ООО НАУЧНО-КОММЕРЧЕСКАЯ ФИРМА « СБК »
РФ, 152912, г. Рыбинск, Ярославской обл., ул. Зои Космодемьянской, 33-33
тел./факс: (4855) 216-504, +7 9108137542, E-mail: bukaty_sa@mail.ru

Выбор группы прочности насосных штанг на основе конечно-элементного моделирования коррозионных воздействий

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

Цель работы

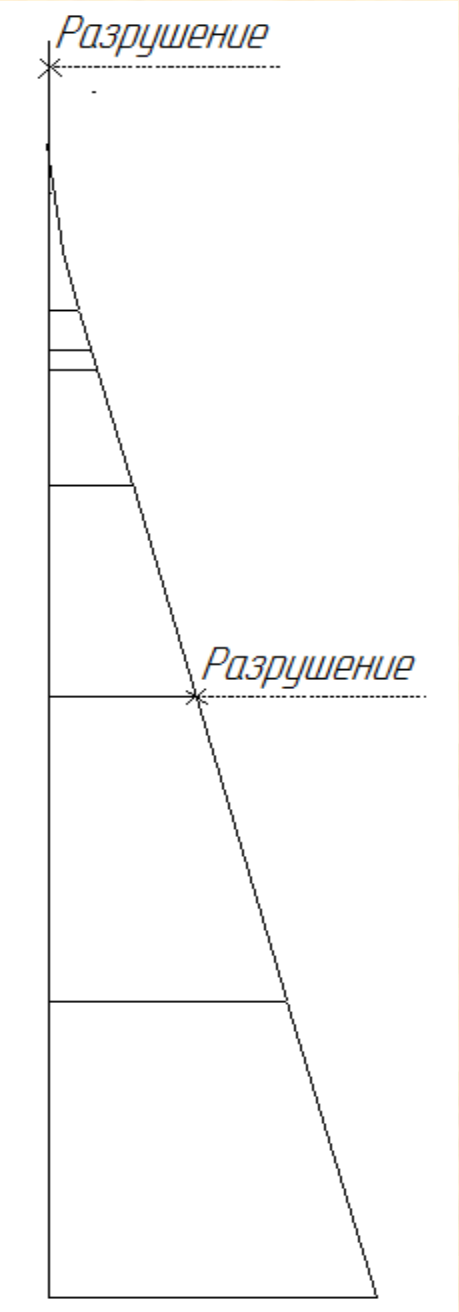
Повышение выносливости штанг насосных ШН19 на основе исследования их напряжённо-деформированного состояния

Задачи

1) Выявление причин преждевременного разрушения штанг ШН19 на основе анализа их напряжённо-деформированного состояния
2) Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое штанг без наработки и с наработкой
3) Составление рекомендаций по повышению выносливости штанг насосных

Граничные условия

- Диаметр штанг: 19,1 мм +0,2/–0,41 мм.
- Максимальная нагрузка:
  P_{max} = 4579 кГс = 44920 Н.
- Минимальная нагрузка: P_{min} = 0 кГс = 0 Н.
- Материал: сталь 15Х2ГМФ, нормализация + отпуск.



Расположение разрушений насосных штанг в скважине

Анализ мест разрушений показал, что кривизна геометрии скважин не влияет на разрушение штанг.

Расчёт коэффициента запаса прочности по текучести $n_т$

$$n_т = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{max}}.$$

Для штанги диаметром 18,8 мм

$\sigma_{max} = 161{,}8\,МПа$

$n_т = 3{,}81.$

Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* без учёта влияния коррозии поверхности штанг

$$n = \frac{\sigma_{-1p}}{K^{\sigma}\sigma_a + \psi_{\sigma}\sigma_m}$$

σ_{-1p} – предел выносливости материала при растяжении,

σ_{-1} – предел выносливости материала при изгибе по симметричному циклу нагружения

σ_a – амплитуда напряжений цикла

σ_m – среднее напряжение цикла

ψ_{σ} – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений.

K^{σ} – коэффициент снижения предела выносливости

$$K^{\sigma} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_d} + \frac{1}{K_F} - 1\right)\frac{1}{K_v}$$

K_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений. Для гладких штанг $K_{\sigma} = 1$.

K_d – коэффициент влияния размеров детали. Для легированной стали при d = 18,8 мм $K_d \approx 0{,}84$.

