

Цыбанев Г.В.,*
Марчук В.Е.,**
Калиниченко В.И.*

*Институт проблем прочности

**Национальный авиационный университет

**УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПРИ
ПРИРАБОТКЕ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ
В УСЛОВИЯХ ФРЕТТИНГА**

Общая постановка вопроса

Одной из основных проблем в машиностроении является обеспечение необходимого качества узлов трения, которое достигается проведением технологической приработки изделий. Значение приработки особенно велико для ответственных и тяжело-нагруженных трибосопряжений, работающих в условиях ограниченной подачи смазочного материала, высоких значений нагрузок, скоростей и температур.

Выбор оптимальных режимов работы узлов трения в период приработки обеспечиваются необходимыми параметрами микрорельефа, площадью фактического контакта, свойствами поверхностного слоя, а также зависит от материалов трибосопряжений и состава смазочной среды. Изменение данных параметров, материалов и среды в каждом конкретном случае по-разному влияет на переход к процессу стабильной воспроизводимости параметров поверхностного слоя.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем

Контактирование при внешнем трении, а также и в процессе приработки, характеризуется дискретной природой взаимодействия трущихся поверхностей, обусловленным остаточным формоизменением микронеровностей, образованием углублений, отделением продуктов изнашивания, изменением структуры, химического состава и физических свойств материала контактирующих поверхностей в режиме постепенного изменения уровня внешних нагрузочных воздействий.

Образованные углубления, сформированные в процессе приработки, служат средством увеличения поверхностной микрокапиллярности, способствующей лучшему удержанию смазочного материала. Это обеспечивает повышение фреттингостойкости трибосопряжений за счет того, что, во-первых, микровпадины представляют собой микрорезервуары, которые являются источником регенерации граничных смазочных слоев, а во-вторых – в эти микровпадины попадают продукты изнашивания [1].

В работе [2] было предложено разделить профили углублений на два типа: мелкие каверны в виде блюдца и маленькие глубокие отверстия. Первый тип углублений возникает тогда, когда абразивные продукты фреттинга проникают за пределы области начального повреждения, продолжая абразивную обработку на соседнем участке и делая именно разрушение менее интенсивным. Углубления второго типа возникают в случае задержки продуктов износа в месте их образования, которое приводит к локальному абразивному действию. Это может быть следствием местного повышения давления, что из расчета превышал в четыре раза предел прочности. Очевидно, подобные повреждения поверхности могут быть источниками начальной усталостной трещины.

Для повышения усталостной прочности деталей, которые работают в условиях фреттинг-изнашивания, был предложен эффективный метод уменьшения концентрации напряжений болтового соединения, которое заключается в нанесении сетки канавок определенной глубины на поверхность для защиты от разрушения. В результате долговечность болтового соединения в условиях фреттинг-изнашивания увеличилась в три раза [3].

Влияние канавок является основной причиной того, что шероховатая поверхность имеет более высокую усталостную прочность при фреттинге, чем гладкая. Фреттинг в этом случае происходит на выступах шероховатости, которые не поддаются переменным напряжениям, действующих в материале. Проточка канавки снижает концентрацию напряжений в месте "фреттинга", но создает концентрацию напряжений у ее дна. Вытачивание должно быть сконструировано таким образом, чтобы был достигнут оптимальный баланс этих двух эффектов [4].

Все эти исследования говорят о перспективности дискретных структур для защиты от фреттинга и обеспечения увеличения ресурса и долговечности узлов трения, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Особое значение в этом процессе играют приработочные процессы, которые относятся к нестационарным и поэтому слабо изучены. Установление принципиальных закономерностей и взаимосвязей триботехнических параметров процесса приработки и нахождения на этой основе приемов управления ими в условиях фреттинг-изнашивания – одна из основных задач трибологии.

Целью работы является исследование влияния дискретности трибоконтакта на приработочный процесс в условиях фреттинга.

Методика экспериментальных исследований

Испытания на изнашивание в условиях фреттинга проводились на установке МФК-1 на образцах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 23.211-80 при следующих параметрах виброконтальной нагрузки: удельная нагрузка – $P = 20$ МПа; амплитуда относительного перемещения образцов – $A = 87,5$ мкм; частота колебаний – $f = 25$ Гц; база испытаний – $N = 10^5$ циклов. Конструкция и принцип работы установки МФК-1 описан в работе [5]. В процессе испытаний измерялся момент трения и определялся коэффициент трения в зависимости от количества циклов виброконтальной нагрузки.

