

Шевеля В.В.,*
Олександренко В.П.,**
Калда Г.С.**

*Жешувский политехнический университет,
г. Жешув, Польша

**Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОПЛАСТИЧНОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФРЕТТИНГ - КОРРОЗИИ

При эксплуатации машин часто инициатором разрушения деталей в условиях коррозии под напряжением являются фреттинг-повреждения. Коррозия под напряжением может быть обусловлена воздействием на деталь как циклических напряжений, вызывающих развитие коррозионно-усталостных явлений, так и статических, приводящих к проявлению коррозионного растрескивания. Фреттинг-усталостные явления изучены достаточно полно [1 - 3], что способствовало раскрытию их природы. В то же время синергизм явлений, обусловленных действием фреттинга и статических нагрузок в коррозионно-активной среде, изучен недостаточно. Вместе с тем детали ряда ответственных устройств и механизмов (рессоры, оси колес стоек шасси самолета, узлы подвески авиадвигателей и др.) одновременно или периодически подвергаются воздействию как фреттинга, так и повторностатических растягивающих напряжений в агрессивной среде, что вызывает аварийные ситуации.

Влияние фреттинг-коррозии на длительную прочность стали, обусловленную коррозионным растрескиванием, может определяться двумя причинами. Во-первых, проявлением механического фактора: локализованный фреттинг-износ и каверны от фреттинг-коррозии становятся концентраторами напряжений. Долговечность элементов с фреттинг-коррозией существенно ниже, чем долговечность элементов с конструктивным концентратором напряжения [4]. При этом установлено [5], что 90 % всех поломок происходит в местах, где возможно контактное трение деталей, находящихся под нагрузкой. Вторая причина – изменение реологических свойств материала при воздействии фреттинга вследствие протекания в слоях, прилегающих к зоне контактирования, субструктурных процессов, приводящих к изменению характеристик микропластичности стали [6]. При этом установить приоритетность указанных причин по имеющимся экспериментальным данным не представляется возможным. В связи с этим были проведены исследования влияния повреждаемости и субструктурных изменений при фреттинг-коррозии на длительную прочность стали в условиях развития коррозионного растрескивания.

Методика исследований

При проведении комбинированных испытаний на фреттинг-коррозию и коррозионное растрескивание оценить ослабляющее влияние фреттинг-коррозии трудно вследствие неизбежно возникающей в таких испытаниях неконтролируемой концентрации напряжений, определяемой конструкцией сборки сопряжения. Поэтому целесообразно проводить испытания на коррозионное растрескивание образцов, предварительно поврежденных фреттинг-коррозией.

Испытания на фреттинг-износ проводились на модернизированной установке [7], позволяющей наносить фреттинг-повреждения на плоские образцы, которые в последующем использовались для исследований коррозии под напряжением при статическом нагружении. Пара трения (рис. 1, а) реализовала контактирование торца подвижного цилиндрического образца ($D \times d = 37 \times 34$ мм) по неподвижному образцу – балке. Материал образцов: пластина (балка) – сталь 65Г, прошедшая стандартную для данного материала термообработку: закалка от 830 °С в масле с последующим отпуском до твердости HRC46; цилиндрический образец был изготовлен из стали 40Х. Температура измерялась термопарами, установленными на расстоянии 0,5 мм от поверхности трения.

Участки плоских образцов, поврежденные фреттинг-коррозией, исследовались с помощью прибора Talyscan 150, являющегося быстродействующей системой трехмерного сканирования геометрической структуры повреждаемости поверхности. Серии получаемых профилей выстраиваются в трехмерное представление тестируемой поверхности [8]. Проводилось сканирование участков шириной 1 мм с периодичностью 10 мкм 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 изменению объемной геометрической структуры повреждений дорожки трения в зависимости от условий контактного взаимодействия. Степень локального повреждения при фреттинге оценивали фреттинг - фактором Φ [9], представляющем собой отношение максимальной глубины локального повреждения H к среднему равномерному линейному износу h : $\Phi = H / h$ (рис. 1, б).