K_F – коэффициент влияния шероховатости поверхности. В соответствии с ГОСТ 13877-96 поверхность штанг была образована без удаления поверхностного слоя материала, после термообработки возможно наличие окалины. $K_F \approx 0{,}6$.

K_v – коэффициент влияния поверхностного упрочнения. При отсутствии упрочнения $K_v = 1$.

$$K^{\sigma} = 1{,}857 \qquad n \approx 1{,}71$$

Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* с учётом влияния коррозии поверхности штанг

до образования очага разрушения и язвы

$K_{F\text{кор}} = K_F \cdot \beta_{\text{кор}}$ $K^{\sigma} = 4{,}952$ $n \approx 0{,}65$

после образования язвы

на основе МКЭ определены максимальные напряжения, обусловленные образованием в очаге разрушения язвы:

$\sigma_{\max_к} = 292{,}1\,\text{МПа}$

Теоретический коэффициент концентрации напряжений $K_{\alpha} = \dfrac{\sigma_{\max_к}}{\sigma_{\max}} = 1{,}805$

Эффективный коэффициент концентрации $K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}\left(K_{\alpha} - 1\right)$

где q_{σ} – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений

$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}\left(K_{\alpha} - 1\right) = 1{,}564$ $K^{\sigma} = 5{,}624$ $n \approx 0{,}57$

Расчёт на прочность насосных штанг из материалов класса Д

Расчёт коэффициента запаса прочности по текучести $n_т$

$$n_т = 3{,}62.$$

Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* без учёта влияния коррозии поверхности штанг

$n \approx 2{,}11$ (для классов К, С n = 0,71)

Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* с учётом влияния коррозии поверхности штанг

до образования очага разрушения и язвы

$n \approx 0{,}80$ (для классов К, С n = 0,65)

после образования коррозионной язвы

$n \approx 0{,}71$ (для классов К, С n = 0,57)

Результаты расчётов

• многоцикловая усталость штанг не обеспечивается,

в т.ч. из материала класса Д

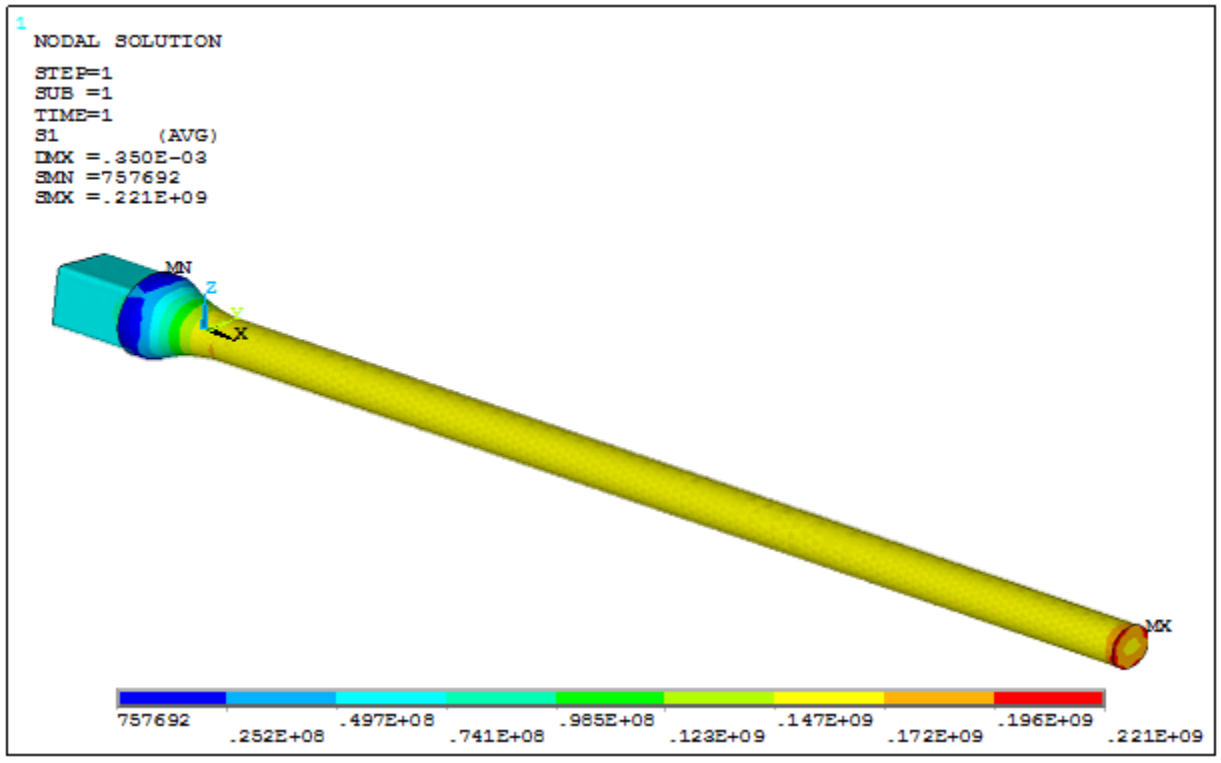
• наиболее важным фактором, влияющим на сопротивление

