

## **ВЛИЯНИЕ ЛИКВАЦИОННОЙ ПОЛОСЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКЕ ТРУБЫ**

Худяков М.А., Муфтахов М.Х., Бердин В.К., Закирничная М.М.

Одной из наиболее важных задач трубопроводного транспорта углеводородов является обеспечение их надежной и безопасной работы путем сокращения риска возникновения аварийных ситуаций. Ее решение позволит снизить безвозвратные потери транспортируемых продуктов, улучшить экологическую обстановку, предотвратить разрушения инженерных сооружений и обеспечить, таким образом, оптимальное функционирование трубопроводных систем.

Актуальность данной проблемы связана с высокой частотой отказов магистральных трубопроводов, приводящих в ряде случаев к катастрофическим последствиям. Более 30 % отказов происходят на трубопроводах, проработавших более 20 лет, что связано с ухудшением их технического состояния. При этом кроме традиционных дефектов сварных соединений, ристок, вмятин, задиоров имеют место и металлургические дефекты, например, в виде расслоения металла трубы. Как показывает анализ результатов внутритрубной диагностики, количество расслоений составляет примерно 20 % от общего числа опасных дефектов. В зонах расслоения наблюдаются раскатанные загрязнения, характерные для трубных кремнемарганцовистых сталей, являющиеся дефектом металлургического производства.

Эти участки имеют большую химическую неоднородность, загрязнены примесями (оксиды, нитриды, сульфиды, силициды), то есть являются ликвационными зонами, отличающимися по значениям характеристик механических свойств от основного металла трубы /1, 2/.

Известно, что металл труб магистральных трубопроводов работает в условиях циклического нагружения от изменения внутреннего давления перекачиваемого продукта /3, 4/. Поэтому, оставленные без "внимания" неметаллические включения, обладающие высокой прочностью, твердостью и хрупкостью и, следовательно, будучи концентраторами напряжений, могут стать

источниками зарождения усталостных трещин и привести к аварийным разрушениям трубопроводов /5, 6/.

Вид такого расслоения стенки трубы приведен на рисунке 1.



Рисунок 1. Вид расслоения стенки трубы

Для изучения микроструктуры использовался микроскоп МИМ-8М. Поверхность подготовленного шлифа травилась концентрированным раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте. Структура исследуемого металла (рисунок 2) типична для горячедеформированной стали.

В центральной части образца имеется ликвационная полоса толщиной порядка 0,5 мм (рисунок 3, а). Структура стали ферритно-перлитная. Для изучения влияния термообработки на толщину ликвационной полосы был проведен отжиг при температуре 850 °С, время выдержки 30 минут. Было определено, что ширина ликвационной полосы увеличилась до 0,7 мм (рисунок 3, б). Это указывает на дополнительное выделение карбидов и оксидов при высоких температурах. Поэтому устранить ликвационную полосу указанной термообработкой не представляется возможным.

Химический состав металла определялся на сканирующем электронном микроскопе JEOL в микрорентгеноспектральном анализаторе модели JXA-6400 при напряжении 20 кВ и увеличении 1000<sup>X</sup>. Определялось содержание основных химических элементов, присутствующих в кремниймарганцовистых сталях: железо, хром, марганец, кремний и алюминий. Точки выбирались на поверхности исследуемого образца в зонах основного металла и ликвационной полосы поперек толщины стенки трубы: точка №1 – внутренняя поверхность, №11 – наружная

поверхность, №6 - середина ликвационной полосы. Распределение марганца, кремния и алюминия приведено на рисунке 4.

