

# 68

Якупов Н.М., Абдюшев А.А., Якупов С.Н.,  
yzsrr@kfti.knc.ru, ИММ КазНЦ РАН;  
Кантюков Р.А., Тамеев И.М.,  
ООО «Газпром трансгаз Казань»

## Локальные «лечащие» накладки-покрытия

Трубопроводная система предназначена для выполнения своих функций в течение заданного срока. С эксплуатационной точки зрения хотелось бы иметь такую систему, у которой все узлы и элементы безотказно и качественно отработали бы заданный срок, после которого их можно было бы полностью заменить. Однако практически это трудноразрешимая задача, поскольку создание идеальной системы потребовало бы больших временных и финансовых затрат.

Обычно ставятся более реальные цели – создать систему трубопровода, которая должна удовлетворять функциональному назначению, быть простой в эксплуатации, дешевой и конкурентоспособной. Если природные конструкции восхищают нас своим изяществом и уникальным совершенством, то рукотворные – весьма далеки от этого. Трубопроводные системы, созданные человеком, к сожалению, далеки от совершенства. Знание механизмов разрушения позволяет разрабатывать эффективные способы защиты трубопроводов от разрушения [1–3].

Одной из наиболее существенных причин разрушения является наличие концентраторов. Еще Леонардо да Винчи в конце XV века сформулировал понятие концентратора и тем самым заложил основы современной механики разрушения. Понятие «концентрация напряжения» было введено гораздо позже. Концентраторами напряжений могут быть отверстия и углубления, раковины и пустоты, коррозионные дефекты, непровары в сварных швах и зоны скопления сварных швов, пазы и зоны стыков элементов, перепады толщин и острые конструктивные углы и т.д.

Наиболее опасным концентратором является трещина. Причинами возникновения трещин могут быть технологические, эксплуатационные, конструктивные и т.д. В процессе деформации металла происходит движение дислокаций в кристаллографической структуре. Взаимодействия различных дислокаций способствуют образованию микротрещин. Трещины могут образоваться и при тепловом воздействии на металл, например, при термической обработке и при сварке, когда возникают существенные температурные напряжения, вызванные градиентом температур.

Однако появление трещины еще не означает «гибель» конструкции. Разрушение произойдет в том случае,

