

557684

На правах рукописи

Сильверстов Игорь Николаевич

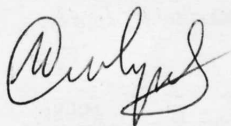
**Расчет шарнирных элементов на усталость
с учетом фреттинг-фактора**

01.02.06 - динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры.

05.02.02 - машиноведение и детали машин.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1997

Работа выполнена на Авиационном научно-техническом комплексе им. А.Н.Туполева и Российском заочном институте текстильной и легкой промышленности.

Научный руководитель:

- доктор технических наук, профессор Сухарев И.П.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Коновалов Л.В.

- Кандидат технических наук, доцент Кожевников В.Ф.

Ведущая организация - НИИ ГИПРО АВИА ПРОМ

Защита состоится "15" апрель 1998г
в 10 часов на заседании диссертационного совета К 0533.15.11
Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

а, 2^я Бауманская, д.5, МГТУ им. Н.Э.Баумана.

иться в библиотеке МГТУ

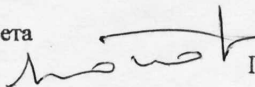
ый печатью учреждения, в двух
указанному адресу.

1557684

_____ 1998г.

ного совета

сор



Попов П.К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации связана с отсутствием на данный момент эффективной методики инженерного расчета шарнирных элементов произвольной конфигурации на долговечность с учетом влияния фреттинг-коррозии.

Фреттинг-коррозия заметно сказывается на усталостной прочности деталей уже при наработке 10^4 циклов, а при наработке 10^6 - 10^7 циклов предел выносливости детали, работающей в условиях фреттинга, может быть в 3-4 раза ниже, чем у такой же детали без фреттинга. Существующие методики расчета стальных и дюралевых проушин на усталость Р.Б.Хэйвуда и С.Е.Ларссона позволяют, на основе чисто экспериментального подхода, в какой-то степени неявно учитывать влияние фреттинг-коррозии, но их применение ограничивается возможностью расчета усталости только для симметрично нагруженных прямых проушин простых геометрических очертаний и простого цикла нагружения. Причем при диаметрах отверстий >35 - 40 мм или сложной формы проушины погрешность расчетов может достигать ста и более процентов.

Цель работы. Заключается в создании инженерной методики оценки и прогнозирования усталостной прочности произвольно нагруженных шарнирных элементов (проушин) любой конфигурации с учетом влияния фреттинг-коррозии.

Научная новизна. Установлена однозначная зависимость между воздействием фреттинг-коррозии на усталостную прочность проушины и произведением относительного перемещения в контакте на безразмерное контактное давление в зоне усталостного разрушения. Подобраны эмпирические формулы и построены графические зависимости эффективного коэффициента фреттинга (ЭКФ) от вышеперечисленных факторов для алюминиевых и стальных проушин. Расчетным путем методом граничного элемента (МГЭ) найдены окружные напряжения, радиальные напряжения и окружные перемещения в контакте проушин различных конфигураций. Экспериментально установлена зависимость относительного градиента напряжений в зоне усталостного разрушения нагруженного и свободного отверстия от основных геометрических параметров.

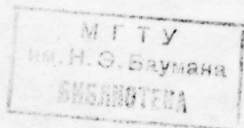
Практическая ценность. Разработана методика расчета усталостной прочности проушин произвольной конфигурации при нагружении произвольным спектром переменных нагрузок. Эта методика позволяет эффективно оценивать долговечность проушин, работающих в условиях ограниченно-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1557684

Сильверстов И.Н. Расчет ш



го ресурса (например в авиации) и, как следствие оптимизировать вес и металлоемкость **проушины при заданном ресурсе изделия.**

Реализация работы. На основании данной диссертационной работы на АНТК им. А.Н.Туполева принята методика расчета шассийных проушин на усталостную прочность с учетом фреттинг-фактора.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на межвузовской научной конференции "Современные проблемы текстильной и легкой промышленности", РосЗИТЛП, Москва, 1996г, на семинаре по Усталостной прочности в МГТУ им. Баумана в 1996г., на семинарах кафедр Детали машин и Прикладной механики МГТУ им. Баумана, на семинарах кафедр ПМА и Детали машин РосЗИТЛП, на АНТК им. А.Н.Туполева.

