

## **Методика определения влияния фреттинг–коррозии на усталостную долговечность гладких конструктивных элементов из титанового сплава ВТ6**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

В работах [1 - 4] отмечено, что сопротивление усталости конструктивных элементов в условиях фреттинга зависит от величины контактных давлений  $\sigma_k$ , амплитуды относительных перемещений  $a$ , сочетания материалов в контактной паре. Авторами исследовано сопротивление фреттинг–усталости конструктивных элементов из алюминиевых сплавов [5], сталей [4, 7] и титанового сплава ВТ8 [3], применяемых в конструкции лопаток газотурбинных двигателей.

Анализ литературных источников показал, что в конструкции самолетов титановые сплавы чаще всего контактируют со сталями и алюминиевыми сплавами. Для соединения титановых силовых элементов используются стальные и титановые болты и шайбы.

В работе [3] разработана методика исследования фреттинг-усталости замковых соединений лопаток газотурбинных двигателей. Влияние фреттинг-коррозии на предел выносливости материала лопаток проведено с помощью эффективного коэффициента концентрации напряжений.

В работе [6] влияние фреттинг-коррозии на усталостную долговечность алюминиевых сплавов учитывается уменьшением амплитуды циклических напряжений, величиной контактных давлений и числом циклов до разрушения рассматриваемых конструктивных элементов.

Усталостные характеристики в условиях фреттинг–коррозии для титанового сплава ВТ6, применяемого в силовых конструкциях планера самолета, в открытой технической литературе не обнаружены.

Целью данной статьи является разработка методики определения влияния фреттинг-коррозии на усталостную долговечность плоских образцов (влияние величины контактных давлений  $\sigma_k$ , амплитуды относительных перемещений  $a$  деталей, сочетания материалов в контактной паре на усталостную долговечность гладкой полосы).

Учитывая результаты исследований влияния фреттинг-коррозии на усталостную долговечность конструктивных элементов, изложенные в работах [1 - 4, 6], разработана методика определения влияния фреттинг-коррозии на характеристики сопротивления гладких конструктивных элементов из сплава ВТ6, которая включает в себя:

1. Анализ конструктивно-технологических параметров сборных конструкций, выполняемых с применением силовых элементов из сплава ВТ6.
2. Разработку и изготовление типовых моделей гладкого образца для исследования характеристик сопротивления усталости сплава ВТ6; экспериментальное исследование характеристик сопротивления усталости плоских образцов из сплава ВТ6, разработку аналитических уравнений

- кривых усталости по результатам испытаний.
3. Разработку, изготовление образцов и приспособлений для испытания простых образцов из сплава ВТ6 для их испытаний при совместном действии циклических нагрузок контактных давлений и изменении величины микросмещений контактируемых элементов.
  4. Экспериментальное исследование характеристик сопротивления усталости гладких образцов из сплава ВТ6 в условиях совместного действия циклических нагрузок и фреттинг-коррозии; определение эффективных коэффициентов концентрации напряжений и разработку аналитических уравнений кривых усталости для прогнозирования долговечности сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии.
  5. Разработку конструктивно-технологических методов, снижающих негативное влияние фреттинг-коррозии на долговечность конструктивных элементов из сплава ВТ6.

Реализация предлагаемой методики проведена на примере исследования влияния фреттинг-коррозии на характеристики усталости гладких конструктивных элементов из сплава ВТ6, находящихся в контактном взаимодействии с шайбами, для типовых крепежных элементов.

Усталостные испытания проведены на воздухе при температуре 15 С на образцах гладкой полосы шириной 25 мм и толщиной 5 мм (рис. 1), изготовленных фрезерованием по контуру из листа титанового сплава ВТ6 толщиной 5 мм в состоянии поставки.

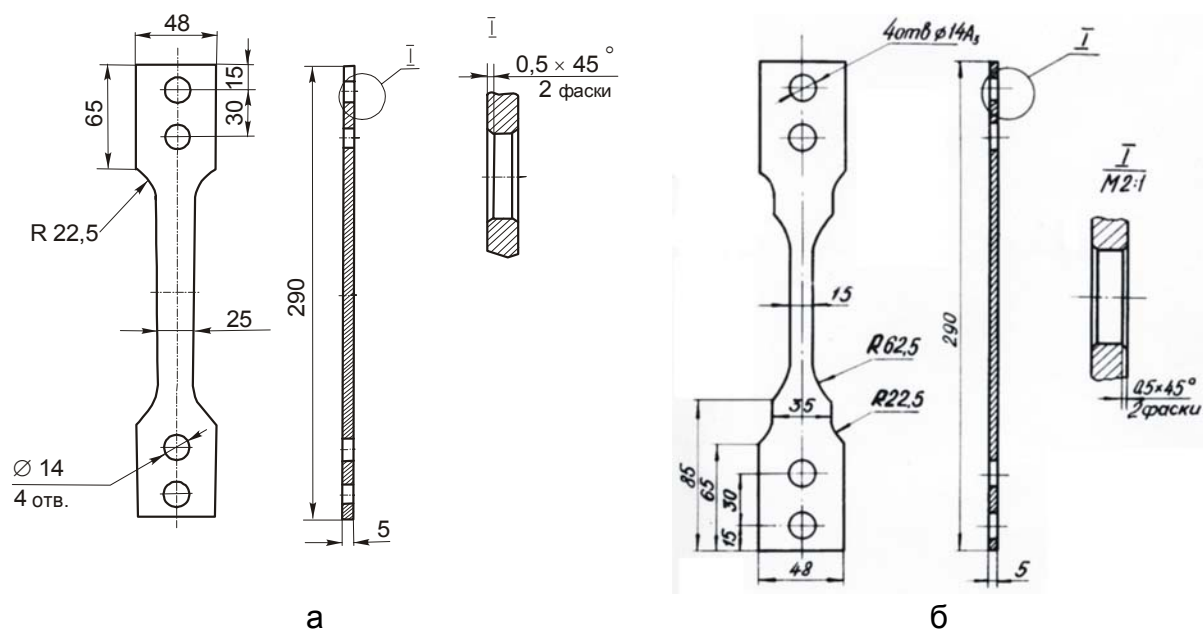


Рис.1. Образцы гладкой полосы для исследования усталости:  
а - в условиях фреттинг-коррозии; б) - без фреттинг-коррозии

Моделирование действия факторов, определяющих интенсивность фреттинг-коррозии осуществлялось при помощи приспособлений (рис. 2 и 3), позволяющих прижимать к испытываемому образцу шайбы размером 1,5 – 10 – 20 мм. из различных материалов.