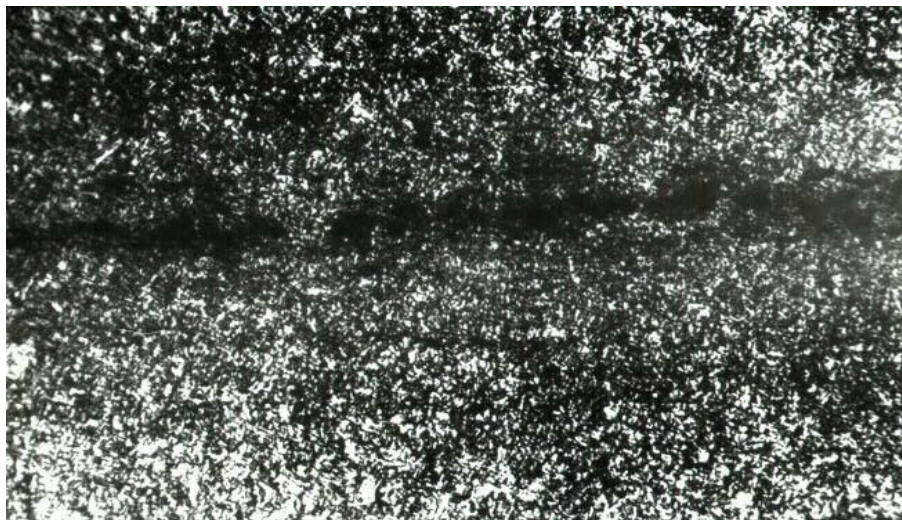
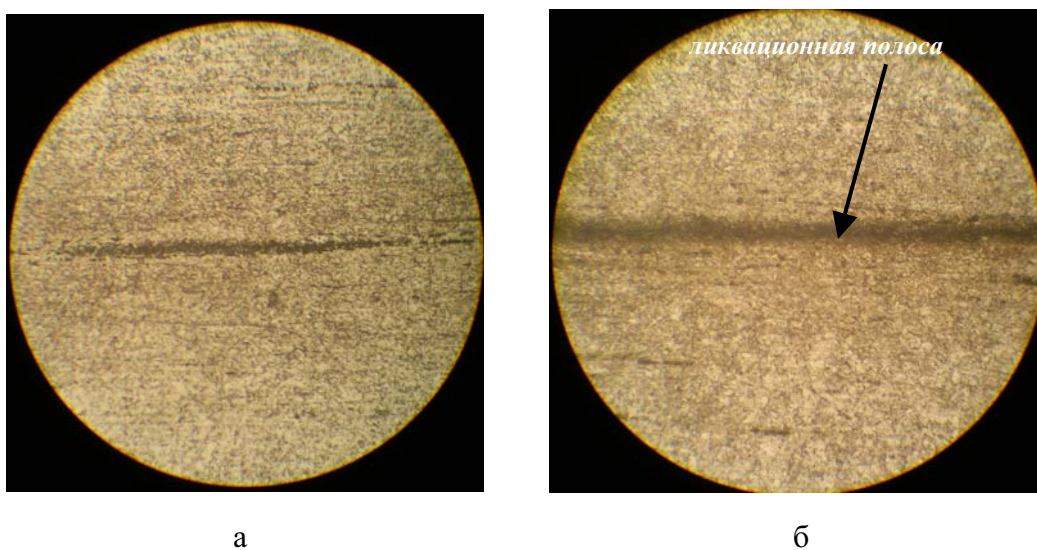


Рисунок 2. Микроструктура металла в зоне ликвационной полосы



а

б

Рисунок 3. Вид ликвационной полосы:  
а – до отжига; б - после отжига

Повышенное содержание рассматриваемых легирующих элементов в зоне ликвационной полосы указывает на возможность присутствия в ней оксидов марганца, кремния и алюминия /7, 8/.

