ООО Научно-коммерческая фирма «СБК»
РФ, г. Рыбинск, bukaty@sbkllc.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ

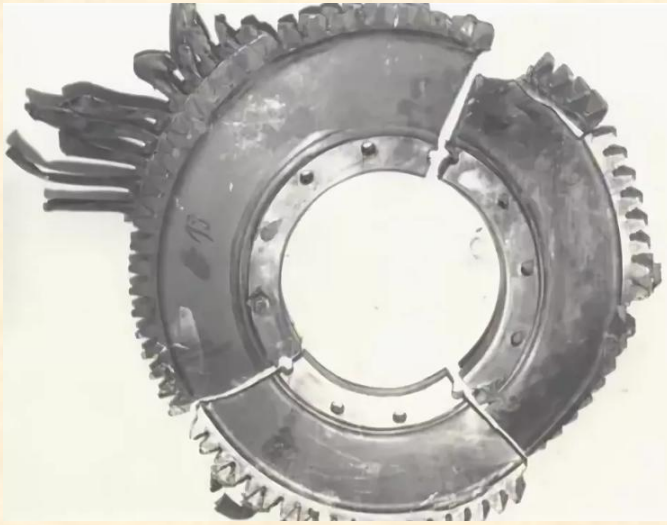
Букатый А.С.

ЦЕЛЬ

Создание единой системы контроля и обеспечения стабильности технологических процессов путём внедрения в производство систематического и периодического контроля качества поверхностного слоя деталей

Проблематика







- **Обеспечение надёжности и долговечности высоконагруженных ответственных деталей;**
- **Повышение сопротивления усталости деталей работающих при повышенных циклических нагрузках;**
- **Исследование разрушений, отказов, разработка мероприятий по совершенствованию конструкции и технологии производства ответственных деталей;**
- **Обеспечение точности изготовления деталей к которым предъявляются повышенные требования (детали самолётов, военной техники, газотурбинных двигателей и прочие).**

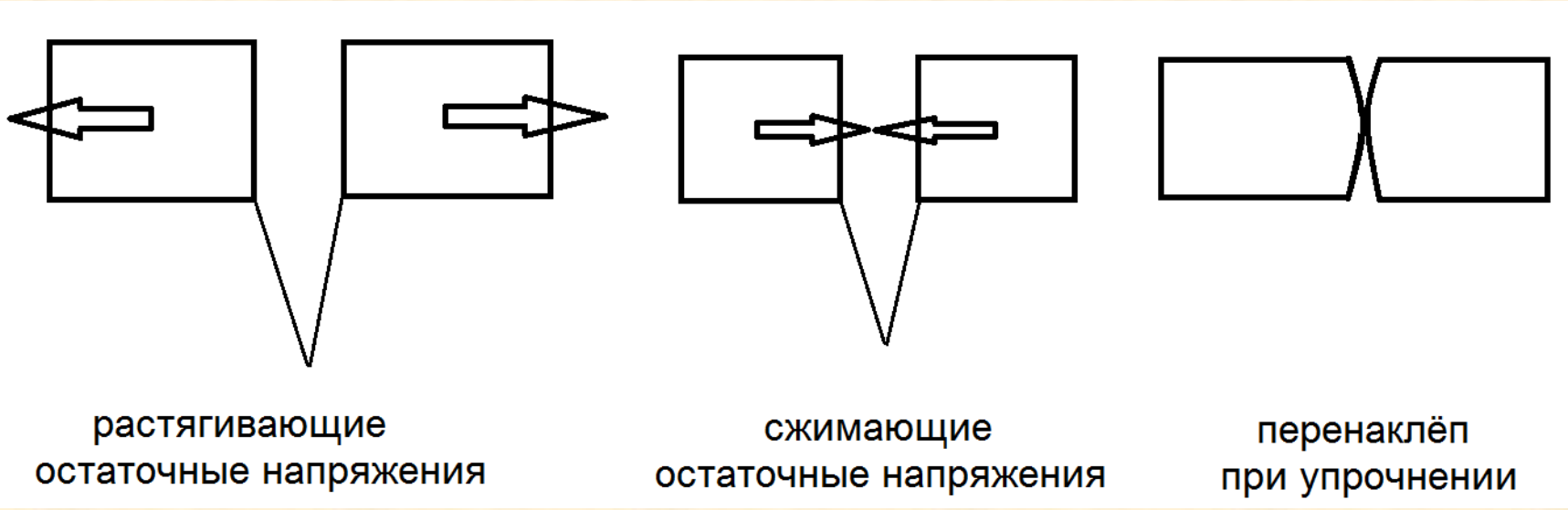
Наши разработки

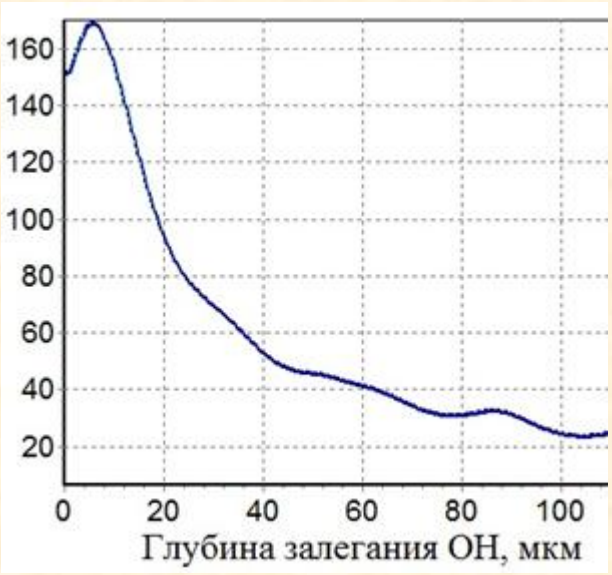
- Исследовательское оборудование и методики для отладки и оптимизации спецпроцессов;
- Оборудование для упрочнения ответственных деталей авиационной техники и общего машиностроения;
- Методики моделирования, оптимизации конструкции, анализа разрушений;

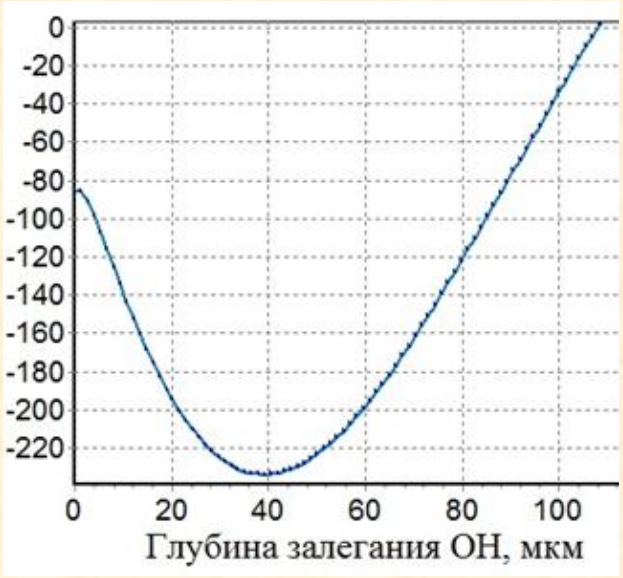
Факторы, влияющие на знак и величину остаточных напряжений

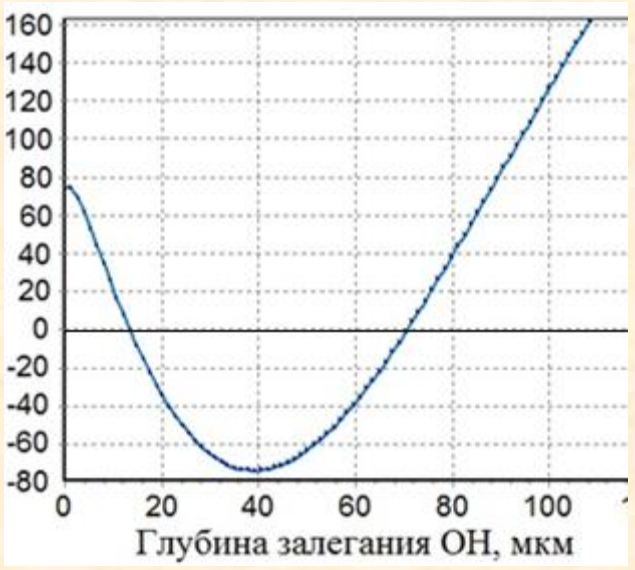
- Режимы резания
- Режимы шлифования
- Режимы поверхностной обработки (пескоструйная, упрочняющая)
- Термическая обработка
- Интенсивность нанесения покрытий

Виды остаточных напряжений

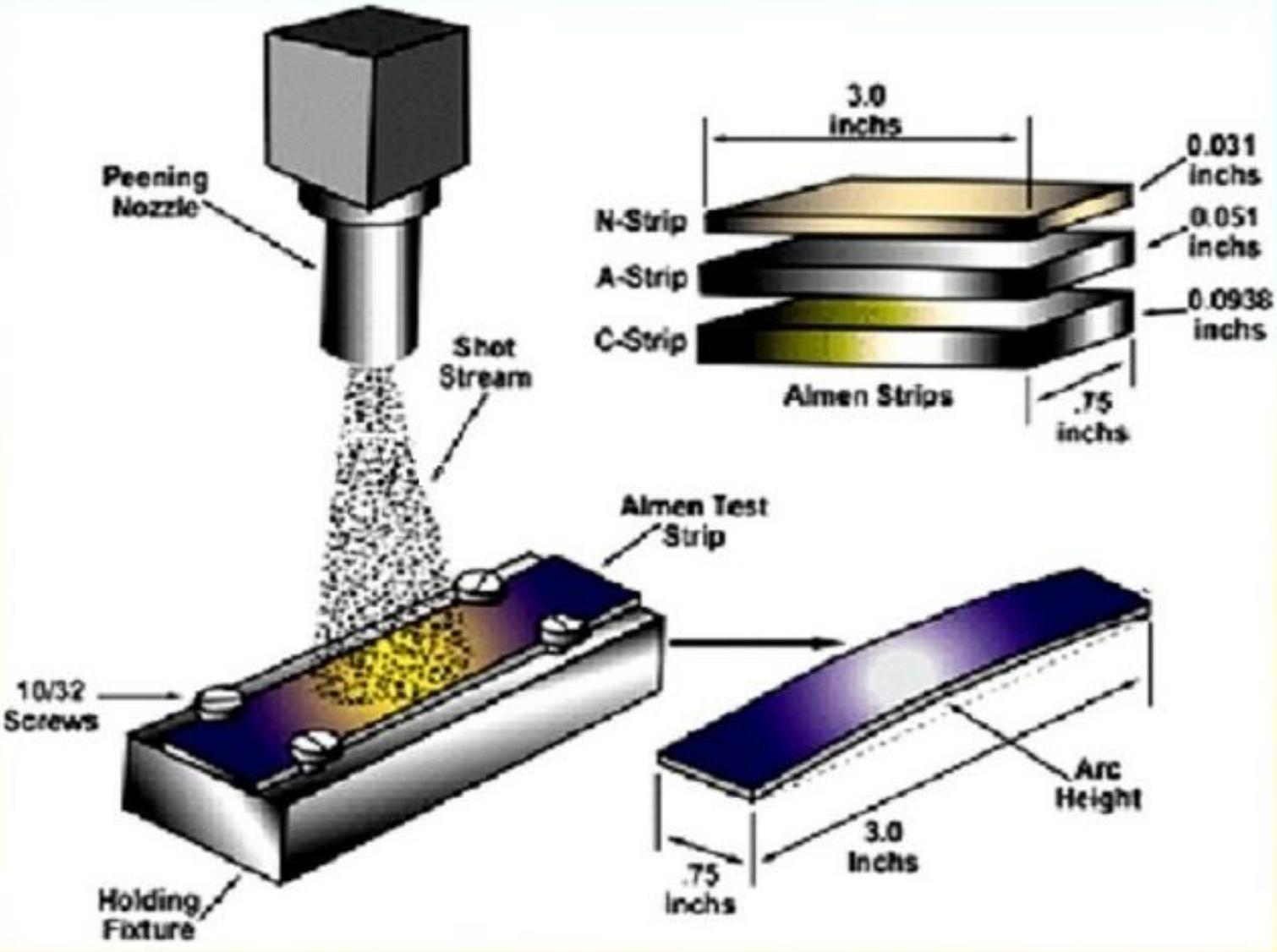


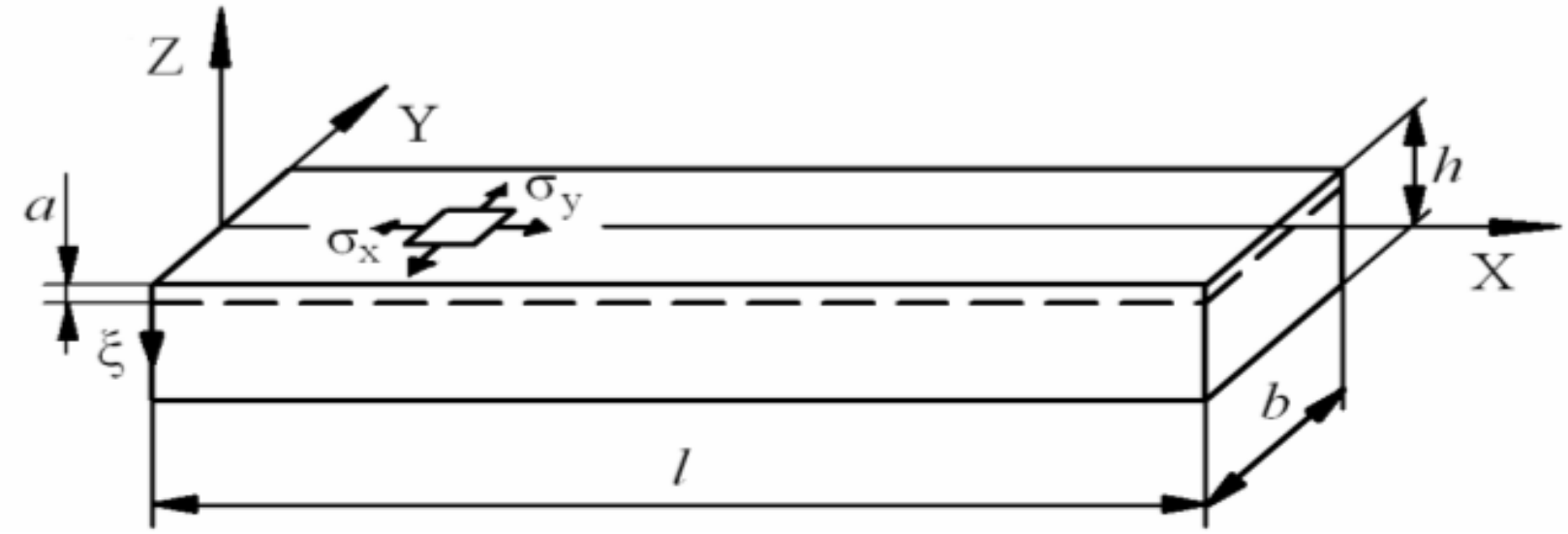






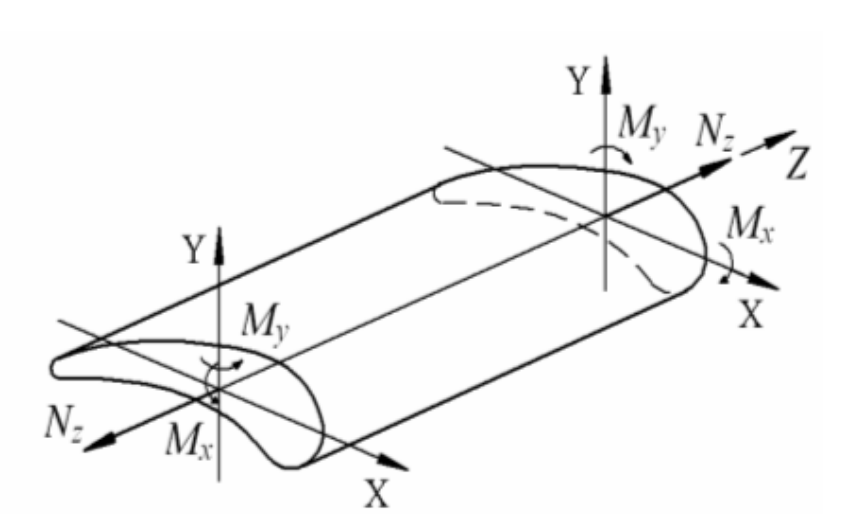
Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (микрошариками)





Ориентация системы координат и направления остаточных напряжений

Детали типа «Стержень»



Расчётная схема для деталей типа стержень

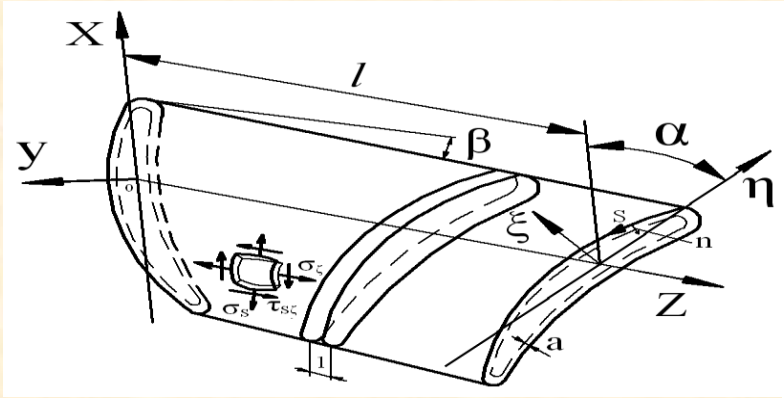
$$\Delta l = -\int_0^l \frac{1}{EF'} \oint_S \int_0^a (\sigma_z - \mu\sigma_S) dn ds dz = -\sigma_{э1} a \int_0^l \frac{S}{EF} dz,$$

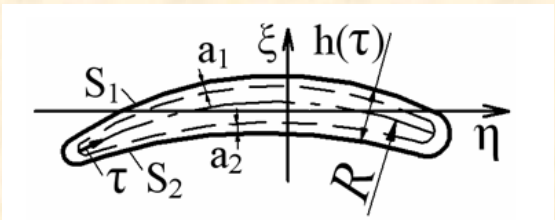
$$f_x = \int_0^l \frac{(l-z)}{EI'_y} \oint_S \int_0^a x(\sigma_z - \mu\sigma_s) dn ds dz = \sigma_{э1} a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_y} \oint_S x ds dz,$$

$$f_y = \int_0^l \frac{(l-z)}{EI'_x} \oint_S \int_0^a y(\sigma_z - \mu\sigma_s) dn ds dz = \sigma_{э1} a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_x} \oint_S y ds dz,$$

где F, I_x, I_y и F', I'_x, I'_y – площадь и осевые моменты инерции поперечного сечения стержня с исходными размерами и без слоя a соответственно; l и S – размеры в продольном и поперечном направлениях поверхности стержня, подверженной упрочняющей обработке.

Естественно закрученные стержни





Поперечное сечение естественно закрученного стержня

$$\Delta l = \int_0^l \left(\frac{N_z}{EF} + \frac{d\varphi}{dz}\frac{\theta I_p}{F}\right)dz,$$

$$f_x = \int_0^l (k_\eta \cos\alpha + k_\xi \sin\alpha)(l - z)dz,$$

$$f_y = \int_0^l (-k_\eta \sin\alpha + k_\xi \cos\alpha)(l - z)dz,$$

$$\varphi = \int_0^l \frac{\theta}{(1 + q_1 - q_2)GI_k}\left(N_z\frac{I_p}{F} + M_k\frac{1}{\theta} - M_\xi\frac{I_{p\xi}}{I_\xi} + M_\eta\frac{I_{p\eta}}{I_\eta}\right)dz,$$

где в соответствии с указанными упрощениями для силовых факторов имеем:

$\varphi(z)$ – изменение угла естественной закрутки текущего сечения стержня (измеряется в радианах, считается положительным, если происходит уменьшение $\alpha(z)$);

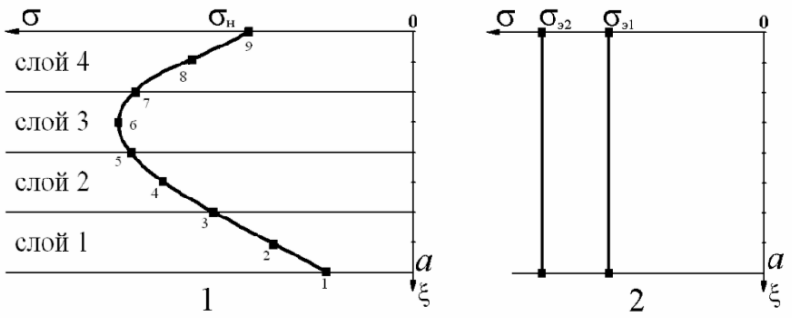
$$N_z = -\sigma_{э1} a \oint_S ds, \qquad M_\eta = -\sigma_{э1} a \oint_S \xi ds,$$

$$M_\xi = -\sigma_{э1} a \oint_S \eta ds, \qquad M_k = M_{k\sigma} = \sigma_{э1} a \oint_S \theta r^2 ds,$$

$M_{k\sigma}$ – крутящий момент от нормальных остаточных напряжений;

Моделирование технологических остаточных напряжений и деформаций на основе метода конечных элементов в системе ANSYS

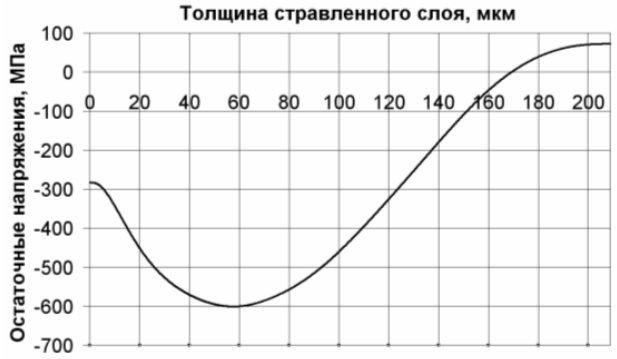
Моделирование упрочненного поверхностного слоя



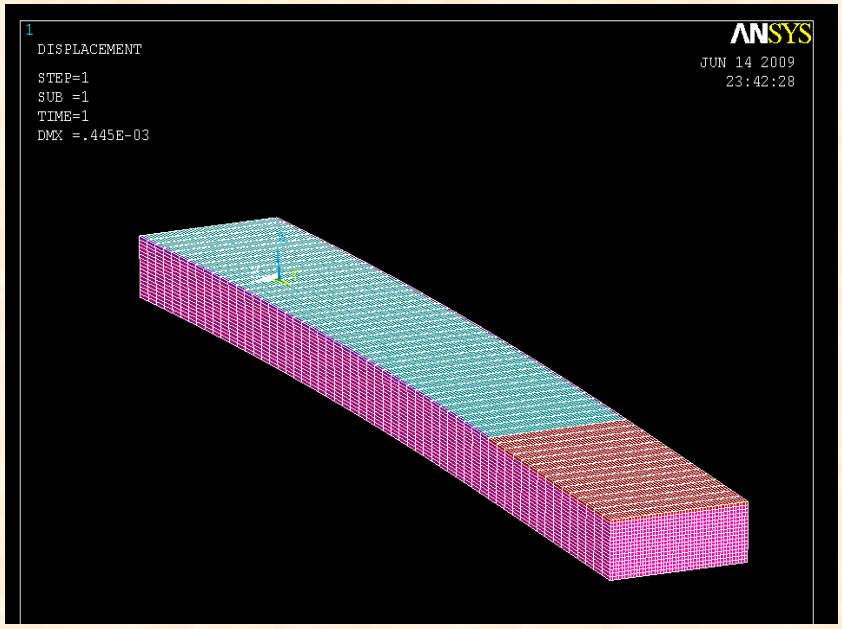
Структура упрочненного поверхностного слоя

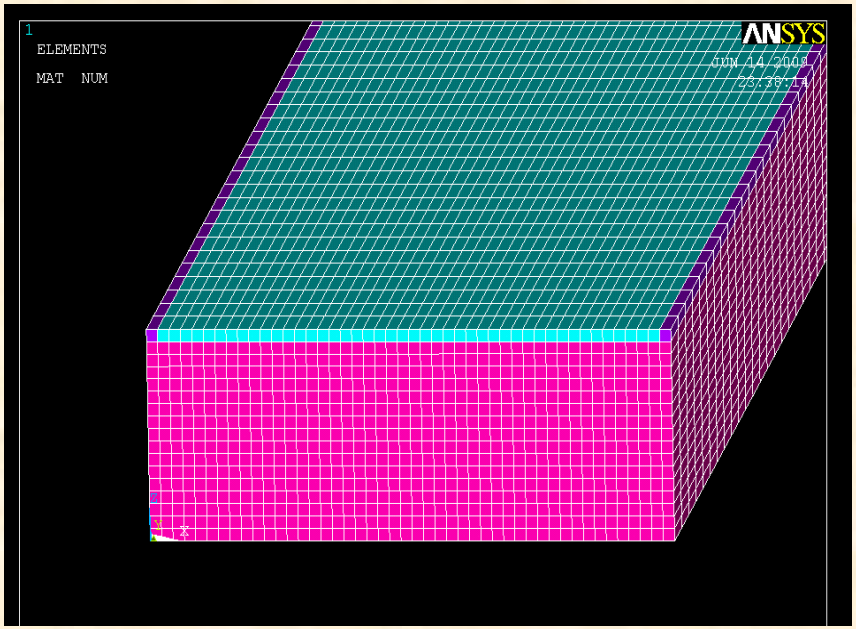
Деформации деталей типа “Стержень”

P **возд = 0,3 МПа, *d*ш = 315мкм, *V*с = 30 мм/мин.**



Распределение ОН после упрочнения на выбранном режиме

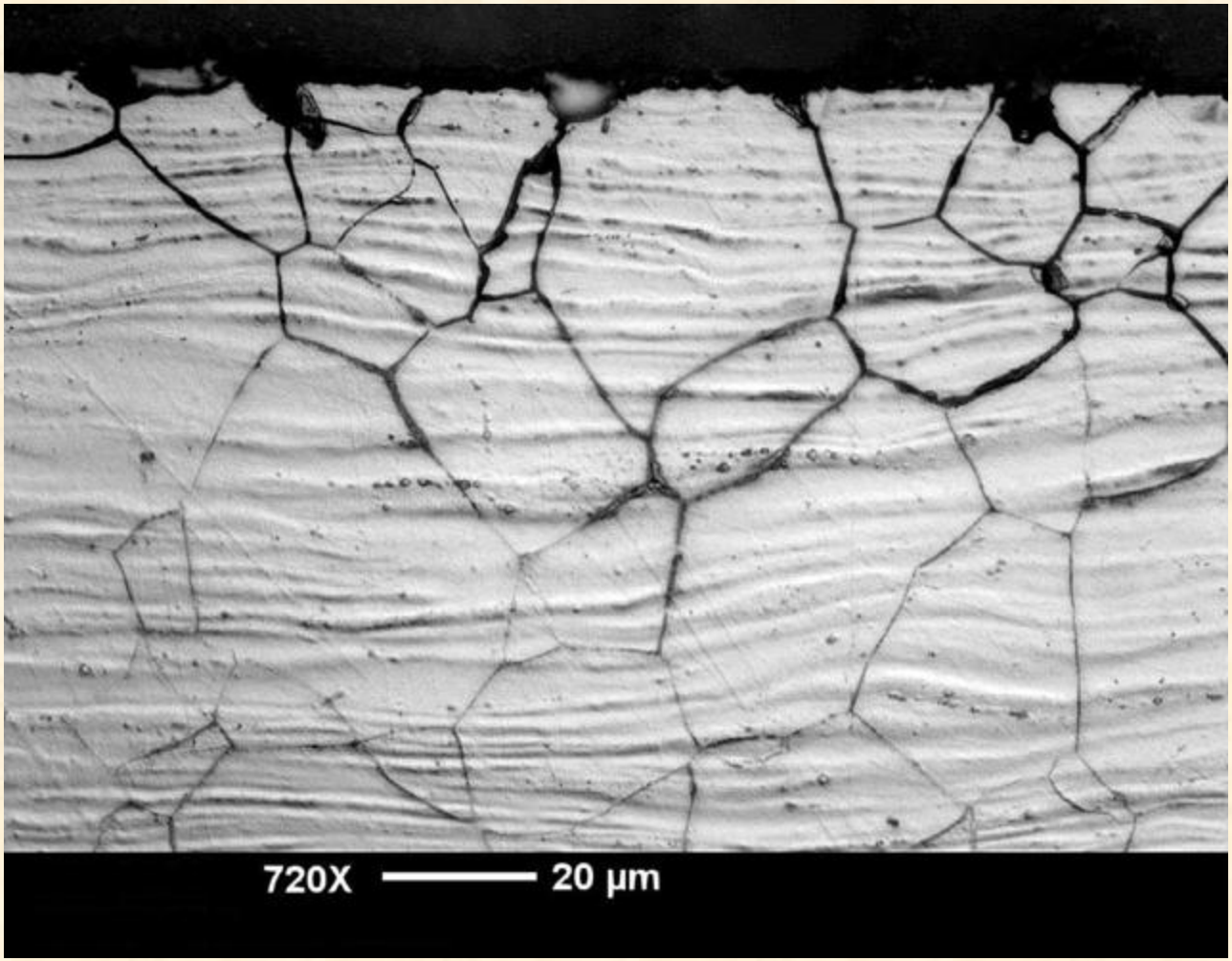




Остаточные напряжения перед операцией «Хромирование»



Трещины в гальваническом покрытии вследствие действия растягивающих остаточных напряжений



Разрушение покрытия вследствие действия растягивающих остаточных напряжений в покрытии



Деталь №2 (изготовлена по базовому ТП)

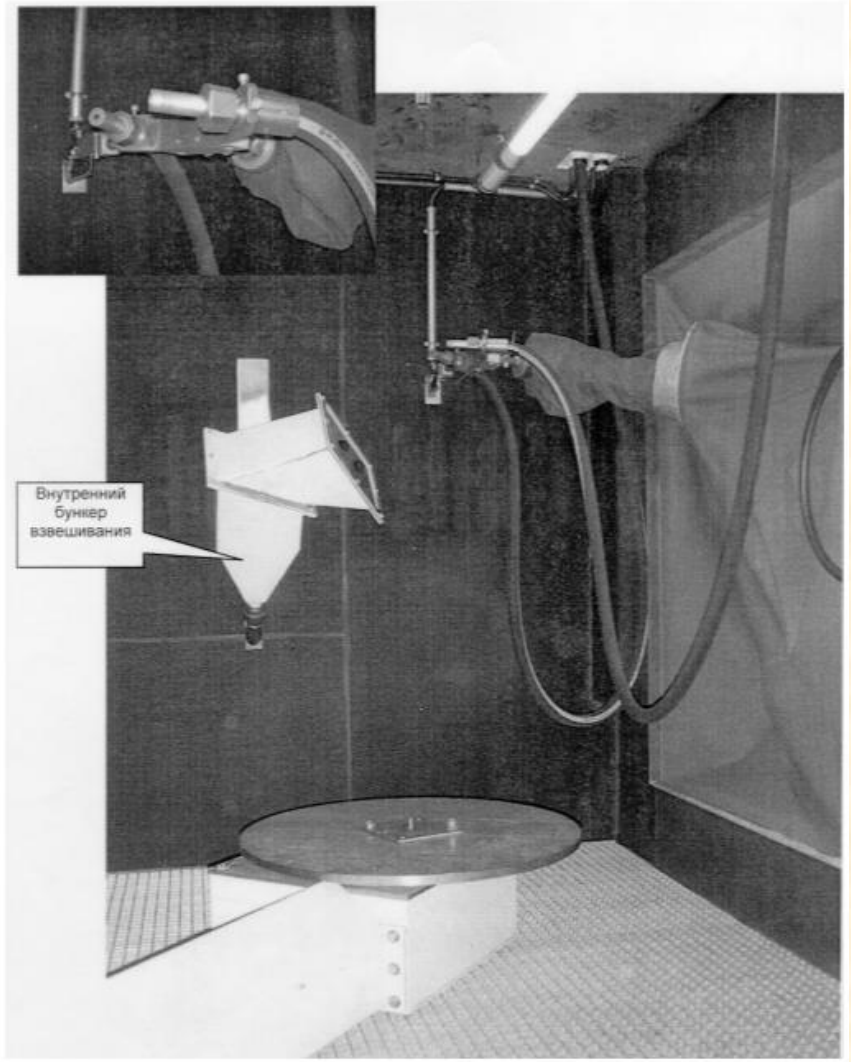
Применение упрочняющей обработки



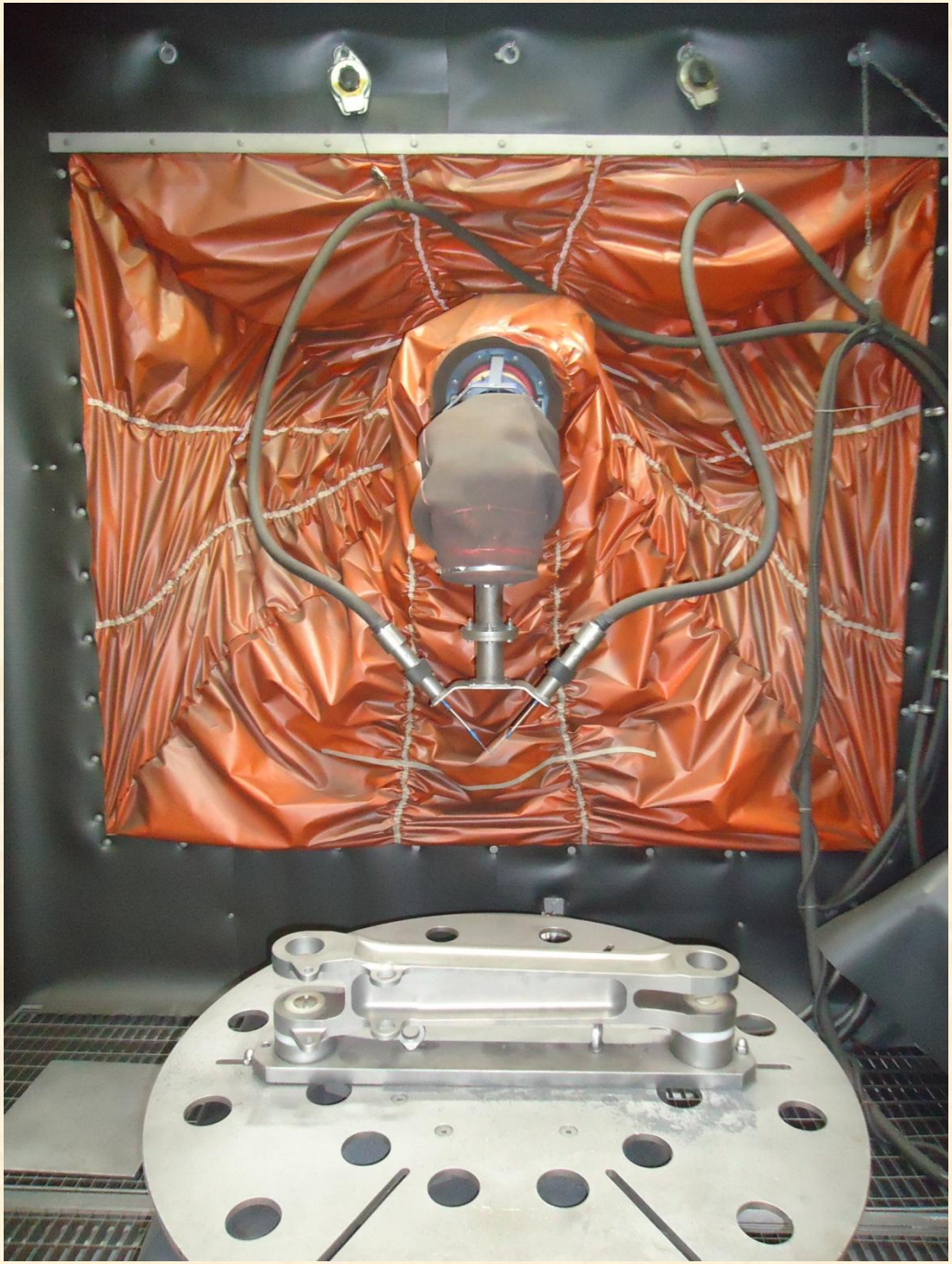
Гидродробеструйная установка Vapor Blast - 130 Wet



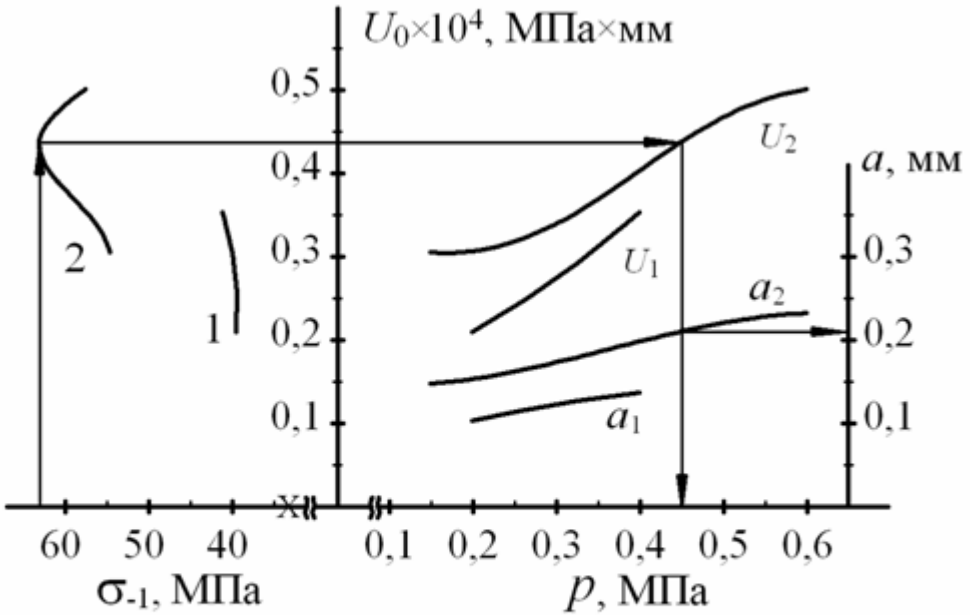
Пневмодробеструйная установка Vapor Blast RSPA - 2



Камера пневмодробеструйной установки Vapor Blast RSPA - 2



Номограмма для определения давления рабочего энергоносителя



Номограмма для определения давления рабочего энергоносителя
1, U_1, a_1 – зависимости σ_{-1}, U_0 и a для стеклянных микрошариков;
2, U_2, a_2 – зависимости σ_{-1}, U_0 и a для стальных микрошариков.

