

## Исследование влияния радиального натяга, осевой затяжки болтов и поверхностного упрочнения элементов срезного соединения из титанового сплава ВТ6 на их усталостную долговечность

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

Из литературных источников [3 – 5] известно, что применение радиального натяга, осевой затяжки болтов и поверхностное упрочнение деталей пластическим деформированием повышают их усталостную долговечность. Однако для срезных болтовых соединений из титанового сплава ВТ6 такой информации в технической литературе не обнаружено.

Целью данной работы является исследование влияния затяжки и радиального натяга болтов на усталостную долговечность одно- и двухсрезных соединений из титанового сплава ВТ6, а также оценка эффективности локального упрочнения контактирующих поверхностей как средства, повышающего усталостную долговечность двухсрезных соединений из сплава ВТ6.

На рис. 1 и 2 показаны приспособление и чертеж образца конструктивного элемента для исследования усталостной долговечности двухсрезных соединений из титанового сплава ВТ6.

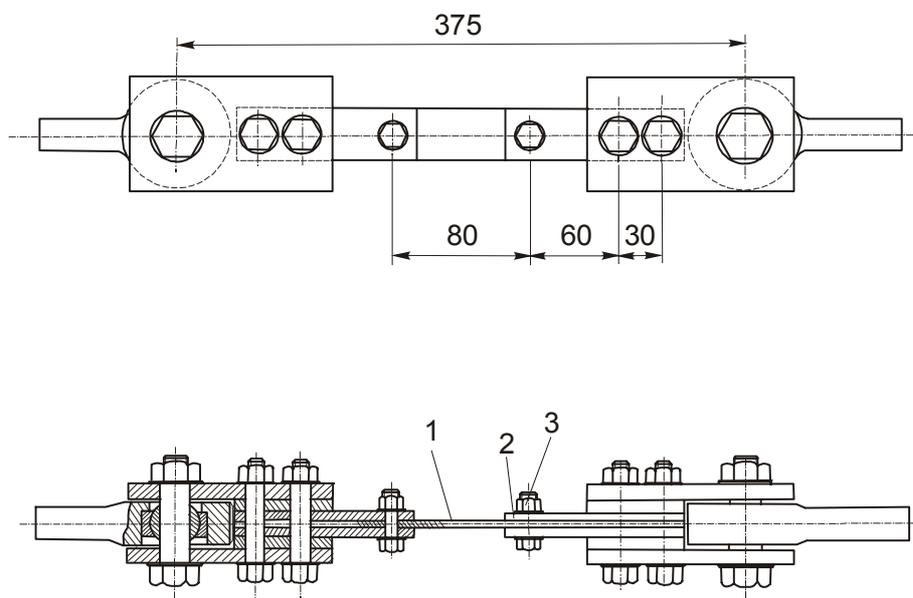


Рис. 1. Приспособление для исследования усталостной долговечности одноболтовых срезных соединений из титанового сплава ВТ6:  
1 – испытуемый элемент из сплава ВТ6; 2 – накладка ВТ6;  
3 – болт 10 – 36 - кд – ОСТ 1 31124 – 80; 4 – проушина - захват

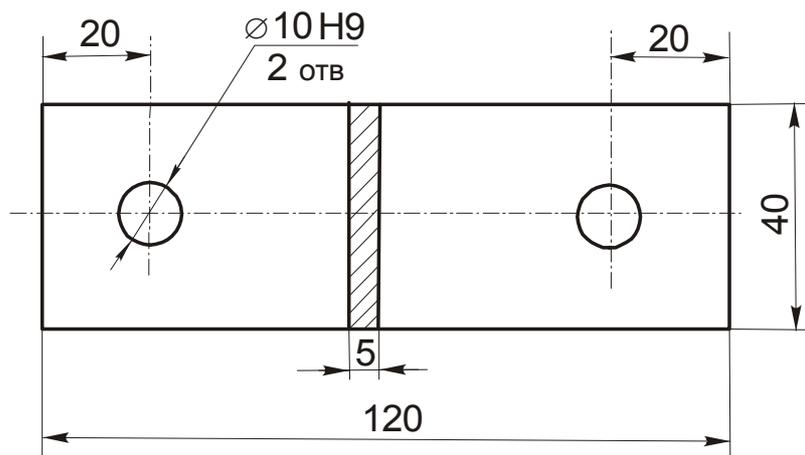


Рис. 2. Испытуемый элемент двухсрезных соединений из сплава ВТ6

Исследование усталостной долговечности двухсрезных соединений из сплава ВТ6 проводили на образцах, представляющих собой одноболтовые двухсрезные соединения шириной 40 мм и толщиной соединяемых пластин, равной 5 мм. Отверстия в пластинах выполняли сверлением в один переход, а потом разворачивали их до номинального диаметра. Качество поверхности отверстий соответствовало разряду А 6 класса шероховатости поверхности (ГОСТ 2789-73). Для изготовления соединений использовали болты диаметром 10 f 9 мм, соответствующие ОСТ 131124 – 80.

На рис. 3 и 4 показаны приспособление и образец исследования усталостной долговечности односрезных соединений.