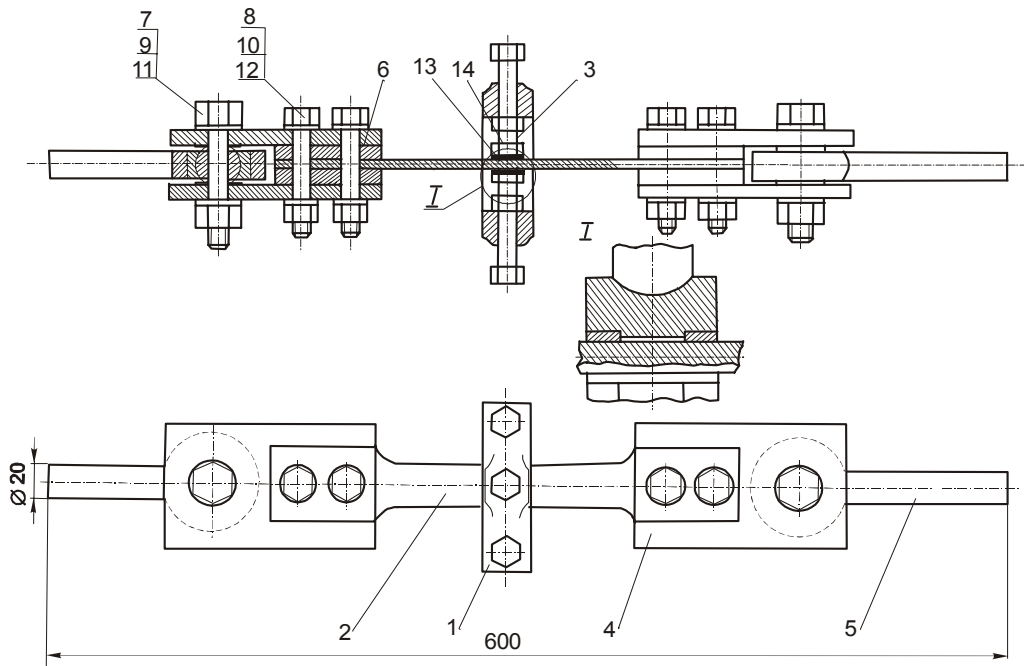


Рис. 2. Образец и приспособление для исследования влияния величины контактных давлений и сочетания материалов в контактной паре на выносливость гладкой полосы в условиях фреттинг-коррозии:

1 – скоба; 2 – образец; 3 – прижимной болт; 4 – пластина; 5 – проушина-захват; 6 – прокладка; 7 – 12 – крепежные детали; 13 – шайба; 14 – прижим

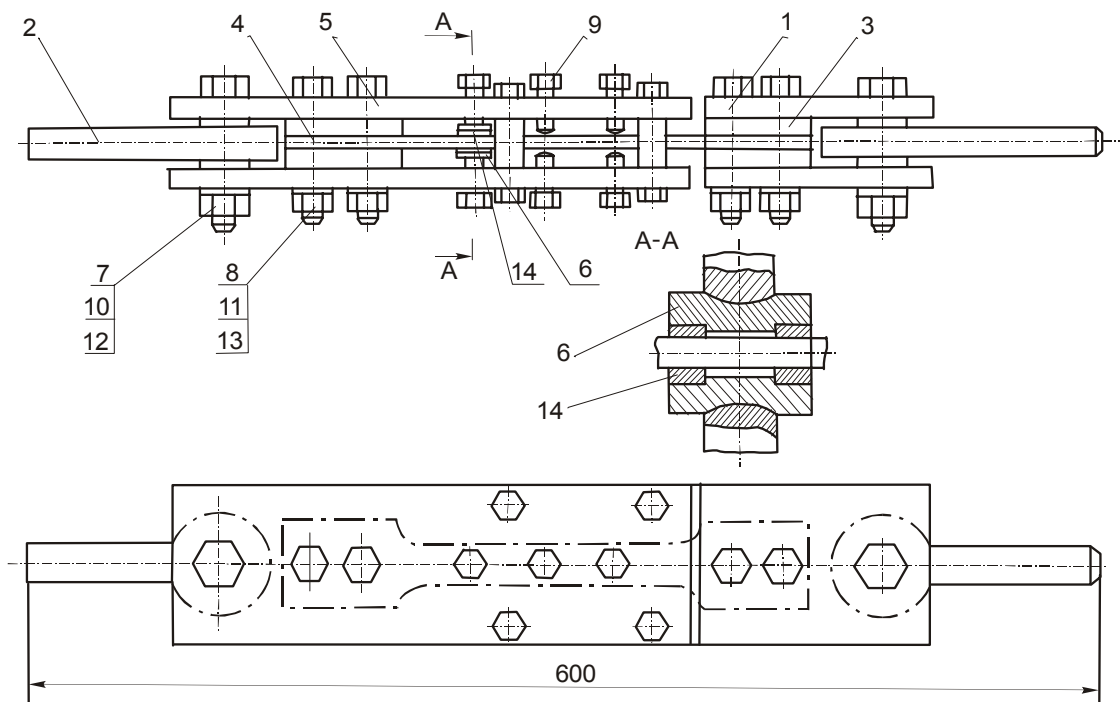


Рис. 3. Приспособление для исследования влияния амплитуды относительных перемещений на выносливость гладкой полосы в условиях фреттинг-коррозии:

1 – пластина; 2 – проушина-захват; 3 – прокладка; 4 – образец гладкой полосы; 5 – накладка приспособления; 6 – прижим; 7 – 13 – крепежные детали; 14 - шайба

Величину контактного давления между шайбой и образцом изменяли от 0 до 106 МПа, а амплитуду относительных перемещений – от 0,01 до 0,225 мм. Влияние сочетания материалов в контактной паре и защитного покрытия шайбы на выносливость образцов гладкой полосы исследовано для трех материалов шайб: кадмированной стали 30ХГСА, титанового сплава ВТ3-1, оксидированного и покрытого грунтом АК-069 алюминиевого сплава Д16АТ.