Схема определения параметров режима упрочнения

$$\sigma_{-1} \rightarrow U_{0,эфф} \rightarrow \{a, \sigma_{эфф}\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta_{j,эфф} < \Delta_{j,пред} \text{ - упрочнение по всей поверхности} \\ \Delta_{j эфф} > \Delta_{j пред} \text{ - упрочнение ответственных участков} \end{array} \right\} \rightarrow$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \text{расчёт деформаций } \Delta_{j,эфф} \text{ после} \\ \text{упрочнения ответственных участков} \end{array} \right\} \rightarrow \{[\Delta_j] = \Delta_{j,пред} - \Delta_{j,эфф}\} \rightarrow$$

$$\rightarrow \{\sigma_{э,1}; a\} \rightarrow \{\Delta_{1,j}, U_{0,1}\} \rightarrow \left\{ U_{0р} = \frac{[\Delta_j]}{\Delta_{1,j}} \cdot U_{0,1} \right\} \rightarrow \{a, p_{эфф}\}$$

Определение взаимозависимых параметров режима упрочнения

Оптимальное время насыщения поверхностного слоя ударами микрошариков $\tau_{\text{îïò}}$ **:**

$$f'(\tau) = tg\beta \approx 0{,}05 \cdot tg\alpha .$$

Общее время обработки поверхности со средним диаметром *D*:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{d_{я}} \cdot \tau_{\text{опт}} .$$

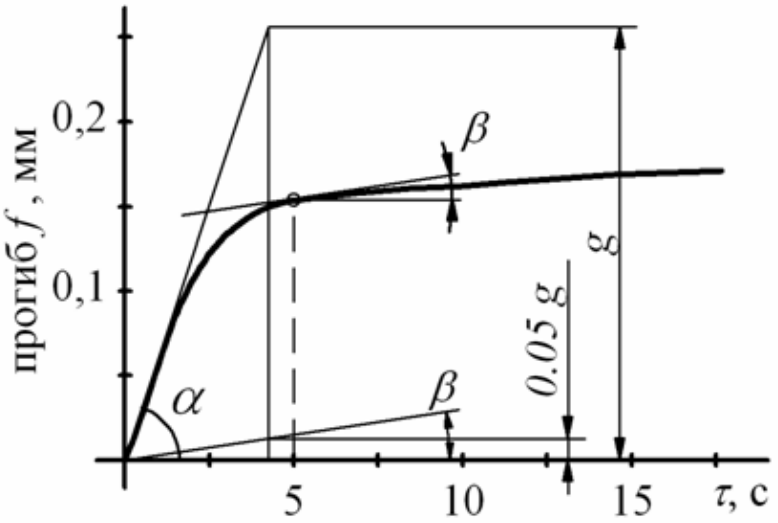


Диаграмма насыщения прогибов контрольных пластинок

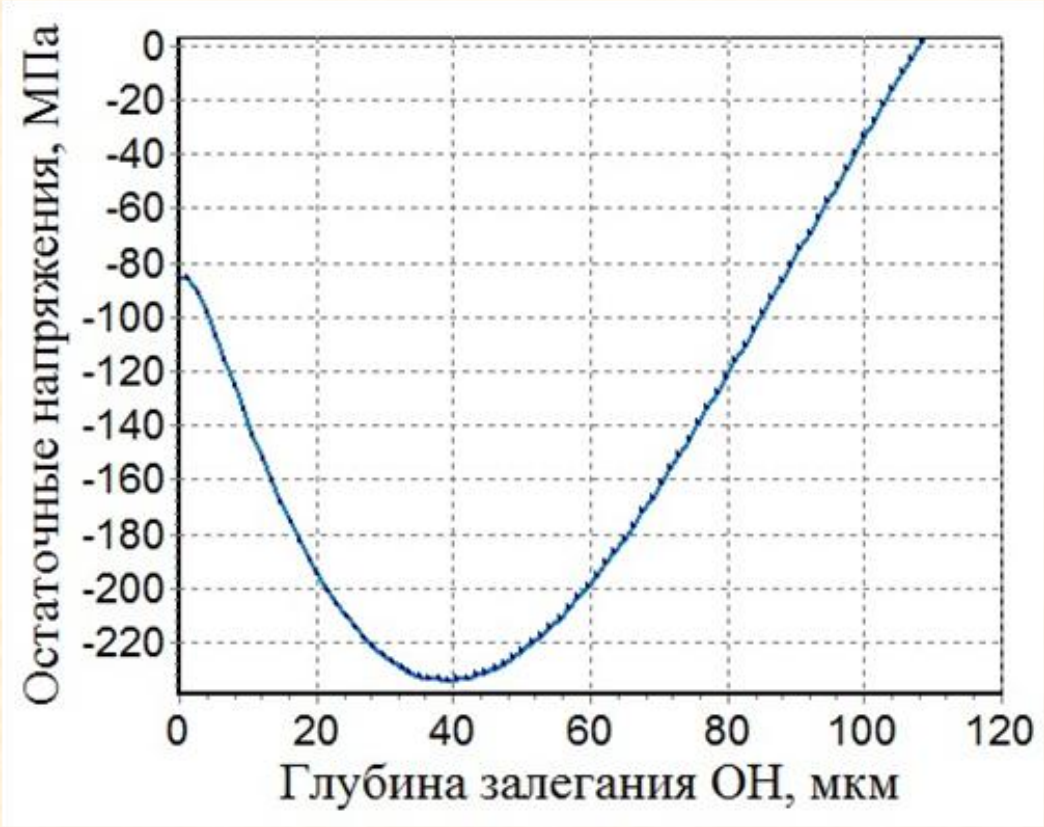
Скорость вращения стола установки:

$$\omega_c = \frac{2\pi \cdot n}{\tau} = \frac{2 \cdot n \cdot d_{я}}{D \cdot \tau_{\text{опт}}},$$ где

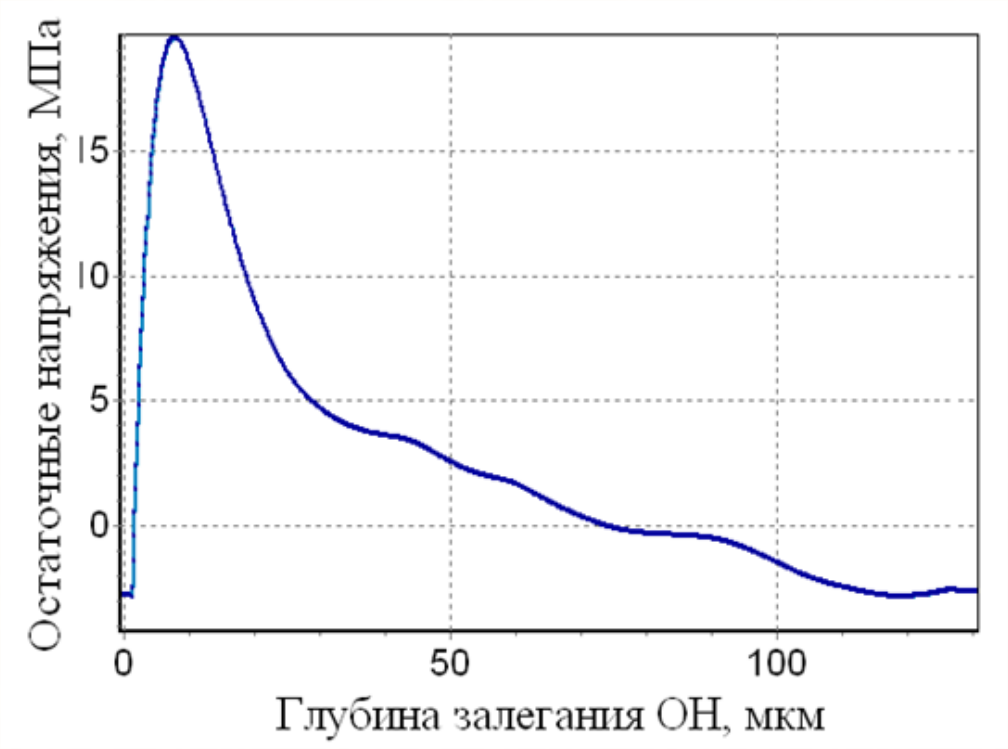
n – целое число оборотов детали.

$d_{я}$ – диаметр участка (ядро) с эффективным упрочнением.

Остаточные напряжения после дробеструйной обработки



Остаточные напряжения после операции «Шлифование»





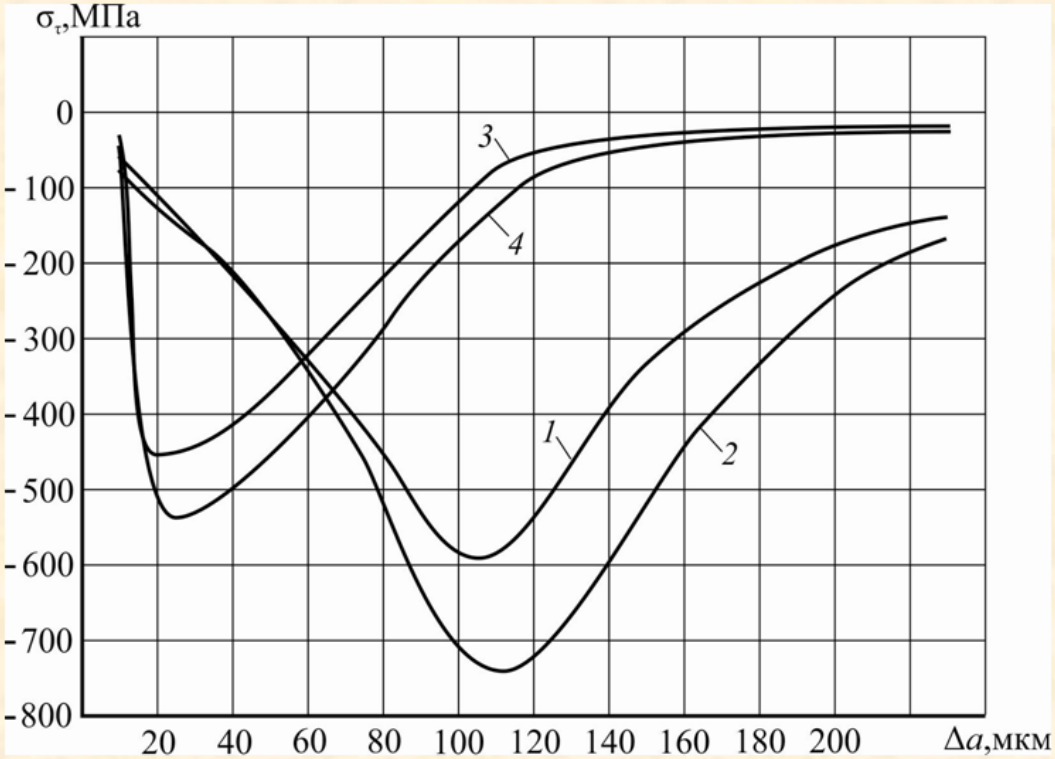
Деталь №1 (подвергнутая дробеструйной обработке)

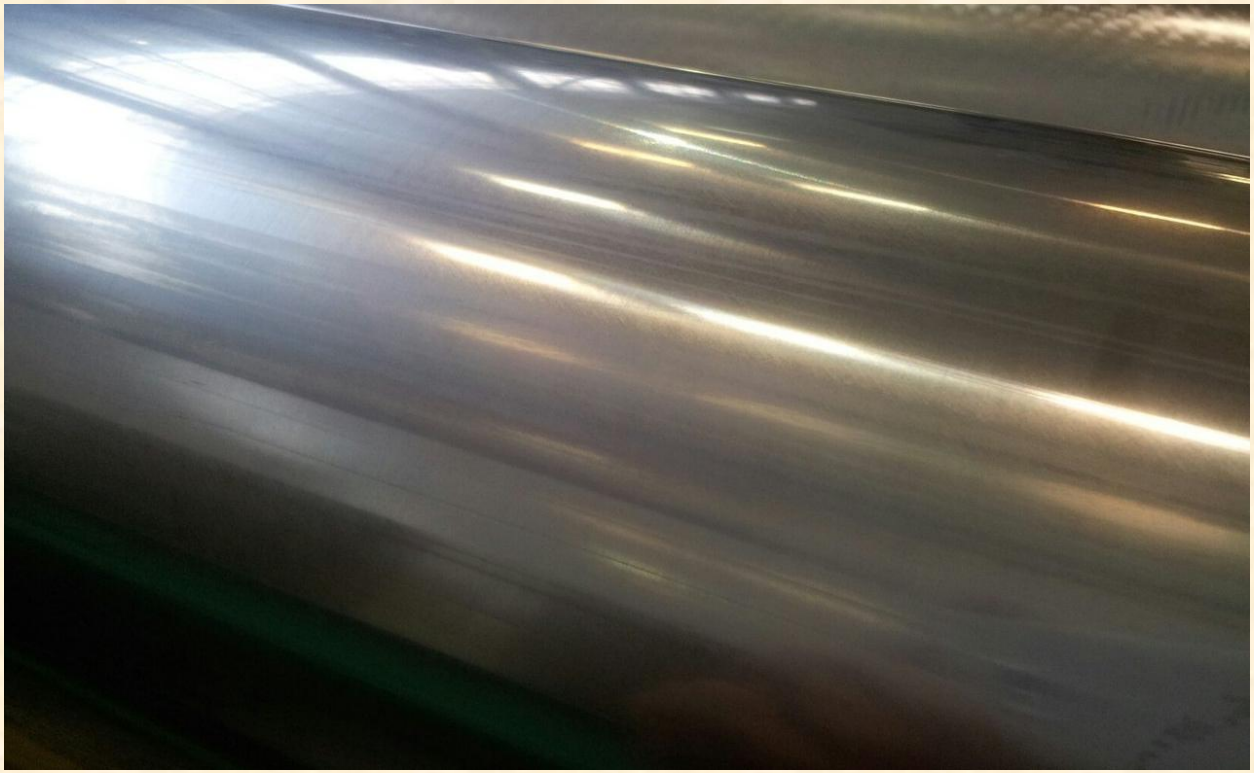
Негерметичность хромового покрытия



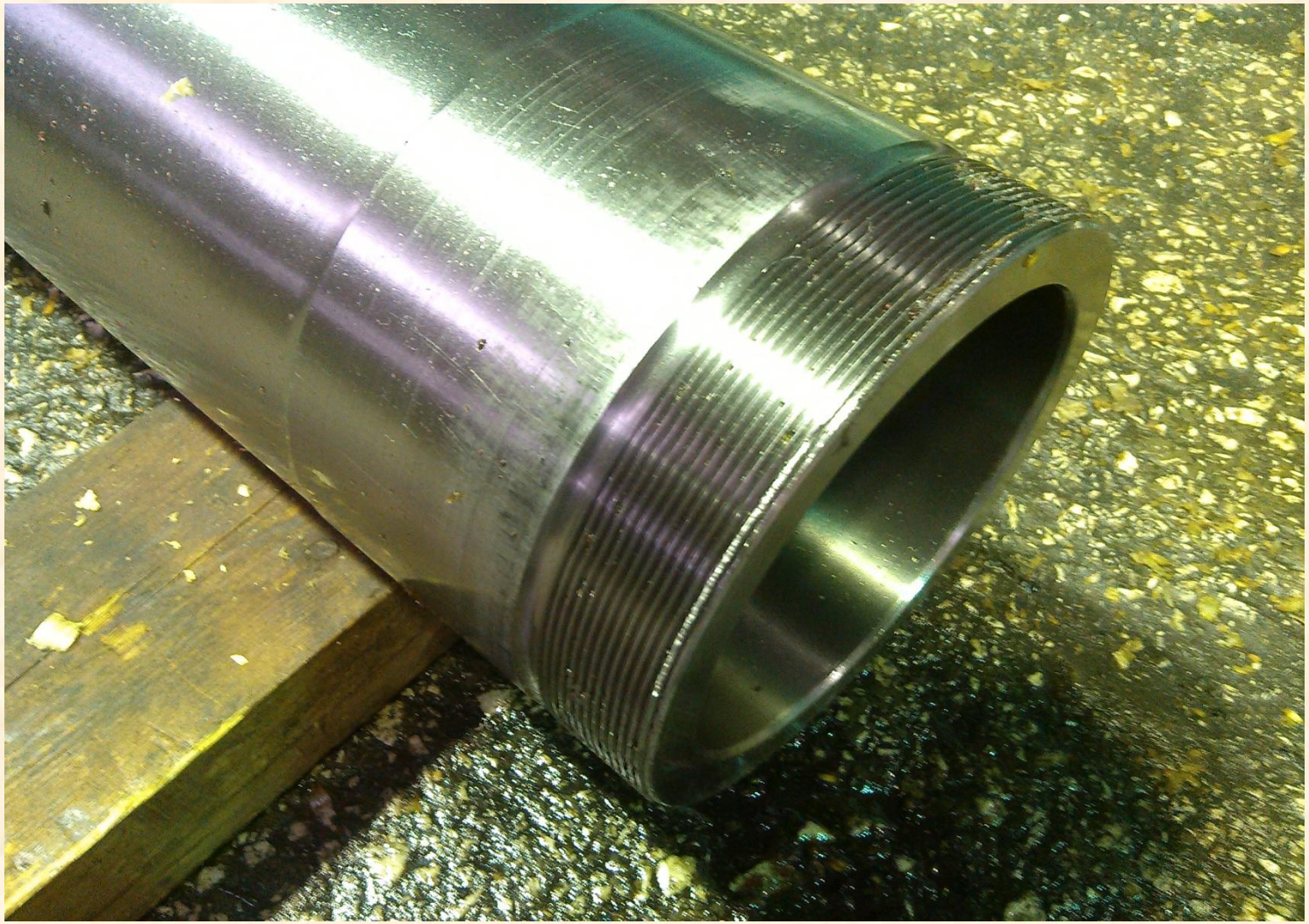
Утечки азота через пористую структуру хрома из полости оправки с давлением азота 150 Ат.

Остаточные напряжения после алмазного выглаживания

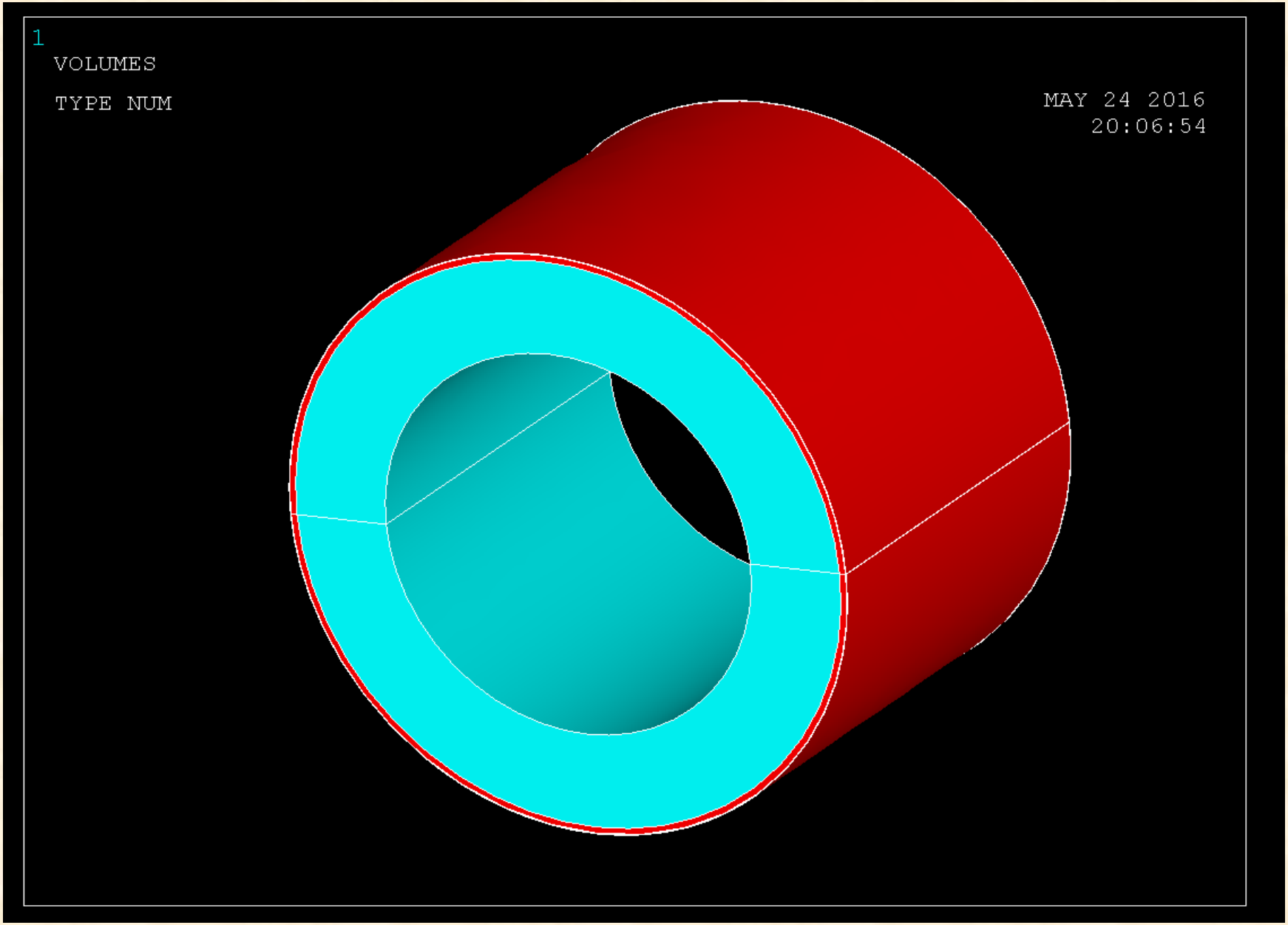


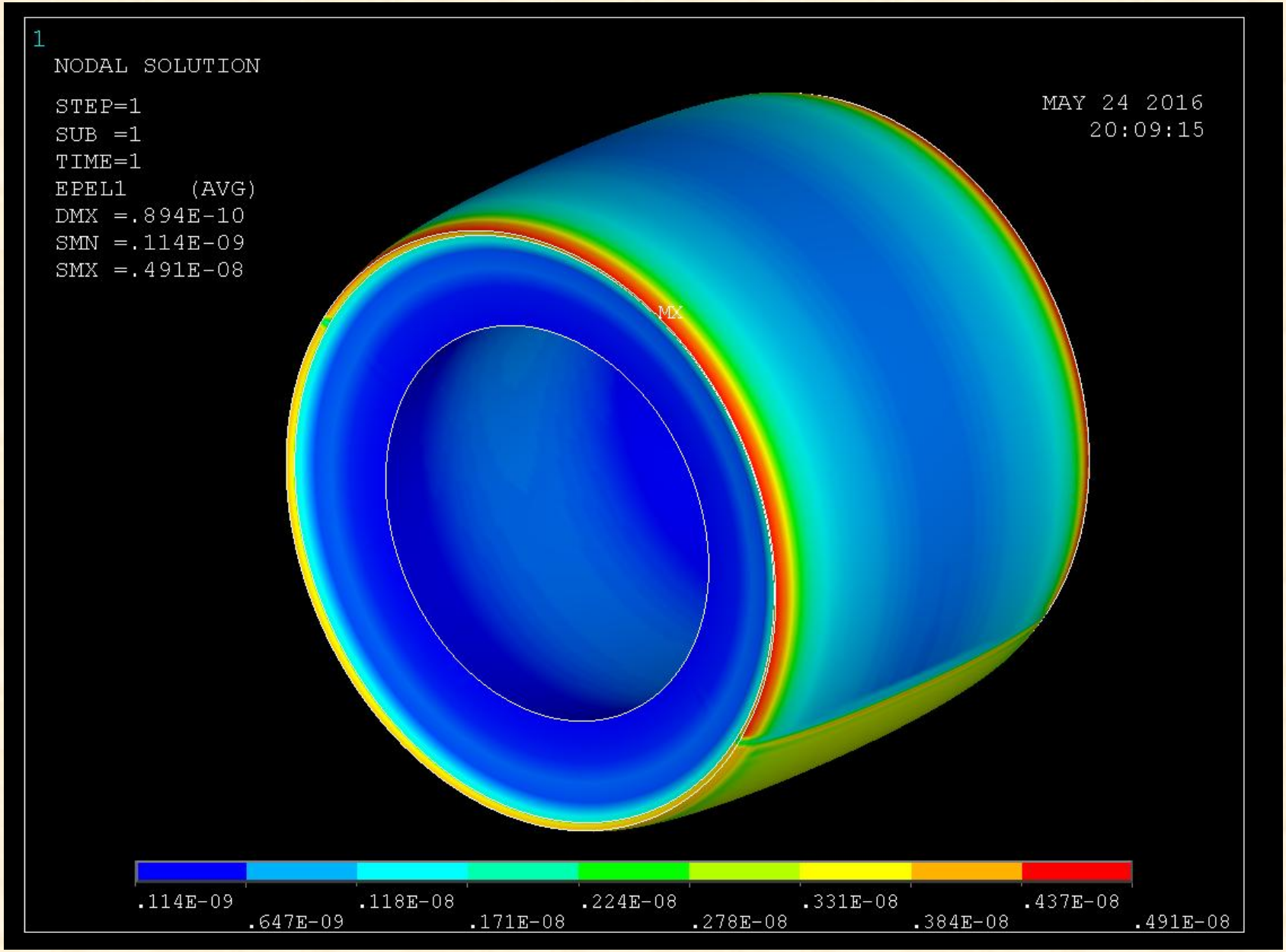


Поверхность поршня, выглаженного на режимах, полученных в результате опытных работ

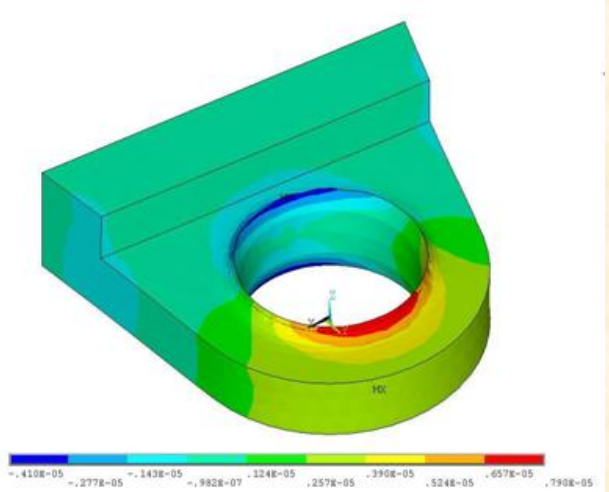


Посадочная поверхность вала


1
VOLUMES
TYPE NUM
MAY 24 2016
20:06:54

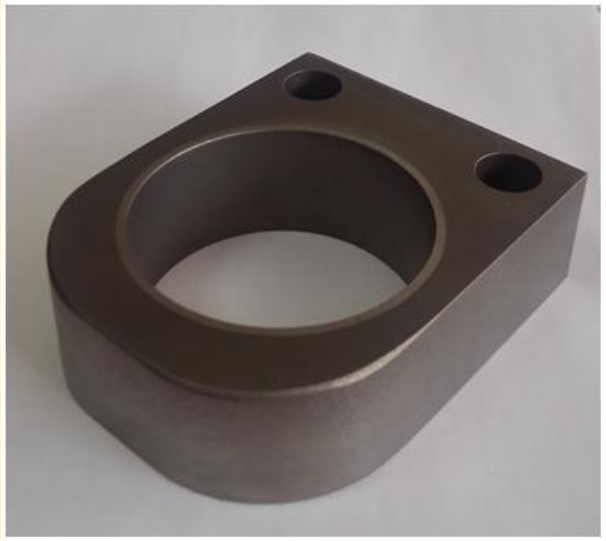

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
EPEL1 (AVG)
DMX =.894E-10
SMN =.114E-09
SMX =.491E-08
MAY 24 2016
20:09:15
MX
.114E-09
.647E-09
.118E-08
.171E-08
.224E-08
.278E-08
.331E-08
.384E-08
.437E-08
.491E-08

Обеспечение геометрической точности элементов шасси звеньев подкосов SSJ100 при назначении режимов дробеструйного упрочнения

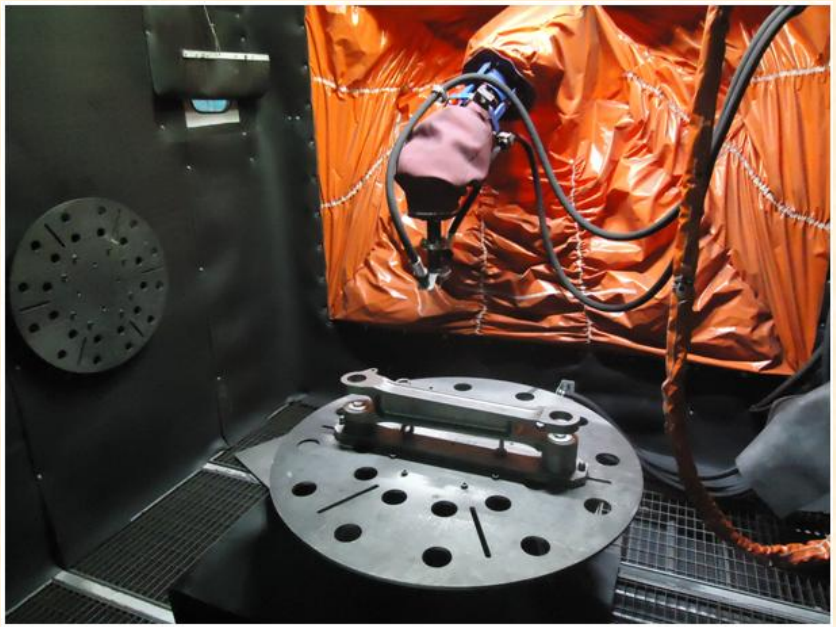


Остаточные деформации отверстия

Результаты опытных работ		
Наименование режимов упрочнения	Параметры режима	Отклонения отверстия диаметром $62^{+0,03}$ мм
Исходные отклонения диаметра (среднее значение)	–	+ 0,01 мм
Упрочнение на базовом режиме	$P_{воздуха} = 0,18$ МПа $G_{дроби} = 0,5$ кг/мин $V_{сопла} = 0,5$ мм/с	+ 0,029 мм
Упрочнение на выбранном режиме	$P_{воздуха} = 0,16$ МПа $G_{дроби} = 1$кг/мин $V_{сопла} = 1$ мм/с	+ 0,012 мм



Опытный образец

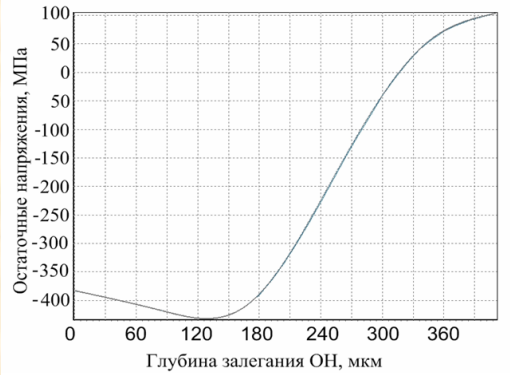


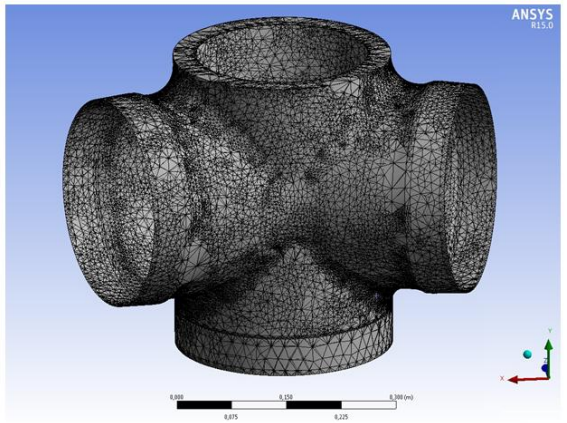
Упрочнение детали «Звено подкоса SSJ100» на роботизированной установке