усталости штанг, является коррозионная стойкость материала.

• определение долговечности штанг в этом случае следует

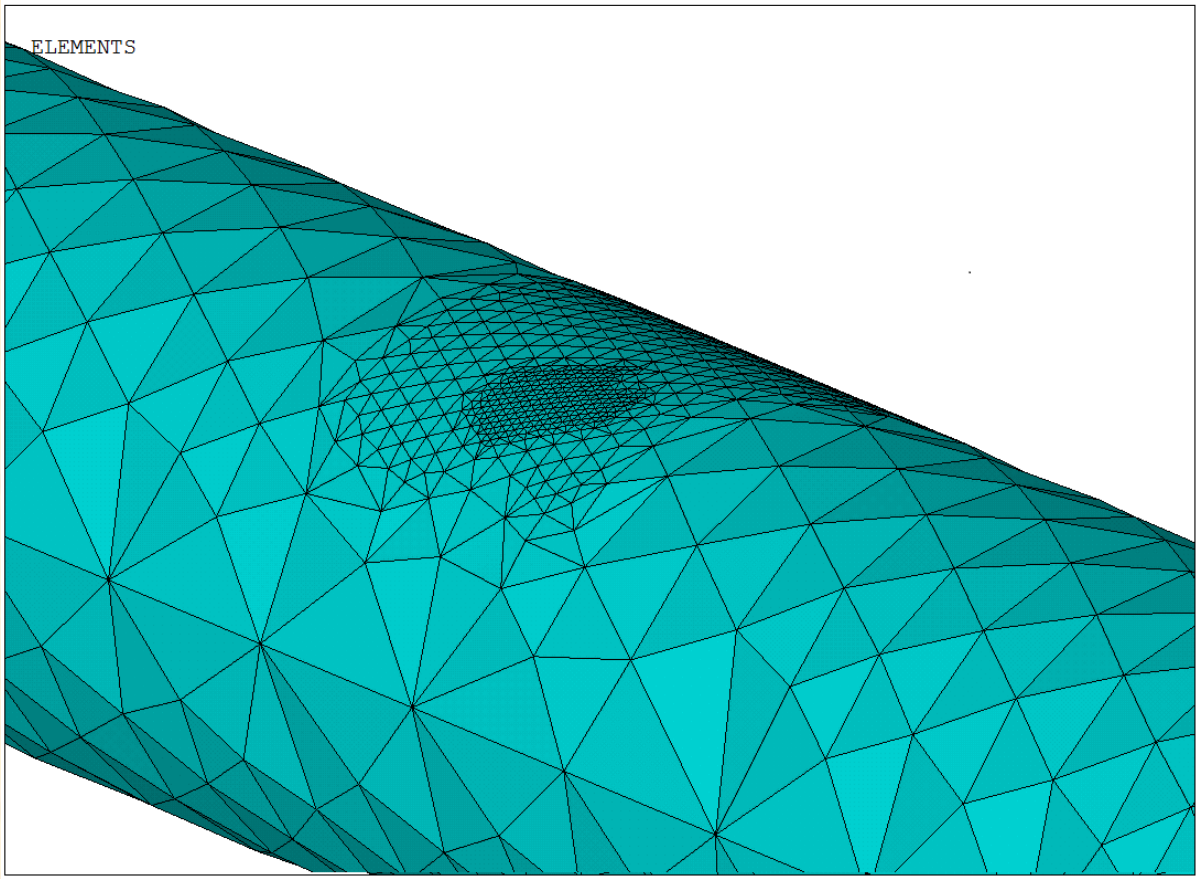
вести методами расчёта малоцикловой усталости.