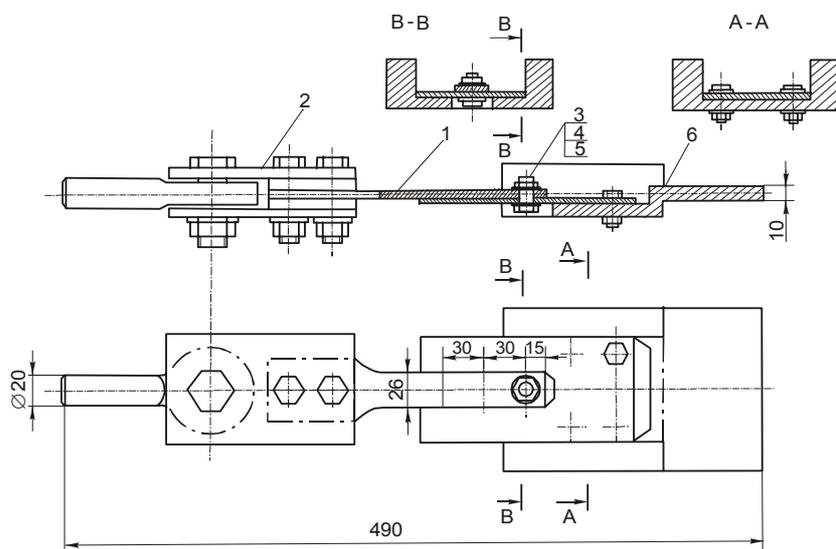


Рис. 3. Приспособление для исследования усталостной долговечности односрезных болтовых соединений из сплава ВТ6:

- 1 – образец; 2 – шарнирный захват; 3 – болт 8 – 26 - к<sub>д</sub> - ОСТ 1 31132 – 80;
- 4 – гайка 8. ан. окс. – ОСТ 1 33018 – 80;
- 5 – шайба 1,5 – 8 – 14 – ан. окс. – ОСТ 1 34509 – 80; 6 – жесткий захват

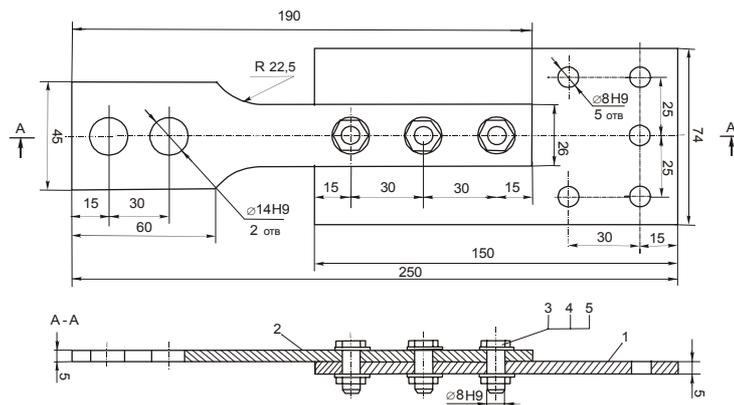


Рис. 4. Образец для исследования усталостной долговечности односрезных соединений:

- 1 – пластина; 2 – испытуемый элемент; 3 – болт 8 – 26 - КД - ОСТ 1 31132 – 80;  
 4 – гайка 8. ан. окс. – ОСТ 1 33018 – 80;  
 5 – шайба 1,5 – 8 – 14 – ан. окс. – ОСТ 1 34509 – 80

Исследование влияния радиального натяга и затяжки болтов на усталостную долговечность односрезных соединений проводили на образцах трехболтовых соединений (см. рис. 4, поз. 3). Исследуемый элемент соединяли с пластиной тремя болтами. Болты в зависимости от условий эксперимента устанавливали по посадке H9/u8 или с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d$ . Шероховатость поверхности болтов соответствовала разряду А 7 класса шероховатости поверхности. Перед сборкой соединений с радиальным натягом болты дорабатывали. Доработка болтов состояла в уменьшении высоты резьбы и выполнении радиусно-конического перехода длиной 2 – 3 мм от резьбовой к гладкой части болта. Установку болтов с радиальным натягом проводили на прессе.

Для проведения усталостных испытаний образцы двухсрезных соединений крепили к шарнирным захватам (см. рис. 1), посредством которых их устанавливали в захваты испытательной машины ЦДМ Пу-10. Для уменьшения общего изгиба образцов односрезных соединений их крепили одним концом к жесткому захвату, а другим – к шарнирному (см. рис. 3).

Усталостные испытания одно- и двухсрезных соединений проводили при коэффициенте асимметрии цикла нагружения  $r = 0,1$  и частоте 12 Гц.

Влияние радиального натяга и затяжки болтов на усталостную долговечность двухсрезных соединений исследовали на соединениях, в которых болты устанавливали без радиального натяга и затяжки: с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d_6$ ; с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9\% d_6$ ; с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d_6$  и затяжкой до  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$ .

На рис. 5 показан характер усталостного разрушения элементов двухсрезового соединения без радиального натяга и осевой затяжки болтов (поз. 1 и 2).



Рис. 5. Характер усталостного разрушения элементов двухсрезовых соединений из титанового сплава ВТ6 при установке болтов:  
1, 2 – без радиального натяга и затяжки; 3, 4 – с радиальным натягом и без затяжки

Разрушение образцов начиналось в зоне максимальной концентрации напряжений по оси отверстия. Разрушение образцов с радиальным натягом происходило в зоне наиболее интенсивной фреттинг-коррозии между телом болта и стенкой отверстия (поз. 3 и 4). Усталостное разрушение образцов с осевой затяжкой болтов  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$  происходило в трех зонах: по брутто - сечению в зоне фреттинг-коррозии под гайкой (рис. 6, а, поз. 1), по сечению нетто по оси отверстия (поз. 2), в зоне фреттинг-коррозии под краями наружных пластин.

