



5/2009

УДК 629.735

*Кривов Г.А.¹, Шулепов В.Н.¹, Шитоха Е.Г.¹, Харченко В.В.², Филатов В.Э.², Моляр А.Г.³*¹ ОАО "Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии". Украина, Киев.² Институт проблем прочности Национальной академии наук Украины. Украина, Киев.³ Институт металлофизики Национальной академии наук Украины. Украина, Киев**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ПЛАСТИНАХ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА НА ИХ УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ****Анотація**

У роботі приведені результати випробувань на втому зразків пластин з титанового сплаву ВТ6С з отворами, зміцненими методом дорнювання при різних режимах.

Abstract

Results are presented for fatigue tests of VT-6C titanium alloy plate samples with holes strengthened by mandreling in different modes.

Цель работы

Целью данной работы является оценка влияния параметров упрочнения отверстий в образцах пластин из листового проката титанового сплава BT6C по ГОСТ 19807-91 на усталостную долговечность этих пластин по результатам испытаний на усталость образцов при комнатной температуре.

Суть проблемы

Достижение весового совершенства и, как следствие, эксплуатационной эффективности гражданских самолетов нового поколения в значительной степени определяется существенным увеличением объема применения титановых сплавов для изготовления высоконагруженных элементов планера.

Доля титановых сплавов в общей массе планера гражданских самолетов, которые будут эксплуатироваться в 2015–2025 годах, по мнению специалистов, будет составлять 15–20% по сравнению с 3–5%, характерными для самолетов предыдущего и нынешнего поколений.

Увеличение объемов применения титановых сплавов неразрывно связано с необходимостью решения ряда проблем в сфере материаловедения, прочности и ресурса конструкций, а также технологий их производства.

Несмотря на неоспоримые преимущества по сравнению с другими авиационными материалами (алюминиевые сплавы, высокопрочные стали, полимерные композиты), титановые сплавы в конструкциях, подвергающихся усталостным нагрузениям, чувствительны к различным концентраторам напряжений, одними из наиболее распространенных из которых являются функциональные отверстия (дренажные, для перетекания топлива, для постановки крепежных элементов).

Учитывая, что только крепежных элементов в конструкции современного самолета насчитывается порядка 1 миллиона штук, актуальность обеспечения требуемой усталостной прочности конструкций планера в зоне функциональных отверстий становится очевидной.

По результатам проведенных рядом исследовательских центров, включая УкрНИИАТ, работ накоплен значительный опыт решения проблемы усталостной прочности для авиационных конструкций, изготавливаемых из высокопрочных алюминиевых сплавов, составляющих основную долю в массе планера современного самолета. Для таких сплавов проблема решается преимущественно

технологическими методами и средствами, обеспечивающими создание в конструкции, в зоне функционального отверстия, благоприятного напряженно-деформированного состояния, снижающего уровень концентрации напряжений вблизи отверстия в условиях эксплуатационного нагружения.

В данной статье представлены отдельные результаты экспериментальных исследований, проводимых УкрНИИАТ совместно с Институтом проблем прочности НАНУ и направленных на поиск эффективных методов и средств повышения усталостной прочности высоконагруженных авиаконструкций из титановых сплавов.

В качестве исследуемой модели принята, в отличие от [1], бесконечная пластина с отверстиями, что более адекватно отражает процессы, происходящие при воздействии эксплуатационных нагрузок на конструкцию планера самолета с упрочненными функциональными отверстиями.

Экспериментальные образцы для исследования влияния способа упрочнения на усталостную долговечность элементов конструкций планера представляют собой прямоугольные пластины с центральным круговым отверстием.

Материалы, оборудование и методы испытаний

Конструкция образцов для проведения испытаний на усталостную долговечность показана на рис. 1.

Номинальный диаметр упрочняемого отверстия – 8 мм.

Образцы изготавливались из титанового сплава BT6C по ГОСТ 19807-91, характеризующего микроструктурой Видманштаттена (альфа-фазные пластинки в бета-фазной матрице).

Справочные характеристики сплава BT6C приведены в табл. 1.

