

## Изучение проблем фреттинг-повреждений механического узла

*В.А. Кириллова, Л.Ю. Рыбакова*

*Самарский государственный технический университет*

**Аннотация:** Исследование проблемы фреттинг-повреждения механического узла, скрепленного болтами в трех измерениях, требует анализа полей напряжений в декартовых координатах по углу и радиусу контактных площадок. Это также требует определения положения зарождения и распространения трещины. В данном исследовании мы сосредоточимся на численном моделировании с использованием ANSYS. Результаты, полученные в виде узловых решений, детально показывают положения концентраций напряжений и формирование болтового узла. Контактная поверхность между пластинами (или контактными элементами) характеризуется контактным давлением, сцеплением и зазором. Полученные результаты позволили определить напряжение, вызвавшее зарождение и распространение трещины, а также положение поврежденного участка фреттингом.

**Ключевые слова:** болтовой узел, контактное моделирование, зона повреждения, фреттинг, закон Рамберга-Осгуда, напряжения Фон Мизеса.

**Введение:** Фреттинг-усталость наблюдалась во многих промышленных механических компонентах, таких, как болтовые соединения, крепления дисков лопаток в турбинах, тросы и валы с термоусадкой. С недавних пор по работам над феноменом фреттинга, были реализованы существенные улучшения в испытаниях и стандартизации этого явления, экспериментальных наблюдениях, механизмах повреждения, моделировании, промышленных примерах, а также в использовании покрытий или смазки для сведения к минимуму явления истирания на границе раздела [1-3].

Нормальная контактная нагрузка и относительное смещение являются ключевыми факторами, определяющими фреттинг-износ или фреттинг-усталость [4-5]. Влияние геометрии контактной кромки на фреттинг-усталостное поведение полного контакта изучалось с использованием двумерной упругопластической конечно-элементной модели конфигурации контакта для расчета рисков растрескивания для полного контакта и почти полная контактная геометрия.

В исследовании была разработана трехмерная модель конечных элементов для прогнозирования механического поведения болтовых соединений. Результаты показали, что фреттинг-усталостная долговечность уменьшалась при увеличении объемного напряжения, а также при увеличении предварительного натяга. В данной работе исследуется положение концентрации напряжений, а также напряжений, вызывающих зарождение и распространение трещин при усталостном фреттинге. Кроме того, поврежденная зона фреттинга выявляется по полям деформаций и перемещений с помощью численного моделирования [6-8].

**Конечно-элементное моделирование.** Была создана трехмерная модель конструкции с соответствующими размерами с использованием ПК ANSYS для определения и проведения анализа поля напряжений в зоне контакта

**Материал.** Материал, используемый для моделирования плоского компонента двойного соединения внахлестку, представляет собой алюминиевый сплав 7075-T6. Материал для болта - высокопрочная и высококачественная легированная сталь (стальной болт AJAX класс 8.8 и стальной болт UNBRAKO класс 12.8). Типичные модуль Юнга и коэффициент Пуассона для этого материала составляют 210 000 МПа и 0,3 соответственно.

Предполагалось, что поведение материалов (алюминиевый сплав 7075-T6), используемых в этом исследовании, следует закону Рамберга-Осгуда.

Закон Рамберга-Осгуда [9]:

$$\sigma = E \varepsilon_e + K \varepsilon_p^n,$$

где  $\sigma$  – предел текучести;  $E$  – модуль упругости;  $\varepsilon_e, \varepsilon_p^n$  – компоненты нормальных и касательных деформаций;  $K$  – коэффициент прочности.