Для изготовления образцов, на поверхности которых формировались микроуглубления, использовалась сталь 30 ХГСА. В качестве материала контрообразцов – сталь 45, термически обработанная до твердости HRC 52–54. Образцы изготовлялись из стали 30ХГСА в состоянии поставки без дополнительной термической обработки, что имело целью установить наличие эффекта образованных на поверхности микроуглублений на триботехнические характеристики при наиболее неблагоприятной – с точки зрения износостойкости – твердости материала образцов, а соответственно и условий сохранения в процессе изнашивания сформированных микроуглублений.

Рабочая поверхность образцов и контрообразцов шлифовалась до $R_a = 0,32$ мкм. Микроуглубления формировались на плоской торцевой поверхности образцов путем пластической деформации материала при динамическом действии индентора с помощью специального устройства [6], который позволяет регулировать, в зависимости от хода головки индентора, глубину и диаметр лунок, а также расстояние в ряду между лунками и расстояние между рядами лунок.

Для испытаний были подготовлены две партии образцов с параметрами дискретной поверхности, которые приведены в табл.

Таблица

Параметры сформированной дискретной поверхности образцов

№ образца	Расстояние между рядами лунок, мкм	Расстояние между лунками в ряду, мкм	Ход головки индентора (глубина лунок), мкм
1	200	200	100
2	200	200	150

Испытания проводились в среде масла ЦИАТИМ-201 в условиях граничного трения. Как базовые варианты для сравнения в таких же условиях смазки испытались образцы с шлифуемыми рабочими поверхностями без микроуглублений, а также образцы с шлифуемыми рабочими поверхностями при отсутствии смазочного материала. Величина изнашивания определялась весовым методом как разница между начальным весом образцов и весом образцов после испытания. Для удаления остатков смазочного материала и продуктов изнашивания образцы после испытаний тщательным образом промывались в бензине Б-1 и просушивались.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Процесс приработки прослеживался по изменению коэффициента трения. Кривые изменения коэффициента трения дискретных поверхностей от количества циклов при фреттинге представлены на рис. 1. Анализ кривых показал, что изменение коэффициента трения в процессе приработки по мере наработки циклов нагружения носит немонотонный характер и зависит от геометрических параметров лунок на поверхности трибоконтакта. Так при первых циклах нагружения коэффициент трения резко возрастает, проходит через максимум, а затем с увеличением количества циклов нагружения резко падает, оставаясь далее постоянным. Такая тенденция поведения коэффициента трения коррелируется с данными, полученными в более ранних исследованиях [7].

Сравнительная оценка изменения значений коэффициентов трения по мере увеличения количества циклов нагружения позволило выделить три характерных периода приработки контактирующих поверхностей при фреттинге.

Первый период обусловлен максимальными значениями коэффициента трения. Для всех поверхностей в этом периоде характерно кратковременное резкое возрастание коэффициента трения на первых циклах нагружения и дальнейшее резкое его снижение. Наибольший скачок коэффициента трения 0,52 проявляется на исходной поверхности (без лунок). Это связано с нарушением сплошности масляной пленки в зазоре трибосопряжения и преобладание в большей степени абразивных процессов, что приводит к высоким значениям интенсивности изнашивания. Исследования показали [1], что на участках фактического контакта в результате разрушений возникают раковины, микроуглубления с размерами от 10 до 80 мкм. Это процессы связаны с локальным абразивным действием продуктов износа и усталостного разрыхления металла, усугубленное химической активизацией поверхности трения.

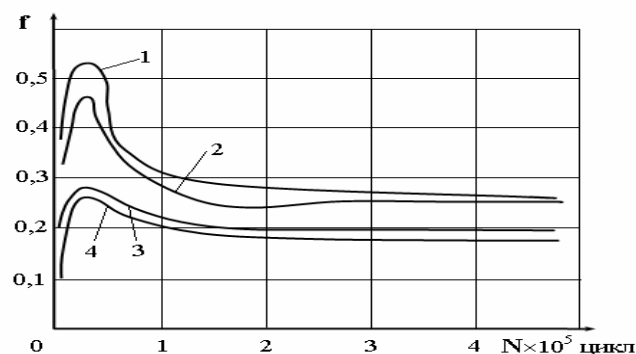


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от количества циклов фреттинга:

- 1 – без лунок при трении без смазочных материалов;
- 2 – без лунок в условиях граничного трения;
- 3 – дискретная поверхность с параметрами лунок образца № 1;
- 4 – дискретная поверхность с параметрами лунок образца № 2

Для дискретных поверхностей этот скачок коэффициента трения лежит в пределах 0,25 - 0,28 (в зависимости от геометрических параметров лунок), что на 57 - 62 % меньше, по сравнению с исходной поверхностью. Кроме того, дискретные поверхности в виде лунок, по сравнению с исходной поверхностью, превышают их по износостойкости в 1,8 - 2,44 раза [1]. Высокие триботехнические характеристики дискретных поверхностей связаны с тем, что лунки представляют собой резервуары для попадания продуктов изнашивания, которые обеспечивают стимулирование трибохимических процессов за счет постоянного их удаления с поверхности трения. Также лунки являются резервуарами для удерживания смазочного материала, которое используется в случаях смазочного голодания контактирующих поверхностей.