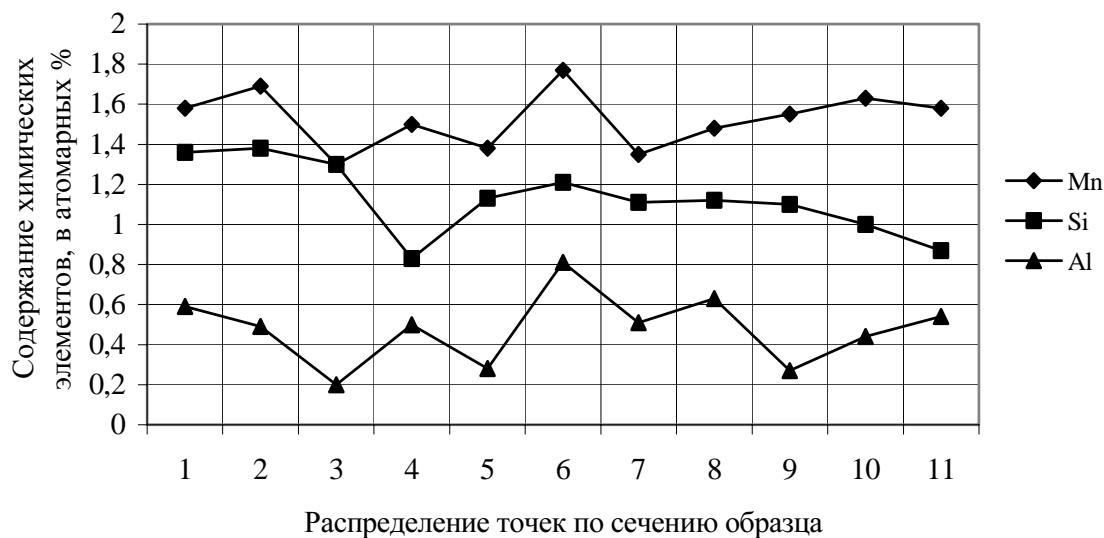


Рисунок 4. Характер распределения химических элементов

Качественный рентгенфазовый анализ зоны ликвационной полосы проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН 2.0 в отфильтрованном излучении трубки СоКа. При анализе полученных рентгеновских рефлексов установлено, что в пробе содержатся кристаллические фазы – оксиды  $MnO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , что подтверждает результаты выше приведенных результатов исследований.

Микротвердость основного металла и ликвационной полосы определялась в соответствии с ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1,96 Н.

Обработка полученных результатов исследований и их визуализация в виде графического изображения с интервальной оценкой ошибки эксперимента проводилась на ЭВМ с использованием пакетов прикладных программ SigmaPlot 8 и SigmaStat 3 /9/.

Проведенные исследования показали (рисунок 5), что в зоне ликвационной полосы микротвердость составляет  $2800 \text{ Н/мм}^2$ , а в основном металле – от  $1700$  до  $2000 \text{ Н/мм}^2$ , что также подтверждает результаты распределения химических элементов по сечению металла трубы.

Так как данные оксиды представляют собой твердые и хрупкие фазы, то в структуре металла будут образовываться участки с разными механическими свойствами. В процессе эксплуатации трубопроводов под действием внутреннего давления перекачиваемого продукта в стенке труб образуются участки с различным напряженно-деформированным состоянием.

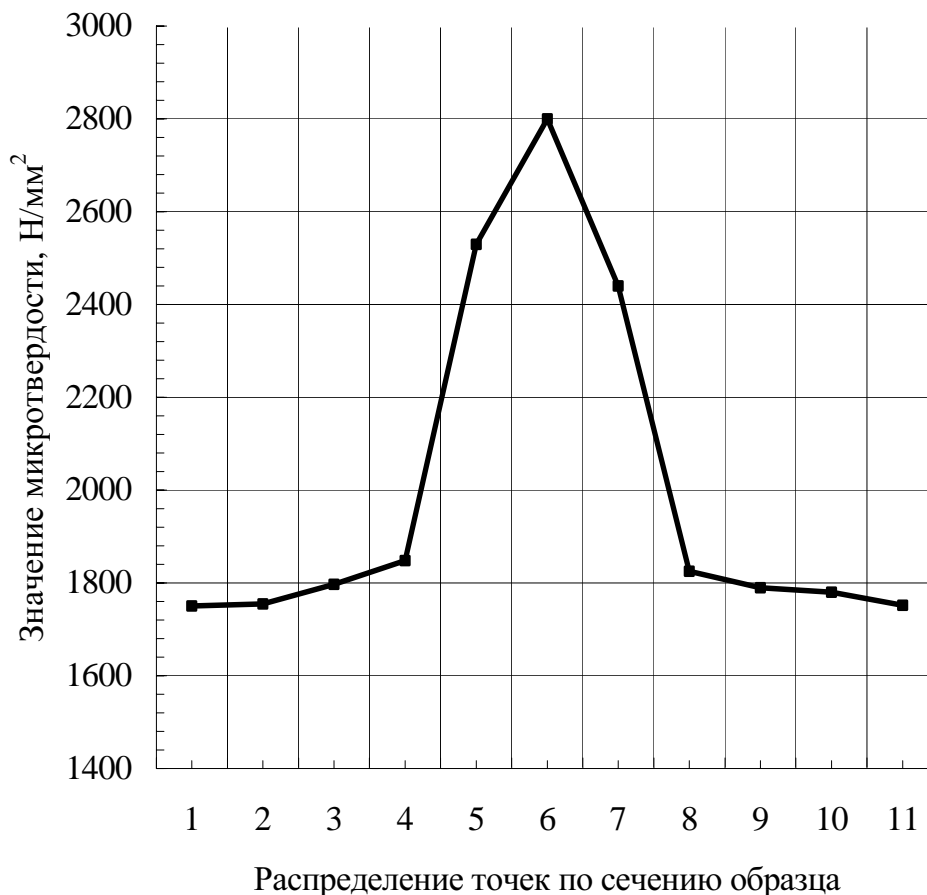


Рисунок 5. Распределение микротвердости по сечению образца

Анализ различных типов дефектов и всего многообразия соответствующих им расчётных схем показал, что выполнить оценку напряжённо-деформированного состояния (НДС) в различных зонах дефектных участков трубопровода при общей постановке задачи можно с использованием численного метода расчёта.

