

## Экспериментальное исследование усталостной долговечности односрезного болтового соединения с натягом и антифреттинговыми покрытиями

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

Представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований усталостной долговечности односрезных болтовых соединений с осевыми и радиальными натягами. Установлен характер разрушения элементов односрезных образцов из алюминиевого сплава Д16АТ, который показывает, что фреттинг-коррозия является причиной преждевременного разрушения соединяемых полос. Показано, что применение кругового барьерного обжатия и специальных шайб, заполненных полимерным наполнителем ВЗ-27м, обеспечивает повышение усталостной долговечности соединений при эксплуатационных нагрузках в 3.1-4.35 раза.

**Ключевые слова:** усталостная долговечность, односрезное болтовое соединение, антифреттинговое покрытие, полимерный наполнитель ВЗ-27м, герметик У-30МЭС-5м, фреттинг-коррозия, полоса, контактное давление, круговое барьерное обжатие, крепежный элемент, болт, специальная шайба.

Проектирование высокоресурсных самолетных конструкций минимальной массы с учетом фреттинг-коррозии предусматривает выбор рациональных геометрических параметров конструктивных элементов срезных болтовых соединений и технологии их сборки, удовлетворяющих требованиям статической прочности, регламентируемой усталостной долговечности и технологичности [1,5].

Для достижения назначенных характеристик односрезных болтовых соединений панелей крыла с профилем разъема (рис.1) применяются радиальный и осевой натяги болтов. В этом случае их усталостное разрушение происходит в зоне интенсивного развития фреттинг-коррозии по сопрягаемым поверхностям [6,7,8].

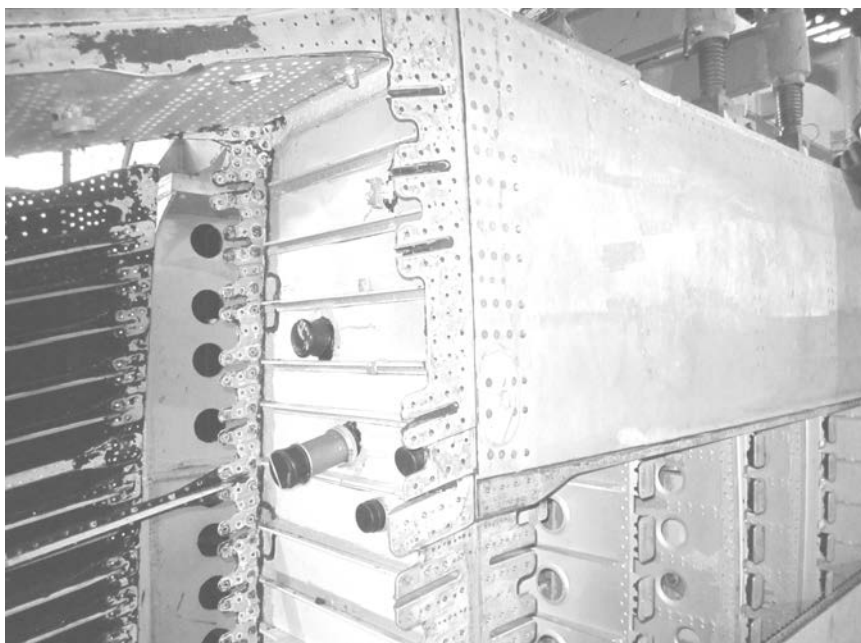


Рис. 1. Общий вид соединения панелей крыла и профиля разъема

Для дальнейшего повышения долговечности соединяемых элементов и снижения их массы целесообразно применять конструктивно-технологический методы, уменьшающие интенсивность фреттинг-коррозии и подтверждать их эффективность экспериментальными исследованиями, что является актуальной задачей и целью данной статьи.

Для проведения экспериментальных исследований усталостной долговечности высокоресурсного болтового односрезного соединения за базовый вариант принято односрезное многоболтовое соединение с плоским сопряжением соединяемых поверхностей полос на жестком профиле (рис.2).

Исследуемым на долговечность элементом соединения является гладкая полоса с отверстиями  $\varnothing 8H7$  шириной 32 мм изготовленная из алюминиевого сплава Д16АТл5. Для крепления полос к жесткому профилю применены болты для соединения с натягом 8-38-Кд ОСТ1 31043-79 и 8-34- Ан. Окс. ОСТ1 31066-86, стандартные шайбы 2-8-16-ц ОСТ1 34507-80 и 2-8-14-Ан. Окс. ОСТ1 34509-80, специальные шайбы с выборкой глубиной 0.35мм и от R 4мм до R7мм (рис.4) [6], гайки 8-ц-ОСТ1 33055-80, 8- Ан. Окс. ОСТ1 11530-74, и антифреттинговые покрытия в виде полимерного заполнителя В3-27м и герметика У-30МЭС-5м. 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 полос с отверстиями и жесткого профиля (заготовки) показаны на рис.3.

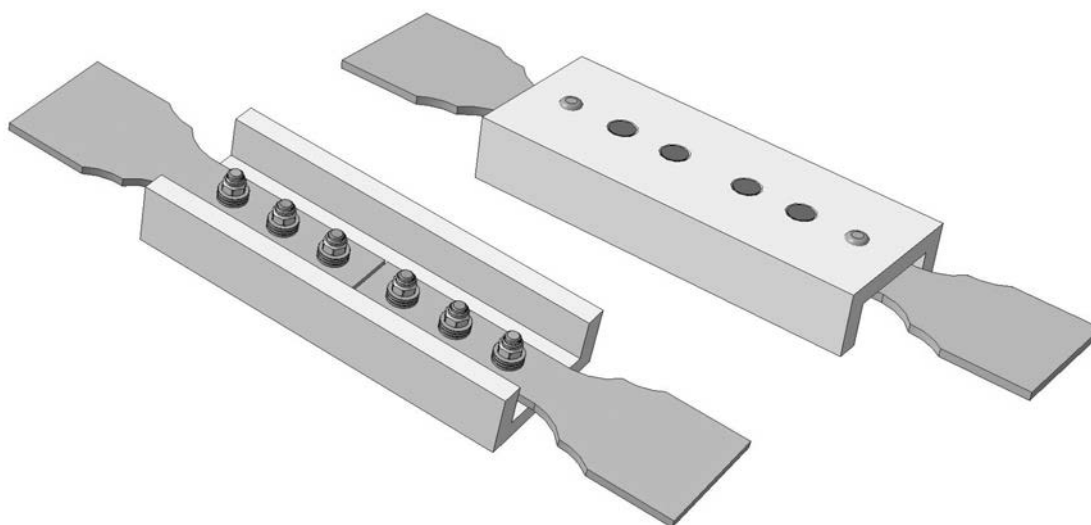


Рис. 2. Трехмерная модель образца односрезного болтового соединения с осевым и радиальным натягами для проведения усталостных испытаний

Полосы изготовлены из листа Д16АТ л.5, профили изготовлены из плиты Д16АТ пл.40 путем фрезерования по контуру на фрезерных станках в проблемной научно-исследовательской лаборатории ресурса авиационных конструкций кафедры проектирования самолетов и вертолетов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». После изготовления заготовок на них было нанесено покрытие Ан. Окс. Нхр. по серийной технологии авиационного предприятия.

