

УДК 629.7.01

А.Г. Гребеников, А.М. Гуменный, И.П. Змиевской,
В.Н. Клименко, В.М. Мацевитый, С.В. Ляшок

Экспериментальное исследование влияния вакуумно-плазменного покрытия, нанесенного на шайбы, на усталостную долговечность конструктивных элементов в условиях фреттинг-коррозии

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины*

Экспериментально установлено, что применение вакуумно-плазменного покрытия $\{Cr+(TiCr)N\}_{x10}$, нанесенного на шайбы при действии эксплуатационных нагрузок, в 1, 5 раза повышает усталостную долговечность конструктивных элементов в виде гладких полос из алюминиевого сплава Д16АТ и таких же полос с отверстием, заполненным болтом с осевым и радиальным натягами, по сравнению с усталостной долговечностью полос, контактирующих с кадмированными шайбами.

Ключевые слова: усталостная долговечность, вакуумно-плазменное покрытие, фреттинг-коррозия, полоса, крепежный элемент, болт, шайба.

Известно [3], что 85% всех разрушений конструкции планера самолёта происходит в местах соединения ее элементов. Установлено [1–6], что в незагруженном болтовом соединении применение радиального натяга и затяжки болтов приводит к значительному повышению усталостной долговечности его конструктивных элементов. Однако усталостное разрушение элементов соединения при использовании средств, повышающих их усталостную долговечность, возникает в зоне интенсивной фреттинг-коррозии между контактирующими деталями соединения, т.е. фреттинг-коррозия ограничивает дальнейшее повышение долговечности конструктивных элементов, не давая возможности в полной мере реализовать положительное влияние осевого и радиального натягов болтов на долговечность соединений.

Поэтому разработка и исследование покрытий для контактирующих поверхностей сопрягаемых деталей соединений, снижающих вредное воздействие фреттинг-коррозии на усталостную долговечность конструктивных элементов, является актуальной задачей и целью данной статьи.

Для проведения испытаний, связанных с определением влияния вакуумно-плазменного покрытия $\{Cr+(TiCr)N\}_{x10}$, нанесенного на шайбы, на усталостную долговечность конструктивных элементов из алюминиевого сплава Д16АТ в условиях фреттинг-коррозии, были спроектированы и изготовлены конструктивно-подобные образцы гладких полос и полос с отверстиями. Форма и размеры образцов для проведения усталостных испытаний разработаны в соответствии с ГОСТ 25.502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов: Методы испытания на усталость».

Геометрические размеры конструктивно-подобных образцов полос показаны на рис. 1 и 2.

