

Оценка циклической долговечности стали 15кп в условиях фреттинга при варьировании уровня контактного напряжения и размера контртела

Г. В. Цыбанев, Ю. П. Кураш

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Проведены испытания на фреттинг-усталость пары сталь 15кп–сталь 45 при варьировании размера контртела и контактного напряжения. Получена полиномиальная модель регрессионного анализа второго порядка, достаточно точно аппроксимирующая результаты испытаний. На основе этой модели спрогнозировано влияние контактных напряжений и масштабного фактора на циклическую долговечность при фреттинг-усталости. Рассмотрен механизм взаимодействия между образцом, контртелом и продуктами фреттинга, позволяющий объяснить результаты выполненного прогноза.

Ключевые слова: фреттинг-усталость, долговечность, размер контакта, контактное напряжение, математическая модель, прогноз долговечности.

Введение. В последнее время увеличилось количество исследований и публикаций, посвященных вопросам фреттинга и фреттинг-усталости. Это связано с тем, что с повышением ресурса изделий, работающих в условиях переменных нагрузок, в очагах фреттинга зарождаются и развиваются трещины. Такие трещины опасны тем, что ввиду специфики повреждения, обусловленного взаимодействием прижатых поверхностей деталей, обнаружение трещин фреттинг-усталости традиционными методами неразрушающего контроля часто затруднено.

В соответствии с данными американских исследователей [1] 90% разрушений авиационных деталей происходит в зонах, где наблюдается контакт и трение циклически нагруженных элементов. Фреттинг-усталостное повреждение характерно для заклепочных, болтовых, штифтовых, пресовых, замковых соединений валов, осей, дисков колес, турбин, лопаток компрессоров, трубопроводов энергетического оборудования. Несмотря на известные расчетные методы определения долговечности в условиях фреттинг-усталости [2–6], более надежная оценка может быть получена экспериментально, особенно для фреттинг-пар с применением новых материалов, обработок и покрытий. Однако варьируемые исследователями многие взаимосвязанные параметры при фреттинг-усталости [7], влияние конфигурации контакта [8] и химического состава контактирующих поверхностей, масштабного фактора [9, 10], жесткости приспособлений, создающих скольжение в контакте [11, 12], схема циклического нагружения позволяют говорить только об отдельных наблюдаемых закономерностях, а не об использовании данных экспериментов в расчетах долговечности конкретных элементов конструкций. Попытка стандартизации методов и оборудования для испытаний на фреттинг-усталость [13] позволила наметить основные требования к испытаниям, хотя до настоящего времени продолжается накопление экспериментальных данных по разным методикам испытаний и установление закономерностей процесса повреждения и разрушения материалов в реализуемых условиях испытаний.

Цель работы заключалась в исследовании влияния масштабного фактора (размера контртела) на циклическую долговечность стали при различных контактных напряжениях. Экспериментальные данные получены с использованием ранее разработанной методики [14]. В отличие от работ [9, 10], где исследование проводилось для условий контакта плоскости с цилиндром, в нашем случае реализовывался контакт плоскость по плоскости, при котором обнаружены несколько иные закономерности повреждения при фреттинг-усталости [8].

Методика испытаний, материалы. Испытания проводили с помощью разработанного комплекса для исследования фреттинг-усталости материалов [14, 15]. При этом образец подвергается циклическому растяжению–сжатию, а фреттинг создается в результате прижатия к нему с двух сторон накладок. Сечение рабочей части плоского образца составляет 5×4 мм при длине 30 мм. Площадь контакта контртела с образцом варьировали путем изменения размера контртела A в направлении оси нагружения, который составлял 0,45; 1; 2,25 и 4,15 мм, в то время как второй размер контртела перекрывал образец по ширине рабочей части, равной 5 мм. Варьировали также уровень номинальных контактных напряжений $P_k = 60; 90$ и 120 МПа. Параметры фреттинга и циклического нагружения измеряли посредством протарированных тензодатчиков с усилением, фильтрацией, регистрацией и первичной обработкой электрических сигналов на персональном компьютере в процессе проведения эксперимента.

Образец для испытаний изготавливали из низкоуглеродистой качественной стали феррито-перлитного класса 15кп, контртело – из среднеуглеродистой стали 45. При испытаниях на статическое растяжение характеристики сталей 15кп и 45 соответственно следующие: предел прочности 380 и 620 МПа; предел текучести 230 и 390 МПа; относительное удлинение 27 и 26%; относительное сужение 69 и 67%. Фреттинг-пара сталь 15кп–сталь 45 отражает сочетание материалов узла крепления диска колеса грузовых автомобилей типа МАЗ, КраЗ, ЗИЛ, ГАЗ к ступице.

Циклические долговечности во всех испытаниях определяли по моменту разделения образца на две части.

Результаты испытаний на усталость и фреттинг-усталость. С учетом ранее [15] полученных данных по фреттинг-усталости стали 15кп испытания проводили при $P_k = 90$ МПа и размерах контртела $A = 1$ и 4,15 мм (рис. 1). Из представленных на рис. 1 данных следует, что при таком уровне контактного напряжения изменение размера контртела от 1 до 4,15 мм практически не влияет на усталостные характеристики стали 15 кп. Значительное рассеяние результатов испытаний при “чистой” усталости и фреттинг-усталости позволяет без привлечения статистических критериев говорить о принадлежности обеих кривых фреттинг-усталости к одной генеральной совокупности.

Отметим также, что для исследуемой фреттинг-пары и реализованных уровней нагружения предел выносливости в условиях фреттинга снижается приблизительно в 1,5 раза. Как было показано ранее [15], не очень значительное влияние фреттинга на усталостные характеристики стали 15кп обусловлено ее высокой циклической пластичностью.