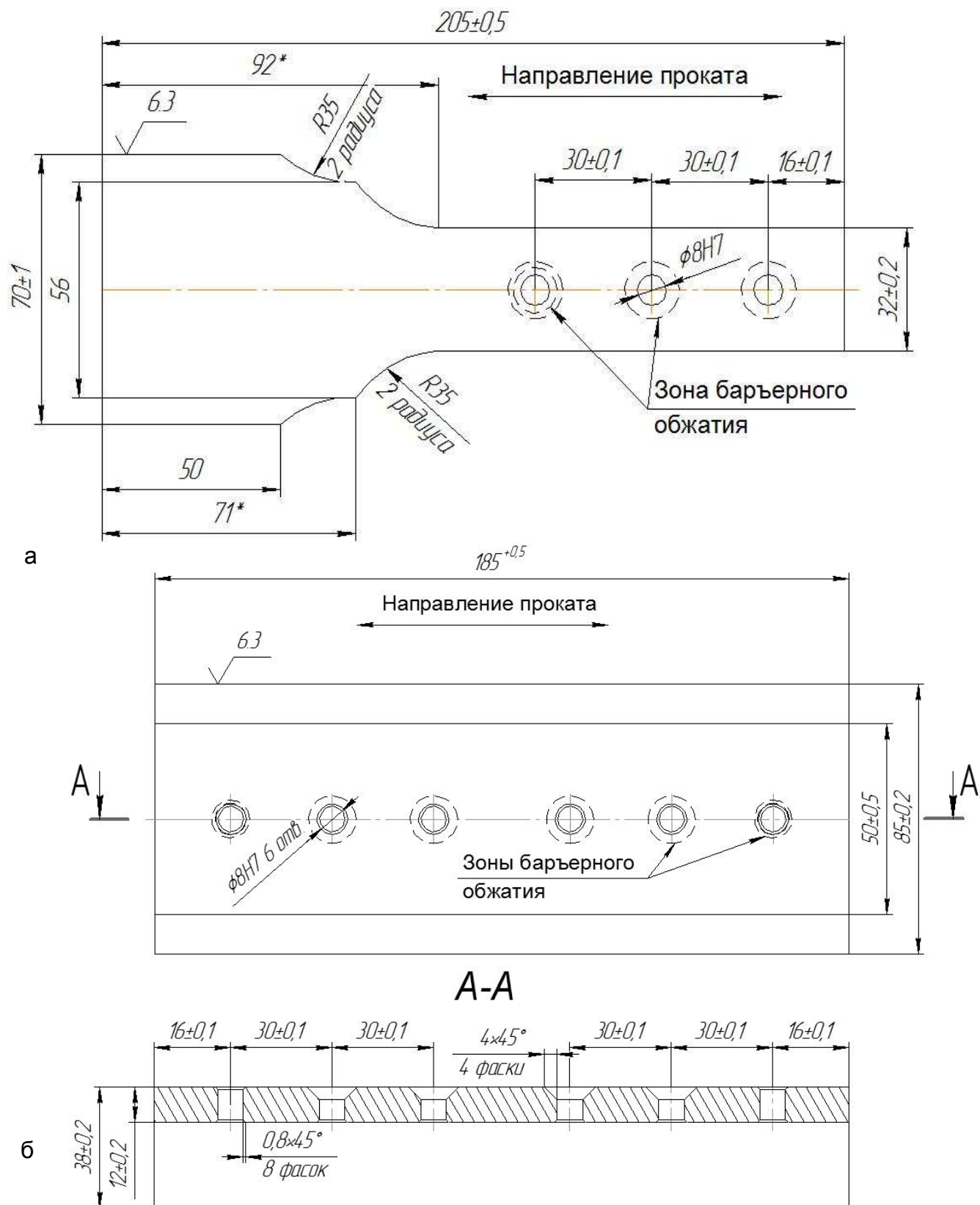


Рис. 3. Геометрические размеры деталей для изготовления образцов:  
а - заготовка полосы с отверстиями; б - заготовка профиля

