

Майстренко Анатолий Викторович
Maystrenko Anatoly Viktorovich
Ростовский государственный строительный университет
Rostov State University of Civil Engineering
Доцент кафедры/assistant professor
05.23.17 – строительная механика
anatol-maystrenko@yandex.ru

Прогнозирование результатов модернизации крепления образца лонжерона для ресурсных испытаний

Forecasting modernization longeron for mounting the sample life test

Аннотация: Рассматривается силовой режим нагружения лонжерона при ресурсных испытаниях для случая упругого поведения материала. Методом конечно-элементного моделирования определены повышенные напряжения в районе отверстий, являющиеся причинами трещин и разрушений. Проанализирован вариант крепления, уменьшающий концентрацию напряжений.

The Abstract: This work considered the loading mode of spar with life test for the case of an elastic material behavior. Increased tension in the holes area is determined by finite elements method. That tension is the reason of cracks and destruction. Mounting variant is analyzed, which decreases concentration of stress.

Ключевые слова: Метод конечных элементов, Концентрация напряжений, Лонжерон, Ресурсные испытания, Прогнозирование.

Keywords: Finite elements method, Stress concentration, Longeron, Life test, Prediction.

При подтверждении пригодности лонжерона к эксплуатации отдельные его образцы проходят ресурсные испытания. Для крепления образца к установке в нем создаются отверстия, которые являются концентраторами напряжений и причиной разрушений по заделке, а не в рабочей зоне. Исключение нештатного разрушения требует анализа путей снижения напряженно-деформированного состояния в районе отверстий.

Для решения данной проблемы использовались конечно-элементные подходы [1;2;3]. Задача решалась в следующей постановке. Имеется испытательный образец сложной геометрии. Сечение лонжерона такое, как на рис. 1.

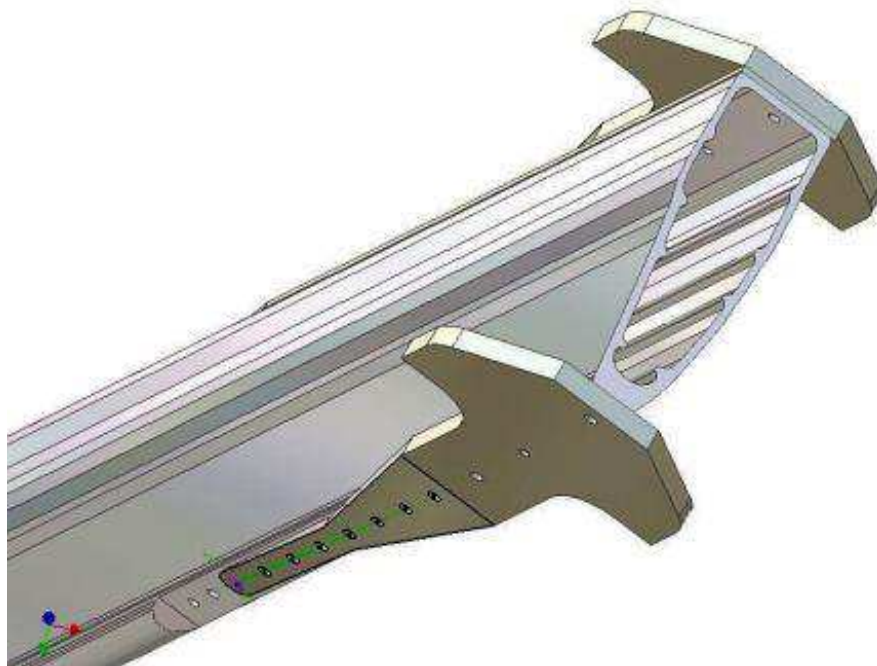


Рис. 1. Внешний вид образца

Материал работает в упругой области, его прочностные характеристики заданы и в процессе испытаний неизменны. Образец нагружается усилиями, приводящими к большим изгибным напряжениям. Требуется определить напряженно-деформированное состояние в зоне отверстий в зависимости от условий нагружения и формы крепежного устройства.

Решение осуществлялось методом конечных элементов в классической постановке. Потенциальная энергия системы при расчете на заданные силы принимала вид

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n P_i Z_i - \sum_{j=1}^m \int_V W_j dV_j \quad (1)$$

где n — число независимых компонентов перемещений; m — количество элементов.

Первый член в (1) является линейной функцией перемещений Z_i . Упругий потенциал W_j является однородной функцией второго порядка относительно Z . Варьирование выражения (1) по Z_i дает n линейных уравнений относительно Z

$$\frac{d\mathcal{E}}{dZ_i} = (i = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

Матрица жесткости произвольного элемента конечных размеров определялась по формуле

$$r = \int_V a' r^{(dV)} a dV, \quad (3)$$

Ее окончательное выражение имело вид

$$r = \int_V (A^{-1})' B' C B A^{-1} dV = (A^{-1})' \left[\int_V B' C B dV \right] A^{-1} \quad (4).$$

Методика расчета реализована программным обеспечением на языке APDL.

