

## ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ И АГРЕГАТОВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ТРАНСПОРТНОЙ КАТЕГОРИИ

### Введение

Анализ взаимосвязи юридически-правовой поддержки жизненного цикла воздушных судов транспортной категории и проблемы обеспечения безопасности их конструкций в эксплуатации [1] показал необходимость на первом этапе решения этой проблемы провести углубленное исследование видов и причин разрушения конструктивных элементов агрегатов из основных классов применяемых авиационных материалов.

В [2] такой анализ проведен для конструкций из алюминиевых сплавов. Ниже аналогичный анализ на основе обобщений предшествующих исследований [3 – 11] проводится для стальных деталей<sup>\*)</sup>.

В конструкциях современных самолетов объем использования сталей постоянно уменьшается (см. [1]), что имеет объективные причины:

– во-первых, для того чтобы сталь конкурировала по удельной прочности с современными алюминиевыми и титановыми сплавами, в которых удельная прочность составляет соответственно 20 и 27, предел прочности стали должен составлять  $\sigma_{\sigma} = 2000$  МПа. Стали с такой прочностью существуют, но их использование ограничено из-за чувствительности к концентраторам напряжений;

– во-вторых, она имеет низкую коррозионную стойкость, в частности низкие пороговые напряжения, что особенно важно для самолетов с длительным ресурсом эксплуатации [9].

Несмотря на указанные недостатки, стальные детали занимают около 10% от массы каркаса самолета. Основными преимуществами, на которых базируется их использование, являются высокий модуль упругости, сравнительно низкая цена, традиции в применении аналогичных конструкций и проверенная эксплуатацией надежность [12 – 16].

Стали в конструкциях отечественных самолетов (рис. 1) в зависимости от класса можно условно разделить:

– на малоуглеродистые нелегированные, применяемые для мало нагруженных деталей, в частности холодновысадных болтов, и для деталей, технология изготовления которых требует значительной пластической деформации;

– самые распространенные конструкционные мало- и среднелегированные средней прочности. Из них изготавливают различные силовые

---

<sup>\*)</sup> Наиболее полно в настоящей публикации использованы материалы, изложенные нами в одноименном подразделе раздела 7 нашей коллективной монографии [3].

детали, упроченные термообработкой на  $\sigma_{\sigma} = 900 \dots 1400$  МПа, в частности сварные и подлежащие химико-термической обработке (азотированию, цементации);

– высокопрочные конструкционные, которые могут упрочняться термообработкой на  $\sigma_{\sigma} = 1400$  МПа и используются для изготовления высоконагруженных ответственных деталей самолета. Их разделяют на высокопрочные среднелегированные и мартенситностареющие;

– нержавеющие и жаропрочные, используемые для изготовления коррозионноустойчивых деталей.

Применение сталей каждого класса связано с их физико-химико-механическими свойствами, технологичностью с учетом условий эксплуатации: нагрузка, контакт с другими материалами, среда, наличие или отсутствие трения и т. д. [9].