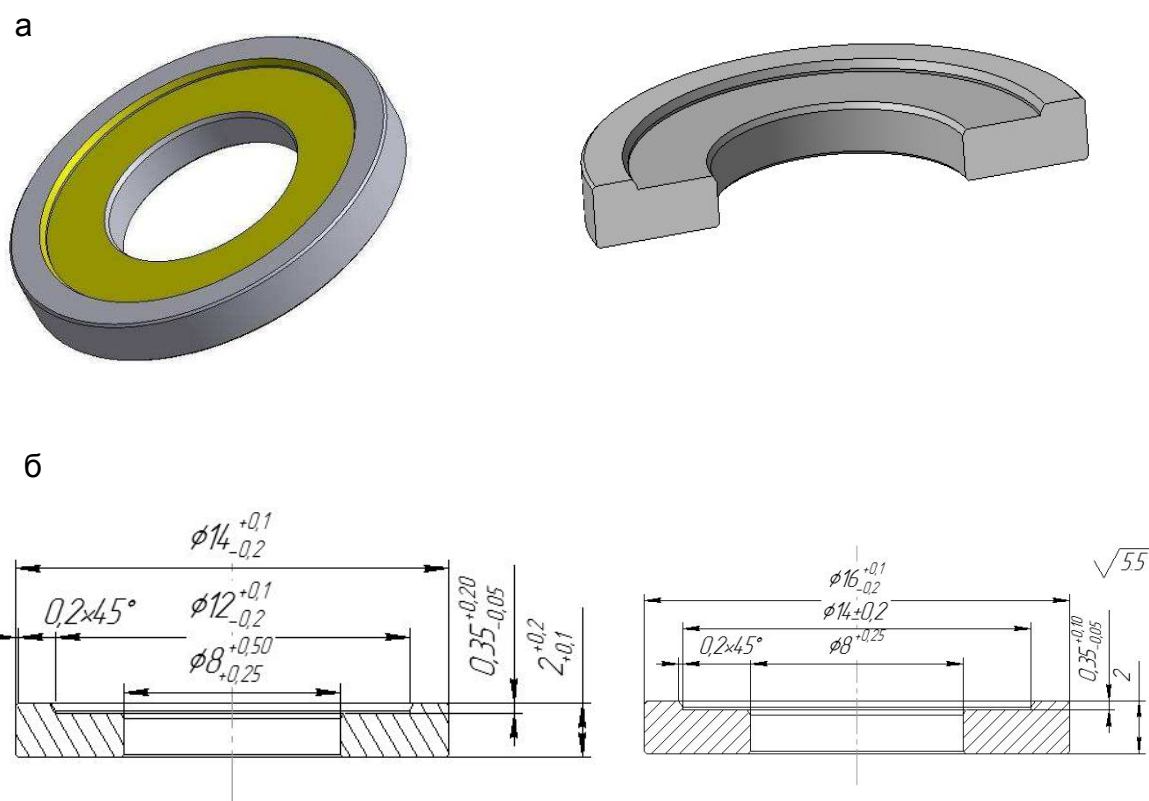


Рис. 4. Специальные шайбы: а - трехмерная модель специальной шайбы; б - геометрические размеры специальных шайб

Сборка односрезных образцов поперечного болтового соединения с осевым и радиальным натягами для проведения усталостных испытаний выполнялась согласно инструкции РТМ 1.4.1941-89 «Сборка болтовых соединений». Болты 8-34-Кд ОСТ 1 31043-79 и 8-34- Ан. Окс. ОСТ1 31066-86 устанавливали в отверстие профиля и полосы, выполняли втягивание болтов до момента отрыва хвостовика, что обеспечивает гарантированный радиальный натяг ( $\Delta=1\% d_6$ ) болта. После установки шайб и гаек 8-ц-ОСТ1 33055-80, 8- Ан. Окс. ОСТ1 11530-74 выполняли затяжку болта моментным шкальным ключом КМШ-140, который соответствовал требованиям ГОСТ Р 51254. Момент затяжки болта составлял  $M_{зам} = 22$  Н·м.

Усталостные испытания образцов проведены на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний ЦДМ-10пу (рис.5) при отнулевом и асимметричном цикле растягивающих нагрузжений с частотой  $f=11$  Гц.

Эксперименты выполнены при четырех уровнях циклических напряжений:

1.  $\sigma_{бр min} = 0$  ,  $\sigma_{бр max} = 130$  МПа
2.  $\sigma_{бр min} = 0$  ,  $\sigma_{бр max} = 150$  МПа.
3.  $\sigma_{бр min} = -30$ ,  $\sigma_{бр max} = 130$  МПа
4.  $\sigma_{бр min} = -30$  ,  $\sigma_{бр max} = 150$  МПа.

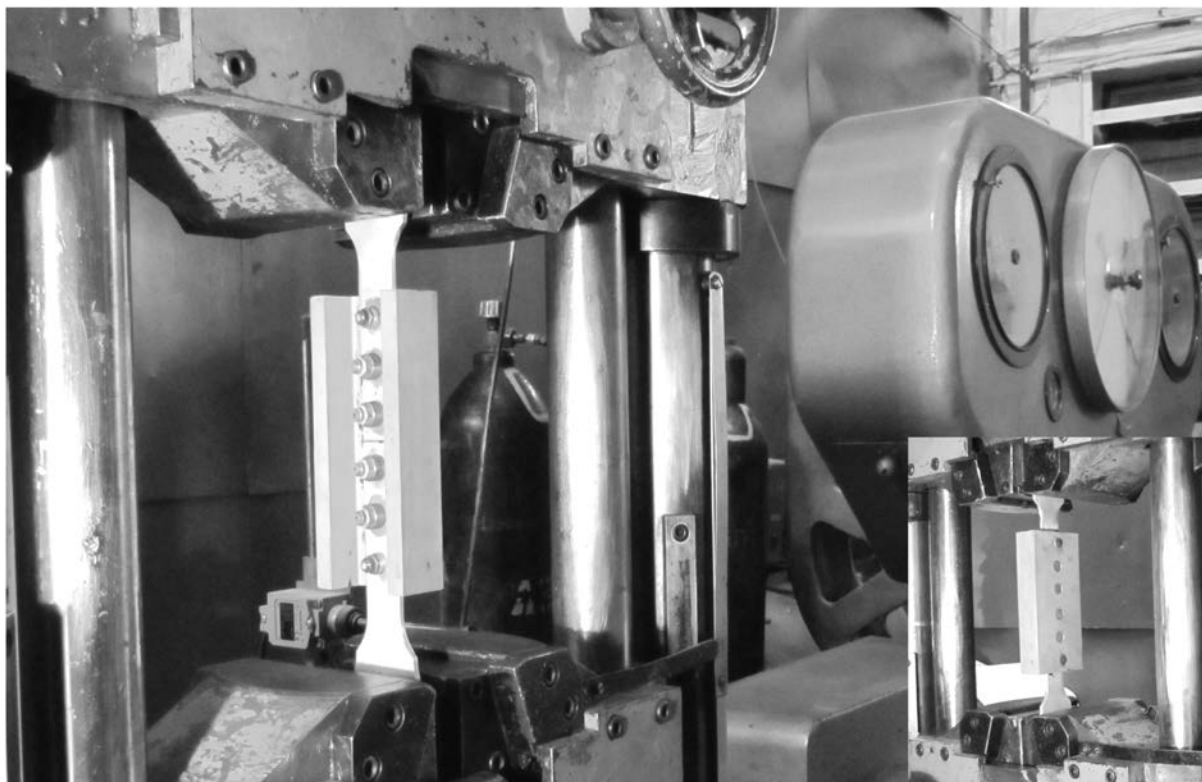


Рис. 5. Образец односрезного болтового соединения с осевыми и радиальным натягами, установленный в испытательную машину ЦДМ-10пу

Проведены экспериментальные исследования односрезных образцов с отверстиями, заполненными болтами 8-34-Кд ОСТ1 31043-79 и 8-34- Ан. Окс. ОСТ1 31066-86 и стандартными шайбами 2 -8-16-ц ОСТ 1 34507-80, 2-8-14-Ан. Окс. ОСТ1 34509-80 без обработки круговым барьерным обжатием и антифреттинговых покрытий. Присвоим им название образцов (тип №1).