Повышение долговечности элементов шасси самолёта ИЛ-76 упрочнением ППД

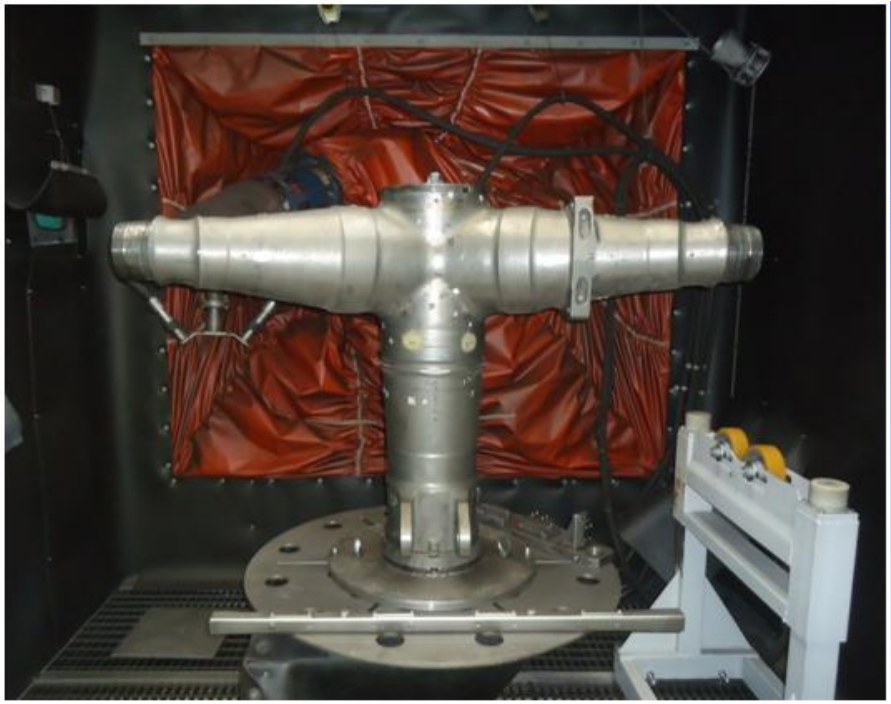
Параметры режима упрочнения:

- **давление воздуха P = 0,3 МПа;**
- **скорость перемещения сопла V = 10 мм/с;**
- **диаметр микрошариков D = 600 мкм;**
- **расстояние от сопла до детали l = 175 мм;**
- **количество сопел 2 шт.**

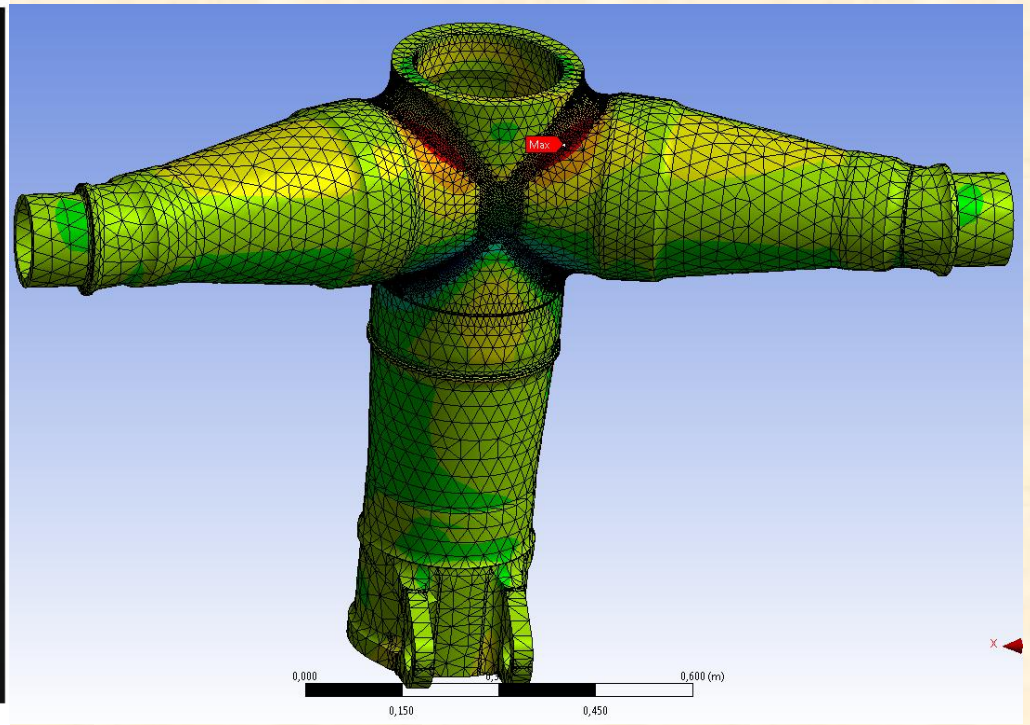




Конечно-элементная модель упрочнённого поверхностно слоя траверсы



Роботизированная упрочняющая установка



Системные работы по повышению технологической подготовки производства

Оптимизация процессов

- Дробеструйное упрочнение
- Алмазное выглаживание
- Шлифование
- Фрезерование
- Точение
- Хонингование
- Суперфинишная обработка

Исследование технологического процесса производства листового проката из электротехнической стали

Базовый технологический процесс

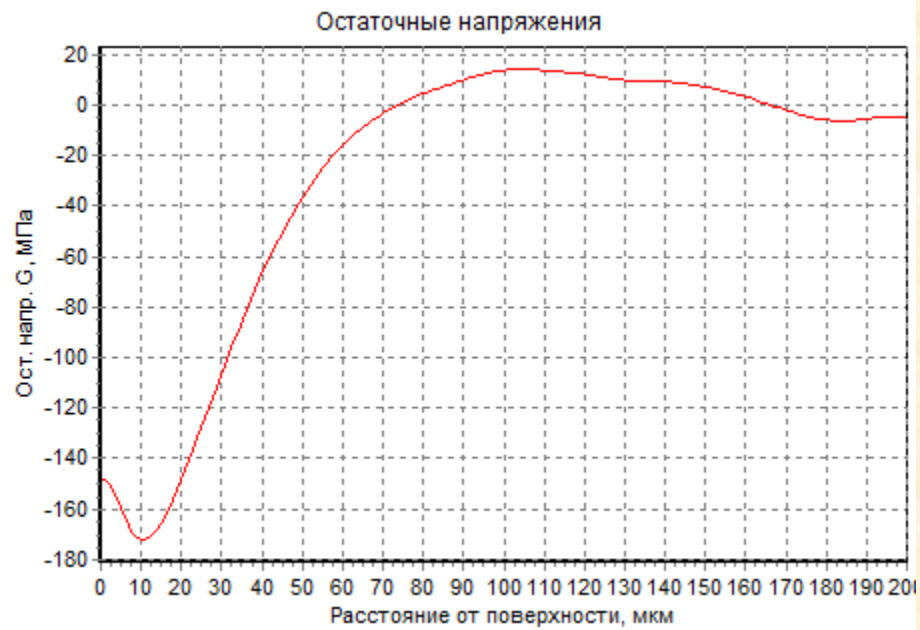








Неравномерности протяжки листа



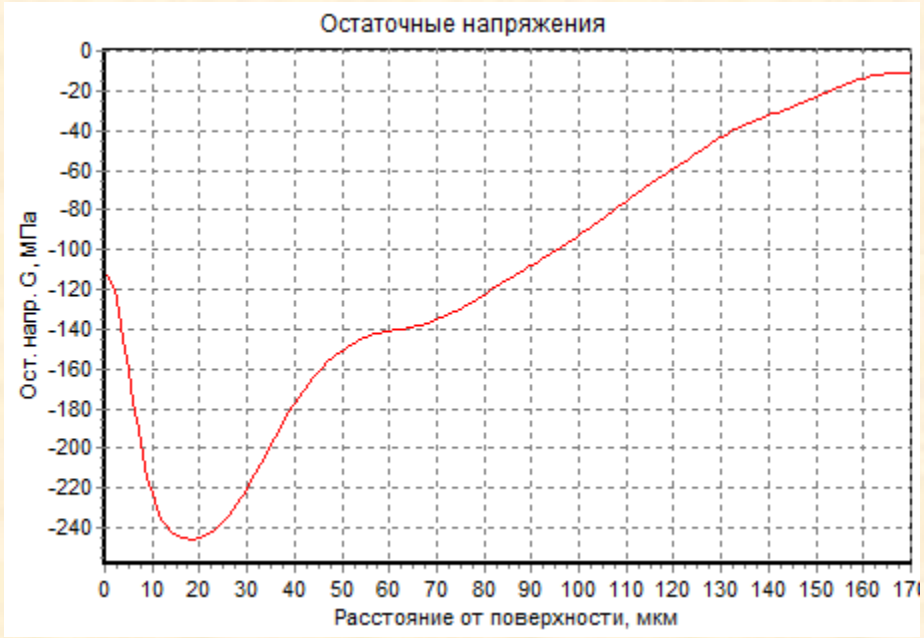


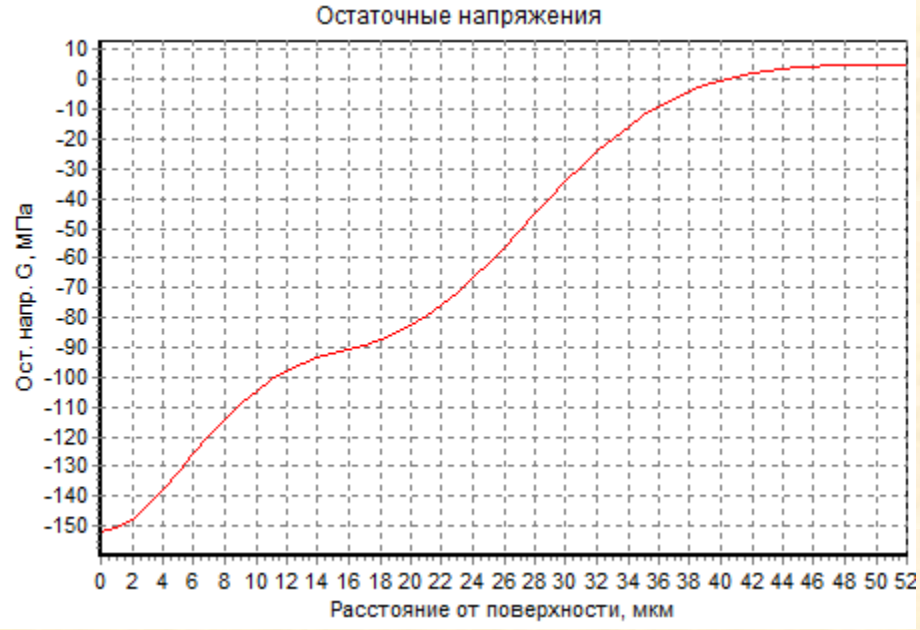


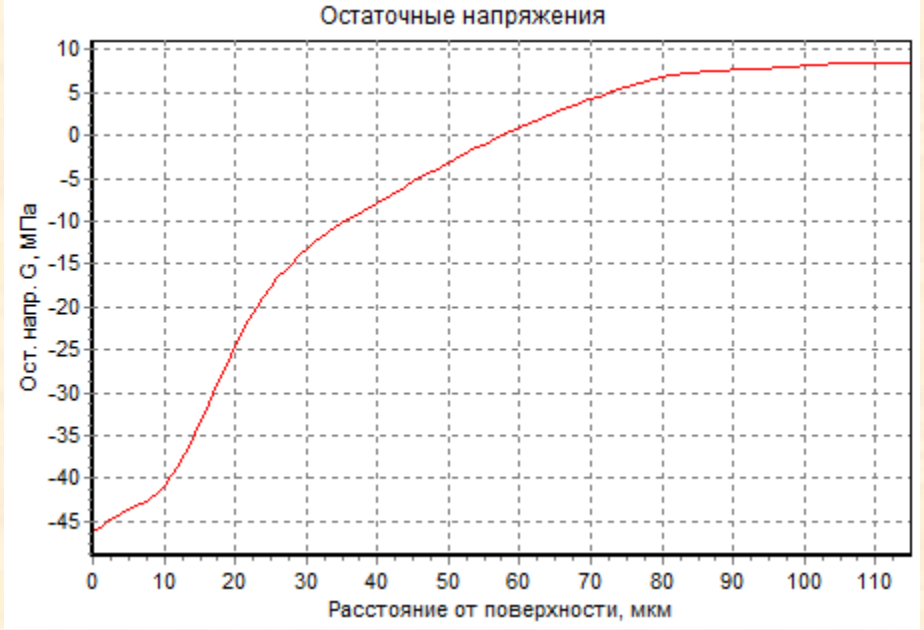


Неравномерности дробеструйной обработки



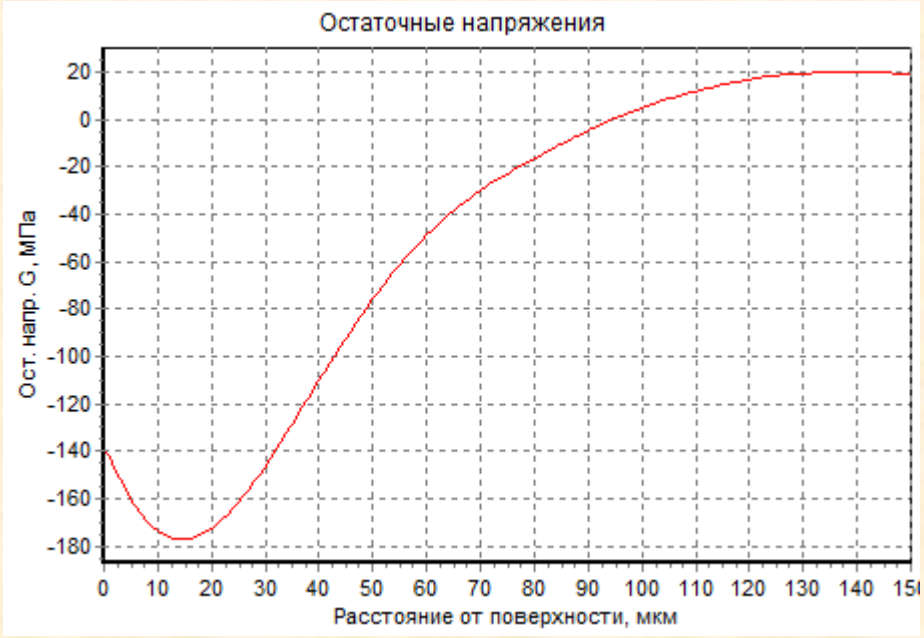


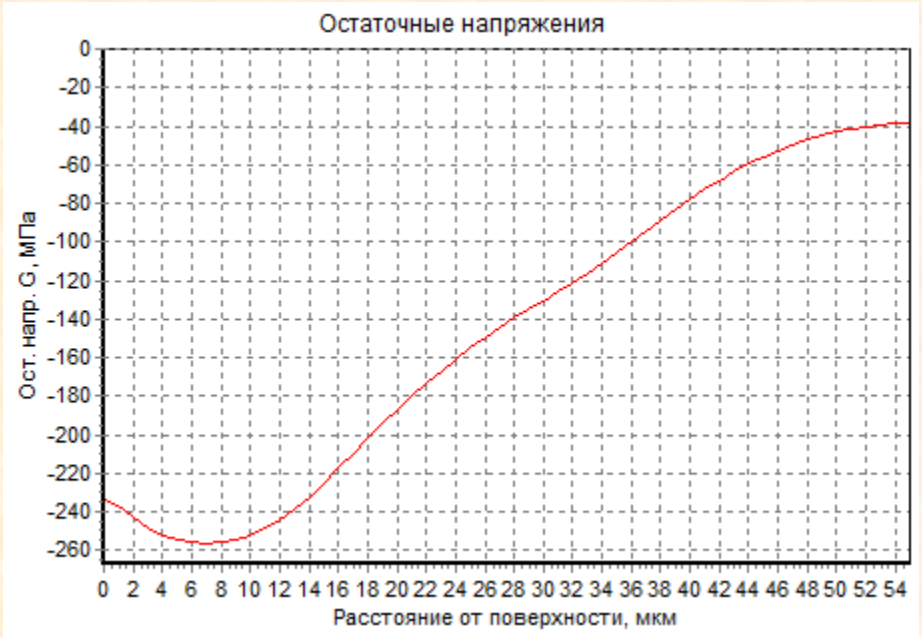




Отладка режимов термической обработки





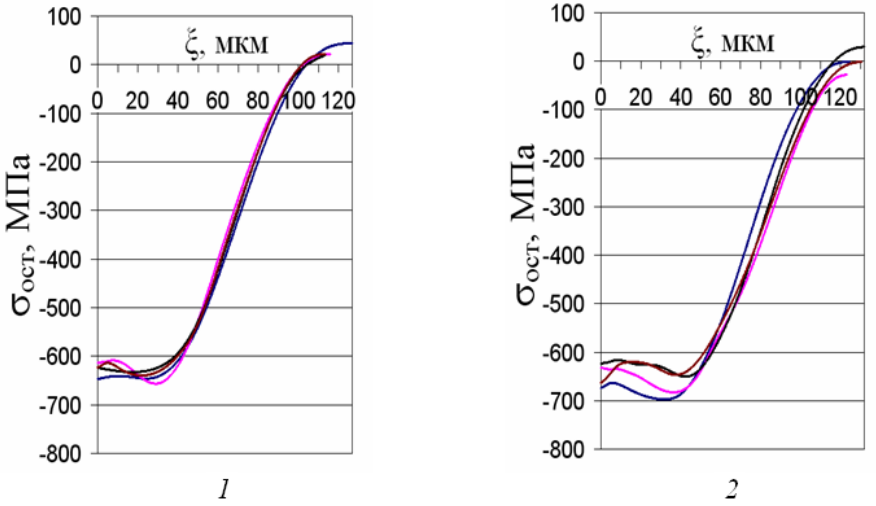




Экспериментальные исследования режимов упрочнения на образцах из материала ЭИ 698 ВД

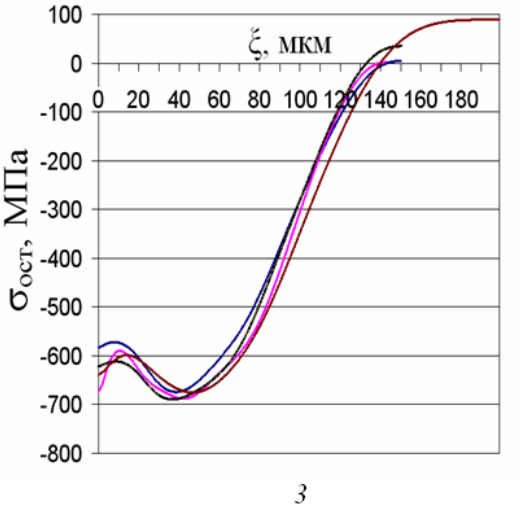
Тип и диаметр микрошариков $d_{ш}$	№ режима упроч-нения	Давление энерго-носителя p, МПа	Средние величины характеристик		
			Толщина слоя a, мм	Удельная энергия слоя $U_0 \times 10^4$, МПа·м	Предел выносливости σ_{-1}, МПа
Не упрочненные образцы					332,89
Стеклянные Ø 250 мкм	1	0,2	0,103	2,095	395,18
	2	0,3	0,122	2,736	395,37
	3	0,4	0,137	3,533	411,46
Стальные Ø 315 мкм	4	0,15	0,147	3,051	545,38
	5	0,3	0,173	3,391	562,59
	6	0,45	0,210	4,375	630,20
	7	0,6	0,232	5,003	574,80

Эпюры остаточных напряжений после упрочняющей обработки

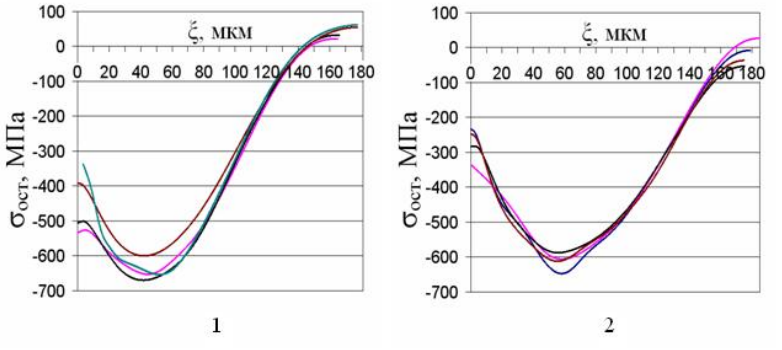


1

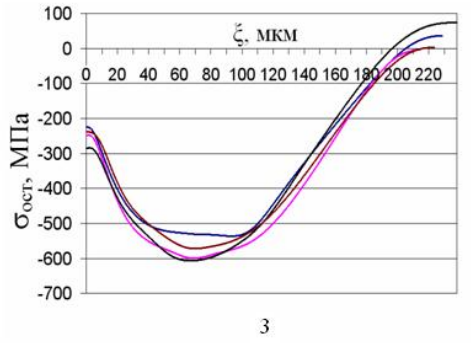
2



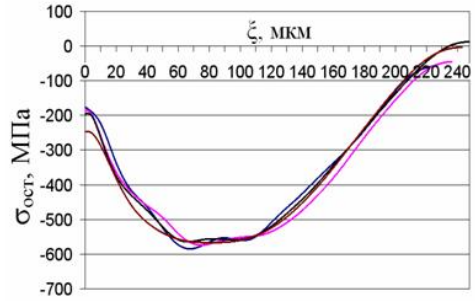
3



1 2



3



4

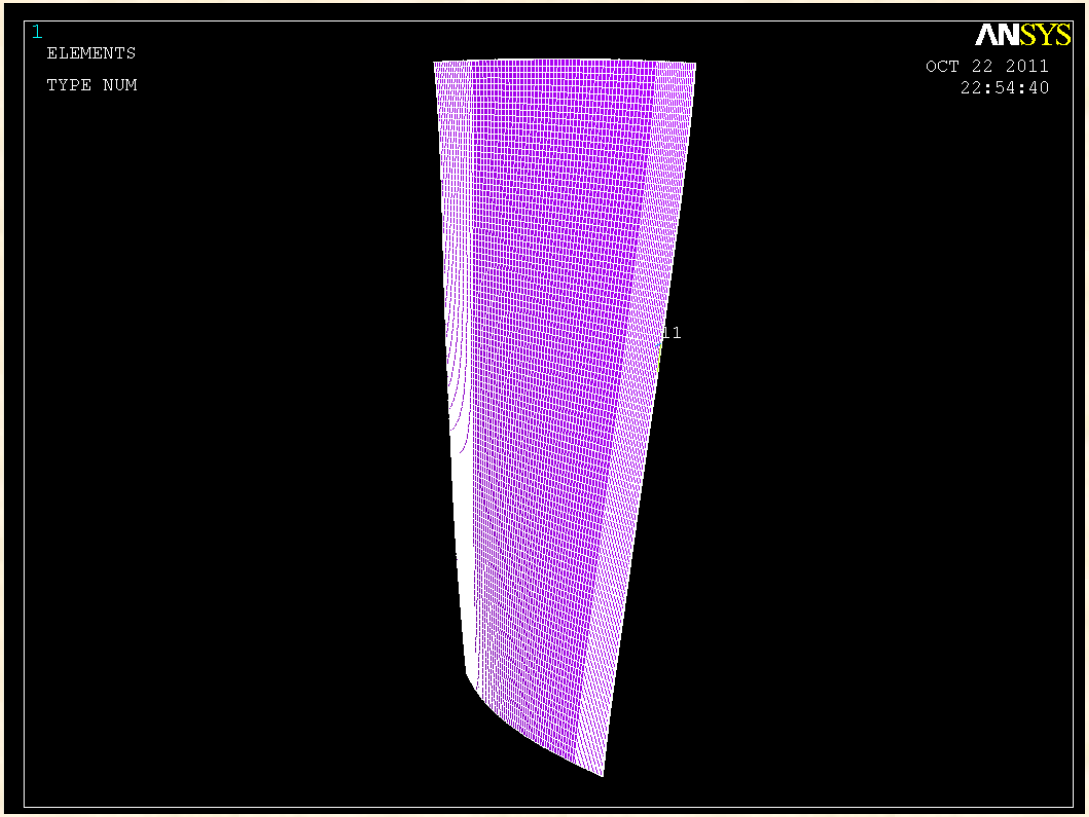
Эпюры ОН в плоских образцах из материала ЭИ-698 ВД после упрочнения стеклянными микрошариками Ø250 мкм (ОН определялись на приборе АСБ – 1) 1 – при давлении *p*= 0.2 МПа; 2 – при давлении *p*= 0.3 МПа; 3 – при давлении *p*= 0.4 МПа

Эпюры ОН в плоских образцах из материала ЭИ-698 ВД после упрочнения стальными микрошариками Ø315 мкм (ОН определялись на приборе АСБ – 1) 1 – при давлении *p*= 0.15 МПа; 2 – при давлении *p*= 0.30 МПа;3 – при давлении *p*= 0.45 МПа; 4 – при давлении *p*= 0.60 МПа

Лопатки компрессора ГТД

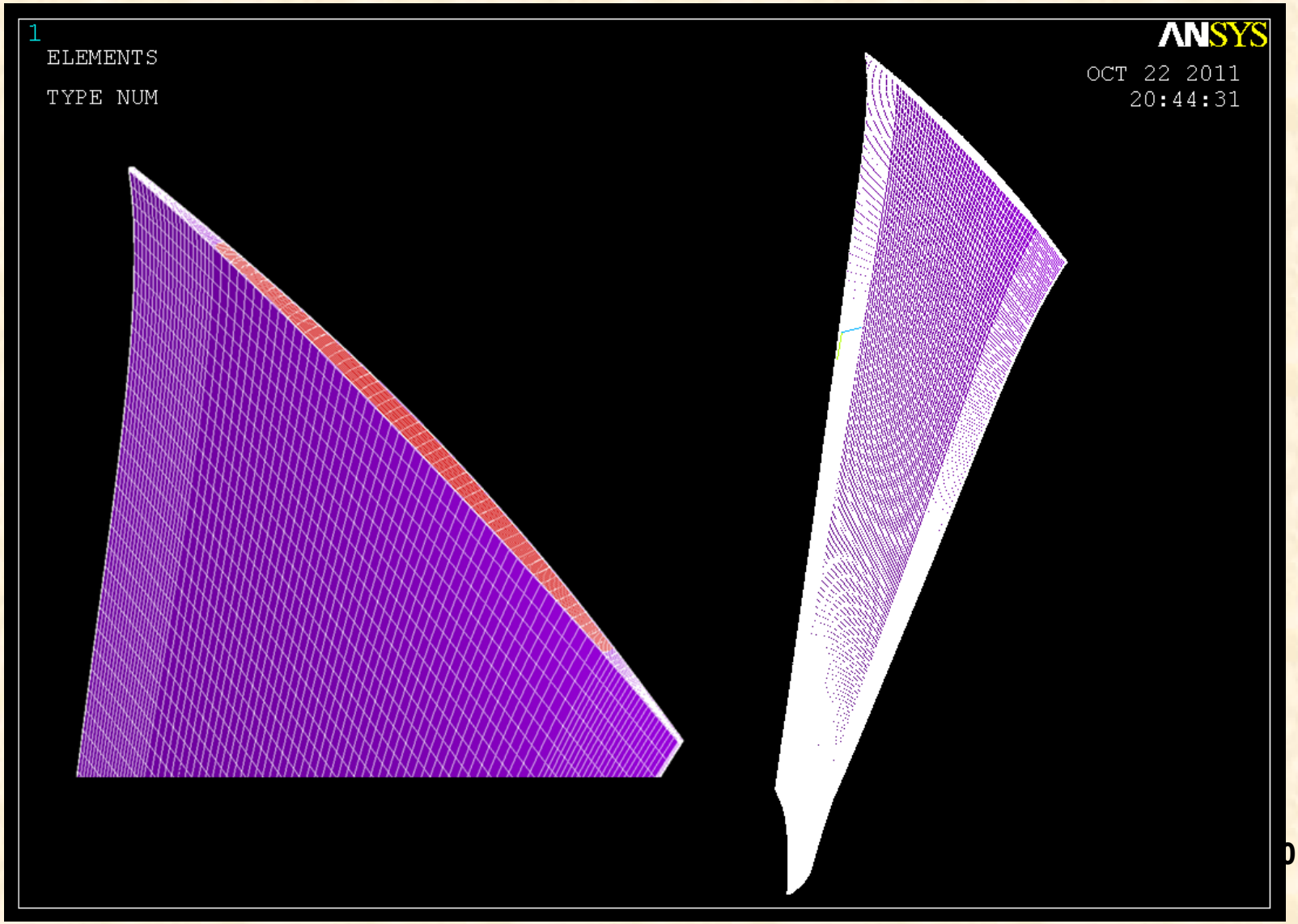


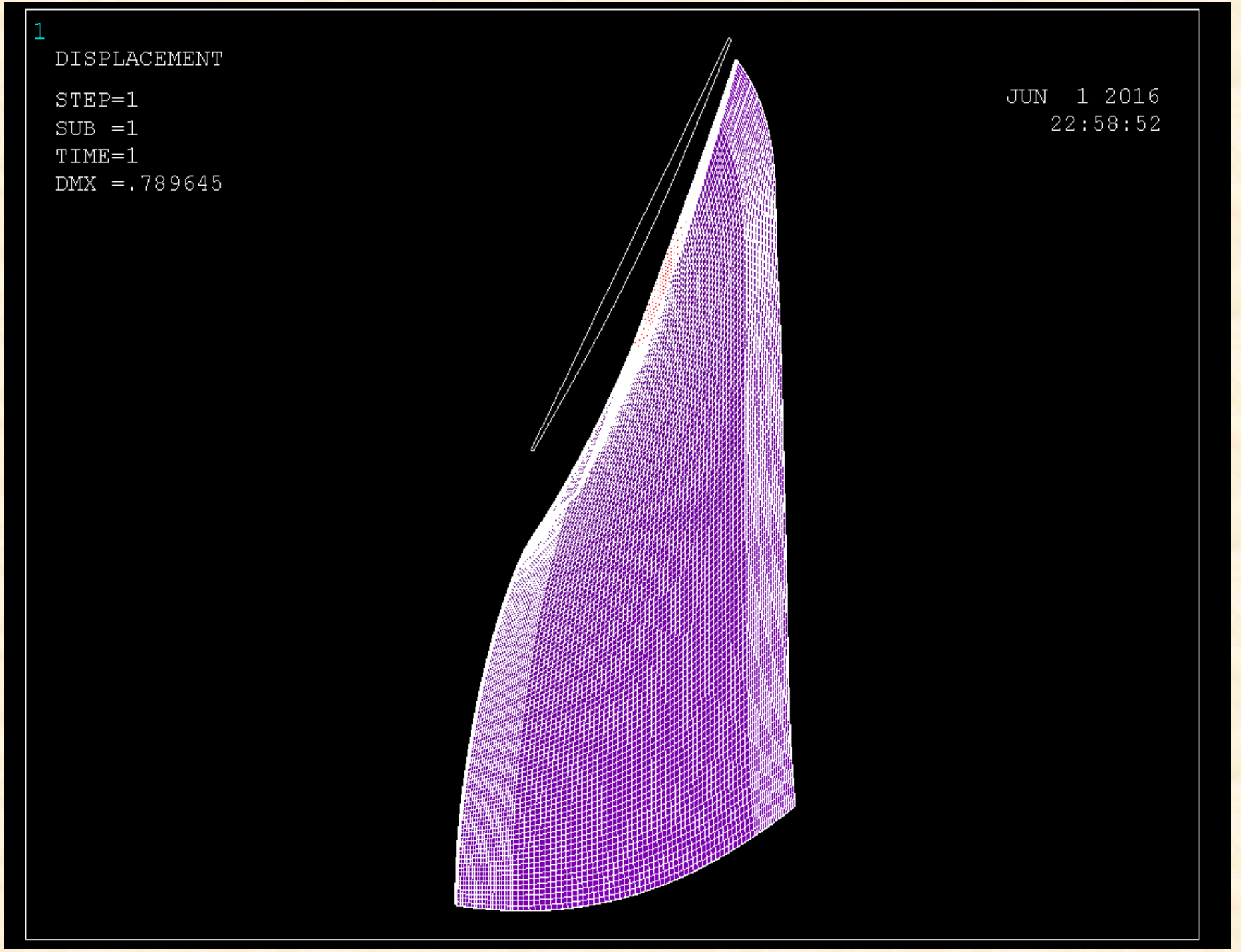
Лопатка 2 ступени КНД



Применение критериально-энергетических критериев для повышения долговечности элементов конструкции ГТД технологическими методами

Выбор оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД




1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
TIME=1
DMX =.789645
JUN 1 2016
22:58:52

Исследование упрочнения лопаток ГТД методом сквозного упрочнения тонкостенных кромок (выглаживание шариком)

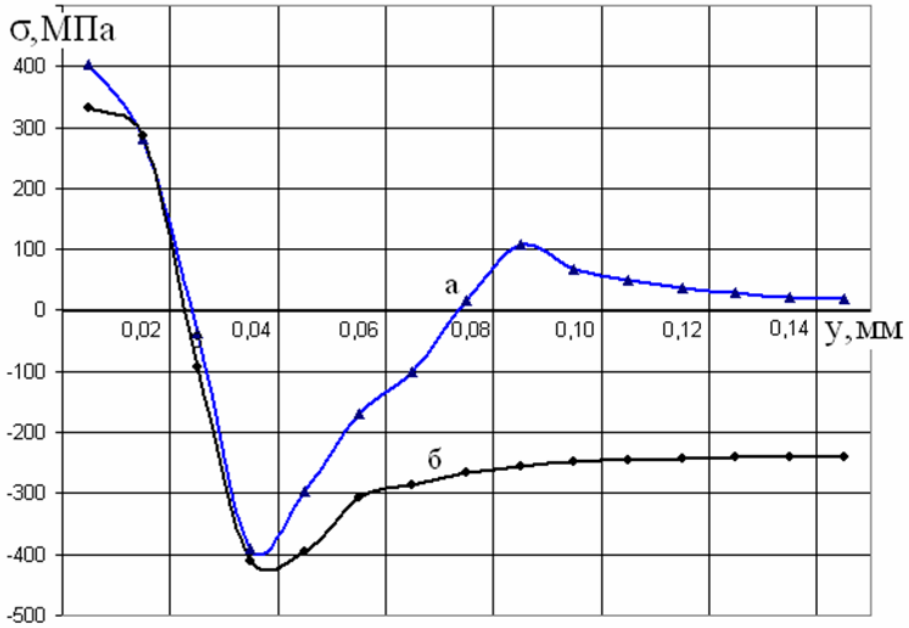
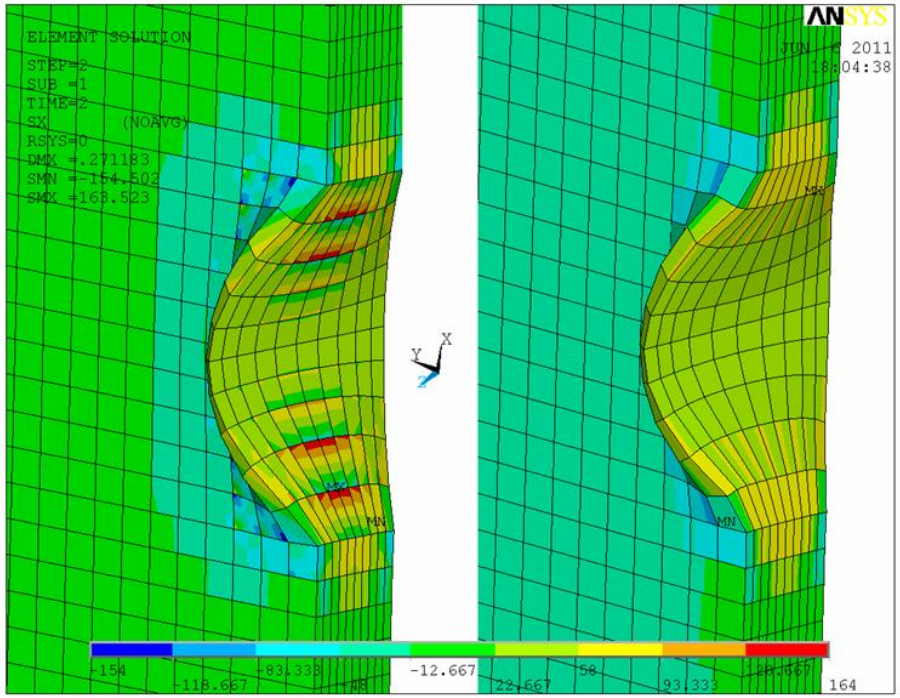


Рис. 4 Распределение ОН по глубине кромки после образования забоины
а – с не упрочённой ВШ кромкой;
б – с упрочнённой ВШ кромкой.

