

Шевеля В.В.,***Любимов В.Е.,*****Олександренко В.П.*****Жешувский политехнический университет,
г. Жешув, Польша**Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий**РАЗВИТИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ФРЕТ-
ТИНГ-КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ**

Локализация контактного взаимодействия при микроперемещениях в условиях фреттинга оказывает существенное влияние на характер формирующейся геометрической структуры зоны трения. Изучение такой структуры позволяет проследить за эволюцией фреттинг-повреждений. Недостаточное соответствие предложенных гипотез о природе фреттинг-коррозии [1-5] ряду обнаруженных экспериментальных фактов можно объяснить довольно односторонними подходами к анализу этого вида поверхностного разрушения, не учитывающими взаимосвязанности реализующихся в ходе динамического контактирования механо-химико-реологических процессов. Существующие представления о механизме фреттинг-процессов можно условно разбить на две основные группы: гипотезы коррозионного и гипотезы механического износа. Каждая из них в той или иной мере отдает предпочтение одному из процессов: или механическому (истирание металла вследствие механического зацепления шероховатостей с последующим окислением металлических продуктов износа) или химическому (когда происходит прямое окисление поверхностей, после чего образовавшиеся окисные пленки соскребаются). Однако в реальном фреттинг-процессе трибохимические и физико-механические механизмы изнашивания являются взаимосвязанными. Очевидно, важная дополнительная информация о природе фреттинг-коррозии может быть получена при использовании современных методик и установок исследования геометрической структуры поверхностей.

Испытания на фреттинг-коррозию проводились на специальной модернизированной установке [6], в которой пара трения реализует контакт кольцевого торца подвижного цилиндрического образца ($D \times d = 37 \text{ мм} \times 34 \text{ мм}$), по неподвижному образцу, имеющему форму пластины ($b \times L = 20 \text{ мм} \times 120 \text{ мм}$) (рис.1). Материал образцов: пластина – сталь 65Г, прошедшая стандартную для данного материала термообработку: закалка от 830 °С в масле с последующим отпуском до твердости 46 HRC; цилиндрический образец сталь 40Х твердостью 46 HRC.



**Рис. 1 – Общий вид фреттинг-узла:
1 – цилиндрический подвижный образец;
2 – плоский неподвижный образец;
3 – дорожка трения**

В связи с наиболее значительным влиянием на фреттинг-износ амплитуды проскальзывания и числа циклов наработки эксперименты проводились с варьированием указанных факторов при нагрузке $p = 30 \text{ МПа}$ и частоте $f = 30 \text{ Гц}$. После фреттинг-испытаний анализировался характер дорожки трения, полученной на плоском образце. Исследования геометрической структуры повреждений (ГСП) при фреттинг-коррозии проводились прибором Talyscan 150 фирмы Taylor-Hobson с использованием программы Taly Map Expert (Mountains Technology). Проводилось сканирование участков шириной 1 мм с периодичностью 1 мм поперек дорожки трения (100 проходов на 1 мм поврежденного участка) в местах с наиболее глубоким износом и в местах с наибольшими наростами для данного режима фреттингования. Это устраняло случайность выбора места повреждений, позволяло получать более объективные данные по измене-

нию объемной геометрической структуры повреждений (ГСП) дорожки трения в зависимости от условий контактного взаимодействия.

Результаты измерений (рис. 2, 3) показывают, что при всех исследованных амплитудах проскальзывания средние и периферийные зоны контакта имеют свои характерные особенности повреждений, интенсивность которых зависит от наработки циклов и амплитуды фреттинга. При одинаковом числе циклов наработки характерные зональные отличия более явно проявляются с увеличением амплитуды перемещения. Для малой амплитуды формирование данной ГСП происходит при большем числе циклов наработки по сравнению с более высокой амплитудой, однако характер ГСП сохраняется идентичным.

