

Машиностроение

УДК 539.621:004.942

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНТАКТНОЙ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ УПРУГИХ ТЕЛ ПРИ КУЛОНОВСКОМ ТРЕНИИ

М.Ю. Александрова

Самарский государственный технический университет
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Проведен анализ моделей, описывающих механизм сцепления упругих тел в условиях сухого трения при циклическом нагружении. Описаны факторы, имеющие существенное влияние для наступления полной и частичной контактной приспособляемости. Представлены результаты численного моделирования полей скольжения и сцепления в сопряженных элементах сборки в условиях циклического нагружения на примере зубка в шарошке бурового долота.

Ключевые слова: трение, приспособляемость, математическая модель.

На поверхностях контакта в номинально неподвижных соединениях элементов конструкций, подвергающихся циклической нагрузке, могут возникать зоны скольжения, которые являются причиной образования фреттинга. Известно, что в упругих системах с трением, подвергающихся периодическим нагрузкам, при определенных условиях после нескольких начальных циклов нагружения может возникать контактная приспособляемость – явление, при котором частичное проскальзывание прекращается после первых нескольких циклов нагружения. Таким образом, чтобы избежать в процессе эксплуатации в соединениях взаимных перемещений контактирующих элементов, необходимо обеспечивать выполнение соответствующих условий приспособляемости. Рассмотрим основные физические аспекты контактной приспособляемости.

Факторами контактной приспособляемости являются постепенное возрастание коэффициента трения в области скольжения и перераспределение контактных сил между телами [1]. Аналитическими и численными методами показано [2-5], что если в контакте $f > f_{cr}$ (рис. 1), то контактные поверхности стремятся приспособиться. В противном случае, хотя относительные размеры области скольжения очень малы, приспособляемость не наступает. На рис. 1, а показан способ нагружения двух тел нормальными постоянными силами P и касательными переменными силами Q . В области контакта проявляется различный характер контактного взаимодействия (рис. 1, б). В координатах $(Q/P)_{max} - f$ можно выделить области полного скольжения, полного сцепления, частичного скольжения, прогрессирующего скольжения (где скольжение может только увеличиваться от цикла к циклу) и область контактной приспособляемости. Поэтому увеличение коэффициента трения имеет большое значение [5].

В работах [6, 7] приведены графики зависимости коэффициента трения от числа циклов нагрузки. Например, для сплава Al/4%Cu коэффициент трения увеличивается от 0,2 до 0,6 ÷ 0,75, а для сплава Ti-6Al-4V – от 0,45 до 0,55 за 5000 циклов. Поэтому при оценке возможности контактной приспособляемости следует учитывать возросшее значение коэффициента трения в зоне скольжения f_n (рис. 2).

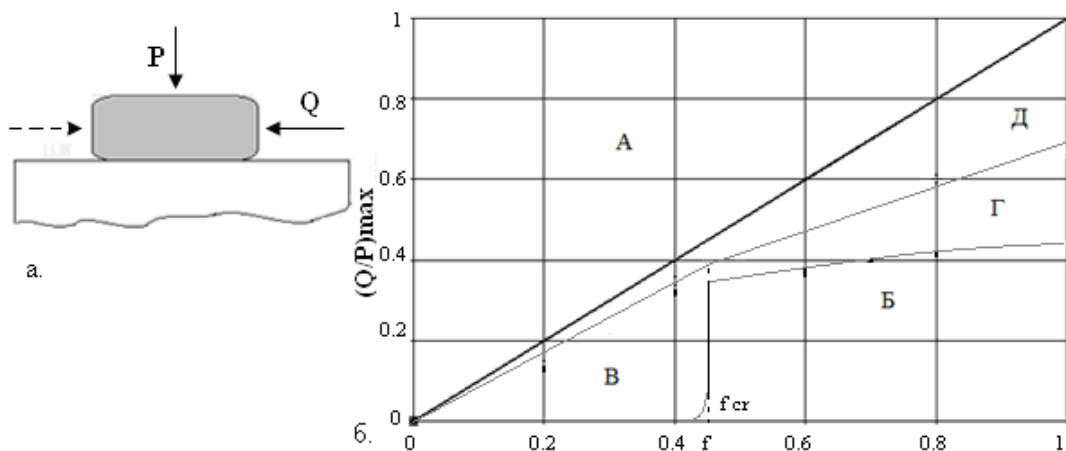


Рис. 1. а – схема нагружения двух упругих тел; б – области с различным характером контактного взаимодействия двух тел в координатах $(Q/P)_{max} - f$: А – полное скольжение; Б – полное сцепление; В – частичное скольжение; Г – контактная приспособляемость; Д – прогрессирующее скольжение