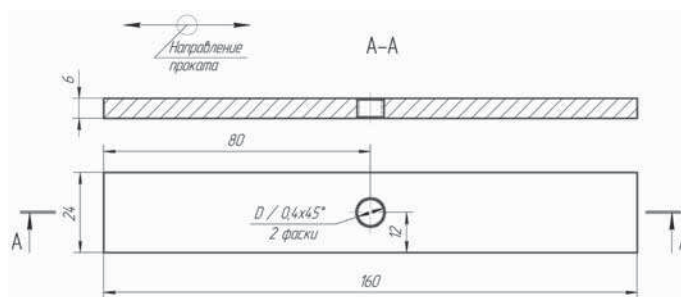


Рис. 1. Чертеж образца пластины из титанового сплава

Таблица 1

Плотность ρ , г/см ³	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сжатие ψ , %	Твердость, НРС	Модуль упругости E , ГПа
4,43	830–1030	6–12	20–30	35–42	115–120

Испытания на усталость согласно требованиям ГОСТ 25.502-79 [2] проводились на современной универсальной сервогидравлической машине Instron 8802 с цифровым программным управлением (рис. 2).

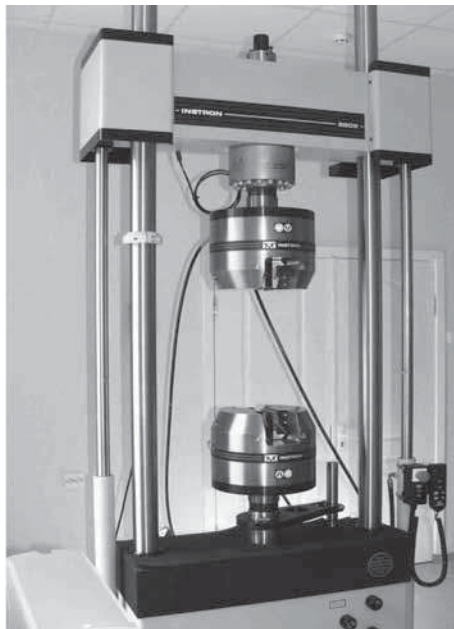


Рис. 2. Сервогидравлическая машина Instron 8802, оснащенная гидравлическими клиновыми захватами

На силовой раме машины снизу смонтирован гидроцилиндр с нижним активным гидравлическим захватом. Верхняя траверса с пассивным гидравлическим захватом устанавливается в рабочее положение с помощью гидродомкратов и фиксируется на колоннах гидрозажимами. Гидравлика машины приводится в действие расположенной в отдельном помещении насосной станцией, создающей давление масла 210 бар.

Гидравлические захваты представляют собой массивные стальные цилиндры с выточкой, куда устанавливаются клиновые кулачки с насечкой на рабочей поверхности. Кулачки поджимаются поршнем, их рабочие поверхности сближаются и надежно фиксируют образец (рис. 3) при знакопеременных нагрузках. Усилие зажима регулируется в зависимости от параметров образца.

Конструктивной особенностью гидравлических захватов является то, что кулачки перемещаются только в горизонтальном направлении, что предотвращает деформирование образца при замыкании силовой цепочки. Дополнительно активизируется программная функция безопасности, автоматически поддерживающая заданное минимальное осевое усилие на образец при его монтаже в захваты.

Активный нижний захват перемещается поршнем. Сервопривод обеспечивает позиционирование поршня с точностью $\pm 0,001$ мм, частоту циклирования до 50 Гц и регулирует его перемещение в диапазоне скоростей 0,0001–170 мм/с. Индуктивный датчик измеряет перемещение поршня с точностью 0,001 мм.

Машина оснащена цифровой системой управления на базе контроллера Instron 8800 с прикладным лицензионным программным обеспечением. Максимальное усилие — 250 кН. Датчик усилия стационарно смонтирован на верхней неподвижной траверсе машины и оснащен динамическим компенсатором.

Испытания образцов пластин с упрочненными и неупрочненными отверстиями проводились при циклическом нагружении с частотой 13 Гц на таких трех уровнях:

1. $\sigma_{бр.мин} = 50$ МПа, $\sigma_{бр.маx} = 500$ МПа;
2. $\sigma_{бр.мин} = 40$ МПа, $\sigma_{бр.маx} = 400$ МПа;
3. $\sigma_{бр.мин} = 30$ МПа, $\sigma_{бр.маx} = 300$ МПа.

Испытывались четыре группы образцов:

Группа 1 — образцы с неупрочненными отверстиями. Окончательная обработка отверстий в образцах этой группы выполнялась развертыванием. Количество образцов в группе — 9.

Группа 2 — образцы с отверстиями, упрочненными в один проход дорнованием с максимальным натягом. Количество образцов в группе — 9.