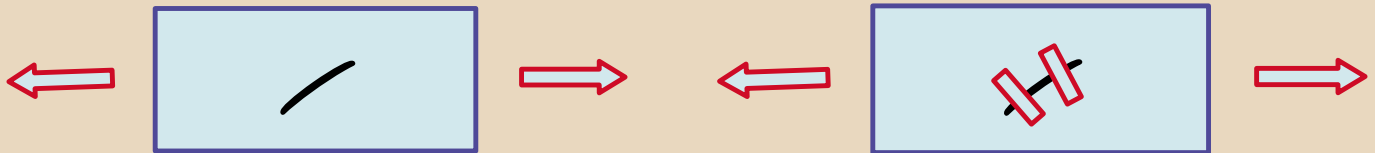


Рис. 1. Схема панели с трещиной «с» и «без» накладки

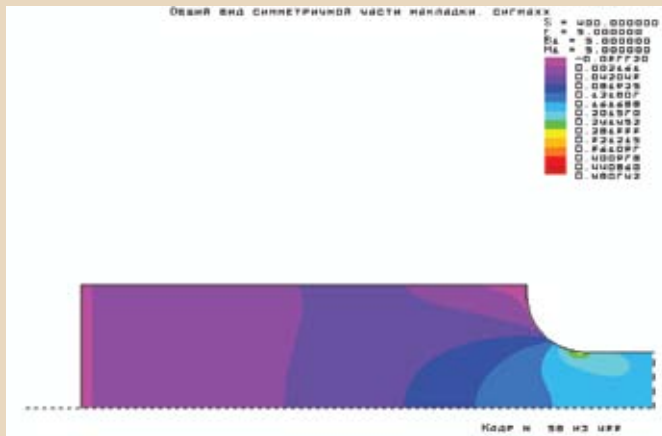


Рис. 2. Нормальные напряжения по оси X в накладке при  $b_0 \gg h_0$

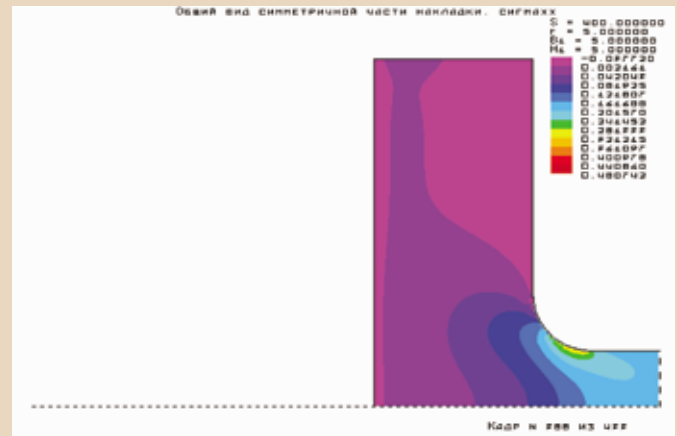


Рис. 4. Нормальные напряжения по оси X в накладке при  $b_0 \ll h_0$

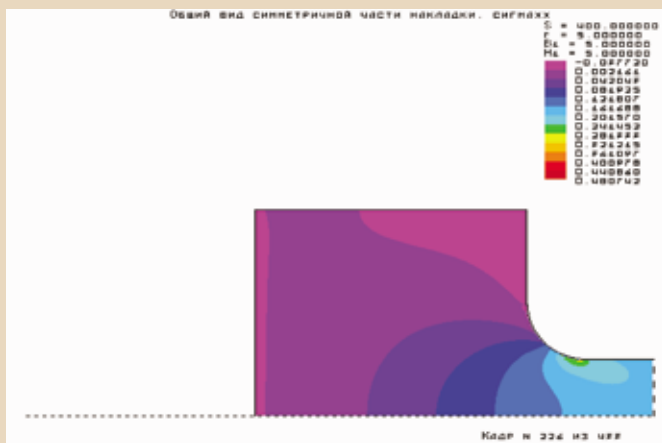


Рис. 3. Нормальные напряжения по оси X в накладке при  $b_0 = h_0$

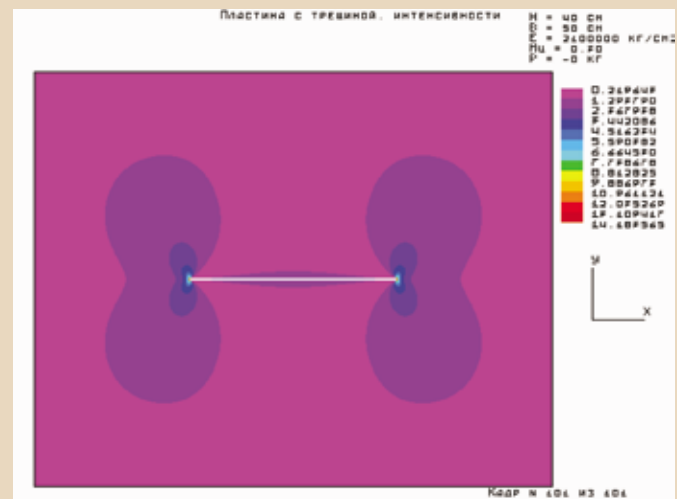


Рис. 5. Панель с трещиной без накладок

если длина трещины превышает критическую длину, являющуюся функцией отношения работы разрушения к упругой энергии, запасенной в материале. Эффективен способ создания при проектировании или ремонте поля сжатия. Этого можно достичь, например, сжатием определенной зоны конструкции и приваркой или склейкой сверху слоя металла. Тогда основной металл окажется сжатым, а слой сверху – растянутым. Этого можно достичь, например, сжатием определенной зоны конструкции и приваркой или склейкой сверху слоя металла или полимера (рис. 1).

Для решения этой проблемы были разработаны способ ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях, а также два типа крепежных элементов. На разработки получены патенты на изобретение: №2310791 Способ ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях, 2008 год [4]; №2380585 Крепежный элемент «ЯМСИ», 2009 год [5].

Методом конечных элементов [6] был проведен анализ напряженно-деформированного состояния накладок, а также панели с трещиной «с» и «без» накладок [7–10]. Некоторые результаты приведены ниже.

### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ «ЛЕЧАЩИХ» НАКЛАДОК

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) непосредственно накладок был использован прямоугольный (квадратный) конечный элемент плоской задачи теории упругости (плосконапряженное состояние) с билинейной аппроксимацией полей перемещений [6]:

$$U_x = a_0 + a_1 \xi + a_2 \xi \eta + a_3 \eta; \quad U_y = b_0 + b_1 \xi + b_2 \xi \eta + b_3 \eta.$$

Получаемое значение напряжения в центре конечного элемента отображается закрашиванием цветом, соответствующим определенному диапазону.

Для каждой компоненты напряжений  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  и  $\sigma_{xy}$  строится своя картина [7]. Дополнительно строится четвертая картина для интенсивностей напряжений, определяемых (как инварианта) по формуле Мизеса.

Для исследования влияния геометрии приклеиваемой части накладки на ее напряженно-деформированное состояние был реализован тест следующего содержания. В силу симметричности задачи относительно двух плоскостей в качестве тестируемого объекта была выбрана четвертая часть накладки. Сама накладка функционально разбита на три части. 1-я часть, приклеиваемая к объекту, имеет, при всех вариантах, фиксированную площадь  $S$ , в  $\text{мм}^2$ , и форму прямоугольника со сторонами  $h_0$  и  $b_0$  в мм, размеры которого вычисляются в результате масштабирования. 2-я часть – переходная к шейке, заданного радиуса  $R$ . 3-я часть – шейка – заданной длины и высоты ( $h_1$  и  $b_1$  в мм). Кроме этих параметров зада-

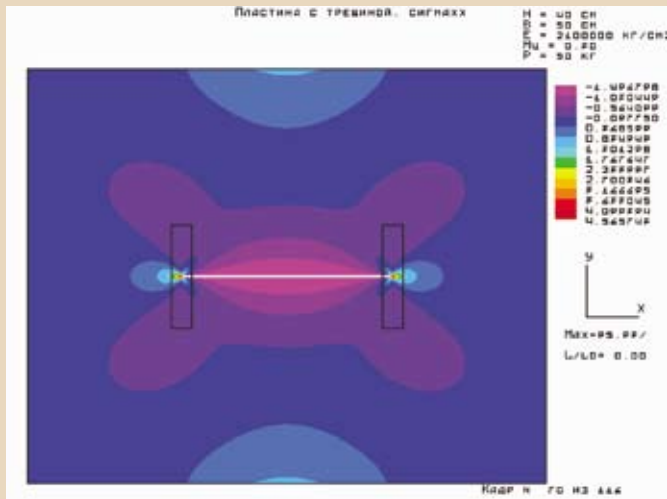


Рис. 6. Нормальные напряжения в объекте при нулевом положении ( $e = 0$ )

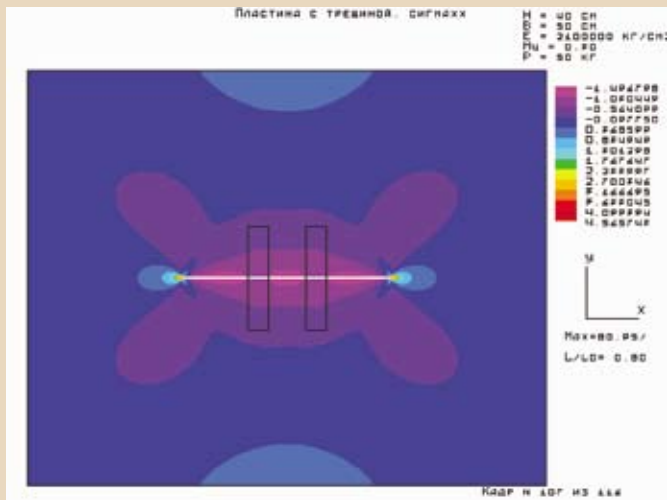


Рис. 7. Нормальные напряжения в объекте при минимальном значении Max ( $e = 0,8$ )