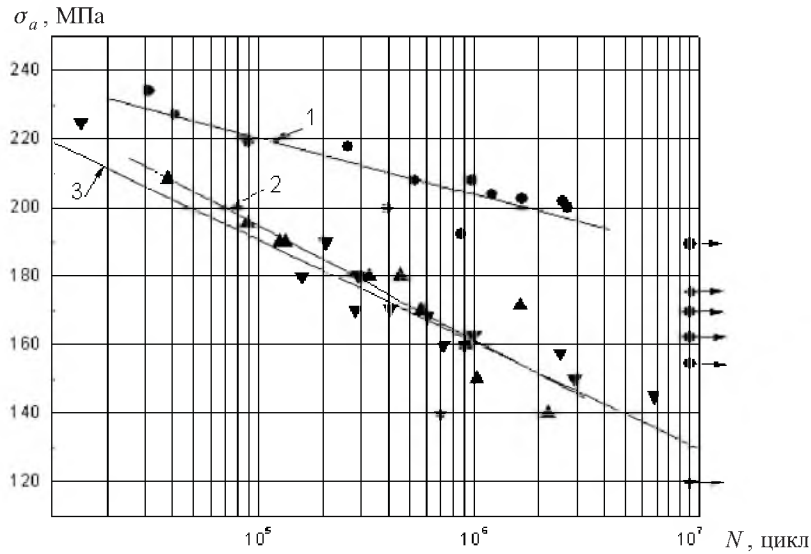


Рис. 1. Кривые усталости стали 15кп: 1, ● – при “чистой” усталости; 2, ▲, 3, ▼ – при фреттинг-усталости пары сталь 15кп – сталь 45 ($P_k = 90$ МПа, $A = 1$ и 4,15 мм соответственно).

Поскольку при других уровнях контактного напряжения и размерах контртела результаты могут отличаться от этой закономерности, было выполнено несколько экспериментов для оценки влияния данных факторов на циклическую долговечность. Планирование и оптимизация эксперимента не проводились, так же, как и оценка полученного таким образом плана. Значения долговечностей осредняли для случаев нескольких испытаний при одинаковых параметрах фреттинга и циклической нагрузки. На рис. 2 в факторном пространстве показано изменение параметров фреттинга и циклической нагрузки.

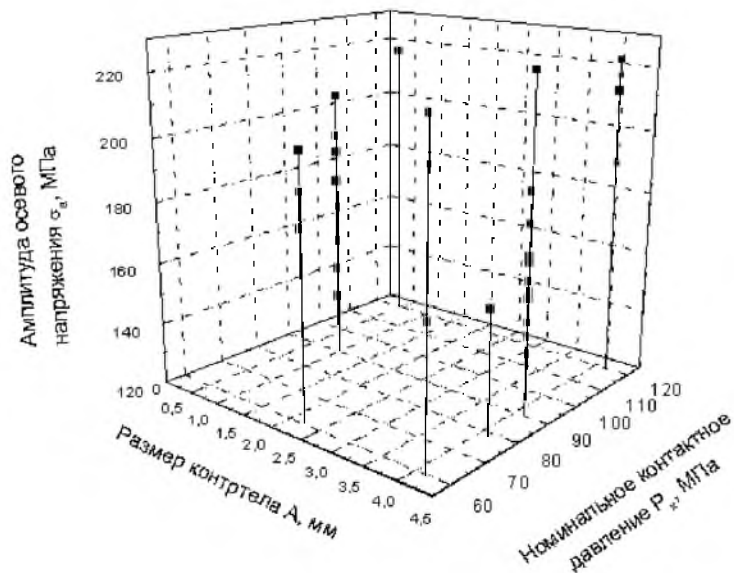


Рис. 2. Графическое представление выполненных экспериментов в факторном пространстве.

Для оценки взаимовлияния исследуемых факторов определяли коэффициенты парных корреляций по зависимости [16]

$$r_{X_1 X_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{1i} - \bar{X}_1)(X_{2i} - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{1i} - \bar{X}_1)^2 \sum_{i=1}^n (X_{2i} - \bar{X}_2)^2}},$$

где X_1, X_2 – оцениваемая пара факторов, которая поочередно принимает значения σ_a, A и P_k ; \bar{X}_1, \bar{X}_2 – средние значения оцениваемых факторов; i – номер эксперимента; n – количество экспериментальных точек.

Результаты расчета приведены в табл. 1 и на рис. 3 в виде матрицы диаграммы рассеяния данных. Ее диагональный элемент (рис. 3) иллюстрирует гистограмму распределения исследуемого фактора, внедиагональный – распределение одного фактора в зависимости от другого в соответствии с табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Матрица коэффициентов парных корреляций

Факторы	σ_a	A	P_k	$\lg N$
σ_a	1	-0,056	0,090	-0,887
A	-0,056	1	-0,088	0,106
P_k	0,090	-0,088	1	-0,299
$\lg N$	-0,887	0,106	-0,299	1

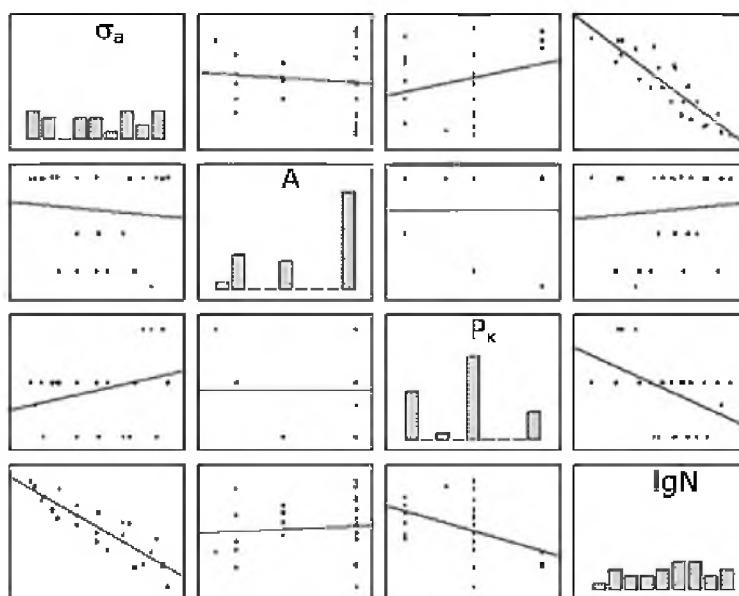


Рис. 3. Матрица диаграммы рассеяния данных.

