

Вячеслав Драган
Сергей Семенюк
Сергей Ляликов
Брестский политехнический
институт

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕТРУЗОК НА НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВАХ ПРИ ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТИ

В настоящее время представления о природе фреттинга еще далеки от своего окончательного завершения. Это обстоятельство во многом определяет то, что надежность узлов, работающих в условиях контактного взаимодействия, определяется по кривым усталости.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований накопления усталостных повреждений под влиянием фреттинг-коррозии при программном нагружении. Было установлено резкое снижение интенсивности накопления повреждений, если в блоке программного нагружения при фреттинге имеются ступени, уровень напряжений на которых превышает предел выносливости материала. При исследовании причин упрочнения материала на высоких ступенях блока было обращено внимание на аномальные свойства поверхностного слоя образца, приведшие к наведению остаточных сжимающих напряжений на высоких ступенях за счет поверхностного пластического деформирования.

Для подтверждения этого предположения образцы из сплава ВТ-14 были испытаны по упрочняющему режиму, показанному на рис.1. Для создания поверхностного пластически деформированного слоя образцы без фреттинга подвергались на протяжении $2 \cdot 10^4$ циклов действию напряжения $\sigma_{II} = 500$ МПа, что превышает предел выносливости гладкого образца для той же асимметрии цикла нагружения. Такое количество циклов нагружения достаточно для наведения в поверхностном слое циклических пластических деформаций, а соответственно, и остальных напряжений, но недостаточно для возникновения усталостных трещин. Затем устанавливались мостики фреттинга и нагружение производилось при $\sigma_I = 340$ МПа. Через каждые $1,5 \cdot 10^4$ циклов образцы нагружались 10 циклами с $\sigma_{II} = 500$ МПа для того, чтобы не допустить релаксации

остаточных напряжений в поверхностном слое.

При таком характере программного нагружения накопление повреждений происходило только на низкой ступени. Вследствие малого количества циклов нагружения на высокой ступени, суммарное накопление на ней повреждений, полученное линейным суммированием относительных долговечностей составило $a=0.005$. Высокая ступень создавала только упрочняющий эффект, практически не внося повреждений. Однако с увеличением числа циклов на низкой ступени нагружения эффект упрочнения уменьшается. Это связано с релаксацией остаточных напряжений, наведенных на высоких ступенях нагружения.

На рис.1 показана зависимость суммы относительной долговечности "а" от продолжительности низкой ступени n_H . Установлено, что при $n_H < 3 \cdot 10^4$ циклов значение накопленных повреждений при таком программном нагружении не происходит и трещины фреттинг-усталости в образцах не образуются. При $n_H > 4 \cdot 10^4$ циклов начинается проявляться эффект релаксации остаточных напряжений и частичное включение низкой ступени в процесс накопления повреждений. При этом значение "а" уменьшается до единицы. Чтобы оценить уровень остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое, для сплавов ВТ14 и Д16АТ были построены зависимости предела текучести σ'_T от удаления слоя n по отношению к поверхности образца (рис.2). Эти зависимости построены по методике, основанной на вдавливании в поверхность образца шарика с различными усилиями P .

Предел текучести слоя определяется по формуле:

$$\sigma'_T = \frac{P}{k_B A_B \pi r_{III} \sqrt{2r_{III} h_L - h_L^2}}, \quad (1)$$

где r_{III} - радиус шарика;

h_L - глубина лунки;

A_B - обобщенный параметр поля линий скольжения;

k_B - постоянный коэффициент материала.

Зависимость A_B и величины $2n/r_{III}$ (где n - радиус пластической зоны под индентором) от относительной глубины лунки n_L/r_{III} представлены на рис.3.

Коэффициент k_B определяется по формуле:

$$k_B = \frac{\sigma_T^Y}{\sigma_T}, \quad (2)$$

где σ_T^X -условный предел текучести на стадии стабилизации (вычисляется по формуле 1 с $k_B = 1$).

Исследования проводились при помощи шарика диаметром $d_{III} = 1.6 \text{ мм}$. При таком d_{III} минимальная глубина поверхностного слоя, для которого можно определить σ_T , составляет 0.06 мм . Из рис.2 следует, что на глубине 0.08 мм для сплава Д16АТ предел текучести составляет 0.6 от предела текучести материала, а для сплава ВТ14 на глубине 0.07 мм - 0.41 .