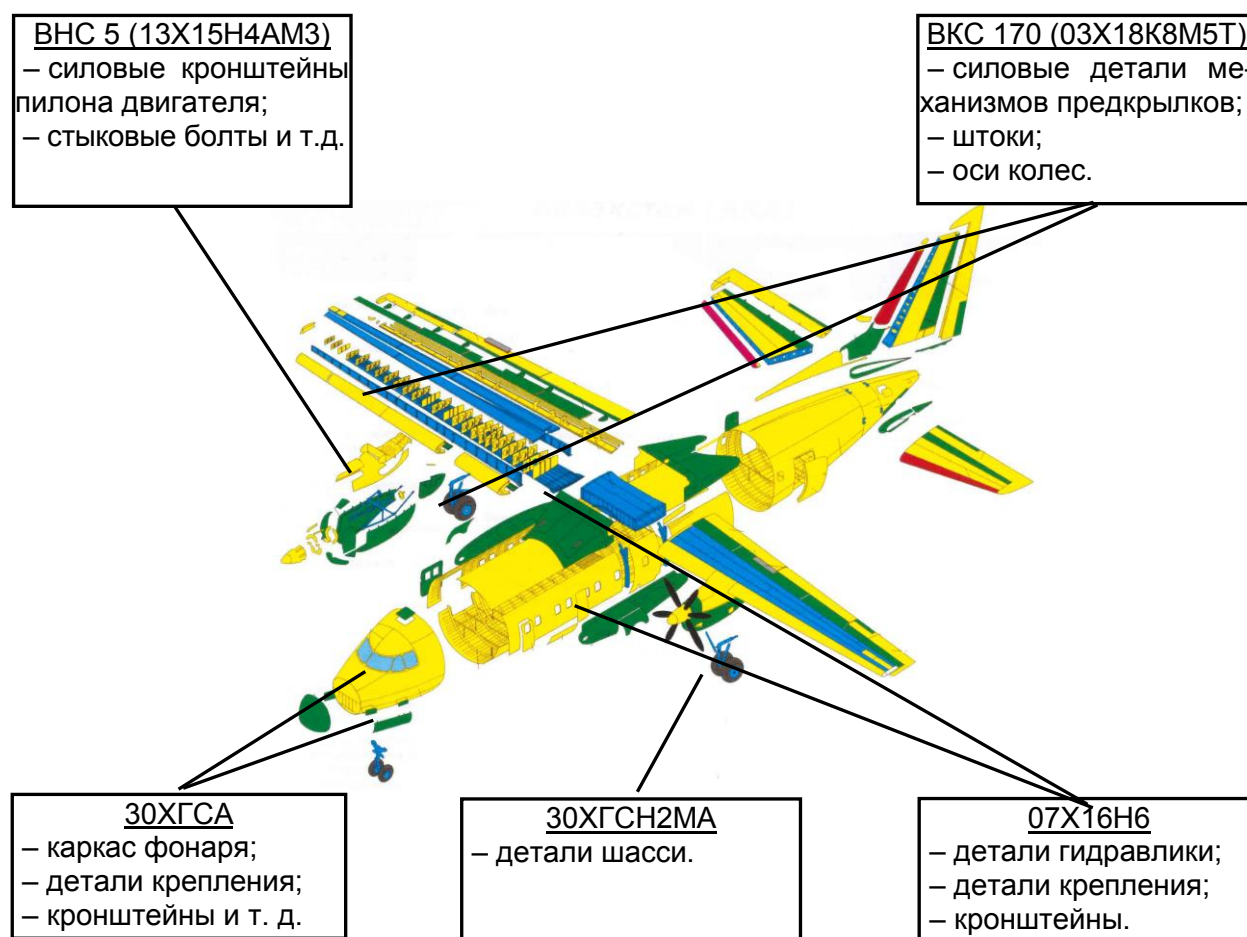


Рисунок 1 – Использование сталей в конструкции самолетов Ан

Эксплуатационные разрушения стальных деталей самолета, как было показано ранее в [1], можно разделить на три категории: коррозионные повреждения, усталость и износ. Рассмотрим некоторые характерные примеры разрушений стальных деталей, вызванных указанными факторами или их комплексным действием, что в реальных условиях имеет место более часто.

## Коррозия

Коррозионные повреждения стальных деталей, как и алюминиевых, являются одним из основных факторов эксплуатационных разрушений. В эксплуатации стальные детали повреждаются следующими типами коррозии [2]: равномерная (общая); контактная; питтинговая (точечная); межкристаллитная; коррозионное растрескивание под напряжением; коррозионная усталость; фреттинг (фреттинг-коррозия, фреттинг-износ и фреттинг-усталость).

Наименее опасной с точки зрения влияния на ресурсные характеристики и возможности диагностики является равномерная коррозия, которую легко обнаружить при периодических осмотрах по наличию продуктов коррозии. Она просто удаляется, и деталь продолжает эксплуатироваться после восстановления системы защитных покрытий [3].

Питтинговую коррозию в труднодоступных зонах обнаружить сложнее, чем равномерную. Она в большей степени влияет на характеристики ресурса, поскольку коррозионная каверна часто становится очагом зарождения усталостной трещины. Поэтому питтинговая коррозия считается более опасной по сравнению с равномерной.

Наиболее опасными типами коррозионного повреждения стальных деталей являются межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание под напряжением, которые визуальными или инструментальными методами обнаруживаются только после разрушения деталей, в лучшем случае – после образования трещин. То же самое можно сказать и о коррозионной усталости, которая существенно ухудшает усталостные характеристики стальных деталей [4 – 5]. Понятие фреттинга, которое относится к разрушению при незначительных взаимных перемещениях металлических деталей, более логично рассматривать как вариант износа, что будет сделано далее.