**Геометрия модели.** На рис.1 представлена геометрия болтового соединения, рассмотренного в этом численном анализе.

---

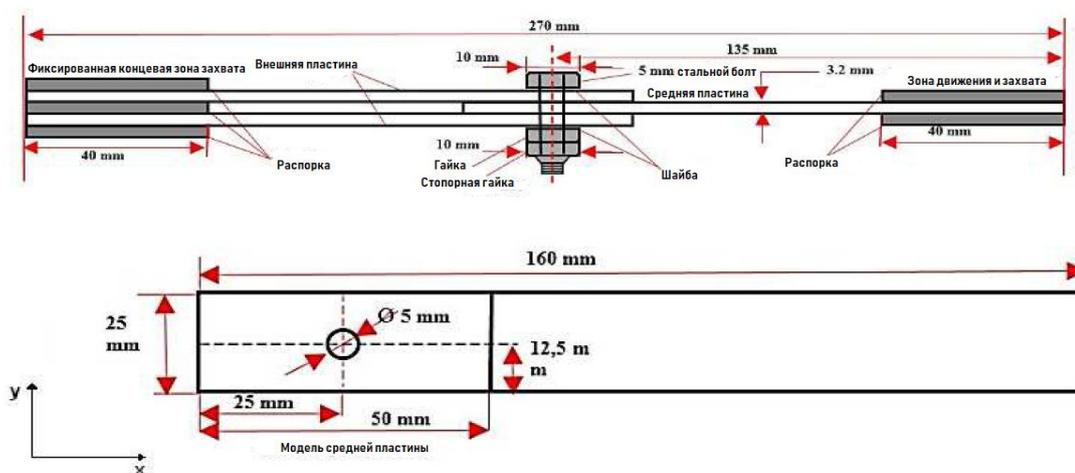


Рис. 1. - Геометрия соединения внахлестку из алюминиевого сплава 7075-T6

Детали конечно-элементной модели и сборочной сетки на механическом соединении представлены на рис.2.



Рис. 2. - Детальная модель из конечных элементов: механического узла

Теория добавочной пластичности введена в моделирование нелинейности материала (упруго - пластический анализ). В качестве подхода к решению нелинейных уравнений с помощью конечных элементов используется итерационный метод Ньютона–Рафсона [10].

**Стресс-анализ.** Полярная координата выбрана для моделирования, чтобы хорошо определить различные положения и ориентации в зоне контакта.

Декартова координата:  $-25 \leq x \leq 25$  мм, и  $-12.5 \leq y \leq 12.5$

Заметим, что величина этого напряжения  $\sigma_{von Mises} = 269.31$  МПа постоянна, а его распределение одинаково по всей поверхности контактной площадки, поэтому оно не локализовано в определенном положении между краем отверстия и краем контактной площадки.

### Результаты и обсуждение

**Распределение напряжений в зоне контакта.** Эти результаты не могут точно предсказать положение начала. Следовательно, по результатам можно найти значение напряжения для локализации места зарождения трещины в зоне контакта. Был проведен детальный анализ каждой составляющей напряжения между отверстием и краями зоны контакта в численной модели с целью анализа совместное влияние момента затяжки  $\theta = 106,6^\circ$  и циклической нагрузки ( $F=12$  кН) на распределение поля напряжений и правильное определение места зарождения трещины в зоне контакта. Рассмотрим распределение касательных напряжений в зоне контакта, представленных на рис.3, 4.

Из рис.3, 4 видно, что знак всех составляющих напряжения по лучу ( $\sigma_{xy}$ ;  $\sigma_{yz}$ ;  $\sigma_{xz}$ ), приподнятый между краем отверстия и край контактной площадки положительный. Напряжения ( $\sigma_{xy}$ ;  $\sigma_{yz}$ ) принимают постоянные значения  $\sigma_{xy} = 200$  МПа и  $\sigma_{yz} = 95$  МПа независимо от значения луча. Напряжение  $\sigma_{xz}$  принимает максимальное значение  $\sigma_{xz} = 247$  МПа на краю отверстия  $r = 2,5$  мм и уменьшается до при  $r = 7,5$  мм. Затем она увеличивается до максимального значения  $\sigma_{xz} = 248$  МПа на краю контактной площадки  $r = 12,5$  мм.