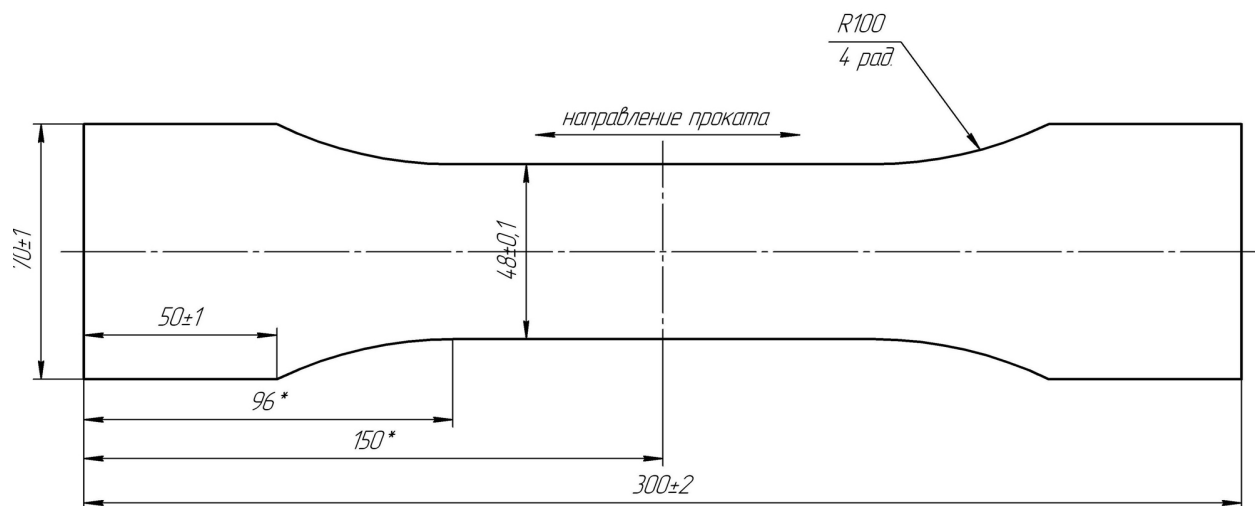


Рис. 1. Схема образца гладкой полосы для проведения усталостных испытаний

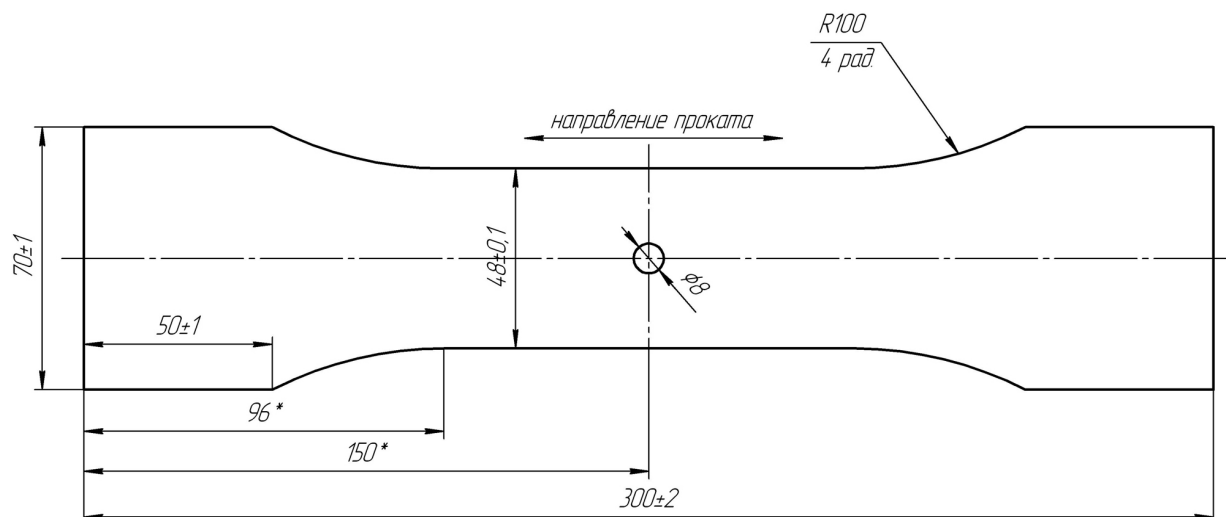


Рис. 2. Схема образца полосы с отверстием для проведения усталостных испытаний

Конструктивно-подобные образцы полос изготовлены из листа Д16АТ л.5 путем фрезерования по контуру на вертикально-фрезерном станке в проблемной научно-исследовательской лаборатории ресурса авиационных конструкций кафедры проектирования самолетов и вертолетов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». После изготовления конструктивно-подобных образцов полос на них по серийной технологии авиационного предприятия было нанесено анодно-окисное покрытие Ан. Окс. Нхр.

Для моделирования контакта между гладкой полосой и шайбами были разработаны и изготовлены специальные приспособления. Трехмерные модели элементов приспособления показаны на рис. 3. В собранном состоянии трехмерная модель приспособления изображена на рис. 4.

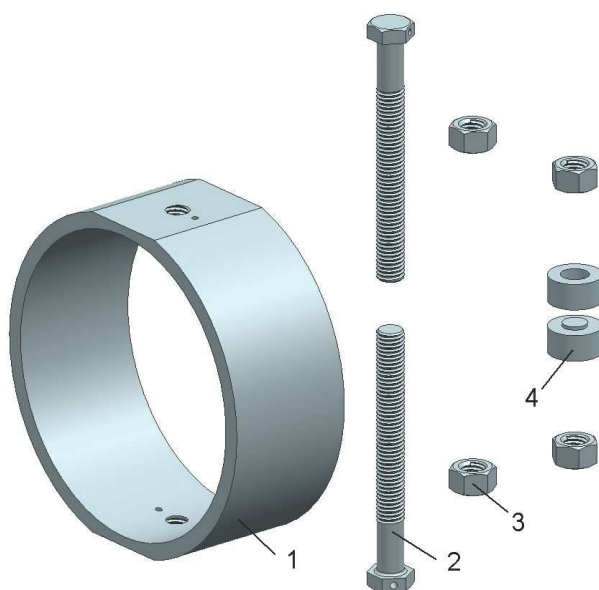


Рис. 3. Трехмерные модели элементов приспособления для проведения исследований:
1 – кольцо; 2 – прижимной болт; 3 – гайка;
4 – прижимные головки