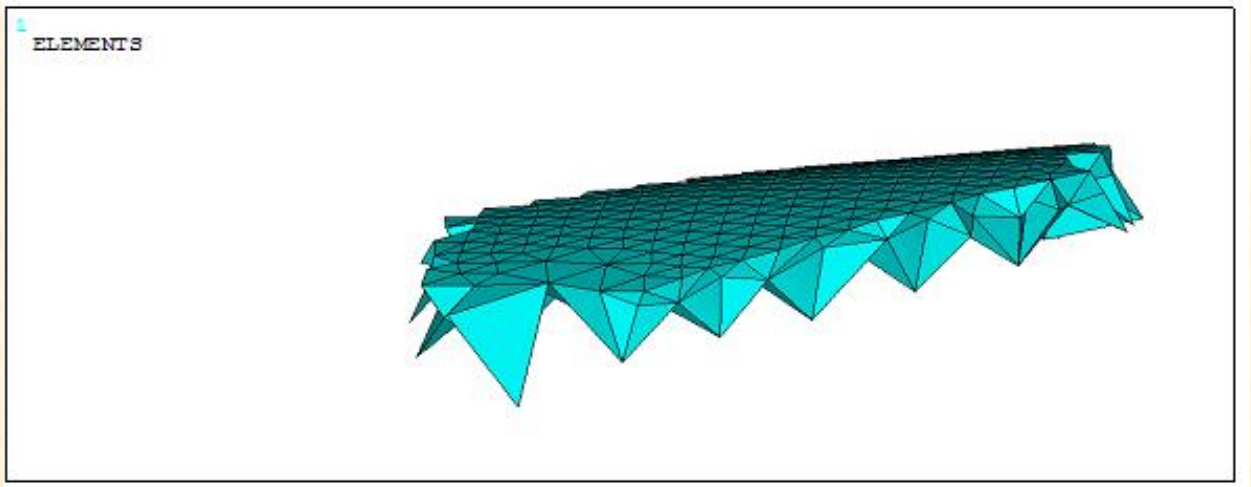
Расчёт напряжённо-деформированного состояния штанг на основе конечно-элементного моделирования повреждения поверхности штанг коррозией



Распределение главных напряжений и деформаций в штанге при отсутствии коррозии

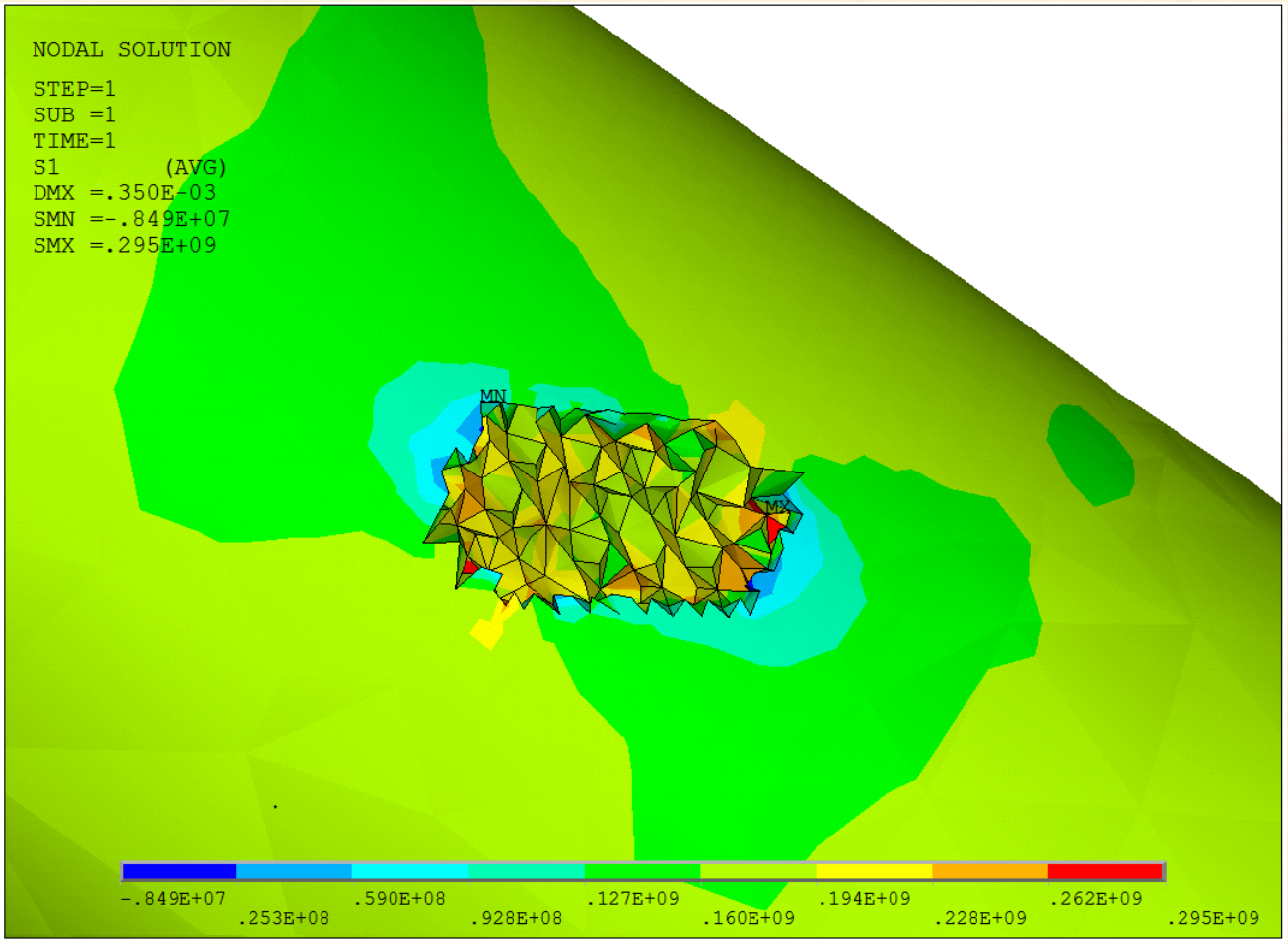
Главные напряжения, МПа			Главные деформации		
σ_1	σ_2	σ_3	ε_1	ε_2	ε_3
170,13	0,90	0,54	0,00084849	– 0,00025152	– 0,00025382