Усталостное разрушение этих образцов на четырех уровнях напряжений происходило от фреттинг-коррозии, возникающей на границе контакта прижатых к поверхности образца шайб и по поверхности сопряжения полос и профиля в зоне крайнего крепежа (рис.6, 7):

1.  $\sigma_{бр\ min} = 0$  ,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа при  $N_{cp} = 721\ 000$  циклов нагружения
2.  $\sigma_{бр\ min} = 0$  ,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа при  $N_{cp} = 245000$  циклов нагружения
3.  $\sigma_{бр\ min} = -30$  ,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа при  $N_{cp} = 252000$  циклов нагружения
4.  $\sigma_{бр\ min} = -30$  ,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа при  $N_{cp} = 230\ 000$  циклов нагружения

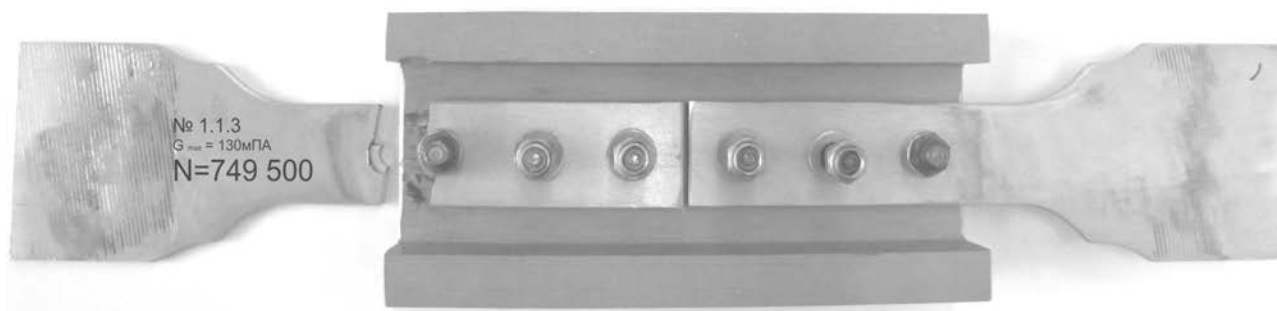


Рис. 6. Зона и характер усталостного разрушения односрезного образца болтового соединения с осевым и радиальным натягами при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии в зоне контакта болта 8-34- Ан. Окс. ОСТ1 31066-86 и шайбы 2-8-14-Ан.Окс. ОСТ 1 34509-80 при уровне напряжений  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа (образец 1.1.3)



Рис. 7. Характер усталостного разрушения полосы односрезного образца болтового соединения при экспериментальных исследованиях в условиях фреттинг-коррозии при уровне напряжений  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа (образец 1.2.4): а - в зоне контакта шайбы 2-8-14-Ан.Окс. ОСТ 1 34509-80, б - в зоне контакта поверхностей полосы и профиля

Проанализировав характер усталостных разрушений в условиях фреттинг-коррозии, установлено, что целесообразно применить антифреттинговые мероприятия для снижения негативного влияния фреттинг-коррозии на усталостную долговечность элементов односрезных образцов. Для этого применено круговое барьерное обжатие в зонах болтовых соединений полос и профилей. Разработаны схемы нанесения герметика У-30МЭС-5м, полимерного заполнителя ВЗ-27м для полос, профилей и специальных шайб, покрытых ВЗ-27м

(рис. 8, 9). Операции нанесения антифреттинговых покрытий выполнены по технологии авиационного завода.

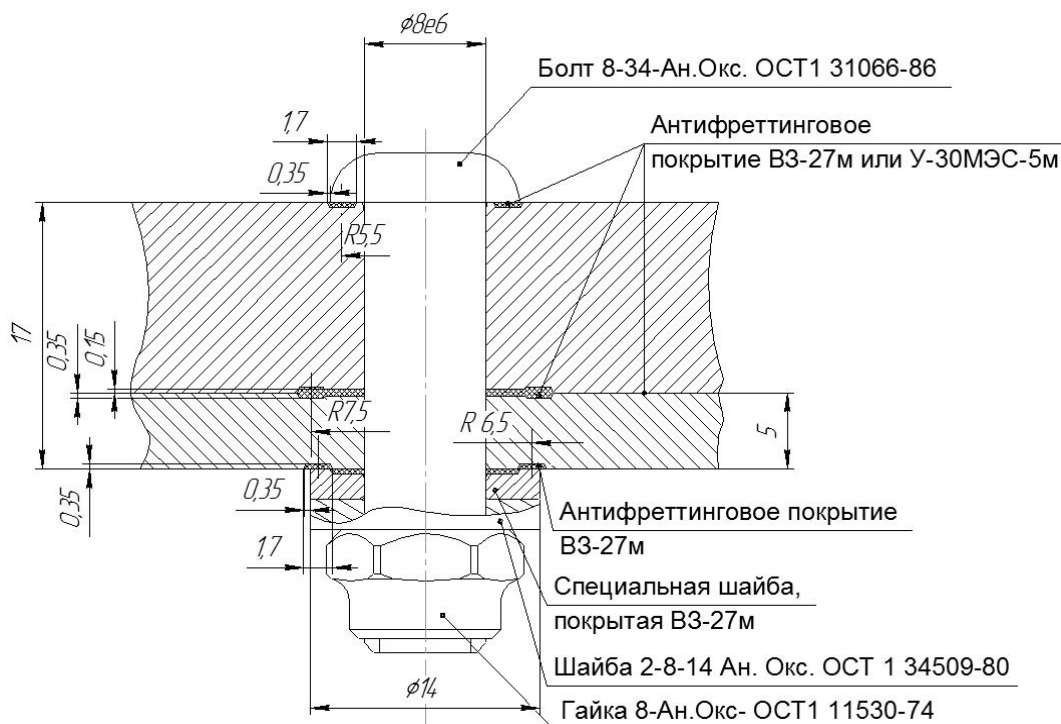


Рис. 8. Схема нанесения антифреттингового покрытия в полости барьерного кругового обжатия в зоне соединения полос , профиля и крепежного элемента

