

Эксплуатационная несущая способность деталей конструкций отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов

*Государственный научно-исследовательский экспертно-криминалистический
центр МВД Украины
Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины*

Проведен углубленный анализ исчерпания эксплуатационной несущей способности деталей и узлов конструкций отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов. В основе анализа лежит обширный статистический материал, охватывающий многолетний опыт эксплуатации самолетов ГП «Антонов». Показано, что основным видом исчерпания несущей способности деталей из титановых сплавов является усталостное разрушение. Приведены его типовые микрофрактограммы, позволяющие проанализировать виды и стадии усталостного разрушения в зависимости от места расположения детали в агрегате воздушного судна.

Ключевые слова: детали и узлы агрегатов отечественных воздушных судов, титановые сплавы, усталостное разрушение, фрактологический анализ.

Титановые сплавы благодаря присущему им комплексу физико-механических и химических свойств являются уникальными материалами для авиационных конструкций [1 – 9], поэтому объем их применения в деталях агрегатов воздушных судов транспортной категории непрерывно возрастает с 2 % в 1960 – 1970 годах до 3 % в 1980 – 2000 годах, а к 2015 году – до 10...12 % [10 – 12].

В [10] также сделана попытка осветить аспекты пересечения базисных основ юридически-правовой поддержки жизненного цикла отечественных воздушных судов транспортной категории с проблемой научного обеспечения основных факторов безопасности их конструкций на стадиях проектирования, производства, эксплуатации.

В порядке реализации намеченных путей дальнейшего анализа этой проблемы в [13] нами обсуждены основные виды и причины разрушения деталей конструкции агрегатов отечественных воздушных судов из алюминиевых сплавов, а в [14] – такой же анализ выполнен для деталей из стальных сплавов.

Ниже на основе углубленного анализа предшествующих исследований вскрыты основные виды и причины эксплуатационного разрушения деталей отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов^{*)}.

Обсуждение проблемы

В авиастроении существуют четыре основных направления использования титановых сплавов в различных деталях отечественных воздушных судов (рис. 1), которые предопределяются их свойствами [16, 17]:

– малолегированные сплавы повышенной пластичности – для изготовления деталей сложной пространственной формы;

^{*)} Изложенный ниже материал в значительной мере заимствован из нашей коллективной монографии [15], приведенный авторами настоящей публикации в разделе 7.

- высокопрочные сплавы – для ответственных высоконагруженных узлов и агрегатов самолета;
- жаропрочные сплавы – для деталей, эксплуатирующихся при высоких температурах до 600 °С;
- свариваемые сплавы – для деталей сложной конфигурации.