Публикации. По теме диссертации имеется 4 печатные работы, отражающие ее основное содержание.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 116 страницах основного текста, иллюстрируется 63 рисунками, 10 таблицами и состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы из 72 наименований и трех приложений на 44 страницах. Всего 160 страниц.

Содержание работы

В первой главе проводится обзор публикаций, посвященных фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости в деталях машин.

Рассматриваются основные факторы, выявляются закономерности, влияющие на развитие повреждений от фреттинга. В частности:

1. При увеличении относительного перемещения в контакте усталостная прочность детали снижается;
2. При увеличении контактного давления, усталостная прочность детали снижается;
3. На усталостную прочность оказывает влияние природа материалов контактирующих деталей, так наиболее чувствительны к фреттингу пары: сталь-сталь, алюминий-сталь, алюминий-алюминий, титан-сталь т.е. наиболее распространенные в настоящее время конструкционные материалы.
4. Влияние фреттинга начинает заметно сказываться на усталостной прочности уже на базе 10^4 циклов, а на базе 10^6 - 10^7 циклов усталостная прочность может упасть в 3-4 раза.

Рассматриваются особенности фреттинг-коррозии у проушин, а также конструктивные и технологические методы ее снижения, которые изучались в работе А.Буша и моделировались в работе С.Д.Позднышева и Б.И.Олькина (1987г.).

Во второй главе показаны недостатки и ограничения существующих методов расчета проушин на усталость. Дается постановка задачи и гипотеза учета влияния фреттинга при расчете проушин на усталостную прочность. Вводится понятие эффективного коэффициента фреттинг-усталости (ЭКФ) $k_{\text{Ф}} = \sigma_{\text{Д}} / \sigma_{\text{ДФ}}$ (отношение пределов выносливости детали без учета фреттинга и с учетом фреттинга). Делается предположение, что основное влияние на фреттинг-усталость проушин оказывают относительные смещения в контакте $u_{\text{с}}$ и контактное давление $\sigma_{\text{т}}$.

Зависимость между напряженным состоянием стандартного образца в зоне разрушения и числом циклов до разрушения обычно принимается в виде:

$$\sigma^m \cdot N = \text{const} \quad \text{или} \quad \lg N = C_0 - m \cdot \lg \sigma, \quad (1)$$

где C_0 и m - константы материала.

Расчет на усталость обычно выполняется с учетом эффективного коэффициента концентрации $k_{\text{ЭФ}}$:

$$\sigma_{\text{Д}} = k_{\text{ЭФ}} \cdot \sigma_{\text{НОМ}}, \quad (2)$$

В этом случае кривая усталости:

$$\lg N = C - m \cdot \lg \sigma_{\text{НОМ}}, \quad \text{где} \quad C = C_0 - m \cdot \lg k_{\text{ЭФ}}, \quad (3)$$

то есть, в рамках выбранной модели, для детали изменяется только C , а тангенс угла наклона кривой усталости m остается неизменным. Причем

$$k_{\text{ЭФ}} = (k_t / \varepsilon_{\sigma} + 1 / \beta - 1) \cdot k_{\text{ТЕХН}}$$

где k_t - теоретический коэффициент концентрации напряжений (ККН), ε_{σ} - масштабный фактор, β - коэффициент, учитывающий чистоту обработки поверхности, $k_{\text{ТЕХН}}$ - коэффициент, учитывающий технологию и режим термообработки детали. Величина $k_t / \varepsilon_{\sigma}$ определяется формулой Когаева-Серенсена с учетом относительного градиента напряжений G , (см. формулу (8)):

$$\frac{k_t}{\varepsilon_{\sigma}} = \frac{2k_t}{1 + (L / 88.3G)^{-\nu_{\sigma}}} \quad (4)$$

где L - в данном случае равно толщине проушины t . ν_{σ} - величина, характеризующая чувствительность материала к концентрации напряжений и влиянию абсолютных размеров.

Для шарнирного элемента (проушины), подверженного фреттингу параметры кривой усталости отличаются от зависимости (3). В отличие от простого концентратора при наличии фреттинга изменяется не только величина C , но и коэффициент m ($m_{\text{ФР}} < m$).