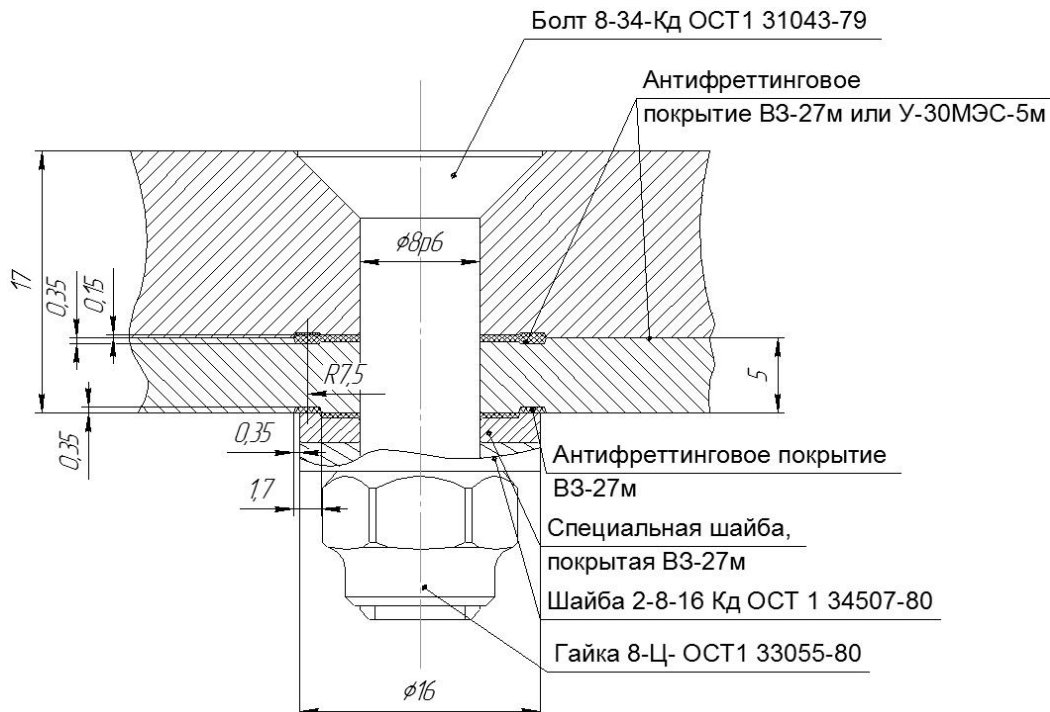


Рис. 9. Схема нанесения антифреттингового покрытия в полости барьерного кругового обжатия в зоне потайного соединения профиля, полос и крепежного элемента

Соединяемые детали были обработаны двухсторонним круговым барьерным обжатием в зоне соединения крепежных элементов и сопрягаемых поверхностей полос и профилей (рис.11).

Для обработки образцов круговым барьерным обжатием спроектированы и изготовлены обжимки [5], представленные на рис.9,10 и 12. Барьерное обжатие выполнялось глубиной 0.35мм, шириной 1.7мм, на R 6.5, R 7.5 по границе контакта шайбы, и по границе контакта головки болта глубиной 0.35мм, шириной 1.7мм, на R 5.5, а также выполняется обжатие поверхностей в зоне соединения крепежного элемента между полосами и профилем глубиной 0.15...0.35мм, шириной от R 4 до R 7.5. Круговое барьерное обжатие проводили на установке ZD 10/90 (рис. 14). Усилие, создаваемое установкой для совместного обжатия, составляло 80 000 Н -100 000 Н. Перемещение обжимок находилось в пределах 0,7...0,8 мм, а глубина кругового барьерного обжатия находилась в пределах 0.3...0.35 мм и 0.1...0.15 мм, которая контролировалась на измерительном приспособлении с часовым индикатором (рис. 15).



Рис. 10. Обжимки для кругового барьерного обжатия

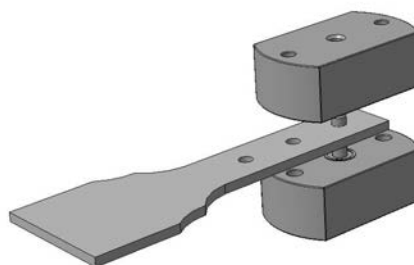


Рис. 11. Трехмерная модель полосы с отверстиями и обжимок



Рис. 12. Заготовки полос: а – гладкая полоса, б – полоса с отверстиями  $\varnothing 8H7$  и обработанная круговым барьерным обжатием



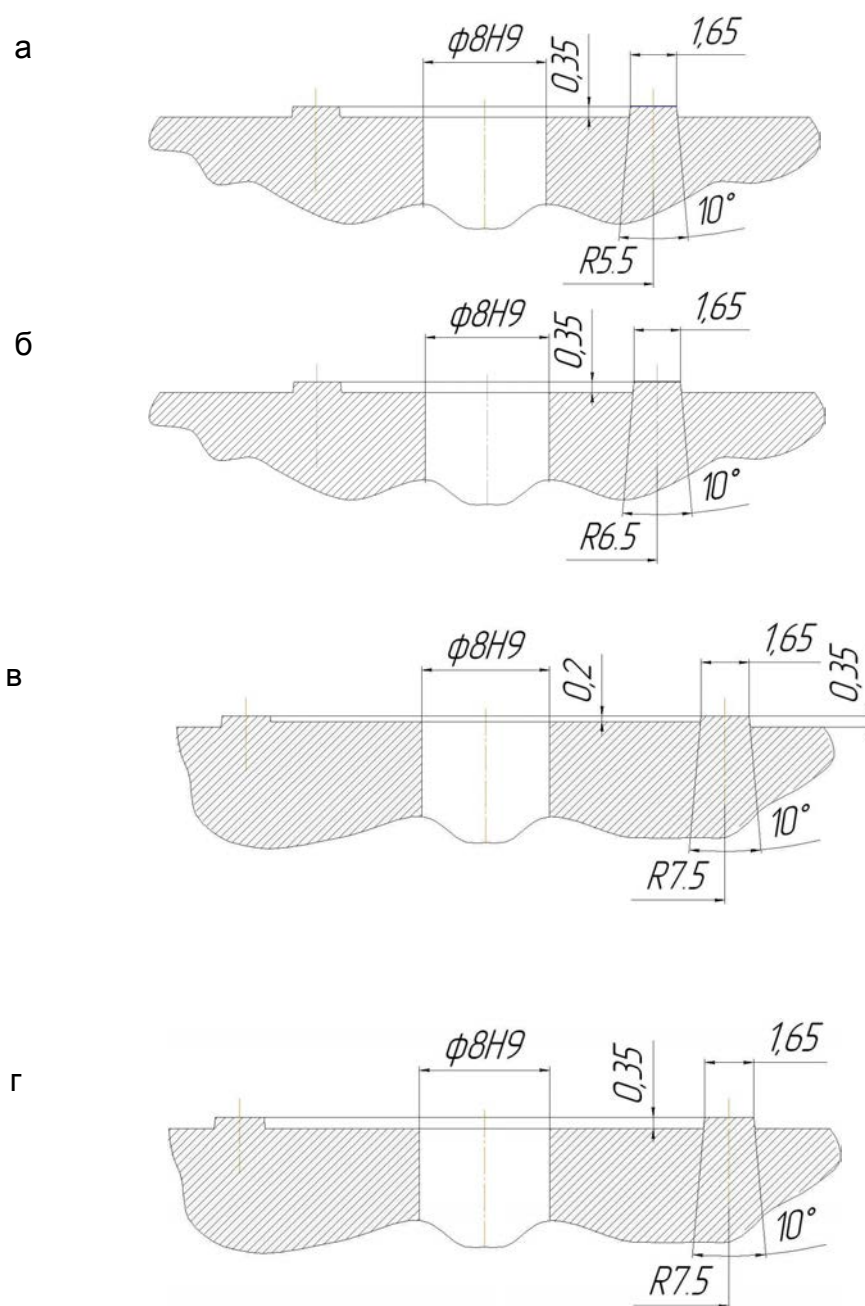


Рис.13. Геометрические размеры буртиков круговых барьерных обжимок:  
а – для кругового барьерного обжатия в зоне контакта головки болта;  
б- для кругового барьерного обжатия в зоне контакта  
специальной шайбы  $\varnothing 14$   
в – для кругового барьерного обжатия в зоне примыкания поверхностей;  
г – для кругового барьерного обжатия в зоне контакта  
специальной шайбы  $\varnothing 16$



