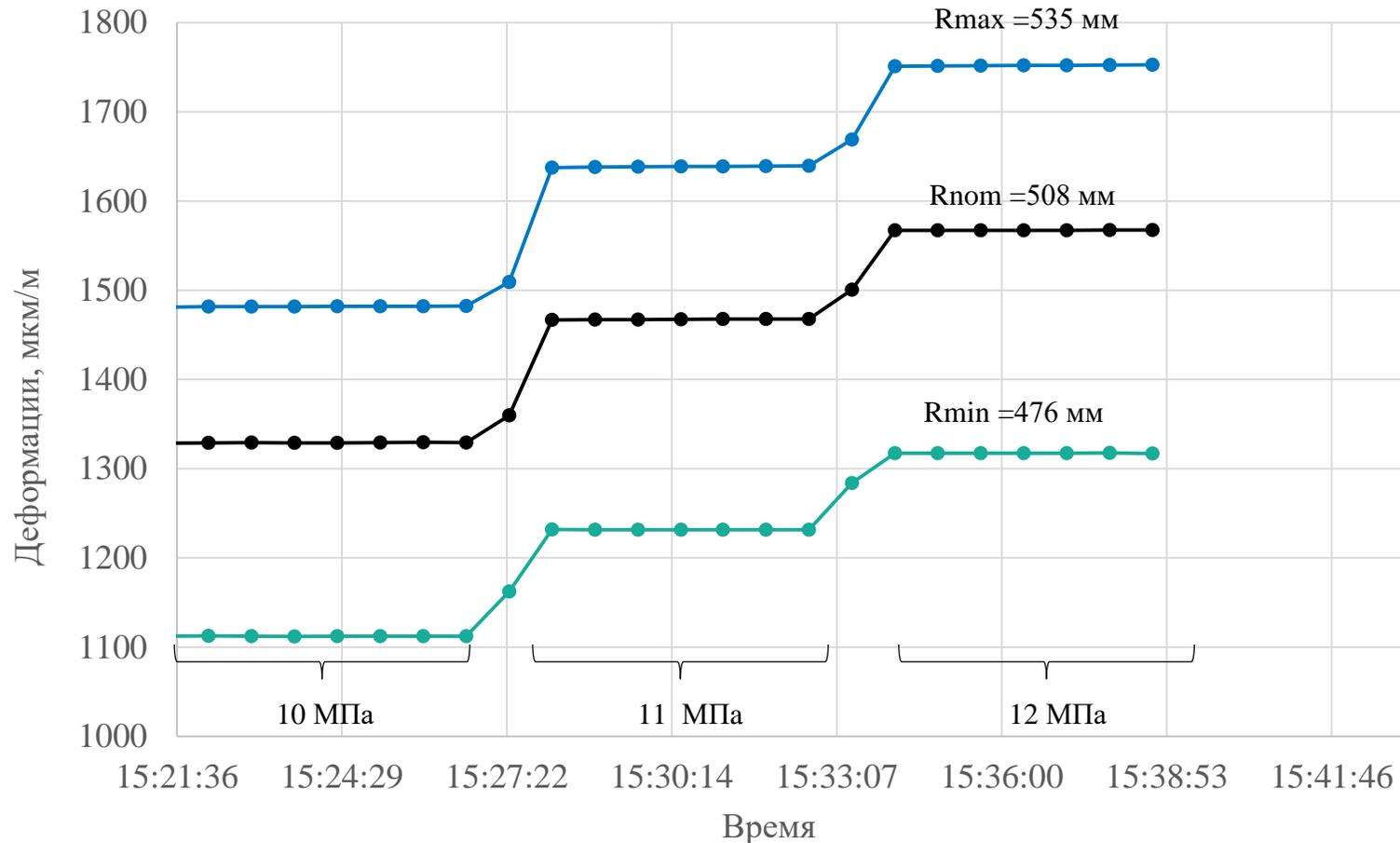
# Данные тензометрии при стендовых испытаниях в 2016 году (труба Ø1420×16,5)

Данные тензометрии подтвердили локализацию высоких напряжений на участках с максимальным радиусом (более пологие участки)