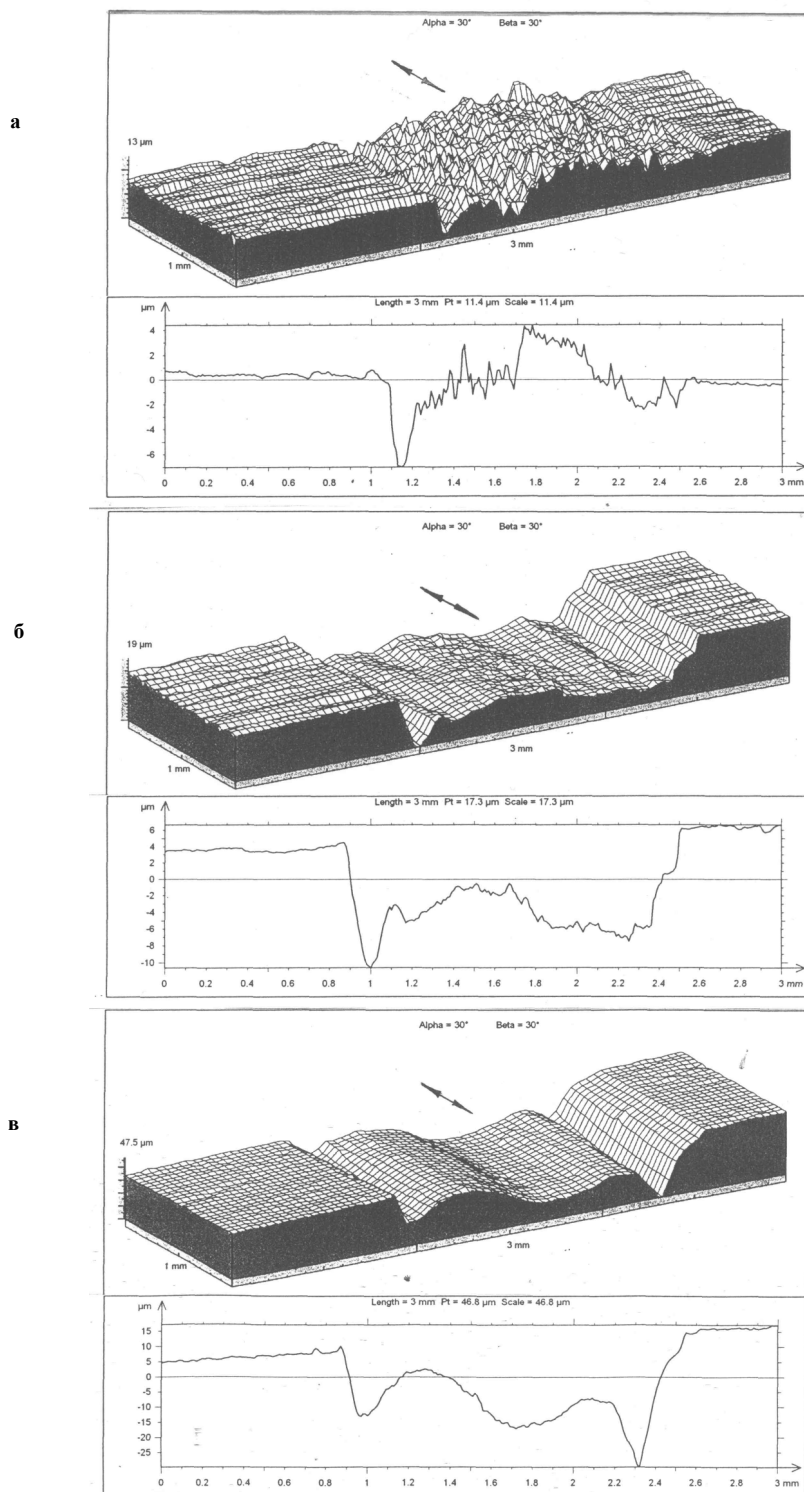


Рис. 2 – Изменение ГСП при фреттинг-коррозии стали 65Г в контакте со сталью 40Х в зависимости от наработки:

а – $N = 10^5$; **б** – $N = 10^6$; **в** – $N = 10^7$ ($P = 30$ МПа; $A = 200$ мкм)
(стрелки показывают направление вибрации подвижного образца)

