

## **Метод определения характеристик локального НДС в элементах соединения ремонтной накладки и пластины с усталостной трещиной**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»  
АНТК им. О.К. Антонова*

**Ключевые слова:** усталостная трещина, ремонтная накладка, локальное НДС, система ANSYS, удельная энергия деформирования.

**Ключові слова:** тріщина від утомленості, ремонтна накладка, локальний НДС, система ANSYS, питома енергія деформування.

**Keywords:** fatigue crack, patch, local deflected mode, ANSYS software, specific deformation energy.

Тонкостенные типовые элементы конструкции планера самолета, спроектированные по принципу безопасной повреждаемости или эксплуатируемые по техническому состоянию, должны иметь достаточные живучесть и ресурс при наличии в них усталостных трещин докритической длины [1, 2]. Долговечность конструкций, ранее спроектированных по принципу безопасного ресурса и находящихся в настоящее время в эксплуатации, информативность их усталостных испытаний можно существенно повысить применением интегрированных способов задержки роста усталостных трещин, восстановления прочности и герметичности.

Задержка роста усталостных трещин в ее вершине происходит вследствие уменьшения: интенсивности напряжений, концентрации напряжений, значения или амплитуды циклических напряжений и деформаций [1-14].

При выполнении ремонта сборных тонкостенных конструкций элементов планера самолета мелкие трещины засверливают в их вершинах, а также устанавливают ремонтные накладки. На основе выявленного характера развития усталостных трещин и типа усталостного разрушения тонкостенных конструкций целесообразно выполнять в вершине трещины отверстие, диаметр которого равен удвоенной толщине листовой детали с трещиной или более. Выполнение отверстий в вершинах трещин замедляет их рост, но не останавливает его [15]. Для прогнозирования долговечности конструктивных элементов при наличии трещин необходима разработка метода определения характеристик локального НДС в элементах соединения ремонтной накладки и пластины с усталостной трещиной, что и является целью данной работы.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- проанализировать существующие способы восстановления несущей способности тонкостенных конструкций, поврежденных усталостной трещиной;
- на основе анализа существующих способов задержки роста усталостных трещин выбрать для дальнейшего анализа несколько наиболее эффективных (обеспечивающих достижение регламентируемой долговечности) способов;
- разработать метод определения характеристик локального НДС в тонкостенных элементах, поврежденных усталостной трещиной;

– обосновать с применением разработанного метода эффективность выбранных способов задержки роста усталостных трещин.

В качестве объекта исследования выбран образец пластины с трещиной длиной 58 мм, в вершине которой выполнены отверстия диаметром 4 мм и ремонтная накладка, присоединенная к пластине с помощью крепежных элементов с односторонним подходом, установленных без натяга и затяжки (см. рис. 1 и 2). Были рассмотрены два варианта конструктивного исполнения накладки: 1) в зоне крайних рядов в накладке выполнено утонение на величину, равную половине исходной толщины накладки; 2) накладка имеет постоянную толщину. Утонение в зоне крайних рядов выполняли в целях разгрузки крайних рядов крепежных элементов. Кроме того, в зоне крайних рядов в накладке выполнены фестоны для удобства обнаружения усталостных трещин в пластине в зоне крайнего ряда. В работе также были рассмотрены два дополнительных конструктивных варианта: пластина без трещины с накладкой и пластина с трещиной длиной 58 мм, в вершине которой выполнены отверстия диаметром 4 мм (без накладки).

Для анализа характеристик локального НДС в элементах соединения применяли систему инженерного анализа ANSYS.

Разработан метод анализа характеристик локального НДС в пластине с усталостной трещиной и ремонтной накладкой, включающий в себя:

- 1) создание трехмерной модели образца пластины с усталостной трещиной и установленной ремонтной накладкой;
- 2) разработку расчетной схемы;
- 3) задание физико-механических характеристик материала и кривых деформирования пластины, накладки и крепежных элементов;
- 4) создание конечно-элементной модели пластины с усталостной трещиной, ремонтной накладкой и крепежных элементов;
- 5) создание контактных элементов для учета контактного взаимодействия пластины с накладкой, пластины и крепежных элементов, накладки и крепежных элементов;
- 6) задание граничных условий;
- 7) приложение внешних растягивающих напряжений;
- 8) решение системы линейных алгебраических уравнений;
- 9) моделирование процесса разгрузки, путем удаления внешних растягивающих напряжений;
- 10) решение системы линейных алгебраических уравнений;
- 11) анализ характеристик локального НДС в зонах вероятного усталостного разрушения.

Учитывая геометрическую и силовую симметрию образца, а также изотропность свойств материала, из которого он изготовлен, моделируем 1/4 образца пластины с усталостной трещиной и накладкой. При этом действие отброшенных частей компенсируем заданием соответствующих граничных условий симметрии.

Расчетная схема образца, показанная на рис. 3, представляет собой 3D элементы твердого деформируемого тела, находящиеся в условиях сложного напряженного состояния, учитывающего изгиб образца пластины в зоне установки накладки и контактное взаимодействие конструктивных элементов.

Для моделирования образца пластины с усталостной трещиной, накладки и крепежных элементов используются 8-узловые 3D элементы твердого деформируемого тела SOLID45, представленные в системе ANSYS [16]. Контактное взаимодействие моделировалось с помощью специальных элементов TARGE170 и CONTA173. В модели контактного взаимодействия учтено трение. Расчет проведен при уровнях напряжений 50, 100, 130 и 150 МПа, что соответствует эксплуатационным напряжениям в тонкостенных элементах конструкции.

При выборе модели поведения материала учитывали величины расчетных нагрузок, действующих на образец. Поскольку при данных уровнях напряжений возможно возникновение в образце пластических деформаций, то для описания законов поведения материала для всех конструктивных элементов выбрана полилинейная упругопластическая модель материала с кинематическим законом упрочнения.

Все конструктивные элементы выполнены из алюминиевого сплава: пластина и накладка – из сплава Д16Тл2, а крепежные элементы  $\varnothing 4$  мм – из сплава В65 [17].

На рис. 1, 3 приняты следующие обозначения: а – без трещины; б – с трещиной длиной 58 мм и отверстиями  $\varnothing 4$  мм в вершине трещины (накладка имеет утонение в зоне крайних рядов); в – с трещиной длиной 58 мм и отверстиями  $\varnothing 4$  мм в вершине трещины (накладка без утонения в зоне крайних рядов); г – с трещиной длиной 58 мм и отверстиями  $\varnothing 4$  мм в вершине трещины (без накладки)