Рис. 14. Установка полосы и обжимок для выполнения кругового барьерного обжата на испытательной машине ZD 10/90



Рис. 15. Контрольно-измерительное приспособление для измерений глубины обжата

Проведены экспериментальные исследования образцов односрезного болтового соединения с осевым и радиальными натягами на усталостную долговечность двух типов односрезных образцов на четырех уровнях нагружения:

тип № 2 – с отверстиями, заполненными болтами 8-34-Кд ОСТ1 31043-79, 8-34-Ан.Окс. ОСТ1 31066-86 и специальными шайбами 2-8-16-ц, 2-8-14 Ан. Окс., покрытыми ВЗ-27м, обработаны круговым барьерным обжатием по границам контакта головок болта, шайб с заполненными лунками ВЗ-27м. В зоне контакта поверхностей полос и профиля обработаны круговым барьерным обжатием с заполненными лунками герметиком У-30МЭС-5М.

тип №3 – с отверстиями, заполненными болтами 8-34-Кд ОСТ1 31043-79 и 8-34-Ан. Окс. ОСТ1 31066-86 и специальными шайбами 2 -8-16-ц, 2-8-14-Ан. Окс., покрытыми ВЗ-27м, обработаны круговым барьерным обжатием по границам контакта крепежного элемента и в зоне контакта поверхностей полос и профиля с лунками заполненными ВЗ-27м.

Усталостное разрушение образцов типа № 2 на уровне нагружения  $\sigma_{\bar{p} \min} = -30$  МПа,  $\sigma_{\bar{p} \max} = 130$  МПа при достижении  $N_{\text{ср}} = 245\ 000$  циклов нагружения происходило в зоне крайнего крепежного элемента по оси отверстия полосы. При уровне нагружения  $\sigma_{\bar{p} \min} = -30$  МПа,  $\sigma_{\bar{p} \max} = 150$  МПа при достижении  $N_{\text{ср}} = 205\ 000$  циклов нагружения разрушались по оси крайнего отверстия (рис. 16).

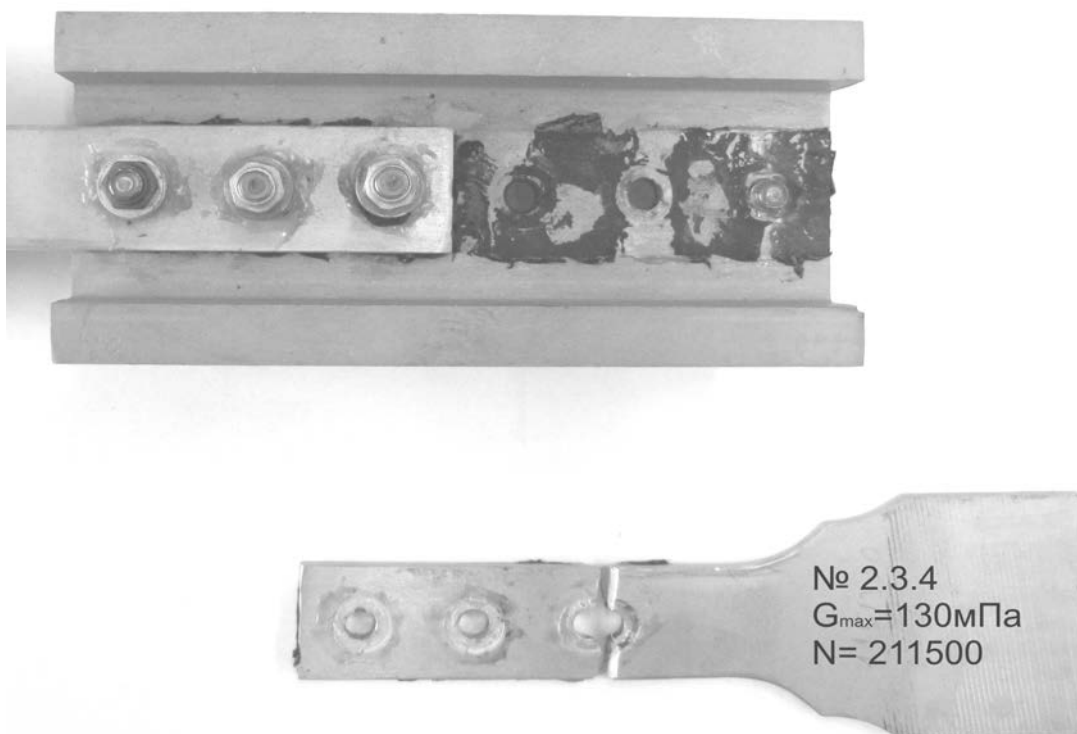


Рис. 16. Характер усталостного разрушения образца односрезного болтового соединения в зоне крайнего крепежного элемента с круговым барьерным обжатием, заполненным герметиком УЗОМЭС-5м между поверхностями профиля и полосы, а также ВЗ-27м в зоне контакта шайбы и головки болта после усталостного разрушения в условиях циклических растягивающих нагрузок при уровне напряжений

$$\sigma_{бр\ min} = -30 \text{ МПа} \quad \sigma_{бр\ max} = 130 \text{ МПа} \quad (\text{образец 2.3.4})$$

Тип образцов №3 на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{бр\ max} = 130 \text{ МПа}$  и  $\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{бр\ max} = 150 \text{ МПа}$  при достижении  $N = 1\,500\,000$  циклов нагружения не разрушились, и на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{бр\ max} = 130 \text{ МПа}$  и  $\sigma_{бр\ min} = -30 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{бр\ max} = 150 \text{ МПа}$  при достижении  $N = 1\,000\,000$  циклов нагружения не разрушились. Данные образцы были сняты с испытаний.

Для определения зон и характера усталостного разрушения испытания части образцов были продолжены.