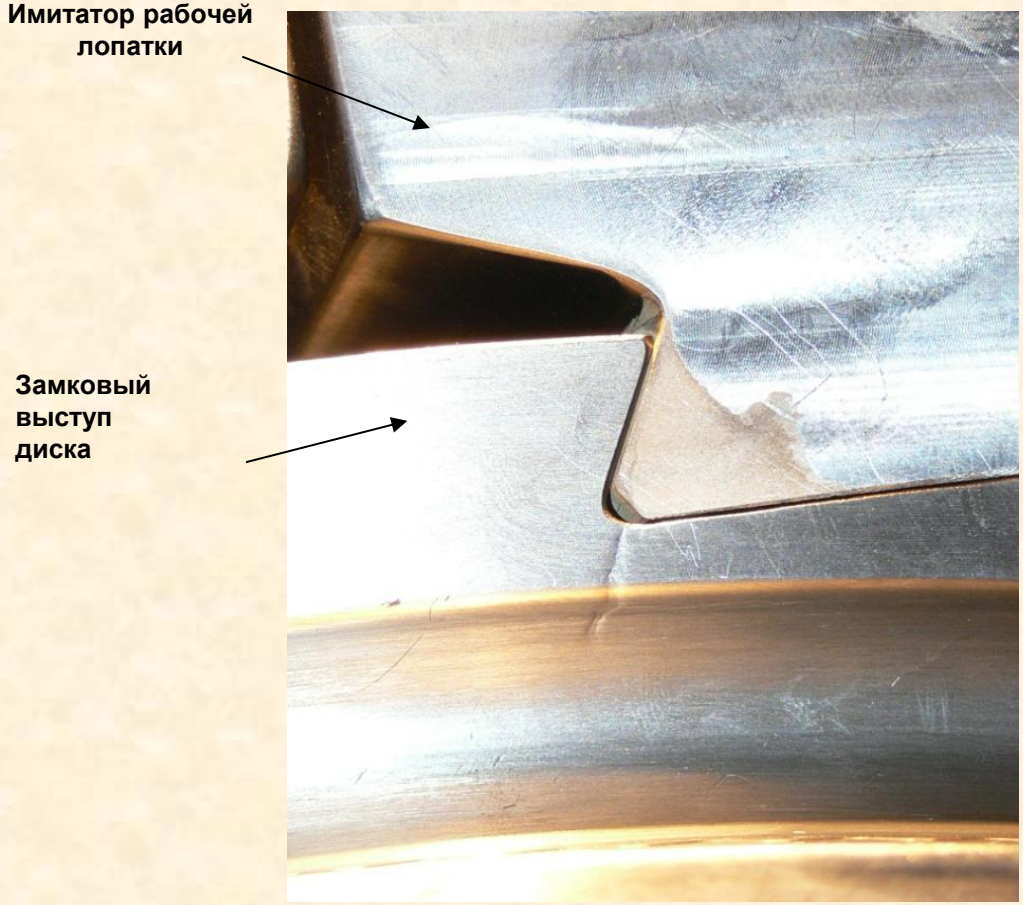


а б

Рис. 3 Моделирование забоины в кромке лопатки
а – с не упрочённой ВШ кромкой;
б – с упрочнённой ВШ кромкой.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ В МАЛОЦИКЛОВОЙ ОБЛАСТИ

Замок типа «ласточкин хвост»



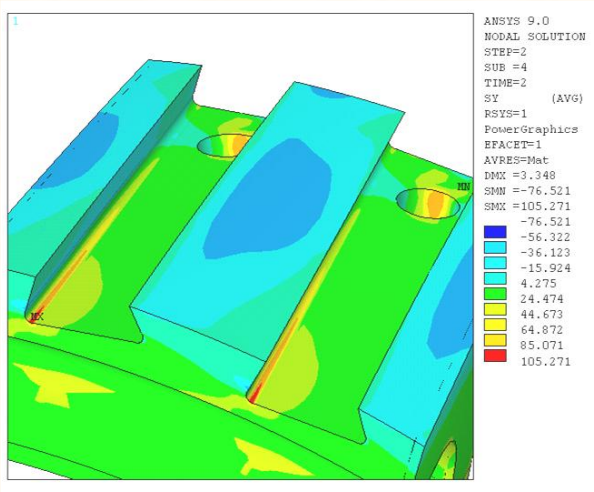
Образование трещины в замке диска 1 ст. КНД при испытаниях на установке УИР-3

Повышение малоцикловой долговечности дисков компрессора низкого давления ГТД

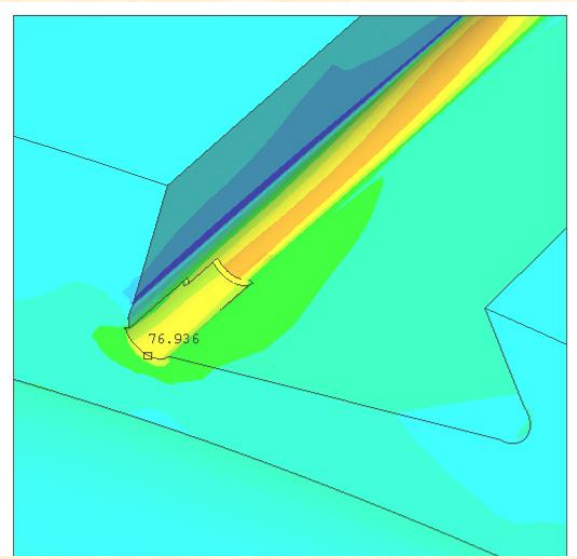
Разработана методика КЭ-моделирования напряжённо-деформированного состояния деталей ГТД в зоне концентрации напряжений с учётом остаточных напряжений после упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования (ППД). На примере диска компрессора низкого давления рассмотрено НДС в замковом соединении типа «ласточкин хвост» после упрочнения микрошариками. Расчёты и испытания образцов и дисков на малоцикловую усталость на стенде УИР-3 подтвердили эффективность упрочнения методом ППД в зоне концентрации напряжений.



Модель поверхностного слоя с ОН в пазе замка



Распределение окружных напряжений в диске 1 ст. КНД на взлетном режиме работы двигателя Д-30КУ-154



Значение первых главных напряжений на глубине 0,4 мм в зоне с максимальной концентрацией

Расчёт циклической долговечности образцов и дисков проводился методом универсальных наклонов по модифицированной в ЦИАМ формуле Мэнсона

$$\Delta\varepsilon = \frac{3{,}5\left(\sigma_{äë} - \sigma_m\right)}{E(t)} N_ö^{-0{,}12} + \left(\ln\frac{1}{1-\psi(t)}\right)^{0{,}6} N_ö^{-0{,}6},$$

где $\Delta\varepsilon$ – интенсивность размахов деформаций за цикл нагружения;
$\sigma_{дл}$ и σ_m –соответственно предел длительной прочности материала и среднее напряжение в цикле, МПа;
***E*(*t*) – модуль упругости материала дисков, МПа; $\psi(t)$ –относительное сужение материала с учетом длительности работы и температуры.**

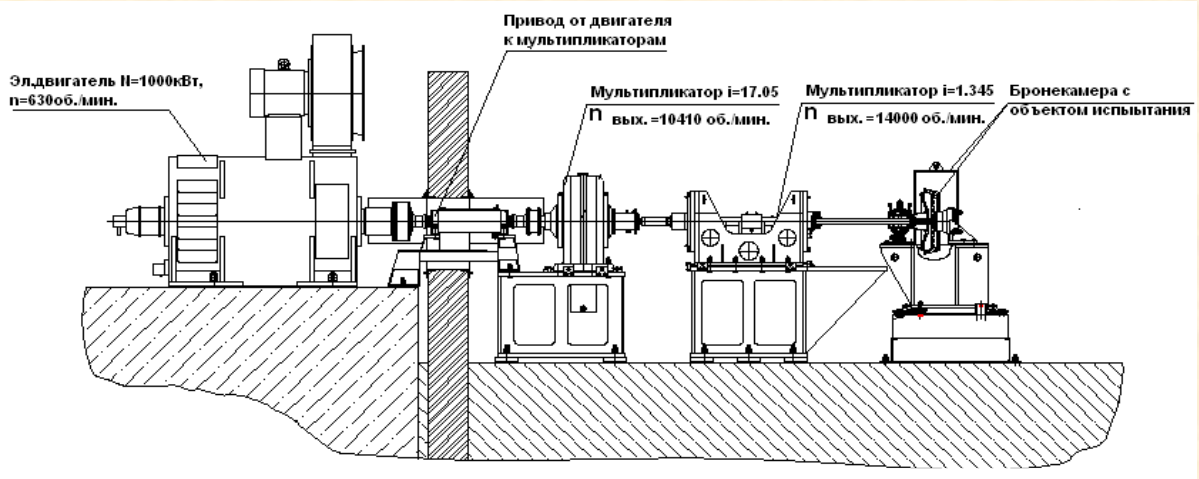


Рис. 9 Схема установки для испытания роторов УИР-3



Рис. 10 Фотографии установки УИР-3 и диска 1 ступени КНД с имитаторами рабочих лопаток

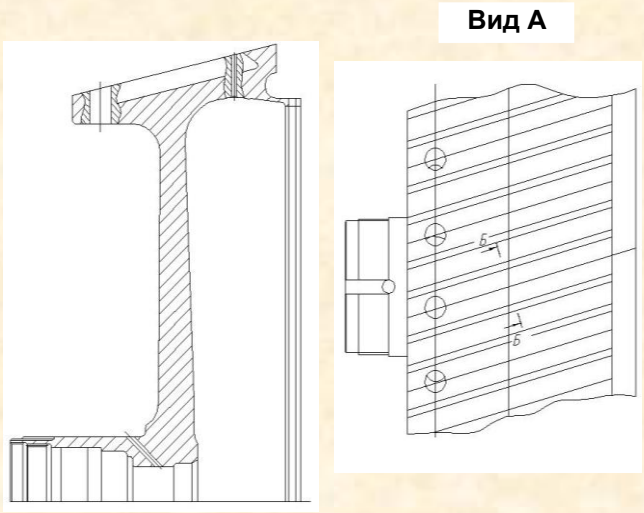


Рис. 5 Эскизы диска 1 ст. КНД, исходного и перепротянутого пазов

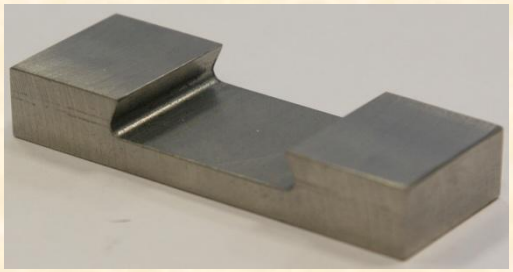


Рис. 6 Образец для испытаний на МЦУ

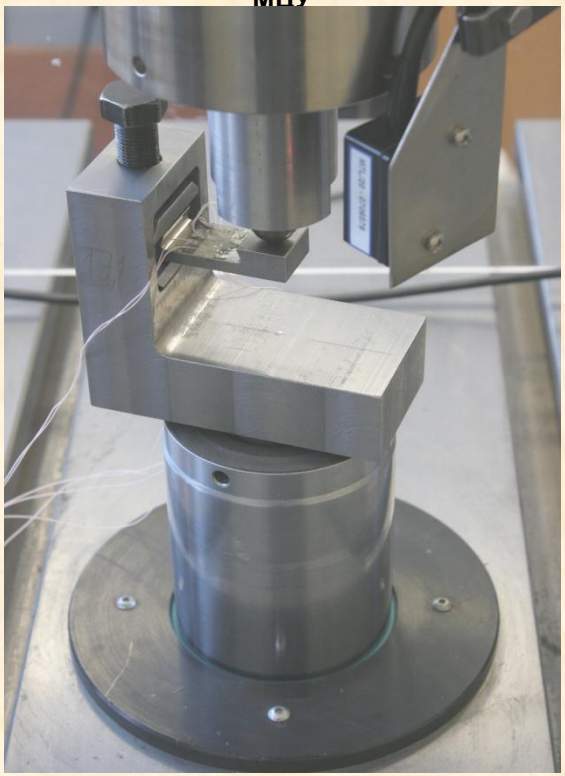


Рис. 8 Схема нагружения образца

Таблица 1
Результаты испытаний опытных образцов на МЦУ

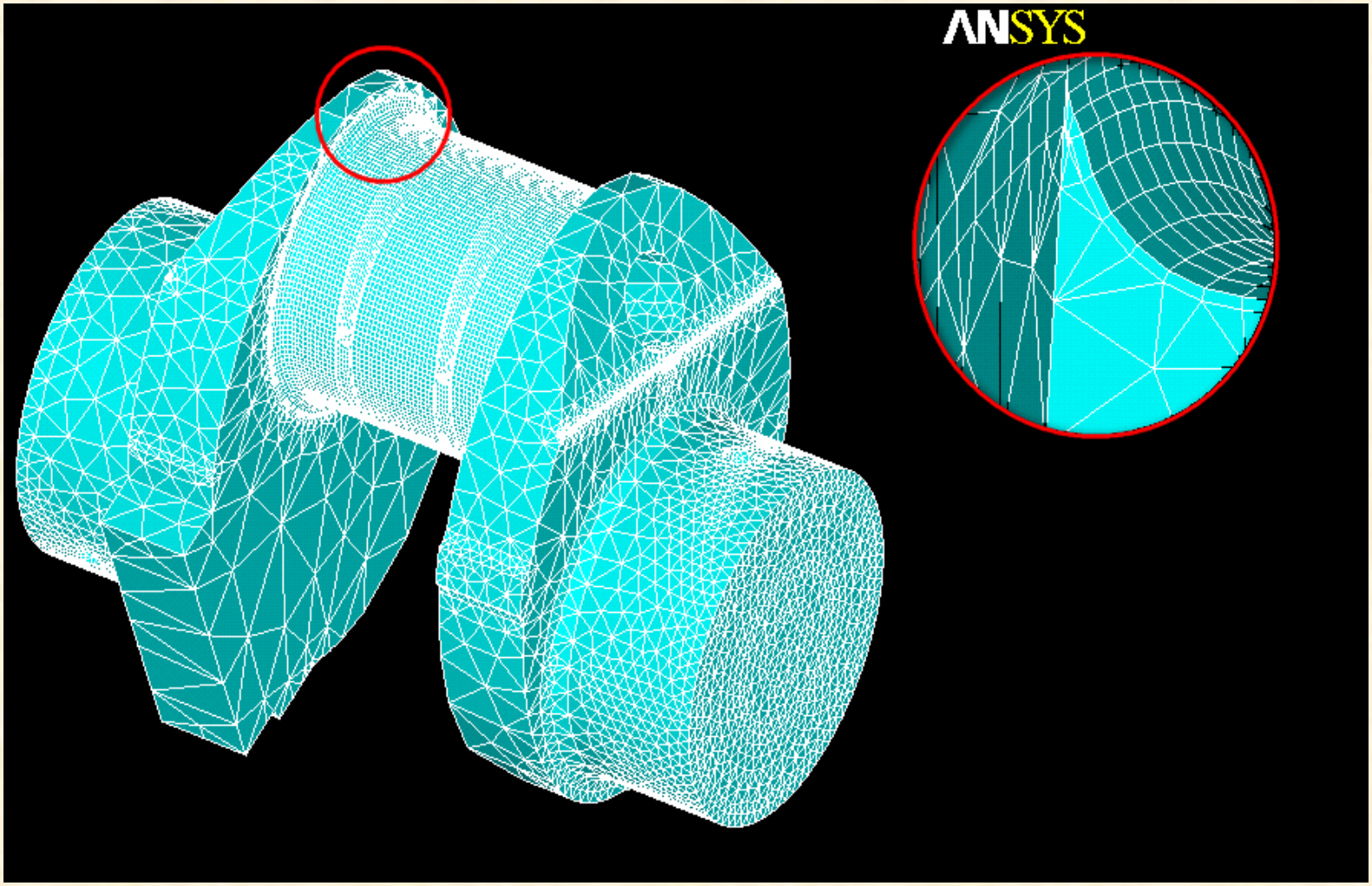
№ образца	Количество циклов до разрушения			
	Образцы из диска без наработки	Образцы из диска с наработкой при ЭЦИ 9658 циклов	Образцы из диска с наработкой в эксплуатации 17995час / 5545циклов	Образцы из диска с наработкой в эксплуатации, после перепротяжки и упрочнения
1	14629	12909	9666	58000
2	14242	3522	20900	51762
3	10247	9600	13344	42000
4	19907	–	–	–
Среднее Количество циклов	14756	8677	14637	50587

Таблица 2
Результаты сравнительных испытаний и расчётов долговечности опытных образцов и дисков на МЦУ

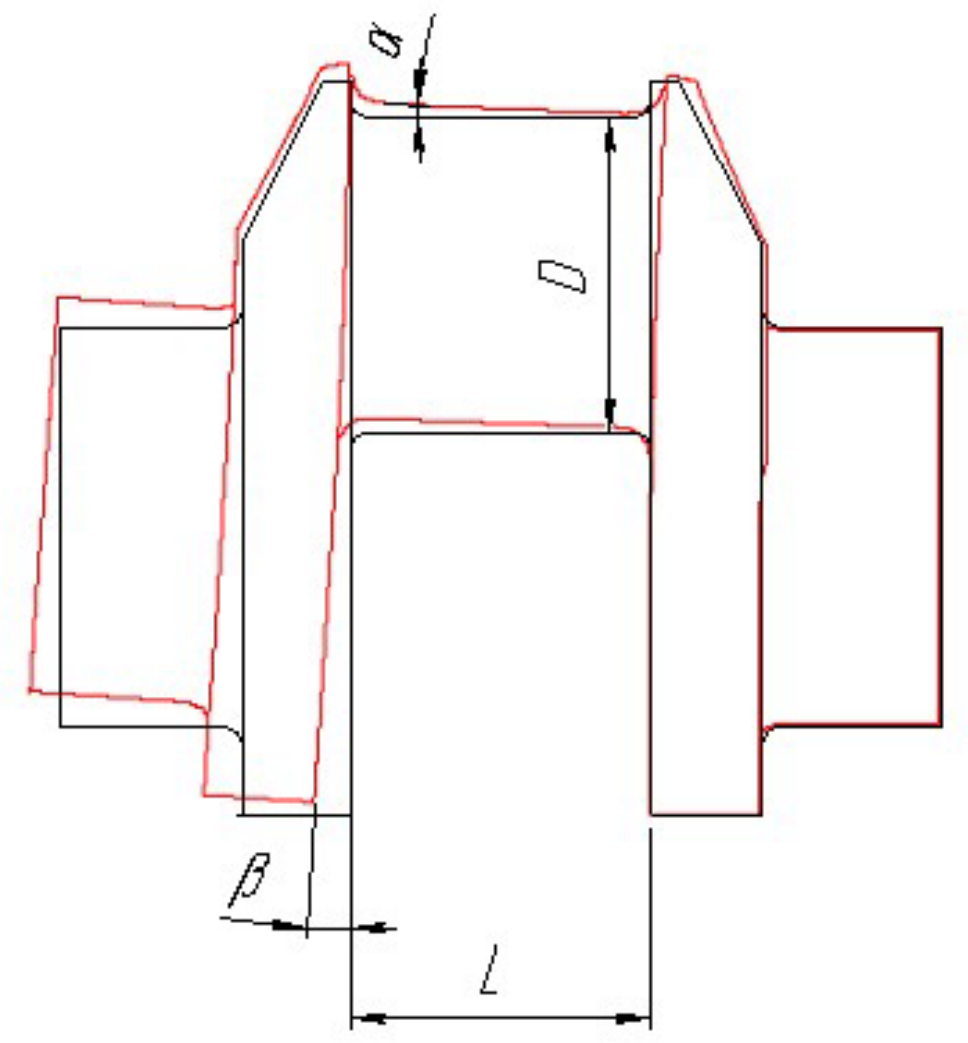
Варианты	Количество циклов до разрушения			
	Долговечность опытных образцов		Долговечность дисков	
	Опытные образцы без упрочнения ППД	Опытные образцы с упрочнением ППД	Диски без упрочнения ППД	Диски с упрочнением ППД
Результаты испытаний	(14756+8677+ 14637)= 12690	50587	(5874+7635) = 6755	(24835+29400) = 27118
Результаты расчётов	10490	51210	9556	46100
Эффективность экспер./расчётн.	4 / 4,9		4 / 4,8	

Результаты расчётов долговечности образцов и дисков без упрочнения и с упрочнением, приведённые в табл. 2, так же как и результаты испытаний подтверждают достаточно большую эффективность применения упрочняющих технологий методом ППД для повышения долговечности не только в многоцикловой, но и в малоцикловой области.

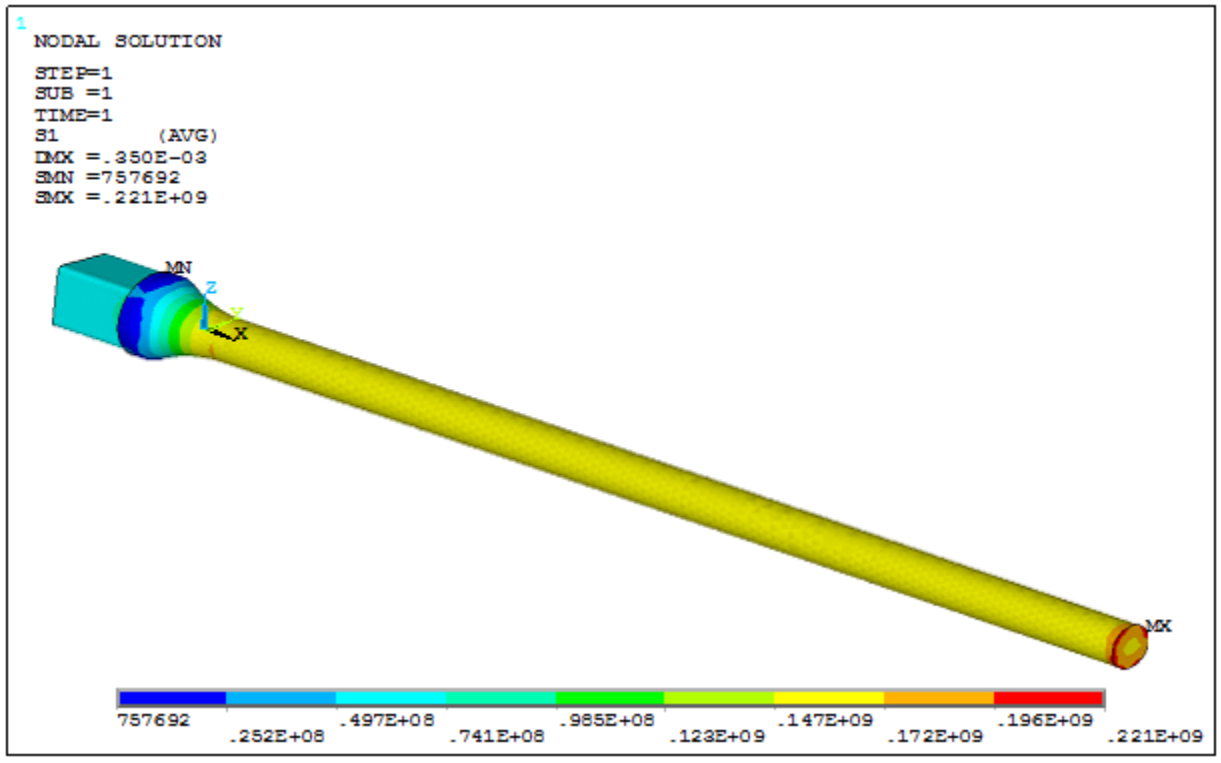
Коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания



Технологические остаточные деформации коленчатого вала ЯМЗ-238 после упрочнения обкаткой роликом

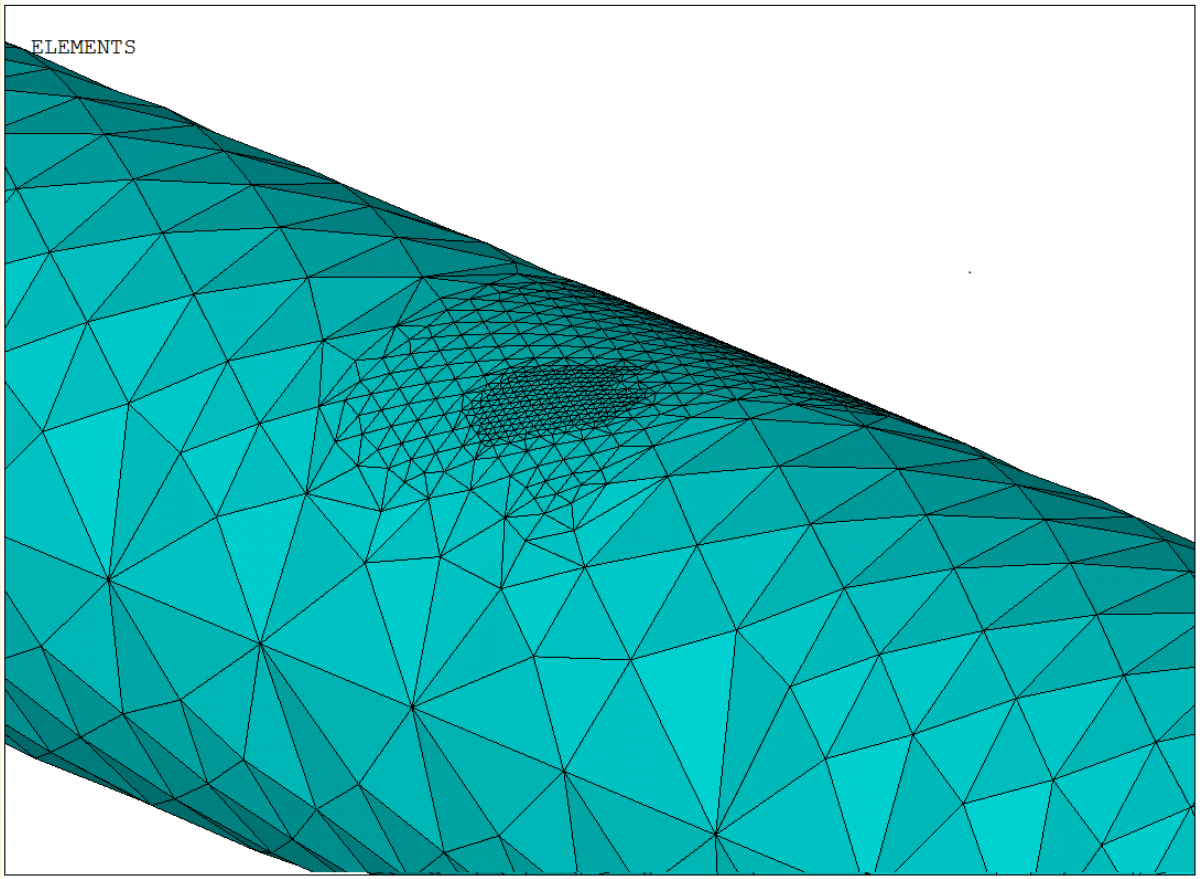


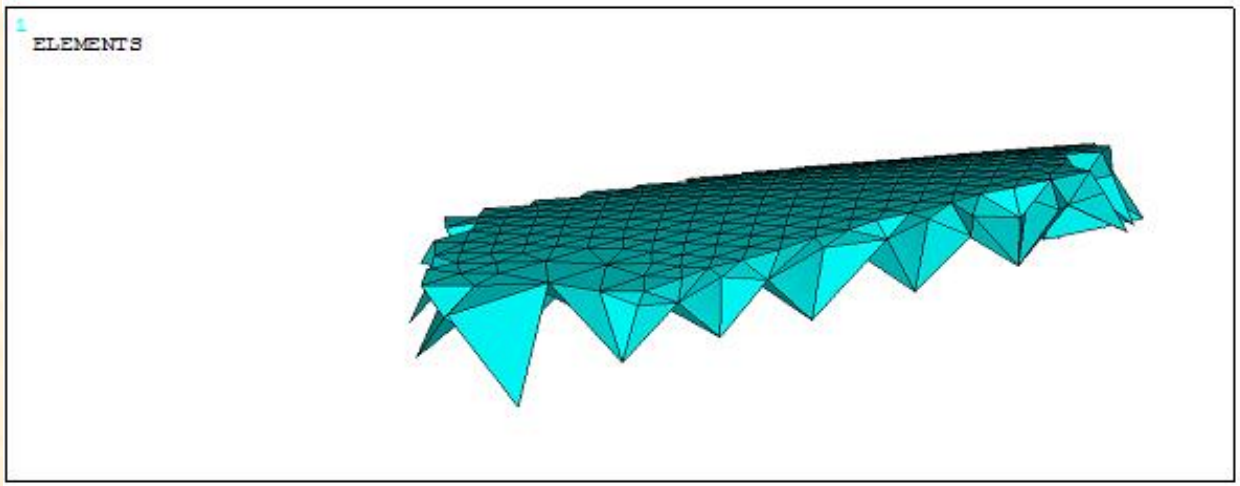
Расчёт напряжённо-деформированного состояния штанг на основе конечно-элементного моделирования повреждения поверхности штанг коррозией



Распределение главных напряжений и деформаций в штанге при отсутствии коррозии

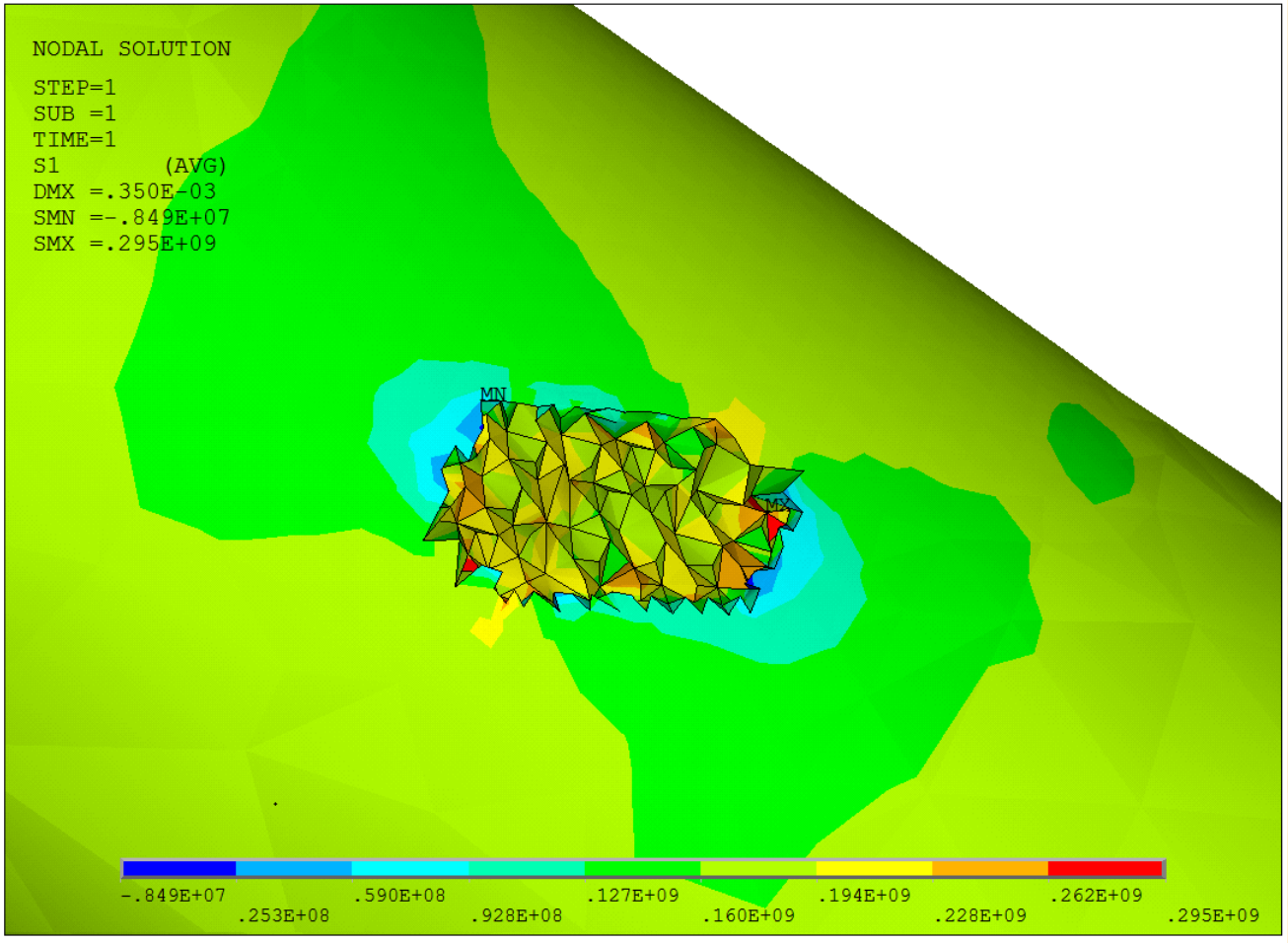
Главные напряжения, МПа			Главные деформации		
σ_1	σ_2	σ_3	ε_1	ε_2	ε_3
170,13	0,90	0,54	0,00084849	– 0,00025152	– 0,00025382





примерные размеры очага разрушения и язвы: длина×ширина ×глубина ≈ 5,87 ×3,31×0,88 мм