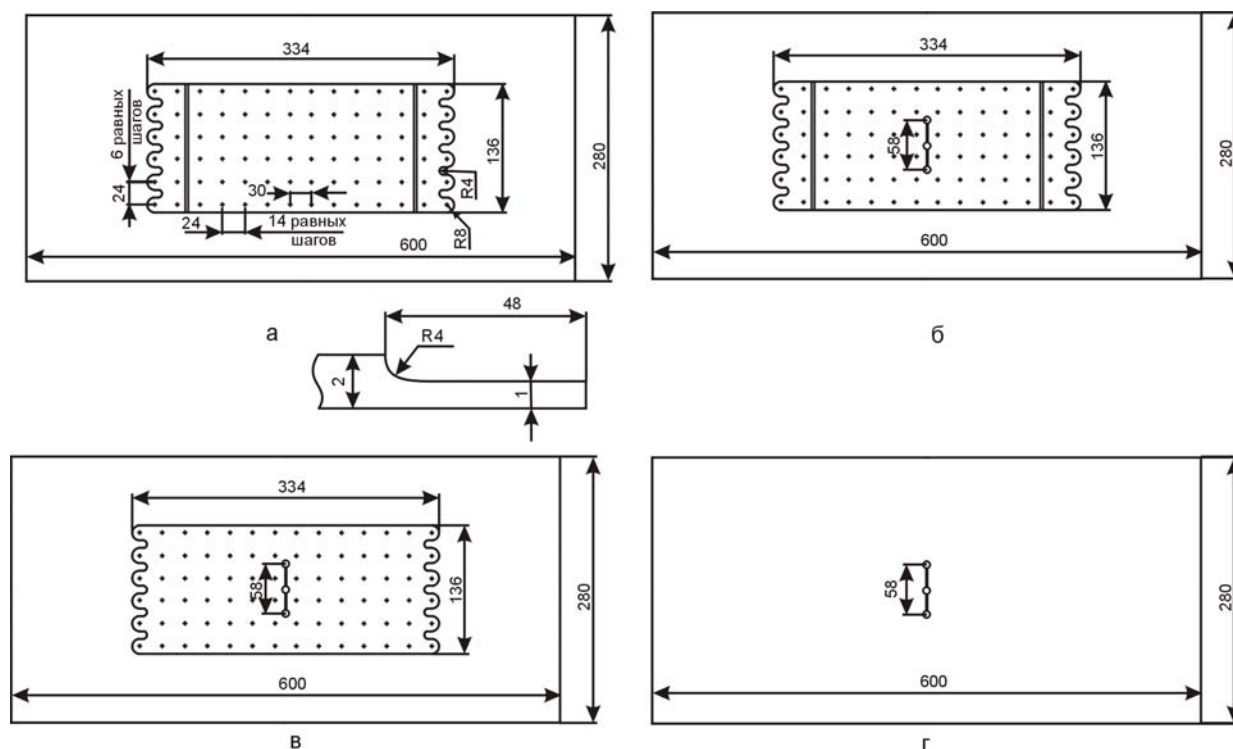


Рис. 1. Рассматриваемые варианты соединения ремонтной накладки и пластины

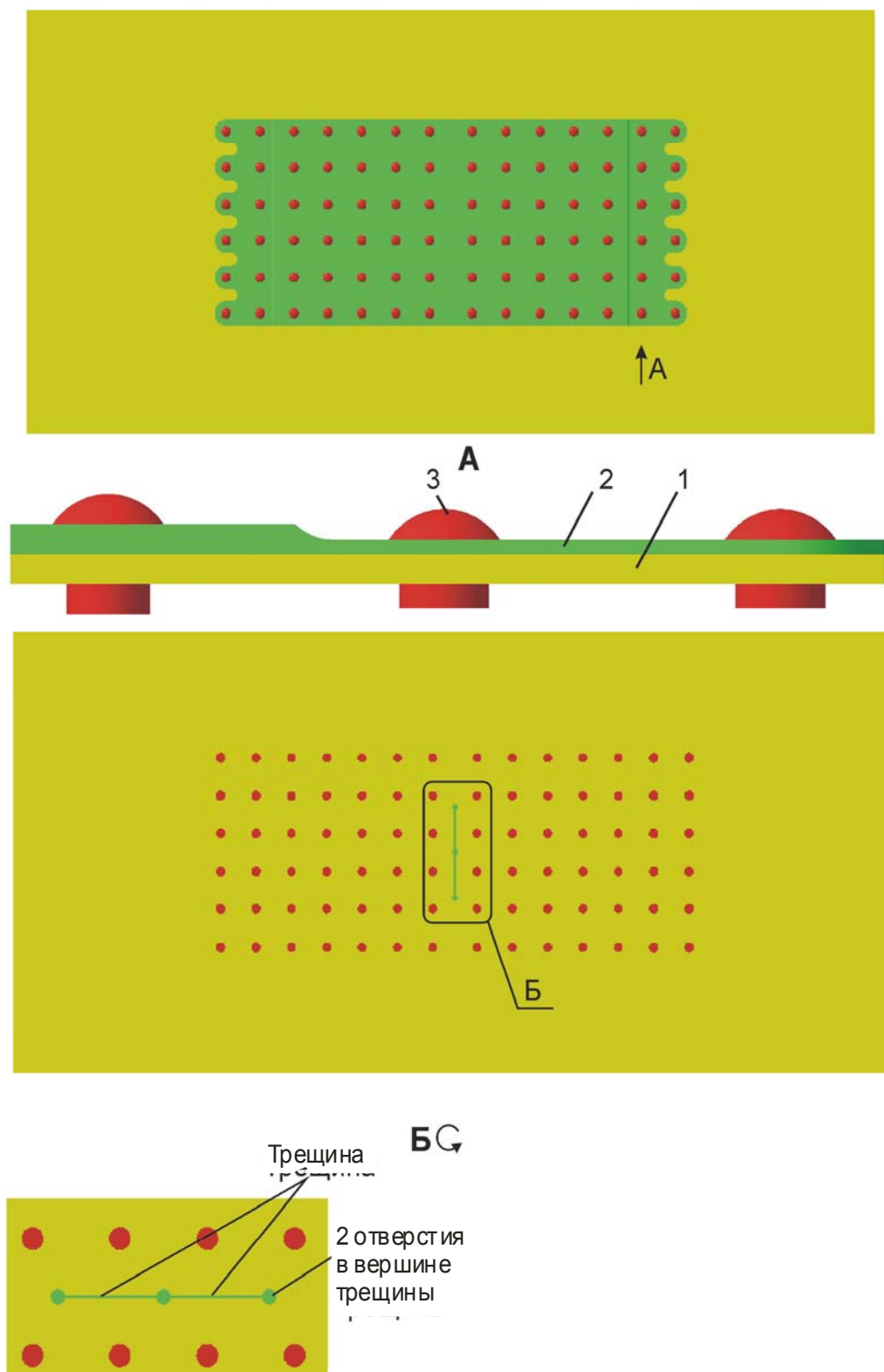


Рис. 2. Образец пластины с центрально расположенной трещиной и присоединенной к ней ремонтной накладкой:  
1 – пластина с трещиной; 2 – ремонтная накладка;  
3 – крепежные элементы

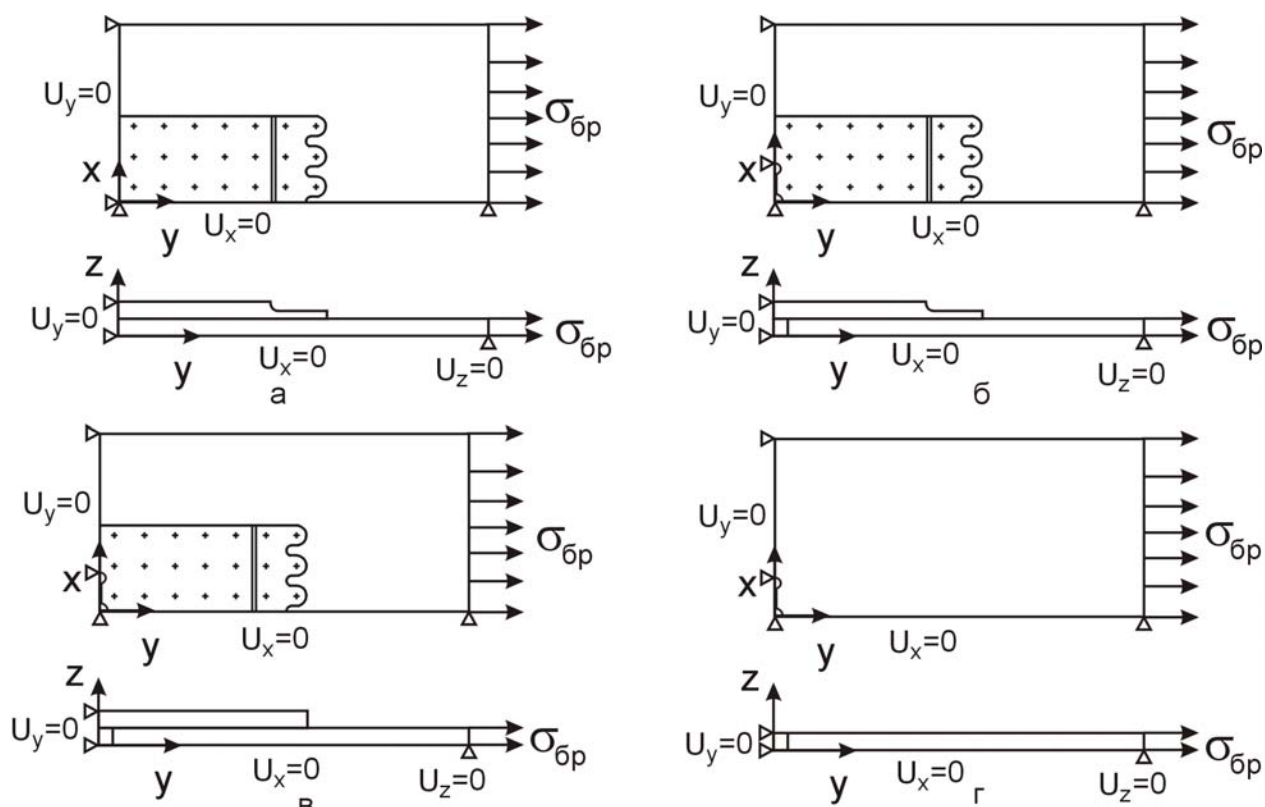


Рис. 3. Расчетная схема рассматриваемых вариантов соединения ремонтной наклейки и пластины

На рис. 4 показана конечно-элементная модель образца пластины с усталостной трещиной и присоединенной к ней ремонтной накладкой.

Целью проведения расчетов является анализ характеристик локального НДС в зонах вероятного усталостного разрушения. Как показывают результаты усталостных испытаний образцов пластин с усталостной трещиной и ремонтной накладкой, можно выделить три зоны вероятного усталостного разрушения: 1) сечение по оси трещины в пластине; 2) сечение по оси крайнего ряда крепежных элементов в пластине; 3) сечение по оси первого ряда крепежных элементов в накладке (см. рис. 5).

В качестве параметров, характеризующих локальное НДС в указанных зонах определены:

- 1) главные растягивающие напряжения  $\sigma_1$ ;
- 2) главные растягивающие деформации  $\varepsilon_1$  (упругая составляющая);
- 3) удельная энергия деформирования  $w_1$ .

На рис. 6 – 11 показан характер распределения перечисленных выше параметров, характеризующих локальное НДС в указанных зонах.