Анализ полученных расчетных величин коэффициентов корреляции (табл. 1) с учетом их графического представления в виде матрицы диаграммы рассеяния данных (рис. 3) свидетельствует об отрицательной корреляционной зависимости между долговечностью до разрушения и амплитудой осевой нагрузки. Между долговечностью до разрушения и размером контртела наблюдается очень слабая положительная зависимость, между долговечностью до разрушения и номинальным контактным напряжением – слабая отрицательная зависимость. Корреляционные зависимости между независимыми переменными незначительны, что подтверждает их линейную независимость.

Построение математической модели для оценки циклической долговечности при варьировании исследуемыми факторами. Согласно имеющимся в литературных источниках данным о нелинейном влиянии размера контртела и контактного давления на долговечность до разрушения целесообразно построить полиномиальную модель регрессионного анализа второго порядка [16–23], где в качестве функции отклика принимается логарифм числа циклов до разрушения $\lg N$:

$$\begin{aligned} \lg N = & b_0 + b_1\sigma_a + b_2A + b_3P_k + b_4\sigma_a A + b_5AP_k + \\ & + b_6P_k\sigma_a + b_7\sigma_a^2 + b_8A^2 + b_9P_k^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Данная модель включает как главные эффекты (σ_a , A , P_k) и их квадраты (σ_a^2 , A^2 , P_k^2), так и парные эффекты взаимодействия ($\sigma_a A$, AP_k , $P_k\sigma_a$).

Число уровней факторов и количество выполненных экспериментов для адекватного определения коэффициентов уравнения регрессии (1) соответствуют рекомендациям, приведенным в специальной литературе [17, 19].

Соответствующие коэффициенты уравнения регрессии оцениваем методом наименьших квадратов [16–23]. Данные можно обрабатывать с помощью натуральных значений факторов, однако система нормальных уравнений существенно упростится, если провести линеаризацию независимых переменных [16, 17, 19, 22, 23]:

$$\begin{cases} z_1 = x_{1ц}; & z_2 = x_{2ц}; & z_3 = x_{3ц}; \\ z_4 = x_{1ц}x_{2ц}; & z_5 = x_{2ц}x_{3ц}; & z_6 = x_{3ц}x_{1ц}; \\ z_7 = x_{1ц}^2; & z_8 = x_{2ц}^2; & z_9 = x_{3ц}^2, \end{cases} \quad (2)$$

где $x_1 = \sigma_a$, $x_2 = A$, $x_3 = P_k$ – натуральные значения факторов в выражении (1); z_i – введенная новая независимая переменная; $x_{iц}$ – центрированные переменные, определяемые по формулам [16, 17, 22, 23]

$$x_{iц} = x_i - \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu}, \quad i = 1, \dots, k \quad (3)$$

(i – номер независимого фактора в соответствии с выражениями (2); u – номер эксперимента; n – количество проведенных экспериментов; k – количество независимых переменных).

В регрессионной модели (1) с помощью коэффициентов b_i определяется степень изменения функции отклика $\lg N$ в зависимости от фактора X_i , когда значения остальных факторов X_j ($j \neq i$) фиксированы. Однако эти коэффициенты могут быть несравнимы по величине из-за различия в единицах измерения факторов. Такую проблему можно решить путем введения стандартизованных независимых переменных и стандартизованной функции отклика [16, 17, 22, 23]:

$$z_{iu}^0 = \frac{z_{iu} - \bar{z}_i}{s_i}, \quad y_u^0 = \frac{y_u - \bar{y}}{s_y}, \quad u = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где \bar{z}_i , \bar{y} и s_i , s_y – соответственно средние значения и среднеквадратические отклонения, определяемые по формулам [16, 17, 22, 23]:

$$\begin{aligned} \bar{z}_i &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n z_{iu}; & \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u; \\ s_i &= \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^n (z_{iu} - \bar{z}_i)^2}{n-1}}; & s_y &= \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^n (y_u - \bar{y})^2}{n-1}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда модель множественной регрессии в терминах z^0 будет задаваться уравнением

$$\begin{aligned} y_i^0 &= b_1^0 z_{1i}^0 + b_2^0 z_{2i}^0 + b_3^0 z_{3i}^0 + b_4^0 z_{4i}^0 + \\ &+ b_5^0 z_{5i}^0 + b_6^0 z_{6i}^0 + b_7^0 z_{7i}^0 + b_8^0 z_{8i}^0 + b_9^0 z_{9i}^0. \end{aligned} \quad (6)$$

Следует заметить, что коэффициент при свободном члене b_0^0 в результате центрирования стал равным нулю.

Преимущество стандартизации состоит в том, что коэффициенты b_1^0, \dots, b_9^0 измеряют степень влияния факторов в одной и той же шкале. Это позволяет сделать вывод о влиянии стандартизованных независимых переменных, а следовательно, и натуральных независимых переменных на функцию отклика.

