



УДК: 539.3

**Н.М. Якупов** – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией

**А.А. Абдюшев** – старший научный сотрудник

Тел.: (843) 272-42-45, e-mail: [YZSRR@kfti.knc.ru](mailto:YZSRR@kfti.knc.ru)

Лаборатория нелинейной механики оболочек Института механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук (ИММ КНЦ РАН)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕЧАЩИХ НАКЛАДОК НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАНЕЛЕЙ С СИСТЕМОЙ ТРЕЩИН

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается панель с тремя параллельными трещинами. Описываются результаты исследований распределения интенсивности напряжений в такой панели в зависимости от длин трещин. Отмечается эффективность использования «лечащих накладок», а также возможность рационального размещения таких накладок. Приводятся выводы по результатам выполненной работы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трещина, пластина, разрушение конструкций, лечащие накладки, напряженно-деформированное состояние.

**N.M. Yakupov** – doctor of technical sciences, professor, chief laboratory

**A.A. Abdiushev** – senior staff scientist

Tel.: (843) 272-42-45, e-mail: [YZSRR@kfti.knc.ru](mailto:YZSRR@kfti.knc.ru)

Laboratory Nonlinear Mechanics of Shell Institute Mechanical engineers and Machine building of Kazan Scientific Centre of Russia Academy of Sciences (IMM KSC RAS)

## INFLUENCE STUDY OF CURING BRACKETS ON TENSE-DEFORMED CONDITION OF PANELS WITH RIFT SYSTEM

### ABSTRACT

Considered panel with three parallel rifts. Described results of studies of sharing an intensity of stresses in such panels depending on lengths of rifts. Noted efficiency of use “curing brackets”, as well as possibility of rational accomodation of such brackets. The results of executed work are included.

**KEYWORDS:** rift, plate, destruction of buildings, curing brackets, tense-deformed condition.

Известно, что одной из существенных причин разрушения конструкций является наличие концентраторов, при этом наиболее опасным концентратором является трещина, об этом отмечается, в частности, и в работах [1-3]. Появление трещины еще не означает разрушение конструкции. Разрушение произойдет в случае, когда длина трещины превысит критическую длину. То есть в промежутке определенного интервала времени до разрушения конструкций имеется возможность каким-то образом приостановить развитие трещины. Если для хрупких материалов этот промежуток времени очень незначителен, то для традиционных конструкционных материалов из стали имеется некоторое время для предотвращения катастрофического разрушения.

Одним из способов приостановки развития трещины является создание сжимающих усилий в дефектной области. Сжимающие нагрузки, в частности, можно создать, используя специальные накладки,

изготовленные из термоориентированного материала – материала с памятью формы [2-4].

Для подтверждения эффективности способа ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях по патенту на изобретение № 2310797 [4] было проведено исследование влияния «лечащих» накладок на напряженно-деформированное состояние панели с одной трещиной [2]. Для анализа использовался метод конечных элементов на базе расчетного комплекса ЭРА-ПК2000 [5].

В данной работе приводятся некоторые результаты численного исследования влияния накладок на напряженно-деформированное состояние панелей с системой трещин. Наличие нескольких трещин усложняет картину деформирования. Распределение напряженно-деформированного состояния зависит от размеров трещин и их расположения. Расположение и количество накладок также существенно влияют на распределение напряжений. Как и в работах [2, 3], для

анализа используется квадратный конечный элемент плоской задачи теории упругости с билинейной аппроксимацией поля перемещений [5].

В работе рассматривается панель прямоугольной формы, в которой имеется система разрезов (дефекты типа трещин). Для анализа напряженно-деформированного состояния одна четвертая часть рассматриваемой панели моделируется 50 тысячами конечных элементов (регулярная сетка конечных элементов 200x250). При этом разрезы формируются путем удаления конечных элементов, расположенных вдоль этих разрезов. Значения напряжения вычисляются в центрах тяжести конечных элементов. По вычисленным значениям компонент напряжений и интенсивности напряжения строятся картины распределения напряженного состояния. Далее производится расчет напряженно-деформированного состояния полученной модели панели с накладками и без накладок. Затем производится сравнение этих решений.

Было проведено исследование прямоугольной панели шириной 0.5 м, высотой 0.4 м и толщиной 1 мм. Материал панели – сталь, с характеристиками: модуль упругости  $E = 2.1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ . На противоположных горизонтальных кромках приложена равномерно распределенная растягивающая нагрузка  $p = 1$  Н/мм.