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

Расчёт малоцикловой долговечности штанг

При отсутствии для данного материала диаграмм малоцикловой усталости применялся расчётный метод определения малоцикловой долговечности деталей – метод универсальных наклонов, основанный на приближённом уравнении С.С. Мэнсона

$$\Delta\varepsilon = \frac{3.5\left(\sigma_{т} - \sigma_{im}\right)}{E} \cdot N^{-0.12} + \left(\ln\frac{1}{1-\Psi}\right)^{0.6} \cdot N^{-0.6}$$

где $\Delta\varepsilon$ – интенсивность размахов деформаций $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{i_нагр} - \varepsilon_{i_разгр}$, (i = 1, 2, 3) за цикл нагружения, определяемая по формуле

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3}\left[(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2)^2 + (\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_3)^2 + (\Delta\varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_1)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

σ_{im} – характеристика цикла нагружения, определяемая как разность интенсивностей напряжений σ_i при нагружении и разгрузке:

$$\sigma_{im} = \sigma_{iн} - \sigma_{ip},$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Результаты расчётов долговечности штанг без учёта и с учётом коррозионного повреждения

коэффициент запаса по долговечности $n = 3$

длительность наработки штанг T в сутках (при $N_{\text{базовой}}$ 5×10^6 циклов или 926 сут.)

частота $f = 4{,}5$ цикл/мин.

Результаты расчёта малоцикловой долговечности штанг

Варианты расчёта	$N_{\text{расчётная}}$, циклы	$N_{\text{допускаемая}}$, циклы	T, сутки	
			расчётная	допускаемая
Без учёта коррозии	128487200	42829067	19827	6609
С учётом коррозии	1368174	456058	210	70