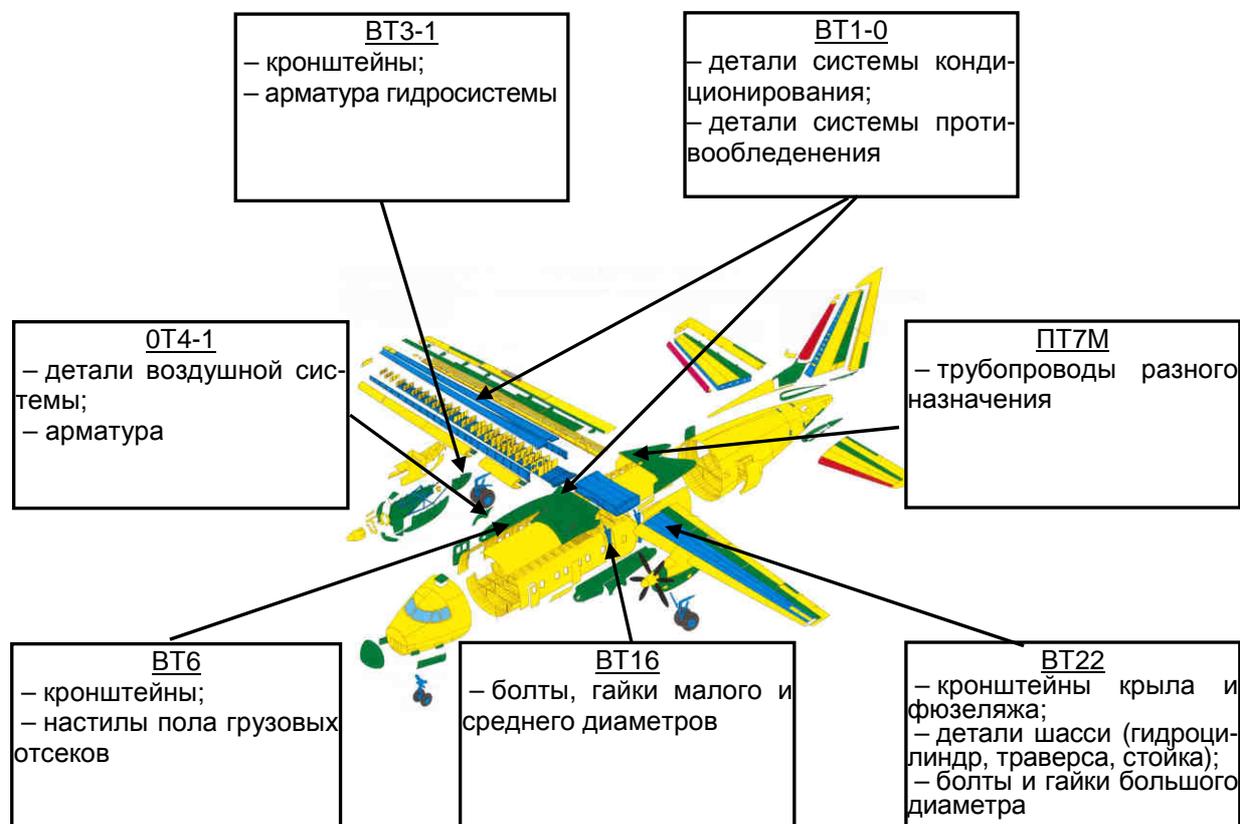


Рис. 1. Использование титановых сплавов в конструкции самолетов Ан

Титановые сплавы имеют уникальный комплекс физико-механических, химических и эксплуатационных свойств, которые делают их незаменимыми во многих отраслях промышленности. Наибольшим потребителями титановых сплавов является, безусловно, аэрокосмическая отрасль. Это обусловлено свойствами титана: высокая удельная прочность; уникальная коррозионная стойкость в различных средах, большинстве органических и минеральных кислот; минимальный среди металлов коэффициент термического расширения; достаточно высокая температура плавления.

К недостаткам следует отнести их высокую стоимость; чрезвычайно низкие триботехнические характеристики, что делает невозможным их использование в узлах трения; высокая химическая активность при нагреве выше 500 °С, приводящая к охрупчиванию вследствие растворения газов (O_2 , N_2 , H_2). Для высокопрочных сплавов в качестве недостатка следует отметить чувствительность к качеству поверхности и концентраторам напряжений.

В табл. 1 приведены марки титановых сплавов и их использование в деталях самолета [16, 19].

Для титановых сплавов в отличие от сталей и алюминиевых сплавов не характерны коррозионные разрушения авиационных конструкций. Кроме того, титановые сплавы не применяют в узлах трения самолетов без износостойких покры-

тий, поэтому для них не характерен износ. Основной причиной разрушения титановых деталей является усталость, которая, как правило, сопровождается влиянием газонасыщенного поверхностного слоя [7, 8] или другими технологическими факторами (грубая механическая обработка, наличие глубоких рисок, шлифовочные прижоги и т.д.). Титановые сплавы, в том числе высокопрочные, требуют повышенной культуры производства и четкого выполнения технологической дисциплины для обеспечения надежности изделий из них.

Таблица 1

Марки титановых сплавов в самолетах Ан

Марка сплава	Система легирования	Полуфабрикаты	Применение (детали)
BT1-00	Нелегированный	Пруток, проволока	Катоды для ионно-плазменного напыления покрытий, сварочная проволока
BT1-0 (ПТ1М)	Нелегированный	Лист, труба, проволока, пруток	Детали трубопроводов воздушной системы, гнутые кронштейны, фольга для сотовых заполнителей композиционных материалов, заклепки
ПТ7М	$Ti - 2Al - 2,5Zr$	Тонкостенная труба, лист	Трубопроводы
OT4-1	$Ti - 2Al - 1,5Mn$	Лист, пруток, штамповка	Окантовка люков и дверей, гнутые и штампованные кронштейны, элементы трубопроводов, противопожарные перегородки, бронезащитные элементы
BT6e	$Ti - 6Al - 4V$	Лист, пруток	Шипованные настилы пола грузовой кабины
BT6	$Ti - 6Al - 5V$	Лист, пруток, штамповка, плита, поковка	Детали крепления, в том числе резьбовые, тяги управления, сварные кронштейны
BT16	$Ti - 2Al - 5Mo - 5V$	Пруток	Детали крепления с накатанной резьбой
BT3-1	$Ti - 6Al - 2,5Mo - 2Cr - Fe - Si$	Пруток, штамповка, толстостенная труба	Кронштейны, элементы крепления, колодки хомутов
BT22	$Ti - 5Al - 5Mo - 5V - 1,5Cr - Fe$	Пруток, плита, штамповка, поковка, толстостенная труба	Кронштейны, детали шасси, в том числе сварные, гидроцилиндры, резьбовые детали крепления, в том числе больших размеров, рейки направляющие

Ниже рассмотрены некоторые случаи разрушения титановых деталей в эксплуатации.

Разрушение траверсы из сплава ВТ22

При достаточно небольшом ресурсе (около 1500 ч) разрушилась траверса основной стойки шасси самолета Ан-124 «Руслан», изготовленная из высокопрочного титанового сплава ВТ22 [17]. Разрушение носило четкий усталостный характер с одним нюансом – трещина началась и развивалась от внутренней поверхности цилиндрической детали. С учетом того, что траверса работает на изгиб, рабочие напряжения на внутренней поверхности цилиндра гораздо ниже действующих на внешнюю поверхность, что свидетельствует о влиянии дополнительного фактора на начало разрушения. Визуально, в том числе и по микро- и макроструктуре, никаких изменений обнаружено не было.