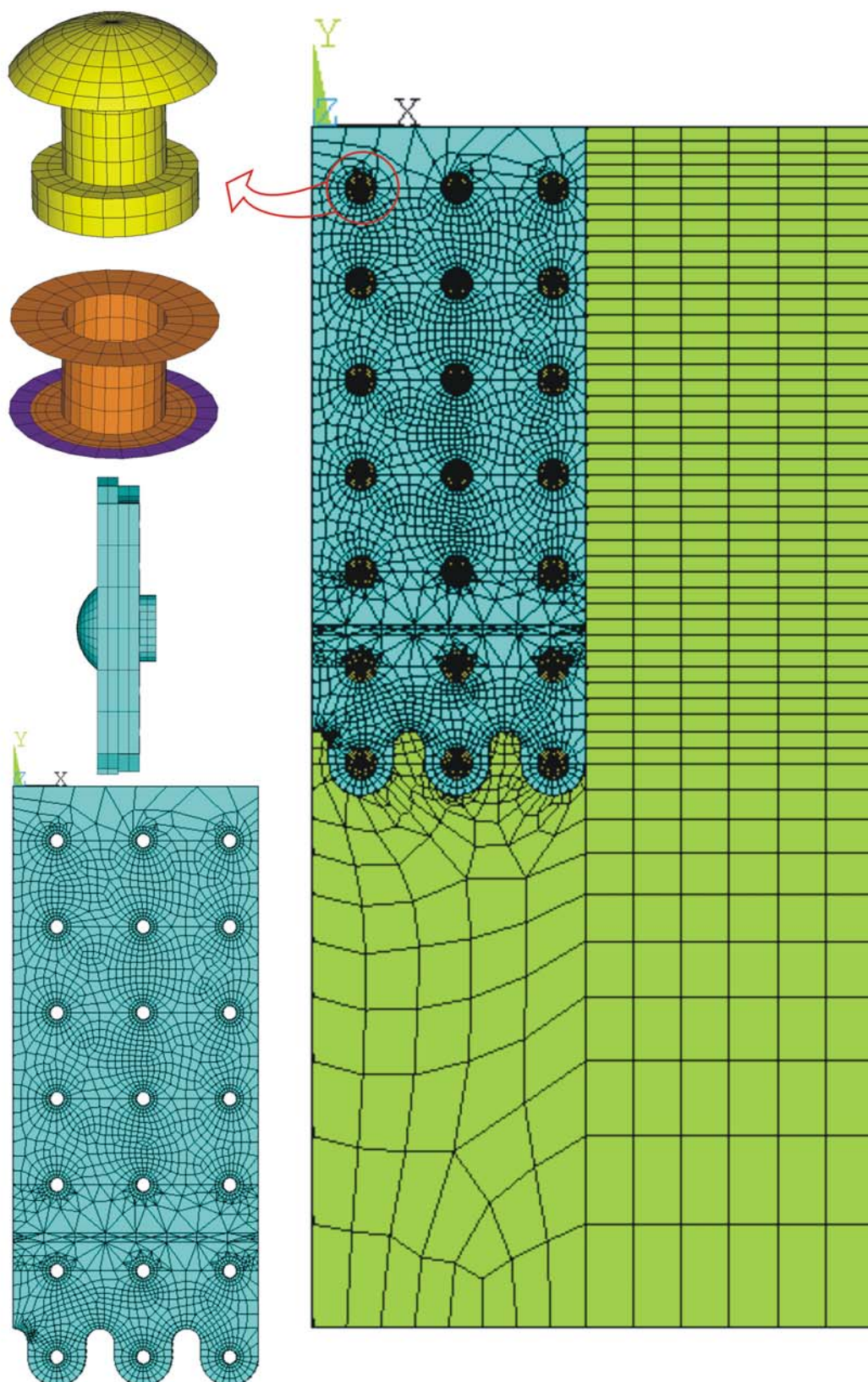


Рис. 4. Конечно-элементная модель пластины с центральной расположенной трещиной и присоединенной к ней ремонтной накладкой



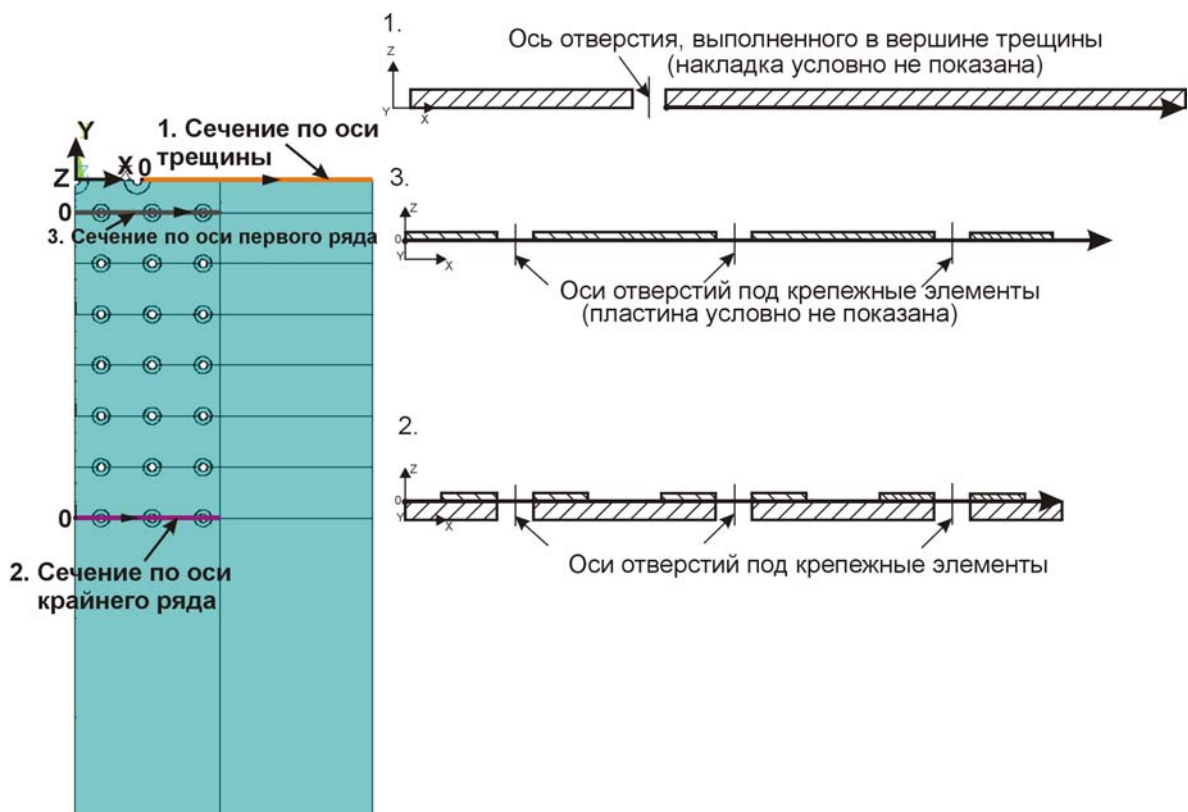


Рис. 5. Схема идентификации путей, вдоль которых строятся графики распределения напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования

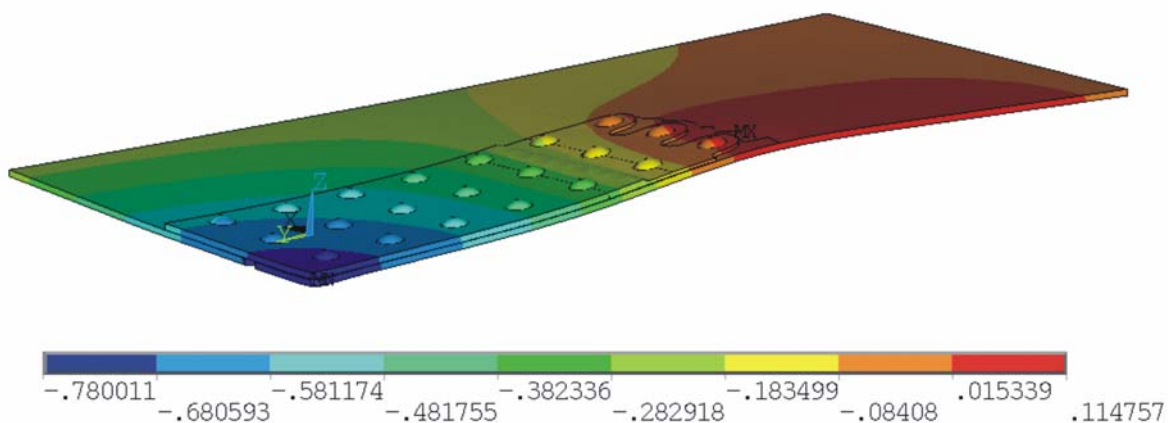


Рис. 6. Характер деформирования элементов соединения ремонтной накладки и пластины с усталостной трещиной