Средство измерения	Локальный радиус, мм	Кольцевые напряжения, МПа		Отклонение	
		Фактические	Теоретические		
Одношовная труба Оптоволоконная система Sm125	Min	631	225 (0,56 $\sigma_{0,2}$ )	265	- 15%
	Nom	707	291 (0,72 $\sigma_{0,2}$ )	294	- 1%
	Max	825	342 (0,85 $\sigma_{0,2}$ )	347	- 1%
Двухшовная труба Тензометрическая станция UCAM-60B	Min	611	193 (0,36 $\sigma_{0,2}$ )	266	- 27%
	Nom	712	338 (0,63 $\sigma_{0,2}$ )	331	+ 2%
	Max	895	406 (0,75 $\sigma_{0,2}$ )	412	-1%



# Данные тензометрии при стендовых испытаниях в 2022 году (труба Ø1020×15,3 мм, X80)



Отклонение от теоретических:

Rmax – плюс 5,7%

Rnom – плюс 2,3%

Rmin – минус 10%



# Общая оценка остаточных и эксплуатационных напряжений

Одношовные трубы  
 $\text{Ø}1420 \times 16,5$  мм, Mannesmann



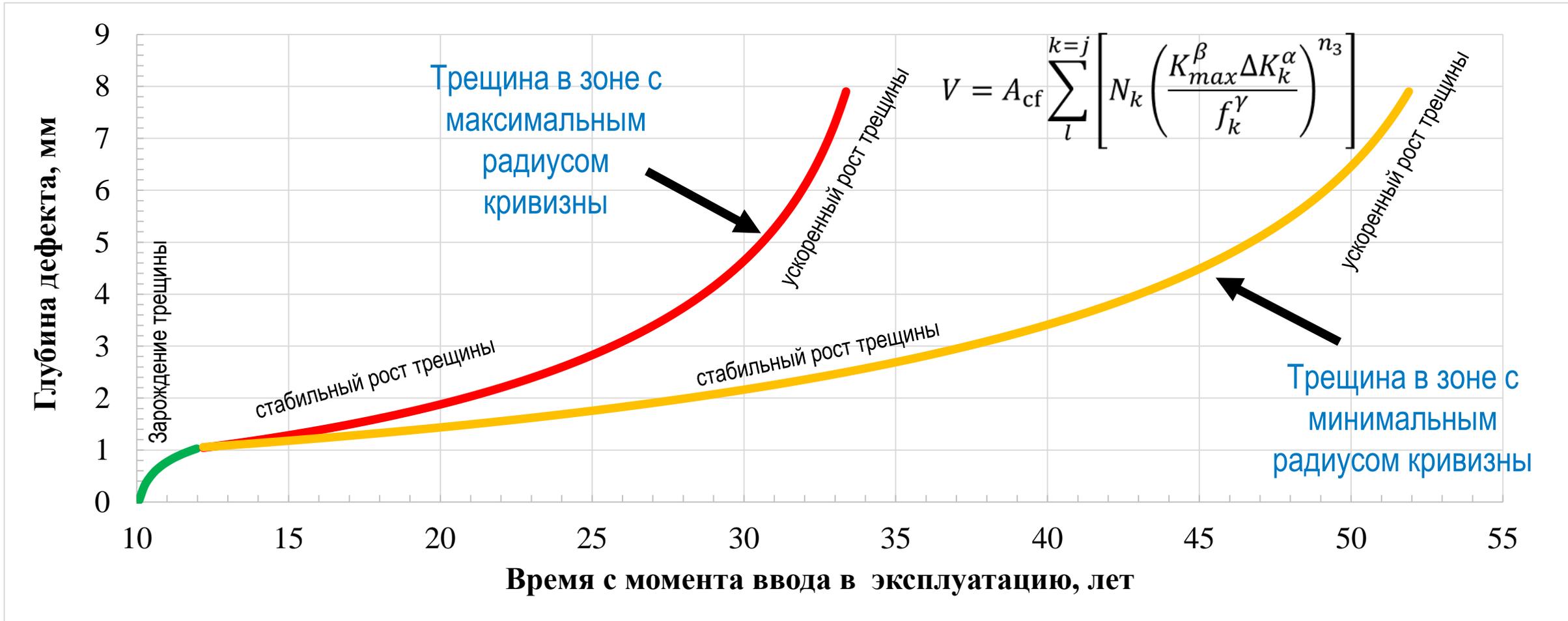
Двухшовные трубы  
 $\text{Ø}1420 \times 16,5$  мм, ХТЗ