При отсутствии фреттинга (например, для свободного отверстия) выражение для относительного предела усталостной прочности можно записать в виде:

$$\sigma_d = \sigma_{OBR} / k_{ЭФФ}, \quad (5)$$

где: σ_d - предел выносливости детали, σ_{OBR} - предел выносливости стандартного образца (обычно стандартного, полированного, с $k_t=1$).

В условиях фреттинг-усталости, выражение (5) можно записать в виде:

$$\sigma_d = \sigma_{OBR} / k_{ЭФФ} \cdot k_{\Phi}, \quad (6)$$

где: k_{Φ} - эффективный коэффициент фреттинга для выбранной базы предела усталости.

Учитывая основные факторы, влияющие на развитие фреттинг-коррозии, сформулированные в главе 1, можно полагать, что k_{Φ} зависит от:

1) природы контактирующих материалов, 2) величины контактного давления σ_r в опасной зоне, 3) величины относительного перемещения в опасной зоне U_s , 4) использования защитных покрытий и/или смазок, 5) технологии изготовления деталей. Причем в данном случае не накладывается никаких ограничений ни на форму, ни на размер проушины, ни на характер цикла нагружения.

Как правило, в каждой отрасли машиностроения, применяется свой, довольно ограниченный набор конструкционных материалов, имеются свои технологические стандарты и приемы, в том числе и при проектировании и изготовлении проушин. Поэтому для каждого их сочетания можно считать ЭКФ функцией только величины контактного давления и величины относительного перемещения:

$$k_{\Phi} = \varphi(\sigma_r, U_s)$$

Это значит, что если известно напряженно-деформированное состояние (НДС) проушины в зоне возможного разрушения, то используя зависимость $k_{\Phi} = \varphi(\sigma_r, U_s)$ для данной пары контактирующих материалов, возможно определение предела выносливости любого конструктивного образца типа проушины без проведения экспериментальных исследований.

Из рис. 1 и формул (3), (5), (6) видно, что зная величину k_{Φ} на базе испытаний N_6 и точку пересечения усталостных кривых N_0 , можно вычислить новые коэффициенты кривой усталости для детали, испытывающей воздействие фреттинг-коррозии:

$$m_{\Phi} = (\lg N_6 - \lg N_0) / \{ \lg k_{\Phi} + (\lg N_6 - \lg N_0) / m \}$$

$$C_{\Phi} = C \cdot m_{\Phi} / m + (1 - m_{\Phi} / m) \cdot \lg N_0. \quad (7)$$

Таким образом, зная k_{Φ} для конкретной детали, расчет шарнирных элементов на усталость с учетом фреттинга ведется по формуле (3), но с коэффициентами C_{Φ} и m_{Φ} , вычисленным по формулам (7).

В последующих главах для проверки этой гипотезы используются уже имеющиеся в литературе экспериментальные данные, а также данные специ-

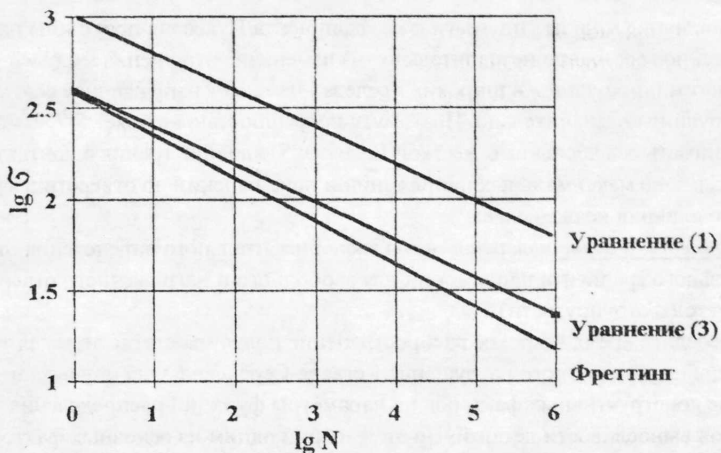


Рис. 1. Кривая выносливости (материал АК6). Диаграмма скорректирована с учетом места разрушения проушин.

ально поставленного для этого эксперимента на проушинах из ковочного алюминиевого сплава АК6, причем величины относительных фреттинг-перемещений и контактных давлений для каждой проушины рассчитаем методом граничных элементов (МГЭ).

