

УДК 621.812

DOI 10.22213/2410-9304-2017-4-12-15

*Ю. В. Турыгин, доктор технических наук, профессор**А. А. Якупов, аспирант**ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФРЕТТИНГА В СОЕДИНЕНИЯХ С НАТЯГОМ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ИЗГИБОМ С ВРАЩЕНИЕМ

*Рассмотрены причины возникновения фреттинга в условиях плотного контакта деталей на примере соединения с натягом. Большое количество такого рода соединений, используемых в машиностроении, испытывают переменные нагрузки. К таким типам нагрузок можно отнести пульсирующие и ударные, стремящиеся сдвинуть соединяемые детали относительно друг друга; скручивающие, которые возникают под действием крутильных колебаний, и способные вызвать окружное смещение сопряженных элементов. Рассмотрены условия появления и некоторые разновидности разрушений, появляющихся в контактирующих деталях в результате фреттинг-износа. Например, фреттинг, возникший в месте посадки наружного кольца подшипника в корпусную деталь. Причиной данного разрушения явились микроперемещения (относительные движения контактирующих деталей), возникшие во время работы узла. Такие разрушения неблагоприятно влияют на распределение нагрузки в подшипнике, продукты же износа будут служить как абразивные элементы, что также плохо отразится на работе детали.*

*Сделан обзор работ, в которых предпринимались попытки решить данный вопрос методом конечных элементов, например в программном комплексе ANSYS. В проанализированном примере при моделировании решалась задача для трех состояний: сцепления, скольжения и раскрытия стыка.*

**Ключевые слова:** фреттинг, фреттинг-коррозия, соединение с натягом, изгиб, вращение, метод конечных элементов (МКЭ).

Фреттинг-коррозия – разновидность разрушений на поверхности металла, возникающая в местах контакта при микроперемещениях деталей друг относительно друга. Сам по себе термин фреттинг означает колебательное относительное движение, возникающее между контактирующими поверхностями [1]. Как пишет Г. Улиг [2]: «Фреттинг-коррозия возникает вследствие малых вибрационных смещений контактных поверхностей друг относительно друга, если одна из них или обе металлические. Обычно коррозия этого типа сопровождается появлением питтингов на контактирующих поверхностях. Оксиды и продукты истирания заполняют питтинги так, что они становятся заметны только после удаления этих продуктов».

На рис. 1 изображено кольцо подшипника с явными разрушениями поверхности от фреттинга. Фреттинг возник в месте посадки наружного кольца в корпусную деталь. Причиной послужили микроперемещения (относительные движения контактирующих деталей), возникшие во время работы узла. Такие разрушения неблагоприятно влияют на распределение нагрузки в подшипнике, продукты же износа будут служить как абразивные элементы, что также плохо отразится на работе подшипника.

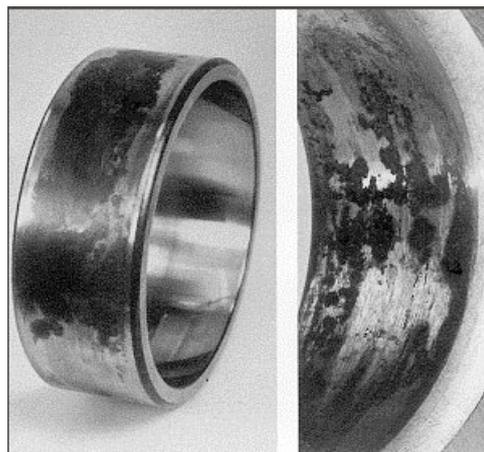


Рис. 1. Разрушения от фреттинга на поверхности кольца подшипника

Фреттинг возникает, как правило, в таких деталях, как подшипники, муфты, проволочные канаты; в соединениях с натягом, заклепочных и штифтовых соединениях; появляется при транспортировке металлических листов и контейнеров; в электрических контактах. Во всех вышеперечисленных примерах, кроме последнего, именно фреттинг служит причиной образования коррозионных разрушений. Основными же причинами микроперемещений являются переменные нагрузки, которые неизбежны в процессе работы или в процессе транспортировки, в случае с металлическими листами и контейнерами.

Рассмотрим причины возникновения вибраций, а соответственно, и фреттинга при условиях плотного контакта деталей, на примере соединения с натягом. Большое количество такого рода соединений, используемых в машиностроении, испытывают переменные нагрузки. К таким типам нагрузок можно отнести пульсирующие и ударные, стремящиеся сдвинуть соединяемые детали относительно друг друга; скручивающие, которые возникают под действием крутильных

колебаний и способные вызвать окружное смещение сопряженных элементов. Большинство соединений с натягом испытывают переменный изгиб (чистый, консольный, комбинированный, плоский, круговой), причем на соединение в это же время могут действовать постоянные или переменные, осевые и скручивающие нагрузки [3]. Все варианты описанных нагрузок представлены графически на рис. 2.