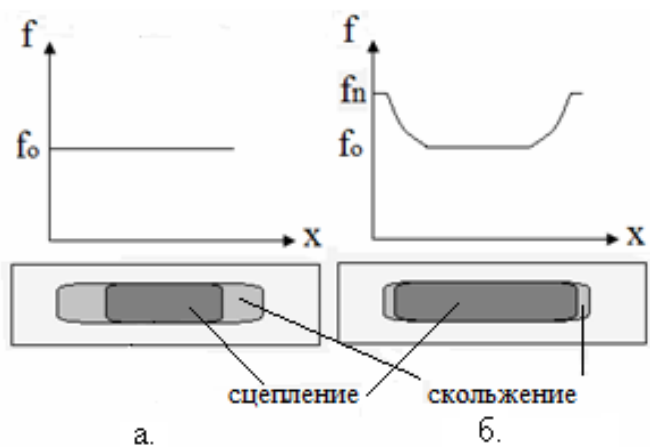


Рис. 2. Коэффициент трения: а – на первом цикле; б – на n -м цикле

Физическая природа изменения коэффициента трения при циклическом взаимодействии тел определяется процессами, происходящими в зоне проскальзывания: адгезией, тепловыделением и т. п. На поверхности трущихся тел адсорбируются вещества, образуются окислы материалов, свойства которых отличаются от свойств основных материалов [8]. Если в ходе повторного нагружения они удаляются, то обнажаются микроучастки контактирующих поверхностей, способных к адгезии, непо-

средственное соприкосновение которых приводит к изменению сил трения и, как следствие, к схватыванию.

Существует несколько описаний явлений, происходящих при взаимном перемещении элементов контакта, в том числе и модели фреттинга. Некоторые из них можно перенести и на противоположную задачу – описание контактной приспособляемости.

На молекулярном уровне можно считать, что, находясь в контакте под нормальной нагрузкой, поверхности контртел достаточно близки. При относительных малых перемещениях они становятся в позицию, где входят в пределы молекулярного взаимодействия. В результате этого на поверхностях фактического контакта появляются точки соединения тел с атомной связью. Эта связь удерживает тела от дальнейшего относительного проскальзывания. Однако если внешняя сила велика и проскальзывание все же происходит, то оно сопровождается вырыванием атомов из решетки металла с образованием свободных частиц, размеры которых сопоставимы с параметрами решетки. Частицы, обладающие большой энергией, активно окисляются даже при наличии в среде «следов» кислорода и начинают играть роль абразива. Подобный механизм описан в молекулярной теории фреттинга [8], основоположниками которой являются Томплинсон, Топ и Гаф.

Такой подход объясняет сцепление контактных поверхностей при очень малых относительных смещениях поверхностей – до 10...100 А. Однако явление приспособляемости в контакте наблюдается и при больших перемещениях (более 6 мкм) [1, 6]. Согласно теории Райта на начальном этапе фреттинга в результате адгезии образуются «мостики» схватывания [8]. При относительных перемещениях эти связи разрушаются с образованием твердых частиц на поверхности неровностей. Можно предположить, что в тех случаях, когда сила сцепления «мостиков» преобладает над внешним воздействием, дальнейших перемещений не будет. Теория Райта помогает объяснить увеличение коэффициента трения на первых циклах нагружения.

Особую трактовку процессам, происходящим в контакте, дали Одинг и Иванова [9], изучавшие влияние на фреттинг-усталость различных металлических материалов газовой среды (воздуха и водорода). На основе полученных данных они сделали вывод, что ведущим процессом при фреттинг-коррозии является не окисление поверхностей, а совокупность механических и электроэрозионных процессов. Первые вызывают разрушение оксидных пленок и образование ювенильных поверхностей металла, а вторые приводят к повышению контактной температуры, образованию ее градиента на поверхности металла, а следовательно, генерированию электродвижущей силы (ЭДС) и возникновению электрического поля в зоне трения напряженностью 10^8 В/см [8]. В процессе циклического смещения поверхностей при трении происходит последовательное смыкание и размыкание контактирующих шероховатостей, т. е. последовательное образование электрических зарядов и разрядов. Описанные процессы могут привести контактные поверхности в состояние «сварки».