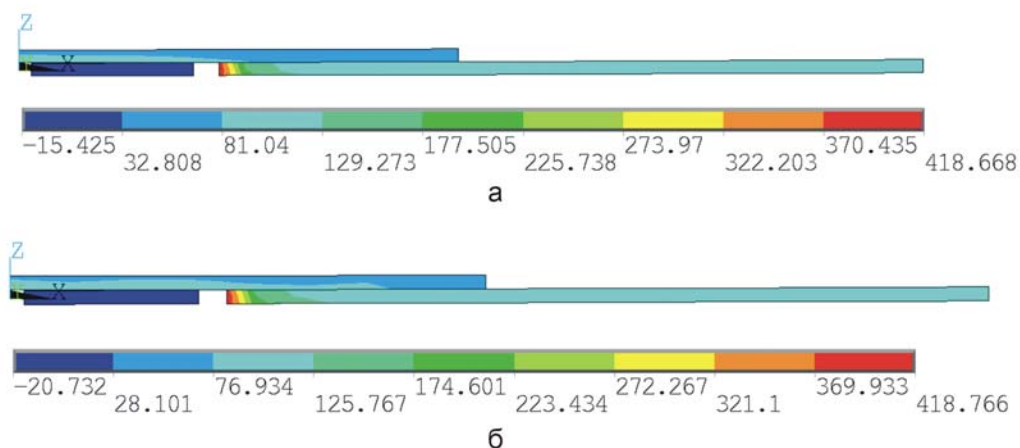


Рис. 7. Характер распределения главных растягивающих напряжений в элементах соединения ремонтной накладки и пластины с усталостной трещиной в сечении по оси трещины при  $\sigma_{бр} = 130$  МПа

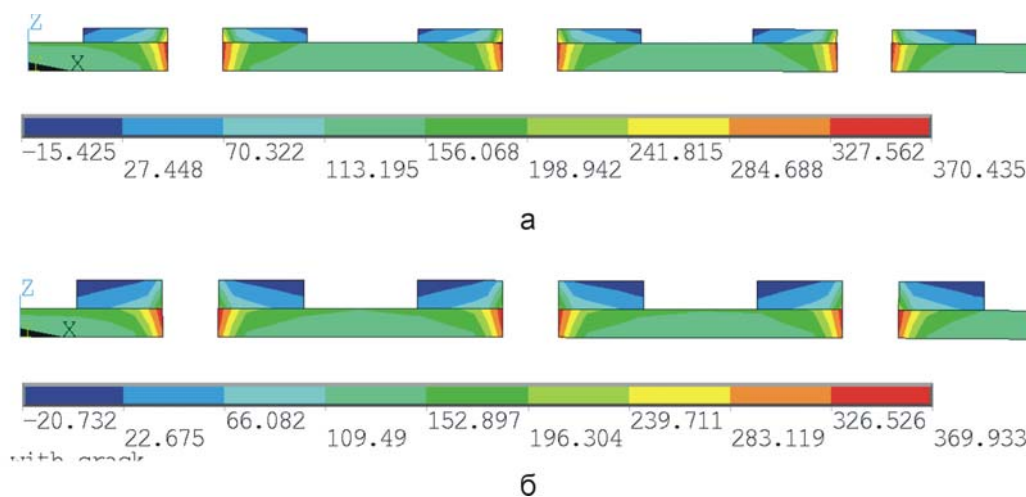


Рис. 8. Характер распределения главных растягивающих напряжений в элементах соединения ремонтной накладки и пластины с усталостной трещиной в сечении по оси крайнего ряда при  $\sigma_{бр} = 130$  МПа

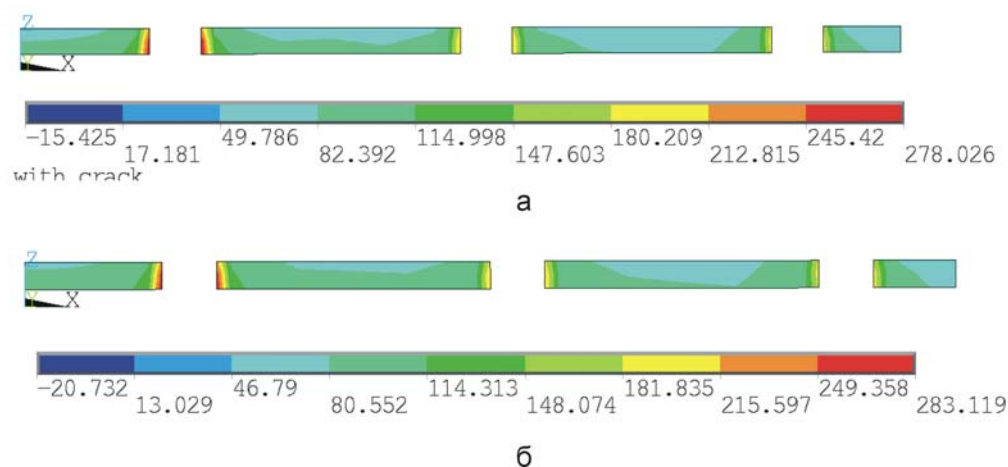


Рис. 9. Характер распределения главных растягивающих напряжений в накладке в сечении по оси первого ряда при  $\sigma_{бр} = 130$  МПа



На рис. 7 - 15 и 19 - 21 приняты следующие обозначения: а – накладка с утонением в зоне крайнего ряда, б – накладка без утонения; 1 -  $\sigma_{бр} = 50$  МПа, 2 -  $\sigma_{бр} = 100$  МПа, 3 -  $\sigma_{бр} = 130$  МПа, 4 -  $\sigma_{бр} = 150$  МПа

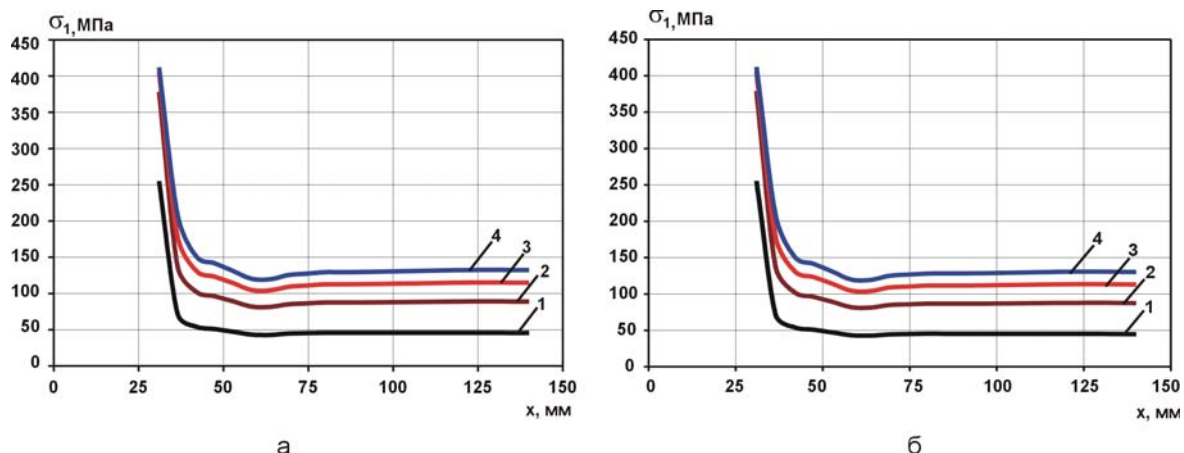


Рис. 10. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальных главных растягивающих напряжений в сечении по оси трещины пластины с усталостной трещиной

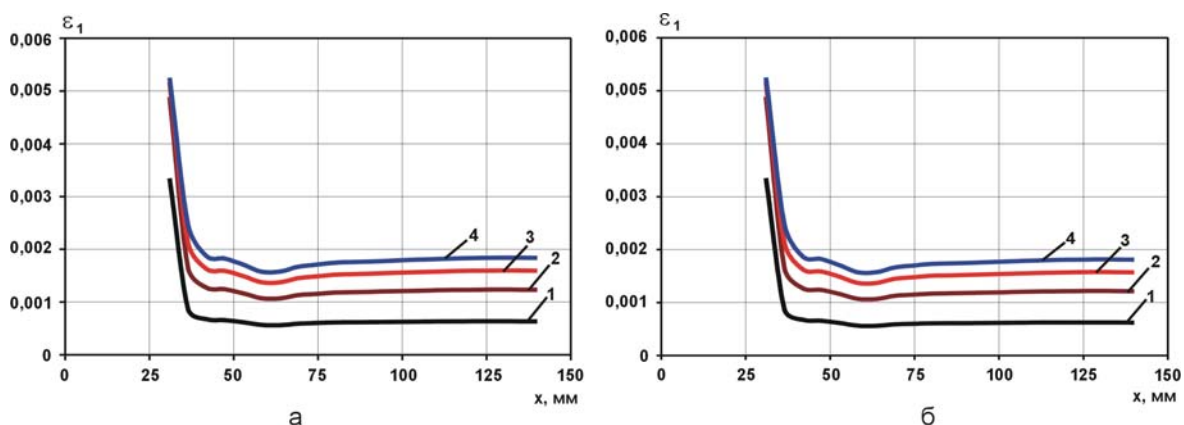


Рис. 11. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальных главных растягивающих упругих деформаций в сечении по оси трещины пластины с усталостной трещиной