Эффективным методом исследования субструктурных изменений, протекающих в поверхностных слоях металлов, являются испытания на микропластичность [10]. Сопротивление микропластическим деформациям исследовалось в соответствии с методикой [11].

Практика показывает [12], что лучше всего охрупчивание материала проявляется при действии на образец изгибающего момента, порождающего неравномерность поля напряжений. Для изучения склонности металла к коррозионному растрескиванию была создана установка, позволяющая производить одновременные испытания девяти балочных образцов консольным изгибом (рис. 2). Нагружение образца 1 осуществлялось с помощью гирь, подвешенных на конец рычажного устройства 2. Для испытаний в жидких средах образец 1 помещался в камеру 5 с 3,5 % раствором NaCl. Образцы имели размеры $l \times b \times h = 150 \times 20 \times 3$ мм с односторонним V-образным надрезом ($\alpha = 60^\circ$) глубиной 0,5 мм. При проведении двухступенчатых исследований на образцы с противоположной от надреза стороны наносилось фреттинг-повреждение при заданном числе циклов наработки, после чего они испытывались на коррозионное растрескивание при статическом изгибе. Стойкость материала к коррозионному растрескиванию оценивали по времени до разрушения образца, которое фиксировалось по таймеру, электрическая цепь которого размыкалась при опускании рычага в момент поломки образца.

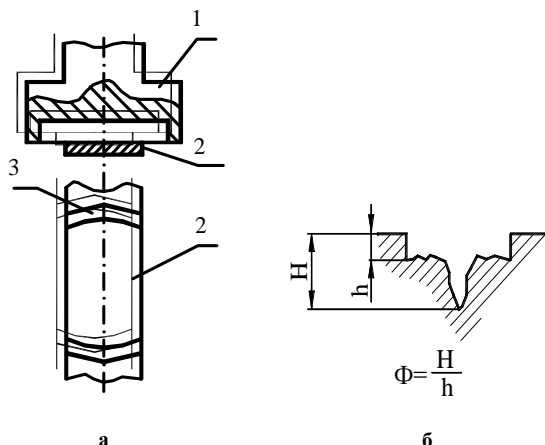


Рис. 1 – Общий вид фреттинг-узла (а) и локальных повреждений, характеризуемых фреттинг-фактором (б):

- 1 – цилиндрический подвижный образец;
2 – плоский неподвижный образец;
3 – дорожка трения

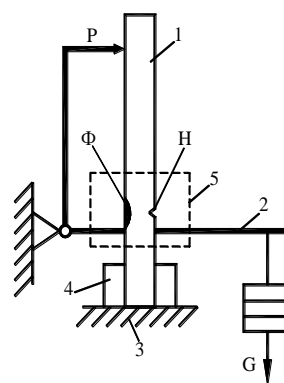


Рис. 2 – Принципиальная схема установки для испытаний на коррозионное растрескивание:

- 1 – образец; 2 – нагружающее устройство;
3 – станина;
4 – приспособление для закрепления образцов;
5 – камера;
Φ – фреттинг-повреждение; H – надрез

Для изучения влияния числа циклов фреттинг-наработки была выбрана нагрузка $\sigma = 1600$ МПа, обеспечивающая разрушение как исходных образцов, так и подверженных воздействию фреттинга. Зависимость стойкости к коррозионному растрескиванию образцов, предварительно испытанных при различных амплитудах проскальзывания, изучалась при нагрузке $\sigma = 1200$ МПа. Приложение более высоких нагрузок приводило к моментальному разрушению образцов, что не позволяло получить кинетические зависимости. Различную глубину локальных износов при данной амплитуде проскальзывания получали выбором продолжительности наработки.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Одними из основных параметров внешнего механического воздействия, определяющих интенсивность разрушения контактирующих поверхностей при фреттинг-коррозии, являются число циклов реверсивного нагружения и амплитуда проскальзывания. С изменением продолжительности испытаний изменяется площадь фактического контакта сопряженных поверхностей и глубина поверхностных слоев металла, принимающих участие в процессах трения и разрушения. Амплитуда скольжения при фреттинг-коррозии определяет температурно-скоростные условия динамического контактирования поверхностей, существенно влияющие на характер и величину износа [13]. С другой стороны, указанные параметры оказывают воздействие на реологическое поведение металла в зоне контакта. Все это в совокупности может сказываться на изменении чувствительности материала к коррозионному растрескиванию.