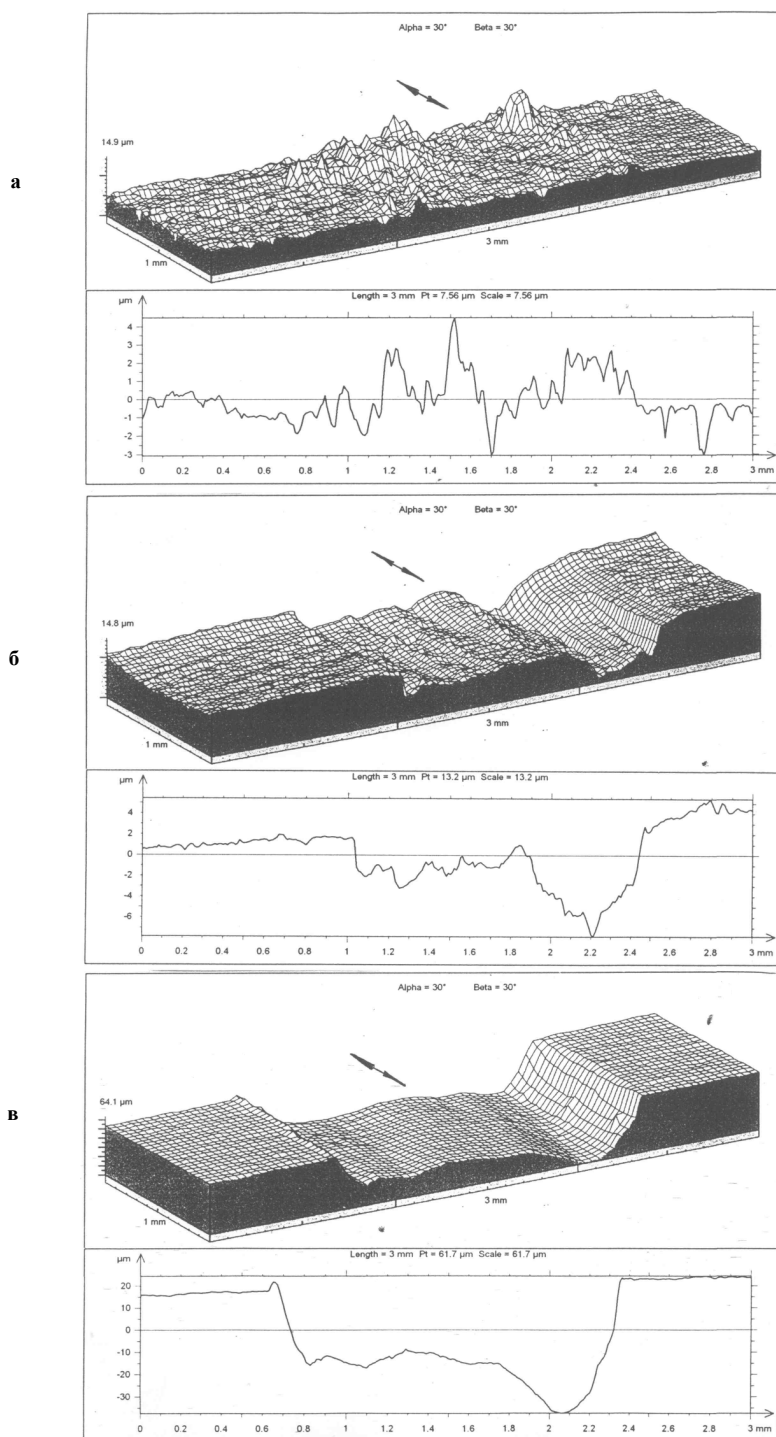


Рис. 3 – Изменение ГСП при фреттинг-коррозии стали 65Г в контакте со сталью 40Х в зависимости от амплитуды вибрации:
а – $A = 50$ мкм; **б** – $A = 100$ мкм; **в** – $A = 300$ мкм ($P = 30$ МПа; $N = 10^7$)
(стрелки показывают направление вибрации подвижного образца)

Обработка результатов исследования геометрической структуры фреттинг-повреждений показывает (рис. 4), что между степенью максимального повреждения (как вырыва, так и нароста) и длительностью испытания существует определенная зависимость, определяемая амплитудой проскальзывания. При малых амплитудах ($A = 50$ мкм) формируется кривая износа затухающего характера, а при высоких ($A = 300$ мкм) – степень износа становится пропорциональной пройденному пути. В случае низких ам-