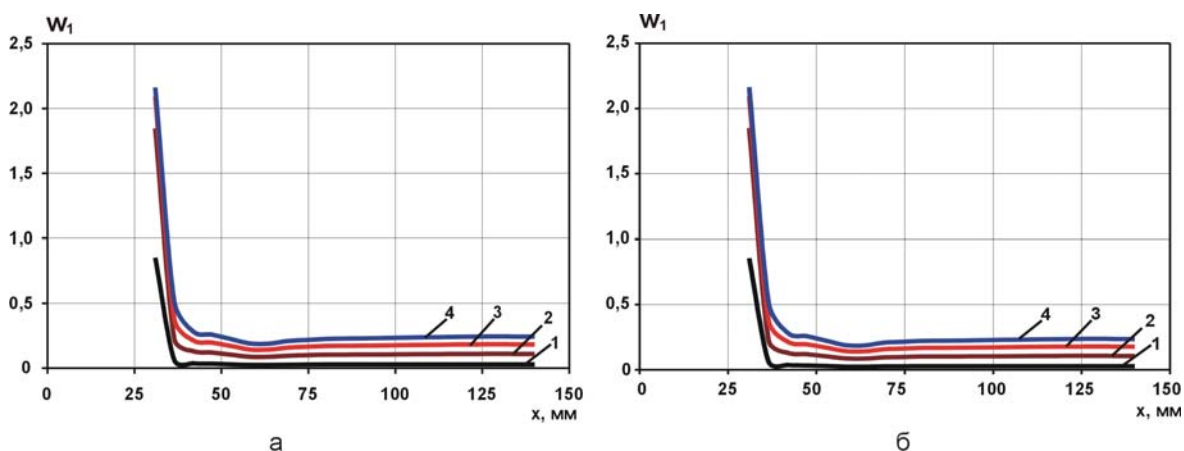


Рис. 12. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальной удельной энергии деформирования в сечении по оси трещины пластины с усталостной трещиной

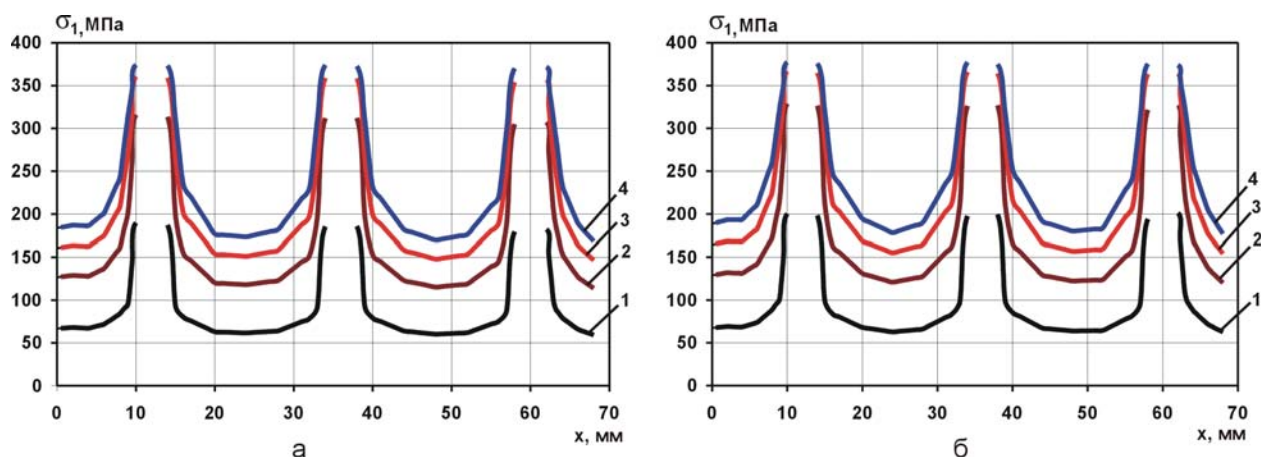


Рис. 13. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальных главных растягивающих напряжений в сечении по оси крайнего ряда пластины с усталостной трещиной

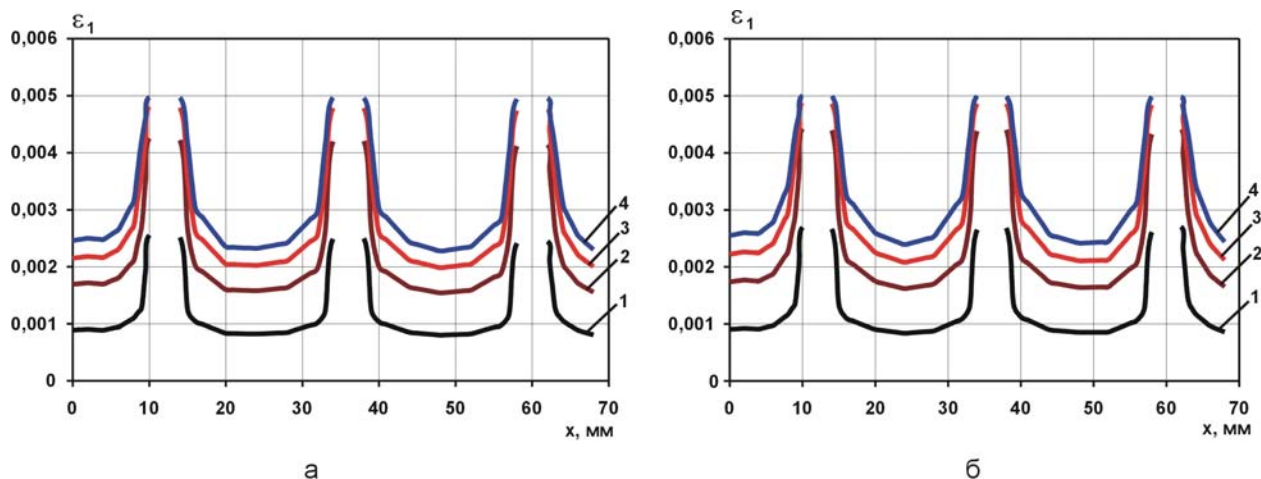


Рис. 14. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальных главных растягивающих упругих деформаций в сечении по оси крайнего ряда пластины с усталостной трещиной:

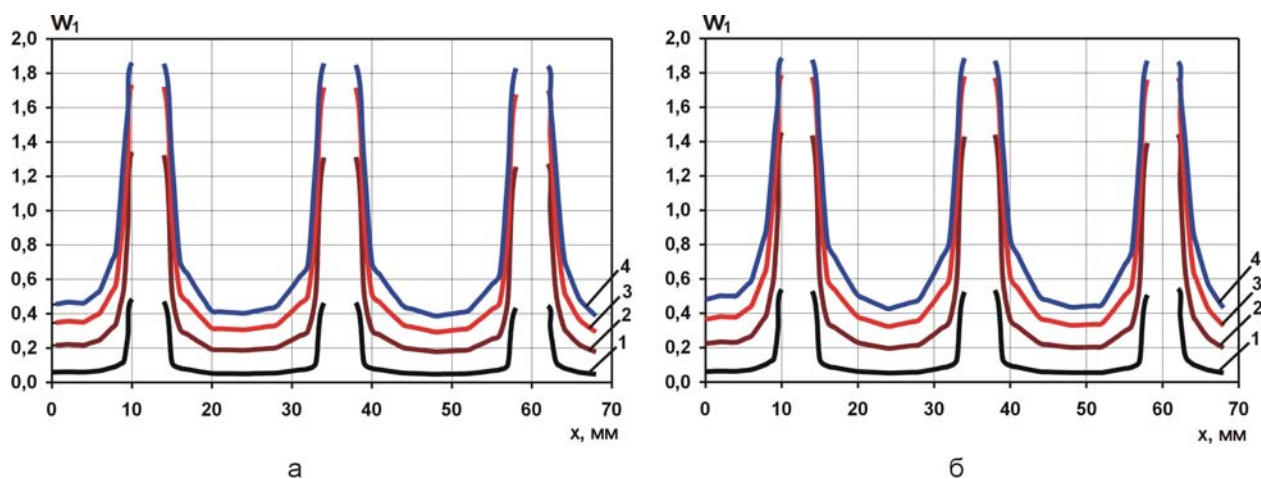


Рис. 15. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальной удельной энергии деформирования в сечении по оси крайнего ряда пластины с усталостной трещиной

Вычисленные параметры локального НДС в сечениях по оси трещины и по оси крайнего ряда приведены к отнулевому циклу нагружения, с помощью формулы Одингга для вычисления максимальных значений отнулевого цикла.

Проанализировано влияние уровня нагружения на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла (рис. 16 – 18).

На рис. 16 - 18 приняты следующие обозначения: 1 – пластина без трещины, 2 – пластина с трещиной длиной 58 мм, в вершине которой выполнены отверстия диаметром 4 мм и накладкой, имеющей утонение в зоне крайних рядов, 3 – пластина с трещиной длиной 58 мм, в вершине которой выполнены отверстия диаметром 4 мм и накладкой без утонения в зоне крайних рядов, 4 – пластина с трещиной длиной 58 мм, в вершине которой выполнены отверстия диаметром 4 мм без накладки; а – сечение по оси трещины, б – сечение по оси крайнего ряда крепежных элементов.