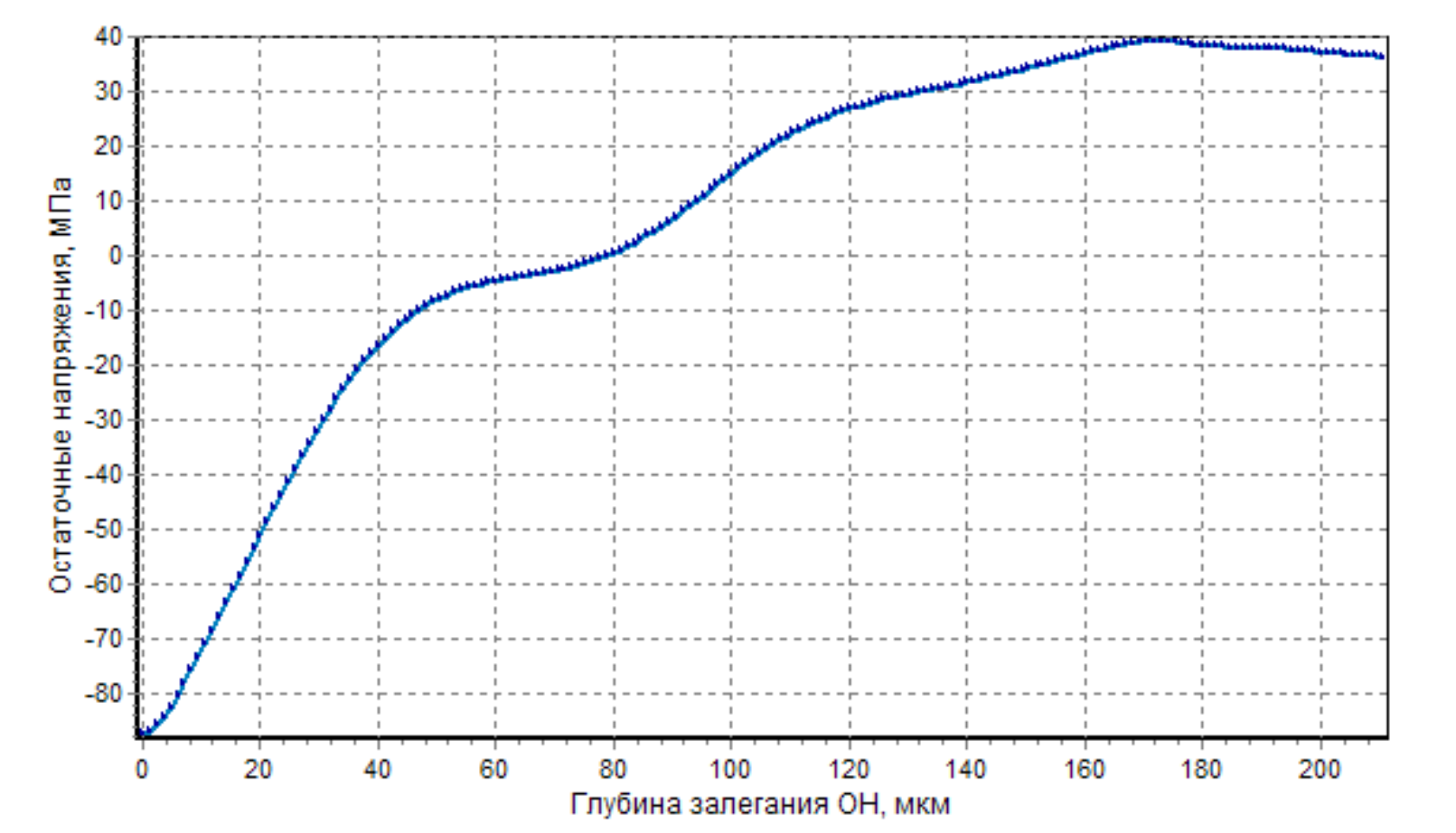
Распределение первых главных напряжений в коррозионном повреждении штанги



Распределение главных напряжений и деформаций в штанге с коррозией

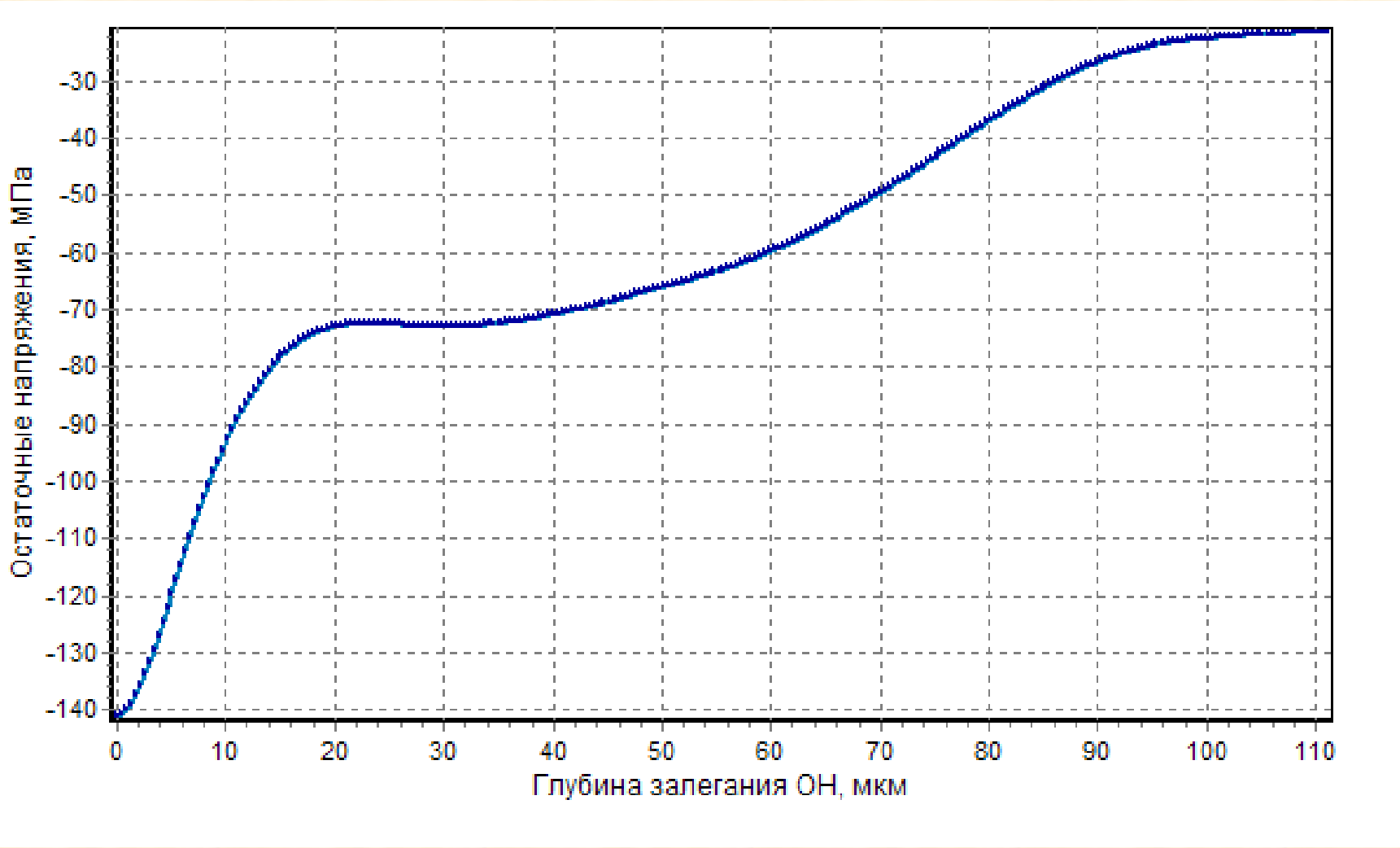
Главные напряжения, МПа			Главные деформации		
σ_1	σ_2	σ_3	ε_1	ε_2	ε_3
292,11	38,43	14,36	0,0013814	– 0,00026755	– 0,00042402

Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое штанг без наработки

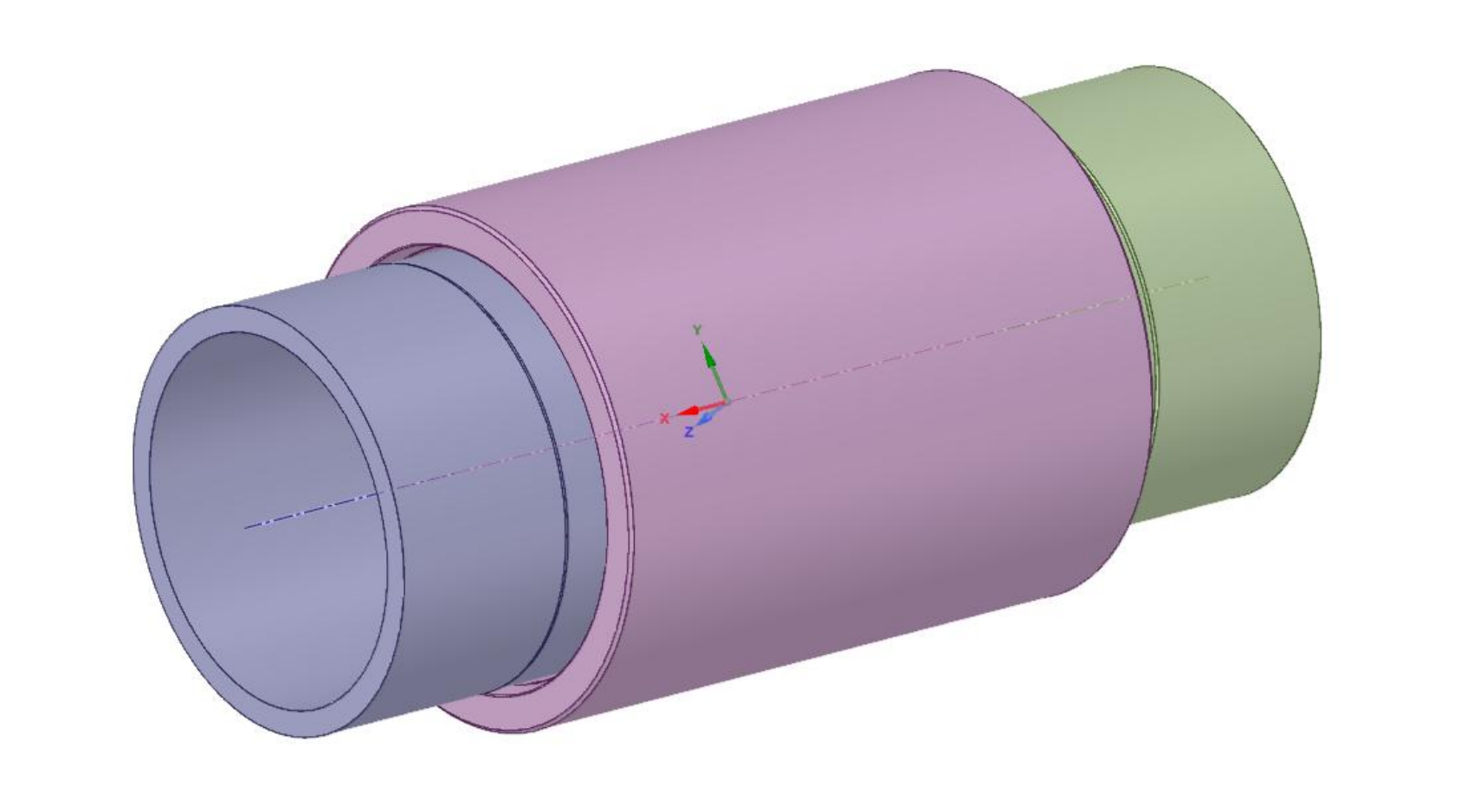


Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое штанг с наработкой (с коррозионным повреждением поверхности штанги)

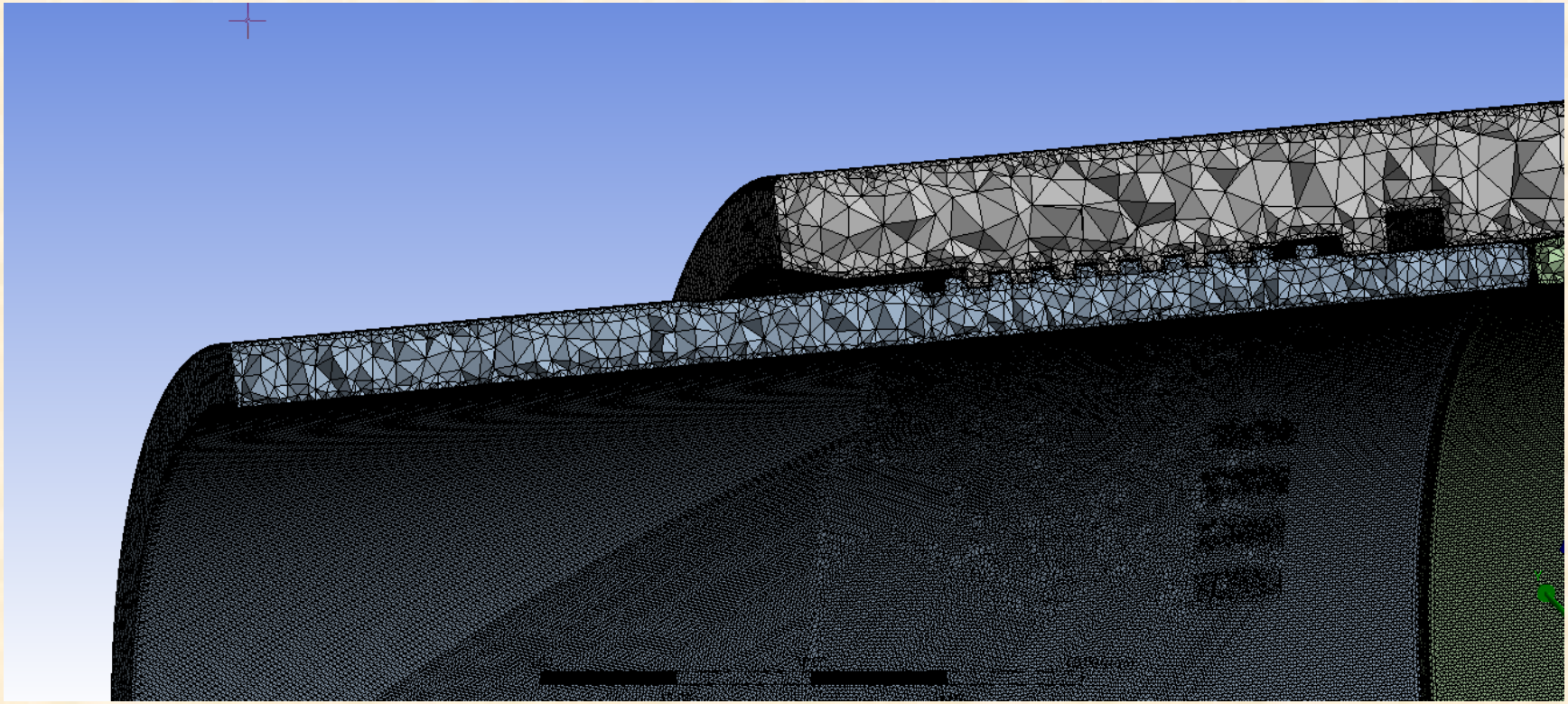
Повышение сжимающих остаточных напряжений вследствие наводораживания поверхностного слоя, а также влияния коррозии составило ~ 60 МПа



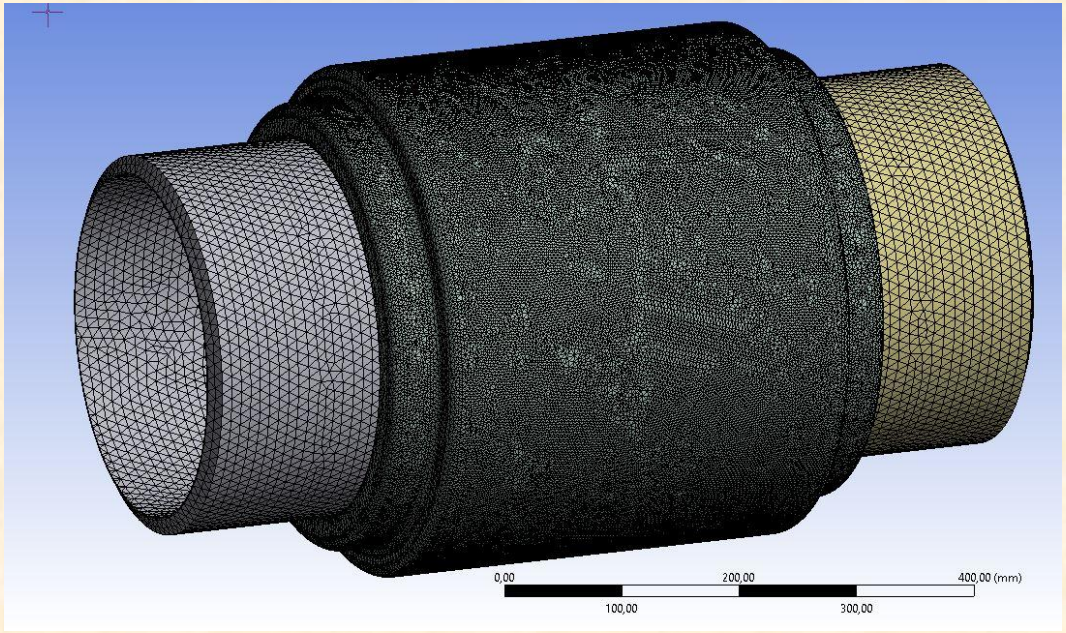
Конечно-элементные расчёты на прочность трубных соединений



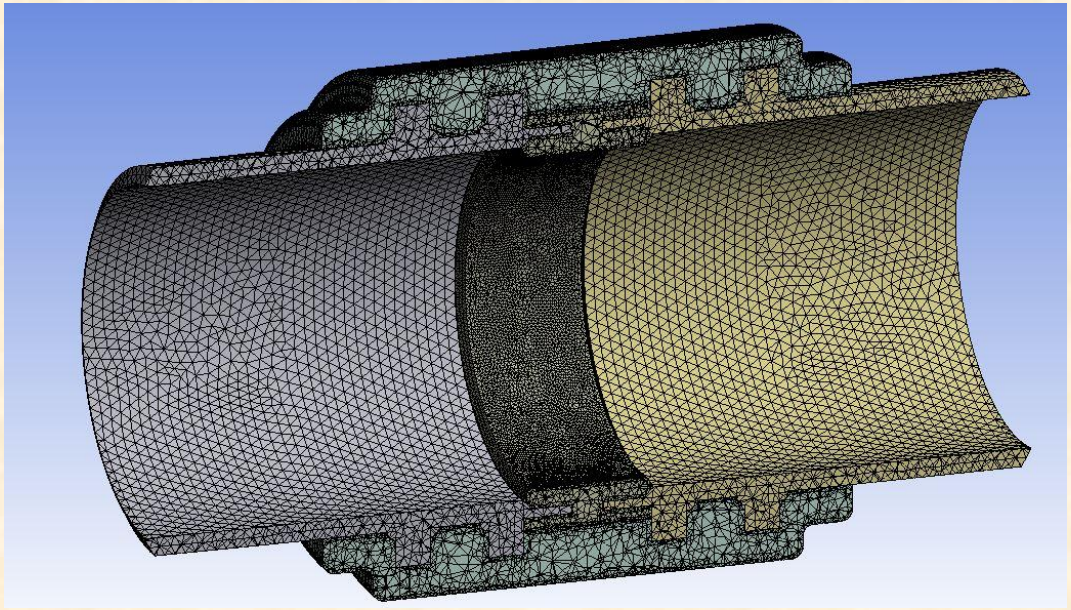
Конечно-элементная модель соединения



Материал труб 09Г2С
Материал муфты 32Г2
К модели было приложено рабочее давление 11МПа

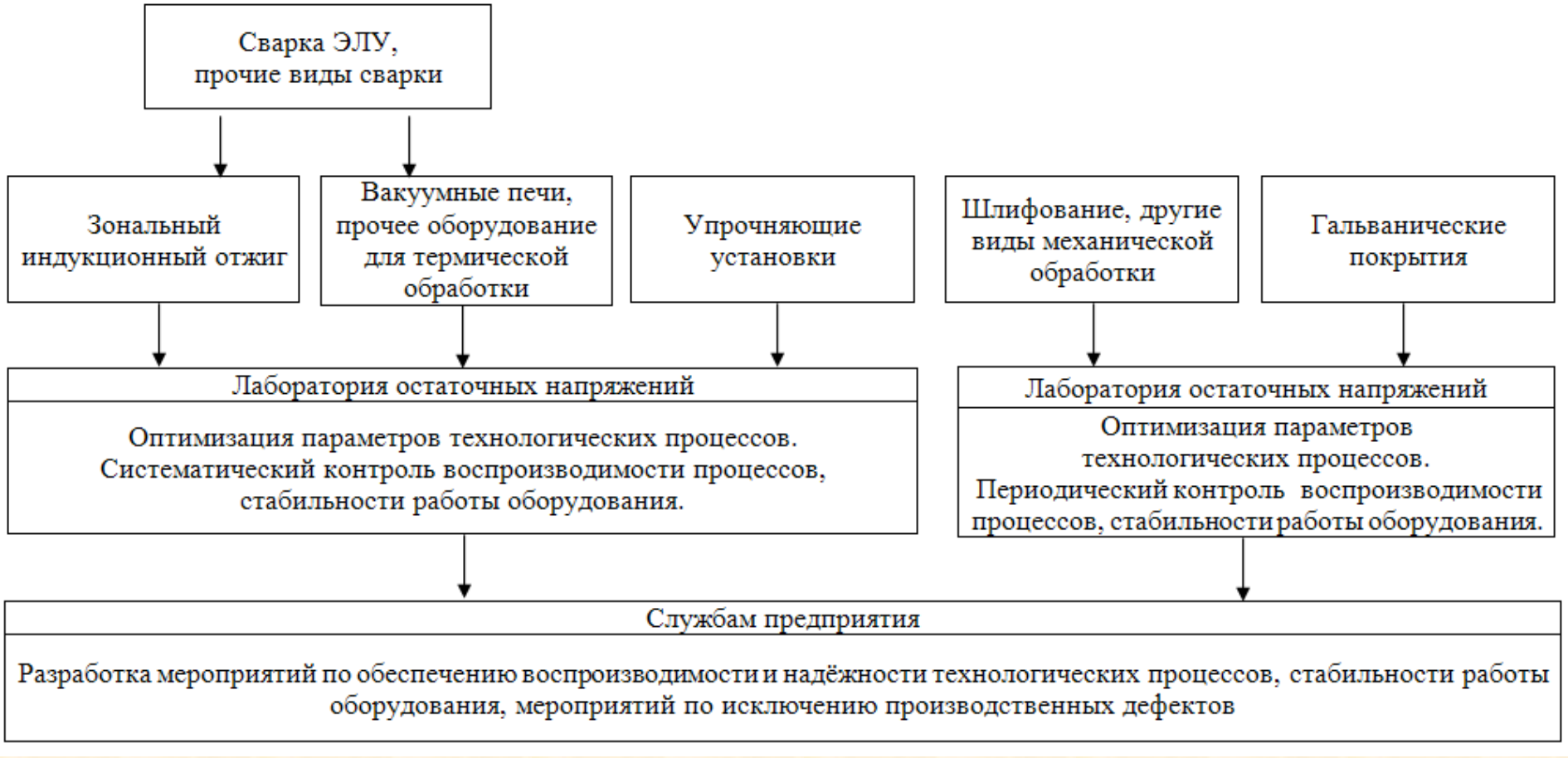


Конечно-элементная модель соединения



Конечно-элементная модель соединения в разрезе

Система оптимизации и контроля технологических процессов по остаточным напряжениям



ОПТИМИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

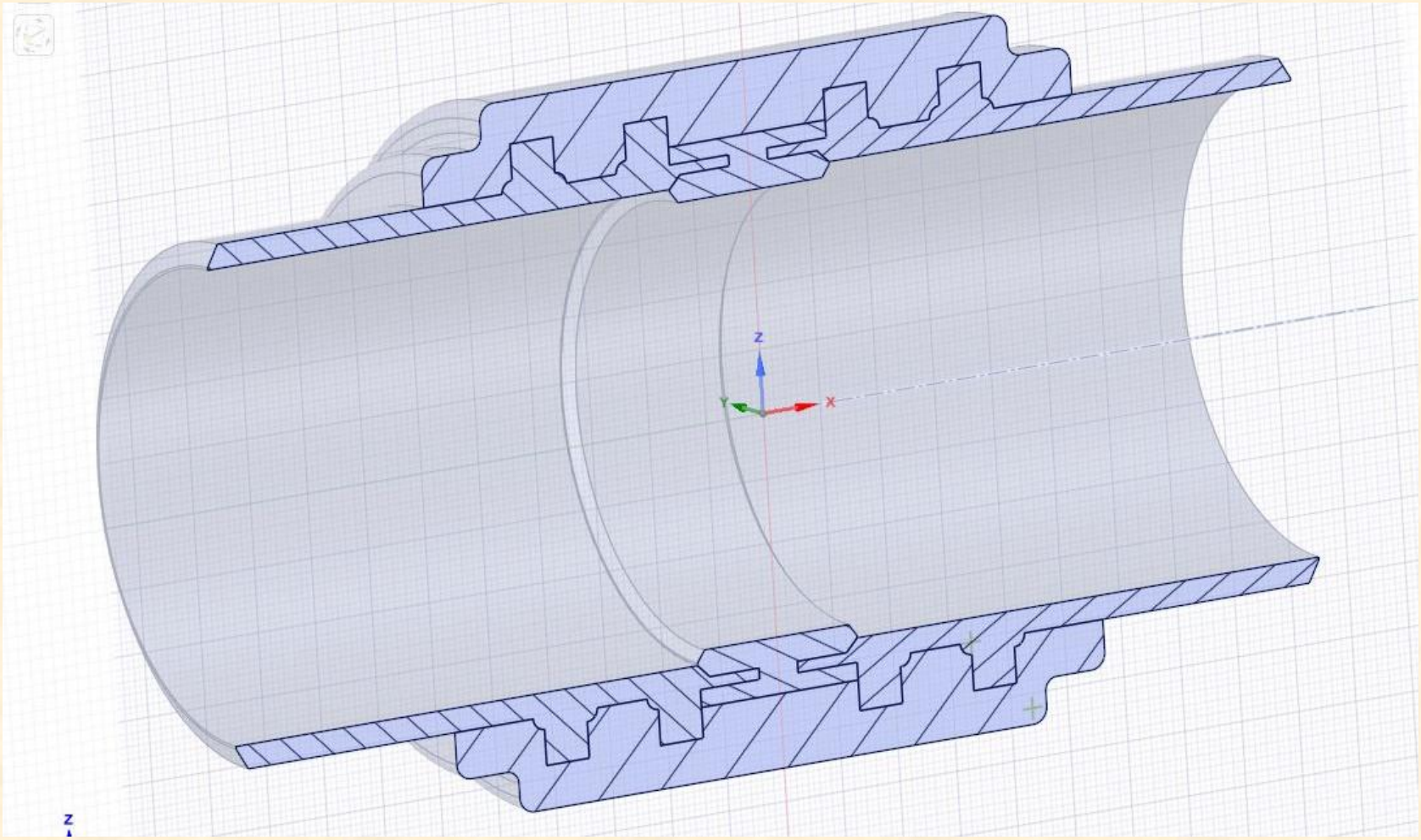
Контроль стабильности технологических процессов	Систематическое определение остаточных напряжений в образцах свидетелях или опытных деталях позволяет получать эпюры остаточных напряжений и осуществлять контроль воспроизводимости технологических процессов: - по величине остаточных напряжений на поверхности детали; - по величине максимальных остаточных напряжений и глубине их залегания; - по эпюре распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей. Отклонение параметров эпюры остаточных напряжений от требуемых значений свидетельствует о необходимости проверки технологического процесса, технологической дисциплины и разработке мероприятий по её обеспечению.
Контроль работоспособности оборудования	Значительные отклонения эпюр остаточных напряжений от заданных является следствием сбоев в работе оборудования или действием человеческого фактора (нарушение технологического процесса). По результатам контроля разрабатываются мероприятия по ремонту оборудования, исключению повторных сбоев.
Оптимизация параметров технологических процессов	Основная цель оптимизации технологических процессов по остаточным напряжениям – создание благоприятной технологической наследственности на всех этапах производства деталей (механическая, термическая, упрочняющая обработка, гальванические покрытия). Исключение неблагоприятных растягивающих и создание сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое изготавливаемых деталей позволяет обеспечить прочность и долговечность деталей, адгезию покрытий, уменьшить или исключить технологические остаточные деформации – коробление деталей.
Решение технологических проблем	Наличие в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений является причиной ряда дефектов, среди которых наиболее значимыми являются: - снижение циклической прочности – выносливости деталей; - отслаивание гальванических покрытий; - скрытые прижоги при шлифовании и других видах механической обработки; - изменение геометрических размеров и формы (коробление) деталей. Выявление дефектов возможно путём определения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей или образцов-свидетелей. Решение проблем коробления деталей после упрочняющей обработки осуществляется путём моделирования пластически деформированного поверхностного слоя упрочняемых деталей. При этом исходными данными для расчёта технологических остаточных деформаций являются эпюры остаточных напряжений.

ООО НАУЧНО-КОММЕРЧЕСКАЯ ФИРМА « СБК »
РФ, 152912, г. Рыбинск, Ярославской обл., ул. Зои Космодемьянской, 33-33
тел. +7 9170111771, +79108137542, E-mail: bukaty@inbox.ru

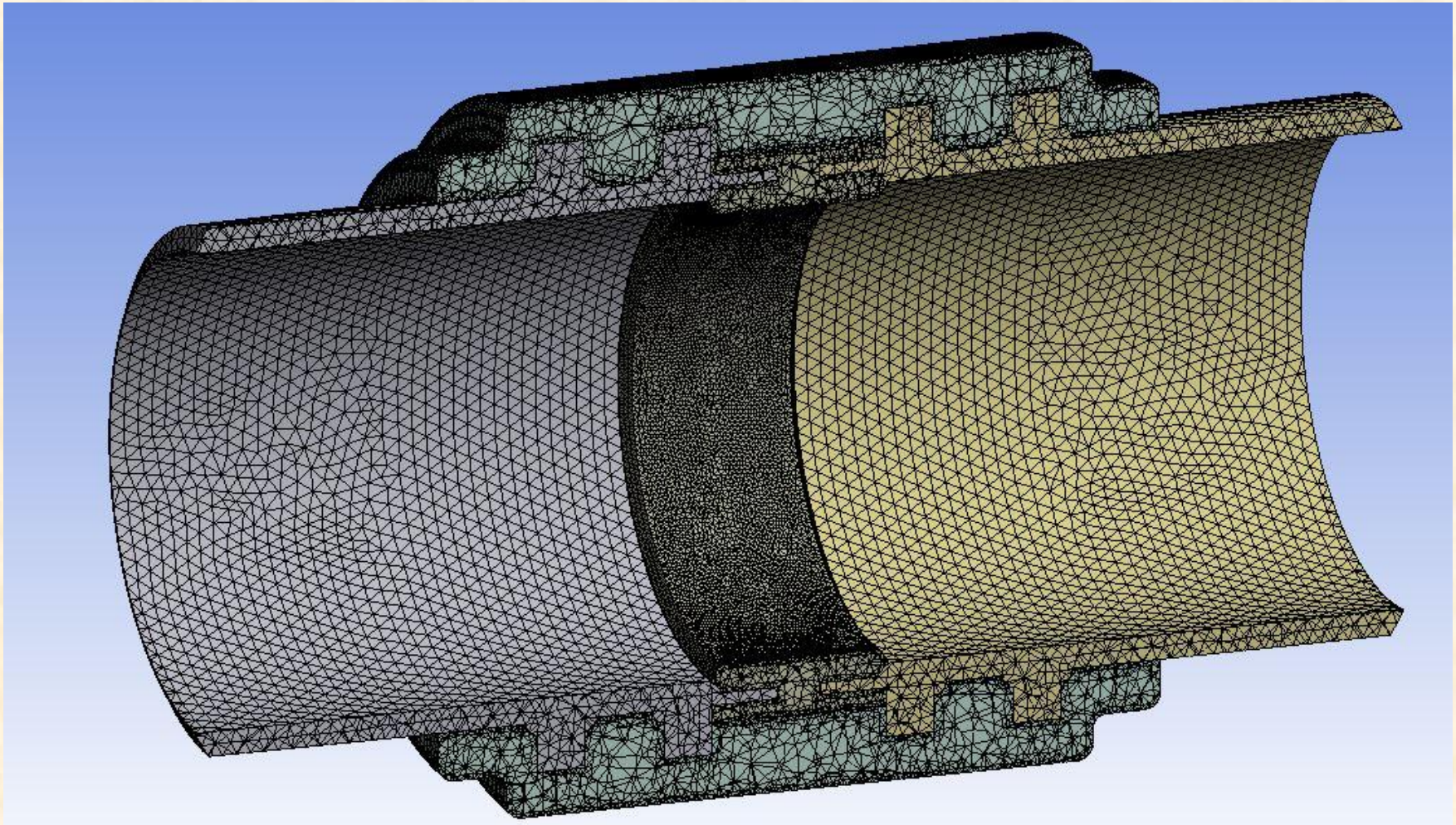
Математическое моделирование анизотропных структур в конструкциях газовой и нефтяной промышленности

Научный руководитель
д-р техн. наук, профессор Букатый С.А.