В третьей главе излагаются варианты метода граничного элемента (МГЭ) применительно к решению контактных задач типа проушины. Обращается внимание на большую потенциальную точность МГЭ по сравнению с такими распространенными численными методами как МКЭ и метод конечных разностей (МКР), а также простоту нахождения относительных перемещений в контакте U_s .

Для ряда проушин характерных очертаний проведено сравнение расчетных данных МГЭ с результатами, полученными экспериментально методом фотоупругости. Граница проушин аппроксимировалась кусочно-постоянными граничными элементами; на контуре отверстия задавалось 36 граничных элементов, что позволяло с необходимой точностью определять зону контакта. Показано, что: 1) погрешность вычисления напряжений МГЭ на наружном контуре проушины практически не превышает 2-3%; 2) погрешность вычисления напряжений МГЭ на внутреннем контуре проушины (отверстии) в зонах максимальных напряжений практически не превышает 2-

5%; 3) влияние модуля упругости и коэффициента Пуассона проушины на ее напряженное состояние незначительно; 4) изменение отношения модулей упругости оси и проушины в широких пределах изменяет напряженное состояние проушины незначительно. Поэтому, с погрешностью не более 5-7%, можно принимать ось абсолютно жесткой $E_{\text{оси}} = \infty$. 5) влияние трения в контакте на НДС в зоне максимальных напряжений и перемещений по отверстию заметного влияния не оказывает.

В четвертой главе излагается метод экспериментального определения относительного градиента напряжений для свободного и нагруженного отверстия (метод фотоупругости).

В последнее время широкое распространение получила статистическая теория подобия усталостного разрушения Когаева-Серенсена. Она описывает влияние конструктивных факторов на параметры функций распределения пределов выносливости деталей. По этой теории одним из основных факторов, учитывающим масштабный эффект и существенно влияющим на эффективный коэффициент концентрации является относительный градиент напряжения G (см. формулу (4)):

$$G = -1/\sigma_{\text{ИМАХ}} \cdot (d\sigma/dX), \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{ИМАХ}} = \sigma_{\text{НОМ}} \cdot k_t$ - max главное напряжение в точке концентрации на контуре; X - нормаль к контуру; k_t - коэффициент концентрации напряжения.

Формулы для определения G некоторых видов концентраторов, полученные теоретическим путем (экспериментальных данных практически не имеется), приводятся в справочной литературе. Однако, имеющиеся данные явно не полны. Так, для свободного отверстия в пластине формула $G = 2,3/r$, полученная методами теории упругости, верна лишь для отверстия в бесконечной пластине. Полностью отсутствуют данные о градиентах, возникающих в проушинах.

При определении G каким-либо экспериментальным методом, исследователь сталкивается с непростой задачей вычисления производной по экспериментальным данным и в этом случае на границе отверстия погрешность может достигать 100%.

В данной работе предлагается метод экспериментального определения G по поллю разности главных напряжений у концентратора, полученному методом фотоупругости. Напряжения вдоль сечения, проходящего через концентратор, представляются в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_1(X) &= A + B \cdot r^2/X^2 + C \cdot r^4/X^4, \\ \sigma_2(X) &= 3B \cdot r^2/X^2 - C \cdot r^4/X^4 \quad \text{и} \quad (9) \\ (\sigma_1 - \sigma_2) &= A - 2B \cdot r^2/X^2 + 2C \cdot r^4/X^4, \end{aligned}$$

где r - радиус отверстия, X - координата с началом в центре отверстия и проходящая через зону концентрации.

При соответствующем выборе коэффициентов A , B и C данные функции точны для ненагруженного отверстия в бесконечной пластине. Поэтому есть основания считать, что, по крайней мере в локальной области около концентратора, распределение главных напряжений для других случаев геометрии деталей с отверстием принадлежит тому же классу функций. В этом случае, считая $\sigma_2(r)=0$ (т.е. $B=3C$) для $X=r$ получаем:

$$G \cdot r = -14B/(A+4B).$$

Коэффициенты A и B в каждом конкретном случае определяются методом наименьших квадратов по экспериментально полученным значениям (σ_1 - σ_2) с использованием формулы (9). Результаты вычисления безразмерных градиентов $G \cdot r$ приведены на рис.2, здесь d/D отношение диаметра отверстия к ширине проушины или полосы с отверстием.

Проведенные повторные замеры (σ_1 - σ_2) с разным количеством точек по сечению показали погрешность определения порядка 3-5%.