Был выбран конечно-элементный анализ, как один из наиболее эффективных методов решения инженерных задач.

Конечно-элементный анализ участка трубопровода был выполнен в среде программного комплекса ANSYS10.0, который позволяет определять напряжённо-деформированное состояние в конструкциях различной сложности при решении статических и динамических задач (в том числе геометрически и физически нелинейных задач механики деформируемого твёрдого тела), форм и

частот колебаний, анализа устойчивости конструкций, нелинейных переходных процессов.

Для определения напряжённо-деформированного состояния в области перехода основного материала и ликвационной зоны была построена модель фрагмента трубопровода, с ликвационной полосой в центральной части его поперечного сечения. Учитывая значительную величину отношения диаметра трубы к ее толщине, фрагмент трубопровода выполнен в виде пластины размером 100x50x10 мм. Пластина находится под действием результирующих растягивающих нагрузок от действия внутреннего давления  $P = 5,5$  МПа анализируемого участка трубы.

Задача решалась в трехмерной (3D) постановке. Расчет выполняли в упругой области. Свойства основного материала трубы и ликвационной полосы приняты изотропными.

Исходные данные для расчета НДС трубы с ликвационной полосой следующие:

- металл трубы – сталь марки 17Г1С;
- условный диаметр трубы – 820 мм, с толщиной стенки 10 мм;
- модуль упругости стали  $2 \cdot 10^5$  МПа;
- коэффициент Пуассона 0,3;
- рабочее давление 5,5 МПа;
- кольцевые напряжения в стенке трубы составляют 225 МПа;
- ликвационная полоса располагается в центре сечения стенки трубы, её толщина в расчётах принята 0,5 мм;
- модуль упругости неметаллических включений  $3,2 \cdot 10^5$  МПа;
- коэффициент Пуассона 0,17.

Фрагмент трубопровода определен 3D октаэдрическим элементом первого порядка “Solid 185”. Общее число элементов в модели равно 17600.

Участок ликвационной полосы занимает  $\frac{1}{4}$  часть рассматриваемого фрагмента модели. Такая конструкция позволяет оценить НДС на границе раздела основного материала и ликвационной полосы вдоль и поперек образующей трубы. Модель фрагмента трубы с ликвационной полосой представлена на рисунке 6.