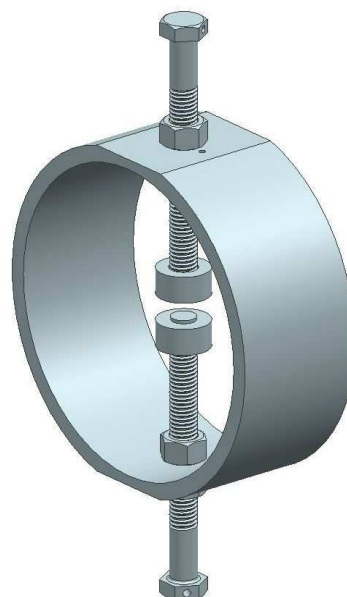


Рис. 4. Трехмерная модель приспособления в сборе

Прижатие шайб к конструктивно-подобному образцу гладкой полосы происходило через прижимные головки 4 (см. рис. 3), с помощью прижимных болтов 2. Прижимные болты вкручивались в кольцо 1. Прижатие шайб через прижимные головки к образцу с заданными контактными напряжениями обеспечивалось затягиванием болтов шкальным ключом КМШ-140 (момент затяжки $M_{зам} = 25 \text{ Н}\cdot\text{м}$). По разработанным трехмерным моделям было изготовлено приспособление для проведения экспериментальных исследований (рис. 5). Трехмерная модель образца с приспособлением для проведения усталостных испытаний в условиях фреттинг-коррозии показана на рис. 6.



Рис. 5. Приспособление для проведения экспериментальных исследований

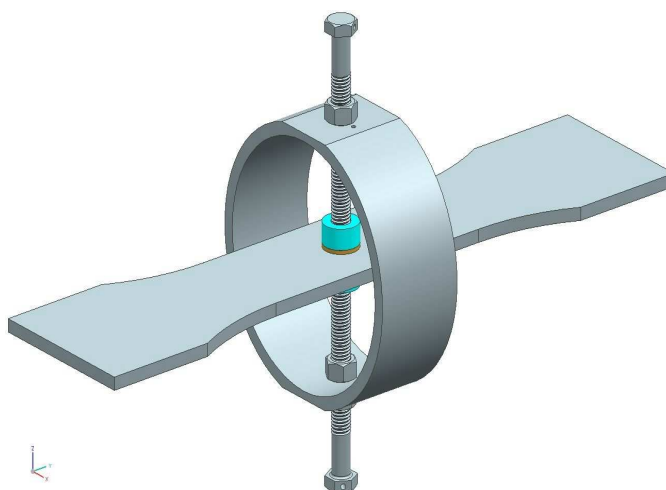


Рис. 6. Трехмерная модель образца с приспособлением для проведения усталостных испытаний

Усталостные испытания выполнены в установке ЦДМ-10ПУ, в которой разработанные конструктивно-подобные образцы нагружали одноосными переменными нагрузками при отнулевом цикле нагружения, которые показаны на (рис. 7 и 8). Частота нагружения $f=11$ Гц.

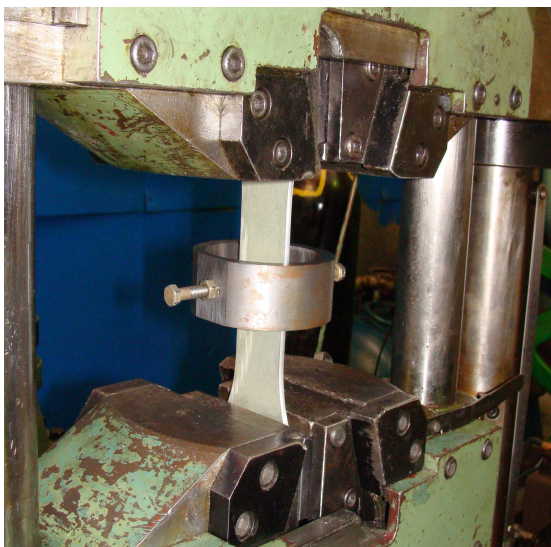


Рис. 7. Гладкая полоса в контактной паре с прижатыми шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 в приспособлении, установленная в испытательной машине

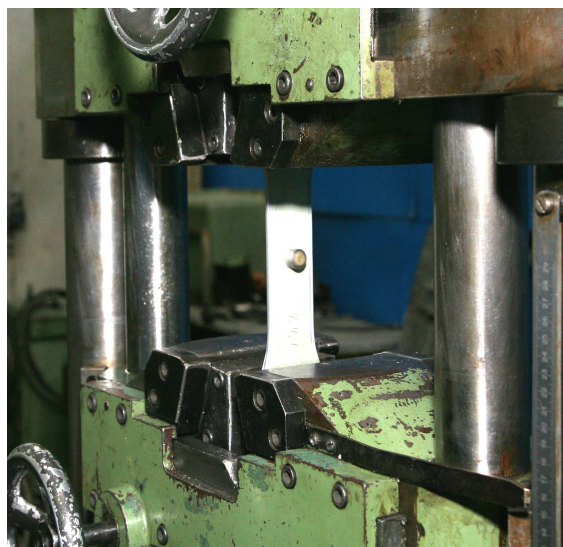


Рис. 8. Полоса с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами в контактной паре с шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80, установленная в испытательной машине

Экспериментальные исследования влияния вакуумно-плазменного покрытия на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов гладких полос в условиях фреттинг-коррозии проводили с шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 и шайбами с вакуумно-плазменным покрытием $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$ (шайбы изготовлены из стали 30ХГСА).