Первая группа исследований посвящена определению напряженно-деформированного состояния панели с тремя параллельными горизонтальными трещинами. Горизонтальные трещины расположены с равномерным шагом и отступают от горизонтальных кромок панели на 0.1 м. Были рассмотрены случаи, когда длины всех трех трещин изменялись от 0 до 0.2 м. По полученным результатам был собран микрофильм, демонстрирующий изменения распределения интенсивности напряжений в зависимости от изменения длин трещин. Наблюдается интересная картина. В частности, при длинах трещин меньше одной трети рассмотренной максимальной длины трещины вблизи вершин всех трех трещин возникает концентрация напряжений с интенсивностью одного порядка. С увеличением длин трещин происходит перераспределение интенсивности напряжений. При этом в области вершин крайних трещин уровень интенсивности напряжений возрастает, а в области вершины средней трещины интенсивности напряжений падают. То есть средняя трещина экранируется крайними трещинами, и нагрузка от вершины одной крайней трещины передается на вершину другой крайней трещины. Область между двумя крайними трещинами находится в теневой зоне и практически слабо включается в работу по восприятию нагрузки, действующей на панель.

Выше сказанное подтверждается результатами второй группы исследований, которая посвящена

определению напряженно-деформированного состояния панели с тремя параллельными горизонтальными трещинами с «лечащими» накладками, установленными в области центральной трещины. Параметры панели и трещин, как и в предыдущей группе исследований. Параметры накладок: ширина – 0.02 м, высота 0.1 м, толщина 1 мм, модуль упругости материала  $E = 2.0 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ , удельная жесткость клея  $K = 10^4$  МПа/мм. Поперечная ось накладки совпадает с продольной осью центральной трещины. Накладки располагаются симметрично относительно вертикальной оси панели. Были рассмотрены случаи, когда расположение каждой накладки изменялось практически от наружной вертикальной кромки до центральной вертикальной оси панели.

На рис. 1 представлен график изменения относительной интенсивности напряжений в зависимости от положения накладок. Под относительной интенсивностью принято отношение максимальной величины интенсивности напряжений при рассматриваемом положении накладок к максимальной величине интенсивности напряжений, соответствующее наибольшему удалению накладок от трещины (расположение накладок по кромкам панели). На этом и последующих графиках ось абсцисс характеризует положение оси накладки на пластине. На этой оси дополнительно выделено положение накладки, при котором относительная интенсивность принимает минимальное значение. Кроме этого, прямая, проведенная под осью абсцисс, характеризует геометрию пластины, а утолщение соответствует трещине на пластине.



Рис. 1. Накладки расположены на средней трещине

Результаты исследований показывают, что наличие накладок и их расположение не оказывает сколь-нибудь значительное влияние, за исключением небольшого перераспределения интенсивности напряжений между крайними трещинами. По полученным результатам, как и для первой группы исследований, был собран микрофильм, демонстрирующий изменения



распределения интенсивностей напряжений в зависимости от изменения расположения накладок в области центральной трещины.

Третья группа исследований посвящена определению напряженно-деформированного состояния панели с тремя параллельными горизонтальными трещинами с «лечащими» накладками, установленными в области крайних трещин. Параметры панели, трещины и накладок приняты такими же, как и в предыдущей группе исследований. Поперечные оси накладок совпадают с продольной осью крайних трещин. Как и во второй группе исследований, накладки располагаются симметрично относительно вертикальной оси панели. Рассмотрены случаи, когда расположение накладок изменялось практически от наружной вертикальной кромки до центральной вертикальной оси панели. Результаты исследований показывают, что наличие накладок и их расположение оказывают существенное влияние на перераспределение интенсивности напряжений. При этом при расположении накладок вблизи вертикальных кромок максимальные интенсивности напряжений возникают в области вершин крайних трещин. При приближении накладок к вершинам трещин начинается перераспределение картины деформированного состояния: вблизи вершин крайних трещин интенсивности напряжений начинают падать, а вблизи вершин центральной трещины уровень интенсивности напряжений возрастает. При расположении накладок в области крайних трещин на удалении 22 мм от вершин трещин (78 мм от середины) наблюдается минимальная интенсивность напряжений

в области вершин крайних трещин и максимальные интенсивности напряжений вблизи вершин центральной трещины. По полученным результатам, как и для первых двух групп исследований, был собран микрофильм, демонстрирующий изменения распределения интенсивности напряжений в зависимости от изменения расположения накладок в области крайних трещин. На рис. 2 представлен кадр из этого фильма. На рис. 3, как и на рис. 1, представлен график изменения относительной интенсивности напряжений в зависимости от положения накладок для рассматриваемого случая.