Исходя из этих представлений одну из ведущих ролей в процессе приспособляемости можно отвести электрофизическому процессу, интенсивность которого однозначно определяется природой материалов сопряженных деталей и коррелирует с рядом активности Вольта по контактной разности потенциалов.

Таким образом, многие из известных моделей фреттинга при наложенных на них ограничениях могут характеризовать процессы, происходящие при контактной приспособляемости. Однако ни одна из моделей не является универсальной.

С другой стороны, необходимо учитывать шероховатость поверхности, где зона фактического сцепления зависит от размера и формы неровностей. Решение задач

механики контактного взаимодействия позволяет рассчитать напряжения и температуры в области контакта [11]. Условием приспособляемости является возникновение поля остаточных напряжений таких, что при их сложении с напряжениями от внешних сил создаются условия, исключающие дальнейшее скольжение. Остаточные напряжения появляются вследствие неоднородности поля скольжения в контакте [5]. Этот вывод граничит с предположением Фенга и Райтмайера, что износ при фреттинге является результатом деформаций шероховатостей, взаимодействие которых приводит к пластическому оттеснению материала или микрорезанию. При локальном повышении температуры и росте сил адгезии между взаимодействующими участками контакта возможно образование «мостиков» сварки или перенос металла с одной поверхности на другую. При малой величине сил адгезии образуются свободные частицы продуктов износа.

Для решения задачи определения условий, при которых система приводится в состояние контактной приспособляемости, анализировалась контактная задача взаимодействия тел. Методом конечных элементов производился расчет в программном комплексе Ansys. Результаты численного моделирования подтверждают и уточняют условия наступления контактной приспособляемости [5]. На примере контактного взаимодействия зубка с шарошкой бурового долота исследованы поля скольжения и сцепления смежных номинально неподвижных элементов (рис. 3). Для данного расчета использовался метод подмоделей. В некоторых местах посадки с натягом при идеальном контуре зубка образуются сингулярности, которые мешают дальнейшему расчету. Поэтому целесообразно определить скругление краев фаски модели.

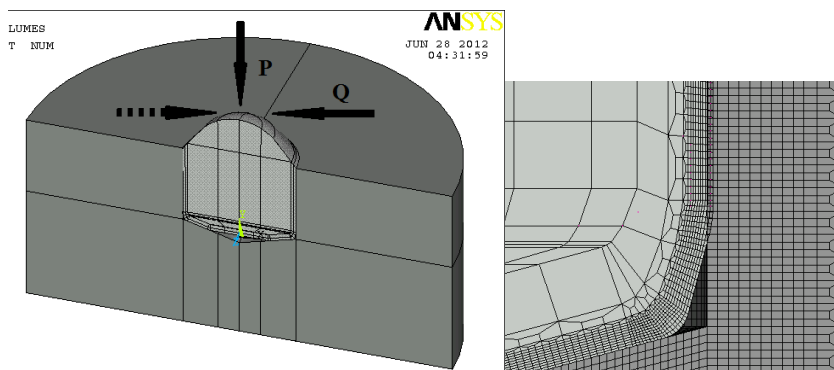


Рис. 3. КЭ-модель контакта зубка с элементом шарошки; скругление краев фаски на поверхности зубка

Расчеты показывают, что по дну посадки происходит переменное скольжение нижней части зубка (рис. 4).

Такое скольжение одновременно с высоким контактным давлением приводит к образованию зародышевых трещин. Дальнейшее развитие трещин сопровождается необратимыми процессами в шарошке, ослаблением натяга и, как следствие, выпадением зубка из тела шарошки. Выпадению зубков иногда предшествует их разворот в отверстиях шарошки. При больших силах скольжение наблюдается также и по боковой поверхности зубка. Следует отметить, что данное скольжение на нескольких первых циклах существенно уменьшается (рис. 4). Явление уменьшения зоны проскальзывания можно объяснить частичной приспособляемостью в контакте.