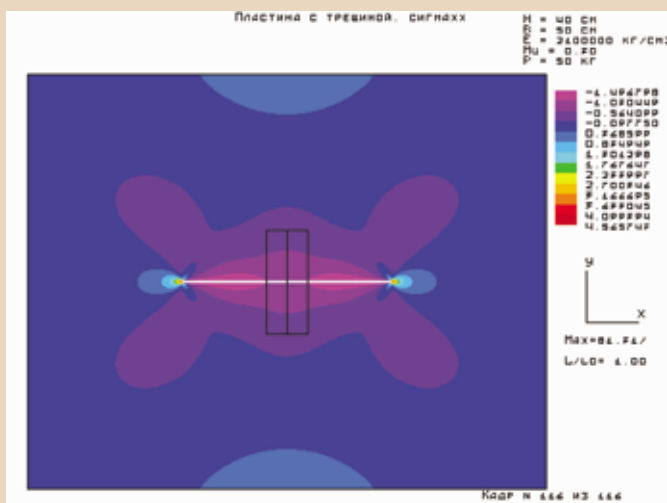


Рис. 8. Нормальные напряжения в объекте при  $e = 1$

ются еще  $E$  – модуль упругости Юнга материала в  $\text{кг}/\text{см}^2$ ,  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала,  $t$  – толщина наклейки в мм,  $G$  – удельная жесткость клеевого слоя в  $\text{кг}/\text{мм}^3$ ,  $P$  – растягивающая сила в кг. На рисунках 2–4 приведены нормальные напряжения по оси  $X$  в наклейке при  $b_0 \gg h_0$ , при  $b_0 = h_0$  и при  $b_0 \ll h_0$  соответственно.

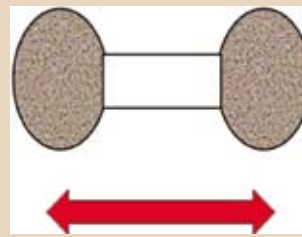


Рис. 9. 1-й этап крепежного элемента

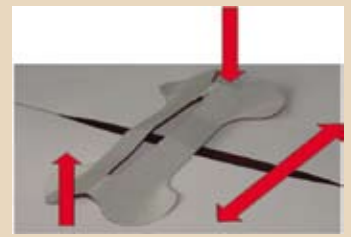


Рис. 10. 1-й этап крепежного элемента

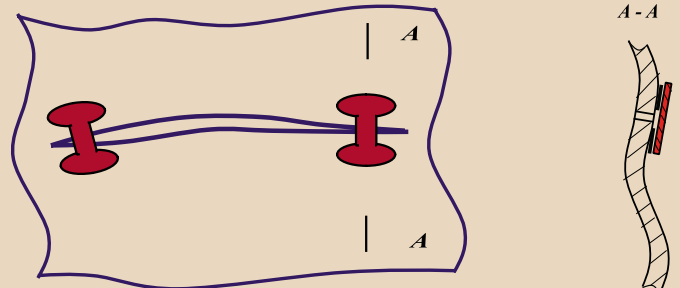


Рис. 11. При нагреве крепежные элементы притягивают берега трещины

### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАНЕЛИ С ТРЕЩИНОЙ «С» И «БЕЗ» НАКЛАДОК

На рисунке 5 показано распределение интенсивностей напряжений для прямоугольного объекта с трещиной. Параметры панели (объекта исследования): ширина – 50 см, высота – 40 см, толщина – 0,1 см, максимальная ширина трещины – 20 см, материал – сталь. Панель нагружена по противоположным краям параллельной линии трещины равномерно распределенной нагрузкой. Две другие кромки свободны от кинематических и силовых факторов.

Для исследования влияния влияния накладок поставлен тест с параметрами первой задачи, при наличии симметрично расположенных накладок, абсолютно жестко связанных с объектом [7–10]. Кроме цветовой информации о диапазонах напряжений на экране показаны численные значения: а) отношение текущего максимального значения напряжения или интенсивности напряжений к соответствующему исходному напряжению в процентах (Max); б) относительная координата положения оси одной наклейки при отсчете от края трещины к центральному положению ( $e = l/l_0$ ).

На рисунках 6–8 приведены нормальные напряжения в панели при  $e=0$ ;  $e=0,8$  и  $e=1$  соответственно.

### КРЕПЕЖНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ РЕМОНТА ТРЕЩИН И СПОСОБ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Разработаны два типа крепежных элементов из материала с «эффектом памяти формы», предназначенные для приостановки развития трещин в элементах конструкций, а также способ их использования. Получены патенты на изобретение РФ: №2310791 Способ ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях; №2380585 Крепежный элемент ЯМСИ.

Первый тип крепежного элемента создает стягивающие усилия вдоль наклейки, предназначен для восприятия нормальных к берегам трещины усилий в тангенциальной плоскости (рис. 9). Второй тип крепежного элемента имеет пространственно искривленную форму, создает стягивающие усилия вдоль наклейки, воспринимает поперечные усилия (обеспечивает поперечную жесткость). Крепежный элемент предназначен для восприятия как нормальных к линии трещины в тангенциальной плоскости, так и поперечных усилий,

приложенных к берегам трещины элемента конструкций; обеспечивает поперечную жесткость в области соединения (рис. 10).