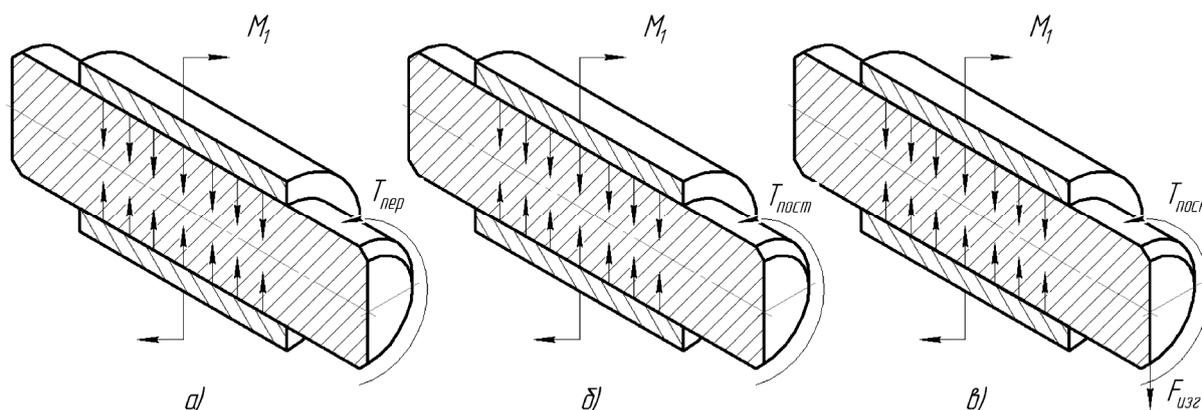


Рис. 2. Графическое изображение видов нагрузок в соединениях с натягом:  
 а – пульсирующие или ударные нагрузки; б – скручивающие нагрузки; в – изгиб с вращением

От величины ударных нагрузок зависит поведение соединений. При энергии удара меньше  $E_0$  вал относительно втулки смещаться не будет. Когда энергия удара  $E > E_0$ , происходит смещение деталей друг относительно друга, и когда это происходит, неоднократно наблюдается накопление остаточных смещений внутри соединения, которое обеспечивает распрессовку соединения. Чем больше значение  $E$ , тем меньше необходимо ударов для полного сдвига вала относительно втулки. При некоторой энергии  $E$  смещение происходит за один удар.

Скручивающие нагрузки, проявляющиеся в процессе всей работы соединения, за счет противодействия возбуждаемого крутящего момента и крутящего момента всей системы стремятся повернуть детали друг относительно друга, что влияет на несущую способность соединения, и впоследствии может привести к самораспрессовке. Взаимная неподвижность деталей соединения достигается за счет выполнения условия (условия самораспрессовки):

$$T \leq \frac{f \pi d l p d}{2},$$

где  $T$  – крутящий момент, Н•м;  $f$  – коэффициент трения;  $d$  – диаметр вала, м;  $l$  – длина посадочного участка, м;  $p$  – контактное давление, Па [3].

Большинство соединений с натягом работают при совместном действии изгибающей силы и вращения (рис. 3). При этом режиме работы в области А происходит изменение вида деформации – переход растяжения в сжатие и наоборот, в зависимости от расположения данной области от точки приложения изгибающей силы. Это явление за счет переменного характера нагрузок может вызывать локальные смещения деталей, то есть фреттинг.

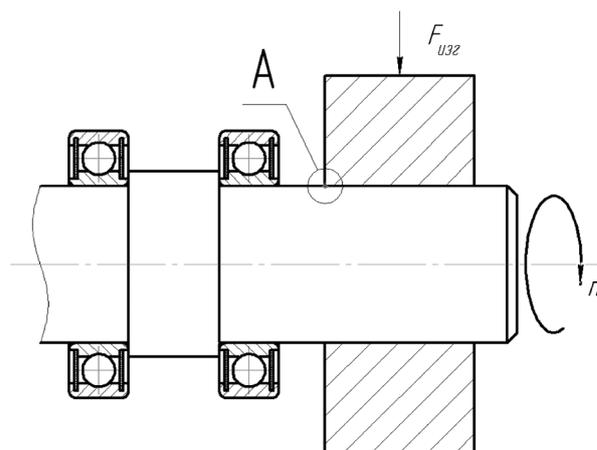


Рис. 3. Соединение с натягом, работающее при вращении и нагружении изгибающей сосредоточенной силой