Измерения микротвердости непосредственно возле начала трещины показали ее аномально высокое значение (более 10000 МПа), в других местах микротвердость была стандартной для сплава ВТ22. Было сделано предположение о том, что зона с аномальной микротвердостью – это газонасыщенный (альфированный) слой, образовавшийся при термической обработке. Микроспектральный анализ показал повышенное содержание в этой зоне как кислорода, так и углерода, что объясняло высокую микротвердость и давало возможность сделать предположение о наличии остатков смазочно-охлаждающей жидкости на внутренней поверхности траверсы при ее термической обработке.

Анализ технологии изготовления сварной траверсы свидетельствовал о том, что вместо вакуумной термической обработки был выполнен отжиг в среде аргона, что делает незаметным наличие загрязнений на детали. Моделирование ситуации полностью подтвердило параметры аномального слоя. На основании выполненных исследований было принято решение – провести пескоструйную обработку внутренней поверхности на всех траверсах, находящихся в эксплуатации, в дальнейшем термическую обработку проводить в вакууме с предварительной подготовкой детали в соответствии с требованиями вакуумной технологии. После этого разрушения траверс не было.

Разрушение рычага из сплава ВТ22

При незначительном налете (около 2000 ч) на самолете Ан-72 разрушился рычаг шасси, изготовленный из штамповки высокопрочного титанового сплава ВТ22 [17]. Характер разрушения – усталостный, в зоне максимально действующих напряжений (радиусный переход от вертикальной к горизонтальной части рычага (рис. 2 – 3)).

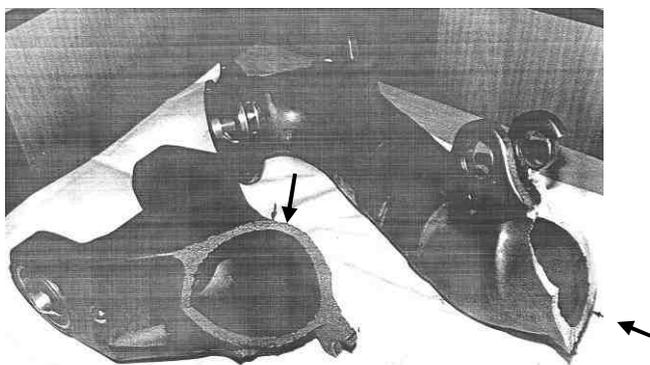


Рис. 2. Общий вид разрушенного рычага из сплава ВТ22 (стрелками указано место начала усталостного разрушения)

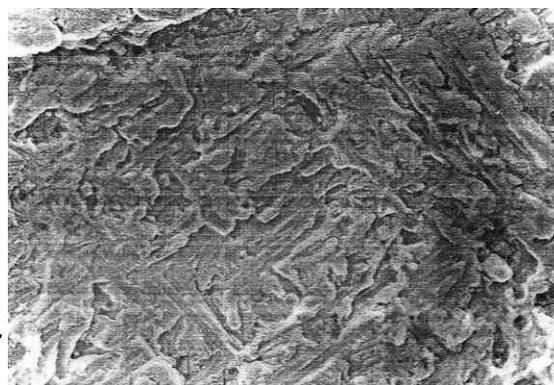


Рис. 3. Фрактораграмма излома рычага из сплава ВТ22 в очаге зарождения усталостной трещины, x 800

При детальном изучении зоны начала разрушения была обнаружена зона с аномальной структурой и микротвердостью, которая и обусловила появление усталостной трещины. Анализ технологии изготовления детали показал, что при изготовлении штамповки на металлургическом заводе образовалась складка металла в месте радиусного перехода, которая была удалена последующей механической обработкой, однако остатки газонасыщенного слоя сохранились. Для эксплуатации было принято решение – провести в месте возможной складки контроль на отсутствие газонасыщенного слоя, при его обнаружении – удалить плавной местной зачисткой. Место травления (контроль на отсутствие газонасыщенного слоя) следовало упрочнить поверхностным наклепом для повышения сопротивления усталости. Металлургическому заводу требовалось срочно доработать штамп, что было выполнено. Повторных разрушений рычагов не было.

Разрушение рейки из сплава ВТ22

В конструкции механизма управления закрылками самолета Ан-124 «Руслан» рейки были изготовлены из титанового сплава ВТ22 в отличие от предыдущих конструкций из стали 40ХНМА, что дало возможность значительно увеличить ресурс и исключить коррозию и скалывание хромового покрытия, характерных для стальных деталей [17]. Тем не менее, при наработке около 6000 полетов (больше назначенного ресурса самолета) в зонах размещения каретки при взлете, посадке и крейсерском режиме были обнаружены недопустимые лунки износа от роликов каретки (рис. 4). Механизм такого износа – фреттинг. Для продолжения ресурса работы реек была предложена технология их восстановления наплавкой (по результатам усталостных испытаний – лучше всего сплавом ВТ22) с последующим местным отжигом и нанесением в зоне образования лунок молибдена электроискровым методом, что позволяет существенно повысить фреттингостойкость.