плитуд на образовавшиеся наросты в средней зоне контактирования действуют меньшие сдвиговые напряжения, вследствие чего они более долговечны. Как видно из представленных данных (рис. 3), при ам-

плитуде $A = 50$ мкм значительные наросты сохраняются даже после 10 млн. циклов, а с увеличением амплитуды они постепенно исчезают: при $A = 100$ мкм после 10^7 , при $A = 200$ мкм после 10^6 , а при $A = 300$ мкм уже после 10^5 циклов. Для малых амплитуд характерен более медленный выход отделившихся частиц металла из пространства между трущимися телами, происходит их накопление, что обеспечивает разделение поверхностей. При повышении амплитуды указанные процессы интенсифицируются и включаются факторы, повышающие интегральный износ.

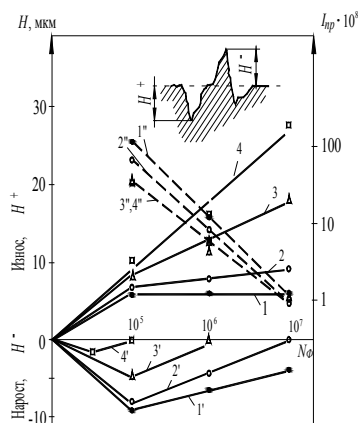


Рис. 4 – Зависимость максимальных локальных износов H^+ (1, 2, 3, 4), наростов H^- (1', 2', 3', 4') и приведенного износа (1, 2, 3, 4) стали 65Г от количества циклов фреттинга и амплитуды проскальзывания (1, 1', 1'' – $A = 50$ мкм; 2, 2', 2'' – $A = 100$ мкм; 3, 3', 3'' – $A = 200$ мкм; 4, 4', 4'' – $A = 300$ мкм)

Для получения дополнительной информации можно привести износ при различных амплитудах скольжения к единице пути трения:

$$I_{i\theta} = \frac{\dot{H}^+}{NA},$$

где H^+ – максимальная глубина локального повреждения;

N – число циклов фреттингования;

A – амплитуда проскальзывания.

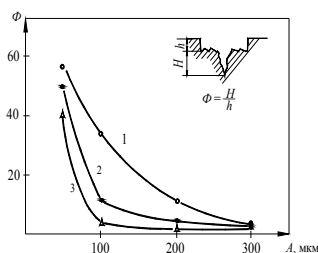
Приведенный износ I_{np} характеризует интенсивность разрушения поверхности в зависимости от амплитуды скольжения за один цикл фреттингования. Результат пересчета износа показан на рис. 4 пунктирными линиями.

Как видим, максимальная интенсивность локального износа соответствует минимальной из исследованных амплитуд – 50 мкм. С увеличением амплитуды интенсивность износа падает, в диапазоне 200...300 мкм наблюдается тенденция к ее стабилизации. Более значительные приведенные износы имеют место при меньшем числе циклов наработки, с увеличением N_{ϕ} они снижаются.

При фреттинге неизбежно образуются каверны, которые являются потенциальными концентраторами напряжений. Для характеристики степени локального повреждения при фреттинге может быть принята величина $\hat{O} = \frac{\dot{H}}{h}$ [7], называемая фреттинг-фактором и представляющая собой отношение ло-

кального адгезионного износа H к "равномерному" фреттинг-износу h . Обработка результатов исследования геометрической структуры фреттинг-повреждений показала (рис. 5), что с увеличением амплитуды проскальзывания локальность повреждений снижается, что связано с ростом "равномерного" износа поверхностей, а также с уменьшением глубины вырывов. При амплитуде 300 мкм значение Φ стабилизируется и величина локального износа остается в 2...4 раза выше h . Однако при низких амплитудах сколь-

жения ($A = 50$ мкм) величина фреттинг-фактора остается стабильно высокой независимо от числа циклов наработки. Это объясняется большей локализацией подвода энергии к отдельным микроучасткам поверхности трения, их значительной активацией вследствие ограниченности объема металла, участвующего в контактном взаимодействии и развитием на этих участках процессов адгезии, схватывания и переноса металла. С повышением амплитуды проскальзывания увеличивается площадь поверхности рассеивания энергии, снижается динамическая напряженность микроучастков поверхности, что приводит к снижению фреттинг-фактора.