Попытки решить задачи, связанные с определениями характера микроперемещений в соединениях с натягом при воздействии изгибающего момента и вращения с помощью метода конечных элементов (МКЭ), были сделаны в работе [4]. Моделирование соединения с натягом произведено в программном комплексе ANSYS. Решена 3-мерная контактная задача о напряженно-деформированном состоянии с учетом воздействия изгибающей силы, вынесенной за область контакта, коэффициента трения, влияния центробежных сил, возникающих при вращении, перераспределения контактных давлений, возникающего в результате приложения изгибающей нагрузки.

При моделировании решалась задача для трех состояний: сцепления, скольжения и раскрытия стыка. Цель работы состояла в определении зависимости поведения состояния контакта от такого рода нагрузений. Однако в работе не решались задачи, связанные с

процессами возникновения фреттинга. Не были описаны и выявлены причины перехода от упруго-деформированного состояния к микроперемещениям.

В результате исследования влияния изгибающей нагрузки и вращения на напряженно-деформированное состояние (НДС) деталей соединения с натягом было установлено, что изгибающий момент приводит к перераспределению напряжений, а вращение – к уменьшению контактных давлений. Одновременное воздействие этих факторов увеличивает площадь раскрытия стыка, за этой зоной наблюдается зона микроскольжения (рис. 4). Напряжения в деталях рассмотренного соединения с натягом, возникающие при нагружении изгибающим моментом и вращением, не превышают пределы текучести материалов. Наиболее опасными являются напряжения растяжения, возникающие на валу в области торца соединения [4].

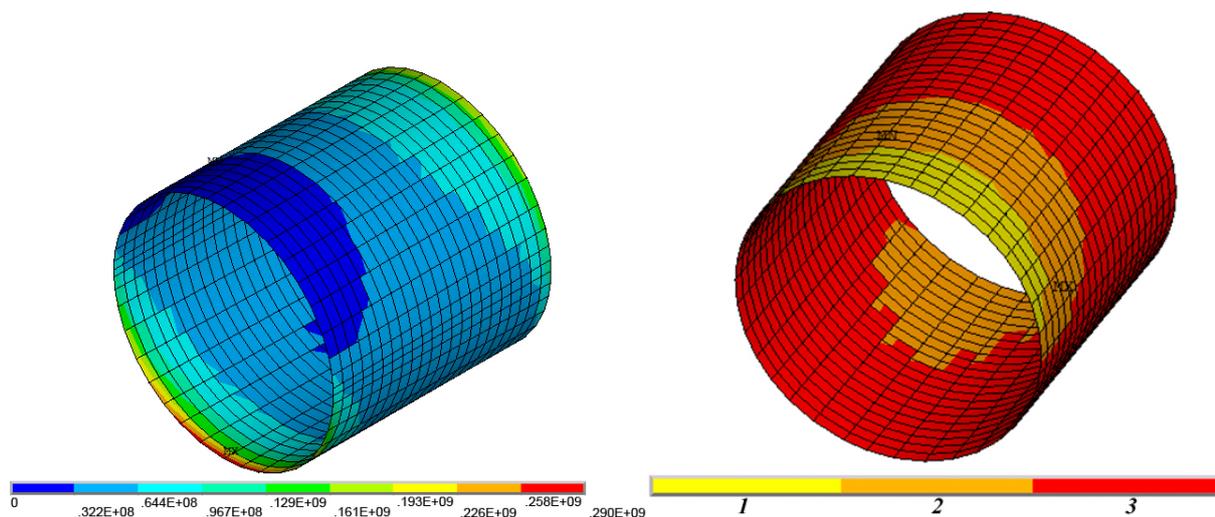


Рис. 4. Контактные давления в соединении, Па (а), и состояние контакта при их нагружении изгибом с вращением: 1 – область раскрытия стыка; 2 – область скольжения; 3 – область сцепления

В работе [6], посвященной определению влияния коэффициента трения и натяга на усталостную прочность при фреттинге, также используются МКЭ в программном комплексе ANSYS. На основе полученных результатов делается вывод о том, что при повышении коэффициента трения и натяга наблюдается снижение усталостной прочности.

В работе Ю. В. Турыгина [5] рассматриваются зоны появления фреттинга в соединениях с натягом. Делается вывод об уменьшении интенсивности фреттинга при использовании автофреттирования. Это объясняется тем, что в соединениях с АОД (автофреттированные охваты-

вающие детали) уровень тангенциальных напряжений на сопряженной поверхности охватываемой детали значительно ниже (за счет предварительного создания остаточных отрицательных тангенциальных напряжений и перераспределении их в процессе сборки). Необходимо отметить, что условия возникновения перемещений в работе не были рассмотрены.