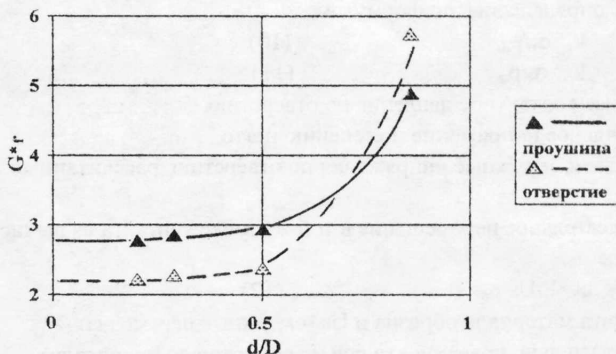


Рис. 2. Относительный безразмерный градиент напряжений (эксперимент).

В пятой главе на основе ранее опубликованных экспериментальных данных находится зависимость ЭКФ от контактного давления и относительного перемещения в контакте в зоне усталостного разрушения, вычисленных нами для конкретных конфигураций проушин.

Обработка экспериментов А.Тума и Е.Брудера.

А.Тум и Е.Брудер исследовали влияние геометрии ряда проушин на предел усталости (на базе 10^7) при пульсирующем цикле и определили их эффектив-

ные коэффициенты концентрации (de facto по результатам эксперимента). В эксперименте исследовались стальные ($\sigma_b=70\text{ кг/мм}^2$) проушины и пластина с ненагруженным отверстием одного и того же диаметра.

В результате эксперимента выяснилось, что для свободного отверстия $k_{\text{эфф}} < k_t$, для проушин же (при наличии фреттинга) эффективный коэффициент концентрации, определенный из эксперимента получается больше, чем ККН: $k_{\text{эфф эксп}} > k_t$.

В данной работе показано, что экспериментально полученные $k_{\text{эфф эксп}} = k_{\text{эфф}} \cdot k_{\Phi}$, где $k_{\text{эфф}}$ - ЭККН для проушины, определенный по любой существующей методике без учета фреттинга, а k_{Φ} в свою очередь является функцией контактного давления и относительного перемещения в опасной зоне $k_{\Phi} = \Phi(U_s, \sigma_t)$.

По данным А.Тума и Е.Брудера проведен расчет напряжений и перемещений МГЭ в опасной зоне, а так же определен коэффициент k_{Φ} . Коэффициент контактного давления и окружающих нормальных напряжений в той же точке по окружности k_r определялись по формулам:

$$k_t = \sigma_t / p_d, \quad (10)$$

$$k_{\sigma} = \sigma_t / p_{\sigma} \quad (11)$$

где $p_d = P/dt$ - среднее контактное давление по отверстию,

p_{σ} - среднее нормальное напряжение по сечению нетто,

σ_t и σ_t - радиальные и окружные напряжения по отверстию, рассчитанные МГЭ.

Относительное касательное перемещение в той же точке контакта u_s вычислялось по формуле:

$$u_s = E \cdot U_s / p_d, \quad (12)$$

где E - модуль Юнга материала образца и U_s - окружные перемещения отверстия образца относительно поверхности оси, через которую происходит нагружение. Следует отметить, что опасная зона на контуре отверстия (место разрушения) вследствие воздействия фреттинга обычно несколько смещена относительно точки максимальных окружных напряжений и коэффициенты k_{σ} , k_t , u_s определялись именно для этой зоны, поэтому значения k_t и эффективный коэффициент концентрации, вычисленный по результатам эксперимента как $k = \sigma_{\text{станд. образца}} / \sigma_t \text{ проуш.}$ для проушин несколько отличаются от данных приводимых в литературе.

На рис.3 показаны экспериментальные точки, полученные расчетным путем по эксперименту А.Тума и Е.Брудера, здесь по оси абсцисс отложены

значения фреттинга-фактора $f=k_r \cdot u_s$, а по оси ординат - эффективного коэффициента фреттинга.