Усталостное разрушение образцов в условиях фреттинг-коррозии происходило по наружной границе зоны контакта шайбы с полосой (рис. 4, 5, 6).



Рис. 4. Характер усталостного разрушения гладкой полосы из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии

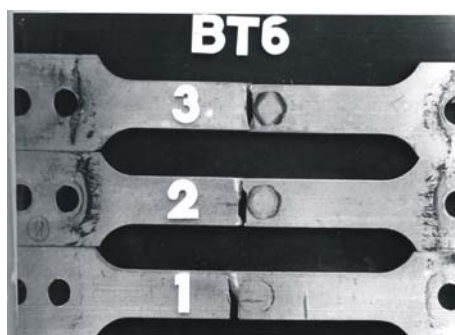


Рис. 5. Характер усталостного разрушения гладкой полосы из сплава ВТ6 при различном сочетании материалов в контактной паре:  
1 – шайба из ВТ3-1; 2 – кадмированная шайба из 30 ХГСА; 3 – оксидированная шайба из Д16АТ

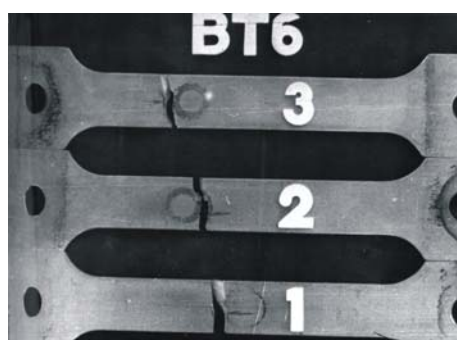


Рис. 6. Характер усталостного разрушения гладкой полосы из сплава ВТ6 при контакте с шайбами из сплава ВТ3-1 при различных величинах амплитуды относительных перемещений:  
1 – база перемещений  $L=10$  мм; 2 –  $L=65$  мм; 3 –  $L=115$  мм

На рис. 7 приведены результаты испытаний на усталость образцов при различных контактных давлениях между шайбой и полосой. Кривая усталости гладкого образца без фреттинг-коррозии (рис. 7, кривая 1) получена в работе [8]. Для всех вариантов испытаний в условиях фреттинг-коррозии характерен перелом линий усталости, построенных в двойных логарифмических координатах ( $\lg \sigma_{\max}$ ,  $\lg N$ ), что подтверждают положения, изложенные в работе [4], о различных механизмах разрушения на двух участках кривой усталости в условиях фреттинг-коррозии.