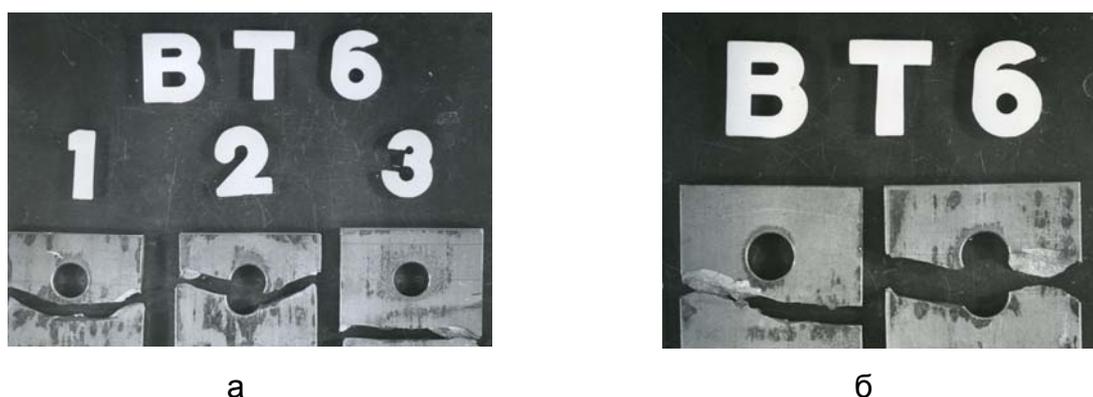


Рис. 6. Характер усталостного разрушения элементов двухсрезовых соединений при установке болтов с затяжкой:

а –  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$ ,  $\bar{\Psi} = 0$ ; б -  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$ ,  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d$

Усталостное разрушение образцов с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d_6$  и затяжкой  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$  происходило в зонах фреттинг-коррозии между испытуемым элементом и накладками (рис. 6,б).

На рис. 7 показаны кривые усталости испытанных вариантов соединений. Результаты испытаний приведены к эквивалентному по разрушающему воздействию отнулевому циклу нагружения по формуле, представленной в работе [1]. Проведен регрессионный анализ результатов испытаний образцов. В табл. 1 приведены параметры кривых усталости для испытанных вариантов соединений  $\sigma_{\max 0}^m N=C$ .

Таблица 1.

Варианты сборки (установки болта в отверстие) соединений	m	c	$\sigma_{\max 0}$
$\bar{\Psi} = 0; M_3=0$	2,7337	$2,897 \cdot 10^{10}$	$6714 N^{-0,3658}$
$\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1 \%d; M_3=0$	7,570	$2,889 \cdot 10^{22}$	$989 N^{-0,1321}$
$\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1 \%d; M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$	4,655	$1,469 \cdot 10^{16}$	$2972 N^{-0,2148}$
$\bar{\Psi} = 0; M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$	4,310	$2,483 \cdot 10^{15}$	$3732 N^{-0,232}$
$\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \%d; M_3=0$	5,23	$4,733 \cdot 10^{17}$	$2396 N^{-0,1912}$

Эксперименты показали, что радиальный натяг  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1 \%d$  значительно повышает усталостную долговечность двухсрезных соединений из сплава ВТ6. При уровне максимальных напряжений  $\sigma_{\max 0}=200$  МПа применение радиального натяга повышает усталостную долговечность двухсрезных соединений в 12 раз, а при  $\sigma_{\max 0}=160$  МПа более чем в 50 раз по сравнению со случаем, когда болты устанавливали без радиального натяга и затяжки (рис. 7). Повышение радиального натяга от  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1 \%d$  до  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \%d$  привело к возрастанию усталостной долговечности в 2,4 раза при  $\sigma_{\max 0}=200$  МПа и в 1,5 раза при  $\sigma_{\max 0}=160$  МПа. При более низких уровнях максимальных напряжений

эффективность радиальных натягов  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1 \%d$  и  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \%d$  становится, практически, одинаковой.

Затяжка болтов  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$  без радиального натяга повысила усталостную долговечность двухсрезных соединений в 2 раза при уровне максимальных напряжений  $\sigma_{\max 0}=210$  МПа по сравнению со случаем, когда болты устанавливали только с радиальным натягом, равным  $0,7 - 1,1 \%d$ . При  $\sigma_{\max 0}=170$  МПа усталостная долговечность обоих вариантов соединений была

одинаковой, а при  $\sigma_{\max 0} < 170$  МПа усталостная долговечность соединений с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1 \% d$  стала выше, чем с затяжкой  $M_3 = 20$  Н·М. Этот результат объясняется тем, что основной причиной усталостных разрушений образцов становилась фреттинг-коррозия на сопрягаемых плоскостях пластин соединения, негативное воздействие которой на усталостную долговечность образцов оказывалось больше, чем с концентратора напряжений в виде отверстия. Совместное применение радиального натяга  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d_6$  и затяжки болтов  $M_3 = 20$  Н·М повысило усталостную долговечность двухсрезных соединений по сравнению с вариантом соединений только с затяжкой болтов  $M_3 = 20$  Н·М. Причиной разрушения образцов в первом и втором вариантах сборки соединений была фреттинг-коррозия по сопрягаемым плоскостям соединяемых пластин, вызванная действием контактных давлений одной и той же величины (рис. 7, кривые 3 и 4).