# Оценка роста трещин КРН в условиях неравномерного распределения НДС

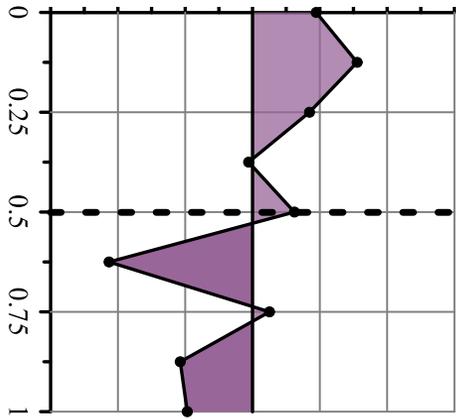
---

# Оценка скорости роста трещин в различных зонах по модели КРН

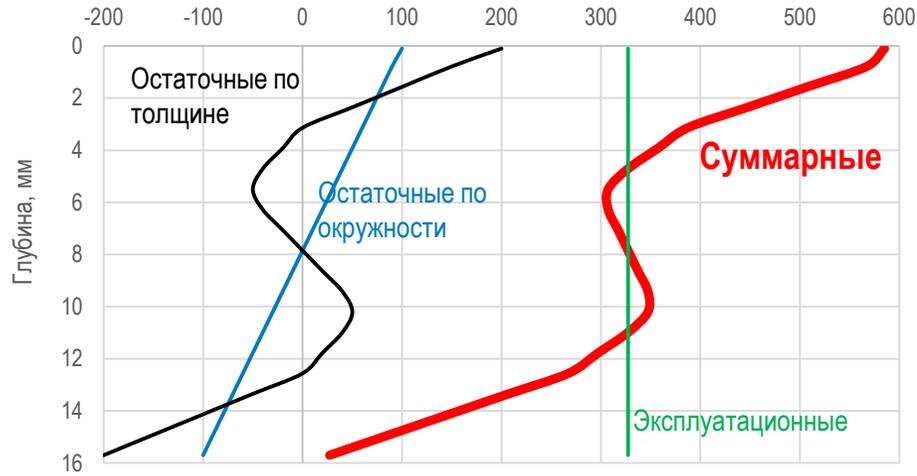


# Взаимосвязь напряженного состояния и трещиностойкости материала

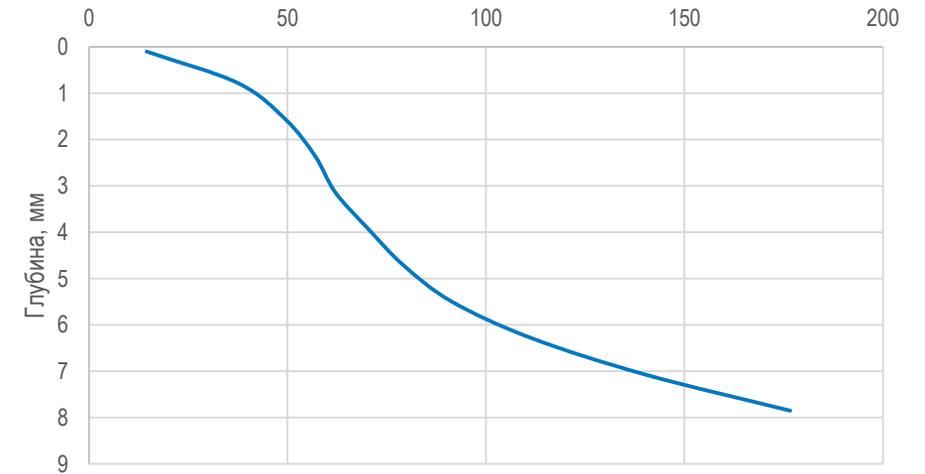
Измеренные остаточные напряжения



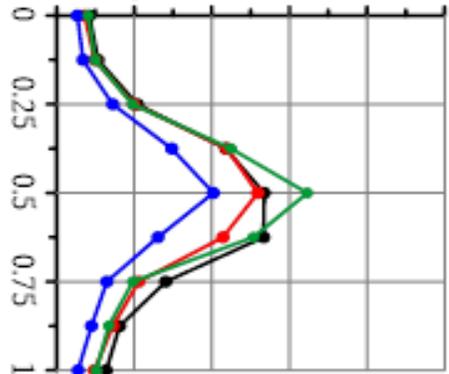
Напряжения, МПа



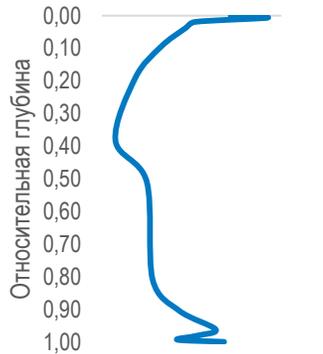
$K_I, \text{МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$



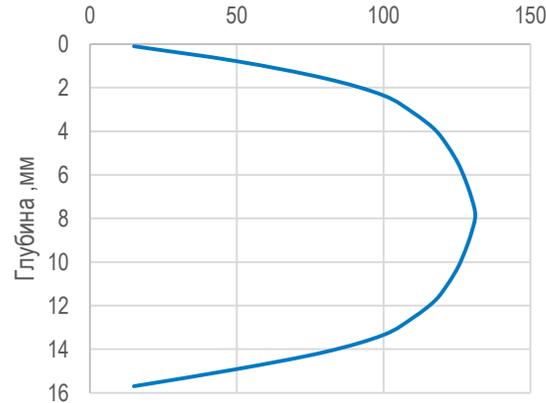
Отношение текстурных компонент



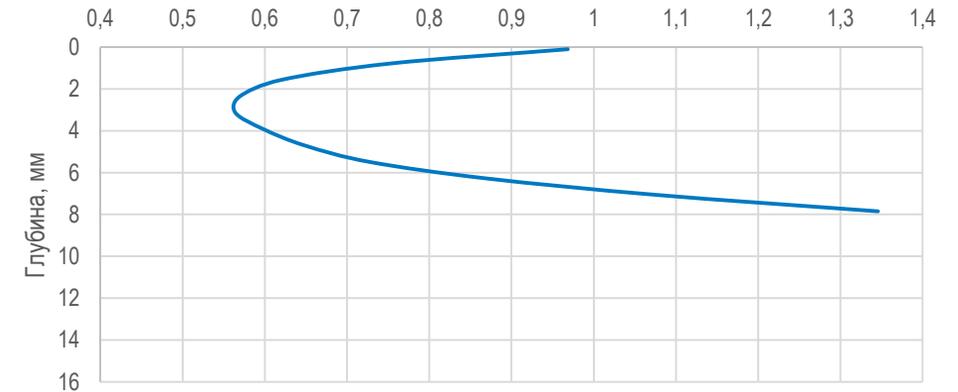
Микротвердость, HV



$K_{1c}, \text{МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$



$f(K_I/K_{1c})$



## Выводы



Напряженно-деформированное состояние (НДС) в трубах имеет неравномерное распределение как по толщине стенки так и по окружности трубы



Совокупность компонентов НДС можеткратно увеличивать скорость роста трещин, что необходимо учитывать в модели роста трещин



Необходим статистический набор данных о распределении компонентов НДС в трубах различного типоразмера и производителей



Следует выполнить исследования зависимости послойной трещиностойкости металла труб различных производителей



Предложение в протокол:

Дочерним газотранспортным обществам ПАО «Газпром» направить в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» кольца труб различной конструкции и производителей диаметром от 530 до 1420 мм шириной не менее 500 мм из основного металла с дефектами КРН.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

**Погуляев Степан Иванович**

Заместитель начальника лаборатории физико-химического моделирования и профилактики коррозионно-механического разрушения.

Тел. (498) 456353

[S\\_Pogulyaev@vniigaz.gazprom.ru](mailto:S_Pogulyaev@vniigaz.gazprom.ru)