**Рис. 5 – Зависимость фреттинг-фактора от амплитуды проскальзывания ($p = 30$ МПа; $f = 30$ Гц) и числа циклов наработки:
1 – $N = 10^5$; 2 – $N = 10^6$; 3 – $N = 10^7$ циклов**

Выявленные закономерности позволяют детализировать механизм изнашивания поверхностей при фреттинге. С термодинамической точки зрения фреттинг представляет собой процесс непрерывного подвода и рассеивания механической энергии при малых амплитудах относительного проскальзывания поверхностей. Диссипация энергии в значительной мере может обеспечиваться эффективными трибохимическими и реологическими механизмами [8-10].

В начальный момент фреттинга происходит быстрый износ исходной окисной пленки и обнажение ювенильных поверхностей. Особенности фреттинг-процесса (малые амплитуды перемещений, плотное прилегание поверхностей) создают условия для дифференциальной аэрации – свободного доступа кислорода к краям зоны трения или, по аналогии, к краям пятна фактического контакта и затрудненный доступ к средней части дорожки трения (или пятна контакта). Это обуславливает действие различных ведущих механизмов диссипации подводимой механической энергии по ширине дорожки трения: для периферийных участков – трибохимический, а для внутренних – реологический.

Свободный доступ кислорода к активированному трением периферийному материалу способствует интенсивному его окислению. В этом случае окисная пленка не защищает металл, подвергшийся фреттингу, так как любая окисная пленка между вибрирующими поверхностями стирается, а порошкообразные частицы окислов, находясь между поверхностями, действуют как мощный абразив. При этом, образующийся на границе дорожки трения уступ препятствует выходу окисных продуктов износа за пределы зоны трения. С учетом того, что объем окислов обычно больше объема металла, который пошел на их образование, в системе произойдет некоторое взаимное отдаление контактирующих поверхностей и перераспределение нагрузки. В средней части дорожки трения удельные давления несколько снизятся, а по краям возрастут.

Повышенные удельные нагрузки на периферийных участках, высокоабразивные свойства порошкообразных частиц окислов и непрерывное их перемещение приведут к изнашиванию металла и образованию дополнительного углубления по краям зоны контактирования (см. рис. 2). Этот процесс будет продолжаться, пока удельные нагрузки по всей ширине контакта не выровняются. Образующийся периферийный слой продуктов изнашивания становится эффективным барьером для поступления кислорода во внутренние зоны контактирования. Дальнейшее виброперемещение поверхностей приведет к частичному удалению из краевой зоны трения окисных продуктов. В результате опорная функция окислов снизится и произойдет перераспределение давления в поперечном направлении дорожки трения с его увеличением в средней части, что будет способствовать более плотному прилеганию поверхностей и дополнительному ограничению доступа кислорода в эту зону.

Диссипация подводимой энергии во внутренней зоне контактирования обеспечивается реологическими механизмами внутреннего трения [8]. Исчерпание отдельными микроучастками поверхностей трения источников релаксации напряжений, возникающих в ходе динамического контактирования,

способствует развитию повреждающей реакции в твердой фазе – схватыванию, и даже возможности временного перевода процесса в колебания пары трения как одной системы. Однако в дальнейшем, накапливающаяся механическая энергия приведет к разрыву и относительному смещению поверхностей с образованием адгезионных вырывов и налипаний, нагруженных в режиме малоциклового усталости. Усталостные процессы развиваются в результате передачи адгезионными связями циклических напряжений на области, не участвующие в непосредственном контакте (зоны влияния [11]). Прогрессирующие усталостные явления, сопровождающиеся конкурирующими процессами упрочнения – разупрочнения и появлением подповерхностных усталостных микротрещин, способствуют обособлению металлических частиц износа. Вибрационные перемещения поверхностей выталкивают оторвавшиеся фрагменты металла в полости между участками фактического контакта и в периферийную область дорожки трения, где они занимают место частично удаленных окисных продуктов.