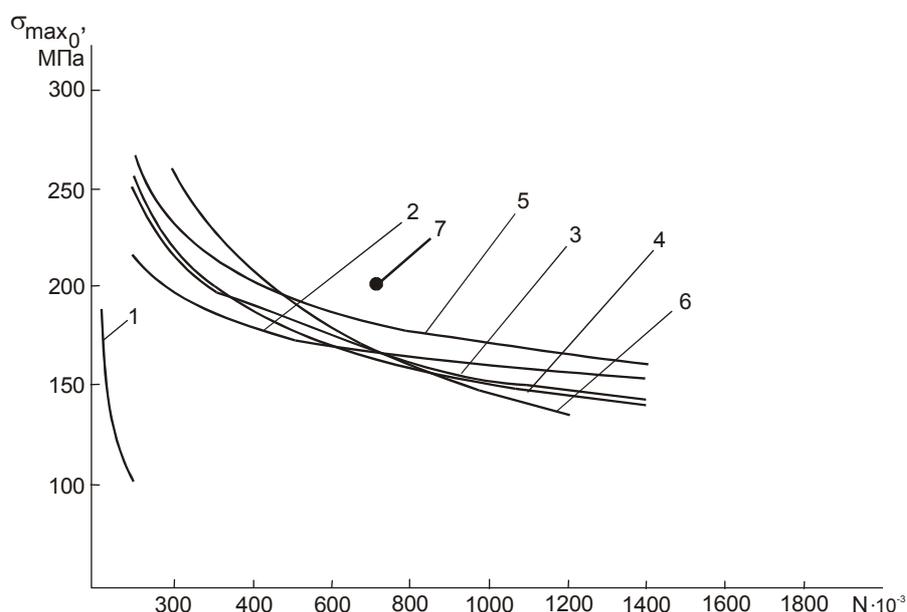


Рис. 7. Влияние радиального натяга и осевой затяжки болтов на усталостную долговечность двухсрезных соединений из сплава ВТ6:

- 1 -  $\bar{\Psi} = 0, M_3 = 0$ ; 2 -  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d, M_3 = 0$ ; 3 -  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d, M_3 = 20$  Н·М;  
 4 -  $\bar{\Psi} = 0, M_3 = 20$  Н·М; 5 -  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \% d, M_3 = 0$ ; 6 - расчетная кривая усталостной долговечности в зоне фреттинг-коррозии по формуле для образцов гладкой полосы  

$$\sigma_{\max i_0} = 1993 N^{-0,101} - 20,8 N^{0,0524} K_{\text{п}} \cdot \sigma_{\text{к}}^{0,48} K_{\text{хп}}$$
; 7 - упрочнение всей контактной

поверхности испытуемого элемента,  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \% d, M_3 = 20$  Н·М

На рис. 7 приведено сравнение экспериментальных данных усталостных испытаний двухсрезных соединений с результатами расчета усталостной долговечности гладких образцов из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии [2].

Определялась минимальная усталостная долговечность образцов соединений в зоне фреттинг–коррозии по формуле

$$\sigma_{\max 0\delta} = \sigma_{\max 0} - \Delta\sigma_{\max 0\text{ср}},$$

где  $\sigma_{\max 0}$  - максимальные напряжения гладкой полосы из сплава ВТ6 без фреттинг–коррозии  $\sigma_{\max 0} = 1993 N^{-0,101}$  [1];

$\Delta\sigma_{\max 0\delta}$  - уменьшение максимальных напряжений, действующих в гладком образце, вызванное фреттинг–коррозией.

Формулу для расчета  $\Delta\sigma_{\max 0\delta}$  получено после обработки результатов усталостных испытаний образцов гладкой полосы в условиях фреттинг–коррозии, приведенных в работе [2]:  $\Delta\sigma_{\max 0\delta} = 20,8 N^{0,0524} K_{\text{п}} \sigma_{\text{к}}^{0,48} K_{\text{хп}}$

С учетом указанного выше формула для расчета усталостной долговечности соединений из сплава ВТ6 в зоне фреттинг – коррозии имеет вид

$$\sigma_{\max 0\delta} = 1993 N^{-0,101} - 20,8 N^{0,0524 K_{\text{п}}} \sigma_{\text{к}}^{0,48} K_{\text{хп}}.$$

где  $\sigma_{\text{к}}$  — контактные давления в зоне фреттинг–коррозии;

$K_{\text{п}}$  — коэффициент, учитывающий влияние покрытий на уменьшение максимальных напряжений при заданной долговечности;

$K_{\text{хп}}$  - коэффициент, учитывающий характер посадки болта.

Рассчитана наименьшая усталостная долговечность соединения в зоне фреттинг–коррозии (см. рис. 7, кривая б), соответствующая  $\sigma_{\text{к}}$  — 78 МПа [2].

Осмотр разрушенных образцов выявил, что фреттинг–коррозионные повреждения, сопровождающиеся усталостным разрушением внутренней пластины соединений, наиболее интенсивно развиваются в контактных зонах под шайбой (диаметром 20 мм) вокруг отверстия и под краями наружных пластин.

В процессе исследований установлено, что наибольшую усталостную долговечность имели соединения, собранные с радиальным натягом.

Осмотр разрушенных образцов выявил, что фреттинг-коррозионные повреждения, сопровождающиеся усталостным разрушением внутренней

пластины соединений, наиболее интенсивно развиваются в контактных зонах (диаметром 20 мм) вокруг отверстия и под краями наружных пластин.

В процессе исследований установлено, что наибольшую усталостную долговечность имели соединения, собранные с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9\% d$  без затяжки. Но в этом случае в 50% образцов разрушался болт. Разрушение болтов было преобладающим при самом низком уровне максимальных напряжений  $\sigma_{\max 0} = 145$  МПа, заданном для усталостных испытаний двухсрезных соединений с  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9\% d$ , причем болты разрушались не по плоскостям среза, а внутри средней соединяемой пластины. Это свидетельствовало о том, что причиной их разрушения был изгиб.