Эксперименты выполнены при двух уровнях циклических напряжений $\sigma_{бр\ min} = 0$, $\sigma_{бр\ max} = 130$ МПа и $\sigma_{бр\ min} = 0$, $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа.

Зоны и характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов показаны на рис. 9 и 10.

Усталостное разрушение конструктивно-подобных образцов гладких полос из алюминиевого сплава Д16АТ л.5 при испытаниях в контактной паре с прижатыми шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 на уровне напряжений $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 130$ МПа происходило в зоне контакта шайбы и полосы от фреттинг-коррозии (рис. 9 образец 1.7.2) и в зоне радиусного перехода полосы (см. рис. 1 и 9, образец 1.8.2). При уровне $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа усталостное разрушение произошло в зоне контакта шайбы и полосы от фреттинг-коррозии (образцы 1.4.1; 1.5.1; 1.6.1 на рис. 10.)

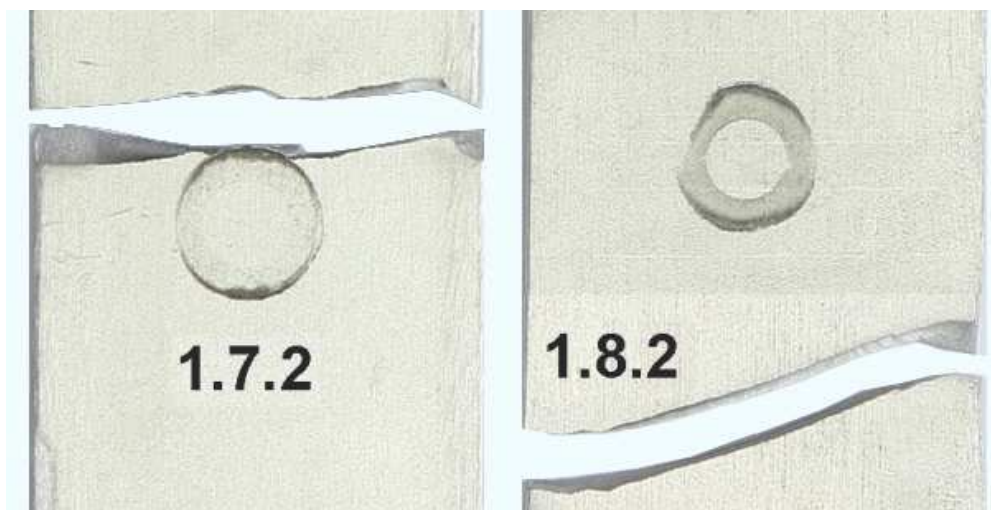


Рис. 9. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов гладких полос из материала Д16АТ л.5 при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии в контактной паре с прижатыми шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 при уровне напряжений $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 130$ МПа

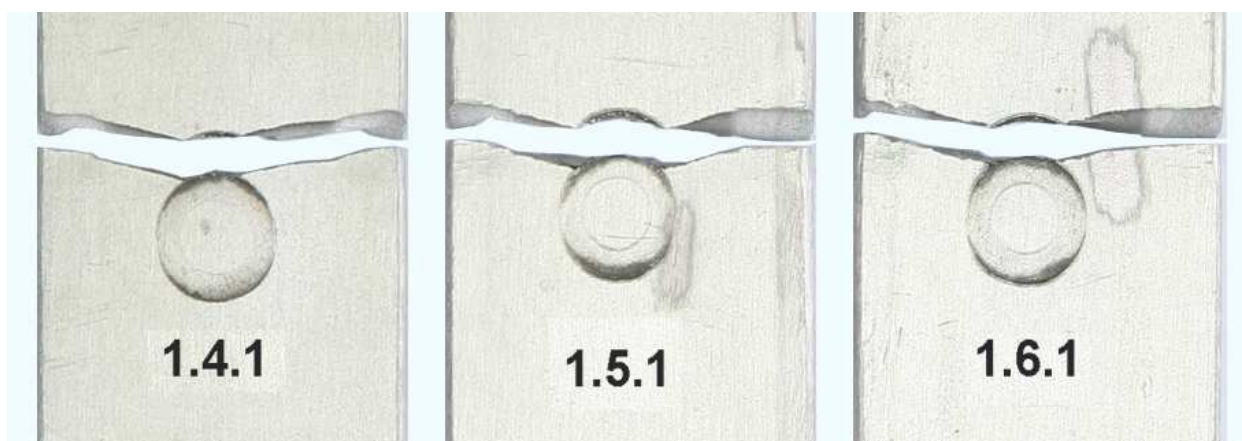


Рис. 10. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов гладких полос из материала Д16АТ л.5 при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии в контактной паре с прижатыми шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 при уровне напряжений

$$\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа, } \sigma_{бр\ max} = 150 \text{ МПа}$$

Зоны и характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов показаны на рис. 11 и 12.