Расчёт полей распределения нагрузок в электроизолирующей вставке от силовых воздействий

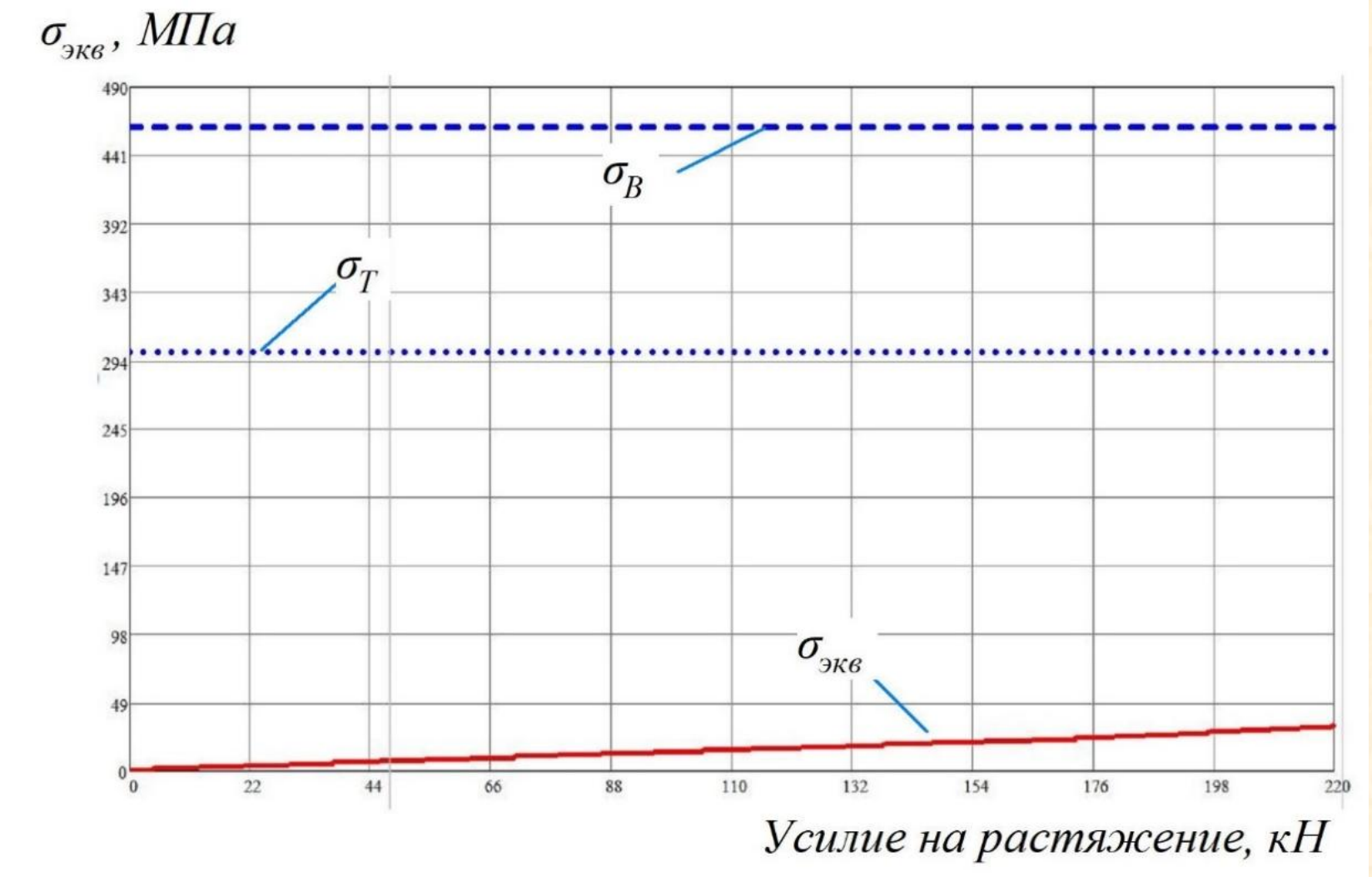


Конечно-элементная модель соединения в разрезе

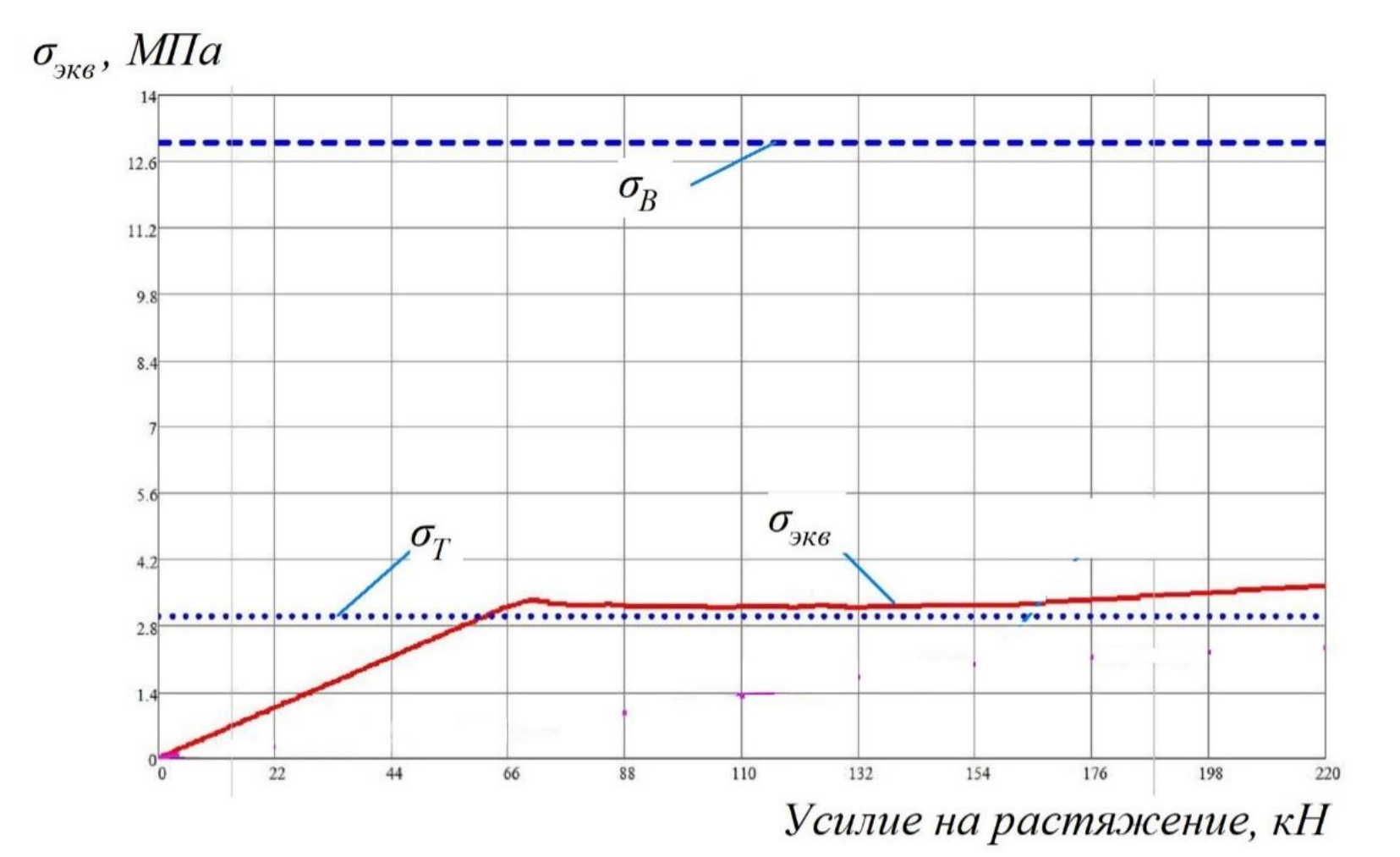


Расчёт напряжённо-деформированного состояния соединения от действия растягивающего усилия

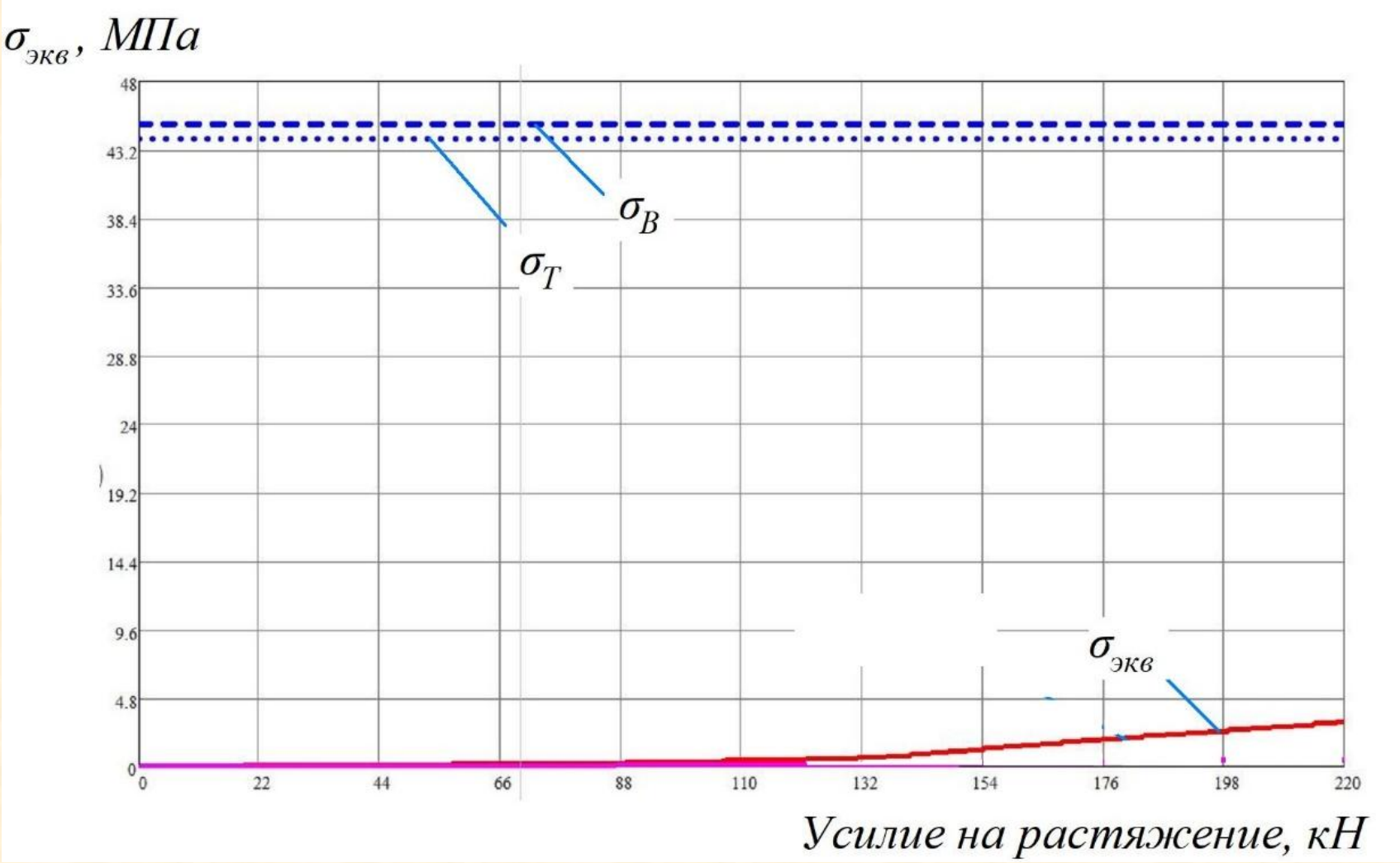
Максимальные эквивалентные напряжения
в стальной части соединения



Максимальные эквивалентные напряжения в полиуретановой части соединения

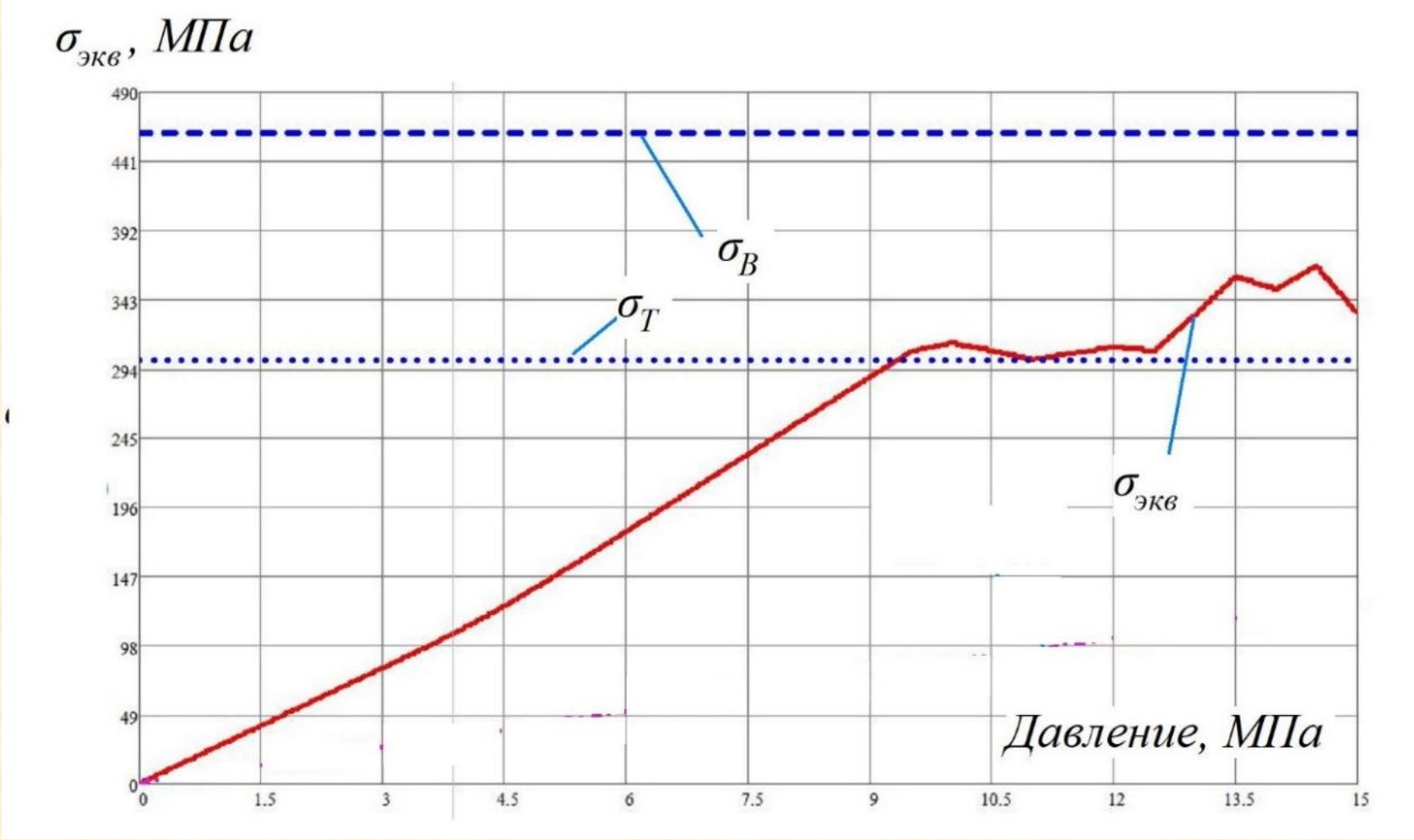


Максимальные эквивалентные напряжения в наружной части соединения (стекловолокно)

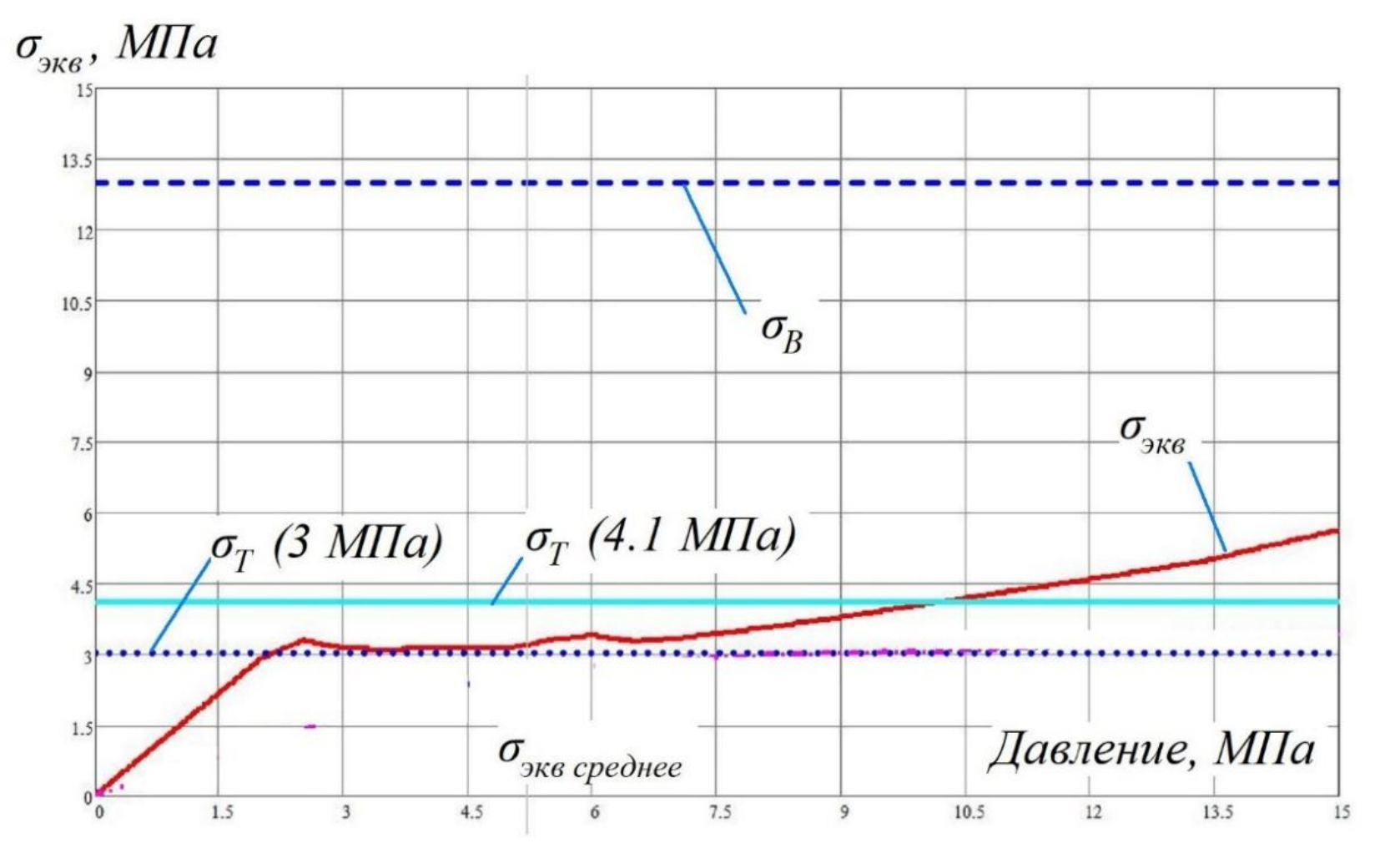


Расчёт напряжённо-деформированного состояния соединения от действия внутреннего давления

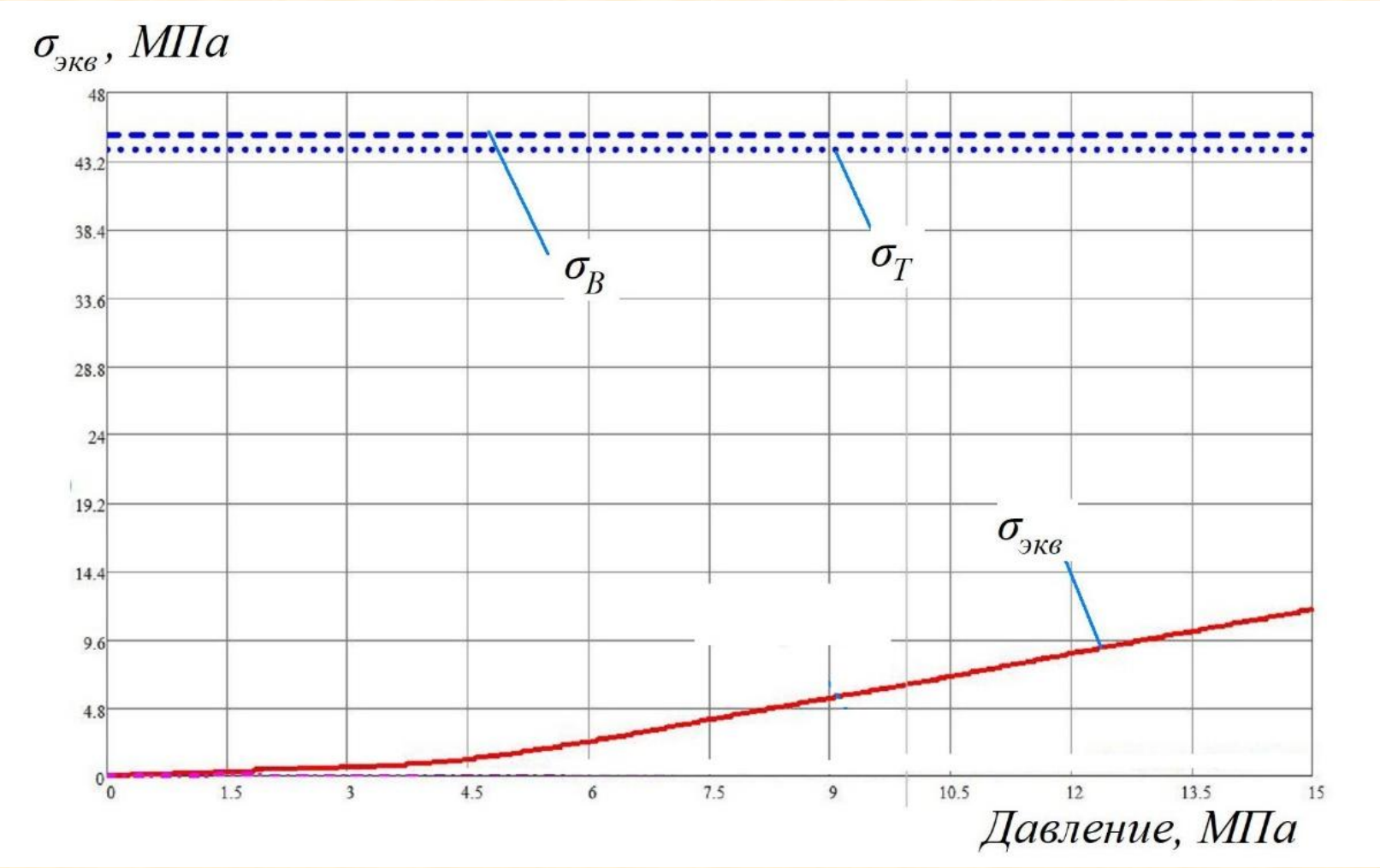
Максимальные эквивалентные напряжения
в стальной части соединения



Максимальные эквивалентные напряжения в полиуретановой части соединения

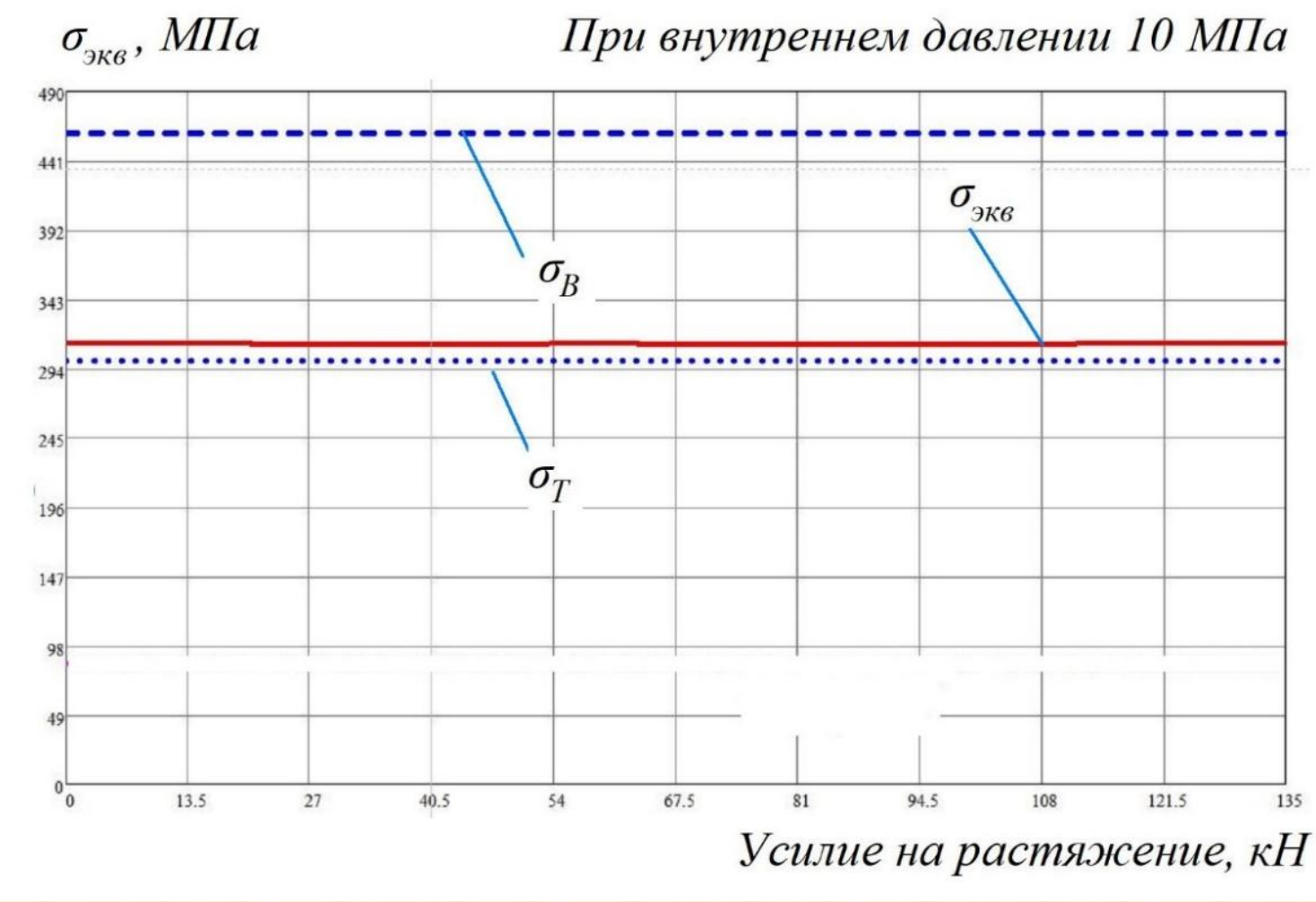


Максимальные эквивалентные напряжения в наружной части соединения (стекловолокно)

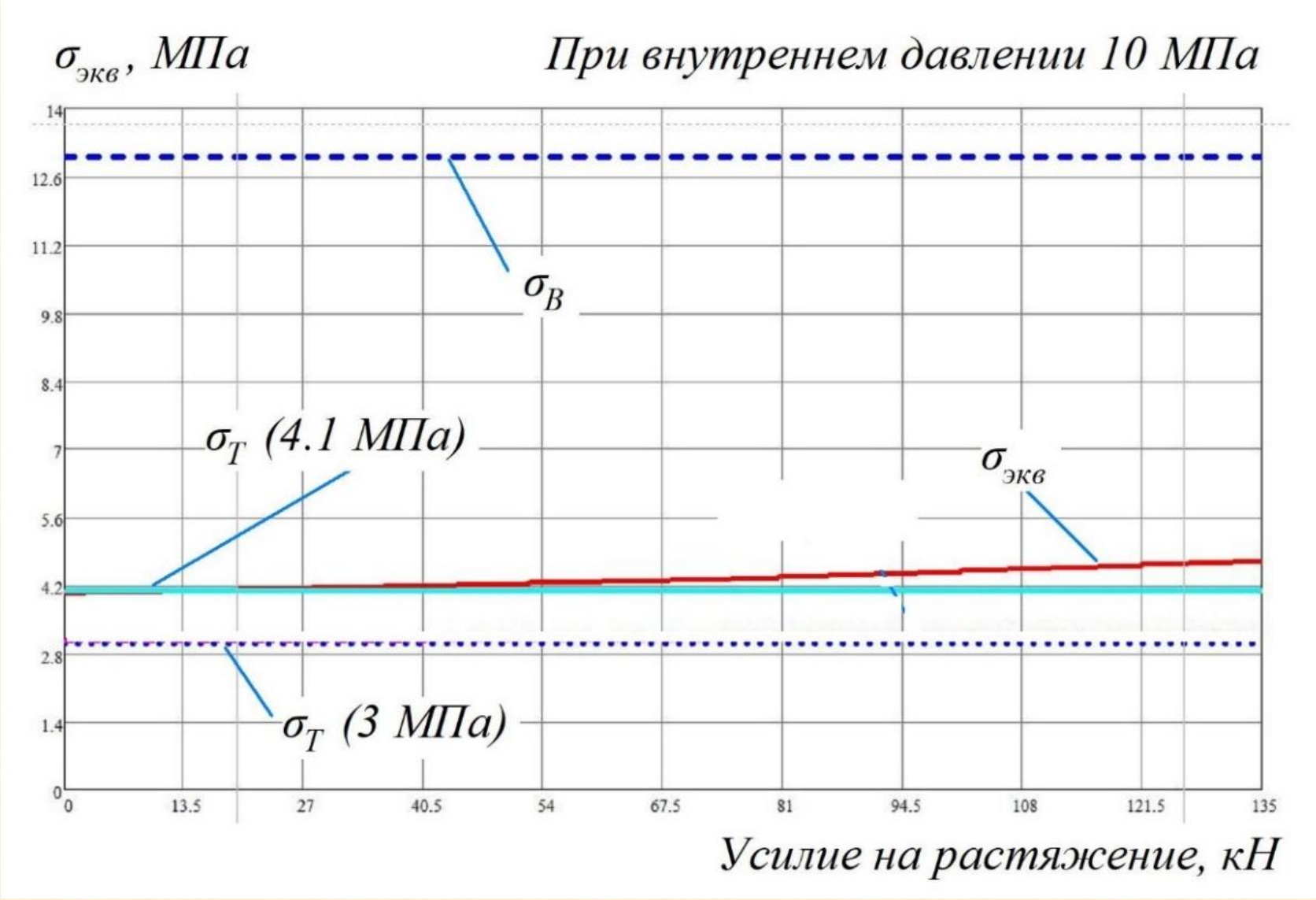


Расчёт напряжённо-деформированного состояния соединения от действия внутреннего давления и растяжения

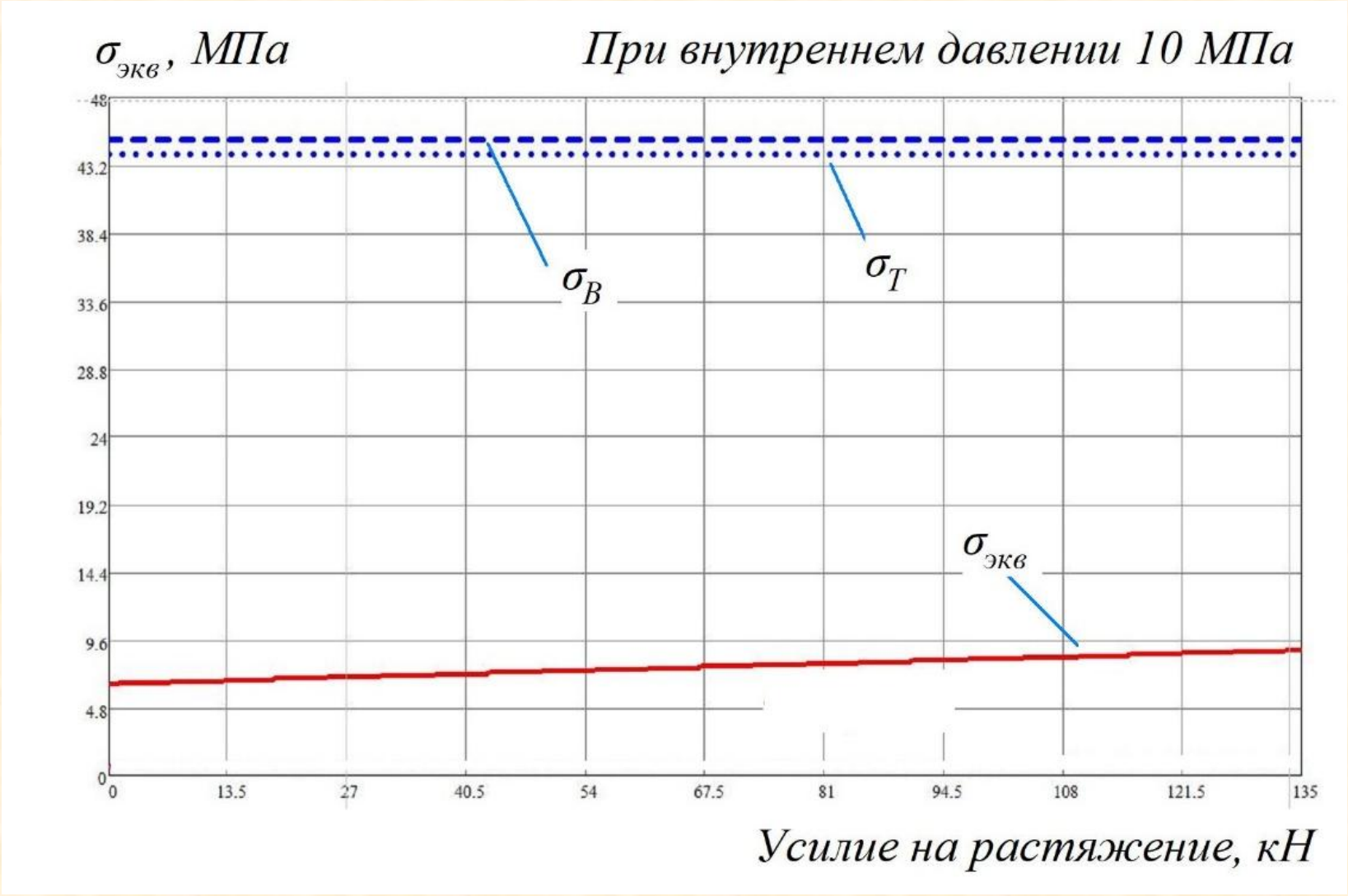
Максимальные эквивалентные напряжения
в стальной части соединения



Максимальные эквивалентные напряжения в полиуретановой части соединения

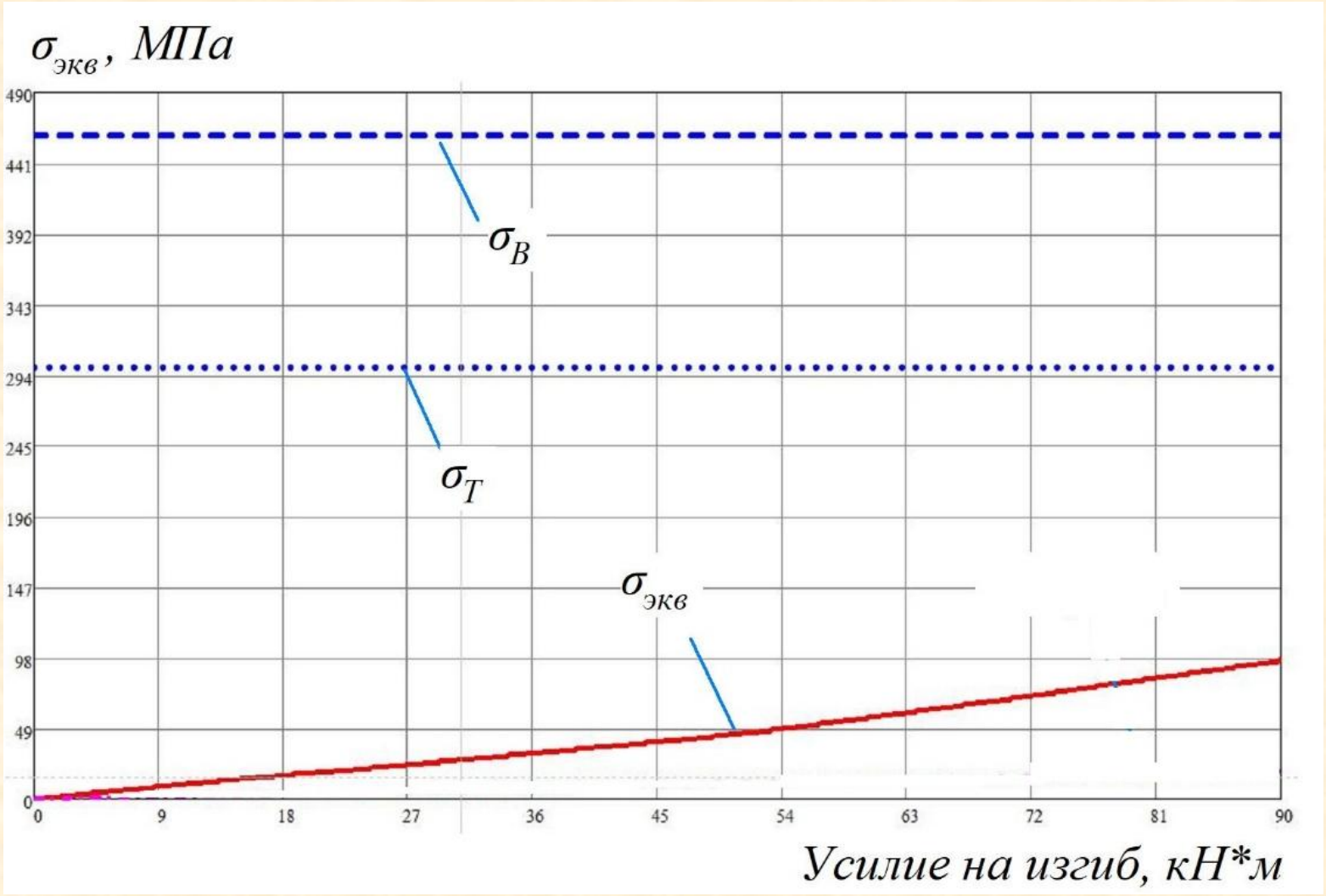


Максимальные эквивалентные напряжения в наружной части соединения (стекловолокно)