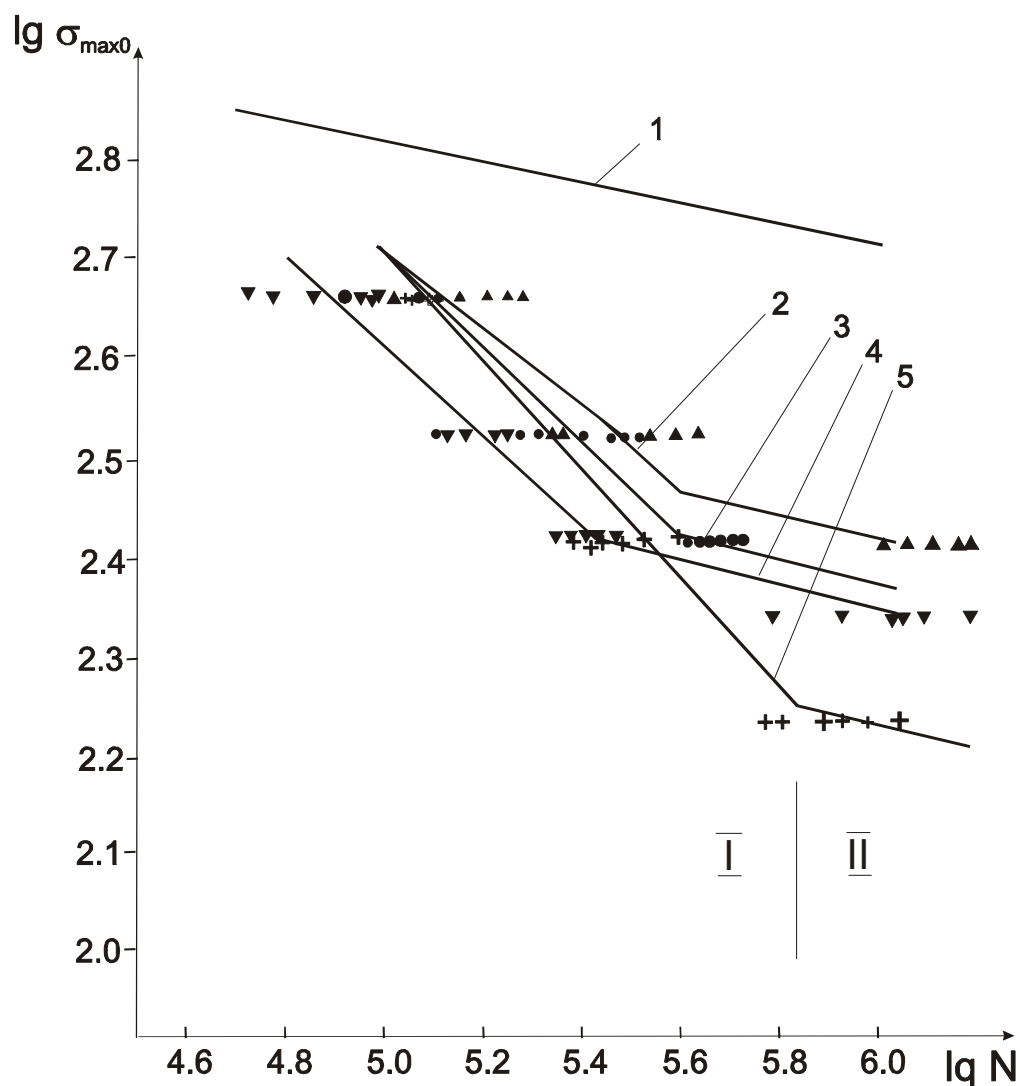


Рис. 7. Результаты усталостных испытаний гладкой полосы из сплава ВТ6 при различном сочетании материалов в контактной паре и различной величине контактных давлений

1 – кривая усталости сплава ВТ6; 2, 3, 4, 5 – кривые усталости сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии;

2 - Д16АТ,  $\sigma_k = 106$  МПа; 3 - 30ХГСА,  $\sigma_k = 106$  МПа; 4 - ВТ3-1,  $\sigma_k = 106$  МПа

5 - 30ХГСА,  $\sigma_k = 82$  МПа; экспериментальные данные: ● - 30ХГСА,  $\sigma_k = 106$  МПа;

▲ - Д16АТ,  $\sigma_k = 106$  МПа; ▼ - ВТ3-1,  $\sigma_k = 106$  МПа; + - 30ХГСА,  $\sigma_k = 82$  МПа

На первом участке кривой имеет место большее влияние фреттинга на концентрацию напряжений и усталостную прочность образцов. На втором участке в большей мере процессы трения и изнашивания влияют на усталостную долговечность.

Влияние величины контактных давлений на величину максимальных напряжений отнулевого цикла нагружения при заданном уровне долговечности сплава ВТ6 показано на рис. 8.

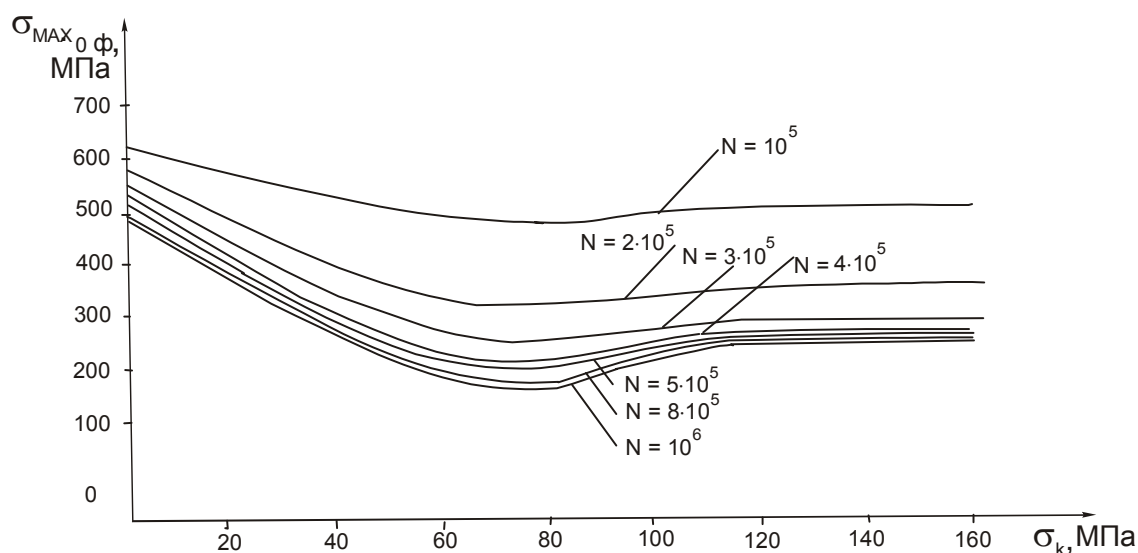


Рис. 8. Влияние величины контактных давлений на предельные максимальные напряжения гладкой полосы

С ростом контактных давлений разрушающее максимальное напряжение отнулевого цикла сначала уменьшается, достигает минимального значения, затем несколько повышается и далее становится постоянным. Малая чувствительность предельного максимального напряжения к изменению контактного давления в области его высоких значений ( $\sigma_{\text{к}} > 120$  МПа) объясняется следующим образом. Если контактная нагрузка достаточно велика, то происходит пластическая деформация (смятие) неровностей поверхности и фактическое давление на контактной площадке становится постоянным, которое по величине соответствует примерно утроенному значению предела текучести при растяжении [4].

В диапазоне малоциклового усталости  $N < 10^5$  до разрушения фреттинг-коррозия снижает максимальное разрушающее напряжение гладкой полосы в 1,2–1,3 раза в связи с тем, что фреттинг-коррозия еще не успевает развиваться. При более высоких значениях чисел циклов до разрушения  $N \rightarrow 10^6$  снижение несущей способности по причине фреттинг-коррозии существенно и достигает четырех раз. Для титановых сплавов характерен диапазон контактных давлений  $45 < \sigma_{\text{к}} < 110$  МПа, в котором фреттинг-коррозия имеет наиболее высокое повреждающее влияние.

На рис. 9 приведены кривые усталости, полученные после обработки результатов испытаний (см. рис. 7) по методике, изложенной в работе [3].