Зная величину предела текучести поверхностного слоя σ_T' , можно оценить уровень возникших в нем остаточных напряжений после приложения к образцу растягивающих напряжений $\sigma > \sigma_T'$. При этом считается, что участки упрочнения диаграмм деформирования поверхностного слоя и внутренних объемов материала параллельны (рис.4).

При нагружении деформации поверхностных и внутренних слоев равны, однако в связи с тем, что предел текучести поверхностного слоя ниже предела текучести материала, в нем начинают накапливаться пластические деформации, в то время как внутренние слои работают упруго. Остаточные напряжения можно определить по схеме, представленной на рис.4:

$$\sigma_{\text{ост}} = -(\sigma - \sigma_T'), \quad (3)$$

где σ_T' -предел текучести поверхностного слоя.

σ -приложенное напряжение.

При нагружении образцов из сплава ВТ-14 напряжением 500 МПа в поверхностном слое образуются остаточные напряжения сжатия величиной не менее 100 МПа .

Эти остаточные напряжения сжатия уменьшают средние напряжения цикла при неизменной амплитуде, что приводит к увеличению долговечности на низкой ступени блока по сравнению с долговечностью при регулярном нагружении, вследствие упрочнения материала на высокой ступени.

Если напряжения на ступенях блока программного нагружения не превышают уровень предела текучести поверхностного слоя, то остаточные напряжения на высокой ступени не образуются и накопление повреждений происходит на всех ступенях. В этом случае значение суммы относительной долговечности при испытаниях в условиях фреттинг-коррозии и полученные на гладких образцах совпадают.

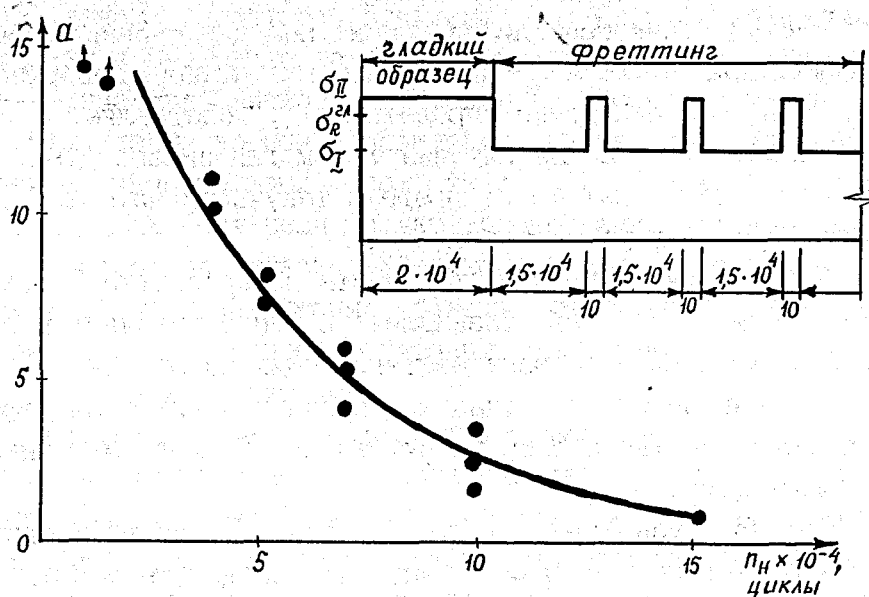


Рис.1. Зависимость α по образованию усталостной трещины в сплаве ВТ14 при действии фреттинг-коррозии от продолжительности низкой ступени упрочняющего режима.