Определение остаточных напряжений на установке АСБ-1

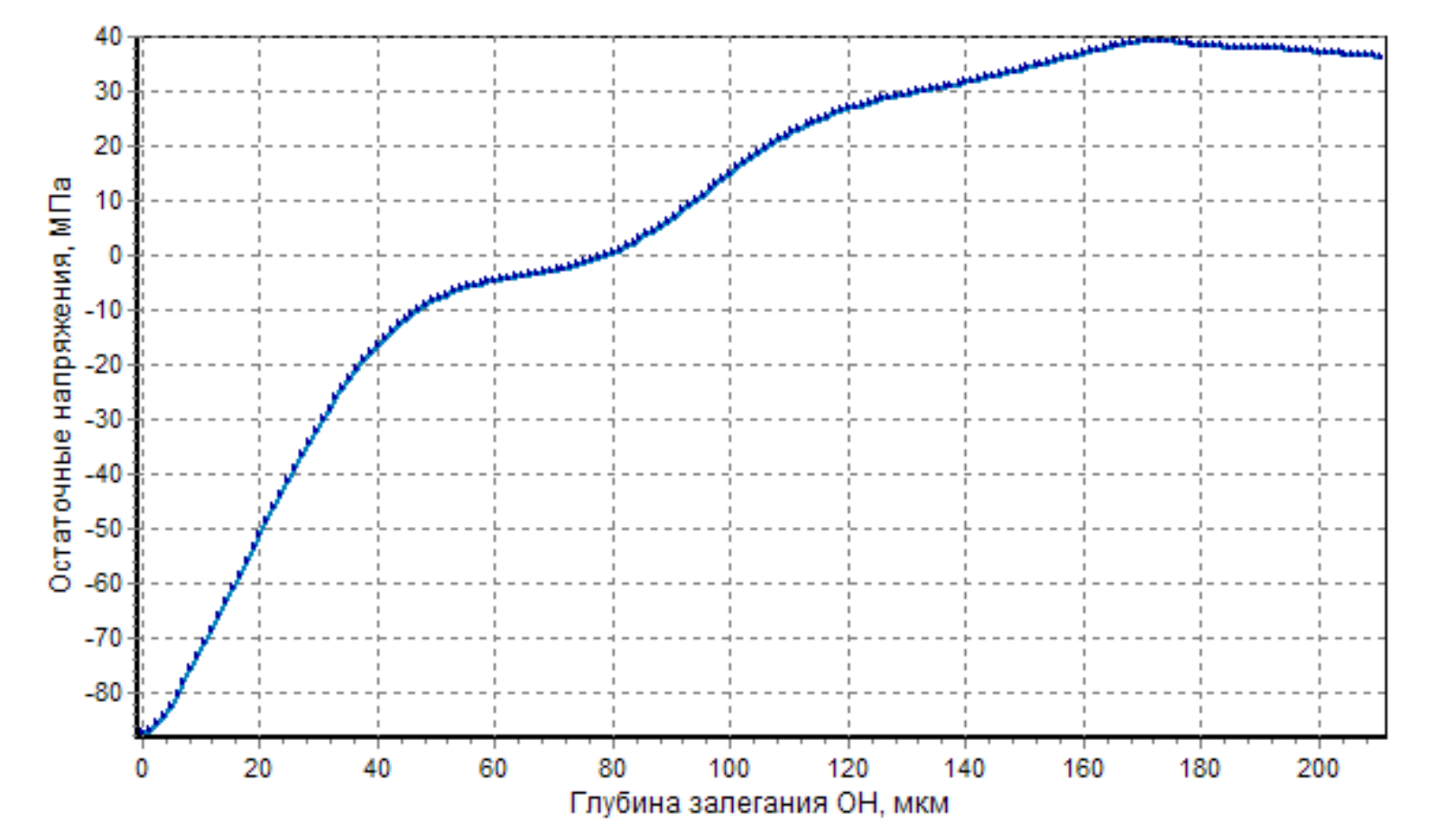




Образцы секторного сечения

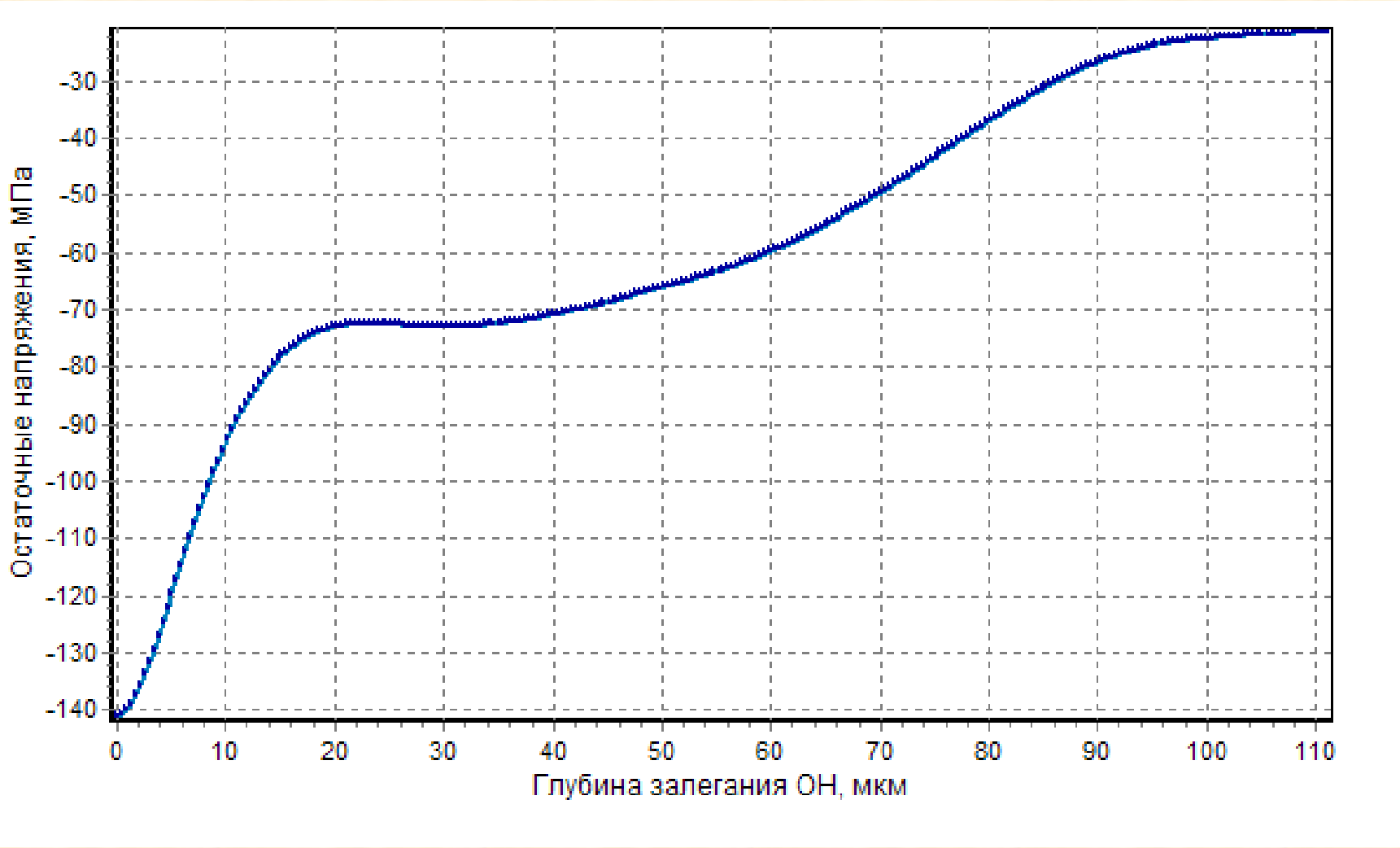
для определения остаточных напряжений

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



Выводы

- Основной причиной преждевременного разрушения штанг является коррозионное повреждение поверхности.
- Механические свойства материалов в меньшей степени влияют на долговечность штанг. Без учёта коррозии штанги класса прочности К и С обеспечивают запас по прочности 1,71, при этом штанги класса Д могут обеспечить запас по прочности 2,11. С учётом коррозии коэффициент запаса прочности штанг класса К и С составляет 0,57, коэффициент запаса прочности штанг класса Д составляет 0,71.
- В условиях возможного коррозийного разрушения материала применение штанг класса прочности Д не целесообразно.
- Для изготовления штанг предлагается использовать коррозионно стойкие стали, например 12Х18Н10Т с пределом выносливости σ_{-1p} = 224 МПа будет иметь коэффициент запаса прочности $n \approx 1{,}45$. При незначительном уменьшении коэффициента запаса по выносливости эта сталь и её аналоги обладают значительно большей коррозионной стойкостью и в сочетании с поверхностным упрочнением (способы поверхностного пластического деформирования – ППД) гарантированно обеспечат повышение сопротивления усталости штанг в многоцикловой области.
- Повысить сопротивление усталости стали 15Х2ГМФ в коррозионной среде можно: на ~ 5–10 % поверхностным упрочнением ППД, но более эффективно повышение коррозионной стойкости применением защитных технологий или замена материала на более коррозионностойкую сталь.