Четвертая группа исследований посвящена определению напряженно-деформированного состояния панели с тремя параллельными горизонтальными трещинами с «лечащими» накладками, установленными в области всех трех трещин. Параметры панели, трещины и накладок приняты такими же, как и в предыдущей группе исследований. Поперечные оси накладок совпадают с продольной осью крайних трещин. Как и в предыдущих группах исследований, накладки располагаются симметрично относительно вертикальной оси панели. Рассмотрены случаи, когда расположение накладок изменялось практически от наружной вертикальной кромки до центральной вертикальной оси панели. На рис. 4, как и на рис. 1 и 3, представлен график изменения относительной интенсивности напряжений в зависимости от положения накладок для рассматриваемого случая. Исследования показывают, что наличие накладок и их расположение оказывают значительное влияние на перераспределение интенсивности напряжений.

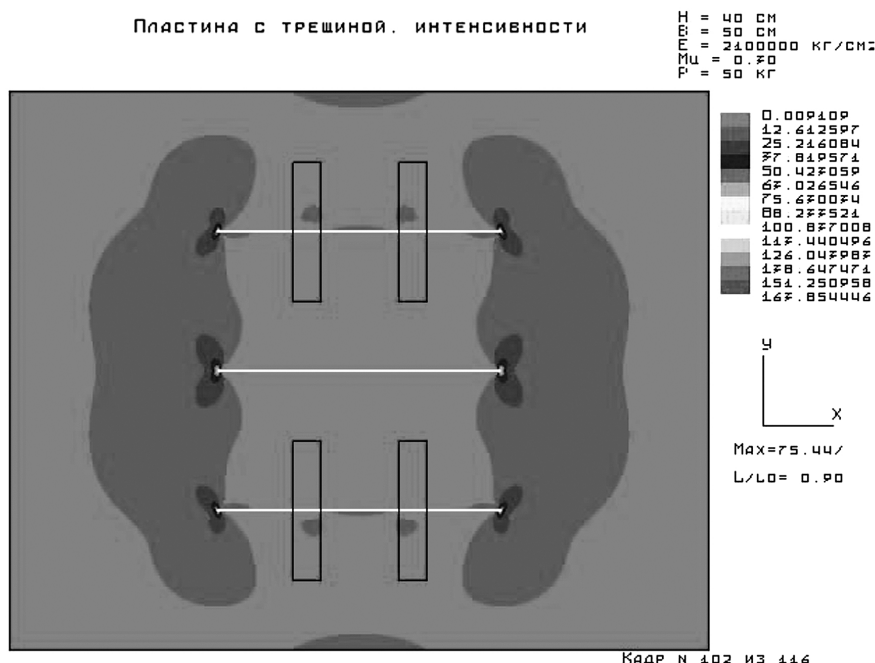


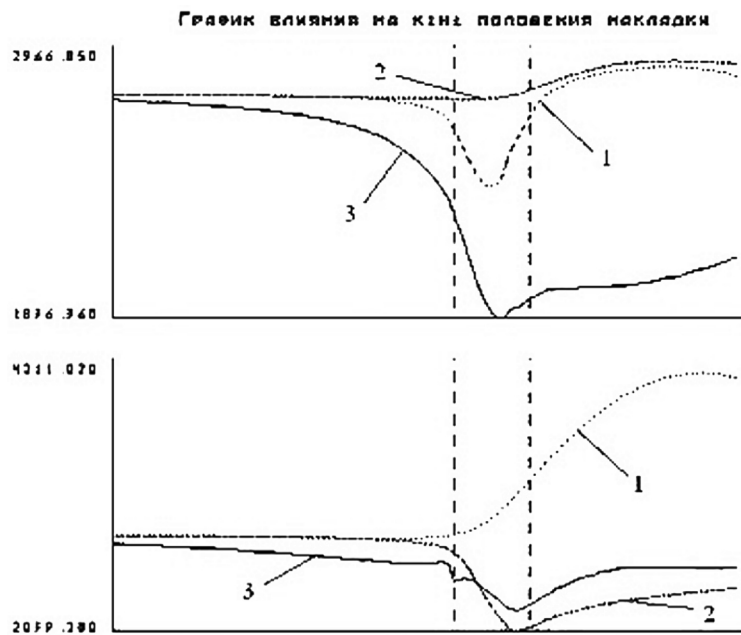
Рис. 2. Распределение напряжений при оптимальном положении «лечащих» накладок по крайним трещинам