Установлено (рис. 3), что время до разрушения образцов при коррозионном растрескивании τ_p с увеличением числа циклов фреттинг-наработки до $N_{\phi} = 10^4$ изменяется незначительно по сравнению с исходным состоянием. Повышение продолжительности испытаний до $5 \cdot 10^4$ циклов приводит к катастрофическому падению стойкости образцов при испытании на коррозионное растрескивание (снижение τ_p на несколько порядков). А после фреттинг-наработки 10^7 циклов образцы моментально разрушались при статическом изгибе в коррозионно-активной среде.

Объяснить такое снижение долговечности только уменьшением площади сечения образца в результате фреттинг-износа не представляется возможным, так как даже после $5 \cdot 10^7$ циклов фреттингования средний линейный износ составляет всего лишь порядка 10 мкм. О слабом влиянии продолжительности фреттинг-воздействия до 10^7 циклов на макромеханические характеристики стали свидетельствует и незначительное изменение предела прочности образцов σ_e при стандартном испытании на растяжение (рис. 3).

Были проведены исследования влияния продолжительности наработки на характеристики микропластичности стали 65Г и ее локальную повреждаемость.

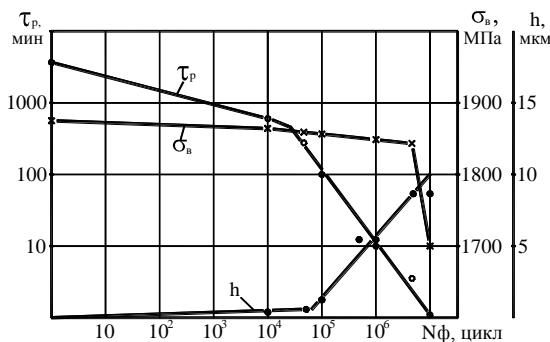


Рис. 3 – Зависимость среднего линейного износа (h), времени до разрушения (τ_p) при коррозионном растрескивании и предела прочности (σ_a) стали 65Г от числа циклов предварительного фреттингования ($p = 30$ МПа; $f = 30$ Гц; $A = 200$ мкм, $\sigma = 1600$ МПа)

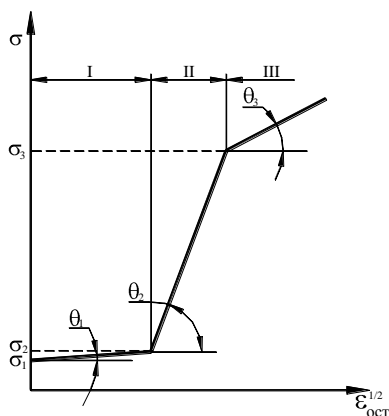


Рис. 4 – Обобщенная зависимость между приложенным напряжением и остаточной микропластической деформацией

В качестве показателей микропластичности использовали критическое напряжение микротекучности σ_3 и коэффициенты упрочнения A_2 и A_3 , характеризующие изменения реологических свойств материала (рис. 4). В общем случае на кривых микропластичности могут проявляться три стадии, которые коррелируют с закономерностями амплитудной зависимости внутреннего трения (демпфирующей способности) [14]. Критическое напряжение микротекучности σ_3 характеризует степень охрупчивания (изменение предела упругости) металла, а коэффициенты A_2 и A_3 , равные тангенсу угла наклона Θ зависимости $\sigma = f \sqrt{\epsilon_{ост}}$, характеризуют деформационное упрочнение на соответствующих участках. По относительному изменению критического напряжения σ_3 и наклона кривых на II и III стадиях можно судить об изменении плотности, подвижности и степени торможения дислокаций, осуществляющих неупругую деформацию, а значит – о степени деформационного упрочнения в микрообъемах.