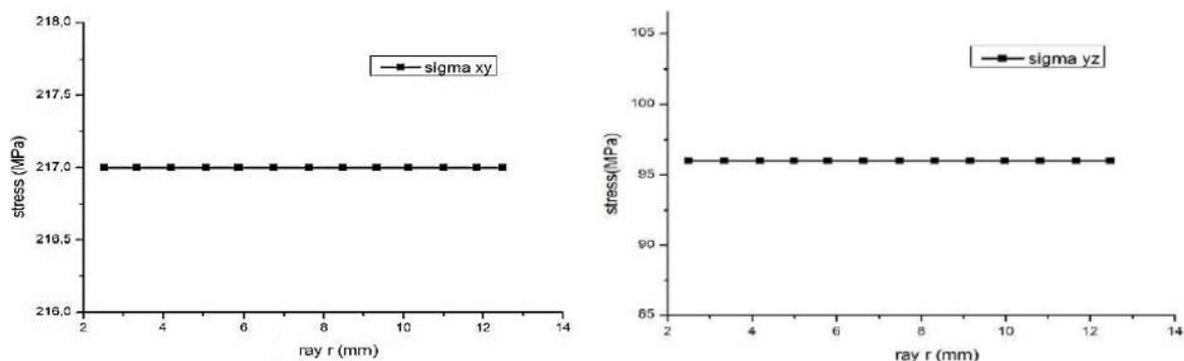


Рис. 3. - Распределение касательного напряжения в зоне контакта  $\sigma_{xy} =$

$$f(r, \theta); \sigma_{yz} = f(r, \theta)$$

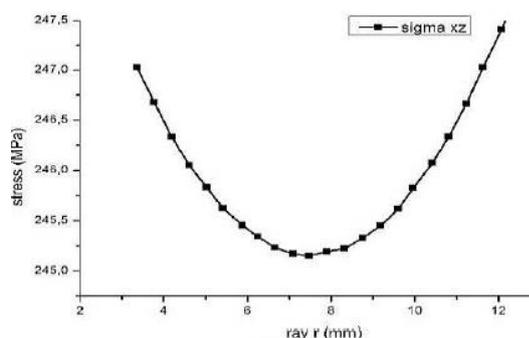


Рис. 4. - Распределение касательного напряжения в зоне контакта

$$\sigma_{xz} = f(r, \theta)$$

**Изо-значение распределения напряжения в контакте.** Чтения этих графиков рис.5, 6 указывает на то, что знак всех напряжений по углу ( $\sigma_{xy}$ ;  $\sigma_{yz}$ ;  $\sigma_{xz}$ ), обнаруженных между край, а край контактной площадки положителен. Каждое напряжение ( $\sigma_{xy}$ ;  $\sigma_{yz}$ ) является постоянным независимо от  $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ , а напряжение ( $\sigma_{xz}$ ) меняются в зависимости от угла.

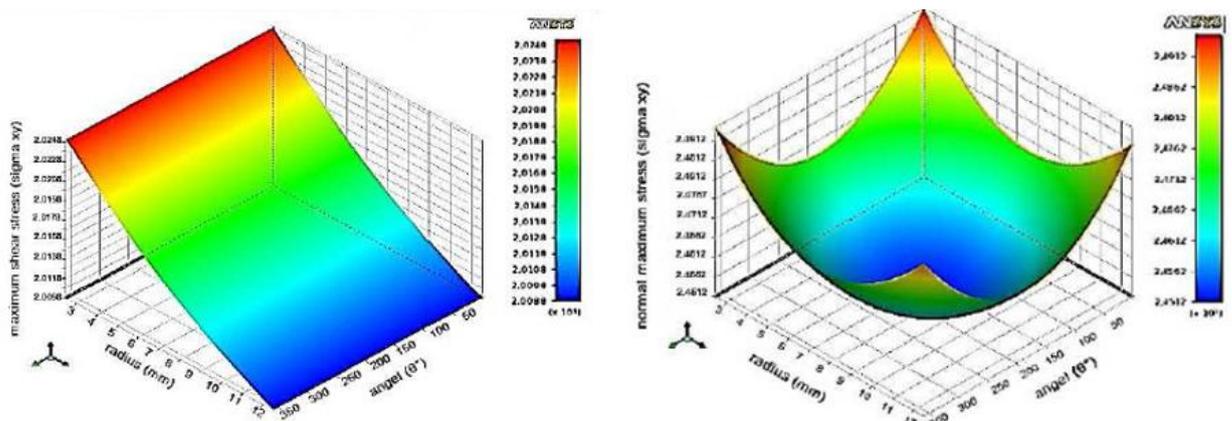


Рис. 5. - Изо-значения распределения касательного напряжения в зоне контакта  $\sigma_{xy} = f(r, \theta)$ ;  $\sigma_{yz} = f(r, \theta)$

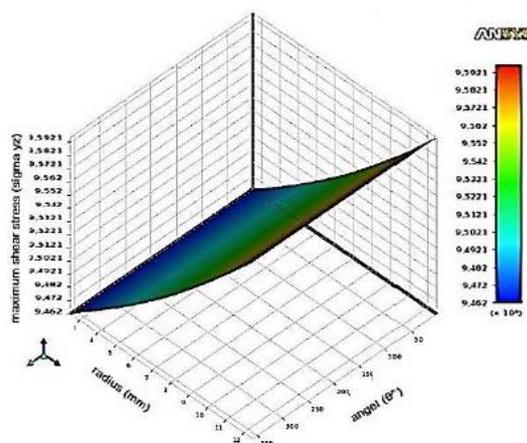


Рис. 6. - Изо-величины распределения касательного напряжения в зоне контакта  $\sigma_{xz} = f(r, \theta)$

Однако напряжение сдвига  $\sigma_{xz}$  принимает минимальное значение = 247 МПа для  $\theta = 178,81^\circ$  при  $180^\circ$  и непрерывно увеличивается до максимального значения  $\sigma_{xz} = 248$  МПа для  $\theta = 0^\circ$ . Можно заметить, что поле напряжений в зависимости от направления циклической нагрузки принимает значительную величину.