#### Заключение

Анализ работ, посвященных соединениям с натягом и фреттинг-коррозии, показал недостаточную проработанность вопроса появления и развития фреттинга. Отсутствует обоснованная и проверенная математические модели фрет-

тинг-процесса. На основе проведенного анализа определены следующие задачи, требующие решения: описание механизма зарождения и развития фреттинга в соединениях с натягом; зависимость фреттинга от контактного давления в соединении (принцип выбора посадок).

#### Библиографические ссылки

1. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия / пер. с англ. ; под ред. канд. техн. наук Г. Н. Филимонова. Л. : Машиностроение (Ленингр. отд-е), 1976. 272 с.
2. Улиг Г. Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / пер. с англ. ; под ред. А. М. Сухотина. Л. : Химия, 1989. 456 с. : ил.
3. Грецищев Е. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. М. : Машиностроение, 1981. 247с. : ил.
4. Там же.
5. Синицина В. В. Исследование и обеспечение нагрузочной способности соединений с натягом под действием изгибающего момента и вращения : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Ижевск, 2012. 138 с.
6. Там же.
7. Mohammad Zehsaz, Pouya Shahriary The Effects of Friction coefficient and interference on the Fretting fatigue strength of Railway axle assembly // U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 75, Iss. 4, 2013. Pp. 71–84.
8. Турыгин Ю. В. Нагрузочная способность соединений с автофреттированными охватываемыми деталями : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Ижевск, 1984. 147 с.

\*\*\*

Yu. V. Turygin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU  
A. A. Yakupov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

#### Occurrence of Fretting in Connection with Interference with Loading by Bending with the Rotation

*The paper considers the reasons for the occurrence of fretting in dense contact details, for example the pressure connection. A large number of such compounds used in mechanical engineering, are experiencing fluctuating loads. These types of loads include pulsating and shock ones tending to move the parts relative to each other; twisting loads which arise under the action of torsional vibrations and capable to cause circumferential offset of the mating elements. The conditions of appearance and some types of damage appearing in contacting details in the result of fretting wear are considered. For example, fretting occurred in the landing place of the outer ring of the bearing in a housing part. The reason for this destruction was the microscopic (relative motion of the contacting parts) that occurred during the operation of the node. Such destruction does not favorably influence the load distribution in the bearing, the products of wear will serve as the abrasive elements, which is also bad for operation of parts.*

*A review of works is carried out describing the attempts to solve this problem by the finite element method, for example using ANSYS software. In the analysed example while modeling the problem was solved for three states: the mesh, the slide and the opening of the joint.*

**Keywords:** fretting, fretting corrosion, pressure connection, bending, rotation, finite element method (FEM).

Получено: 12.09.17

#### References

1. Uoterkhauz R. B. (1976). *Fretting-korroziya* [Fretting corrosion]. Moscow: Mashinostroenie (Leningr. otde), 272 p. (in Russ.).
2. Ulig G. G., Revi R. U. (1989). *Korroziya i bor'ba s nei. Vvedenie v korrozionnuyu nauku i tekhniku* [Corrosion and the fight against it. Introduction to Corrosion Science and Technology]. Leningrad: Khimiya, 456 p. (in Russ.).
3. Grechishchev E. S., Il'yashenko A. A. (1981). *Soedineniya s natyagom: Raschety, proektirovanie, izgotovlenie* [Connections with interference: Calculations, design, manufacturing]. Moscow: Mashinostroenie, 247 p. (in Russ.).
4. Ibid.
5. Sinitsina V. V. (2012). *Issledovanie i obespechenie nagruzochnoi sposobnosti soedinenii s natyagom pod deistviem izgibayushchego momenta i vrashcheniya* [Investigating and ensuring the load capacity of joints with interference under the action of bending moment and rotation] (PhD Thesis). Izhevsk (in Russ.).
6. Ibid.
7. Mohammad Zehsaz, Pouya Shahriary The Effects of Friction coefficient and interference on the Fretting fatigue strength of Railway axle assembly // U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 75, Iss. 4, 2013, pp. 71-84.
8. Turygin Yu. V. (1984). *Nagruzochnaya sposobnost' soedinenii s avtofretirovannymi okhvatyvayushchimi detalyami* [Load capacity of connections with auto-engaged female parts] (PhD Thesis). Izhevsk (in Russ.).