Зависимость характеристик микропластичности материала от числа циклов наработки при фреттинге имеет сложный характер (рис. 5). На начальном этапе фреттингования ($N_\phi = 10^4$) критическое напряжение микротекучности σ_3 и коэффициенты упрочнения A_2 и A_3 изменяются незначительно. Это связано с латентным периодом развития фреттинга, обусловленным наличием на поверхности естественных пленок окислов, предохраняющих непосредственное контактирование сопряженных материалов и обеспечивающих их защиту от локальной повреждаемости, о чем свидетельствует низкое значение фреттинг-фактора. Вследствие этого склонность стали под воздействием фреттинга к коррозионному растрескиванию растет (рис. 3), однако интенсивность происходящих изменений невысока.

В дальнейшем при $N_\phi = 5 \cdot 10^4$ циклов вследствие разрушения поверхностных пленок образуются ювенильные участки поверхностей. Данная стадия контактирования (приработка) характеризуется большими удельными нагрузками на пятна контакта из-за пониженной фактической площади соприкосновения, что приводит к значительным локальным пластическим деформациям металла. Макродеформационный процесс характеризуется развитием третьей стадии микропластичности. Видно (рис. 5), что при $N_\phi = 5 \cdot 10^4$ коэффициент динамического упрочнения A_3 резко возрастает, т.е. способность структуры к пластическим деформациям снижается. В результате на данном этапе преобладающее развитие получают

процессы схватывания, вызывающие интенсивное локальное повреждение в местах фактического контакта поверхностей.

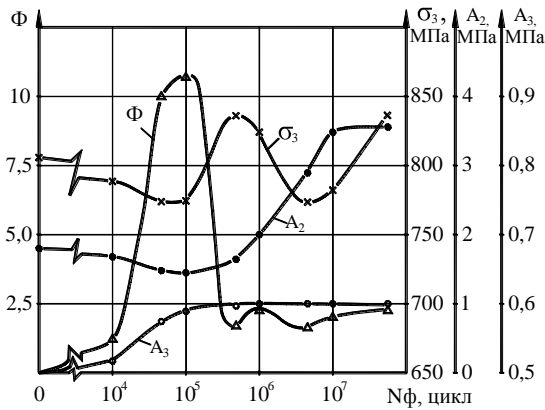


Рис. 5 – Зависимость фреттинг-фактора и характеристик микропластичности стали 65Г от числа циклов фреттингования ($\rho=30\text{МПа}$; $f=30\text{Гц}$; $A=200\text{мкм}$)

свойств и, как следствие, происходит некоторое увеличение фреттинг-фактора после наработки $N_{\phi} = 10^6$ циклов. Последующее снижение σ_3 приводит к уменьшению величины фреттинг-фактора, несмотря на рост коэффициента упрочнения A_2 . В последующем опять происходит рост упругих свойств поверхности. Таким образом, развитие процессов повреждения при фреттинге связано с проявлением реологических свойств поверхности, которые циклически изменяются в процессе контактирования. Общая тенденция изменения указанных свойств поверхности в ходе фреттингования характеризуется исчерпанием запаса микропластичности материала.

Действие реологического и повреждающего факторов приводит к резкому снижению сопротивляемости металла коррозионному растрескиванию под влиянием фреттинг-коррозии (рис. 3). Определенное разупрочнение материала (снижение показателей σ_3 и A_2) уже на начальной стадии фреттингования сопровождается некоторым снижением стойкости против коррозионного растрескивания (рис. 3), а после наработки $N_{\phi} = 10^5$ циклов время до разрушения образца при выдержке под статической нагрузкой снижается более значительно. Важным условием развития коррозионного растрескивания [15] является концентрация напряжений в локализованных объемах, приводящая к возникновению и развитию трещин. Фреттинг характеризуется значительными локальными повреждениями, проявляющимися уже в первые 20 ... 25 % общей долговечности [16]. В период приработки неровности деформируются, происходит их холодная сварка, а при дальнейшем относительном смещении эти сваренные неровности разрываюются либо по поверхности раздела, либо внутри неровностей [17]. В результате возникает поврежденность, обуславливающая значительную величину фреттинг-фактора (рис. 5). Уже на ранних стадиях фреттинга на границе между участком со скольжением и участком без скольжения происходит зарождение трещины [18].