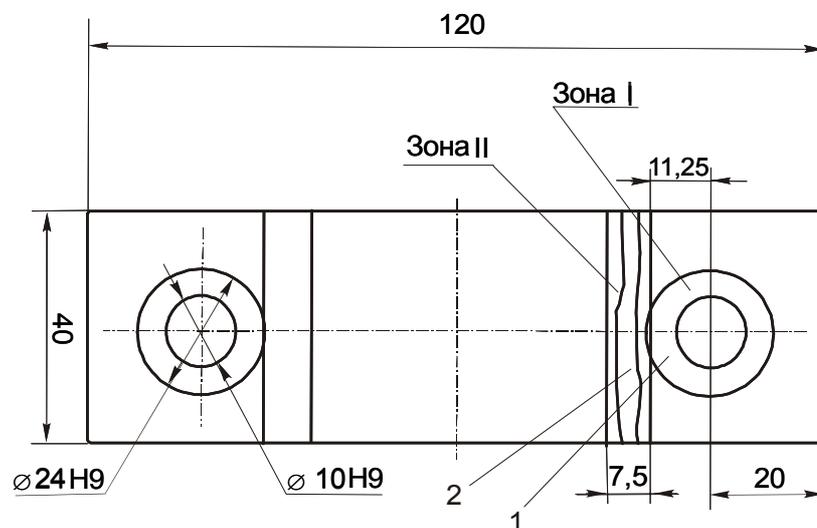


Рис. 8. Схема упрочнения испытуемого элемента двухсрезного соединения

В целях уменьшения негативного влияния фреттинг-коррозии на усталостную долговечность двухсрезных соединений исследовали применение упрочнения участков внутренней пластины соединения (рис. 8). Упрочнению подвергали кольцевую зону диаметром 24 мм вокруг отверстия в зону шириной 7,5 мм под краями наружных пластин. Образцы упрочняли с помощью прессы. Исследовали три режима упрочнения (выполнение подштамповки) внутренней пластины соединения в кольцевой зоне вокруг отверстия (зона I) и под краями наружных пластин (зона II): первый режим характеризовался средним контактным давлением упрочнения  $p_{\text{упр}} = 900$  МПа (это давление равно  $\sigma_{0,2}$  материала ВТ6), второй -  $p_{\text{упр}} = 1170$  МПа, третий -  $p_{\text{упр}} = 1350$  МПа. Упрочненные образцы соединяли болтами с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,1 - 1,1\% d$  и затяжкой  $M_3 = 20$  Н·М. Усталостные испытания этих образцов проводили при уровне амплитуды напряжений  $\sigma_{\text{ан}} = 124$  МПа (что соответствует  $\sigma_{\max 0} = 200$  МПа) и коэффициенте асимметрии цикла нагружения  $r = 0,1$ .

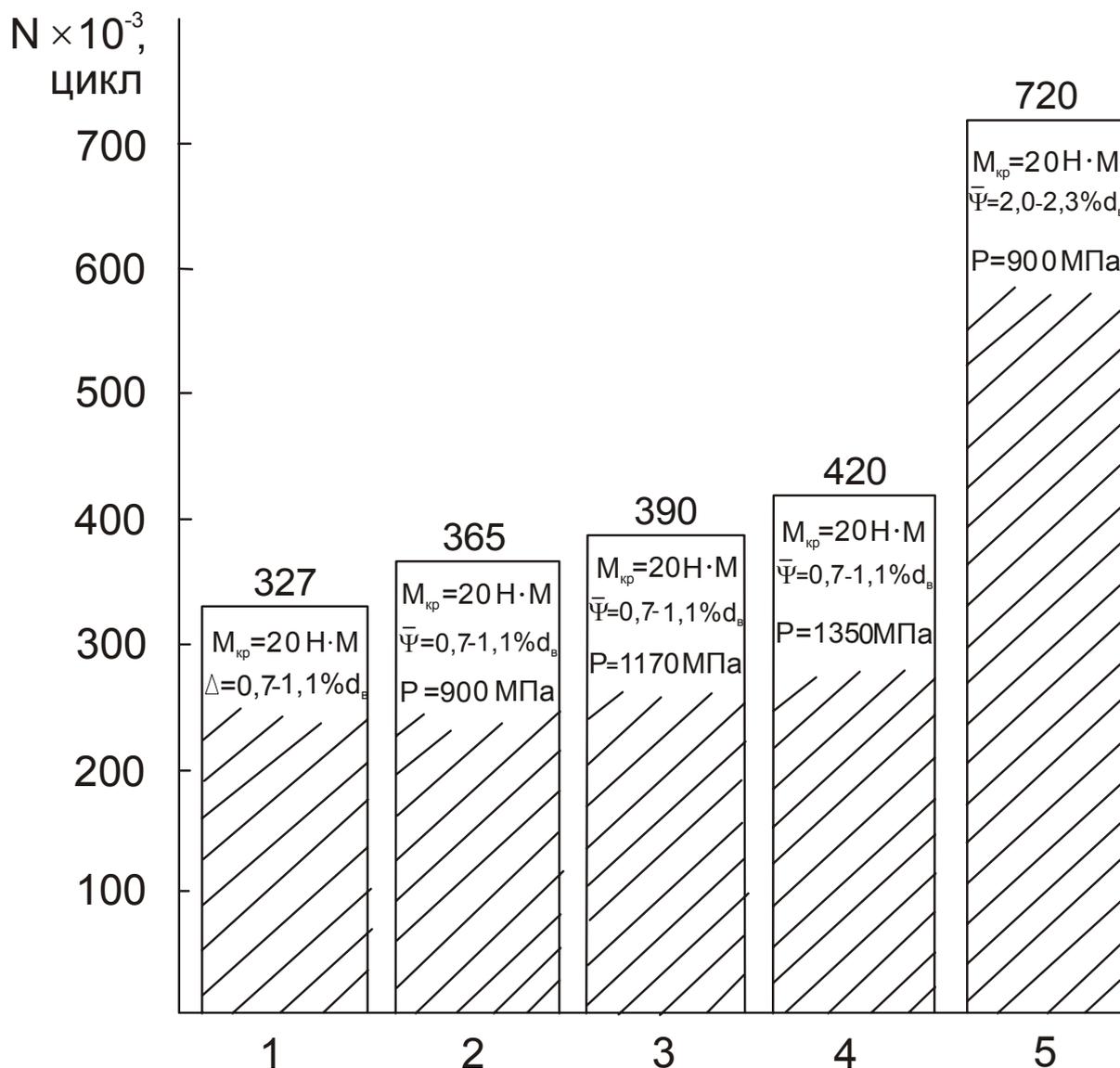


Рис. 9. Влияние упрочнения поверхности внутренней пластины на выносливость двухсрезных соединений из сплава ВТ6:

1 – без упрочнения; 2, 3, 4 – упрочнение кольцевой зоны вокруг отверстия и зоны под краями наружных пластин соединения; 5 – упрочнение всей контактной поверхности внутренней пластины соединения

Упрочнение образцов по первому режиму почти не оказало влияния на усталостную долговечность соединений (рис. 9). Усталостное разрушение образцов начиналось от фреттинг-коррозионных повреждений в упрочненной зоне и за упрочненной зоной. Образцы, упрочненные по второму и третьему режимам, показали усталостную долговечность, в 1,07 – 1,2 раза большую, чем образцы, упрочненные по первому режиму, и в 1,2 – 1,28, чем без упрочнения (см. рис. 9).



Рис. 10. Характер усталостного разрушения элементов двухсрезного соединения после упрочнения в зонах I и II. Болт установлен с  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,8 \% d$

Усталостные разрушения образцов начинались вследствие фреттинг-коррозии за упрочненной зоной и от отверстия (рис. 10). При этом большая часть усталостных разрушений внутренней пластины происходила за упрочненной зоной. Хотя при давлении упрочнения  $R_{упр} = 1350$  МПа соединения имели в 1,28 раза большую усталостную долговечность, чем без упрочнения, они в процессе подштамповки изгибались, после чего их приходилось подвергать правке.

Анализ результатов усталостных испытаний образцов показал, что для более эффективной борьбы с фреттинг-коррозией необходимо упрочнять всю контактную поверхность внутренней пластины соединения. Давление упрочнения при этом нет необходимости создавать более чем  $1,1 - 1,3 \sigma_{0,2}$ , так как при большей величине оно не дает значительного повышения усталостной долговечности, а может привести к искажению формы образцов.

Поэтому упрочнение всей контактной поверхности внутреннего элемента проводили при давлении упрочнения 900 МПа. Болты устанавливали с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \% d$  и затяжкой  $M_3 = 20$  Н·М, так как предыдущие исследования показали, что применение радиального натяга повышает усталостную долговечность больше, чем применение радиального натяга  $0,7 - 1,1 \% d$ .

Этот технологический вариант изготовления соединений оказался наилучшим и показал усталостную долговечность соединения, в 2,3 раза большую усталостной долговечности (см. рис. 9) соединений, выполненных без упрочнения с радиальным натягом  $0,7 - 1,1 \% d_6$  и затяжкой болтов до  $M_3 = 20$  Н·М, и в 48 раз большую усталостной долговечности соединений, выполненных без радиального натяга и затяжки болтов. Хотя вредное влияние фреттинг-коррозии в этом варианте соединения уменьшено, она все же остается основным очагом усталостного разрушения. Так, 60% упрочненных образцов разрушилось в контактных зонах под накладками от действия фреттинг-коррозии, а также

концентрации напряжений, вызванной давлением гайки и головки болта на соединяемые элементы при затяжке болтов (рис. 11).

Проведенные исследования показали, что наиболее эффективным средством повышения усталостной долговечности двухсрезных соединений из сплава ВТ6 при диаметре болтов 10 мм является совместное применение поверхностного упрочнения, радиального натяга болтов, равного  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \% d$ , и затяжки болтов до  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$ .

Усталостную долговечность односрезных соединений из титанового сплава ВТ6 исследовали на образцах (см. рис. 3 и 4) для двух уровней амплитуды напряжений  $\sigma_{ан} = 100 \text{ МПа}$  и  $\sigma_{ан} = 150 \text{ МПа}$  ( $\sigma_{\max 0\dot{a}\dot{o}} = 149; 224 \text{ МПа}$ ). Напряжения  $\sigma_{ан}$  вычислены по сечению нетто, а  $\sigma_{\max 0\dot{a}\dot{o}}$  - по сечению брутто для разрушенных элементов соединения.

Испытали два варианта односрезных соединений. В первом варианте соединений болты устанавливали с затяжкой  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$  без радиального натяга, во втором – болт установлен с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,8 \% d$  и осевой затяжкой  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$ .