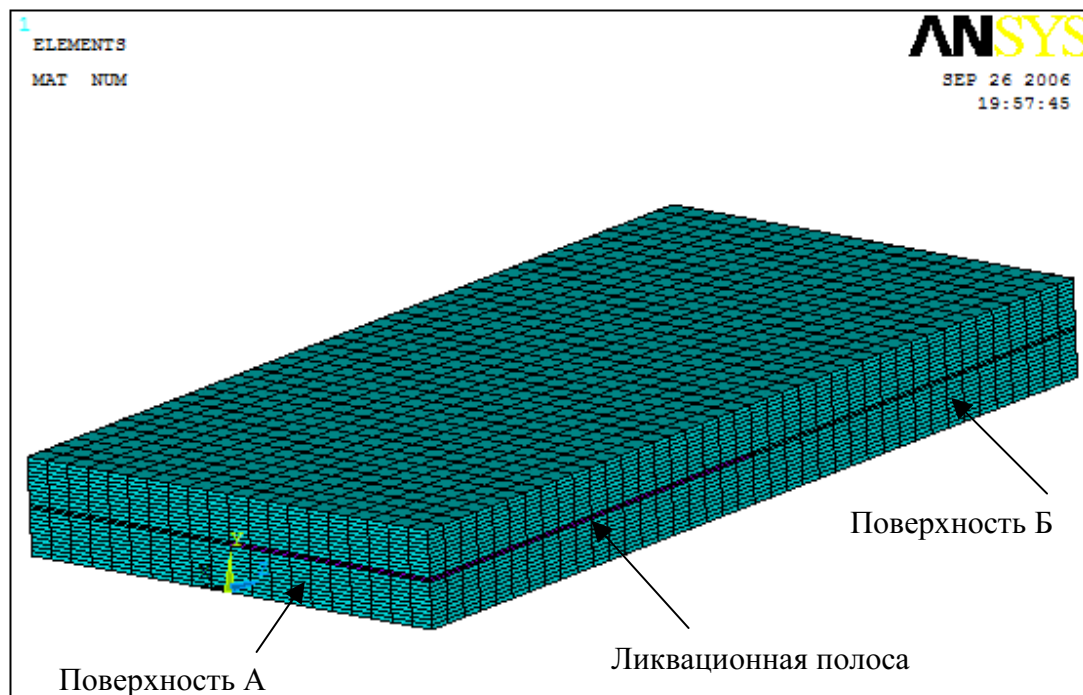


Рисунок 6. Конечно-элементная модель фрагмента трубы с ликвационной полосой

Необходимо отметить, что фрагмент трубы имеет две характерные поверхности : А - располагается поперек оси трубы, Б - вдоль оси трубы.

Граничные условия в модели были следующими.

К поверхности А фрагмента трубы равномерно приложены растягивающие напряжения равные  $P=207,52$  МПа вдоль направления оси OZ, которые создаются в стенке трубы от действия внутреннего давления. Противоположная поверхность закреплена от перемещения вдоль направлений OZ.

Поверхность Б и противоположная ей поверхность закреплены от перемещения вдоль направления оси OX.

На рисунках 7 а, б представлены эпюра распределения интенсивностей напряжений и деформаций на поверхностях фрагмента трубы А и Б.

Результаты показали, что значения напряжений в ликвационной полосе выше, чем в основном материале трубы - 298,6 МПа и 202,0 МПа, соответственно.

На границе перехода ликвационной полосы в основной материал наблюдается скачкообразное изменение величины интенсивности напряжений с 186,0 МПа до 330,7 МПа.

Величина упругой деформации в аналогичных участках фрагмента трубы составляет, соответственно 0,1% и 0,13%. Необходимо отметить, что в зоне

перехода от ликвационной полосы к основному материалу значение упругой деформации локально увеличивается до 0,15%.

На рисунке 8 представлены эпюры распределения интенсивности напряжений и деформации на краях ликвационной полосы в теле фрагмента трубы, расположенные параллельно плоскостям А и Б. Максимальные значения интенсивности напряжений отмечены в ликвационной полосе и составляют величину 342,3 МПа, а величина интенсивности деформации в ней составляет 0,12%.

На рисунке 9 представлено распределения интенсивности напряжений по границе раздела ликвационной полосы и основного материала.

Наибольшие значения интенсивности напряжений располагаются в продольном направлении фрагмента трубы, а наименьшие в поперечном направлении.

В вершине ликвационной полосы значения интенсивности напряжений максимальны и составляют величину 342,3 МПа.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений в указанной области составляет значение 1,7. Полученные результаты необходимо использовать при проведении расчетов на прочность труб с ликвационной полосой.

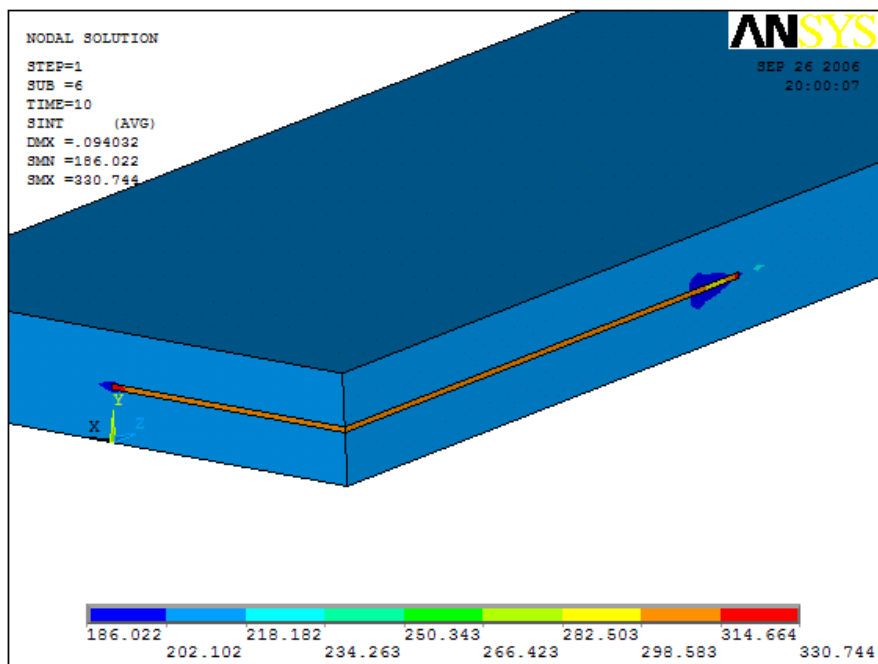
### **Выводы**

1. Участок трубы с находящейся в стенке ликвационной полосой обладает неоднородностью химического состава и механических свойств. В состав ликвационной полосы входят оксиды MnO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