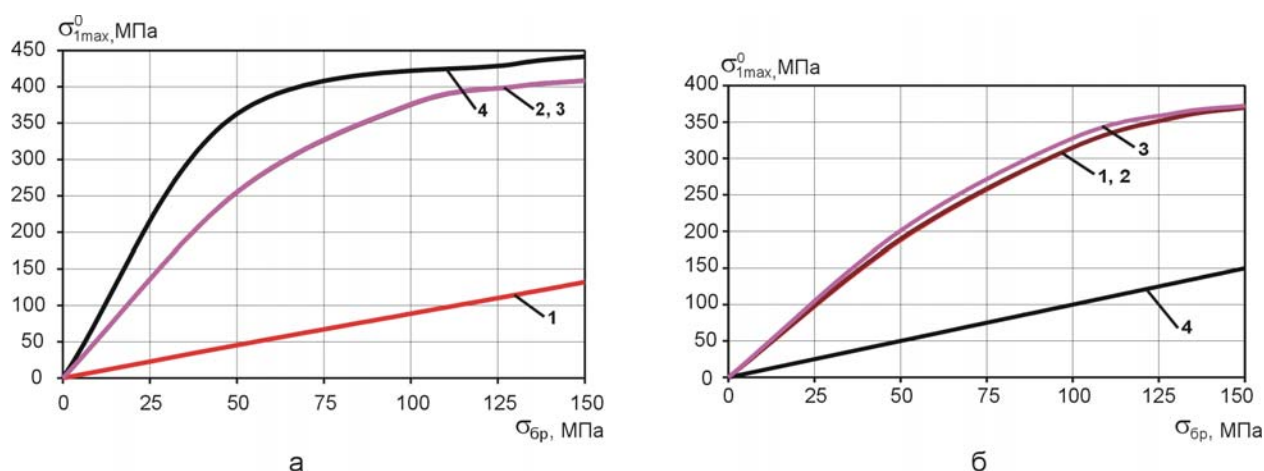


Рис. 16. Влияние уровня нагружения на распределение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине

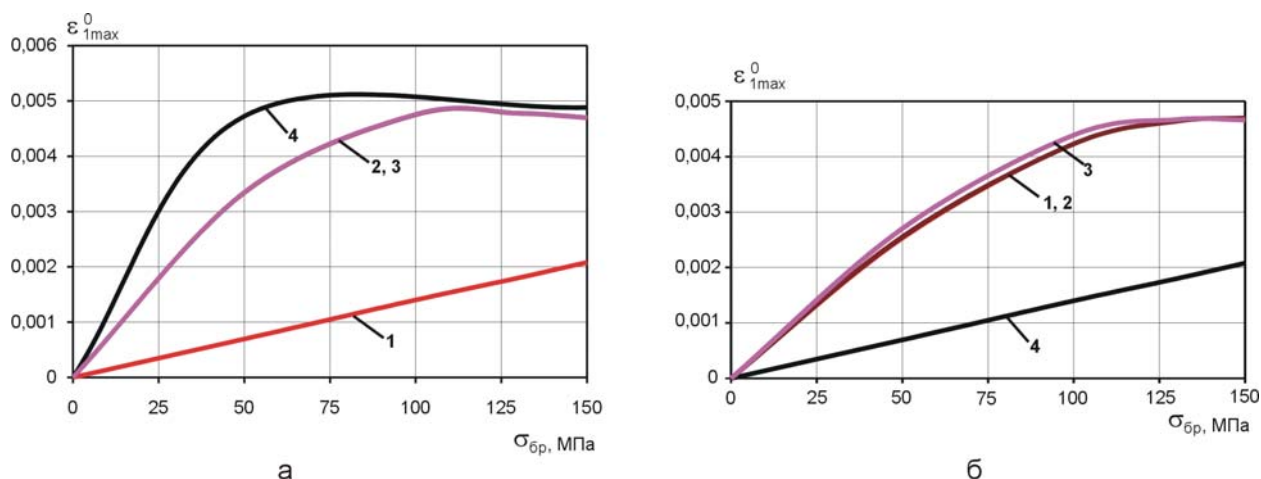


Рис. 17. Влияние уровня нагружения на распределение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине

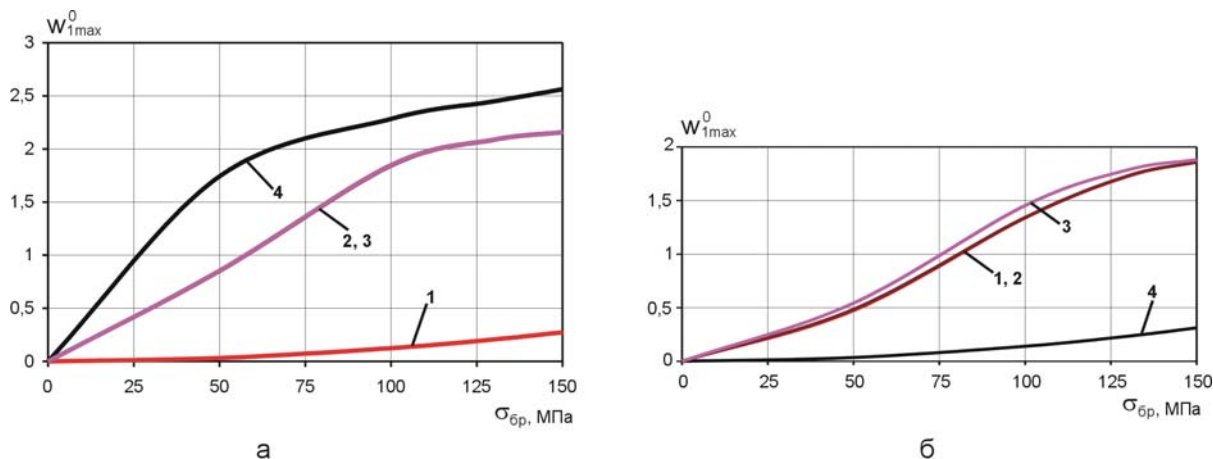


Рис. 18. Влияние уровня нагружения на распределение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине

Исследованы характеристики локального НДС в накладке в сечении по оси первого крепежных элементов, расположенных вблизи усталостной трещины (рис. 19-21).

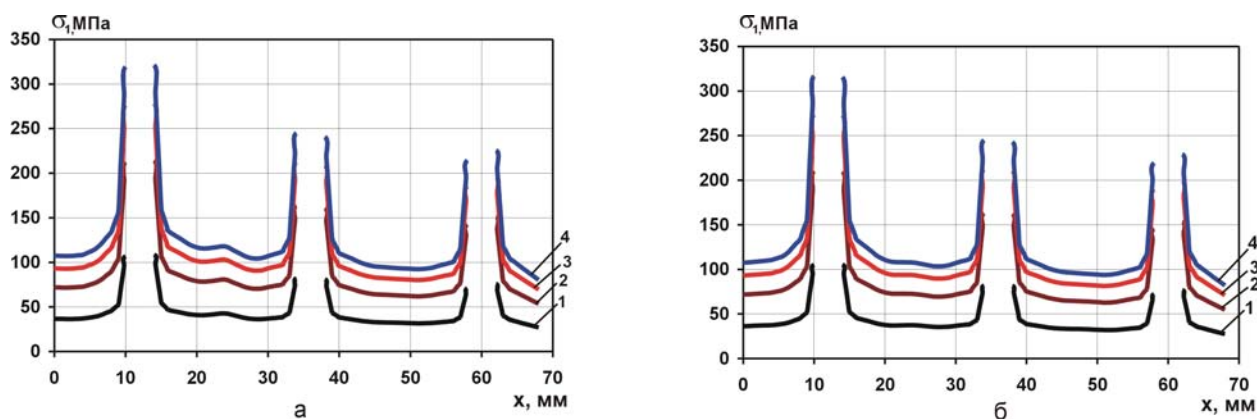


Рис. 19. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальных главных растягивающих напряжений в накладке в сечении по оси крепежных элементов, расположенных в зоне усталостной трещины

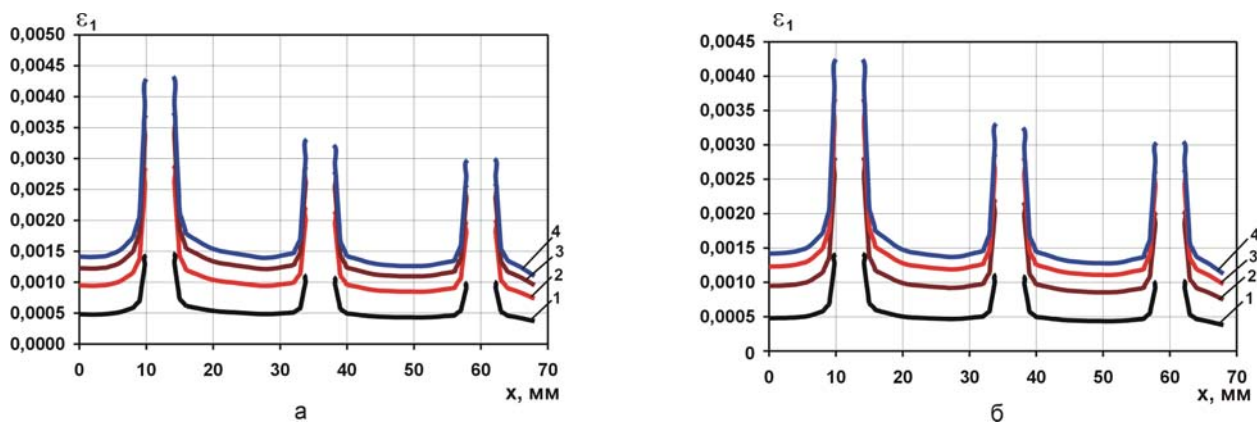


Рис. 20. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальных главных растягивающих упругих деформаций в накладке в сечении по оси крепежных элементов, расположенных в зоне усталостной трещины