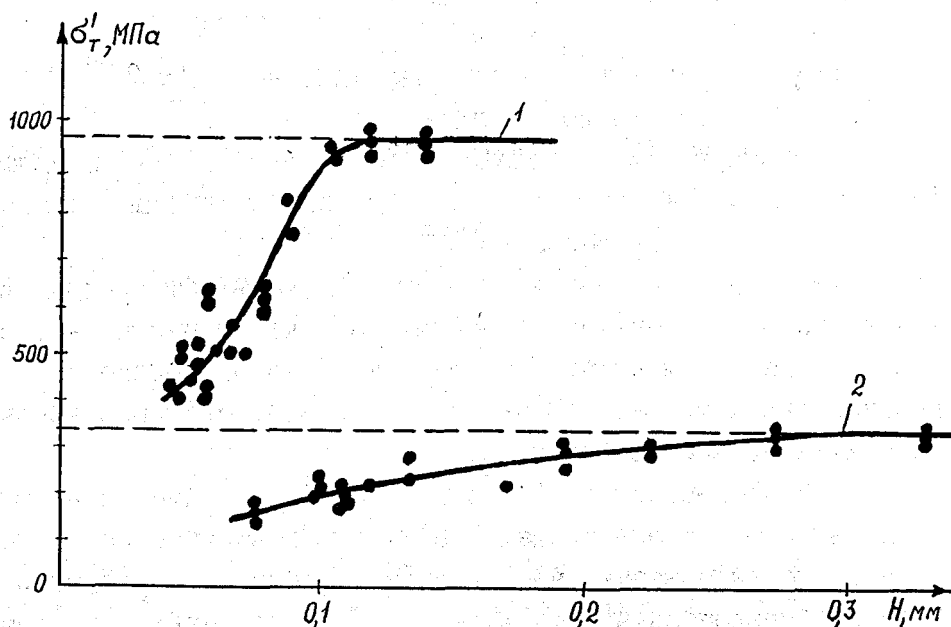


Рис.2. Зависимость предела текучести сплавов ВТ14 (1) и Д16АТ (2) от удаления по отношению к поверхности образца.

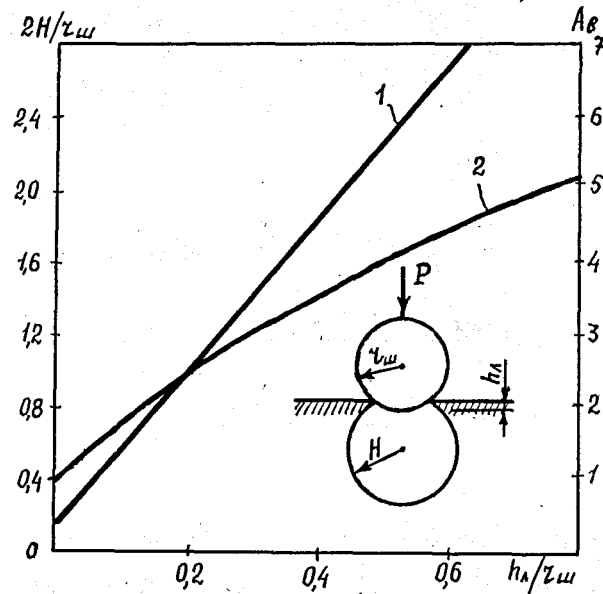


Рис.3. Зависимости величины $2H/\gamma_{\text{ш}}$ (1) и обобщенного параметра поля линий скольжения A_{δ} (2) от относительной глубины лунки $h_{\text{л}}/\gamma_{\text{ш}}$.

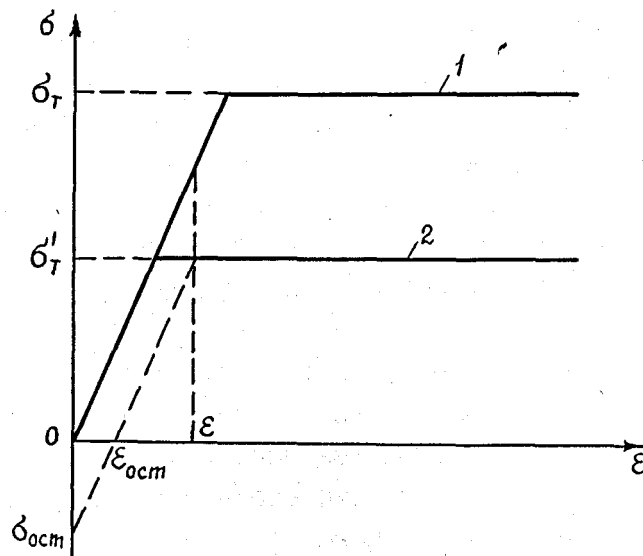


Рис.4. Схема определения остаточных напряжений в поверхностном слое материала (1-диаграмма деформирования материала; 2-диаграмма деформирования поверхностного слоя).