Для проверки правильности работы программы она проходила тестирование. В качестве тестовых были выбраны случаи нагружения лонжерона для режима тарировки. Эти нагружения моделировались созданной программой и сравнивались расчетные и практически измеренные значения напряжений. Изгибающие напряжения задавались при тарировке прогибами образца в определенном, заранее заданном месте. Чаще всего эти прогибы принимали значения 3, 6 и 8 мм. Значение растягивающих напряжений для всех случаев оставалось неизменным и равными заданной программой испытаний величине. Проверялись не только напряжения, но и прогибы в контрольных точках. Сводные данные по результатам тестирования модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты тестирования разработанной программы

Прогиб в контрольной точке	Анализируемая величина	Относительная погрешность расчета в %
3 мм	Продольные напряжения	8,34
6 мм	Продольные напряжения	5,19
8 мм	Продольные напряжения	9,39
Среднее значение относительной погрешности		7,64

Видно, что для различных режимов нагружения относительная погрешность определения напряжений в теле лонжерона различна. Средняя их величина составляет 7,7%. Однако для всех случаев эта погрешность не выходит за пределы 10%. На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что моделирование режимов нагружения созданной математической моделью дает удовлетворительное согласие с реальными процессами испытаний и может быть использовано для анализа силовых и деформационных процессов в лонжероне.

Согласно методике расчета объемы лонжерона и крепежных пластин разбивались на тетрагональные конечные элементы, узлы которых показаны на рис. 2 и 3. Их количество в расчетных моделях варьировалось в пределах от 150 до 550 тыс. в зависимости от точности задания анализируемой области.

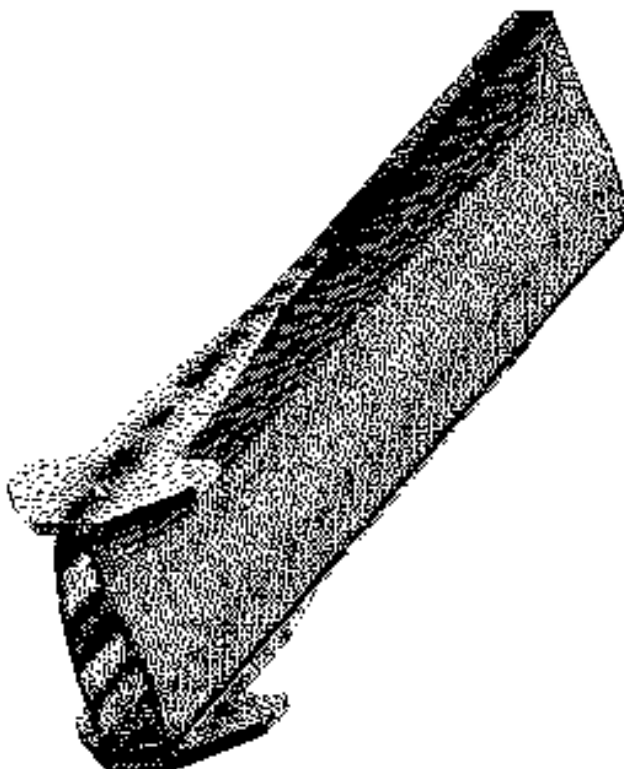


Рис. 2. Конечно-элементная модель сборки

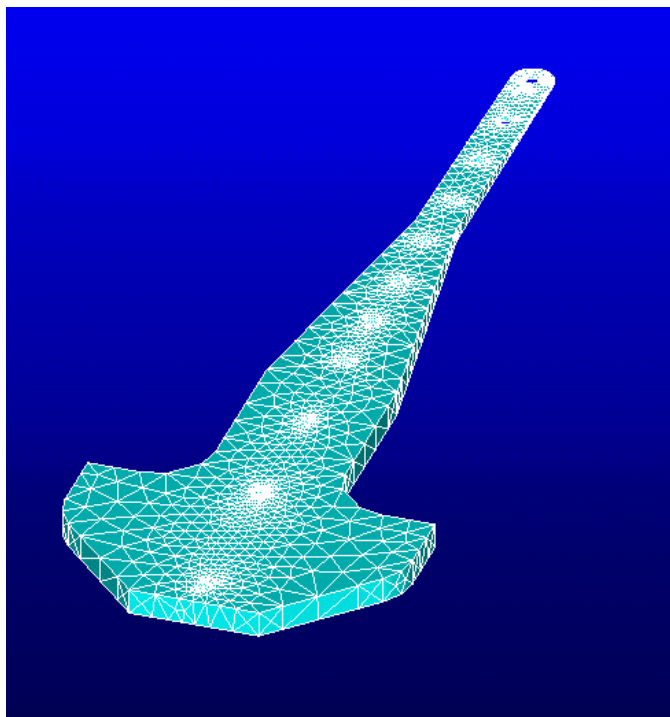


Рис. 3. Конечно-элементная модель крепежной пластины

Алгоритм расчета полей напряжений и деформаций заключался в следующем.