Решение системы нормальных уравнений и оценки коэффициентов регрессии в стандартизованном масштабе находим в виде [16, 17]

$$b^0 = A^{-1}g, \quad (7)$$

где

$$A_{l,i} = \sum_{u=1}^n z_{u,l}^0 z_{u,i}^0; \quad g_i = \sum_{u=1}^n z_{u,i}^0 y_u^0.$$

Выполним проверку гипотезы о равенстве нулю (проверку значимости) некоторых из регрессионных коэффициентов с помощью критерия Стьюдента [16, 21, 23]:

$$t_i = \frac{b_i}{s_y \sqrt{c_{ii}}} \geq t_{\alpha, f}, \quad (8)$$

где c_{ii} – диагональный элемент обратной матрицы нормальных уравнений $(z^{0T} z^0)^{-1}$; здесь и далее верхний индекс “T” обозначает операцию транспонирования;

$$s_y = \frac{y^{0T} (E - z^0 (z^{0T} z^0)^{-1} z^{0T}) y^0}{n - k - 1};$$

$t_{\alpha, f}$ – табличное значение коэффициента Стьюдента для уровня значимости $1 - \alpha$ и числа степеней свободы $f = n - k - 1$; E – единичная диагональная матрица размера $n \times n$.

Если расчетное значение t -критерия меньше табличного для принятого уровня значимости α и числа степеней свободы, то проверяемый параметр статистически незначим и может быть исключен из модели. Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $f = 19$ табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{0,05;19} = 2,09$.

Соответствие между прогнозируемыми по модели значениями и результатами наблюдений, или так называемую проверку адекватности модели проводили с помощью F -критерия Фишера [16]:

$$F = \frac{e^T e}{\tilde{y}^T \tilde{y}} \frac{n - k - 1}{k} \leq F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}, \quad (9)$$

где $e = y^0 - \tilde{y}$ – вектор остатков или невязок, представляющий собой разницу между расчетными и экспериментальными значениями логарифма долговечности; $\tilde{y} = z^0 b^0$ – вектор расчетных (предсказанных) значений; F_{α, ν_1, ν_2} – критическое значение параметра Фишера для выбранного уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $\nu_1 = n - k$ и $\nu_2 = n(m - 1)$.

Для оценки качества получаемого уравнения регрессии используем множественный коэффициент корреляции (или детерминации):

$$R = \sqrt{1 - \frac{e^T e}{y^{0T} y^0}}.$$

В табл. 2 представлены расчетные значения t -критерия Стьюдента, стандартная ошибка и численное значение нормированного коэффициента для разных моделей уравнения регрессии. В качестве моделей в табл. 2 используются следующие:

модель 1 – линейная, учитывающая основные эффекты;
 модель 2 – к модели 1 добавляются парные эффекты взаимодействия (см. уравнение (1));
 модель 3 – нелинейная модель второго порядка, учитывающая основные эффекты и их квадраты;
 модель 4 – к модели 3 добавляются парные эффекты взаимодействия (см. уравнение (1)).

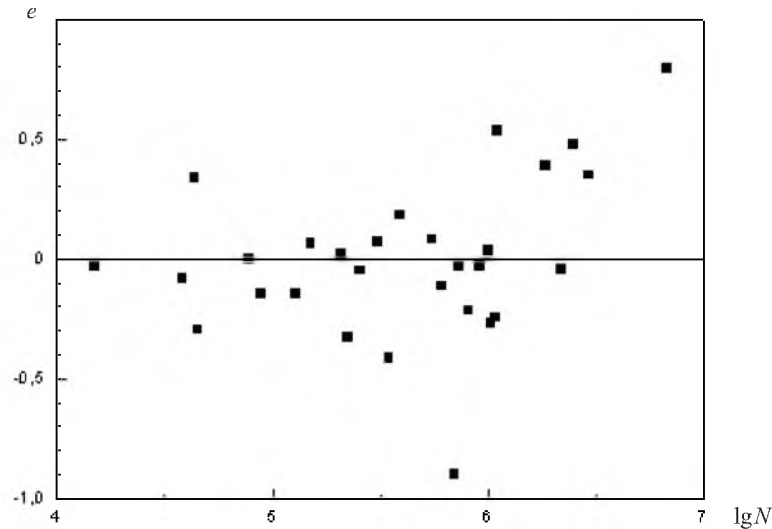
Т а б л и ц а 2

Расчетные значения *t*-критерия Стьюдента, стандартная ошибка и численное значение нормированного коэффициента для разных моделей уравнения регрессии

Коэффициент	Модель 1			Модель 2		
	Численное значение	Стандартная ошибка	Расчетное значение <i>t</i> -критерия	Численное значение	Стандартная ошибка	Расчетное значение <i>t</i> -критерия
b_1	-0,865	0,081	10,662	-0,880	0,091	9,647
b_2	0,038	0,081	0,473	0,060	0,090	0,662
b_3	-0,218	0,081	2,685	-0,252	0,135	1,874
b_4				$-4,330 \cdot 10^{-3}$	0,092	0,047
b_5				-0,070	0,096	0,047
b_6				0,056	0,140	0,401
F	1,622			0,684		
R	0,915			0,918		
	Модель 3			Модель 4		
b_1	-1,009	0,096	10,496	-1,024	0,098	10,478
b_2	0,113	0,154	0,733	-0,135	0,379	0,357
b_3	-0,231	0,101	2,28	0,160	0,310	0,516
b_4				0,019	0,106	0,180
b_5				-0,216	0,310	0,696
b_6				-0,243	0,164	1,483
b_7	-0,064	0,086	0,742	-0,106	0,095	1,113
b_8	0,112	0,172	0,649	-0,311	0,612	0,508
b_9	0,261	0,010	2,613	0,325	0,156	2,088
F	0,520			0,255		
R	0,936			0,945		

Уравнения регрессии для остальных моделей получены по формулам, аналогичным приведенным выше. Из данных табл. 2 следует, что наиболее адекватно экспериментальные данные описывает нелинейная модель второго порядка, учитывающая парные эффекты взаимодействия (модель 4).