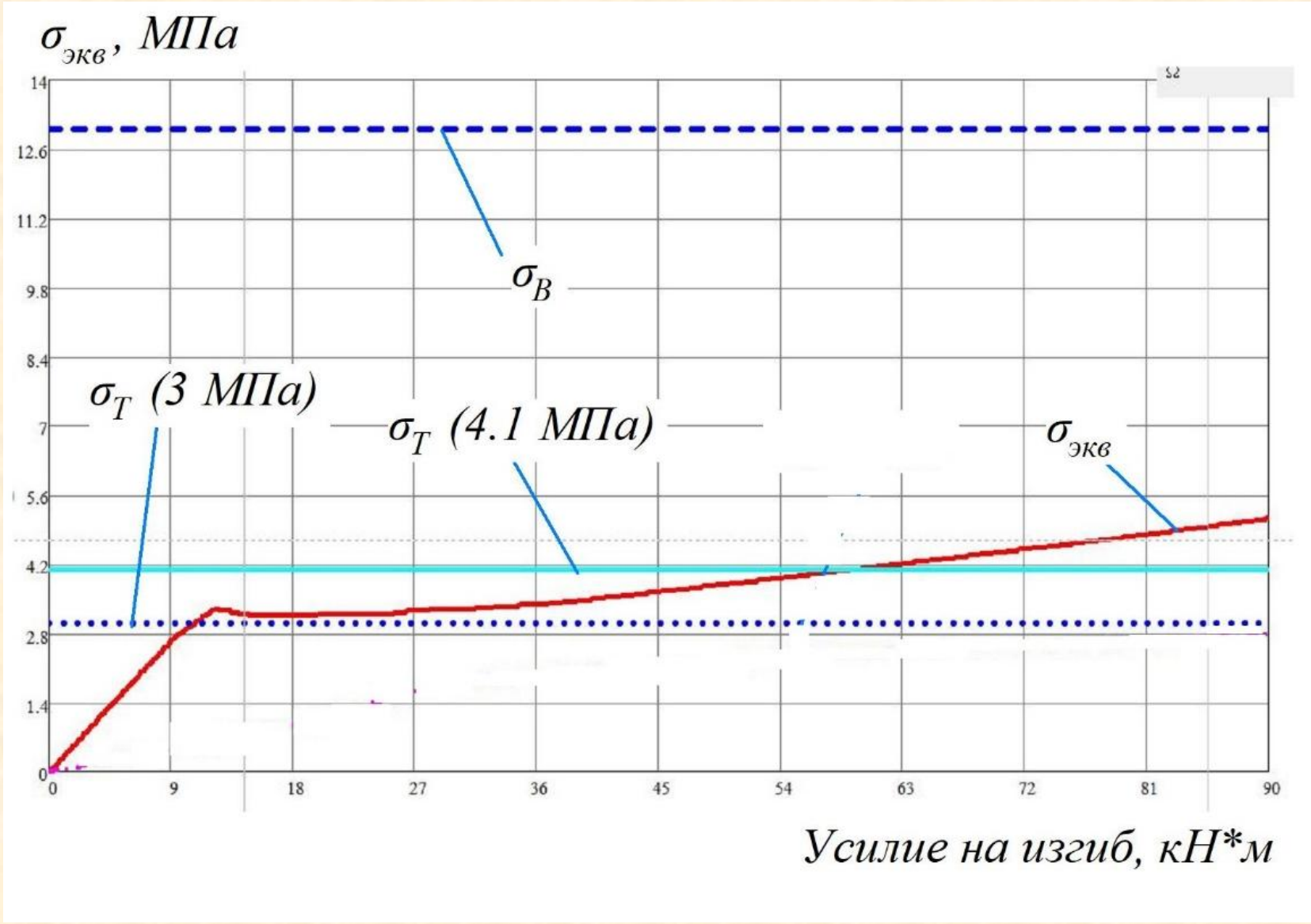


Расчёт напряжённо-деформированного состояния соединения от действия изгибающей нагрузки

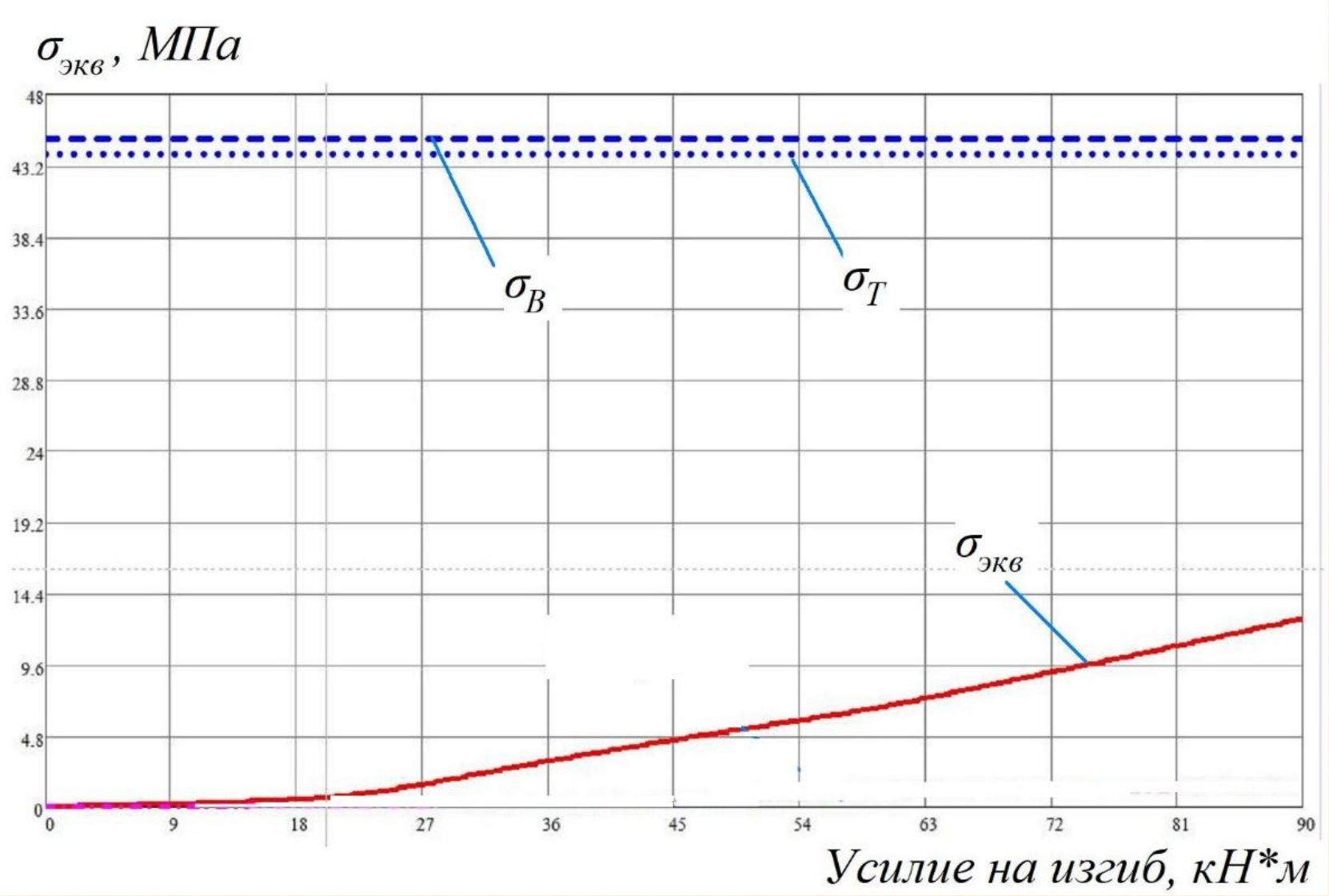
Максимальные эквивалентные напряжения
в стальной части соединения



Максимальные эквивалентные напряжения в полиуретановой части соединения



Максимальные эквивалентные напряжения в наружной части соединения (стекловолокно)



Выводы

- Нарушение работоспособности электроизолирующего соединения происходит при давлении, близком к рабочему, без достаточного коэффициента запаса прочности
- Предельное напряжённое состояние полиуретановой вставки, соответствующее началу зарождения разрушения, близко к рабочему давлению (10 МПа). При этой рабочей нагрузке запас прочности у полиуретановой вставки отсутствует.
- Конструкция силовой части муфты выполнена в виде анизотропной структуры, механические свойства которой во взаимно перпендикулярных направлениях различаются более чем в ~4 раза. Нить намотана диаметрально по принципу «катушки», в результате чего при действии нагрузок (давление, осевые нагрузки, изгибающие нагрузки) не реализован весь потенциал прочностных свойств композита, нагрузки воспринимает не нить в своём наиболее прочном направлении, а связующая смола.
- прочность оболочки муфты из композитных материалов существенно выше, чем полиуретановой вставки, однако, на потерю герметичности наибольшее влияние оказывает внутреннее давление и его влияние на полиуретановую часть, в то время как на механическое разрушение оболочки большее влияние оказывают монтажные факторы (нарушение соосности трубопроводов и прочие).

Моделирование напряжённо-деформированного состояния трубопроводов из композитных материалов с учётом анизотропии механических свойств

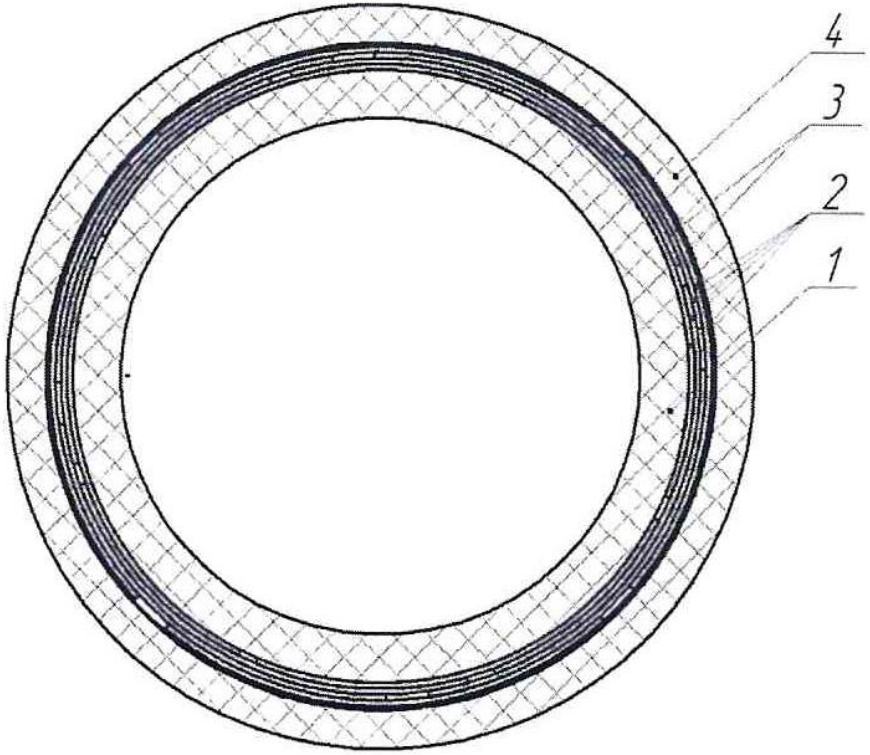


Рисунок 4 – Конструкция гибкой трубы

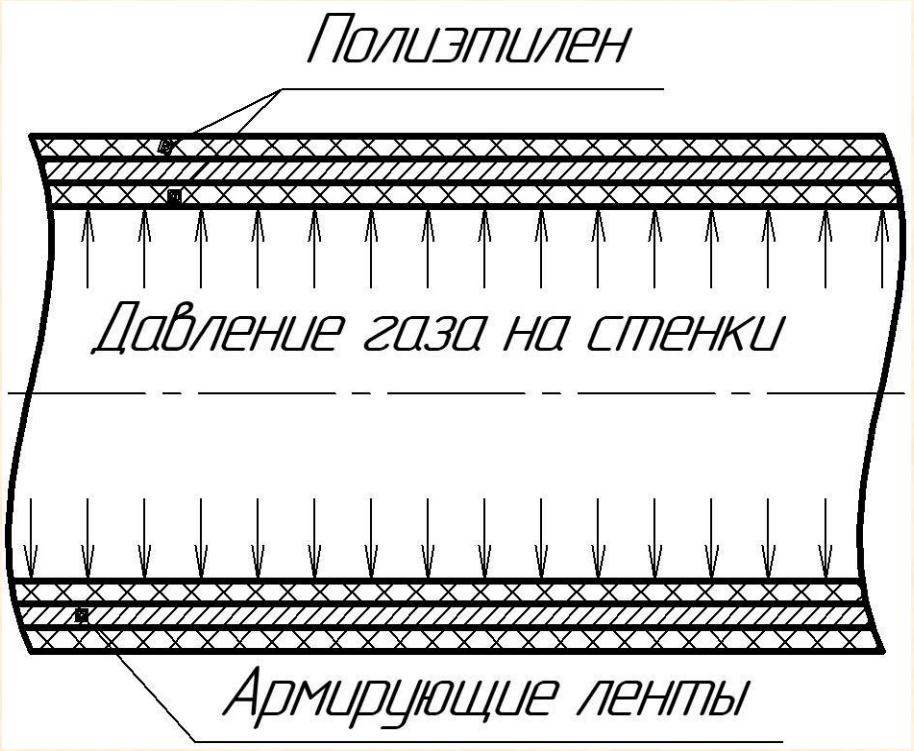
1 – внутренняя оболочка; 2 – армирующий слой (4 слоя высокопрочной металлической ленты); 3 – противоизносный слой (2 слоя ленты ПЭТ); 4 – внешняя оболочка

Заданные расчётные условия

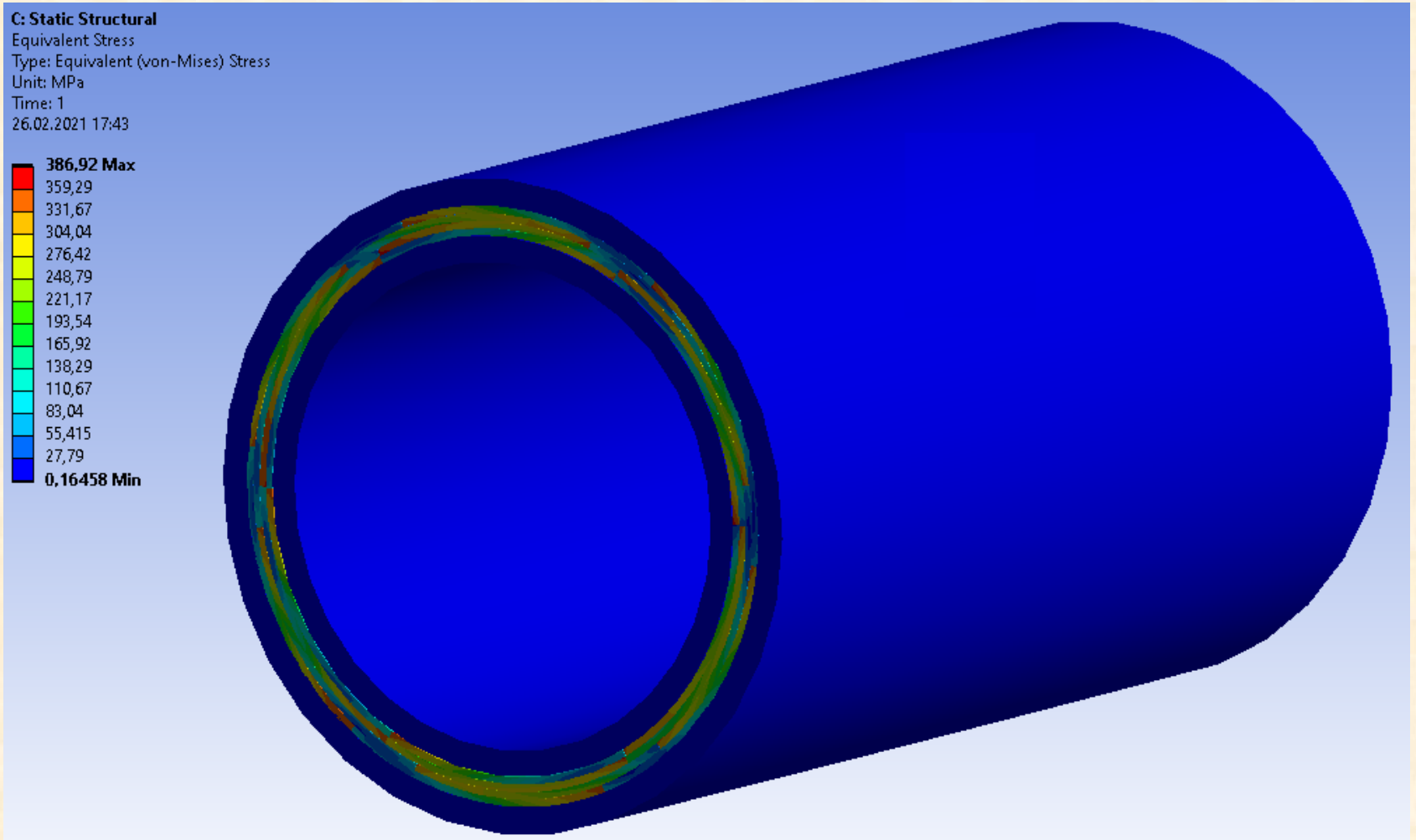
- Материал армирующей ленты – Сталь 35Г;
- Материал полиэтилена – ПЭ2НТ11-9;
- Коэффициент трения между стальными лентами – 0,35;
- Коэффициент трения между полиэтиленом и стальными лентами – 0,25;

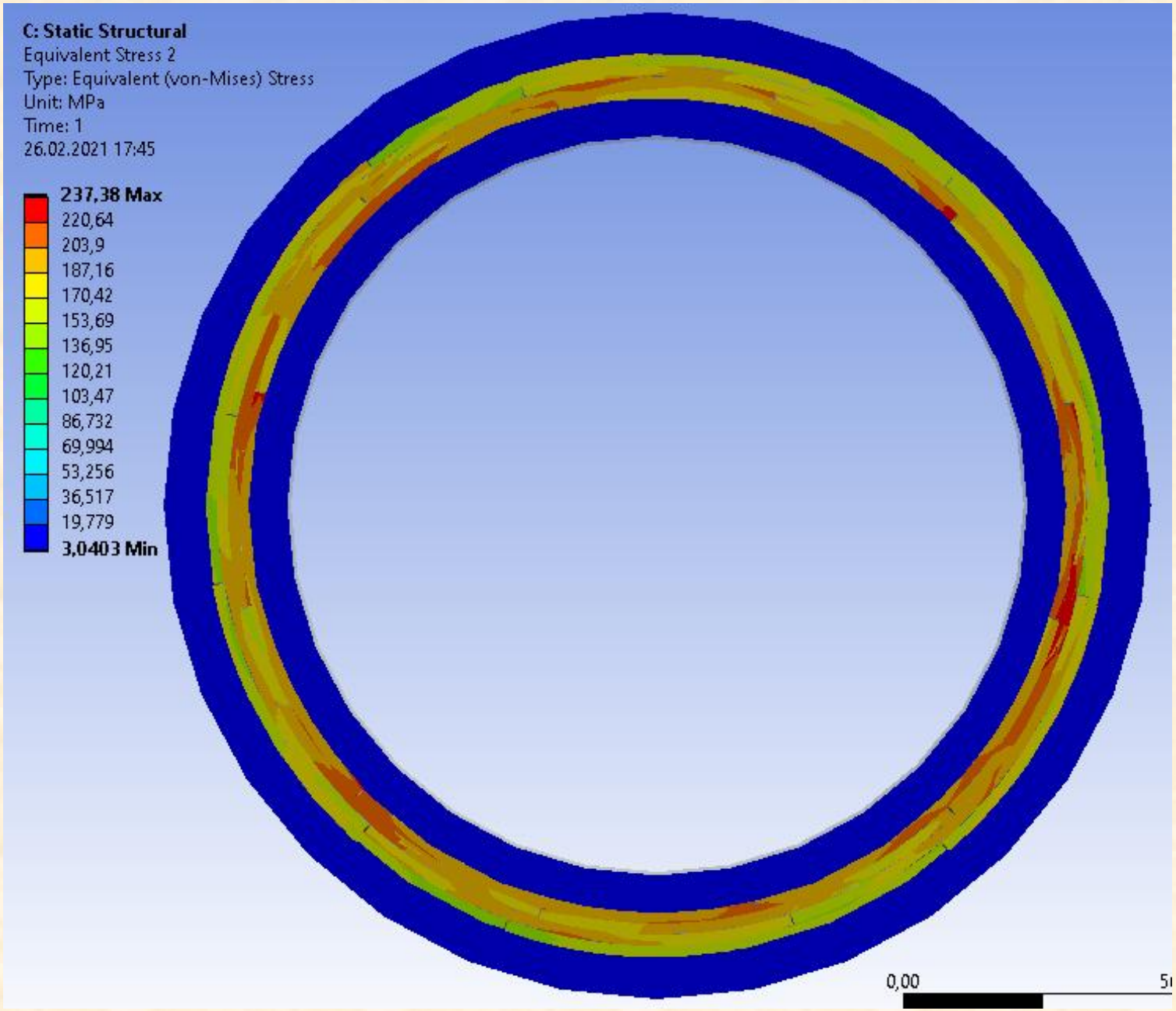
Основными нагруженными точками трубы являются:

- области кромок армирующих лент;
- области в теле армирующей ленты;
- области в полиэтилене (на внутренней, наиболее нагруженной оболочке).

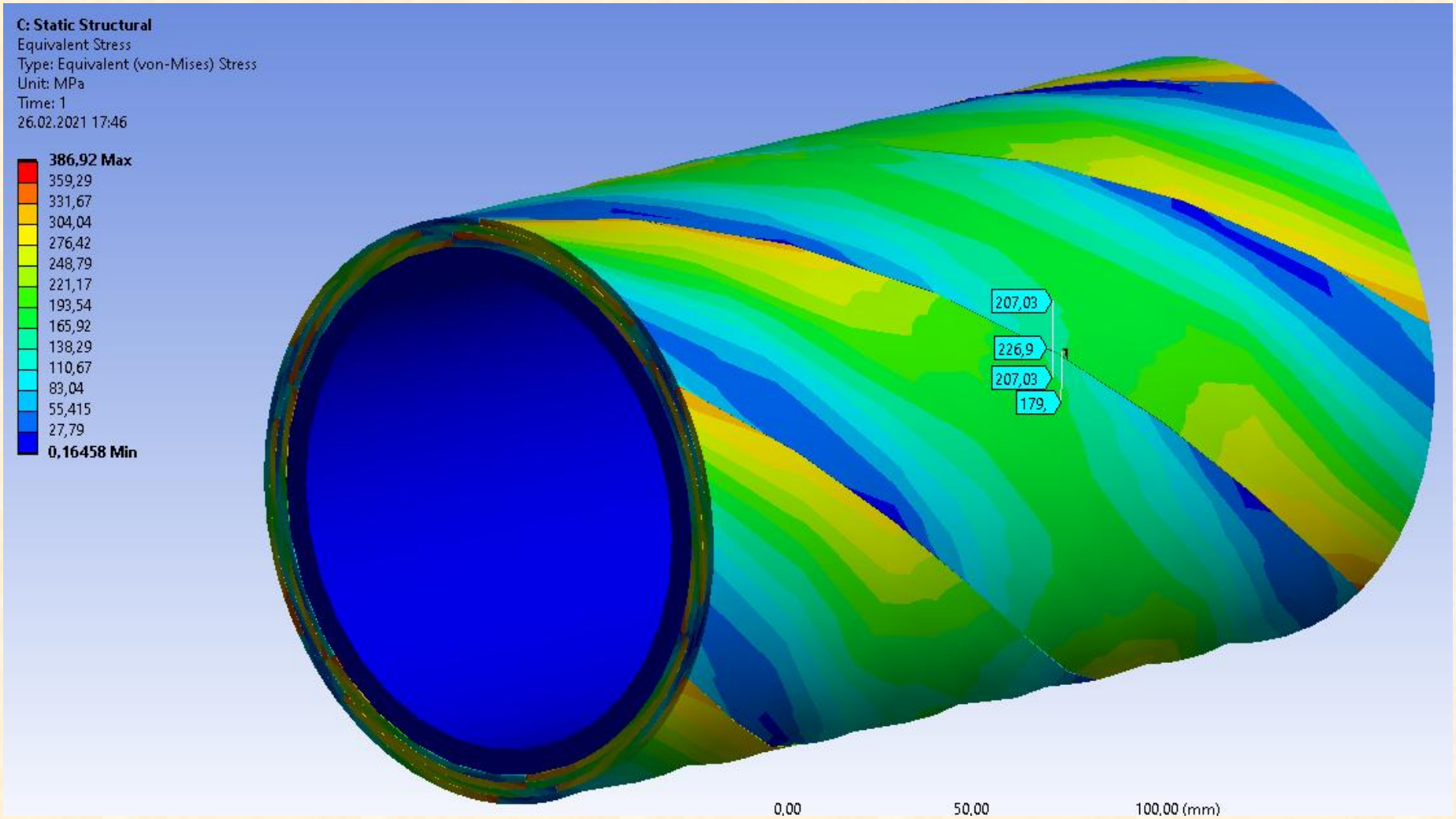


Результаты расчётов методом конечных элементов




C: Static Structural
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
26.02.2021 17:45
237,38 Max
220,64
203,9
187,16
170,42
153,69
136,95
120,21
103,47
86,732
69,994
53,256
36,517
19,779
3,0403 Min
0,00

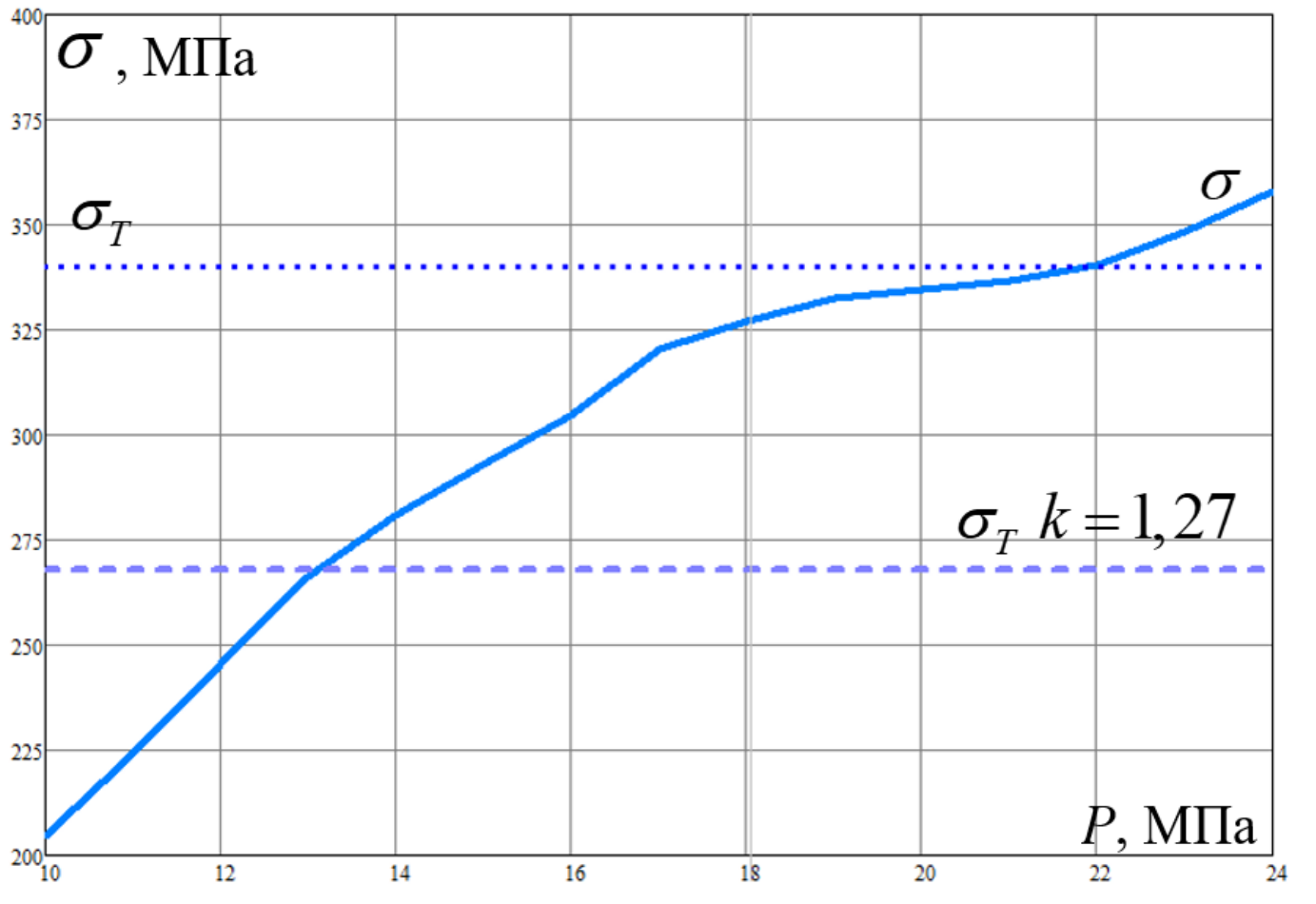
Напряжённо-деформированное состояние армированного слоя



Результаты расчёта напряжений в элементах трубы при различных давлениях

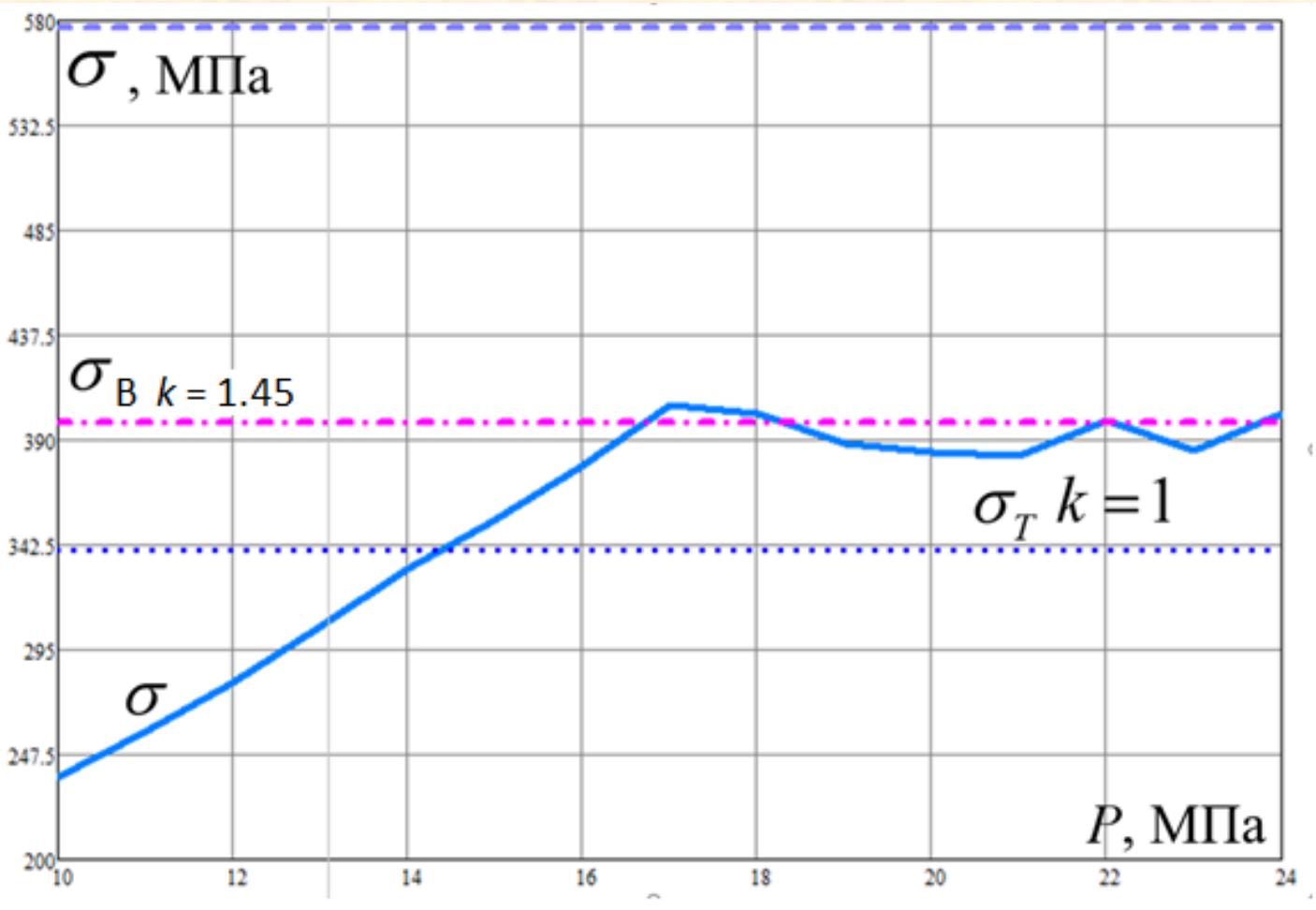
В армирующей ленте		**На кромке армирующей ленты**		**Внутреннее кольцо (полиэтилен)**		**Коэффициент запаса**
σ, МПа	P, МПа	σ, МПа	P, МПа	σ, МПа	P, МПа	
309,1	16,3	309,1	13,1	19,1	14,8	1,1
283,3	14,2	283,3	12,1	17,5	13,5	1,2
261,5	12,8	261,5	11,2	16,2	12,4	1,3
242,9	11,9	242,9	10,3	15,0	11,5	1,4
226,7	11,1	226,9	>10	14,0	10,7	1,5
204,5	10,0	237,4	10,0	13,0	10,0	Рабочее давление

Напряжения в армирующей ленте



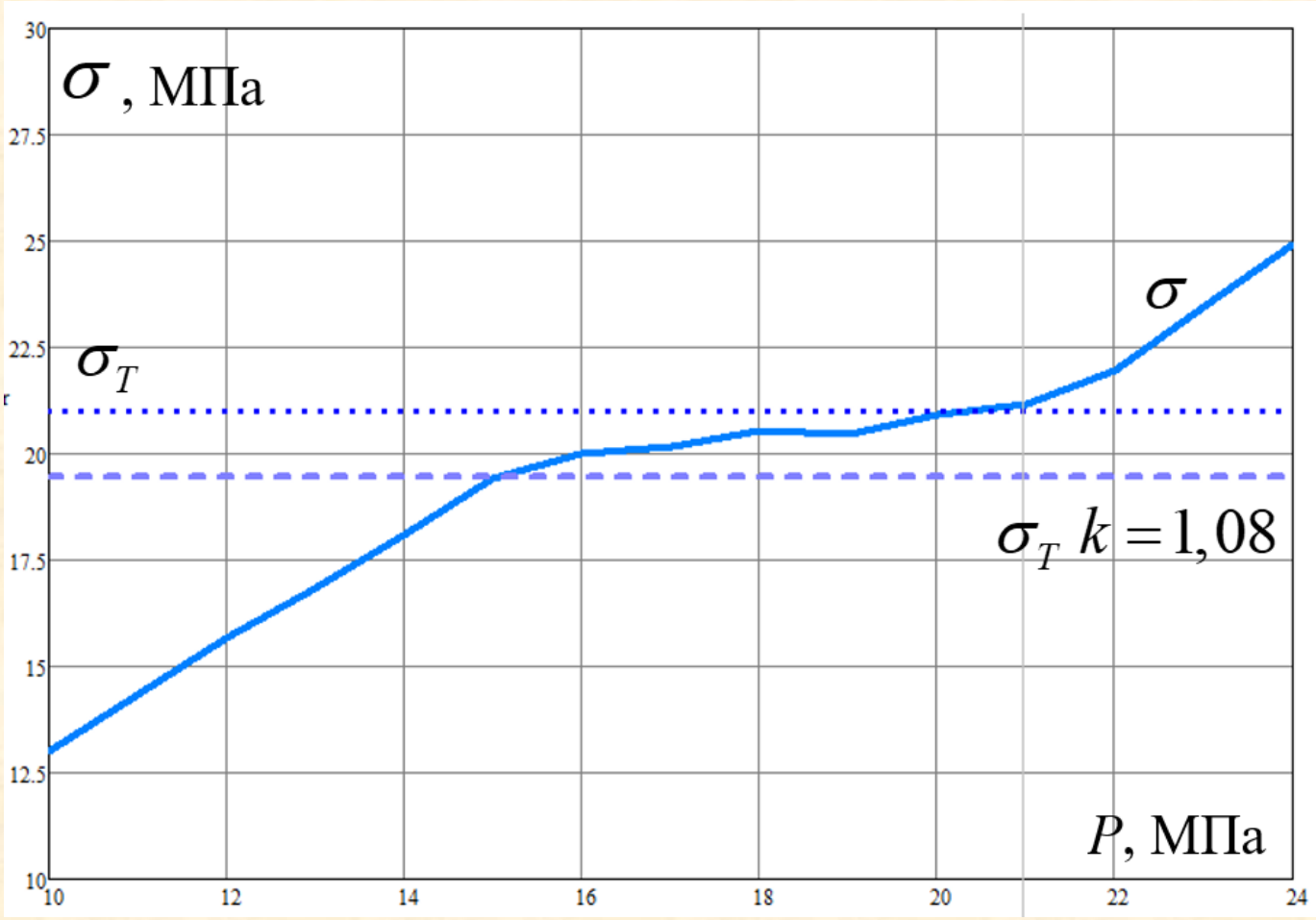
При создании давления до 13,089 МПа труба воспринимает нагрузки в упругой области, при этом напряжения в армирующей ленте достигают значения 268 МПа, что соответствует коэффициенту запаса прочности 1,27. Далее идёт область образования необратимых пластических деформаций.