## Заключение

Численное моделирование, выполненное в 3D, позволяет описать реальное поведение болтового соединения при фреттинг-усталости. Полученные результаты показывают, что момент затяжки играет важную роль в передаче нагрузки.

На распределение поля напряжений влияют несколько параметров, которые можно резюмировать ниже:

- Технологические параметры, связанные с конструкцией.
- Числовые параметры, представленные количеством элементов и шагом времени вычисления.
- Детали с высокой концентрацией напряжений фон Мизеса, как правило, находятся в крепежных деталях и дорожках трения, вызывая механические явления (трещины, износ, разрыв... и т.д.).
- Интенсивность крутящего момента вызывает увеличение эквивалентных напряжений фон Мизеса и увеличение касательных напряжений, а также увеличение нормальных напряжений в пластинах.
- Напряжения фон Мизеса в плитах заметно увеличиваются, когда поперечная циклическая нагрузка и крутящий момент сочетаются.

## Литература

1. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. 272 с.
2. Семин М.И., Стреляев Д.В. Расчеты соединений элементов конструкций из композитных материалов на прочность и долговечность. М.: Латмэс, 1996. 288 с.

3. Петухов А.Н. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов с учётом влияния эксплуатационных повреждений фреттингом. Механическая усталость металлов. Киев: Наукова Думка, 1983. С. 381-386.
4. Гура Г.С. Качение тел с трением. Фреттинг: монография. Сочи: Дория, 2009. 294 с.
5. Гельфанд М.П., Ципенюк Я.И. Сборка резьбовых соединений. М.: Машиностроение, 1978. 109 с.
6. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые соединения. М.: Машиностроение, 1973. 256 с.
7. Stolarski T.A. Rolling contacts. London: Professional Engineering Publishing Limited. 2000. 446 p.
8. Isaev M.S. Applications of Finite Element Analysis in Structural Engineering. Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering. 2007. pp. 26-58.
9. Лавыгин Д.С., Леонтьев В.Л. Алгоритм смешанного метода конечных элементов решения задач теории отказов // Инженерный вестник Дона, 2013. №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910)
10. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов // Инженерный вестник Дона. 2019. №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768)

### References

1. Golego N.L., Aljab'ev A.Ja., Shevelja V.V. Fretting-korroziya metallovo. [Fretting-corrosion of metals]. Kiev: Tehnika, 1974. 272 p.

2. Semin M.I., Strelyayev D.V. Raschety soyedineniy elementov konstruktsiy iz kompozitnykh materialov na prochnost i dolgovechnost. [Calculations of joints of structural elements made of composite materials for strength and durability]. M.: Latmes. 1996. 288 p.

3. Petuhov A.N. Prognozirovanie harakteristik soprotivleniya ustalosti konstrukcionnykh materialov s uchjotom vlijaniya jekspluatacionnykh povrezhdenij frettingom. Mehanicheskaja ustalost' metallov. [Prediction of fatigue resistance characteristics of structural materials taking into account the impact of operational damage by fretting. Mechanical fatigue of metals]. Kiev: Naukova Dumka, 1983. pp. 381-386.

4. Gura G.S. Kachenie tel s treniem. Fretting: monografija. [Rolling of bodies with friction. Fretting: a monograph]. Sochi: Dorija, 2009. 294 p.

5. Gel'fand M.P., Cipenjuk Ja.I. Sborka rez'bovyh soedinenij. [Assembly of threaded connections]. M.: Mashinostroenie, 1978. 109 p.

6. Birger I.A., Iosilevich G.B. Rez'bovyje soedinenija. [Threaded connections]. M.: Mashinostroenie, 1973. 256 p.

7. Stolarski T.A. Rolling contacts. London: Professional Engineering Publishing Limited. 2000. 446 p.

8. Isaev M.S. Applications of Finite Element Analysis in Structural Engineering. Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering. 2007. pp. 26-58.

9. Lavygin D.S., Leontev V.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910)

10. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768)

---