На рис. 4 представлено распределение остатков e в зависимости от наблюдаемого значения $y = \lg N$. Видно, что с увеличением значения логарифма экспериментальной долговечности до разрушения $\lg N$ полоса разброса остатков становится шире.

Рис. 4. Зависимость остатков e от экспериментальной долговечности $\lg N$.

Это может свидетельствовать о гетероскедантности, т.е. об отсутствии постоянства дисперсии случайной переменной. Известно, что для усталостных испытаний характерно увеличение разброса значений долговечности с ростом длительности эксперимента, что и отражено в разбросе остатков на рис. 4.

Как было показано выше, модель по F -критерию Фишера адекватна, однако часть коэффициентов регрессии оказалась незначимой. В этом случае модель пригодна для принятия некоторых решений, но не для прогнозирования. Установленная незначимость некоторых коэффициентов регрессии обусловлена тем, что диапазон изменения исследуемых факторов узок и экспериментальные точки в основном сгруппированы на одном уровне контактного напряжения (90 МПа) и двух уровнях размера контртела (1 и 4,15 мм).

Для оценки влияния исследуемых факторов на циклическую долговечность и возможности ее прогнозирования с помощью полученной модели выполним переход к натуральному масштабу с использованием формул [16, 17, 22, 23]

$$b_i = b_i^0 \frac{s_y}{s_i}; \quad b_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^k b_i z_i. \quad (10)$$

После приведения подобных и сокращения имеем уравнение регрессии в виде

$$\begin{aligned} \lg N = & 2,876 + 0,044\sigma_a + 1,231A - 953 \cdot 10^{-3} P_K + \\ & + 3,1 \cdot 10^{-4} \sigma_a A - 5,99 \cdot 10^{-3} A P_K - 3,075 \cdot 10^{-4} P_K \sigma_a - \\ & - 1,1 \cdot 10^{-4} \sigma_a^2 - 0,14A^2 - 5,128 \cdot 10^{-4} P_K^2. \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 5 представлено сравнение результатов долговечности до разрушения, полученных экспериментально и путем прогноза. Видно, что лишь несколько экспериментальных точек имеют наибольшее удаление от прогнозируемой долговечности. Анализ результатов показал, что в основном они получены при $A = 4,15$ мм, когда прилегание контртела к образцу происходит не по всей поверхности. Были измерены реальные площади контактирования, и линия регрессии по модели 4 была пересчитана в соответствии с этими данными. Диапазон реальных номинальных контактных напряжений при этом составил 63,9...182,9 МПа. Учитывая также установленный факт наличия некоторого уровня контактных напряжений, превышение которого мало влияет на долговечность [24], модель 4 была проварьирована в предположении, что номинальные контактные напряжения выше выбранного граничного уровня влияют на долговечность так же, как и граничный уровень. Модель проварьирована при граничных значениях $P_k^{гр} = 100, 110, 120, 130$ и 140 МПа. В табл. 3 приведены параметры, характеризующие качество описания экспериментальных данных с помощью данной модели.

Т а б л и ц а 3

Параметры, характеризующие описание результатов испытаний с учетом реальных номинальных контактных напряжений и их граничных значений

Параметр	Модель 4 с реальными номинальными P_k при $P_k^{гр}$, МПа					
	Без граничного уровня	100	110	120	130	140
F -критерий	0,174	0,229	0,167	0,105	0,189	0,188
Коэффициент корреляции R	0,952	0,938	0,953	0,970	0,948	0,948
Сумма квадратов остатков	2,264	2,902	2,183	1,424	2,442	2,435

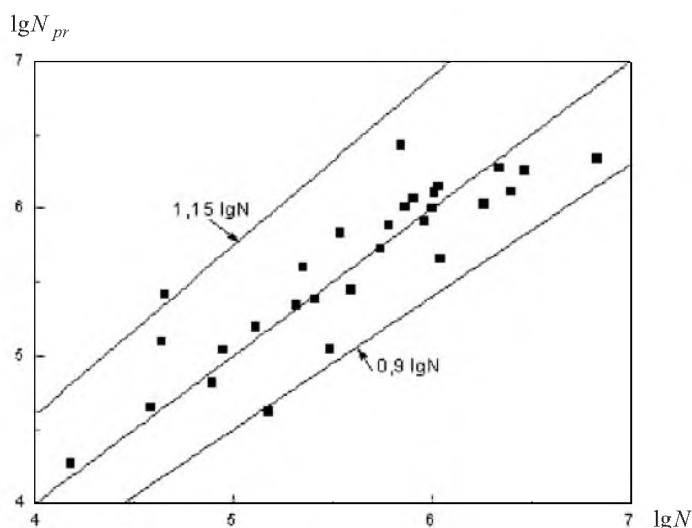


Рис. 5. Сравнение результатов долговечности до разрушения, полученных экспериментально (точки) и путем прогноза (линии).

Анализ данных табл. 2 и 3 показал, что наименьшие значения суммы квадратов остатков и F -критерия при наибольшем коэффициенте корреляции получены по модели 4, построенной для реальных номинальных контактных напряжений при $P_k^{Гр} = 120$ МПа. Таким образом, превышение контактными напряжениями значения $P_k^{Гр} = 120$ МПа в испытанном диапазоне реальных номинальных контактных напряжений мало влияет на циклическую долговечность при фреттинг-усталости пары сталь 15кп–сталь 45. С другой стороны, значение $R = 0,97$ свидетельствует о высокой плотности описания результатов испытаний этой регрессионной моделью, которая близка к функциональной. В этой связи могут быть рассмотрены закономерности изменения циклической долговечности как прогнозируемые значения функции отклика при изменении уровня контактных напряжений и масштабного фактора (размера контртела).