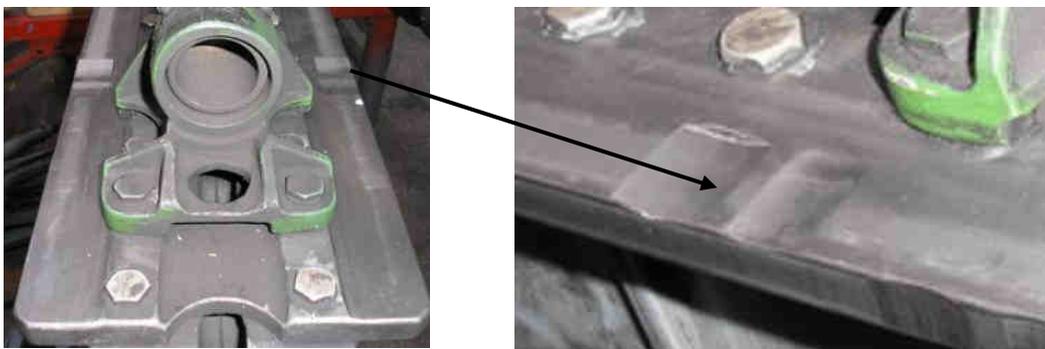


Рис. 4. Общий вид рейки управления закрылками с лунками износа

Разрушение гидрошарниров из сплава ВТ22

Для обеспечения надежной передачи высокого давления гидравлической жидкости с неподвижных агрегатов гидросистемы к подвижным на шасси была сконструирована шарнирная гидропроводка из титанового сплава ВТ22 (рис. 5). Поскольку шарнир предусматривает перемещение, давление в середине шарнира составляет 150 атм, а также имеются внешние нагрузки, то подвижные рабочие поверхности необходимо защитить от износа. За основу был взят опыт разработки конструкции титановых гидроцилиндров, которые были впервые применены в самолете Ан-28, т.е. рабочую поверхность шарнира покрывали гальваническим хромом. В самом начале эксплуатации гидрошарниров было обнаружено подтекание гидрожидкости сквозь резиновое уплотнение, хотя следов износа не было.

Подтекание жидкости сквозь уплотнения в гидроцилиндрах, которые на тот момент эксплуатировались уже несколько лет, не наблюдалось. При более детальных исследованиях было установлено, что просачивание гидрожидкости происходило через неплотности хромового покрытия на границе покрытие-основа. Поскольку в гидроцилиндрах резиновое покрытие было трехбарьерным, то этого было достаточно, чтобы подтекание не выходило наружу, а в гидрошарнирах такую конструкцию создать было сложно. Поэтому было принято решение о замене гальванического хромового покрытия на покрытие ДЭХО (диффузионная электрохимическая обработка), которое было отработано в условиях Ульяновского авиационного производственного комплекса. Гидрошарниры успешно эксплуатируются уже на протяжении 30 лет.

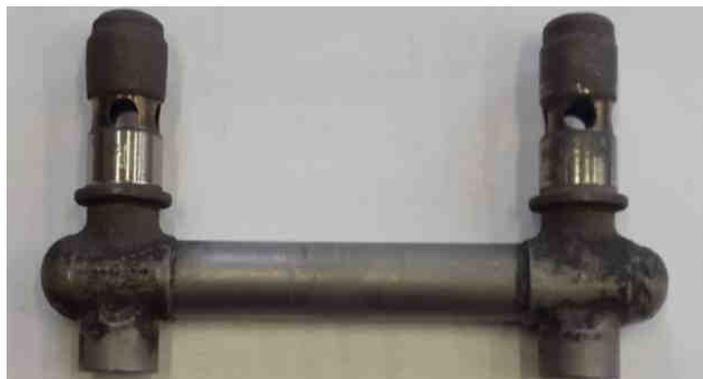


Рис. 5. Гидрошарнир из сплава ВТ22

Разрушение колодок из сплава ВТ3-1

Отраслевым стандартом ОСТ1 12886-77 для изготовления колодок хомутов фланцевых соединений трубопроводов воздушной системы самолетов предусмотрено применение титанового сплава ВТ3-1 с анодным покрытием для защиты от фреттинга (рис. 6). При изготовлении указанных хомутов для самолета Ан-72 вместо анодирования колодок ошибочно было назначено термоокисидирование, что привело к их разрушению (рис. 7).

Фрактографические исследования показали, что разрушение произошло по механизму хрупкого замедленного разрушения (рис. 8), причиной которого стали наличие на поверхности газонасыщенного слоя и грубая β -превращенная микроструктура (рис. 9). Наличие такой структуры способствует неравномерному газонасыщению сплава при термоокисидировании. Проникновение кислорода по границам бывших β -зерен происходит гораздо быстрее, чем по телу зерна, что вызывает расклинивающие микронапряжения и зернограничное разрушение детали.

Для предотвращения подобных разрушений было запрещено использовать процесс термоокисидирования и проведена замена исходной заготовки для изготовления колодок. Ранее использовали штамповку на молотах в β -зоне, а затем, после отработки, было предложено применять прессованную толстостенную трубу, которую прессовали в двухфазной области [16].

Как уже отмечалось, долговечность – один из важнейших показателей, определяющих применимость высокопрочных титановых сплавов в элементах конструкций самолетов. Эффективность применения сплава ВТ22 в тяжелонагруженных деталях и узлах шасси обусловлена его надежностью под знакопеременными нагрузками в течение заданного ресурса [2]. В то же время он недостаточно технологичен, в частности, при сварке.