Таким образом, влияние начального этапа фреттинга ($N_{\phi} = (5 \dots 10) \times 10^4$) на процесс коррозионного растрескивания связано с поверхностными повреждениями (вырывами, кавернами), характеризующимися повышенным фреттинг-фактором, что способствует росту концентрации напряжений и снижению времени до растрескивания τ_p .

В процессе последующей наработки происходит снижение фреттинг-фактора, что способствует геометрической деконцентрации напряжений. Однако время до растрескивания при этом также значительно снижается. Это обусловлено действием реологических факторов, проявляющихся в увеличении деформационного охрупчивания (росте A_2 , A_3 и σ_3). Чем больше металл приобретает способность сопротивляться микротекучести, проявляя более высокую упругость, тем значительнее проявляется концентрация напряжений вследствие утраты материалом структурной подвижности. В результате снижения релаксационных свойств поверхностного слоя материала уменьшается время до растрескивания при наложении внешней нагрузки. При наработке $N_{\phi} = 10^7$ циклов происходит взаимное усиление реологического (повреждающего) и геометрического факторов, что приводит к падению σ_e до 1700 МПа и моментальному разрушению образца при испытании на коррозионное растрескивание.

Равномерный износ при этом незначителен, а величина фреттинг-фактора (Φ) имеет экстремальное значение. В дальнейшем, с повышением числа циклов наработки увеличивается фактическая площадь контактирования, снижается давление в контакте, пластическая деформация локализуется в приповерхностном слое, на что указывает стабилизация коэффициента A_3 . Получают развитие некорпоративные реологические процессы, связанные со второй стадией микротекучести, характеризуемые показателями σ_3 и A_2 . Скорость роста глубины локальных повреждений снижается и происходит уменьшение величины фреттинг-фактора, который проявляет осциллирующую зависимость от числа циклов наработки, что связано с изменением микропластических свойств металла в ходе фреттингования. Увеличение критического напряжения микротекучести σ_3 и рост A_2 указывает на стабилизацию структуры, снижение ее диссипативных

Известно, что необходимым условием возникновения фреттинг-коррозии является относительное проскальзывание контактирующих поверхностей. В пределах упругого деформирования пятен фактического контакта происходит неповреждающее демпфирование вибрации и разрушения поверхностей не наблюдается [19]. Увеличение амплитуды скольжения и снижение локализации контактного взаимодействия микрообъемов зоны трения может оказывать влияние на реологическое поведение металла и связанные с ним релаксационные процессы, обуславливающие развитие фреттинг-повреждений и предрасположенность материала к коррозионному растрескиванию.

На рис. 6 показано влияние глубины повреждений и амплитуды скольжения на время до растрескивания образцов. Наиболее чувствительны к коррозии под напряжением образцы после фреттинга при амплитуде 50 мкм. При снижении и повышении величины относительного перемещения контактирующих поверхностей стойкость образцов к разрушению под действием статической нагрузки и коррозионно-активной среды растет.