Группа 3 — образцы с отверстиями, упрочненными в три прохода дорнованием с общим максимальным натягом.

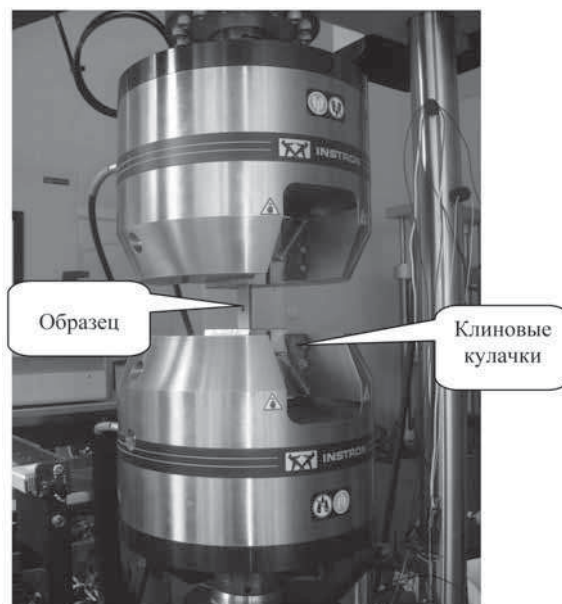


Рис. 3. Образец пластины из титанового сплава BT6C в гидравлических клиновых захватах

Группа 4 – образцы с отверстиями, упрочненными в три прохода дорнованием с общим максимальным натягом, прошедшие термообработку.

Для снятия внутренних напряжений все образцы, перед выполнением в них отверстий, прошли термообработку. Режимы термообработки указаны в таблице 2.

Результаты испытаний

Перед испытаниями на циклическую прочность были проведены при нормальных условиях испытания на статическую прочность пластин без отверстия, результаты которых приведены на рисунке 4 и в таблице 3.

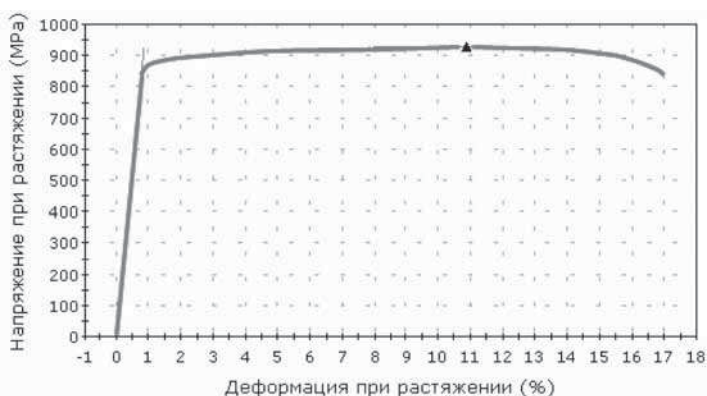


Рис. 4. Диаграмма деформирования образца из титанового сплава BT6C при температуре 20°C

Таблица 2

Вид термообработки	$t_{отж}$, °C	Время, мин	Вакуум, Па	Охлаждение
Вакуумный отжиг	800	45	$(3...5) \times 10^{-4}$	до 150°C – в печи с вакуумом, далее на воздухе

Таблица 3

Временное сопротивление (N/mm ²)	Предел текучести (N/mm ²)	Модуль E (N/mm ²)
> 929,1	> 872,5	> 107 135,828

Первыми испытывались образцы на уровне нагружения, соответствующем максимальным номинальным напряжениям в сечении без отверстия 500 Н/мм².

Полученные значения числа циклов до разрушения от 7000 до 11100 показали, что более высокий уровень нагружения может привести к пластическому деформированию металла.

Во всех случаях разрушения образцов усталостные трещины развивались от концентратора – отверстия диаметром 8 мм в противоположные стороны примерно перпендикулярно оси образца.

На рис. 5 представлен излом образца, на котором видны характерные детали рельефа – более плоская зона усталостного разрушения и зона хрупкого долома.

По результатам испытания отдельных групп образцов строились кривые усталости в полулогарифмических координатах, описываемые известным [3] степенным уравнением вида

$$\sigma = a \cdot N^b.$$

Результаты испытаний и описывающие их кривые усталости приведены в сопоставимом виде на рис. 6.