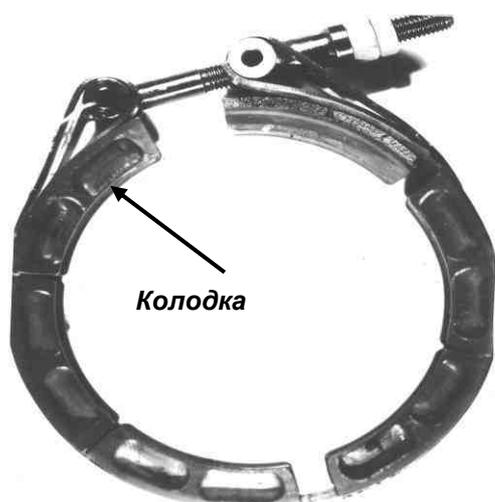


Рис. 6. Хомут для фланцевых соединений трубопроводов воздушной системы самолета



Рис. 7. Общий вид разрушенных колодок из сплава ВТ3-1



Рис. 8. Излом колодки из сплава ВТ3-1

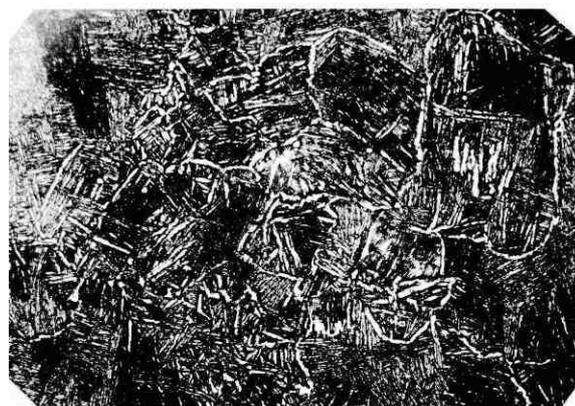


Рис. 9. Микроструктура колодки из сплава ВТ3-1, x 400

Чтобы получить заданный комплекс механических свойств, нужно подвергать его сложному и длительному регламентированному отжигу в вакуумных печах [18]. Все это усложняет изготовление деталей и узлов. Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины вместе с АНТК им. О.К. Антонова разработали более технологичный сплав условной марки Т110 (патент Украины № 40087С2 от 16.06.2003 г.), который хорошо сваривается и имеет прочность не ниже прочности сплава ВТ22 [18, 19]. Сплав Т110 (имеет: 5,0...6,0 % Al , 3,5...4,8 % Nb , 1,5...2,5 % Fe , 0,8...2,0 % V , 0,8...1,8 % Mo , 0,3...0,8 % Zr , 0,09 % O_2 , 0,02 % N_2 , 0,003 % H_2) после определенных технологических операций (плавка электронно-лучевым методом с промежуточной емкостью, двойной переплав; ковка и вальцевание на плиты толщиной 50 мм, когда ковку начинали в β -области (1180...1050 °С), а заканчивали в $(\alpha + \beta)$ -области при 850 °С; вальцевание в $(\alpha + \beta)$ -области на пластины толщиной 10 мм; отжиг при 780 °С в течение 2 часов и охлаждение на воздухе) демонстрирует высокие показатели пластичности и ударной вязкости при показателях прочности не менее 1100 МПа и по уровню механических характеристик не уступает сплаву ВТ22 (табл. 2 [16]).

Таблица 2

Механические характеристики сплавов Т110 и ВТ22

Материал	σ_{ϵ}	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCV , Дж/см ²
	МПа		%		
Т110, лист $t=10$ мм	1107	1083	21	55	48
ВТ22, пруток $\varnothing 40$ мм	1180	1100	14	38	33

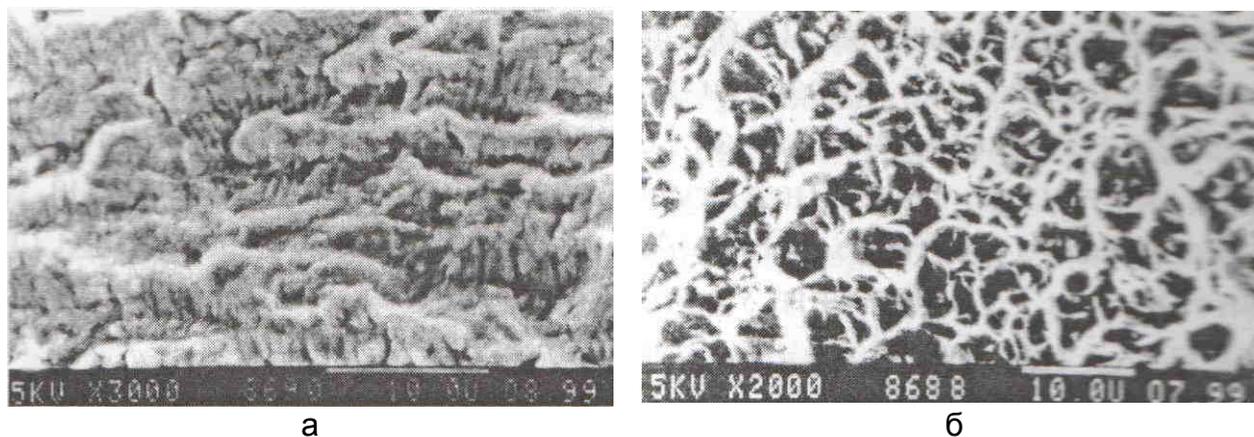
Результаты усталостных испытаний на специальных образцах-ушках ($K_t=2,8$ [20]) выявили некоторое преимущество сплава Т110 (табл. 3 [16]). Фрактологические исследования изломов показали, что разрушение образцов этого сплава носит явно выраженный усталостный характер. На поверхности усталостных трещин наблюдаются микробороздки, соответствующие циклам программного нагружения (рис. 10, а), а в зоне статического долома – вязкий ямочный рельеф (рис. 10, б).