1. Задается геометрия модели.
2. Выбираются прочностные свойства материала.
3. Разбиваются области на конечные элементы.

4. Устанавливается закрепление и прикладываются силовые нагрузки.
5. Задача запускается на решение.
6. Определяется перемещение в каждом расчетном узле.
7. Определяются поля напряжений и деформаций в лонжероне.
8. Результаты расчета в табличной и графической форме выводятся на печать.

В результате исследования определены поля деформаций и напряжений в лонжероне при испытаниях на разных режимах. Определены места появления концентрации напряжений в лонжероне (рис. 4,5,6), приводящие к появлению и развитию трещин (рис. 7).

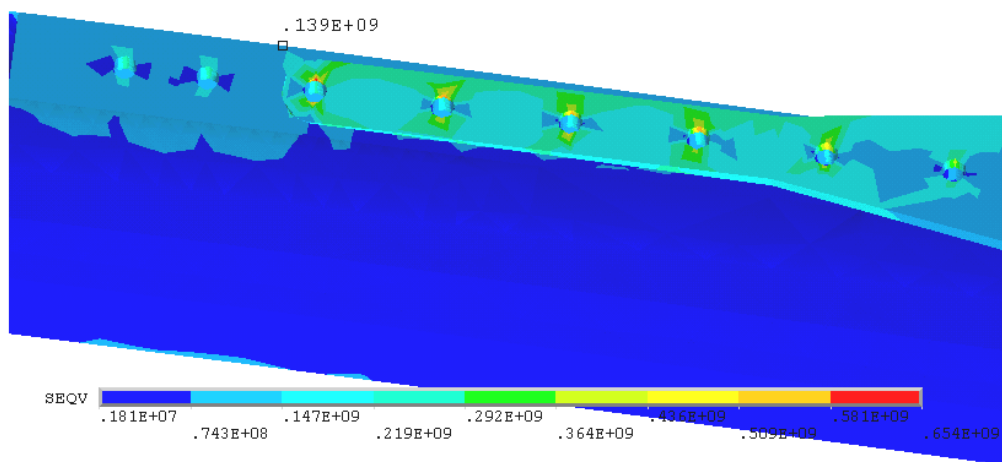


Рис. 4. Распределение по поверхности лонжерона эквивалентных по Мизесу напряжений в Па на втором режиме нагружения в зоне крепления пластины

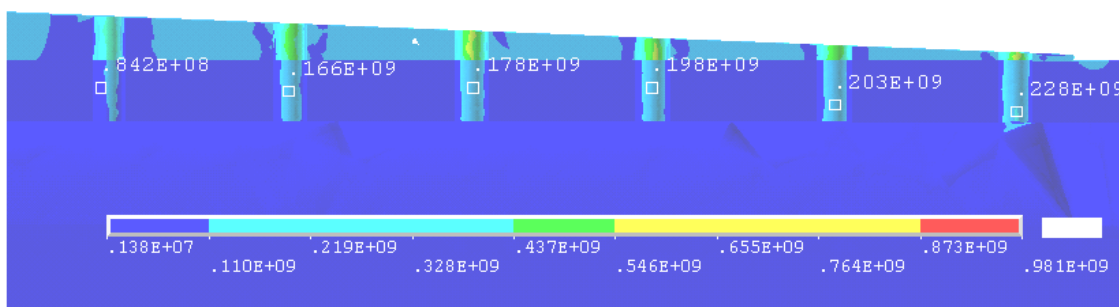


Рис. 5. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в Па по сечению образца в области крепления пластины к лобовой части

Наиболее опасным с точки зрения напряженно-деформированного состояния является первое отверстие. На рис. 5 показан вид сверху этого отверстия.