Прогнозирование влияния исследуемых параметров фреттинга на долговечность на основе полиномиальной модели. На рис. 6, 7 представлены данные эксперимента и расчета в соответствии с полиномиальной моделью 4. Поскольку эта модель (рис. 6,а и 7,а) получена путем минимизации квадратов отклонений результатов испытаний от линии регрессии, построенные зависимости удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Модифицированная модель 4 (рис. 6,б и 7,б) позволяет проанализировать тенденцию во влиянии исследуемых факторов на циклическую долговечность. Как отмечалось выше, это связано с достаточно высокой степенью корреляции экспериментальных результатов и полинома, близкой к функциональной зависимости.

Из рис. 6,б следует, что в области амплитуд $\sigma_a \approx 140...180$ МПа при $P_k = 90$ МПа между кривыми фреттинг-усталости имеет место незначительное отличие при использовании накладок различного размера. С дальнейшим повышением амплитуды напряжения наблюдается расхождение между кривыми усталости при $A = 1$ и 4,15 мм. В первом случае долговечность снижается, во втором – увеличивается с разницей в 1 порядок при амплитуде осевого напряжения $\sigma_a \approx 220$ МПа. Такая прогнозируемая тенденция влияния масштабного фактора на долговечность при повышенных значениях амплитуды напряжения может быть объяснена следующим образом.

Учитывая, что при испытываемых уровнях контактных напряжений при циклическом нагружении зона контакта содержит участки сцепления поверхностей и скольжения, с повышением амплитуды напряжения в соответствии с используемой схемой реализации фреттинга увеличивается участок скольжения. Это приводит к перемещению линии перехода от участка скольжения к участку сцепления, где происходит зарождение трещины фреттинг-усталости, в сторону середины контртела и таким образом происходит смещение места разрушения в зону меньших контактных и соответственно тангенциальных напряжений. Для фреттинг-пары с $A = 4,15$ мм, где выход продуктов фреттинга в виде порошка $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ из зоны скольжения затруднен, происходит частичный переход от трения скольжения к трению качения (с участием частиц $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) [24], что снижает коэффициент трения и соотношение тангенциальных и нормальных напряжений в опасной зоне. В то же

время для фреттинг-пары с $A = 1$ мм с повышением амплитуды скольжения происходит более интенсивное выпадение порошка $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ из зоны скольжения, что связано с масштабным фактором, и, следовательно, увеличение коэффициента трения и тангенциальных напряжений в опасной зоне [24]. Согласно описанным механизмам взаимодействия между образцом, контртелом и “третьим телом” (продукты фреттинга) [25] долговечности при высоких амплитудах напряжения фреттинг-пар с различным размером контртела разные (рис. 6,б). Количественно это может быть учтено при расчете напряженно-деформированного состояния в зоне контакта и фреттинга.

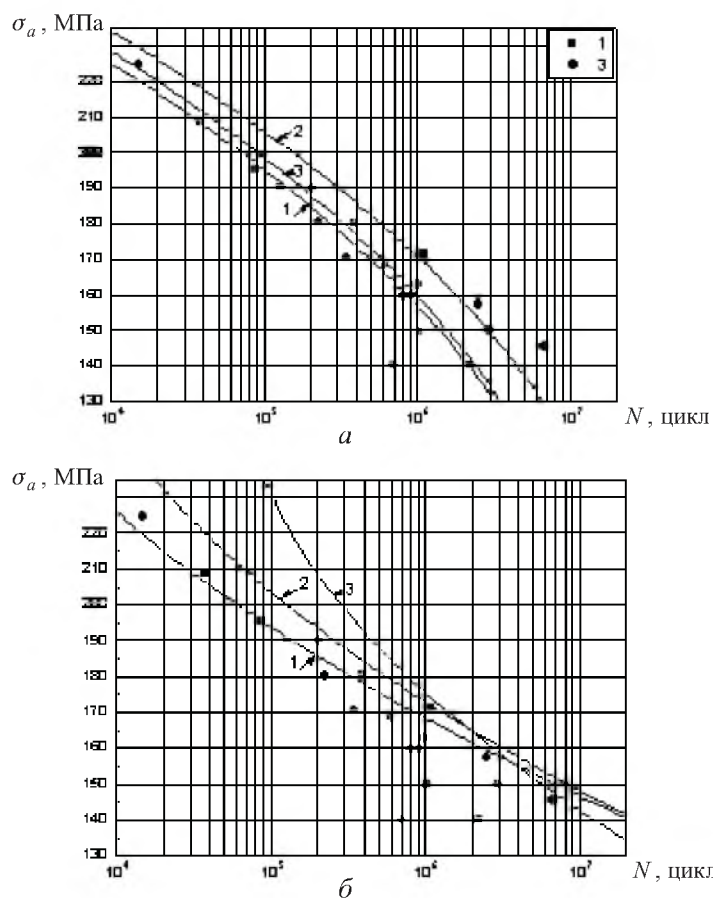


Рис. 6. Распределение расчетных (линии) и экспериментальных (точки) данных по фреттинг-усталости в зависимости от $A = 1,0$ (1), $2,0$ (2) и $4,15$ мм (3) при $P_k = 90$ МПа. (Здесь и на рис. 7: a – модель 4; b – модель 4, модифицированная путем учета реальных номинальных контактных напряжений и введения граничного уровня этих напряжений 120 МПа.)