Таблица 3

Малоцикловая усталость образцов-ушек ($K_t=2,8$) из титановых сплавов Т110 и ВТ22

Сплав	Напряжение σ_{max} ($R=0$), МПа	Средняя долговечность, циклы
Т110	600	8235
	400	24540
ВТ22	700	2993
	500	12904
	400	19600

Примечание: при одном уровне нагрузки испытывались 3 – 5 образцов.



а – усталостные бороздки; б – вязкий ямочный микрорельеф в зоне статического долома

Рис. 10. Микрофрактограммы титанового сплава Т110

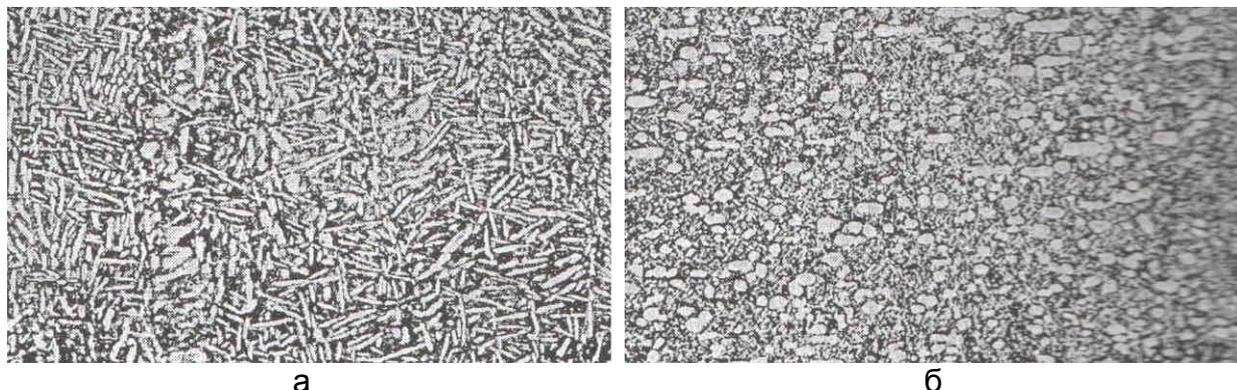
Долговечность сварных соединений из сплава Т110 исследована на гладких образцах-лопатках (300×70×10 мм). Сваривали электронно-лучевым методом (ЭЛС), аргонодуговым без сварочной проволоки (АрДЭС-1) и проволокой марки СП15 (АрДЭС-2), после чего соединение термически обрабатывали по режимам А и Б (табл. 4).

Таблица 4

Долговечность гладких сварных образцов из сплава Т110 [20]

Вариант	Вид сварки	Термообработка после сварки	Напряжение $\sigma_{max} (R = 0)$, МПа	Число циклов	Место разрушения
1	ЭЛС	А (нагрев 870 °С и выдержка 3 часа, охлаждение на воздухе; нагрев 380°С и выдержка 8 часов; нагрев 550°С и выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе)	500	74070 ...74220	Основной металл (ОМ)
			300	525550	Без разрушения
2	АрДЭС-1	Б (нагрев 750 °С и выдержка 1 час, охлаждение на воздухе)	500	45960 ...67000	ОМ
			300	510840	Без разрушения
3	АрДЭС-2	Б (нагрев 750 °С и выдержка 1 час, охлаждение на воздухе)	500	49080	Металл шва
				91290	ОМ
			300	466930	Без разрушения
				503790	Металл шва

После термообработки по режиму А микроструктура основного материала двухфазная ($\alpha + \beta$) с характерными пластинчатыми выделениями α -фазы (рис. 11, а); по режиму Б – выделения α -фазы пластинчатые и глобулярные (рис. 11, б).



а – режим А; б – режим Б

Рис. 11. Микроструктура основного металла сварных образцов титанового сплава Т110, подвергнутых различной термообработке после сварки

Макро- (рис. 12, а – в) и микроструктура (рис. 12, г, д) металла сварного шва зависит от вида сварки. После ЭЛС зерна имеют ровные границы толщиной 2...2,5 мкм, выделений зернограницных хрупких фаз не наблюдали (рис. 12). После АрДЭС-1 и АрДЭС-2 вдоль зерен толщиной 0,5...1 мкм выявлены ориентированные выделения α -фазы, количество которых больше после АрДЭС-2, чем после АрДЭС-1 (рис. 12, д). Протяженность зоны длительного отжига составляла 7 мм после ЭЛС и 20...22 мм после АрДЭС, причем здесь размер зерна в первом случае в 5 – 10 раз меньше, чем во втором.