Зависимость k_Φ - f нелинейна и хорошо аппроксимируется выражением:

$$k_\Phi = A f^{0.25} + 1 \quad (13)$$

Обработка данных методом наименьших квадратов дает: $A=0.480$,

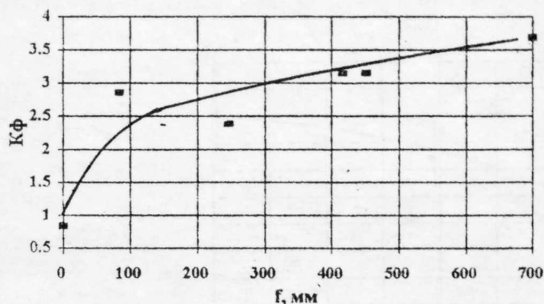


Рис. 3. Коэффициент фреттинга. Опыты А.Тума и Е.Брудера.

среднеквадратическое отклонение A (СКВО A) равно 0.036, коэффициент линейной корреляции r значащий и равен 0.966.

Таким образом, для шарнирного узла существует однозначная зависимость $k_\Phi = f(k_r \cdot u_s)$, характер которой зависит только от геометрии проушины и материалов взаимодействующих элементов.

Обработка опытов Б.В.Бойцова.

Б.В.Бойцовым опубликованы экспериментальные данные по усталости характерных деталей шасси самолета (на базе $2 \cdot 10^6$ циклов), в частности исследуется прочность и усталость стальных проушин (30ХГСНА, $\sigma_b=160 \text{ кг/мм}^2$) и болтов (30ХГСА, $\sigma_b=110 \text{ кг/мм}^2$), изготовленных по принятой в авиационной промышленности технологии, определены значения рассеивания пределов выносливости и долговечности.

В данной работе численная обработка эксперимента проводилась как и в предыдущем случае. На рис. 4 показана, полученная зависимость k_Φ от f , причем нелинейность функции выражена не так ярко как на рис. 3, так как величина f в данном случае более чем на порядок меньше. Вертикальными линиями указаны интервалы равные одному среднеквадратическому отклонению коэффициента k_Φ для каждого типа проушин, определенные на основе коэффициентов вариации их пределов выносливости на данной базе испытаний. Использование зависимости (13) дает значимый коэффициент

корреляции равный 0.968. Коэффициент А равен 0.617, СКВО коэффициента А равно 0.079.

Таким образом, расчеты ЭКФ с использованием экспериментальных данных Б.В.Бойцова в качественном плане аналогичны расчетам по данным А.Тума и Е.Брудера и показывают высокую коррелированность величин k_f и f .

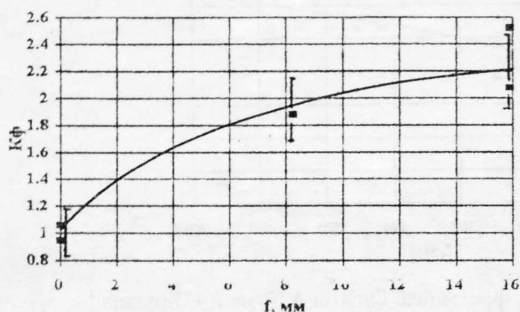


Рис. 4. Эффективный коэффициент фреттинга. Опыты Б.В.Бойцова.

В шестой главе излагается методика расчета на усталостную прочность с учетом фреттинг-фактора.

Постановка задачи.

В предыдущих разделах была установлена зависимость ЭКФ от фреттинг-фактора f для проушин при условном пределе выносливости. Тем не менее, имеется еще ряд вопросов, требующих уточнения и проверки, в частности:

- необходимо проверить характер зависимости на проушинах изготовленных из других конструкционных материалов, например, из алюминиевого сплава.

- необходимо уточнить влияние масштабного фактора и величины диаметра отверстия проушины на ЭКФ и фреттинг-усталость.

Используя формулы (3) и (7), учитывающие k_f и зная зависимость k_f от f для данной пары контактирующих материалов, возможно определение усталостной прочности любого конструктивного образца типа проушины без проведения экспериментальных исследований. Для проверки и уточнения вывода о независимости k_f от амплитуды циклического напряжения и определения точки пересечения кривых усталости для образцов без фреттинга и с фреттингом N_0 (которая, вообще говоря, вероятно, зависит от материалов взаимодействующих поверхностей и условий их контактного взаимодей-

вия, но по видимости изменяется в незначительных пределах) необходимо провести ряд экспериментов при различных уровнях номинальных напряжений.

Эксперименту, отвечающему на поставленные вопросы посвящено дальнейшее изложение.

Проведение эксперимента.