В связи с тем, что общее количество образцов было разделено на четыре группы, то по объему каждая группа стала статистически менее представительной. На таком весьма ограниченном материале не представилось возможным провести полноценный статистический анализ результатов испытаний и сделать выводы об эффективности рассмотренных методов упрочнения [4]. Поэтому приведенные ниже рассуждения носят качественный характер и дают лишь ориентировочные оценки.

Долговечность образцов после упрочняющей обработки дорнованием заметно увеличивается. Так, например, на уровне нагружения 300 Н/мм²,

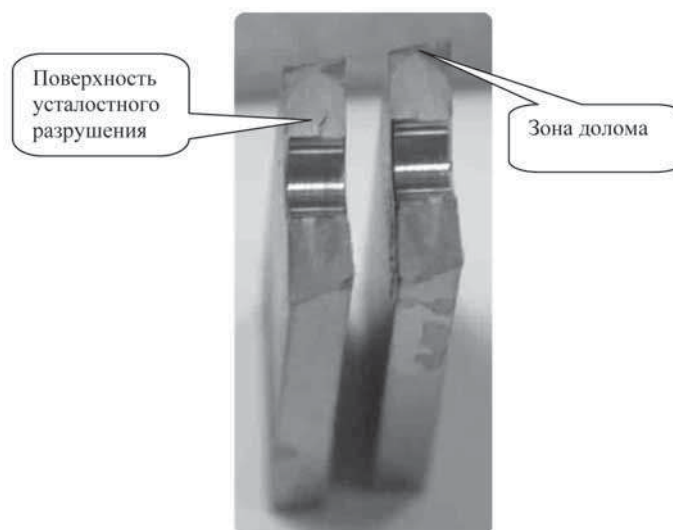


Рис. 5. Характерный излом образца



Рис. 6. Кривые усталости образцов титанового сплава ВТ6С с отверстием диаметром 8 мм (четыре группы)

на котором испытано наибольшее количество образцов, число циклов до разрушения после дорнования в один проход увеличивается с 45 000 до 180 000, а после дорнования в три прохода — до 245 000. То есть, методом дорнования можно повысить долговечность в четыре раза.

Усложнение способа обработки — дорнование в три прохода вместо одного, приводит лишь к некоторому росту числа циклов до разрушения. После дорнования в три прохода при незначительном повышении усталостной долговечности заметно возрастает разброс ее значений. К примеру, на уровне нагружения 300 Н/мм² при дорновании в три прохода наибольшее и наименьшее число циклов различаются более чем в четыре раза (408 200 против 99 020), в то время как при дорновании в один проход разница между наибольшим и наименьшим количеством циклов становится меньше, соответственно, 285 400 и 124 600 циклов.

Термическая обработка после дорнования снижает усталостную долговечность практически на порядок (на уровне нагружения 300 Н/мм²), что, предположительно, происходит в результате снятия остаточных напряжений сжатия. Вместе с тем, представляется целесообразным проведение более достоверных исследований по выявлению значения температуры, при котором снимаются остаточные напряжения сжатия, наведенные в результате дорнования.

Из проведенного предварительного качественного анализа следует, что механическая упрочняющая обработка отверстий в образцах титанового сплава ВТ6С путем дорнования может увеличить их усталостную долговечность в несколько раз по сравнению с образцами с неупрочненными отверстиями.

В то же время заметный разброс значений числа циклов до разрушения указывает на то, что эффект упрочнения нестабилен, а технология обработки нуждается в доработке.

Количественно оценить эффективность применения упрочняющей обработки можно будет после проведения дополнительной серии испытаний на усталость на примененном и аналогичном по характеристикам материалах.

Выводы

1. Испытания на усталость образцов пластин из титанового сплава ВТ6С с отверстиями, упрочненными дорнованием в различных режимах, показали возможность увеличения усталостной долговечности упрочненных образцов вплоть до четырех раз по сравнению с образцами с неупрочненными отверстиями.

2. Упрочнение отверстий дорнованием дает положительный эффект и увеличивает сопротивление многоциклового усталости титанового сплава ВТ6С.

3. Примененная термическая обработка после дорнования снижает усталостную долговечность образцов пластин из титанового сплава BT6C.

Литература

1. *Спосіб обробки отворів циліндричних виробів. Декларативний патент України на винахід № 68825А; автори Розенберг О.О. та інші.*
2. *ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.*
3. *Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. — М.: Машиностроение, 1964. — С. 168.*
4. *Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. — М.: Металлургия, 1978. — С. 54–55.*