Усталостное разрушение конструктивно-подобных образцов гладких полос из алюминиевого сплава Д16АТ л.5 при испытаниях в контактной паре с прижатыми шайбами с нанесенным на них вакуумно-плазменным покрытием $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$ на уровне напряжений $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 130$ МПа (образцы 2.7.2; 2.8.2) и

$\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа (образцы 2.4.1; 2.5.1; 2.6.1) произошло в зоне контакта шайбы и полосы от фреттинг-коррозии.

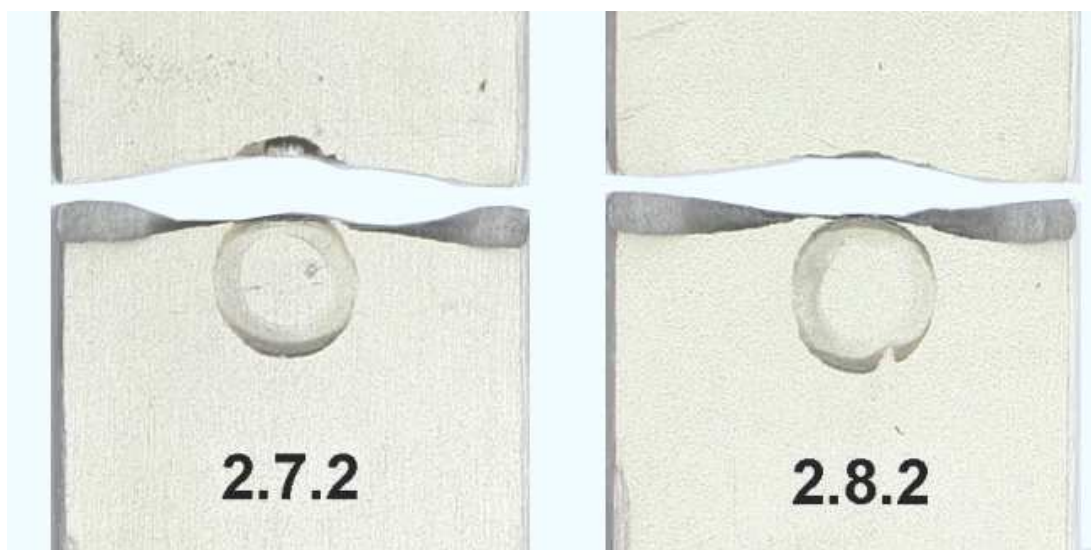


Рис. 11. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов гладких полос из материала Д16АТ л.5 при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии в контактной паре с прижатыми шайбами с нанесенным на них покрытием {Cr+(TiCr)N} x10 при уровне напряжений

$$\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа}, \sigma_{бр\ max} = 130 \text{ МПа}$$



Рис. 12. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов гладких полос из материала Д16АТ л.5 при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии в контактной паре с прижатыми шайбами с нанесенным на них покрытием {Cr+(TiCr)N} x10 при уровне напряжений

$$\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа}, \sigma_{бр\ max} = 150 \text{ МПа}$$

Диаграмма на рис.13 показывает влияние вакуумно-плазменных покрытий на усталостную долговечность гладкой полосы в условиях фреттинг-коррозии.

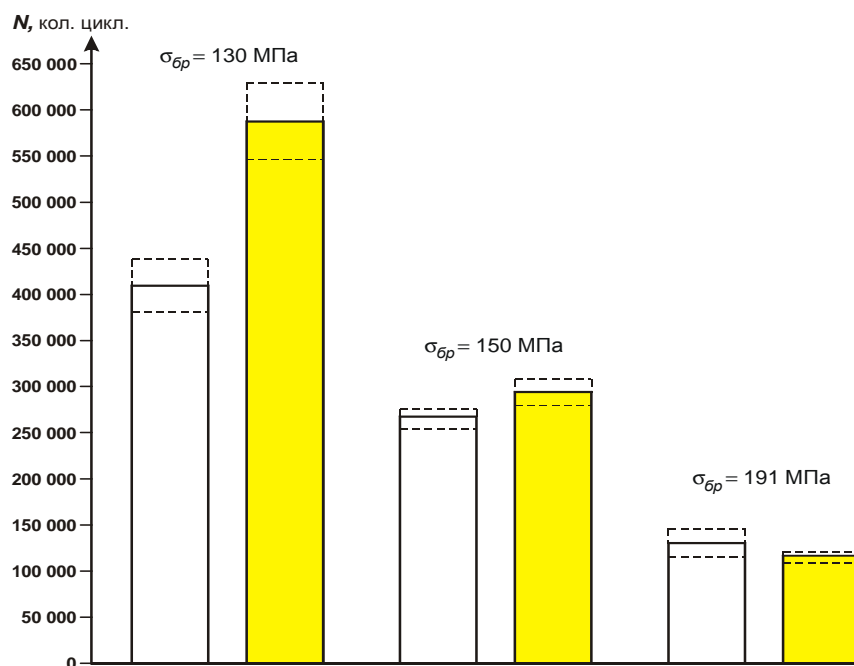


Рис. 13. Влияние вакуумно-плазменного покрытия, нанесенного на шайбы, на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов гладких полос в условиях совместного действия циклических растягивающих нагрузок и фреттинг-коррозии:

- - долговечность образца гладкой полосы с прижатыми шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 ($M_{зам} = 25 \text{ Н}\cdot\text{м}$);
- - долговечность образца гладкой полосы с прижатыми шайбами с нанесенным на них вакуумно-плазменным покрытием

В результате экспериментальных исследований установлено, что нанесение вакуумно-плазменного покрытий на шайбы приводит к повышению усталостной долговечности конструктивно-подобных образцов гладких полос из материала Д16АТ л.5, работающих в условиях фреттинг-коррозии, при уровне напряжений $\sigma_{br \text{ min}} = 0 \text{ МПа}$, $\sigma_{br \text{ max}} = 130 \text{ МПа}$ – в 1,4 раза и при уровне напряжений $\sigma_{br \text{ min}} = 0 \text{ МПа}$, $\sigma_{br \text{ max}} = 150 \text{ МПа}$ – в 1,1 раза.

Экспериментальные исследования влияния вакуумно-плазменных покрытий шайб на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов полос с отверстием, заполненным болтом с радиальным и осевым натягами, в условиях действия фреттинг-коррозии проведены на образцах, трехмерная модель которых показана на рис. 14.

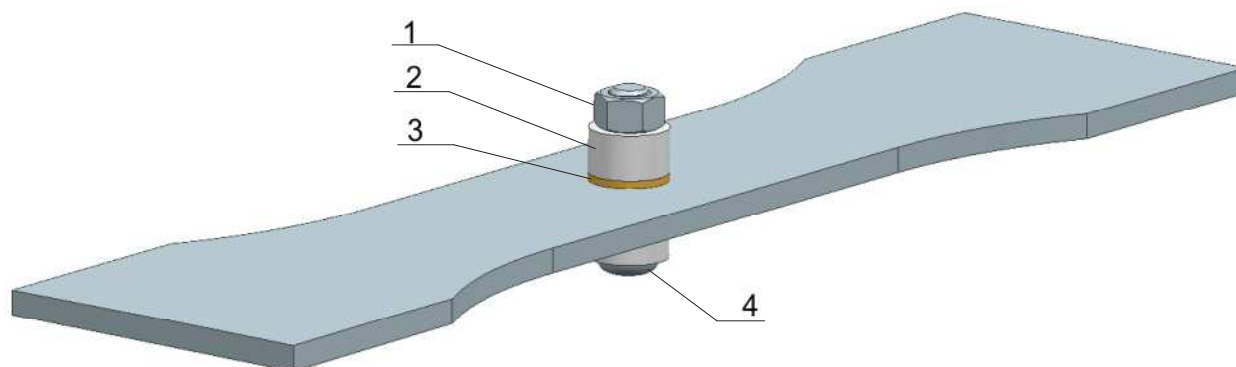


Рис.14. Трехмерная модель образца для проведения исследований:
1 – гайка; 2 – втулка; 3 – шайба; 4 – болт 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79

Сборку образцов полосы с отверстием выполняли в следующем порядке:

- 1) на болт 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 устанавливали стальную втулку и шайбу;
- 2) болт вставляли в отверстие в полосе;
- 3) с обратной стороны на полосу устанавливали технологическую шайбу и втулку;
- 4) навинчивали гайку на хвостовик болта и выполняли втягивание болта до момента отрыва хвостовика, что обеспечивало гарантированный радиальный натяг болта;
- 5) снимали технологическую втулку и шайбу и устанавливали исследуемую шайбу и стальную втулку, навинчивали гайку;
- 6) после этого выполняли затяжку болта моментным шкальным ключом КМШ-140, который соответствовал требованиям ГОСТ Р 51254. Момент затяжки болта составлял $M_{зам} = 25$ Н·м.

Экспериментальные исследования влияния вакуумно-плазменного покрытия на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов полос с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами, в условиях фреттинг-коррозии, проводили с шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 и шайбами, с нанесенным на них вакуумно-плазменным покрытием {Cr+(TiCr)N} x10.

Вакуумно-плазменное покрытие наносили на шлифованные шайбы.

Экспериментальные исследования проводили при отнулевом цикле ($r=0$) с напряжениями: $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа.

Усталостное разрушение конструктивно-подобных образцов полос из алюминиевого сплава Д16АТ л.5 с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами, при испытаниях в контактной паре с шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 при уровне максимальных напряжений $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа произошло по внешней границе контактной зоны шайбы и полосы от фреттинг-коррозии и в контактной зоне под шайбой с доломом по отверстию (рис. 15) .