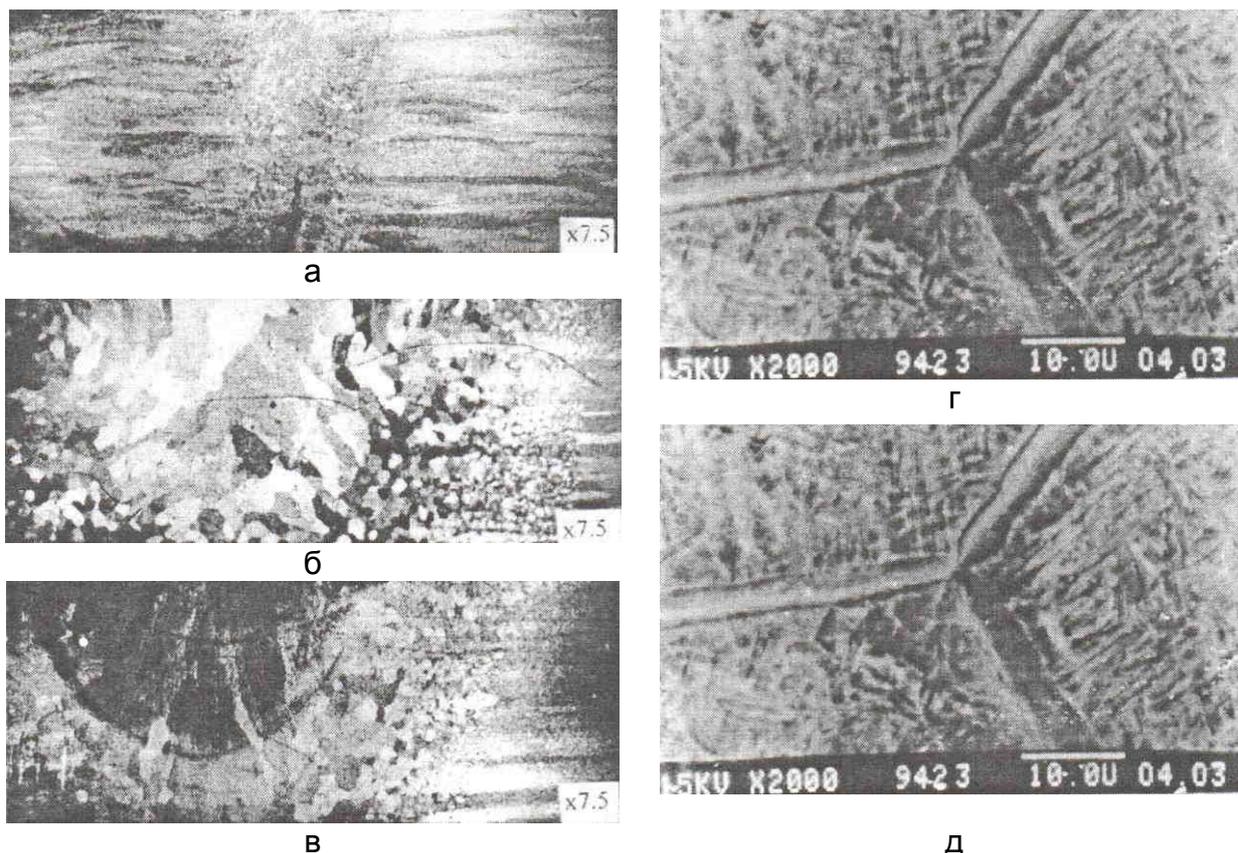


Рис. 12. Макро- и микроструктура (г, д) металла шва сварных образцов титанового сплава Т110, выполненных разными видами сварки: ЭЛС (а, г); АрДЭС-1 (б, д); АрДЭС-2 (в)

Усталостные испытания показали (табл. 4), что в большинстве случаев металл шва и зона длительного отжига обладают большим сопротивлением разрушению, чем основной металл, а наиболее долговечны сварные соединения, полученные методом ЭЛС.

Выводы

1. Углубленный анализ и обобщение результатов предшествующих исследований вскрыли основные виды и причины исчерпания несущей способности в эксплуатации деталей и узлов из титановых сплавов отечественных самолетов транспортной категории.

2. Показано, что из всех факторов, являющихся причинами разрушения деталей самолета из титановых сплавов, основным является усталость.

Приведены типовые микрофрактологические картины усталостных разрушений конструктивных элементов из титановых сплавов, позволяющие проанализировать характерные виды и стадии их разрушения в зависимости от места расположения конструктивного элемента в агрегате воздушного судна.

Список литературы

1. Авиационные материалы: справ. – Т. 5 [Текст]. – М.: ВИАМ, 1973. – 583 с.
2. Глазунов, С. Г. Конструкционные титановые сплавы [Текст] / С. Г. Глазунов, В. И. Моисеев. – М.: Металлургиздат, 1974. – 368 с.