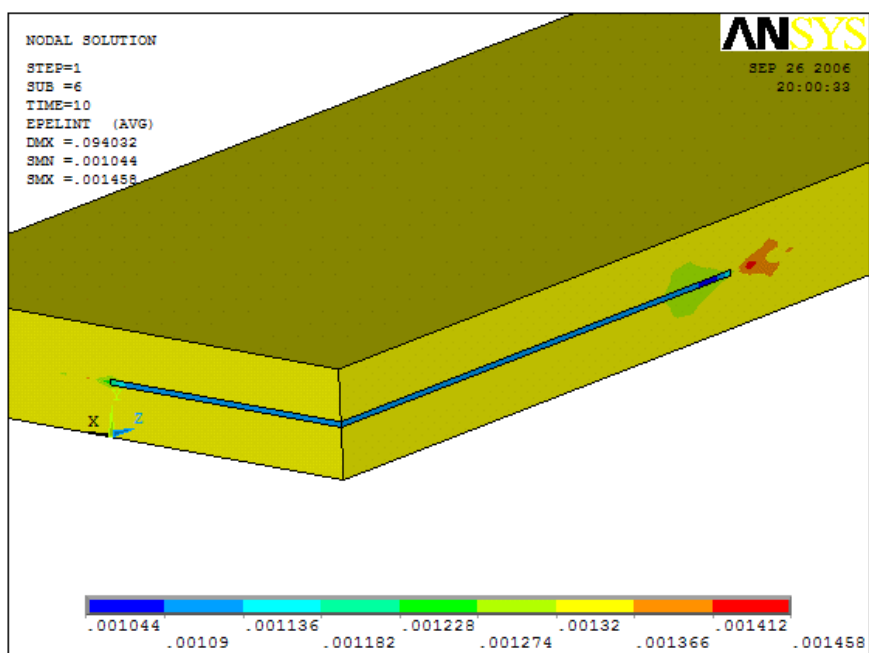
2. Анализ результатов математического моделирования свидетельствует о неоднородном распределении напряженно-деформированного состояния в стенке трубы с ликвационной полосой. Максимальные значения интенсивности напряжений наблюдаются в вершине ликвационной полосы и составляют величину 342,3 МПа, близкую к пределу текучести для стали 17Г1С (380 МПа).

3. Теоретический коэффициент концентрации напряжений в указанной области составляет значение 1,7.