Многочисленное перетиравание частичек металла в абразивной среде окисных продуктов износа приводит к их размалыванию и последующему интенсивному окислению. Время, требующееся для завершения окисления, зависит от исходных размеров частиц, интенсивности подвода механической энергии и доступа в полость трения кислорода. То есть в процессе фреттинга реализуется двойной механизм трибоокисления материала: прямое окисление поверхности и автокаталитическое доокисление изношенных частиц [12]. Поэтому анализ продуктов фреттинга практически не обнаруживает металлического железа. Дополнительное образование окисных продуктов сопровождается ростом объема материала, что в свою очередь в запертом пространстве приводит к расприранию контактирующих поверхностей и увеличению в краевых зонах удельного давления. Ужесточение внешних условий, а также абразивное изнашивание в результате трения окисных частичек о металлическую поверхность способствуют повышенному износу и углублению профиля краевых зон. Стадии фреттинг-коррозии повторяются.

Таким образом, повреждения при фреттинг-процессе обусловлены адгезионно-усталостным механизмом, осложненным локально-абразивным действием продуктов фреттинг-коррозии. Взаимоускоряющее действие трибохимического и усталостного процесса способствует интенсификации износа. Уменьшение трибохимических повреждений, например, снижением окислительной способности среды, а также повышение реологических диссипативных свойств контактирующих материалов, способствующих как снижению интенсивности адгезионных повреждений, так и росту усталостной прочности, в целом будет благотворно сказываться на фреттингостойкости пары трения. На основе изложенного механизма изнашивания поверхностей можно объяснить большинство, наблюдаемых экспериментально, особенностей фреттинг-коррозии.

Литература

- 1 Berthier Y, Vincent L, Godet M. Le fretting corrosion: aspects fondamentaux description des phenomenes // *Qualite: Rev. prat. contr. ind.* – 1989. – 28. – № 156. – P. 30-34.
- 2 Iwabuchi F. Fretting wear of inconel 625 at high temperature and in high vacuum // *Wear.* – 1985. – P. 163-175.
- 3 Duquette D.J. Fretting corrosion and fretting fatigue // *Surface Treat. Improv. Perform. and Prop. Proc. 26th Sagamore Army Mater. Res. Conf., Lake George, N.Y., July 16-20.* - 1979. – P. 173-186.
- 4 Gaul D.J., Duquette D.J. Cyclic wear behavior (fretting) of a tempered martensite steel // *Met. Trans.* – 1980. - № 9. – P. 1581-1588.
- 5 Harris S.J., Overs M.P., Gould A.J. The use of coatings to control fretting wear at ambient and elevated temperatures // *Wear.* – 1985. - 106. – P. 35-52.
- 6 Кузьменко А.Г., Волынский Б.С., Заболотная Л.В. Количественная оценка фреттинг-коррозии радиального подшипника при пульсирующей нагрузке. Сообщение 2 // *Проблемы трибологии.* – 1998. – № 3. – С. 44-59.
- 7 Shevelya V., Drzymala A., Kalda G., Oleksandrenko V., Shevelya I. Fretting-factor as a parameter of wear-resistance at boundary friction // *Proc. Int. Scien. Conf. Mechanics 2002, Rzeszow, July 2002.* – P. 279-283.
- 8 Шевеля В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения // *Трение и износ.* – 1993. – Т. 14. – № 1. – С. 48-62.
- 9 Шевеля В.В. О роли релаксационных явлений и субструктурных превращений при трении металлов / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко, Г.С. Калда // *Проблеми трибології.* – 2003. – № 2. – С. 3-11.
- 10 Шевеля В. Процеси механічної і хімічної релаксації при динамічному навантаженні металів / В. Шевеля, В. Олександренко, Г. Калда // *Машинознавство.* – 2003. – № 2 (68). – С. 21-26.
- 11 Алябьев А.Я. Структурные изменения при фреттинг-коррозии / А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля, М.Н. Рожков // *Физико-химическая механика материалов.* – 1969. – № 6.
- 12 Розовский А.Я. Кинетика топохимических реакций. – М.: Химия, 1974. – 221 с.