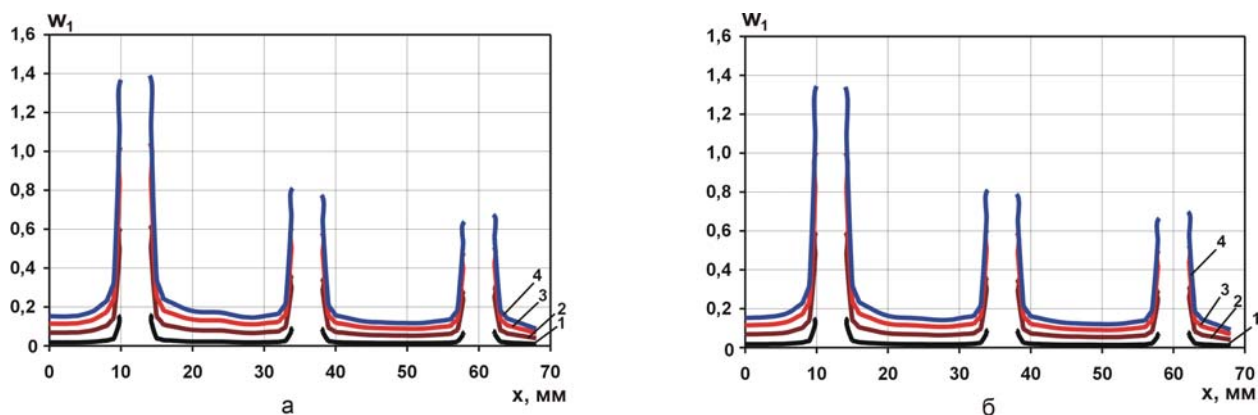


Рис. 21. Влияние уровня нагружения на характер распределения максимальной удельной энергии деформирования в накладке в сечении по оси крепежных элементов, расположенных в зоне усталостной трещины

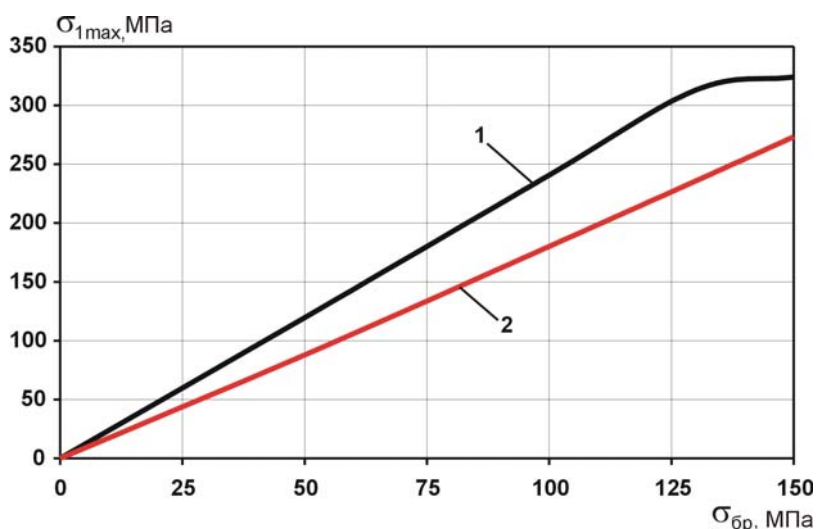


Рис. 22. Влияние уровня нагружения на распределение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в накладке в сечении по оси крайнего ряда крепежных элементов:

1 – накладка с утонением в зоне крайнего ряда; 2 – накладка без утонения

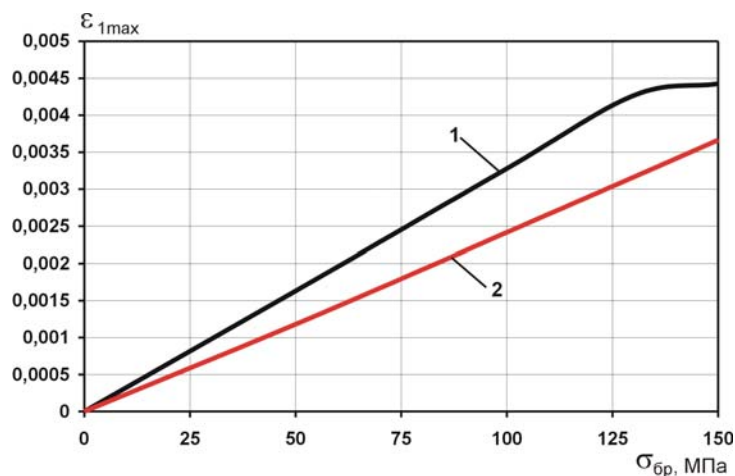


Рис. 23. Влияние уровня нагружения на распределение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в накладке в сечении по оси крайнего ряда крепежных элементов:

1 – накладка с утонением в зоне крайнего ряда; 2 – накладка без утонения

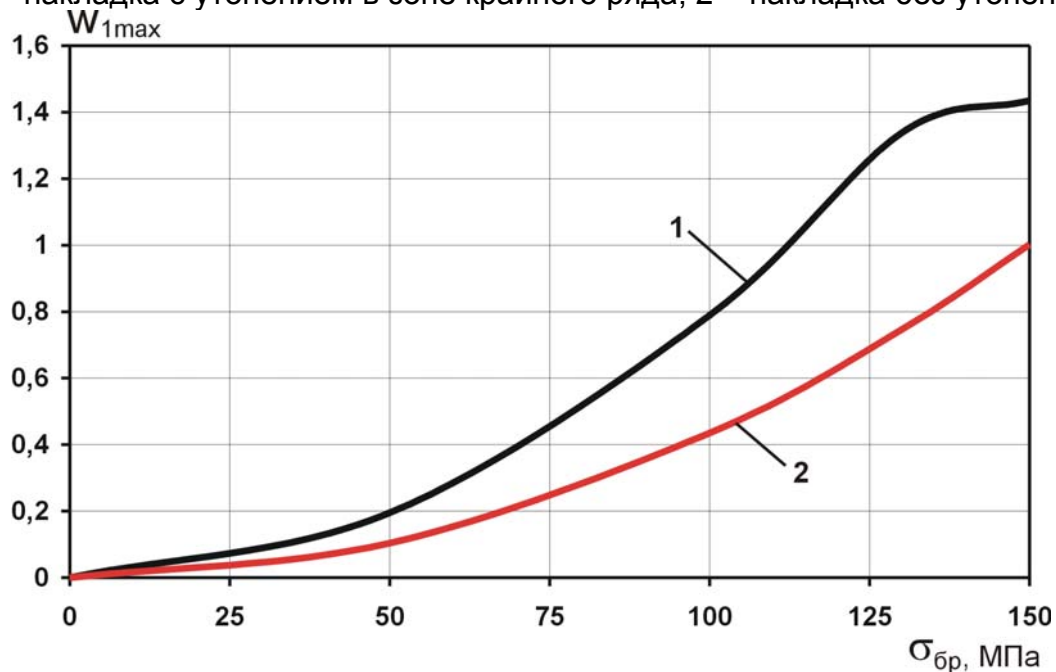


Рис. 24. Влияние уровня нагружения на распределение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в накладке в сечении по оси крайнего ряда крепежных элементов:

1 – накладка с утонением в зоне крайнего ряда; 2 – накладка без утонения

Анализ полученных результатов показывает, что применение ремонтной накладки с утонением в зоне крайних рядов крепежных элементов на величину, равную половине исходной толщины, приводит к увеличению максимальных главных растягивающих напряжений в 1,25-1,56 раза, деформаций – в 1,25-1,33 раза и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла – в 1,4-2 раза соответственно по сравнению с данными значениями для накладки постоянной толщины.

Выполнен расчет распределения усилий между рядами крепежных элементов в пластине с накладкой, имеющей утонение в зоне крайнего ряда без трещины (рис. 26).

Расчет распределения усилий между рядами проводим по формуле:

$$P_{к.эi} = P_{ли} - P_{л(i+1)},$$

где  $i$  – номер ряда (сечения);  $P_{к.эi}$  – нагрузка, передаваемая  $i$ -м рядом крепежных элементов;  $P_{ли}$  – усилие в  $i$ -м сечении пластины.

Величину усилия в  $i$ -м сечении пластины определяли по формуле

$$P_{ли} = \int \sigma_{li} dF_i.$$

Для этого вычисляли среднеинтегральное значение напряжений в заданном сечении пластины.