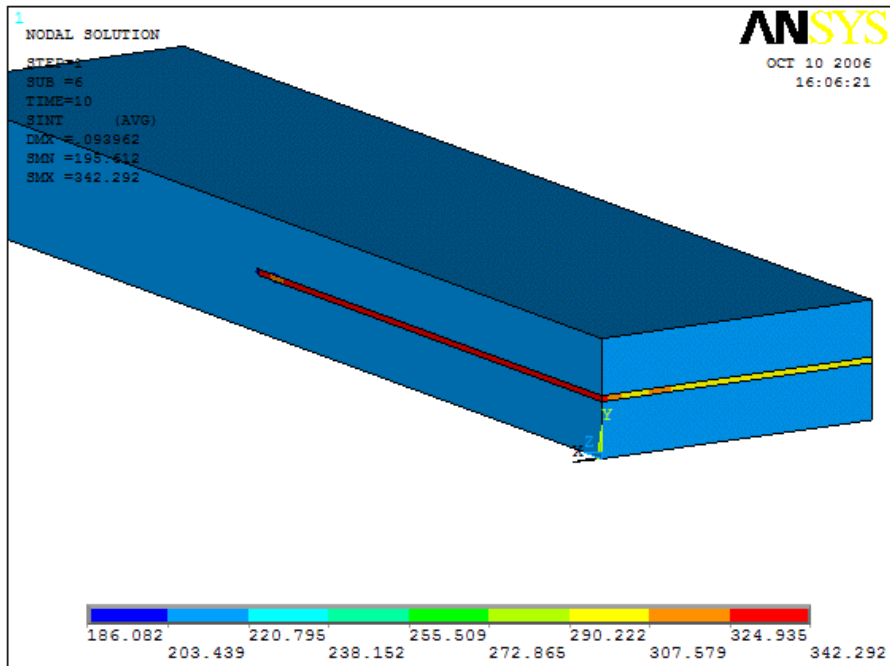


а

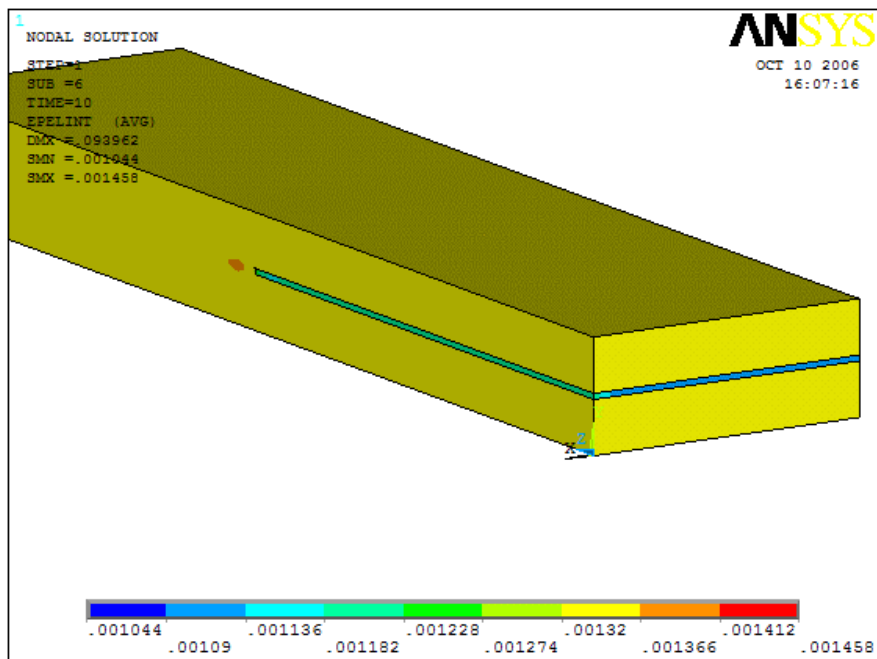


б

Рисунок 7. Эпюра распределения интенсивности напряжений (а) и интенсивности деформаций (б) в поперечном сечении фрагмента трубы