На втором периоде приработки отмечается заметное улучшение условий трения и изнашивания. Масляная пленка между разделяющими поверхностями постепенно восстанавливается, значения коэффициента трения уменьшается менее интенсивно. Разница значений коэффициента трения между исходной поверхностью (0,25 - 0,28) и дискретными (0,2 - 0,22 ... 0,18 - 0,2) составляет 64 - 80 %.

Третий период приработки характеризуется стабилизацией коэффициента трения, что свидетельствует о нормальном механо-химическом износе поверхностей трения и окончания процесса приработки.

Результаты численного расчета

Для детального анализа процессов, происходящих в трибоконтакте, а также влияния напряженно-деформированного состояния и температуры контактирующих поверхностей на процессы трения и изнашивания было осуществлено моделирование процесса контактирования поверхности контртела с дискретной поверхностью. К поверхности модели прикладывались нормальные и касательные нагрузки, которые приближенно отвечают тем силам, которые действуют в направлении вращения контртела и силам давления по нормали. А также температурные составляющие, которые возникают в результате трения между поверхностями контакта. Вся модель разбита на гексагональные конечные элементы (количество узлов 37727, элементов 14478), а ее основа жестко закреплена в координатных плоскостях (рис. 2, а). На рис. 2, б показан увеличенный вид разбивки поверхности образца с лунками на конечные элементы.

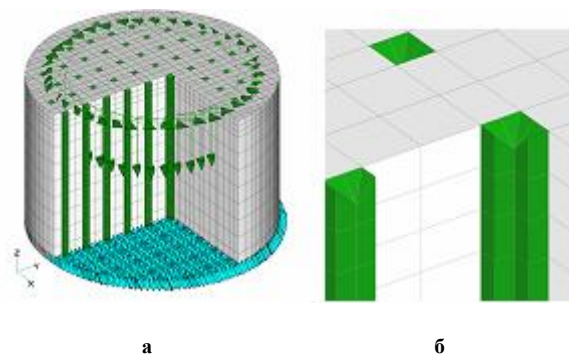


Рис. 2 – Конечно элементная модель с прилагаемыми касательными и нормальными нагрузками и закреплениями в основе (а), и увеличенный вид поверхности с лунками (б)

Расчет проводился в несколько этапов. На первом этапе было определено температурное распределение по объему модели за определенный период времени, где максимальная температура на поверхности достигла почти 100 °С (рис. 3, а, б, в, г). Температурное распределение получили путем задания конвекционного потока по поверхности модели в области контакта образца с контртелом.

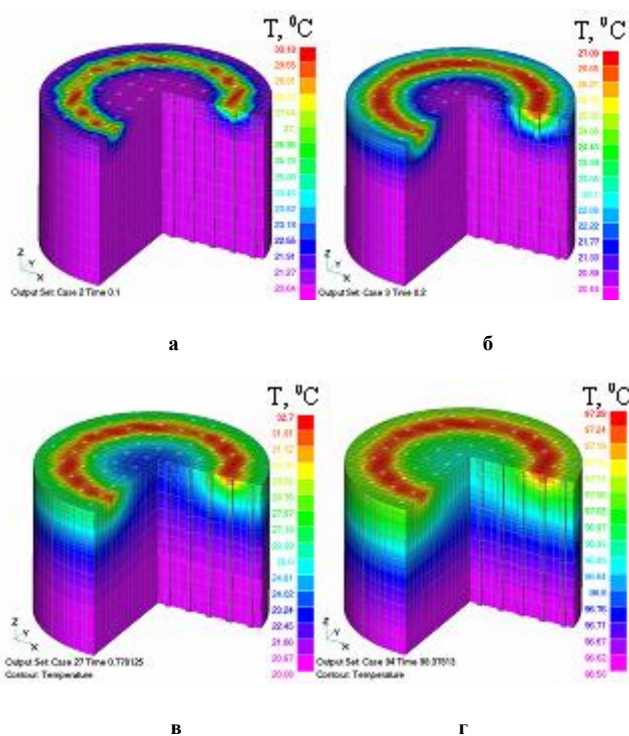


Рис. 3 □ Распределение температурного поля образца в разных временных интервалах:
 $t = 0,1$ с (а); $t = 0,2$ с (б); $t = 0,78$ с (в); $t = 98$ с (г)