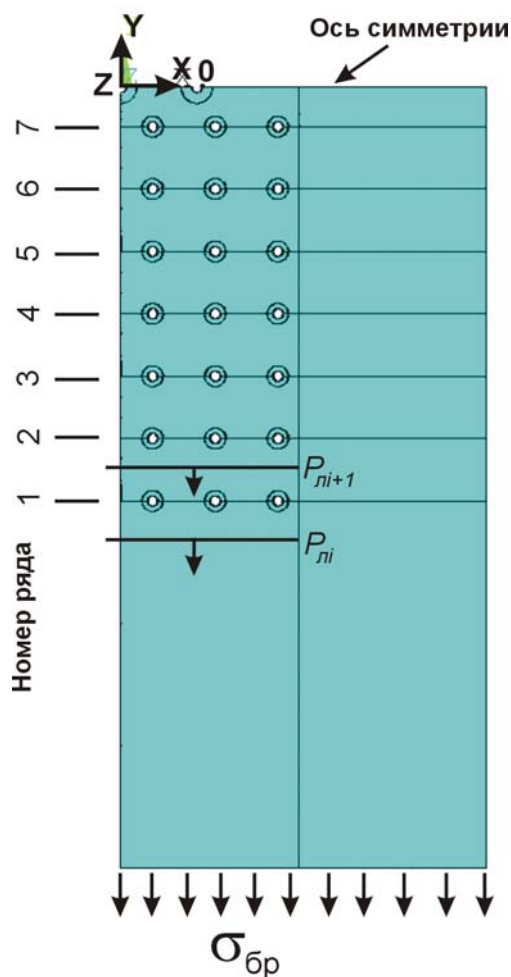


Рис. 25. Схема расчета распределения усилий между рядами крепежных элементов

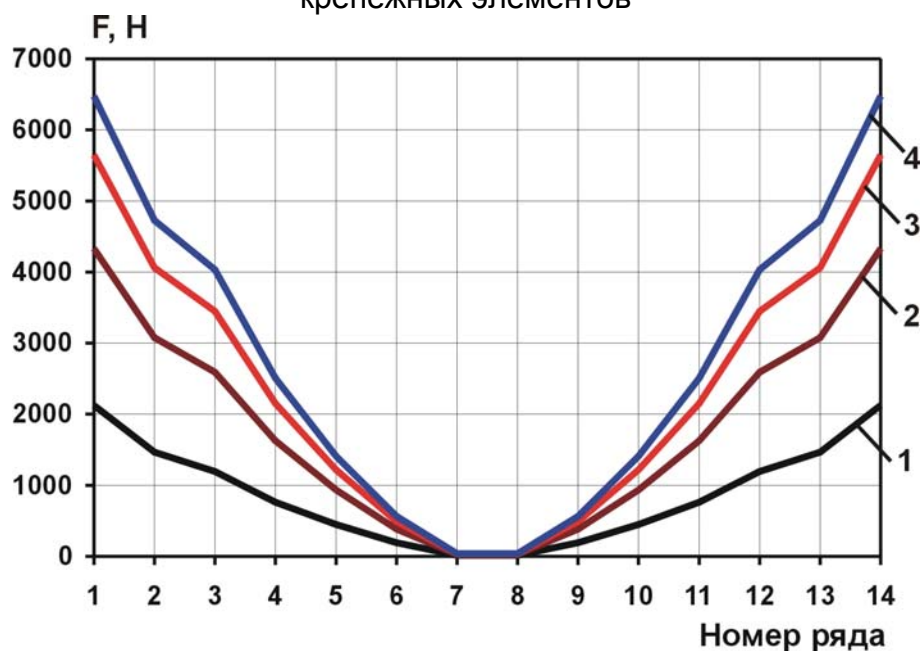


Рис. 26. Влияние уровня нагружения на распределение усилий между рядами крепежных элементов в соединении накладки с пластиной без трещины:  
 1 –  $\sigma_{бр} = 50$  МПа, 2 –  $\sigma_{бр} = 100$  МПа, 3 –  $\sigma_{бр} = 130$  МПа, 4 –  $\sigma_{бр} = 150$  МПа

Анализ полученных результатов показал, что в зонах вероятного усталостного разрушения наблюдается концентрация напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования. Причем в сечении по оси трещины величины максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования больше соответствующих величин в сечении по оси крайнего ряда. Расчеты показали, что геометрия ремонтной накладки оказывает влияние на изменение локального НДС только в зоне крайнего ряда, в сечении по оси трещины не наблюдается существенного изменения характеристик локального НДС для обоих вариантов конструктивного исполнения накладки.

Выводы:

1. Разработан метод анализа локального НДС в элементах соединения ремонтной накладки и пластины с усталостной трещиной.

2. На основе предложенного метода анализа локального НДС проанализирована эффективность применения ремонтных накладок различной конфигурации и способ разгрузки крайних рядов соединения пластина-накладка.

3. В диапазоне растягивающих напряжений в сечении брутто 50...150 МПа величина максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с усталостной трещиной в сечении по оси трещины в 1,10–1,75 раза больше соответствующей величины в сечении по оси крайнего ряда, величина максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине с усталостной трещиной в сечении по оси трещины в 1,14–1,40 раза больше соответствующей величины в сечении по оси крайнего ряда и величина максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с усталостной трещиной в сечении по оси трещины в 1,25–2 раза больше соответствующей величины в сечении по оси крайнего ряда.

4. Установлено, что в накладке в сечении по оси первого ряда крепежных элементов имеет место неравномерность распределения главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования между отверстиями под крепежные элементы, что приводит к неравномерности распределения усилий между крепежными элементами в ряду и концентрации напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования. Центральное отверстие первого ряда в накладке нагружается больше, чем крайние.

5. В диапазоне растягивающих напряжений в сечении брутто 50...150 МПа степень неравномерности максимальных главных растягивающих напряжений в накладке в сечении по оси первого ряда составляет 1,31–1,43, степень неравномерности максимальных главных растягивающих деформаций составляет 1,31–1,45, степень неравномерности максимальной удельной энергии деформирования составляет 1,72–2,09.

11. В процессе деформирования элементов соединения наблюдается локальный изгиб пластины и накладки в зоне их крепления.

12. Крепежные элементы с односторонним подходом, применяемые для крепления ремонтной накладки, установлены по скользящей посадке без натяга и затяжки. В практике возможна установка крепежных элементов с радиальным натягом и осевой затяжкой, а в случае заклепок необходимо учитывать изменение локального НДС после процесса клепки, что является предметом для дальнейших численных исследований.

### Список литературы

1. Гвинтовкин И.Ф. Справочник по ремонту летательных аппаратов. / И.Ф. Гвинтовкин, О.М. Стояненко. – М.: Транспорт, 1977. – 342 с.
2. Ремонт летательных аппаратов учебник для вузов гражданской авиации. / под ред. Н. Л. Голего. – М.: Транспорт, 1977. – 424 с.
3. Справочник по текущему и среднему ремонту авиационной техники / под ред. В. Г. Александрова. – М.: Воениздат, 1975. – 296 с.
4. Столбов В.В. Ремонт самолетов. / В.В. Столбов, Н.В. Музыкин. – Рига: РКВИАВУ, 1954. – 312 с.
5. Карпов Г.Н. Задачи конструкционного торможения трещин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.03. / Г.Н. Карпов; Моск. ин-т хим. машиностроения. – М., 1982. – 34 с.
6. Пат. № 3469305, США, Кл. 29-527, 4, 1969.
7. Гребеников А.Г. Интегрированные способы задержки роста усталостных трещин в тонкостенных конструкциях / А.Г. Гребеников, С.П. Светличный, А.М. Тимченко // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ. – 2002. – Вып. 4(15). – С. 11-21.
8. Гребеников А.Г. Влияние затяжки болтов, установленных в вершинах усталостной трещины, на локальное напряженно-деформированное состояние пластины / А.Г. Гребеников, С.П. Светличный // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 1999. – Вып. 16(3). – С. 134-155.
9. Гребеников А.Г. Влияние радиального натяга болтов на напряженно-деформированное состояние пластины с усталостной трещиной и отверстиями, выполненными по ее длине / А.Г. Гребеников, С.П. Светличный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 1999. – Вып. 3. – С. 39-67.
10. Брок Д. Основы механики разрушения / Д. Брок. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
11. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 347 с.
12. Писаренко Г.С. Исследование явления остановки трещины в пластине зонами поперечного сжатия / Г.С. Писаренко // Проблемы прочности. – 1978. – №1. – С. 8-12.
13. Рудаков А.Г. Эффективность местного глубокого пластического деформирования как способа повышения ресурса деталей самолета: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04/ А.Г. Рудаков; Всесоюз. ин-т авиац. материалов. – М.: 1983. – 28 с.
14. Савинаев И.А. Исследование способов задержки роста усталостных трещин в тонкостенных конструкциях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / И.А. Савинаев; Рижск. ин-т. – Рига.: 1973. – 26 с.
15. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций /– Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.
16. ANSYS Analysis Guide. Element Reference. Element Library. 001087. 4<sup>th</sup> Edition. SAS IP<sup>®</sup>.
17. Авиационные материалы. Т.4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы / под общ. ред. д-ра. техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ. – 1982. – 627 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Буланов  
Национального автодорожного университета, Харьков

Поступила в редакцию 10.03.09