- образец 3.1.4 на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{бр\ max} = 130 \text{ МПа}$ ;  
N = 2 185 000 циклов
- образец 3.1.5 на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{бр\ max} = 130 \text{ МПа}$ ;  
N=2 243 000 циклов;
- образец 3.2.7 на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{бр\ max} = 150 \text{ МПа}$ ;  
N=1 677 000 циклов;

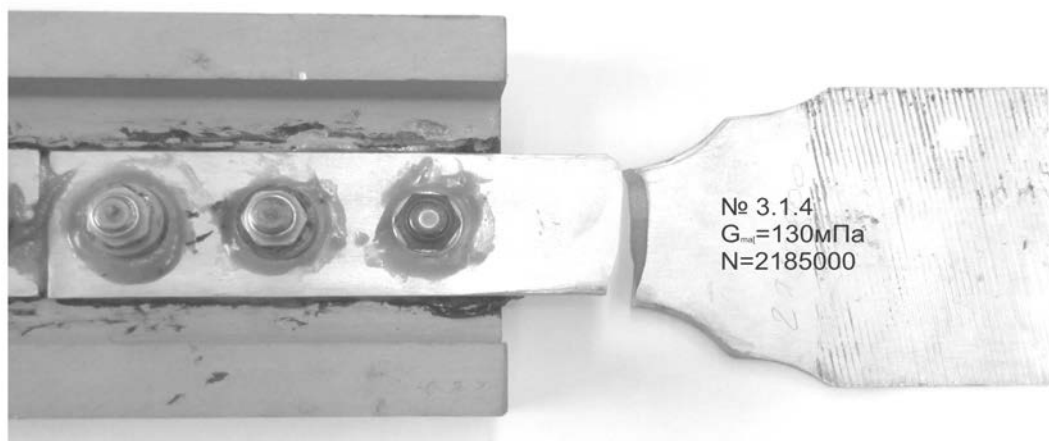


Рис. 17. Характер усталостного разрушения полосы с круговым барьерным обжатием, покрытой полимерным наполнителем ВЗ-27м (образец 3.1.4)

Усталостное разрушение образца 3.1.4 (рис.17) и образцов 3.1.5., 3.2.7 происходило по радиусному переходу в зоне геометрической концентрации напряжений и распространяется примерно перпендикулярно к направлению действия главного растягивающего напряжения (рис.18). В зонах контакта шайб, головки болта и сопрягаемых поверхностей полос, профилей активной фреттинг-коррозии не наблюдается благодаря мероприятиям и контактной схеме «металл – наполнитель – металл».

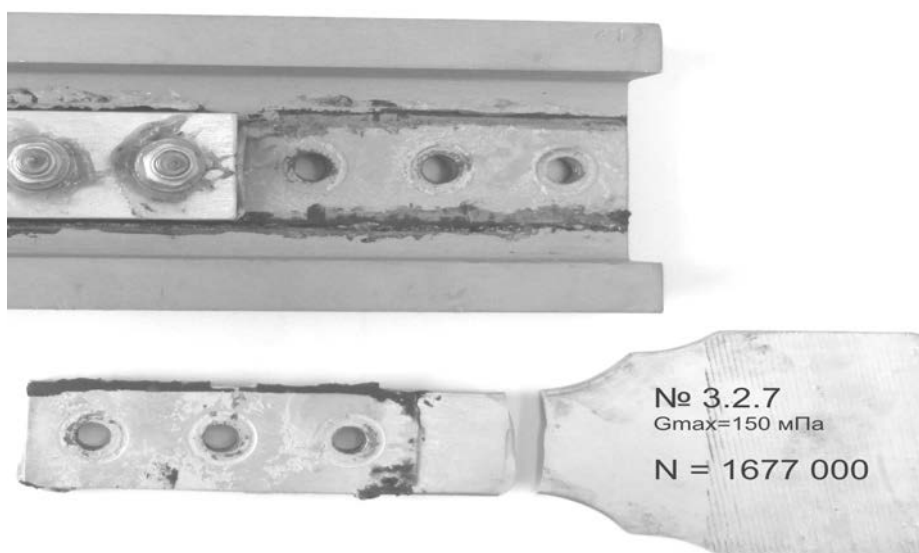


Рис.18. Вид на поверхности контакта полосы и профиля односрезного образца, обработанных круговым барьерным обжатием и покрытых полимерным наполнителем ВЗ-27м после усталостного разрушения

Результаты усталостных испытаний показаны в виде номограммы на рис. 19.