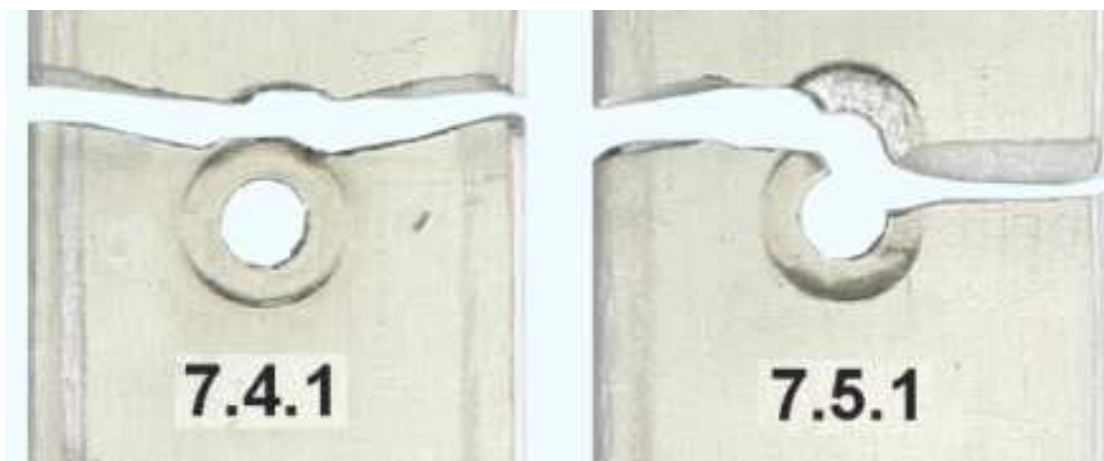


Рис.15. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов полос из материала 16АТ л. 5 с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии в контактной паре с шайбами 1,5 -8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 при уровне напряжений $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа

Усталостное разрушение конструктивно-подобных образцов полос из алюминиевого сплава Д16АТ л.5 с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами, при испытаниях в контактной паре с шайбами с нанесенным на них вакуумно-плазменным покрытием $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$ на уровне напряжений $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа, произошло как в зоне контакта шайбы и полосы от фреттинг-коррозии, так и в зоне радиусного перехода полосы (см. рис. 2 и 16).



Рис. 16. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов полос из материала Д16АТ л.5 с отверстием, заполненным болтом 8-34-Ан. Окс-ОСТ 1 31066-86 с радиальным и осевым натягами при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии в контактной паре со шлифованными шайбами с нанесенным на них покрытием $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$ при уровне напряжений $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа, $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа

Зоны и характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов показаны на рис. 15 и 16.

На рис.17 изображена диаграмма влияния вакуумно-плазменных покрытий на усталостную долговечность конструктивных элементов в условиях фреттинг-коррозии.

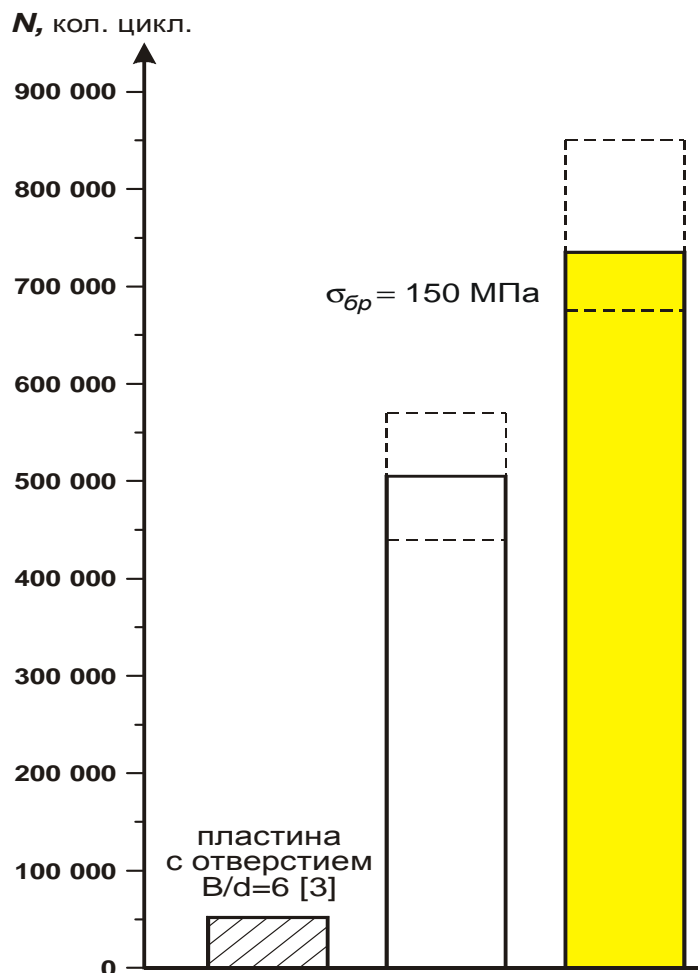


Рис. 17. Влияние вакуумно-плазменного покрытия, нанесенного на шайбы, на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов полосы с отверстием, заполненным болтом с радиальным и осевым натягами в условиях фреттинг-коррозии:

- - долговечность образца полосы с отверстием, заполненным болтом с радиальным и осевым натягами в контактной паре с шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ1 34507-80;
- - долговечность образца полосы с отверстием, заполненным болтом с радиальным и осевым натягами в контактной паре со шлифованными шайбами, с вакуумно-плазменным покрытием

В результате исследования влияния вакуумно-плазменных покрытий на усталостную долговечность конструктивных элементов в условиях фреттинг-

коррозии установлено, что нанесение вакуумно-плазменного покрытия на шайбы приводит к повышению усталостной долговечности конструктивно-подобных образцов полос из материала Д16АТ л.5 с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами, при уровне максимальных напряжений $\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа – в 1,5 раза.

Выводы

В результате выполненных исследований влияния вакуумно-плазменного покрытия $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$ на усталостную долговечность гладких полос и полосы с отверстием в условиях фреттинг-коррозии установлено следующее:

1. Усталостное разрушение гладких полос из алюминиевого сплава Д16АТ л.5 при испытаниях в контактной паре с прижатыми шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 и шайбами с нанесенным на них вакуумно-плазменным покрытием $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$ произошло в зоне контакта шайбы и полосы от фреттинг-коррозии.
2. Нанесение вакуумно-плазменного покрытия на шайбы приводит к повышению усталостной долговечности в условиях фреттинг-коррозии образцов гладких полос из материала Д16АТ л.5 на эксплуатационном уровне нагрузки в 1,4 раза.
3. Усталостное разрушение полос из алюминиевого сплава Д16АТ л.5 с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами при испытаниях в контактной паре с шайбами 1,5-8-16-Кд-ОСТ 1 34507-80 и шайбами с нанесенным на них вакуумно-плазменным покрытием $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$, произошло в зоне контакта шайбы и полосы от фреттинг-коррозии.
4. Нанесение вакуумно-плазменного покрытия на шайбы приводит к повышению усталостной долговечности в условиях фреттинг-коррозии образцов полос из материала Д16АТ л.5 с отверстием, заполненным болтом 8-34-Кд-ОСТ 1 31042-79 с радиальным и осевым натягами на эксплуатационном уровне нагрузки в 1,5 раза.

Список литературы

1. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций / А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.
2. Методы определения влияния конструктивно-технологических параметров на выносливость элементов планера самолёта / А.Г. Гребеников, С.В. Трубаев, В.А. Гребеников и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 10. – Х., 2001. – С. 19 – 54.
3. Технология выполнения высокоресурсных заклепочных и болтовых соединений в конструкциях самолетов / А.И. Ярковец, О.С. Сироткин, В.А. Фирсов, Н.М. Киселев. –М.: Машиностроение, 1987. – 192с.
4. Степнов М.Н. Усталость легких конструкционных сплавов / М.Н. Степнов, Е.В. Гиацинтов.- М.: Машиностроение, 1973.-214 с.

5. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости / Р.Б. Хейвуд; пер. с англ; под ред. И.Ф. Образцова. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
6. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев, Т.С. Родченко. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
7. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Л. Алябьев, В.В. Шевель. – К.: Техніка, 1974. – 270 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. П.А. Фомичев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 02.09.09.

Експериментальне дослідження впливу вакуумно-плазмового покриття, нанесеного на шайби, на втомну довговічність конструктивних елементів в умовах фреттинг-корозії

Експериментально встановлено, що застосування вакуумно-плазмового покриття $\{Cr + (TiCr) N\}x10$, нанесеного на шайби при дії експлуатаційних навантажень, в 1,5 раза підвищує втомну довговічність конструктивних елементів у вигляді гладких смуг з алюмінієвого сплаву Д16АТ і таких же смуг із отвором, заповненим болтом з осьовим і радіальним натягами, порівняно зі втомною довговічністю смуг, що контактують із кадмованими шайбами.

Ключові слова: втомна довговічність, вакуумно-плазмове покриття, фреттинг-корозія, смуга, кріпильний елемент, болт, шайба.

Experimental research of influence of washer vacuum-plasmic coating on fatigue durability of constructive elements in fretting-corrosion conditions

It was established on the basis of tests that application of vacuum-plasmic coating made of $\{Cr+(TiCr)N\}x10$ to washers increases the fatigue durability of structural members made as smooth strips of the Д16АТ aluminum alloy and strips having hole with bolt installed with radial and axial interference under action of operational loads in 1.5 times in comparison with fatigue durability of strips being in contact with cadmium-plated washers.

Keywords: fatigue durability, vacuum-plasmic coating, fretting-corrosion, strip, fastener, bolt, washer.