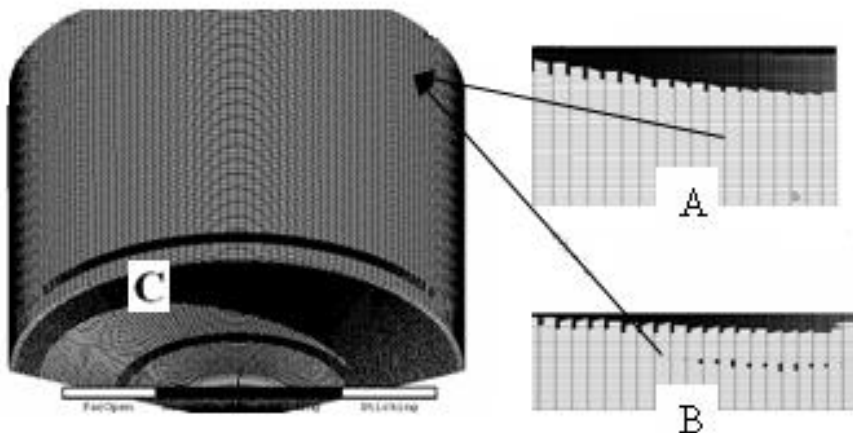


Рис. 4. Зоны скольжения по краю боковой поверхности зубка:
 А – в 1-м цикле нагрузки; В – в 3-м цикле нагрузки; С – нижней части зубка

Подводя итог изложенному, можно заключить, что при сухом трении упругих тел, подвергающихся циклическим нагрузкам в соответствующем диапазоне, наблюдается полная или частичная контактная приспособляемость. Полученные результаты численного моделирования подтверждают и уточняют условия наступления контактной приспособляемости. Для моделирования контактного взаимодействия в условиях циклического нагружения необходимо учитывать динамику коэффициента трения и использовать в расчете его максимальное значение. Явление контактной приспособляемости может иметь место при одновременном контактном взаимодействии большого числа тел. Поэтому необходимо разработать методы, которые устраняют причины, приводящие к фреттингу. Уменьшение или исключение скольжения в зоне фактического контакта может служить одним из методов антифрикционной защиты. Учитывая факторы, имеющие существенное влияние на процесс приспособляемости, такие как коэффициент трения, распределение сил между контактными поверхностями, можно регулировать процессы в зоне контакта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ding J.* Simple parameters to predict effect of surface damage on fretting fatigue // *International Journal of Fatigue.* – 2011. – vol. 75. – pp. 1384-1399.
2. *Barber J.R.* Shakedown in frictional contact problems for the continuum / J.R. Barber, A. Klarbring, M. Ciavarella // *Comptes Rendus Mecanique.* – 2008. – vol. 336. – pp. 34-41.
3. *Hills D.A.* Mechanics of Fretting Fatigue // *Solid mechanics and its applications.* – 1994. – vol. 30. – P. 236.
4. *Churchman C.M.* General results for complete contacts subject to oscillatory shear // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* – 2006. – vol. 54. – pp. 1186-1205.
5. *Клебанов Я.М., Александрова М.Ю.* Исследование процесса контактной приспособляемости при кулоновском трении упругих тел // *Изв. Самарского научного центра РАН.* – 2011. – Т. 13. – № 4(3) – С. 748-752.
6. *Christopher D. Lykins.* An Evaluation of Parameters for Predicting Fretting Fatigue Crack Initiation // *International Journal of Fatigue.* – 2000. – vol. 22. – pp. 703-716.
7. *Jin O.* Fretting Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V at Elevated Temperature / Jin O., Mall S., Sahan O. // *International Journal of Fatigue.* – 205. – vol. 27. – pp. 395-401.
8. *Петухов А.Н.* Механизм фреттинга и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ. – М.: ЦИАМ, 2008. – 203 с. – ISSN 0042-4633.

9. *Иванова В.С., Одинг И.А.* Усталость металлов при контактном трении // Изв. АНН СССР. – 1957. – № 1. – С. 34-38.
10. *Hills D.A.* Mechanics of Fretting Fatigue / D.A. Hills, D. Nowell // Solid mechanics and its applications. – 1994. – vol. 30. – P. 236.
11. *Goryacheva I.G.* Mechanics of discrete contact // Tribology International. – 2006. – vol. 39. – No 5. – pp. 381-386.

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2012 г.

PHYSICAL ASPECTS OF CONTACT SHAKEDOWN ELASTIC BODIES AT COULOMB FRICTION

M.Y. Alexandrova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The analysis of models describing the stick mechanism of elastic bodies at Coulomb friction at cyclic loading is done. The factors having a significant impact on the onset of full and partial shakedown in frictional contact are described. The results of numerical modeling of the fields slip and stick in conjugate cell assembly at cyclic loading at the example of cloves in cone drill bit are presented.

Keywords: *friction, flexibility, mathematical model.*