Напряжения на кромке армирующей ленты



Наиболее опасные напряжения на кромках армирующей ленты достигаются при давлении газа в трубе 14,5 МПа, что соответствует пределу текучести материала.

Напряжения в полиэтиленовом слое (внутреннее кольцо)



Начальному моменту разрушения полиэтиленового слоя соответствует давление 15 МПа. Коэффициент запаса прочности при этом равен 1,08.

Результаты расчётов трубы, армированной стальной лентой

1) Максимальное давление газа, при котором сохраняется прочность всех слоёв армированной трубы составляет 13 МПа с коэффициентом запаса прочности 1,27. Полученное давление на 30% превышает давление газа, воспринимаемого трубой в рабочих условиях.

2) Наиболее нагруженной областью трубы является центральная часть армирующей ленты. Полиэтилен не выполняет несущей функции, полностью разрушается при достижении внутреннего давления 15 МПа с учётом наличия армирующей ленты в составе конструкции трубы.

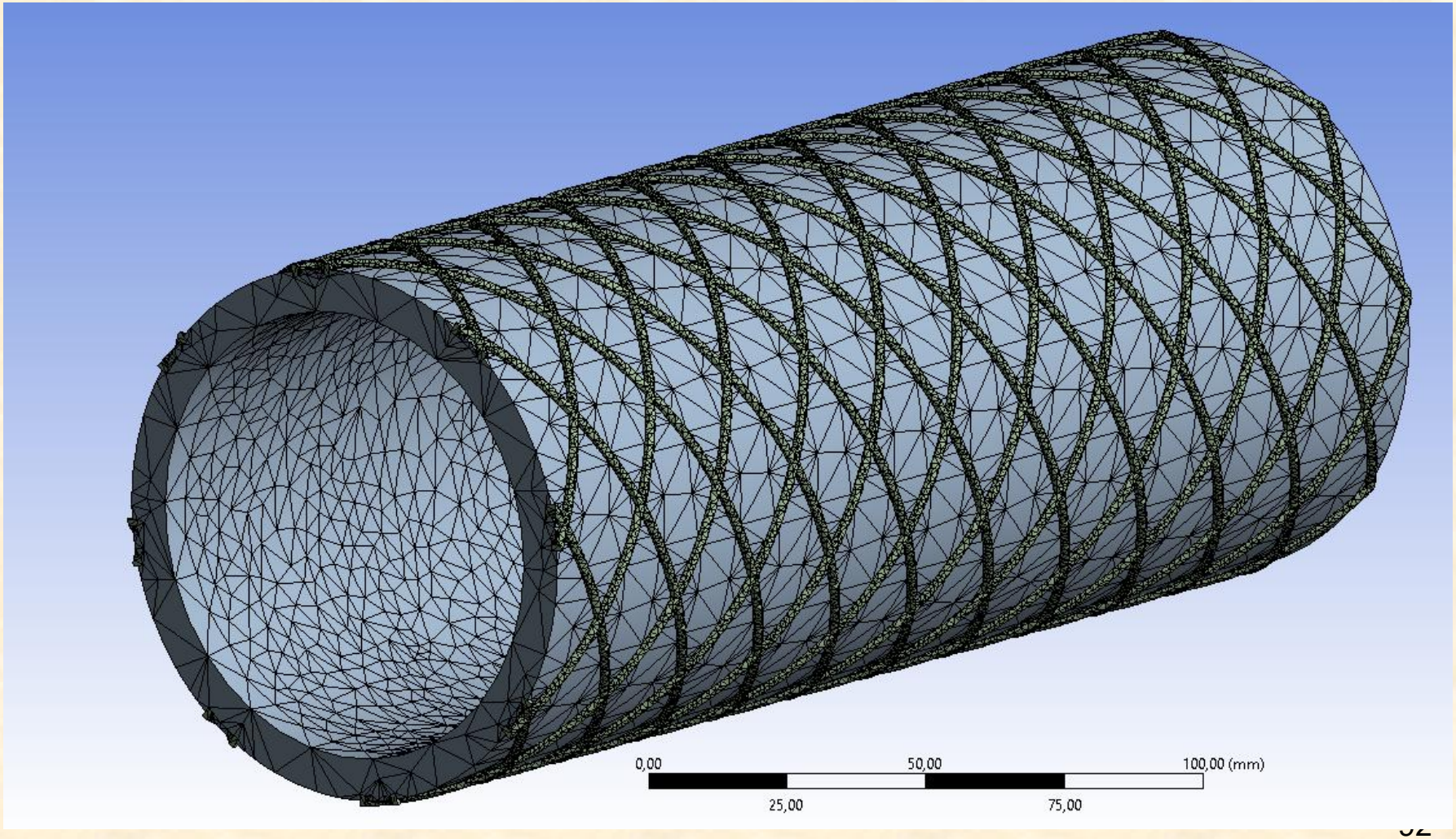
3) Коэффициент запаса трубы на рабочем давлении

P = 10 МПа составляет ~ 1,4.

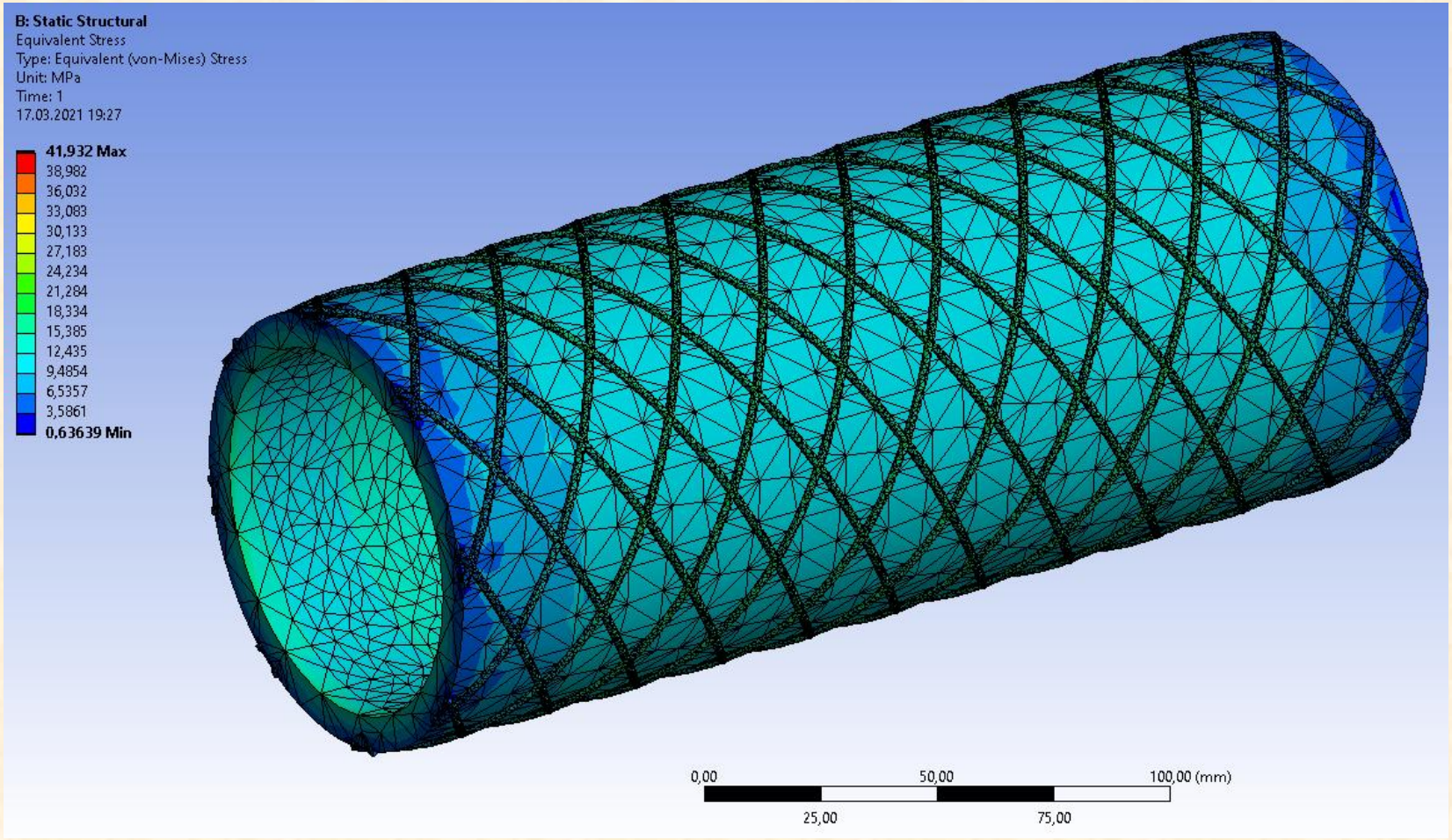
Расчет на прочность армированной нитью полиэтиленовой трубы



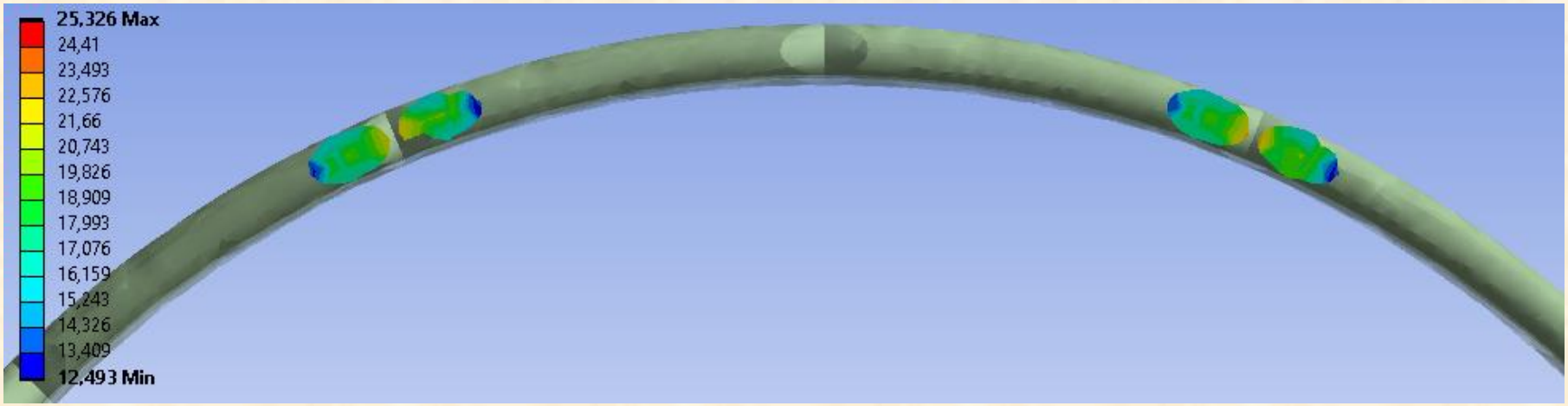
Конечно-элементная модель трубы

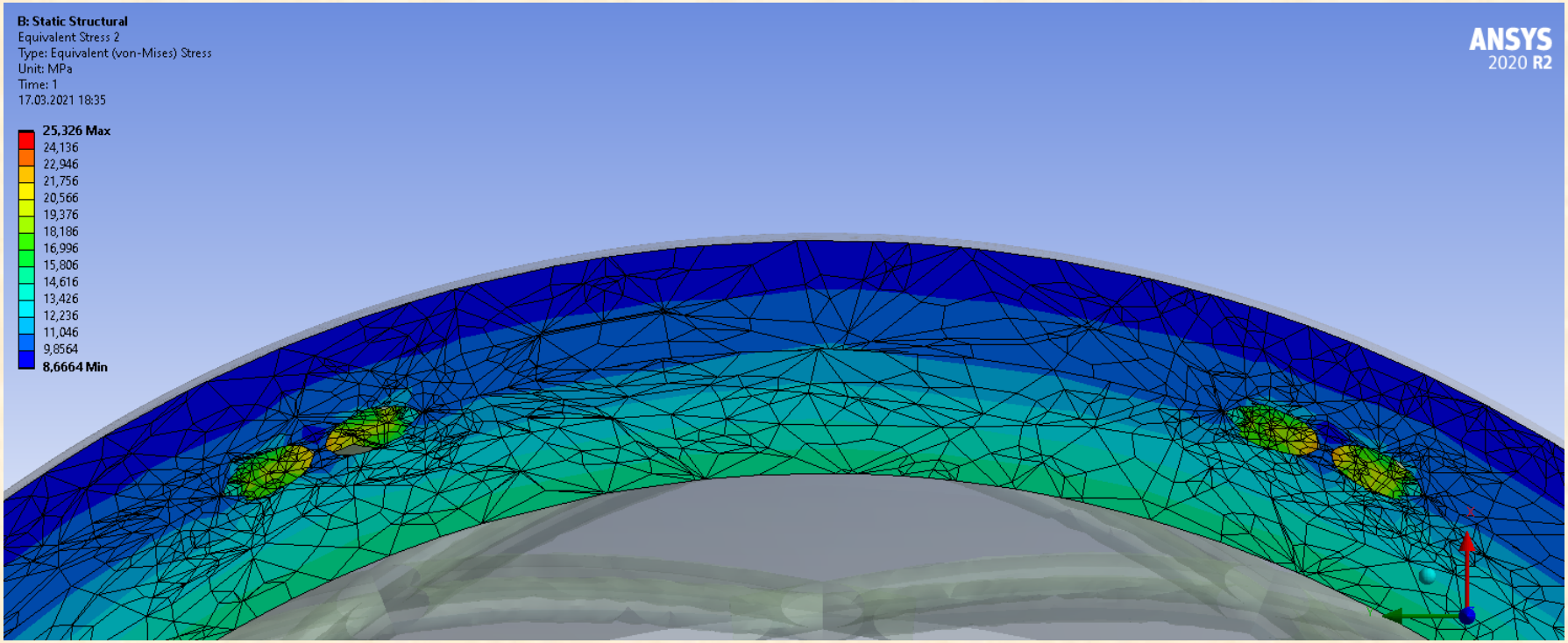


Результаты расчётов методом конечных элементов

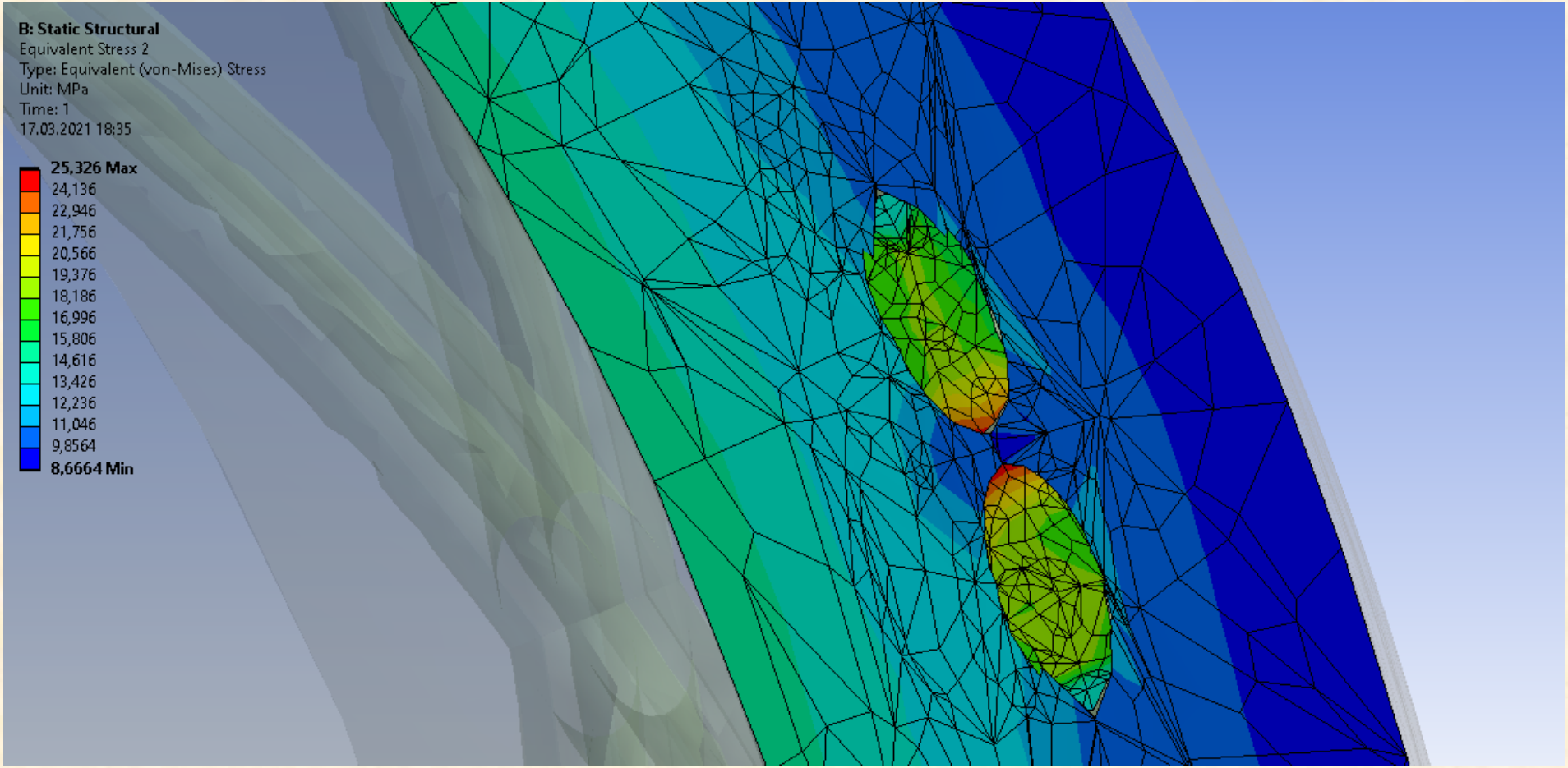


Напряжённо-деформированное состояние армирующего элемента

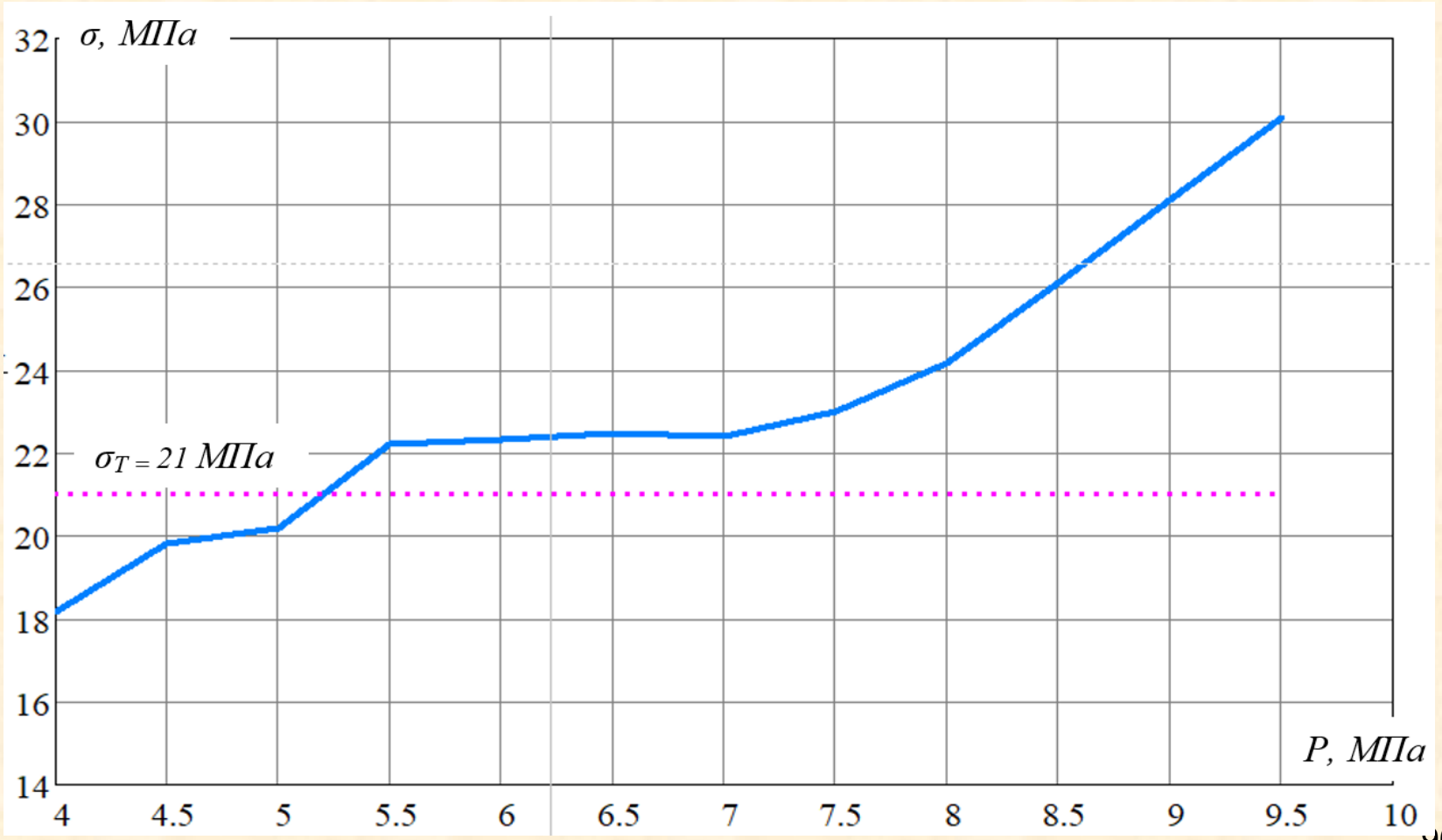




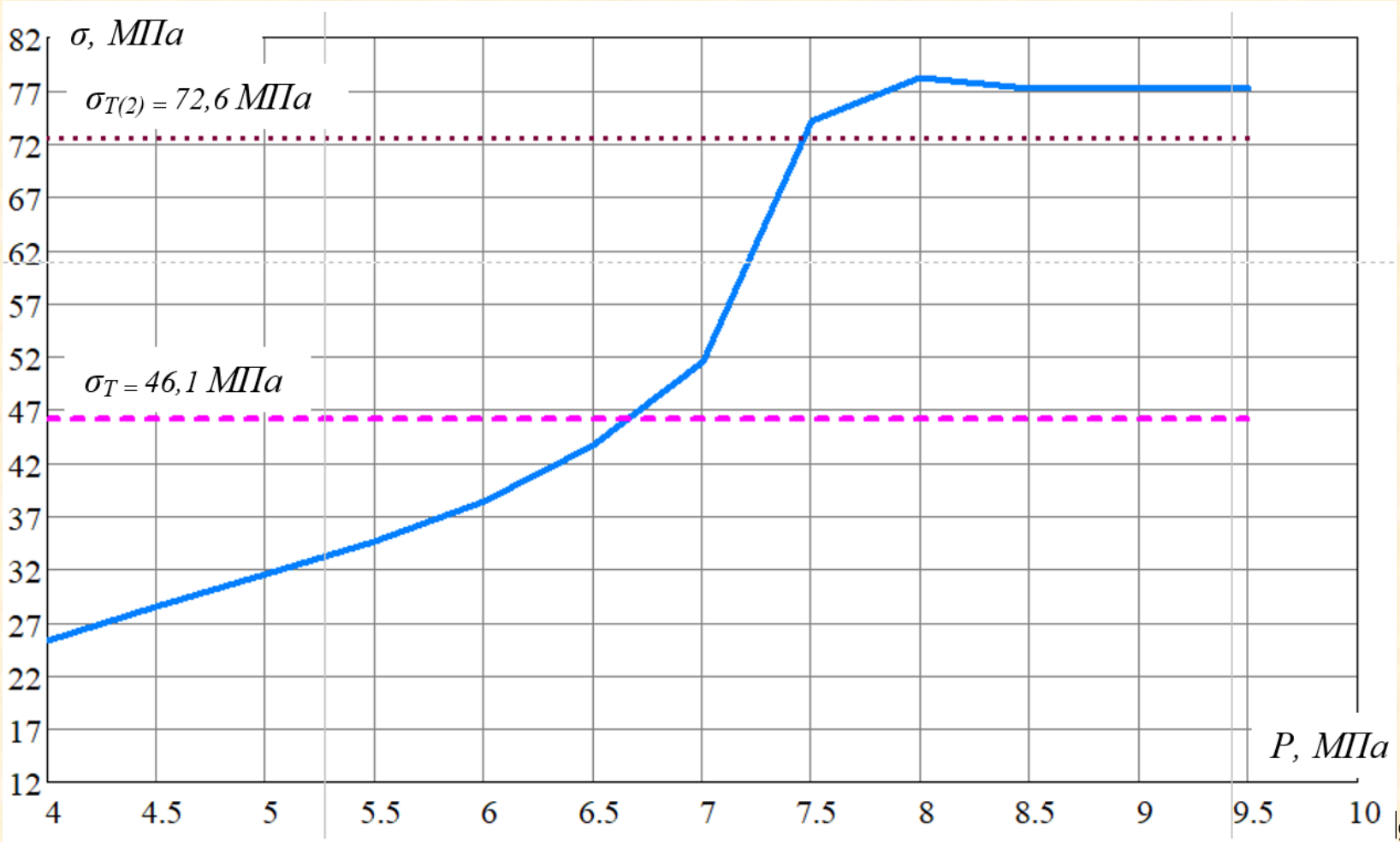
Напряжённо-деформированное состояние поперечного сечения композитной трубы



Изменение максимальной величины напряжений в полиэтиленовом элементе композитной трубы в зависимости от давления в системе



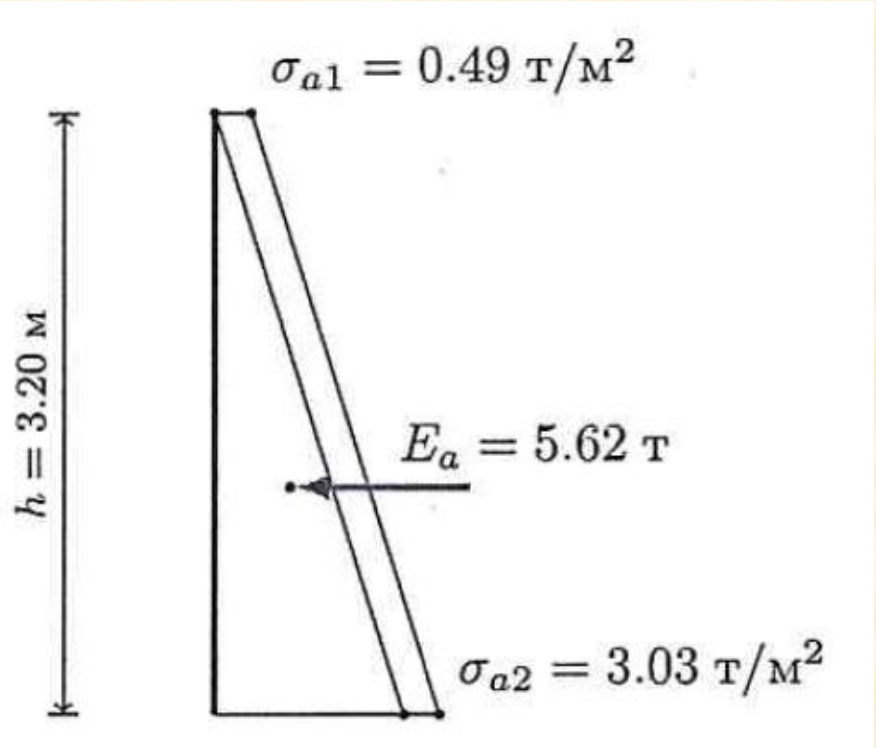
Изменение максимальной величины напряжений в армирующем элементе композитной трубы в зависимости от величины давления в системе



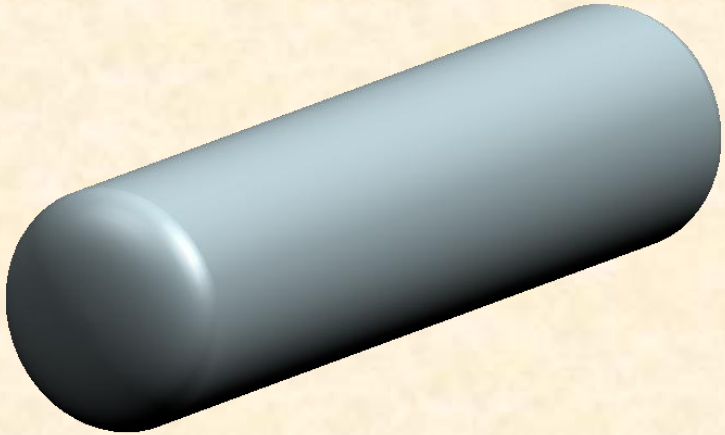
Результаты расчётов трубы армированной полиэфирной нитью

- Прочностной анализ композитной трубы показал, что его разрушение способно начаться уже при значении давления в системе равного **5,2 МПа**, что соответствует **1.3** от рабочего давления (4 МПа). При рабочем давлении, коэффициенты запаса прочности равны **1,155** для полиэтиленовой части и **1,82** для полиэфирной армирующей нити.
- Результаты модельного эксперимента согласуются с результатами испытаний. Начало разрушения армирующего слоя отмечено при давлении 4,5 МПа. Повышение сходимости расчётов и экспериментов может быть достигнуто проведением испытаний механических свойств армирующих нитей.
- Оценка напряженного состояния композитной трубы показывает, что способ армирования полиэфирной нитью оказывается низкоэффективным, ввиду того, что при таком конструктивном решении (т.е. схеме армировки) не происходит ожидаемого перераспределения усилий на армирующий каркас.

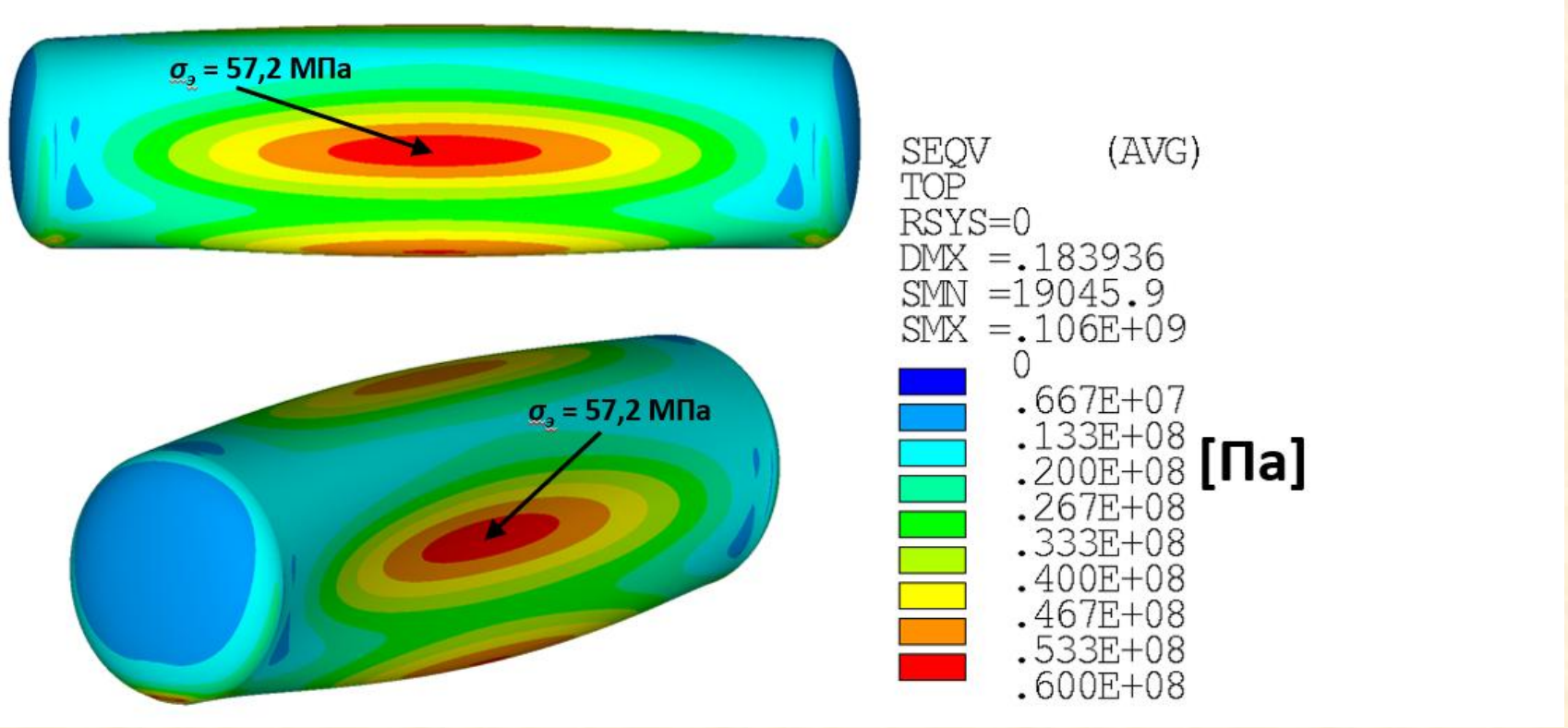
Разрушение ёмкости из композитных материалов под воздействием давления почвы



Прилагаемые нагрузки от давления грунта



Трёхмерная модель ёмкости



Распределение эквивалентных напряжений в стенках ёмкости

Спасибо за внимание.

Букатый А.С.

bukaty@inbox.ru

+79170111771