При нагреве крепежные элементы притягивают берега трещины друг к другу в нормальной к линии трещины плоскости (рис. 11).

Крепежные элементы должны стать эффективным инструментом для приостановки развития трещин при эксплуатации трубопроводов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Одной из наиболее существенных причин разрушения трубопроводов является наличие дефектов.
2. Наиболее опасным концентратором является трещина.
3. Причинами возникновения трещин могут быть технологические, эксплуатационные, конструктивные и т.д.

4. Появление дефектов еще не означает «гибель» конструкции.
5. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния прямоугольных накладок различной геометрии с закругленными углами.
6. Имеет место сложное распределение напряженно-деформированного состояния нагруженных накладок.
7. Подбирая соответствующие параметры накладки, можно варьировать уровнем ее загруженности.
8. Установкой «лечащих» накладок в области трещины можно влиять на распределение интенсивности напряжений во всей области панели.
9. Варьируя расположением накладок, можно добиться минимального уровня интенсивности напряжений.
10. Проведенные исследования показывают эффективность использования «лечащих» накладок, а также

возможность выбора наиболее рационального варианта расположения этих накладок.

11. Разработаны два типа крепежных элементов.
12. 1-й тип крепежного элемента (плоская гибкая накладка) создает стягивающие усилия вдоль накладки, предназначен для восприятия нормальных к берегам трещины усилий в тангенциальной плоскости.
13. 2-й тип крепежного элемента имеет пространственно искривленную форму, предназначен для восприятия как нормальных к линии трещины в тангенциальной плоскости, так и поперечных усилий, приложенных к берегам трещины элемента конструкций.
14. Крепежные элементы должны стать эффективным инструментом для «лечения» элементов трубопроводных систем.

### Литература:

1. Якупов Н.М. *Механика: проблема – идея – практика*. Казань: Казан. гос. ун-т, 2010. 161 с.
2. Якупов Н.М. *Строительные конструкции: этапы и перспективы развития*. Учебное пособие. Казань, КГАСУ, ИММ КазНЦ РАН, 2006. 154 с.
3. Якупов Н.М. *Механика: проблема – идея – практика // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. №3. 2010. С. 24–37.
4. Якупов Н.М., Якупов С.Н., Мифтахутдинов И.Х., Мифтахутдинов А.И. *Способ ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях // Патент на изобретение РФ № 2310791*.
5. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Мифтахутдинов И.Х., Якупова Р.Н. *Крепежный элемент «ЯМСИ» №2380585*.
6. Лукашенко В.И., Абдюшев А.А. и др. *Экспертиза, расчет, анализ пространственных конструкций: Монография*. Казань: КГАСУ, 2006. 321 с.
7. Якупов Н.М., Абдюшев А.А. *Параметрическое исследование лечащих накладок средствами расчетного комплекса ЭРА-ПК2000 // Известия КГАСУ*. №2 (8)/2007. С. 61–64.
8. Якупов Н. М., Абдюшев А. А., Мифтахутдинов И. Х., Якупов С. Н. *Эффективный способ ремонта трещин в оболочечных конструкциях. Актуальные проблемы нелинейной механики оболочек*. Казань: Изд-во Казанского государственного ун-та, 2008. С. 131–133.
9. Якупов Н.М., Абдюшев А.А., Мифтахутдинов И.Х., Якупов С.Н. *Способ ремонта трещин в оболочечных конструкциях // Инженерные системы 2008. Труды Всероссийской научно-технической конференции*. М.: РУДН, 2008. С. 166–169.
10. Якупов Н.М., Абдюшев А.А. *Лечение дефектов в элементах конструкций // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики. Том 1. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции*. 12–13 октября 2009. Казань. С. 20–26.

**ПИ**®  
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**Промизоляция**



**100** лет  
надежная защита

ЗАО «ПРОМИЗОЛЯЦИЯ»  
603058, г. Н. Новгород, ул. Новикова-Прибл. д.4  
Тел.: +7 (831) 258-39-58, 258-39-32; Факс: +7 (831) 258-39-66  
e-mail: promizolyaciya@ruiz.ru  
www.ruiz.ru