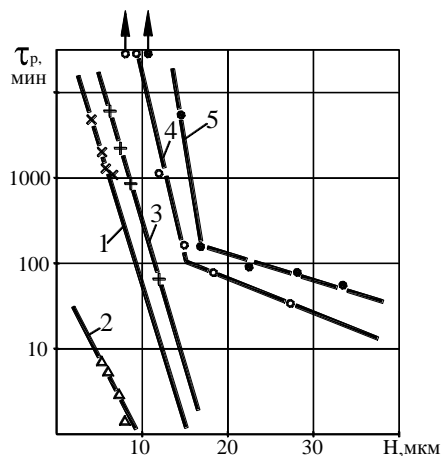


Рис. 6 – Влияние максимального локального износа на склонность стали к коррозионному растрескиванию после предварительного фреттинга при амплитудах скольжения: 1 – $A = 25 \text{ мкм}$; 2 – $A = 50 \text{ мкм}$; 3 – $A = 100 \text{ мкм}$; 4 – $A = 200 \text{ мкм}$; 5 – $A = 300 \text{ мкм}$

Особенностью фреттинг-коррозии является локализованность взаимодействия поверхностей, обуславливающая неравномерность износа с образованием вырывов. Наблюдающийся линейный характер зависимостей [8] максимальных локальных износов от количества циклов наработки при различных амплитудах скольжения может показаться тривиальным. В этом случае более объективным показателем повреждаемости является износ, приведенный к единице пути трения. Видно (рис. 7), что в зависимости от величины виброперемещения приведенный износ имеет экстремальную зависимость. При увеличении амплитуды до $A = 50 \text{ мкм}$ износостойкость значительно падает, а при дальнейшем повышении амплитуды скольжения до $A = 200 \dots 300 \text{ мкм}$ приведенный износ уменьшается и впоследствии стабилизируется.

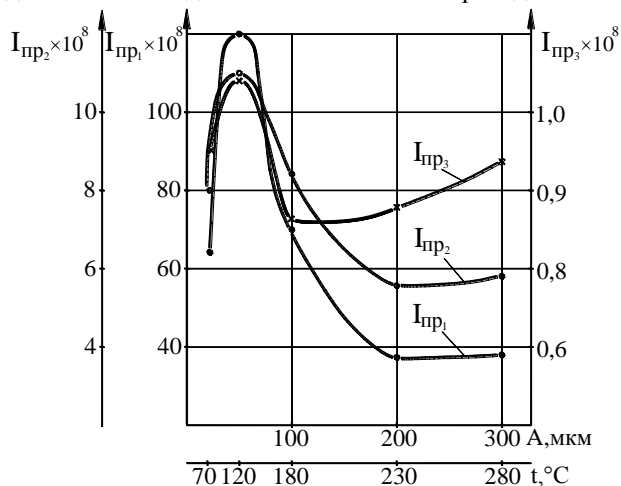


Рис. 7 – Зависимость приведенного максимального локального износа от амплитуды проскальзывания и количества циклов фреттинга:

$$I_{пр1} - N_{ф} = 10^5; I_{пр2} - N_{ф} = 10^6; I_{пр3} - N_{ф} = 10^7$$

С величиной амплитуды скольжения при фреттинг-коррозии связана скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей и развиваемая при этом температура их нагрева. В свою очередь температурные условия при определенных частотных параметрах механических колебаний определяют возникновение максимумов внутреннего трения, способствующих деконцентрации контактных напряжений, локализации и однородности деформации за счет необратимого рассеивания подводимой механической энергии в точках фактического контакта с превращением ее в теплоту [1, 13]. Это обеспечивает снижение динамической напряженности контактирующих поверхностей и рост сопротивления повреждаемости. В низоамплитудном диапазоне проскальзывания при температуре $40 - 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ релаксационный максимум внутреннего трения связан с механизмом Сноэка (диффузия атомов внедрения в поле действующих напряже-

ний в металлах с ОЦК решеткой). В районе температур 200 ... 350 °С при $A = 200 \dots 300$ мкм возможно возникновение деформационного пика внутреннего трения по механизму Кестера (взаимодействие дислокаций с атомами примесей). В указанных условиях динамического контактирования сталь проявляет повышенную фреттингостойкость. В диапазоне режимов нагружения и соответствующих температур, не способствующих проявлению высокого уровня внутреннего трения, развиваются повреждающие процессы релаксации напряжений, связанные со схватыванием и образованием хрупких трещин, что вероятно, характерно для амплитуд скольжения вблизи 50 мкм, когда наблюдается повышенная повреждаемость. Вместе с тем, температурная зависимость релаксационного внутреннего трения не соответствует изменению чувствительности стали к коррозионному растрескиванию в зависимости от амплитуды вибропроскальзывания.