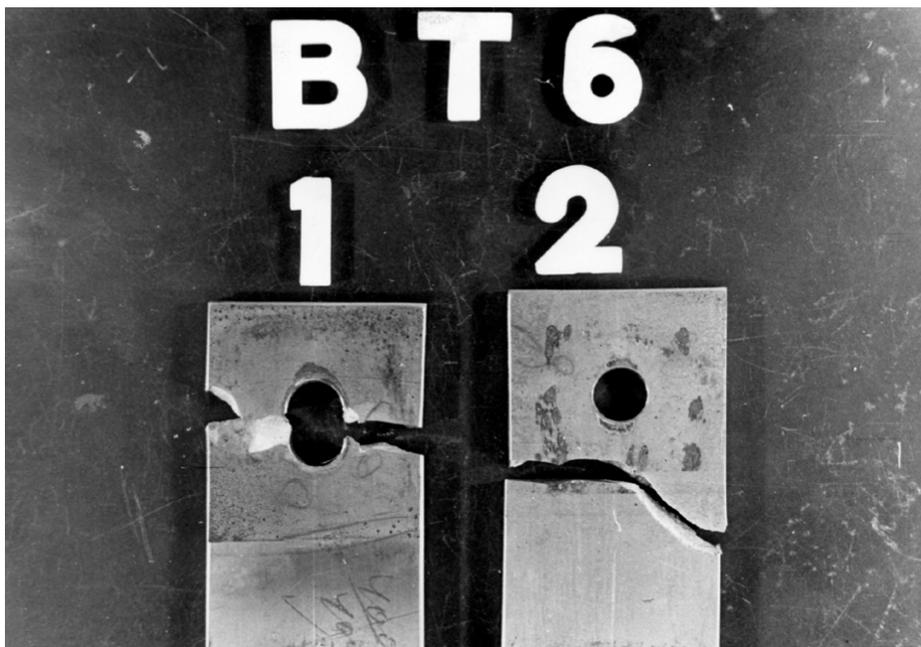


Рис. 11. Характер усталостного разрушения элементов двухсрезного соединения при установке болтов с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9 \% d$ , затяжкой  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$  и упрочнением всей контактной поверхности

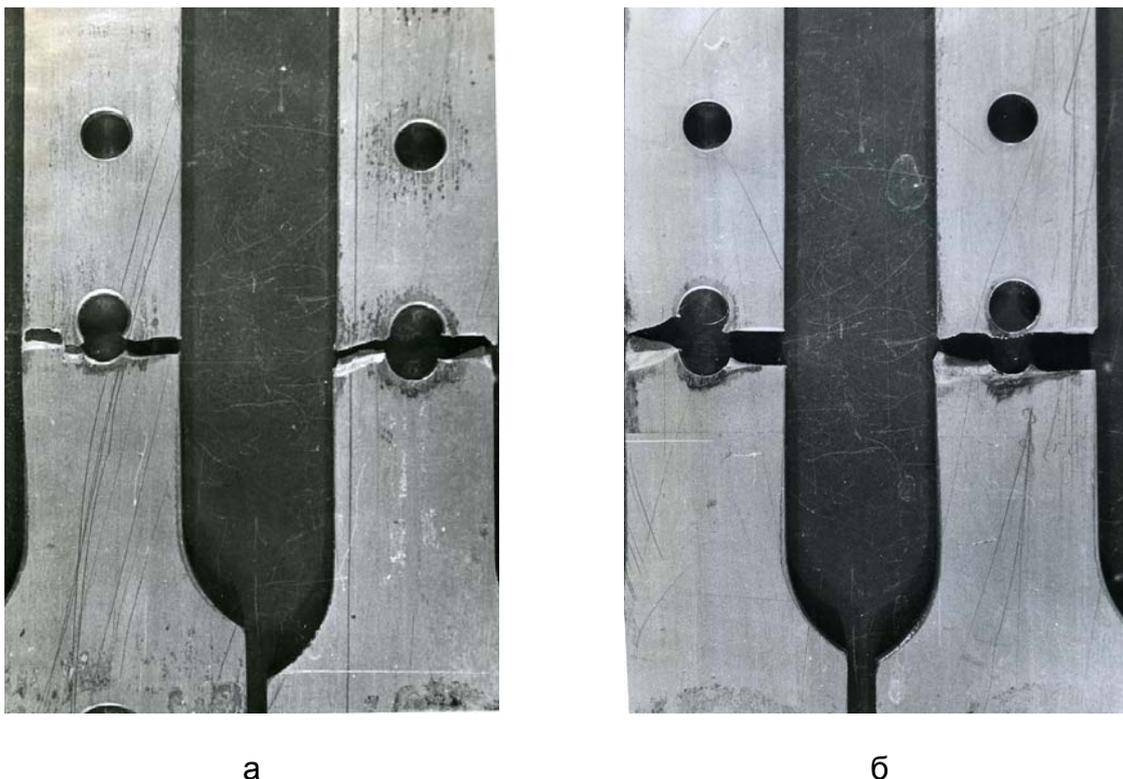


Рис. 12. Характер усталостного разрушения элементов односрезного соединения из сплава ВТ6:

1 -  $\bar{\Psi} = 0$ ,  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$ ; 2 -  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,8 \% d$ ,  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$

Осмотр образцов показал, что разрушение образцов с затяжкой, испытанных при уровне амплитуды напряжений  $\sigma_{ан} = 150 \text{ МПа}$  (амплитуда напряжений рассчитана в сечении оси отверстия, первого со стороны захвата) (см. рис. 3), начиналось от отверстия, а при уровне амплитуды напряжений  $\sigma_{ан} = 100 \text{ МПа}$  – в контактной зоне между пластинами от фреттинг-коррозионного повреждения (рис. 12). Образцы соединений, собранные с радиальным натягом и осевой затяжкой болтов, разрушились в зоне действия фреттинг-коррозии при обоих уровнях амплитуды напряжений. Анализ характера разрушений свидетельствует о существенном влиянии на усталостную долговечность односрезных соединений изгиба образцов. Все усталостные трещины на образцах появились в зоне контакта испытуемого элемента с пластиной, где действовали максимальные растягивающие напряжения, вызванные изгибом образцов.