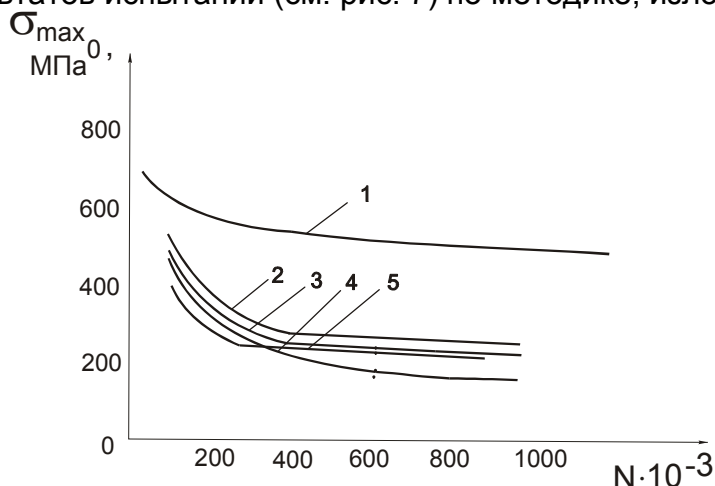


Рис. 9. Кривые выносливости сплава VT6 в условиях фреттинг-коррозии:  
 1 – сплав VT6 без фреттинг-коррозии,  $\sigma_{\max_0} = 1993N^{-0,101}$ ; 2 – VT6+Д16АТ,  $\sigma_k = 106$  МПа; 3 – VT6+30ХГСА,  $\sigma_k = 106$  МПа; 4 – VT6+30ХГСА,  $\sigma_k = 82$  МПа; 5 – VT6+VT3 – 1,  $\sigma_k = 106$  МПа

Параметры кривых усталости ( $\sigma_{\max_{0\text{фр}}}^m \cdot N = C$ ) приведены в табл. 1. Значения показателя степени  $m$  и константы  $C$  определены в процессе регрессионного анализа результатов испытаний образцов на усталость.

Таблица 1

Участок I					
Сочетание материалов в контактной паре	$\sigma_k$ , МПа	$m$	$C$	$\sigma_{\max_{0\text{фр}}}$	$N$
VT6 + Д16АТ	106	2,15615	$7,61815 \cdot 10^{10}$	$111402 \cdot N^{-0,46379}$	$60000 \leq N$ $N < 400000$
VT6 + 30ХГСА	106	2,10717	$4,71826 \cdot 10^{10}$	$116267 \cdot N^{-0,47457}$	$60000 \leq N$ $N < 400000$
VT6 + 30ХГСА	82	1,89215	$1,14782 \cdot 10^{10}$	$207321 \cdot N^{-0,5285}$	$60000 \leq N$ $N < 680000$
VT6 + VT3 -1	106	2,09996	$2,98452 \cdot 10^{10}$	$97305 \cdot N^{-0,4762}$	$60000 \leq N$ $N < 260000$
Участок II					
VT6 + Д16АТ	106	8,54701	$3,46665 \cdot 10^{26}$	$1274 \cdot N^{-0,117}$	$400000 \leq N$ $N < 2 \cdot 10^6$
VT6 + 30ХГСА	106	8,00000	$7,25092 \cdot 10^{24}$	$1281 \cdot N^{-0,125}$	$400000 \leq N$ $N < 2 \cdot 10^6$
VT6 + 30ХГСА	82	9,09091	$1,33776 \cdot 10^{26}$	$748 \cdot N^{-0,11}$	$68000 \leq N$ $N < 2 \cdot 10^6$
VT6 + VT3 -1	106	7,91766	$2,99207 \cdot 10^{24}$	$1234 \cdot N^{-0,1263}$	$260000 \leq N$ $N < 2 \cdot 10^6$

Влияние амплитуды относительных перемещений в контактной паре исследовано при помощи приспособлений (см. рис. 3). Возрастание величины амплитуды относительных перемещений обеспечивалось прижатием шайбы на различных расстояниях от заделки  $L=10$ ; 65; 115 мм.

Усталостные испытания проведены для сочетания материалов ВТ6+ВТ3-1 при контактном давлении  $\sigma_k = 106$  МПа.

На рис. 10 представлены результаты испытаний на усталость образцов при различных значениях амплитуды перемещений в контактных парах. По результатам испытаний получены уравнения и построены кривые выносливости гладких образцов из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии. Параметры кривых приведены в табл. 2.