С помощью аналогичного механизма можно объяснить прогноз фреттинг-усталостной долговечности стали 15кп по полиномиальной модели при разных уровнях P_k и одинаковой ширине контртела (рис. 7,б). Кривые на рис. 7 прогнозируют снижение долговечности при увеличении контактного давления во всем исследуемом диапазоне амплитуд напряжений при фреттинг-усталости для $A = 4,15$ мм. Незначительное увеличение расхождения

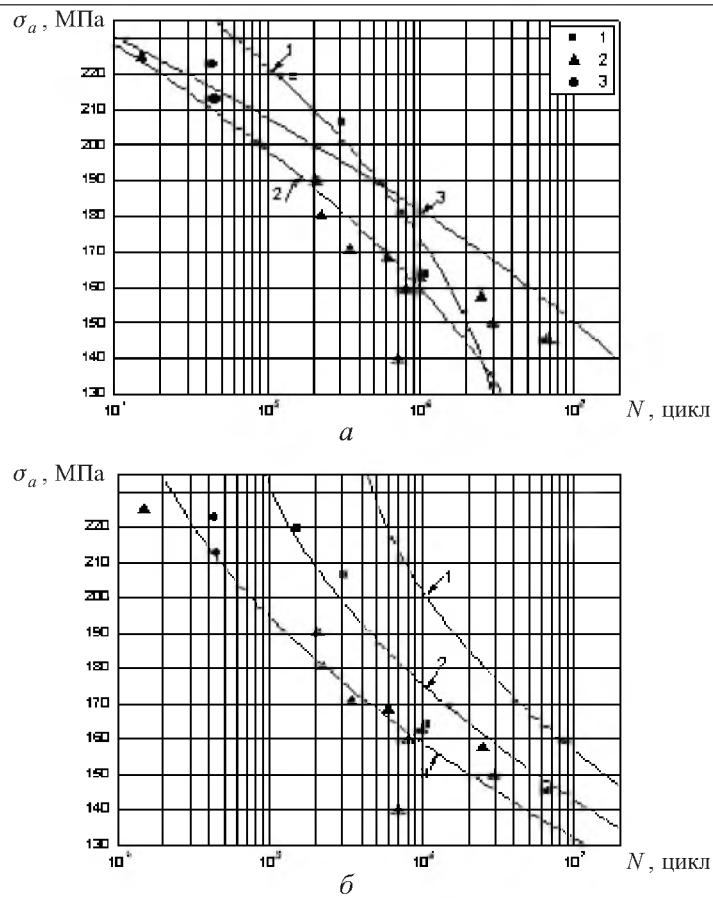


Рис. 7. Распределение расчетных (линии) и экспериментальных (точки) данных по фреттинг-усталости в зависимости от $P_k = 60$ (1), 90 (2) и 120 МПа (3) при $A = 4,15$ мм.

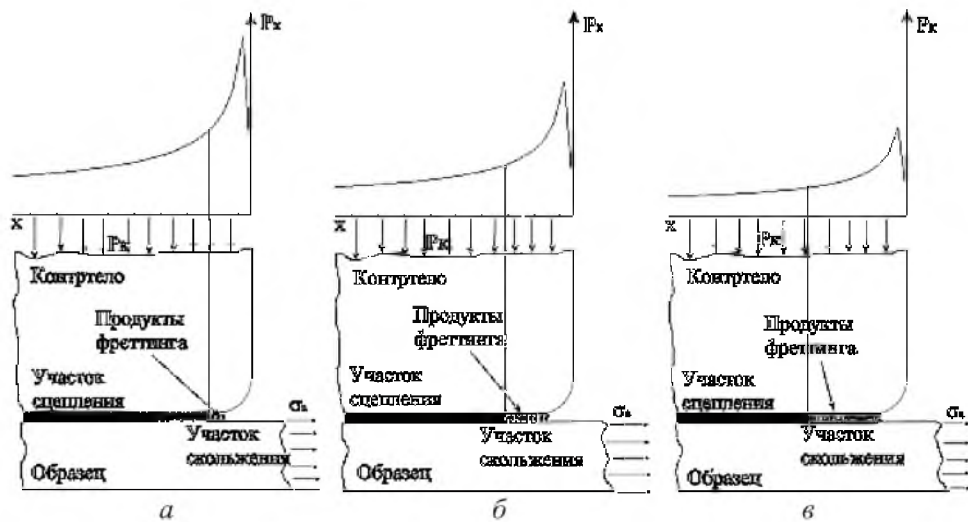


Рис. 8. Схема взаимодействия между образцом, контртелом и продуктами фреттинга при различных номинальных контактных давлениях и $A = 4,15$ мм: а - $P_k = 120$ МПа; б - $P_k = 90$ МПа; в - $P_k = 60$ МПа.

между кривыми усталости с повышением амплитуды напряжения (и скольжения) может быть обусловлено большим смещением линии перехода от участка скольжения к участку сцепления к центру контртела при меньших контактных напряжениях, что приводит к большему, чем при более высоких P_k , снижению тангенциальных напряжений от трения в соответствии с рассмотренным выше механизмом взаимодействия между образцом, контртелом и продуктами износа.

Снижение напряженности в зоне зарождения трещины фреттинг-усталости иллюстрирует рис. 8, оно может учитываться в схеме расчета напряженно-деформированного состояния.

Выводы

1. Экспериментальные данные по фреттинг-усталости пары сталь 15кп–сталь 45 при варьировании размером фреттинг-накладок и контактным напряжением свидетельствуют о незначительном их влиянии на долговечность в пределах варьирования с учетом рассеяния результатов.

2. Циклическая долговечность в исследуемых условиях фреттинга может быть адекватно оценена на основе полиномиальной модели регрессионного анализа второго порядка, учитывающей главные эффекты, их квадраты и парные эффекты взаимодействия.