На рис. 4. показан график изменения температуры во времени при действии нормальной и касательной составляющих нагрузки в процессе трения дискретной поверхности. Характер распределения температуры на поверхности образца и по его глубине практически одинаков. Разброс температур составляет 4 - 10 °С. Наибольшая температура наблюдается в зоне трибоконтакта (кривая 1) возле лунок и составляет 30 - 95 °С в зависимости от временного интервала. В процессе трения температура отводится в луночное пространство и далее в глубь материала образца. Разность температур в лунке и на поверхности трибоконтакта обеспечивает постоянный отвод тепла из зоны трения. Градиент температур приводит к возрастанию напряженно-деформированного состояния на поверхности трибоконтакта (рис. 5), что является следствием неустановившегося режима трения и высоких значений коэффициента трения. Это соответствует первому периоду приработки.

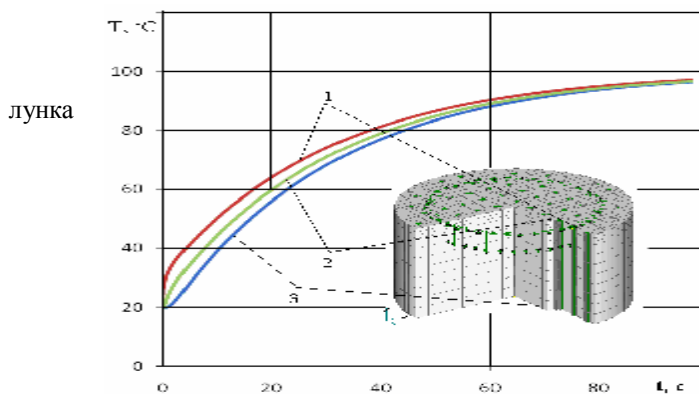


Рис. 4 □ Распределение температуры на дискретной поверхности образца в зависимости от времени:
 1 □ изменение температуры на поверхности между лунками;
 2 □ изменение температуры в лунке;
 3 □ изменение температуры у основания образца

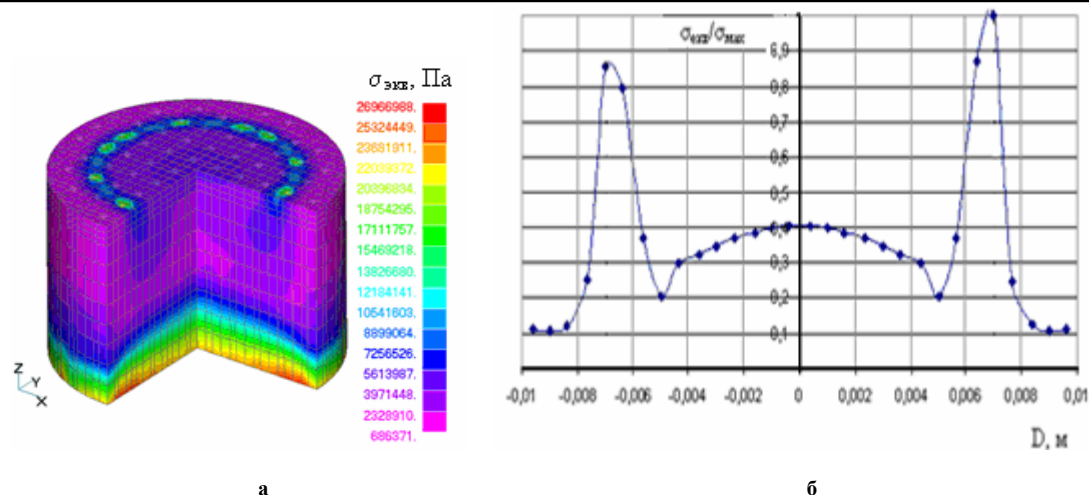


Рис. 5 – Напряженно-деформированное состояние дискретной поверхности в первом периоде приработки:
 а – распределение эквивалентных напряжений в образце по Мизесу ($S_{экв}$) вдоль оси X на поверхности дискретного покрытия при воздействии силовой и температурной нагрузки;
 б – график распределения приведенных напряжений вдоль образца с максимальными значениями напряжений в межлуночном пространстве ($S_{экв}/S_{max}$ – отношение текущего эквивалентного напряжения в образце по Мизесу к максимальному; D – диаметр образца)

С увеличением температуры прогрев образца становится более равномерным, т.е. разница температур на его поверхности и у основания устанавливается минимальной (рис. 6). Термические напряжения в образце при установившейся температуре уменьшаются, поскольку нет существенного перепада температур между его поверхностью и основанием. Это приводит к уменьшению коэффициента трения, что соответствует второму и далее третьему периодам приработки.