Виброперемещения при фреттинге и высокие удельные нагрузки способствуют реализации в ходе динамического контактирования поверхностей амплитудозависимого внутреннего трения, одним из проявлений которого является микропластическое внутреннее трение (связанное с образованием новых структурных дефектов), уровень которого может достигать довольно высоких значений. С одной стороны, образование дефектов требует энергетических затрат, вследствие чего происходит рассеивание подводимой механической энергии, с другой – их необратимое накопление вызывает концентрацию напряжений, снижает субструктурную подвижность материала приповерхностных слоев трибоэлементов, способствуя его охрупчиванию, что при последующем воздействии статических нагрузок и коррозионно-активной среды может оказывать влияние на чувствительность стали к коррозионному растрескиванию.

Проведенные исследования характеристик микропластичности стали 65 Г в зависимости от амплитуды скольжения (рис. 8) при постоянной удельной нагрузке ($p = 30$ МПа) и наработке $N_{\phi} = 10^7$ циклов выявили экстремальную зависимость величин критического напряжения микротекучести

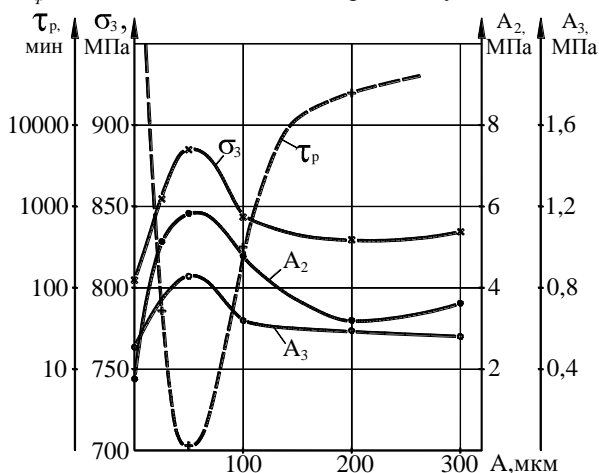


Рис. 8 – Зависимость характеристик микропластичности (σ_3 , A_2 , A_3) стали 65Г и времени до разрушения при выдержке под статической нагрузкой ($\sigma = 1200$ МПа) от амплитуды предварительного фреттинга ($p = 30$ МПа; $f = 30$ Гц; $H = 10$ мкм)

рнее трение относится к исчерпаемым релаксационным процессам, интенсивность которого для данного материала определяется нагрузочно-скоростными условиями контактного вибропроскальзывания. Чем более стабильной получается структура стали в результате фреттинг-процесса, то есть чем меньше становится запас микропластичности, тем материал приобретает большую склонность к разрушению под действием статической нагрузки в коррозионной среде. Это подтверждается существованием связи (рис. 8) между временем до разрушения образца (приведенного для величины износа 10 мкм) и характеристиками микропластичности, сформировавшимися в результате фреттингования стали. Таким образом, снижение долговечности металла при коррозионном растрескивании под влиянием фреттинг-коррозии происходит как от воздействия геометрического так и структурного факторов, ответственных за концентрацию напряжений.

Выводы

Фреттинг-коррозия приводит к катастрофическому (в $10^2 \dots 10^4$ раз) падению стойкости (времени до разрушения) образцов к коррозионному растрескиванию в связи с потерей материалом микропластичности и возникающими локальными повреждениями. Макропоказатели прочности металла при этом

уменьшаются незначительно. На начальных этапах фреттинга определяющим фактором, влияющим на снижение времени до разрушения образцов, является повреждающий, характеризуемый фреттинг-фактором. В последующем – преобладающим становится фактор реологический, обусловленный снижением релаксационных свойств материала поверхности после фреттинга. Установлено существование связи между временем до коррозионного разрушения образцов при статическом нагружении и характеристиками микропластичности металла, сформировавшимися в результате фреттинг-воздействия при различных амплитудах проскальзывания. Чем сильнее снижается релаксационная способность металла (что характерно для низкоамплитудной зоны вблизи $A = 50\text{мкм}$), то есть чем меньше запас микропластичности, тем более материал склонен к разрушению в условиях коррозионного растрескивания.