3. Линеаризация и стандартизация независимых переменных полиномиальной модели, учет реальных номинальных контактных напряжений и введение их граничного значения (120 МПа), влияющего на фреттинг-усталостную долговечность, позволяют получить наиболее тесную корреляционную взаимосвязь между моделью и экспериментальными данными, близкую к функциональной зависимости.

4. Полученная модель показывает однозначное снижение долговечности при повышении контактного напряжения до его граничного значения с увеличением этого эффекта при высоких амплитудах напряжения. Масштабный фактор сказывается только при высоких амплитудах напряжения.

5. Предложен механизм контактного взаимодействия между материалами образцов, контртелом и продуктами фреттинга при наличии участков сцепления и скольжения на контактирующих поверхностях, позволяющий объяснить прогнозируемые закономерности изменения долговечности в зависимости от варьируемых параметров фреттинга. Он может учитываться при разработке расчетной схемы для определения локального напряженно-деформированного состояния в зоне зарождения трещины фреттинг-усталости.

Резюме

Виконано експерименти на фреттинг-утому пари сталь 15кп–сталь 45 при варіюванні розміру контртіла і контактного напруження. Отримано поліноміальну модель регресійного аналізу другого порядку, яка достатньо точно апроксимує результати досліджень. На основі цієї моделі спрогнозовано вплив контактних напружень і масштабного чинника на циклічну довговічність при фреттинг-утомі. Розглянуто механізм взаємодії між зразком, контр-

тілом і продуктами фретингу, який дозволяє пояснити результати виконаного прогнозу.

1. *Waters K. T.* Production methods of cold working joint subjected for improvement of fatigue strength // ASTM STP. – 1959. – No. 274. – P. 99 – 111.
2. *Edwards P. R.* The application of fracture mechanics to fretting fatigue // Fretting Fatigue / R. B. Waterhouse (Ed). – London: Appl. Sci. Publ., 1981. – P. 67 – 99.
3. *Nix K. J. and Lindley T. C.* The application of fracture mechanics to fretting fatigue // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1985. – No. 8. – P. 143 – 160.
4. *Nowell D. and Hills D. A.* Crack initiation criteria in fretting fatigue // Wear. – 1990. – **316**. – P. 329 – 343.
5. *Ruiz C., Boddington P. H. B., and Chen K. C.* An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint // Exp. Mech. – 1984. – **24**, No. 3. – P. 208 – 217.
6. *Szolwinski M. P. and Farris T. N.* Observation, analysis, and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy // Wear. – 1998. – **221**. – P. 24 – 36.
7. *Iyer K.* Peak contact pressure, cyclic stress amplitudes, contact semi-width and slip amplitude: relative effects on fretting fatigue life // Int. J. Fatigue. – 2001. – **23**. – P. 193 – 206.
8. *Pape J. A. and Neu R. W.* Influence of contact configuration in fretting fatigue testing // Wear. – 1999. – **225-229**. – P. 1205 – 1214.
9. *Bramhall R.* Studies in Fretting Fatigue ... D. Phil. Thesis. – Oxford, 1973. – 30 p.
10. *Hills D. A., Nowell D., and O'Connor J. J.* On the mechanics of fretting fatigue // Wear. – 1988. – **125**. – P. 129 – 146.
11. *Lykins C. D., Mall S., and Jain V.* An valuation of parameters for predicting fretting fatigue crack initiation // Int. J. Fatigue. – 2000. – **22**. – P. 703 – 716.
12. *Wittkowsky B. U., Birch P. R., Domingues J., and Suresh S.* An apparatus for quantitative fretting fatigue testing // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1999. – **22**. – P. 307 – 320.
13. *Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment* // ASTM STP. – 1992. – 1159 p.
14. *Цыбанев Г. В., Кураш Ю. П.* Методика комплексного исследования фреттинг-усталостного повреждения металлов // Пробл. прочности. – 2001. – № 5. – С. 130 – 140.
15. *Цыбанев Г. В., Кураш Ю. П.* Исследование фреттинг-усталости стали при варьировании размера контакта в направлении скольжения // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2004. – № 2 (23). – С. 106 – 111.
16. *Афифи А., Эйзен С.* Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 488 с.

17. Филаретов Г. Ф. К вопросу о построении нелинейной регрессионной модели методом пассивного эксперимента // Проблемы планирования эксперимента. – М.: Наука, 1968. – С. 12 – 19.
18. Веселая Г. Н., Егорова Н. В. О математических моделях технологических процессов, полученных по данным пассивных наблюдений // Проблемы планирования эксперимента. – М.: Наука, 1968. – С. 24 – 28.
19. Стрижало В. А., Медведь И. И. Планирование эксперимента при механических испытаниях. – Киев, 1985. – 51 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т пробл. прочности).
20. Стрижало В. А., Радченко С. Г., Шукаев С. Н. Методические рекомендации по планированию эксперимента и статистической обработке его результатов в механике деформируемого твердого тела. – Киев: Киев. политехн. ин-т, 1988. – 40 с.
21. Богатова В. П. Регрессионный анализ данных на ПК: В примерах и задачах (система Statistica). – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2002. – 42 с.
22. Morin A. and Findlay S. Applied Biostatistic. – Ottawa: Ottawa University, 2001. – 286 p.
23. Mason R. M., Gunst R. G., and Hess J. F. Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science. – New Jersey: John Willey & Sons Inc., 2003. – 730 p.
24. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
25. Colombie Ch., Berthier Y., Floquet A., et al. Fretting: load carrying capacity of wear debris // Trans. ASME. – 1984. – **106**. – P. 194 – 201.

Поступила 27. 07. 2006