Рис. 3. Наклейки расположены на крайних трещинах



Рис. 4. Наклейки расположены на всех трещинах

Рис. 5. Графики изменения величины  $K_I$  в зависимости от положения осей накладок (от крайнего – до центрального) на правой симметричной части панели

По полученным результатам линейных расчетов по МКЭ, как и в предыдущих группах исследований, был собран микрофильм, демонстрирующий изменение распределения как отдельных компонент тензора напряжений, так и их интенсивностей по формуле Мизеса в зависимости от изменения расположения накладок в области трещин.

Все проведенные численные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что исследуемая модель достоверно отражает качественную картину распределения напряжений по исследуемой области. Однако для количественной оценки влияния положения накладок необходимо использовать критерии механики разрушения [6].

С этой целью, по результатам тех же численных экспериментов, были определены зависимости коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  от наличия и расположения накладок, изменения которых

для крайних (верхний график) и центральной трещин (нижний график) представлены на рис. 5. При определении использовалась методика численного получения J-интегралов [7].

На рис. 5 показаны следующие кривые зависимостей коэффициентов интенсивности от положения и наличия накладок: 1 – наклейки расположены только на центральной трещине; 2 – наклейки расположены только на крайних трещинах; 3 – наклейки расположены на всех трещинах. Пунктиром здесь выделена зона, в которой лечащая наклейка, хотя бы частично, попадает на область интегрирования при вычислении  $K_I$ .

#### Выводы:

1. С увеличением длин трещин, когда они соразмерны с параметрами панели и дистанциями между трещинами, происходит перераспределение напряжений, причем в области вершин крайних



трещин уровень интенсивности напряжений возрастает, а в области вершин средней трещины интенсивности напряжений падают.

(Исследование  $K_I$  для данной группы тестов не проводилось).

2. Установка «лечащих» накладок в области центральной трещины (при соразмерности длины трещины с параметрами панели и дистанциями между трещинами) не эффективна, а по значениям  $K_I$  даже ухудшает сопротивляемость трещинообразованию.

3. Наличие накладок в области крайних трещин оказывает существенное влияние на распределение напряжений в конструкции, при этом  $K_I$  для крайних трещин практически не изменяется, а в центральной трещине – уменьшается.

4. Установкой «лечащих» накладок в области всех трещин можно влиять на распределение напряжений во всей области панели. И, варьируя расположением накладок, можно добиться минимального значения  $K_I$ , отвечающих за сопротивление материала росту трещин.

5. Проведенные исследования показывают, что путем выбора положения «лечащих» накладок для системы параллельно расположенных трещин имеется возможность увеличить несущую способность дефектных элементов конструкций, воспринимающих растяжение.

#### Литература

1. Якупов Н.М. Строительные конструкции: этапы и перспективы развития. Учебное пособие / Под ред. проф. Сучкова В.Н. – Казань: КазГАСУ, ИММ КазНЦ РАН, 2006. – 154 с.
2. Якупов Н.М., Абдюшев А.А. Параметрическое исследование лечащих накладок средствами расчетного комплекса ЭРА-ПК2000 // Известия КазГАСУ, 2007, № 2(8). – С. 61-64.
3. 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 КГУ, 2008. – С. 131-133.
4. Якупов Н.М., Якупов С.Н., Мифтахутдинов И.Х., Мифтахутдинов А.И. Способ ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях // Патент на изобретение РФ № 2310797.
5. Лукашенко В.И., Абдюшев А.А. и др. Экспертиза, расчет, анализ пространственных конструкций: Монография. – Казань: КГАСУ, 2006. – 321 с.
6. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – Изд. 2-е, испр. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 256 с.
7. Шлянников В.Н. Вычислительная механика деформирования и разрушения. Учебное пособие. – Казань: КГЭУ, 2002. – 228 с.