Для ответа на поставленные вопросы, из материала АК6 (алюминиевый сплав), были изготовлены образцы полосы с отверстием и проушины различной геометрической формы и диаметров отверстий в количестве: полоса с отверстием -55 штук, проушины -87 штук. Нагрузка производилась пульсирующим циклом с коэффициентом асимметрии $r=0$.

Результаты эксперимента.

Результаты испытаний на усталость и расчетов МГЭ напряженно деформированного состояния проушин и полосы с отверстием приведены на рис. 5.

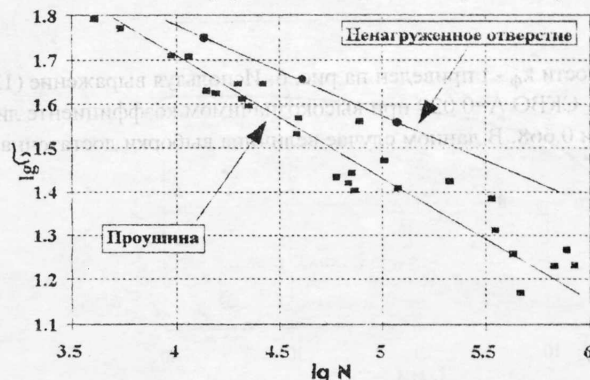


Рис. 5. Материал АК6 (с учетом K_ϕ).

Здесь σ -напряжения $\sigma_{1\max}$ с учетом эффективного коэффициента концентрации. Если теперь по этим точкам построить линейные регрессии отдельно для образцов со свободным отверстием и для проушин, то получим две пересекающиеся прямые. Как видно из рис. 5, воздействие фреттинга становится заметным при $\lg N > 2$.

При продолжении прямых, точка их пересечения $\lg N_0 \approx 0$ т.е. $N_0=1$ (см. также рис.1), это очень хорошо совпадает с данными имеющимися в публикациях.

Таким образом, на самом деле влияние фреттинга распространяется фактически на всю длину кривой усталости. Безусловно однако и то, что конкретное значение N_0 и наклон кривой усталости в полной мере будут зависеть от материала контактирующих пар и наличия между ними той или иной смазки или антифреттингового покрытия.

Теперь строится диаграмма k_Φ - f например для базы $\lg N_6=6$. Причем выбор базы принципиального значения не имеет. Главное, чтобы выбранная база была меньше базы предела выносливости материала, но, тем не менее достаточно велика для того, чтобы точно построить по точкам $\lg N_0$, $\lg N_6$ кривую усталости для каждой проушины.

Для определения k_Φ поступаем следующим образом. Из точки $\lg N_0=0$ на кривой усталости проводится прямая через каждую экспериментальную точку разрушения проушины и точка проектируется на ось ординат со значением $\lg N_6$.

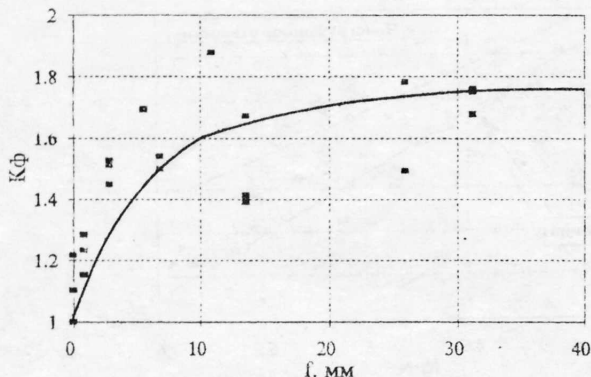


Рис. 6. Эффективный коэффициент фреттинга. Материал АК6.

Эффективный коэффициент фреттинга при истинной наработке равен:

$$k_{\Phi n} = \sigma_n \text{ отк} / \sigma_n \text{ проуш.}$$

а для выбранной базы:

$$k_\Phi = \sigma_b \text{ отк} / \sigma_b \text{ проуш.} \quad (14)$$

Тогда:

$$\lg k_\Phi = \lg k_n \cdot (\lg N_6 - \lg N_0) / (\lg N_n - \lg N_0) \quad (15)$$

График зависимости k_Φ - f приведен на рис. 6. Используя выражение (13) получаем $A=0.337$, СКВО $A=0.029$ при высокослабимом коэффициенте линейной корреляции 0.668. В данном случае величина выборки достаточна

подтверждает адекватность выбранной модели (13) экспериментальным данным.