3. Металлография титановых сплавов [Текст] / под ред. С. Г. Глазунова, Б. А. Колачева. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
4. Ильин, А. А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах [Текст] / А. А. Ильин. – М.: Наука, 1994. – 304 с.
5. Тур, А. А. Металлургия титана [Текст] / А. А. Тур. – К.: Металагротрейд, 2003. – 200 с.
6. Оцінка експлуатаційної придатності виробів з титанових сплавів різних структурних класів з газонасиченими шарами [Текст] / В. М. Федірко, А. Т. Пічугін, О. Г. Лук'яненко, З. О. Сірик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1996. – 32, №6. – С. 49 – 54.
7. Солонина, О. П. Повышение усталостной прочности деталей из титановых сплавов [Текст] / О. П. Солонина, О. А. Никишов // Структура и свойства титановых сплавов. – М.: ВИАМ, 1972. – С. 38 – 42.
8. Повторно-статическая выносливость листового сплава ОТ4 с неполностью удаленным поверхностным газонасыщенным слоем [Текст] / А. Б. Коломенский, Б. А. Колачев, А. Н. Рощупкин, А. В. Дегтярев // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1989. – №5. – С. 112 – 114.
9. Федірко, В. М. Підвищення зносостійкості титанових сплавів хіміко-термічною обробкою в азотовмісних середовищах [Текст] / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1994. – №1. – С. 69 – 74.
10. Бычков, А. С. О взаимосвязи юридически-правовой поддержки жизненного цикла воздушных судов и проблемы обеспечения безопасности их конструкций [Текст] / А. С. Бычков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (84). – Х., 2015. – С. 79 – 85.
11. Гришин, В. И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов [Текст] / В. И. Гришин, А. С. Дзюба, Ю. И. Дударьков. – М.: Физматлит, 2013. – 272 с.
12. Буланов, И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник [Текст] / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 516 с.
13. Бычков, А. С. Основные причины разрушения конструктивных элементов воздушных судов транспортной категории из алюминиевых сплавов [Текст] / А. С. Бычков, И. Р. Игнатович, А. Г. Моляр // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 70. – Х.: 2015. – С. 136 – 151.
14. Бычков, А. С. Основные виды и причины разрушения стальных деталей агрегатов отечественных воздушных судов транспортной категории [Текст] / А. С. Бычков, А. Г. Моляр // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (85). – Х.: 2016.
15. Конструкционные материалы в самолетостроении [Текст] / А. Г. Моляр, А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко. – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.
16. Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст]: довідн. посібник / за заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Осташ, В. М. Федірко, В. М. Учанін, С. А. Бичков та ін.; за ред. О. П. Осташко, В. М. Федірка. – Л.: Вид-во «Сколор», 2007. – 1068 с.
17. Титановые сплавы в самолетах АНТК Антонова [Текст] / В. А. Трофимов, С. Л. Антонюк, О. М. Ивасишин, А. Г. Моляр // Ti-2005 в СНГ: сб. тр. междунар.

конф. (22 – 25 мая 2005 г., Киев). – К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2005. – С. 298 – 305.

18. Полуфабрикаты из титановых сплавов [Текст] / Г. Д. Агарков, И. Н. Каганович, И. С. Польшин и др. – М.: Metallurgy, 1979. – 511 с.

19. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины [Текст] / С. Л. Антонюк, А. Г. Моляр, В. Н. Замков, А. Н. Калынюк // Проблемы специальной электрометаллургии, 2003. – №1. – С. 10 – 14.

20. Втомна міцність експериментального титанового сплаву Т110 [Текст] / С. Л. Антонюк, В. М. Король, О. Г. Моляр та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – №2. – С. 99 – 101.

Поступила в редакцію 15.03.2016.

Експлуатаційна несуча здатність деталей конструкцій вітчизняних повітряних суден транспортної категорії з титанових сплавів

Проведено поглиблений аналіз вичерпання експлуатаційної несучої здатності деталей і вузлів конструкцій вітчизняних повітряних суден транспортної категорії з титанових сплавів. В основі аналізу лежить численний статистичний матеріал, що охоплює багаторічний досвід експлуатації літаків ДП «Антонов». Показано, що основним видом вичерпання несучої здатності деталей з титанових сплавів є втомене руйнування. Наведено його типові мікрофрактограми, що дозволяють проаналізувати види і стадії втомного руйнування залежно від місця розташування деталі в агрегаті повітряного судна.

Ключові слова: деталі та вузли агрегатів вітчизняних повітряних суден, титанові сплави, втомене руйнування, фрактологічний аналіз.

Operational Bearing Capacity of Domestic Transport Aircraft Parts Made of Titanium Alloys

In-depth analysis of the operational bearing capacity exhaustion of domestic transport aircraft structure parts and components made of titanium alloys is carried out. Extensive statistical data covering many years of ANTONOV Company aircraft operation experience lies in the basis of analysis carried. It is shown that the main type of titanium part bearing capacity exhaustion is fatigue destruction. Its typical microfractograms are adduced that allows to analyze fatigue destruction types and stages depending on part location in aircraft unit.

Keywords: domestic aircraft parts and units, titanium alloy, fatigue destruction, fractology analysis.