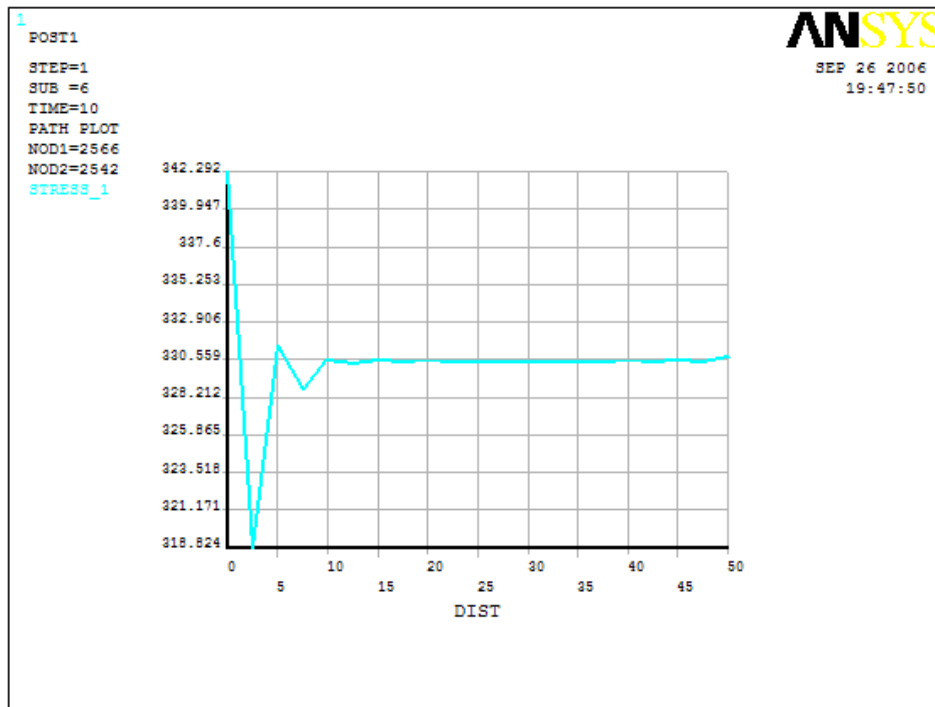


a

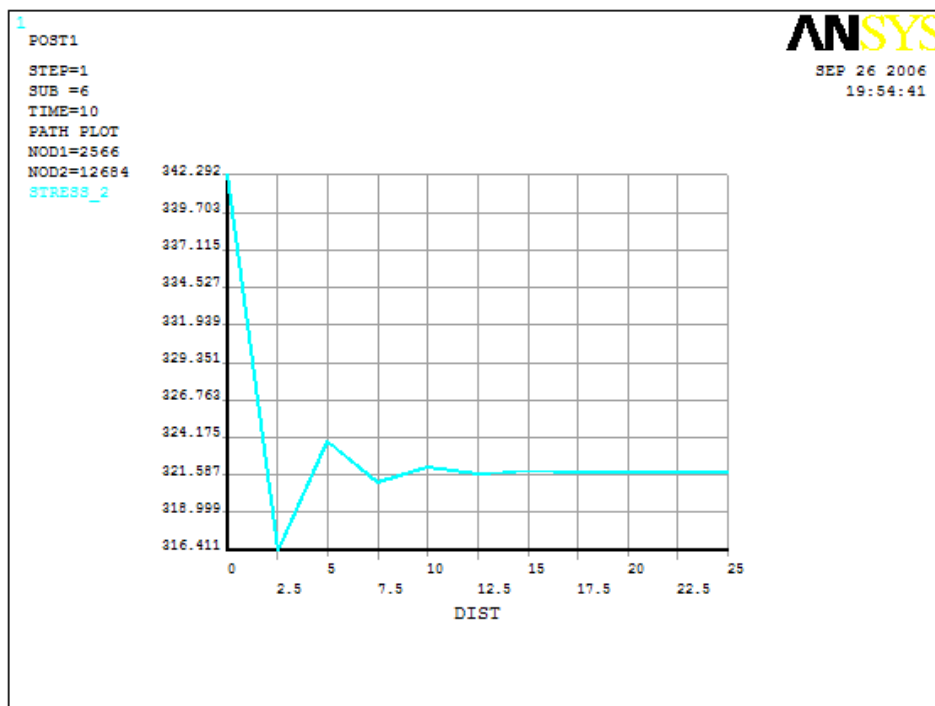


б

Рисунок 8. Эпюра распределения интенсивности напряжений (а) и интенсивности деформаций (б) в поперечном сечении фрагмента трубы на границе раздела ликвационной полосы и основного материала



а



б.

Рисунок 9. Распределение интенсивности напряжений в ликвационной полосе на границе раздела в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

## Литература

1. Бельченко Г.И., Губенко С.И. Неметаллические включения и качество стали.– К.: Техніка, 1980.– 168 с.
2. Виноград М.И. Включения в стали и ее свойства.- М.: Металлургиздат, 1963.– 252 с.
3. Гутман Э.М., Амосов Б.В., Худяков М.А. Малоцикловая коррозионная усталость трубной стали при эксплуатации магистральных нефтепроводов// Строительство трубопроводов.– 1978.- № 4.– С. 25 – 30.
4. Волский М.И., Аистов А.С., Гусенков А.П. и др. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении// Нефтяная промышленность. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов: Обзор. информ.- М.: ВНИИОЭНГ, 1979.– 55 с.
5. Куслицкий А.Б. Неметаллические включения и усталость стали.– Киев: Техніка, 1976.– 128 с.
6. Даль В. Поведение стали при циклических нагрузках// Пер. с нем. Под ред. В.Н. Геминова.– М.: Металлургия, 1983.– 568 с.
7. Худяков М.А., Закирничная М.М., Муфтахов М.Х. Роль неметаллических включений в расслоении трубных сталей// Прикладная синергетика – II: Сб. науч. трудов.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004.- Т.2.- С. 156 – 158.
8. Худяков М.А., Муфтахов М.Х. К вопросу о расслоении металла труб. Мировое сообщество и пути решения: Сб. науч. статей.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. - № 16.- С. 36-39.
9. Гареев А.Г. Основы обработки и визуализации экспериментальных данных: Учеб. пособие: - Уфа: УГНТУ, 2004.– 82 с.