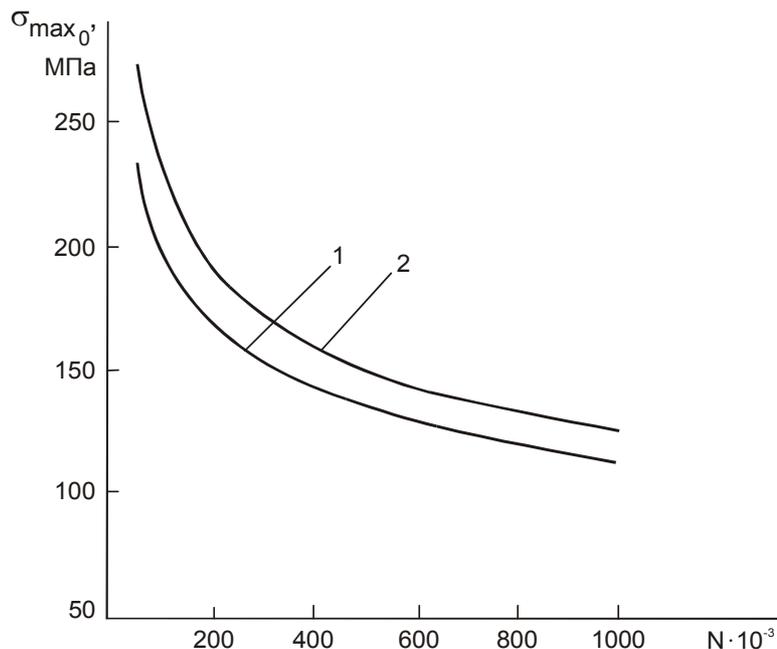


Рис. 13. Кривые усталости односрезных соединений из сплава ВТ6 для различных вариантов установки болтов в отверстия:

1 -  $\bar{\Psi} = 0$ ,  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$ ; 2 -  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,8 \% d$ ,  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$

На рис. 13 приведены кривые усталости односрезных соединений из сплава ВТ6. После регрессионного анализа результатов усталостных испытаний получены уравнения кривых 1 и 2 на рис. 13. Параметры кривых представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Вариант сборки соединения	m	c	$\sigma_{\max 0}$
$\bar{\Psi} = 0$ ; $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$	4,1545	$3,393 \cdot 10^{14}$	$3144,6 \text{ Н}^{-0,2407}$
$\bar{\Psi} = 1,5 - 1,8\% d$ ; $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$	3,9108	$1,597 \cdot 10^{14}$	$4284 \text{ Н}^{-0,2557}$

Усталостные испытания показали, что применение радиального натяга болтов, равного  $1,5 - 1,8\% d$ , и затяжки болтов  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$  повышает усталостную долговечность односрезных соединений в 1,67 раза при уровне  $\sigma_{\max 0} = 223 \text{ МПа}$  и в 1,51 раза при уровне  $\sigma_{\max 0} = 150 \text{ МПа}$  по сравнению со случаем применения только затяжки болтов  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$ .

Снижение эффективности радиального натяга при уровне  $\sigma_{\max} = 150 \text{ МПа}$  объясняется увеличивающимся влиянием фреттинг-коррозии при низких уровнях нагрузок.

## Выводы

1. Применение осевой затяжки болтов  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$  повышает усталостную долговечность двухсрезных соединений из сплава ВТ6 в 25 – 33 раза по сравнению с усталостной долговечностью соединений без затяжки болтов.

2. Установка болтов с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d$  без затяжки способствует повышению усталостной долговечности двухсрезных соединений из сплава ВТ6 в 12 раз при уровне максимальных напряжений  $\sigma_{\max 0} = 200 \text{ МПа}$ , а при  $\sigma_{\max 0} = 160 \text{ МПа}$  более, чем в 50 раз по сравнению со случаем, когда болты устанавливаются без радиального натяга и затяжки. Повышение радиального натяга от  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d$  до  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9\% d$  привело к возрастанию усталостной долговечности в 2,4 раза при  $\sigma_{\max 0} = 200 \text{ МПа}$  и в 1,5 раза при  $\sigma_{\max 0} = 160 \text{ МПа}$ .

3. Наиболее эффективным средством повышения усталостной долговечности двухсрезных соединений из сплава ВТ6 является совместное применение упрочнения контактной поверхности, радиального натяга  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,9\% d$  и осевой затяжки  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$ . Повышение долговечности составляет 2,3 раза по сравнению с долговечностью соединений с радиальным натягом  $\bar{\Psi} = 0,7 - 1,1\% d$  и осевой затяжкой  $M_3 = 20 \text{ Н}\cdot\text{М}$ .

4. Применение радиального натяга  $\bar{\Psi} = 1,5 - 1,8\% d$  и затяжки  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$  повышает усталостную долговечность односрезных соединений в 1,67 раза для уровня  $\sigma_{\max 0} = 223 \text{ МПа}$  и в 1,51 раза для уровня  $\sigma_{\max 0} = 150 \text{ МПа}$  по сравнению со случаем применения только затяжки болтов  $M_3 = 10 \text{ Н}\cdot\text{М}$ .

## Список литературы

1. Гребеников А. Г., Клименко В. Н. Сопротивление усталости титанового сплава ВТ6 // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - Х.: НАКУ «ХАИ». - 2005. – Вып. 42(3). – С. 37 – 46.

2. Гребеников А. Г., Клименко В. Н. Методика определения влияния фреттинг–коррозии на усталостную долговечность гладких конструктивных элементов из титанового сплава ВТ6 // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». - 2005. – Вып. 29. – С. 57 – 68.

3. Современные технологии авиастроения / Коллектив авторов; Под ред. А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.

4. Порошин С. Н. К вопросу повышения ресурса болтовых соединений // Некоторые вопросы технологии производства летательных аппаратов. - М.: МАИ. - 1975. – Вып. 316. – С. 23 – 29.

5. Григорьев В. П., Ярковец А. И., Порошин С. Н. Влияние состояния контактных поверхностей листов на выносливость болтовых соединений / Методы повышения ресурса соединений элементов конструкций // Труды ЦАГИ. 1974. – Вып. 1. – С. 37 – 41.