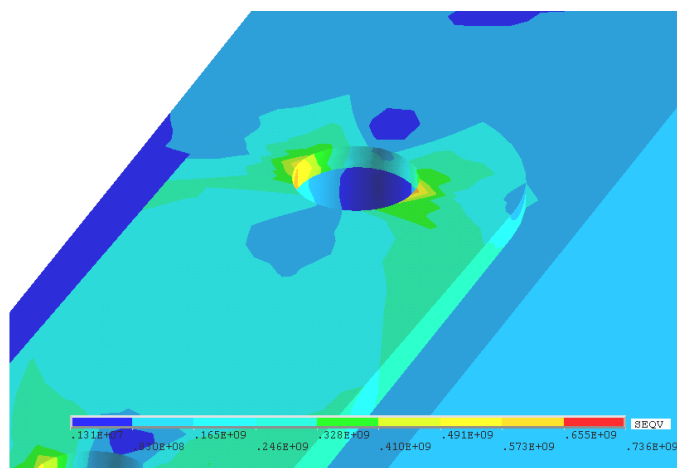


Рис. 6. Эквивалентные по Мизесу напряжения в Па в области первого отверстия для крепления пластины к лонжерону на втором режиме нагружения. Вид сверху

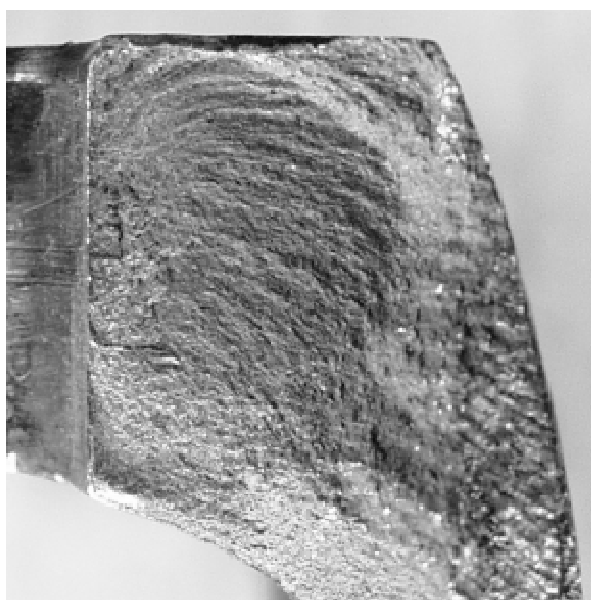


Рис. 7. Вид области развития трещины образца в месте разрушения. Увеличено

Одной из возможных причин разрушения образцов по заделке является неблагоприятное напряженно-деформированное состояние этой области. В результате нагружения образца наибольшие напряжения возникают в местах крепления лонжерона к пластине, в зоне отверстий. С точки зрения прочности наиболее опасным является первое отверстие лонжерона, т.е. крепежное отверстие, наиболее приближенное к середине образца. Напряжения в этом месте достигают величины 230-250 МПа (при максимальных напряжениях в зачетной области 145-180 МПа).

На всех других отверстиях также наблюдается концентрация напряжений. Однако их величина меньше, чем для первого. Так если для первого отверстия на первом режиме напряжение составляет 230 МПа, то для второго – 206 МПа, для третьего – 188 МПа и т.д. Кроме того, сама область повышенных напряжений постепенно сужается при переходе к отверстиям, находящимся ближе к концу образца. Распределение напряжений в отверстиях по окружности таково, что наименьшие их значения лежат на нейтральной плоскости, а наибольшие – в плоскости, перпендикулярной к продольной оси образца.

Для исключения причин разрушения предложено изменение конструкции крепежного устройства образца к стенду за счет его укорочения, смещения в сторону от рабочей зоны испытаний лонжерона, уменьшения количества отверстий. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния в районе отверстий для исходного и модернизированного крепления представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Сравнение значений продольных напряжений для исходного и модернизированного крепления

Номера отверстий	Номер режима испытаний	Значения продольных напряжений в МПа для исходного крепления	Значения продольных напряжений в МПа для модернизированного крепления	Понижение напряжений в %
1	1	230	204	11,30
1	2	239	218	8,79
1	3	251	230	8,37
2	1	206	189	8,25
2	2	210	196	6,67
2	3	223	209	6,28

Предлагаемая модернизация заделки приведет к снижению напряжений лонжерона в зоне отверстий на 10-15% для всех режимов испытаний. Большого снижения достичь не удастся из-за конструктивных особенностей крепежного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майстренко А.В. Остаточные деформации элементов конструкции летательных аппаратов после действия сосредоточенных сил. «Современные проблемы механики сплошной среды». Труды VII Международной конференции, Россия, Ростов-на-Дону, 2001. т.1., стр. 157-159.
2. Майстренко А.В. Оптимизация теплового режима склейки элемента конструкции летательного аппарата. «Современные проблемы механики сплошной среды». Труды VIII Международной конференции, Россия, Ростов-на-Дону, 2002.
3. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц.- М.: Мир, 1989.-190с.