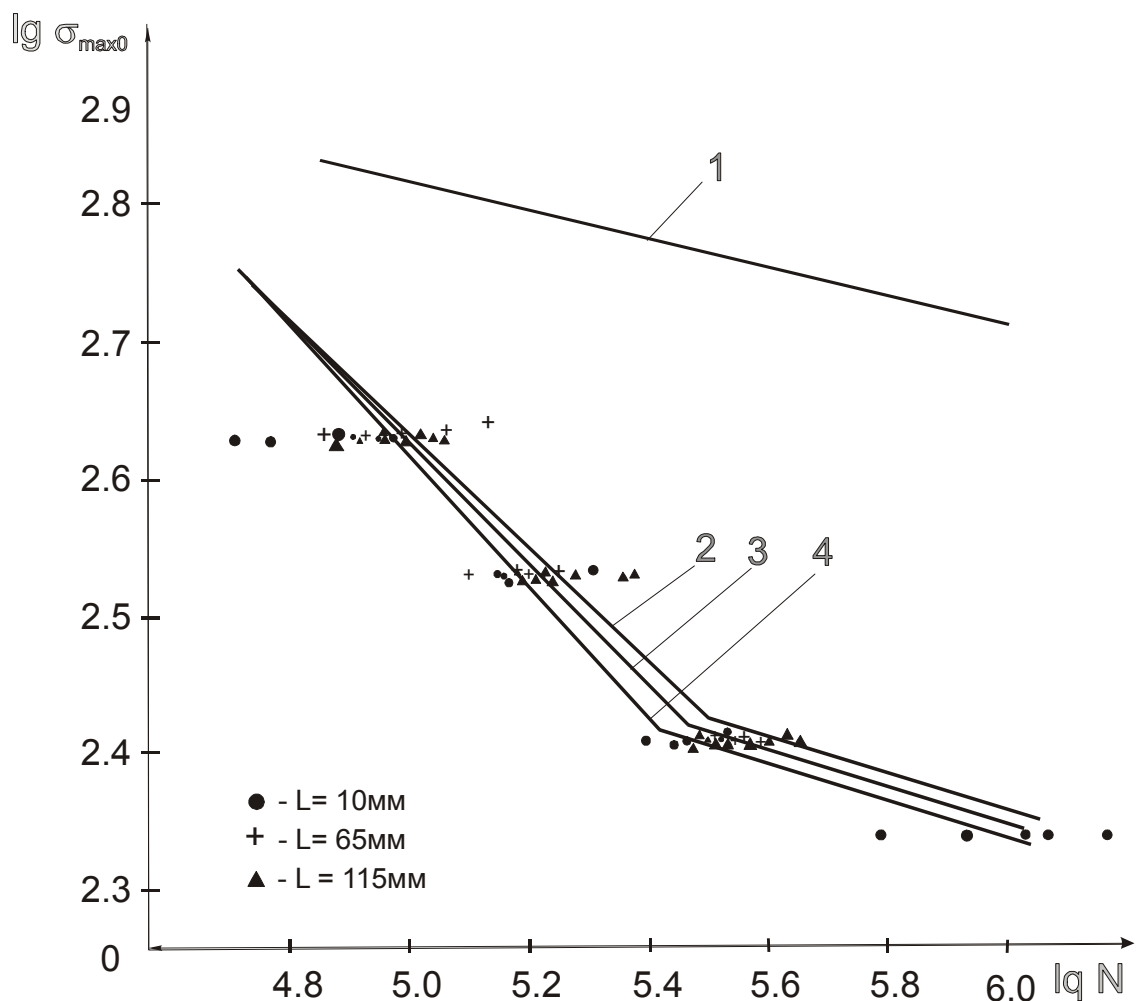


Рис. 10. Результаты усталостных испытаний гладкой полосы из сплава ВТ6 при различных расстояниях от заделки до исследуемой зоны интенсивной фреттинг-коррозии:

1 – кривая усталости сплава ВТ6:  $\sigma_{\max 0} = 1993N^{-0.101}$ ; 2, 3, 4 – линии регрессии;

2 –  $L=115$  мм; 3 –  $L=65$  мм; 4 –  $L=10$  мм



Таблица 2

Участок I					
Расстояние до заделки L, мм	$\sigma_K$ , МПа	m	c	$\sigma_{\max_{0фр}}$	N
10	106	2,09996	$2,98452 \cdot 10^{10}$	$97305 \cdot N^{-0,4762}$	$60000 \leq N \leq 260000$
65	106	2,1725	$4,8964 \cdot 10^{10}$	$83282 \cdot N^{-0,4603}$	$60000 \leq N \leq 290000$
115	106	2,25175	$8,5015 \cdot 10^{10}$	$71415 \cdot N^{-0,4441}$	$60000 \leq N \leq 320000$
Участок II					
10	106	7,91766	$2,99207 \cdot 10^{24}$	$1234 \cdot N^{-0,1263}$	$260000 < N \leq 2 \cdot 10^6$
65	106	7,66871	$8,23396 \cdot 10^{29}$	$1314 \cdot N^{-0,1304}$	$290000 < N \leq 2 \cdot 10^6$
115	106	7,5075	$4,09813 \cdot 10^{23}$	$1397 \cdot N^{-0,1332}$	$320000 < N \leq 2 \cdot 10^6$

На рис. 11 показано влияние амплитуды проскальзывания на величину предельных максимальных напряжений гладкой полосы из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии. Установлено, что в исследованном диапазоне амплитуд относительных перемещений в контактной паре усталостная прочность титанового сплава ВТ6 изменяется незначительно. Увеличение амплитуды перемещений в 11,7 раз приводит к изменению  $\sigma_{\max_{0ф}}$  на 4,4%.

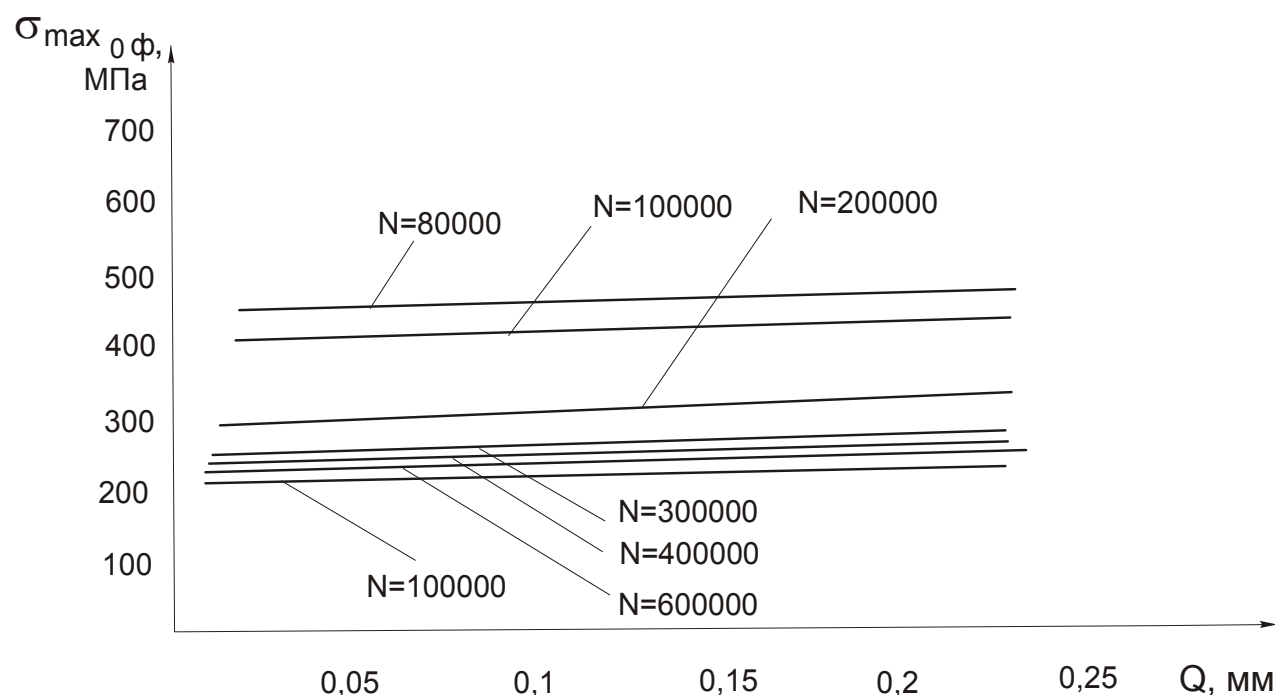


Рис. 11. Влияние амплитуды проскальзывания на величину предельных максимальных напряжений гладкой полосы из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии

На рис. 12 показано влияние амплитуды проскальзывания в контактной паре на выносливость гладкой полосы из сплава ВТ6. Минимальные значения амплитуды перемещений характерны для деталей болтового соединения. В исследованном диапазоне влияние амплитуды перемещений на долговечность полосы незначительно. При  $\sigma_{\max_{0\phi}} = 250$  МПа увеличение  $a$  от 0,008 до 0,18 мм приводит к повышению долговечности полосы на 24%. При  $\sigma_{\max_{0\phi}} = 334$  МПа выносливость возрастает на 18%, а при  $\sigma_{\max_{0\phi}} = 416$  МПа – на 13%.

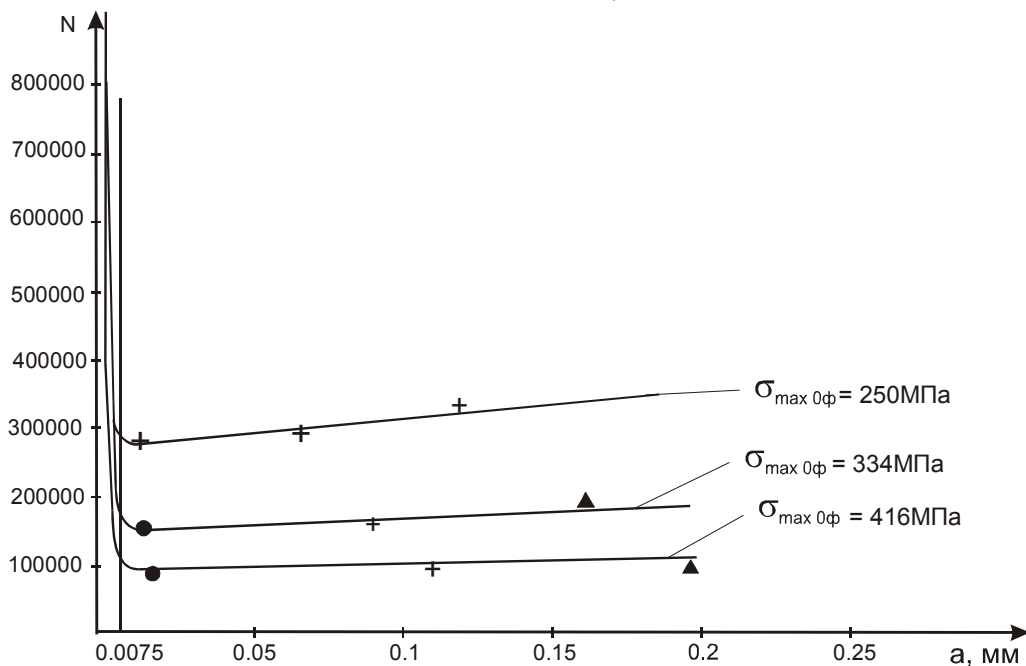


Рис. 12. Влияние амплитуды проскальзывания на выносливость гладкой полосы:

Эксперимент: ● -  $l = 10$  мм; + -  $l = 65$  мм; ▲ -  $l = 115$  мм

Степень влияния величины контактных давлений и сочетания материалов в контактной паре на несущую способность гладких образцов полосы из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-усталости оценивалось величиной эффективного коэффициента концентрации напряжений, показывающего снижение несущей способности материала при фреттинг-коррозии ( $K_{\sigma\phi}$ ):

$$K_{\sigma\phi} = \frac{\sigma_{\max_0}}{\sigma_{\max_{0\phi}}},$$

где  $\sigma_{\max_0}$  - максимальные напряжения для гладкой полосы при числе циклов до разрушения  $N_i$ , вычисленные по формуле  $\sigma_{\max_0} = 1993N^{-0,101}$  [8];

$\sigma_{\max_{0\phi}}$  - максимальные напряжения для гладкой полосы в условиях фреттинг-коррозии при том же числе циклов до разрушения  $N_i$ .

Для исследованных сочетаний материалов и давлений в контактной паре получены формулы для расчета  $K_{\sigma\phi}$ , которые приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сочетание материалов в контактной паре	$\sigma_k$ , МПа	$K_{\sigma\phi}$ , I участок	$K_{\sigma\phi}$ , II участок
BT6 + Д16АГ	106	$0,01789N^{0,3628}, N \in [6 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^5]$	$1,564N^{0,016}, N \in [4 \cdot 10^5, 10^6]$
BT6 + 30ХГСА	106	$0,01714N^{0,3736}, N \in [6 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^5]$	$1,556N^{0,024}, N \in [4 \cdot 10^5, 10^6]$
BT6 + BT3-1	106	$0,02048N^{0,3752}, N \in [6 \cdot 10^4, 2,6 \cdot 10^5]$	$1,616N^{0,0253}, N \in [2,6 \cdot 10^5, 10^6]$
BT6+ 30ХГСА	82	$0,009613N^{0,4575}, N \in [6 \cdot 10^4, 6,8 \cdot 10^5]$	$2,664N^{0,009}, N \in [6,8 \cdot 10^5, 10^6]$

На рис. 13 приведены зависимости эффективного коэффициента концентрации напряжений от числа циклов до разрушения. Менее всего фреттинг-коррозия снижает несущую способность полосы из сплава BT6 в контакте с шайбой из сплава Д16АТ при  $\sigma_k = 106$  МПа,  $K_{\sigma\phi} < 2,0$ . Наиболее значительное снижение усталостной прочности - для контактной пары BT6+BT3-1 при  $\sigma_k = 106$  МПа,  $K_{\sigma\phi} \leq 2,3$  (рис. 13, кривая 4). Уменьшение давления в контактной паре BT6+30ХГСА от 106 до 82 МПа привело к возрастанию величины  $K_{\sigma\phi} \leq 2,1$  до  $K_{\sigma\phi} \leq 3,0$  (рис. 13, кривая 3).