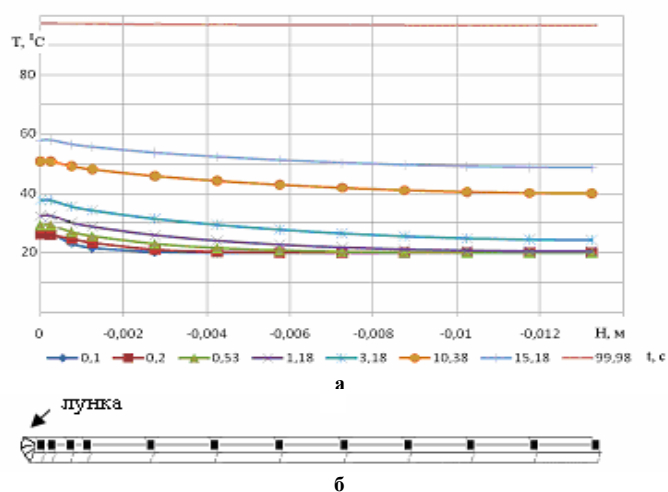


Рис. 6 □ Распределение температуры по глубине образца для разных временных интервалов:
 а – графическое представление результатов;
 б – точки, по которым проводились исследования

Для определения напряженного состояния модели было взято за основу распределение температурного поля образца в последний временной интервал $t=98$ с, исходя из тех рассуждений, что повышение температуры больше не происходит при заданном постоянном нагружении. Как видно из рис. 5, а, максимальные напряжения возникают в зоне закрепления образца, но они минимальны и не могут существенно влиять на поверхность с лунками. Данный тип модификации поверхности в виде лунок, за счет отсутствия значительных остаточных напряжений, имеет преимущества по сравнению с покрытиями, для которых характерны разные коэффициенты температурного расширения материала основы и покрытия. На поверхности образца напряжения распределились в виде островков с максимальными значениями около краев лунок (рис. 5). Наплывами, которые возникают при создании луночного покрытия, при расчете пренебрегаем, поскольку их площадь, по сравнению с площадью контакта образца и контртела, мизерно мала, а на стадии приработки они исчезают.

Выводы

1. Установлено три периода приработки. Изменение коэффициента трения в процессе приработки по мере увеличения числа циклов нагружения носит немонотонный характер и зависит от геометрических параметров лунок на поверхности трибоконтакта.
2. Высокие триботехнические характеристики дискретных поверхностей связаны с тем, что лунки представляют собой резервуары для попадания продуктов изнашивания, которые обеспечивают стимулирование трибохимических процессов за счет постоянного их удаления с поверхности трения. Эти процессы приводят к уменьшению коэффициента трения на 57-62% по сравнению с исходной поверхностью. Кроме того лунки являются резервуарами для удерживания смазочного материала, которое используется в случаях смазочного голодания контактирующих поверхностей.
3. Луночное пространство обеспечивает эффективный отвод тепла с поверхности трибоконтакта, что приводит к снижению напряженно-деформированного состояния.
4. Наличие граничной смазки и ее отсутствие в трибосопряжении не влияет на общую тенденцию изменения коэффициентов трения в процессе приработки.
5. Применение дискретных покрытий с различными параметрами их нанесения позволяет управлять процессами в трибоконтакте при приработке в условиях фреттинга путем влияния на процессы трения и изнашивания.

Литература

1. Марчук В.Є. Зносостійкість дискретних поверхонь в умовах фреттинг-зношування // Вісник НАУ. – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”, 2010. – Вип. 2 (43). – С. 40-45.
2. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
3. Вахтель В.Ю. Повышение усталостной прочности деталей, работающих в условиях контактной коррозии трения // Вестник машиностроения. – 1969. – №2.
4. Neuwold R.B. Designing against fatigue // Chapman and Hall. – London. – 1962.
5. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.
6. Пат. Україна, F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / Марчук В. Є., Шульга І. Ф., Шульга О. І., Плюснін О. Є. (Україна); НАОУ. – № 13762; Заявл. 24.10.2005; Опубл. 17.04.2006. Бюл. №4.
7. Марчук В.Є., Духота О.І., Градиський Ю.О., Єнін О.М. Фреттингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 100. – С. 147-152.

Надійшла 11.11.2010