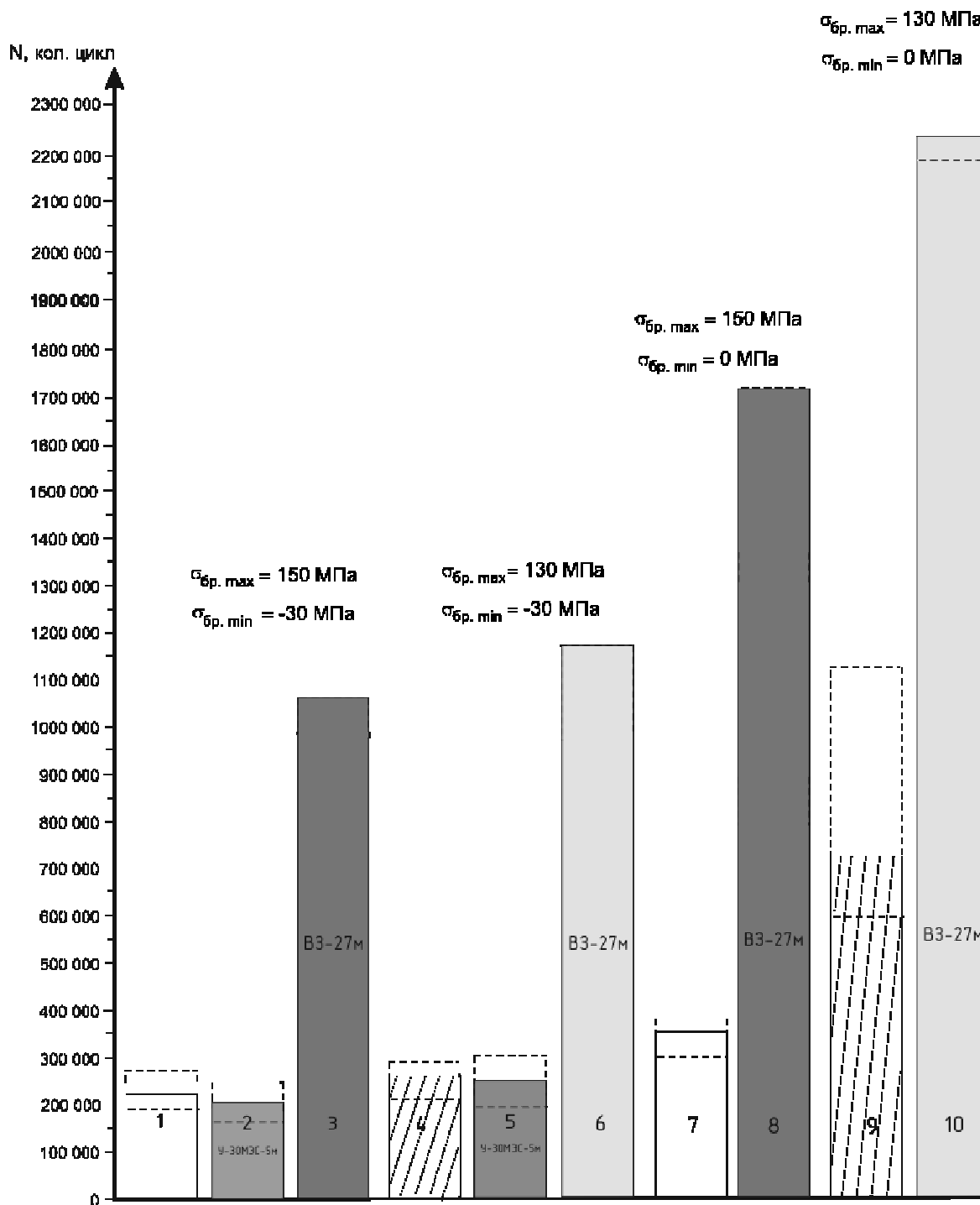


Рис. 19. Усталостная долговечность односрезных образцов болтовых соединений с осевым и радиальным натягами в условиях совместного действия циклических растягивающих нагрузок и фреттинг-коррозии:

- 1,4,7,9 – долговечность односрезных образцов типа №1;
- 2, 5 – долговечность односрезных образцов типа №2;
- 3,6,8,10 – долговечность односрезных образцов типа №3

### Выводы

В результате проведения экспериментальных исследований при отнулевом и асимметричном цикле нагружений частотой  $f=11$  Гц на четырех уровнях циклических напряжений образцов односрезных болтовых соединений с осевым и радиальным натягами установлено:

1. Усталостное разрушение образцов односрезного болтового соединения с осевым и радиальным натягами без применения кругового барьерного обжатия и антифреттинговых покрытий при нагружении происходило в зоне интенсивной фреттинг-коррозии по границе контакта шайбы, контактирующих сопрягаемых поверхностей полосы и профиля на расстоянии 6-9мм от оси отверстия полосы.

2. Усталостное разрушение образцов односрезного болтового соединения которые покрыты по сопрягаемым поверхностям герметиком У-30МЭС-5М в полостях лунок кругового барьерного обжатия происходило по оси крайнего отверстия полосы. При этом фреттинг-коррозия по контактируемым поверхностям не наблюдается.

3. Усталостная долговечность образцов односрезных болтовых соединений с применением барьерного обжатия, полимерного заполнителя ВЗ-27м и специальных шайб, заполненных полимерным заполнителем, превышает в 3.1–4.35 раза усталостную долговечность образцов с осевым и радиальным натягами без применения барьерного обжатия и антифреттинговых покрытий.

### Список литературы

1. 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.
2. 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. – 192 с.
3. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пширков, Я.Н. Робаковский, А.С. Тарасов и др. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с
4. Соппротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
5. Обеспечение ресурса высоконагруженных элементов конструкции планера самолета с функциональными отверстиями / Г.А. Кривов, В.А. Матвиенко, Р.И. Гирш и др. // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ. – 2009. – Вып. 5 (49). – С. 94 – 100.
6. Экспериментальное исследование влияния полимерных заполнителей, герметиков и барьерного обжатия на усталостную долговечность гладких полос в условиях фреттинг-коррозии/ А.К.Мялица, А.Г. Гребеников, И.П. Змиевской, // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 50. – Х., 2011. – С. 154 – 175.
7. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости / Р.Б. Хейвуд; пер. с англ; под ред. И.Ф. Образцова. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с
8. Голего, Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Л. Алябьев, В.В. Шевель. – К.: Техніка, 1974. – 270 с.

9. Экспериментальное исследование влияния вакуумно-плазменного покрытия, нанесенного на шайбы, на усталостную долговечность конструктивных элементов в условиях фреттинг-коррозии / А.Г. Гребеников, А.М. Гуменный, И.П. Змиевской, В.Н. Клименко, В.М. Мацевитый, С.В. Ляшок // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 43. – Х., 2009. – С. 243 – 254.
10. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25). – М.: МАК, 1994. – 322 с.
11. Исследование влияния барьерного обжатия и антифреттинговых покрытий на усталостную долговечность соединения двух полос с отверстиями, заполненными болтами с осевым и радиальным натягами / А.К. Мяслица, И.П. Змиевской, В.А. Гребеников // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 55. – Х., 2012. – С. 168 – 186.

**Рецензент:** к-т техн. наук, доц. А. М. Гуменный, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

Поступила в редакцию 18.12.2014

### **Експериментальне досліджено втомної довговічності однорізних болтових з'єднань з натягом та антифреттинговими покриттями**

Представлено результати порівняльних експериментальних досліджень втомної довговічності однорізних болтових з'єднань з осевим та радіальним натягами. Встановлено характер руйнування елементів однорізних зразків із алюмінієвого сплаву Д16АТ який показав, що фреттинг-корозія є причиною передчасного руйнування з'єднань смуг. Показано, що застосування кругового бар'єрного обтиснення та спеціальних шайб заповнених полімерним заповнювачем ВЗ-27м забезпечує підвищення втомної довговічності з'єднань при експлуатаційних рівнях навантаження в 3,1 – 4,35 рази.

**Ключові слова:** втомна довговічність, однорізне болтове з'єднання, антифреттингове покриття, полімерний заповнювач ВЗ-27м, герметик У-30МЭС-5м, фреттинг-корозія, смуга, контактний тиск, кругове бар'єрне обтиснення, кріпильний елемент, болт, спеціальна шайба.

### **Experimental Study of Fatigue Life of Single-Shear Bolted Joint with Interference and Anti-Fretting Coatings**

The results of comparative experimental studies of fatigue life of single-shear bolted joints with axial and radial interference are given. The nature of destruction of single-shear specimen elements made of aluminum alloy D16AT, which shows that fretting corrosion is the cause of premature failure of bands to be jointed. It is shown that the use of circular barrier compression and special washers filled by polymer filler ВЗ-27м enhances the fatigue life of the joints under operational loads in 3.1-4.35 times.

**Keywords:** fatigue life, single-shear bolted joint, anti-fretting coating polymer filler ВЗ-27м, sealant У-30МЭС-5м, fretting corrosion, band, contact pressure, circular barrier compression, fastener, bolt, special washer.