Литература

1. Шевеля В.В. Фреттинг-усталость металлов / В.В. Шевеля, Г.С. Калда. – Хмельницкий: Поділля.– 1998. – 199с.
2. Похмурский В.И. Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения. – К.: Наукова думка. – 1974.
3. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272с.
4. Султанов А.Э. Влияние вида коррозии обшивки самолета на предельную величину повреждения/ А.Э. Султанов, А.И. Радченко // Физико-химическая механика материалов. – 1978. – Т.14, № 2. – С.92-96.
5. Heywood R.B. Designing against fatigue // Chapman and Hall. – London. – 1962.
6. Шевеля В.В. Влияние фреттинга на микропластичность и коррозионное растрескивание конструкционных материалов / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко, Г.С. Калда // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов МНТК. – ДонНТУ, 2004. – Т.3. – С. 230-233.
7. Кузьменко А.Г. Количественная оценка фреттинг-коррозии радиального подшипника при пульсирующей нагрузке. Сообщение 2 / А.Г. Кузьменко, Б.С. Волынский, Л.В. Заболотная // Проблемы трибологии. – 1998. – № 3 – С. 44-59.
8. Шевеля В.В. Развитие геометрической структуры повреждений при фреттинг-коррозии металлов/ В.В. Шевеля, В.Е. Любимов, В.П. Олександренко // Проблемы трибологии. – 2005. – №1. – С.143-148.
9. Shevelya V. Fretting-factor as a parameter of wear-resistance at boundary friction / V. Shevelya, A. Drzymala, G. Kalda, V. Oleksandrenko, I. Shevelya // Scientific Bulletins of Rzeszow University of Technology. – 2002. - № 193. – P. 279-283.
10. Хенкин М.Л. О связи между изменением тонкой структуры и сопротивлением микропластическим деформациям металлов и сплавов // Известия АН СССР. Металлы. – 1967. – № 4. – С. 90-96.
11. А.с. № 536418 СССР. Устройство для определения остаточных деформаций в материалах при изгибе пластин равного сопротивления / В.В.Шевеля, А.Н. Гладченко, И.И. Ильинский. – БИ. – 1976. – №43.
12. Браун У. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации / У. Браун, Дж. Сроули. – М.: Мир, 1972. – 246с.
13. Шевеля В.В. О роли релаксационных явлений и субструктурных превращений при трении металлов / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко, Г.С. Калда // Проблемы трибологии. – 2003. - № 2. – С. 3-11.
14. Кон-Сю Ю. Микродеформация, гистерезис и внутреннее трение поликристаллических сплавов / Ю. Кон-Сю, Л.А. Соловьев, Г.П. Коваль // Аналитические возможности метода внутреннего трения. – М.: Наука. – 1973. – С. 28-34.
15. Романив О.Н. Фактор геометрии трещин и структурная чувствительность коррозионной трещиностойкости низколегированных сталей при длительном нагружении / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин, А.З. Студент // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – Т.19, №5. – С. 3-13.
16. Endo K. Effects of environment on fretting fatigue / K. Endo, H. Goto // Wear. – 1978. – V. 48, №1. – P. 347-367.
17. Bethune B. Adhesion between fretting steel surfaces / B. Bethune, R.B. Waterhouse // Wear. – 1965. – V.8, № 22.
18. Waterhouse R.B. The role of adhesion and delamination in fretting wear of metallic materials // Wear. – 1977. – V. 45, № 3. – P. 355-364.
19. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. – К.: Техніка, 1974. – 272с.

Надійшла 27.04.2007