Таким образом получены ответы на вопросы, поставленные в начале главы.

На основе проведенных исследований выявляется следующая методика расчета проушин на усталостную прочность с учетом воздействия фреттинга, рис. 7.

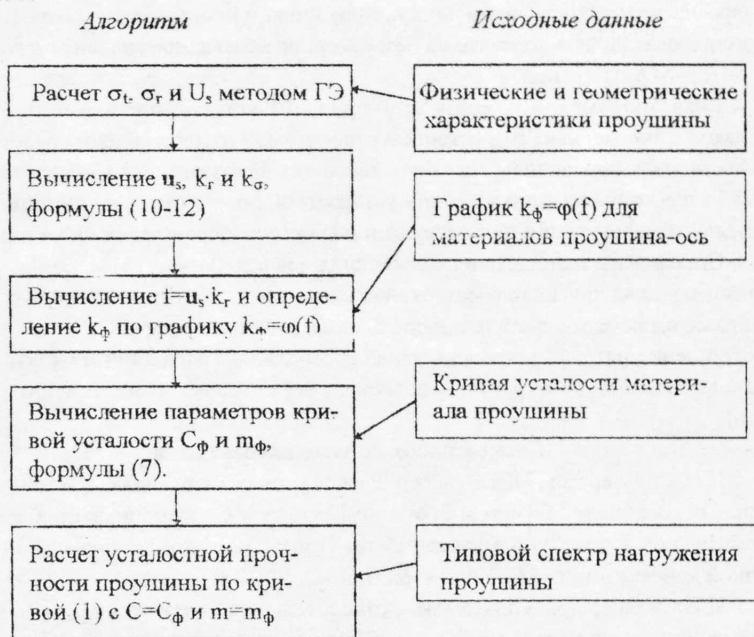


Рис. 7

Особенностями данного алгоритма являются:

1. Использование полной информации о НДС проушины.
2. Явный учет фреттинга на усталостную прочность.
3. Универсальность метода, позволяющая производить расчет проушин любой геометрии и размеров при различном направлении нагрузки и любом виде переменного цикла.

Выводы

1. Разработан и опробован вариант метода граничных элементов для расчета НДС проушин. Выявлено хорошее совпадение расчетных значений напряжений и перемещений с экспериментом.

2. Разработан экспериментальный метод определения относительного градиента напряжений.

3. Установлена однозначная зависимость между воздействием фреттинг-коррозии на усталостную прочность проушины и произведением относительного перемещения в контакте на безразмерное контактное давление в зоне усталостного разрушения.

4. Показано замедление роста ЭКФ при $f > 10$, которое, по видимому, связано с чрезмерным возрастанием относительного перемещения u_s и как следствие с уменьшением числа возникающих фреттинговых микротрещин.

5. Разработана методика расчета усталостной прочности проушин произвольной конфигурации при нагружении спектром переменных нагрузок.

6. Определены направления дальнейших исследований:

- исследование других пар материалов таких как сталь-титан, дюраль-дюраль, а также сталь-сталь и дюраль-сталь различных марок;
- обобщение методики, использующей ЭКФ для учета влияния контакта на усталость любых конструктивных элементов (не только элементов проушина-ось).

Список работ по теме диссертации:

1. И.Н.Сильверстов, И.П.Сухарев. Расчет усталостных характеристик шарнирных соединений с учетом фреттинг-фактора. // Современные проблемы текстильной и легкой промышленности: Тезисы докладов межвузовской научной конференции. -М., 1996. - Часть 2. -С. 11-12.

2. И.Н.Сильверстов. Определение относительного градиента напряжений для свободного и нагруженного отверстия расчетным методом // Вопросы прочности и надежности механики машин, процессов и изделий: Межвузовский сборник научных трудов. -1995. -Вып.4, - С. 30-32.

3. Сильверстов И.Н., Сухарев И.П. Расчет проушин на усталость с учетом фреттинг-фактора // Вестник машиностроения. -1997. - №5. -С. 16-20.

Кроме того, принято в печать:

Коэффициенты для расчета деталей машин на прочность и усталость.: Справочник. -М.: Машиностроение. \в печати\, (два параграфа написаны Сильверстовым И.Н.).