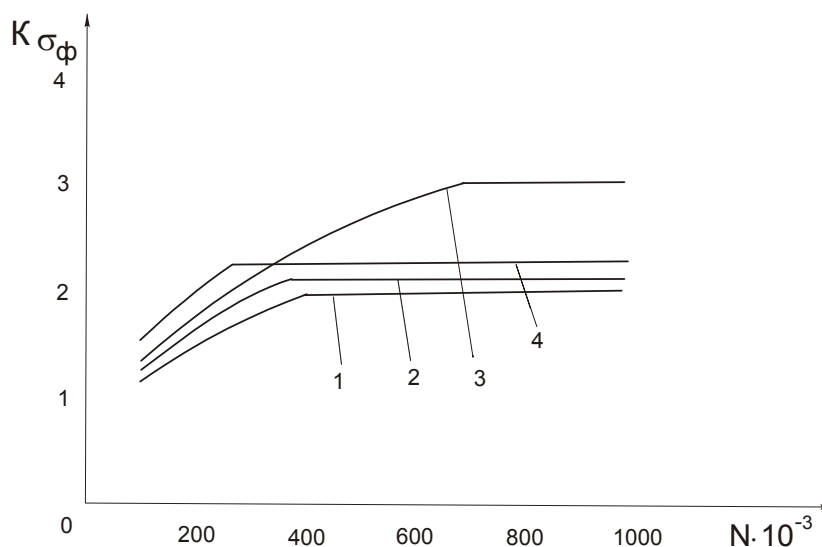


Рис. 13. Эффективные коэффициенты концентрации напряжений для гладкой полосы в условиях фреттинг-коррозии:

1 - BT6+Д16АТ,  $\sigma_k = 106$  МПа; 2 - BT6+30ХГСА,  $\sigma_k = 106$  МПа; 3 - BT6+30ХГСА,  $\sigma_k = 82$  МПа; 4 - BT6+BT3-1,  $\sigma_k = 106$  МПа

### Выводы

1. Разработана и экспериментально апробирована методика определения влияния фреттинг-коррозии на усталостную долговечность гладких конструктивных элементов из титанового сплава BT6.

2. Контактные давления  $\sigma_k = 82$  МПа снижают усталостную прочность титанового сплава ВТ6 в 3 раза ( $K_{\sigma_\phi} \leq 3$ ). С увеличением контактных давлений до  $\sigma_k = 106$  МПа повреждающее влияние фреттинг-коррозии несколько уменьшается, что приводит к увеличению усталостной прочности ВТ6. В этом случае эффективный коэффициент концентрации в этом случае  $K_{\sigma_\phi} \leq 2,3$ .
3. Сочетание в контактной паре титановой полосы из сплава ВТ6 и ненагруженного контактирующего элемента из алюминиевого сплава Д16АТ обеспечивает максимальную выносливость титанового сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии. Применение в контактной паре с ВТ6 стали 30ХГСА и титанового сплава ВТ3-1 приводит к снижению усталостной прочности ( $K_{\sigma_\phi} < 2,13$  и  $K_{\sigma_\phi} < 2,3$  соответственно).
4. Увеличение амплитуды относительных перемещений от величин, характерных для болтовых соединений  $a \in [0,009; 0,019]$  мм, приводит к увеличению предельных максимальных напряжений в 12 раз.
5. Изменение величины амплитуды относительных перемещений от 0,009 до 0,019 мм оказывает незначительное влияние на изменение выносливости сплава ВТ6. При числах циклов до разрушения  $N < 100000$  изменение амплитуды перемещений не оказывает влияния на выносливость. При больших значениях  $N$  увеличение амплитуды приводит к возрастанию выносливости сплава ВТ6 до 1,3 раза.
6. Получены аналитические выражения для расчета эффективных коэффициентов концентрации напряжений, позволяющие оценить влияние конструктивно-технологических факторов на фреттинг-коррозию и усталостную долговечность титанового сплава ВТ6.

#### Список литературы

1. Голего Н.Л., Алябьев А.Л., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – К.: Техніка, 1974. - 270 с.
2. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. - Л.: Машиностроение, 1976. - 270 с.
3. Конструкционная прочность материалов и деталей ГТД /Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А., Захарова Т.П., Козлов Л.А., Петухов А.Н., Сизова Р.Н// Труды ЦИАМ. - №835. 1979. – 522 с.
4. Сосновский Л.А., Махутов Н.А., Шуринов В.А. Фреттинг-усталость: основные закономерности (-Обобщающая статья) // Заводская лаборатория. – 1992. - т. 58. - № 8. - С. 45 - 62.
5. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования сборных самолетных конструкций регламентируемой долговечности // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2004. - Вып. 23. - С. 191–199.
6. Гребеников А.Г. Расчет выносливости срезного болтового стыка с учетом фреттинг-коррозии // Вопросы оптимизации тонкостенных силовых конструкций. Х.: «Вища школа» при ХГУ. - 1975. - С. 140–150.
7. Трощенко В.Т., Цыбанев Г.В., Хоцяновский А.О. Определение долговечности сталей при фреттинг-усталости // Пробл. прочности. – 1988. - №6. – С. 3–8.
8. Гребеников А.Г., Клименко В.Н. Сопrotивление усталости титанового сплава ВТ6 // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». 2005.– Вып. 42(3). – С. 37-46.