Особым элементом планера самолета, имеющим специфические особенности в коррозионном отношении, являются шасси [6 – 7]. Исходя из действующих напряжений и необходимости минимизировать размеры конструкции для обеспечения уборки шасси в нишу фюзеляжа во время полета, его традиционно изготавливают из высокопрочной стали 30ХГСН2МА-ВД (в конструкциях зарубежных самолетов применяют сталь М300). Эти стали имеют довольно высокие показатели удельной прочности, однако характеризуются низкой коррозионной стойкостью и склонностью к коррозии под напряжением.

Известно несколько случаев разрушения деталей шасси по механизму замедленного хрупкого межзеренного коррозионного разрушения, вызванного низким уровнем критического напряжения коррозионного растрескивания. Иногда, в зависимости от условий эксплуатации, разрушение стальных деталей происходит с многократной сменой механизма разрушения – начало трещины имеет коррозионный межзеренный

характер, дальнейший ее прирост происходит по усталостному механизму с переходом вновь на коррозионный и заканчивается вязким статическим доломом.

### **Разрушение оси из стали 30ХГСН2МА-ВД**

Одной из наиболее нагруженных деталей шасси является ось колеса. Она представляет собой разнотолщинную трубу, которая по центру запрессовывается в рычаг стойки шасси, а на два симметричных конца монтируются последовательно распорная втулка, корпус тормоза по шлицевой части и по цилиндрической части на подшипниках колеса. Ось изготавливают из высокопрочной стали 30ХГСН2МА-ВД, ее расчетная долговечность составляет 6000 взлетов-посадок и 12 лет эксплуатации.

На лидерном самолете Ан-124 «Руслан» в 1999 году при 2040 посадке произошло разрушение оси колес в зоне шлицов крепления тормоза внутреннего колеса (рис. 2).

Макрофрактографические исследования излома показали, что начало разрушения находилось в нижней части оси. Были выделены три зоны (рис. 3):

- зона 1 начального разрушения с малой шероховатостью и более темным по сравнению с другими зонами цветом;
- зона 2, в которой шероховатость излома возрастала с увеличением длины трещины;
- зона 3 с рельефом, характерным для статического излома высокопрочных сталей.

Макропризнаков усталости в изломе оси колес не обнаружено.



Рисунок 2 – Разрушение оси колес на самолете Ан-124 «Руслан»

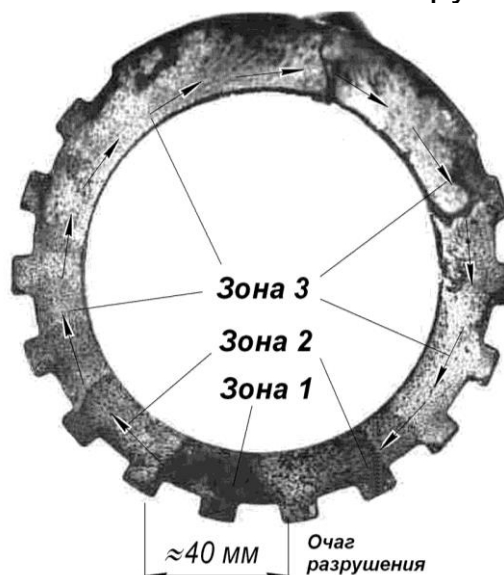


Рисунок 3 – Зоны 1 – 3 в изломе оси колес основной опоры шасси, разрушенной на самолете Ан-124 «Руслан» (стрелками показано направление развития трещины)

При микрофрактографических исследованиях излома в зоне 1 обнаружены фасетки зерен, покрытые продуктами коррозии, что свидетельствует о хрупком разрушении по границам бывших аустенитных зерен (рис. 4, а). В зоне 2 сохраняется межзеренный характер разрушения, но появляются фрагменты вязкого ямочного микрорельефа (рис. 3, б), что свидетельствует об увеличении скорости роста трещины. Относительная площадь ямочного рельефа увеличивается до конца зоны (рис. 5, а). Зона 3 характеризуется вязким ямочным трансзеренным рельефом статического долома (рис. 5, б). Микропризнаков усталости в зоне не обнаружено.

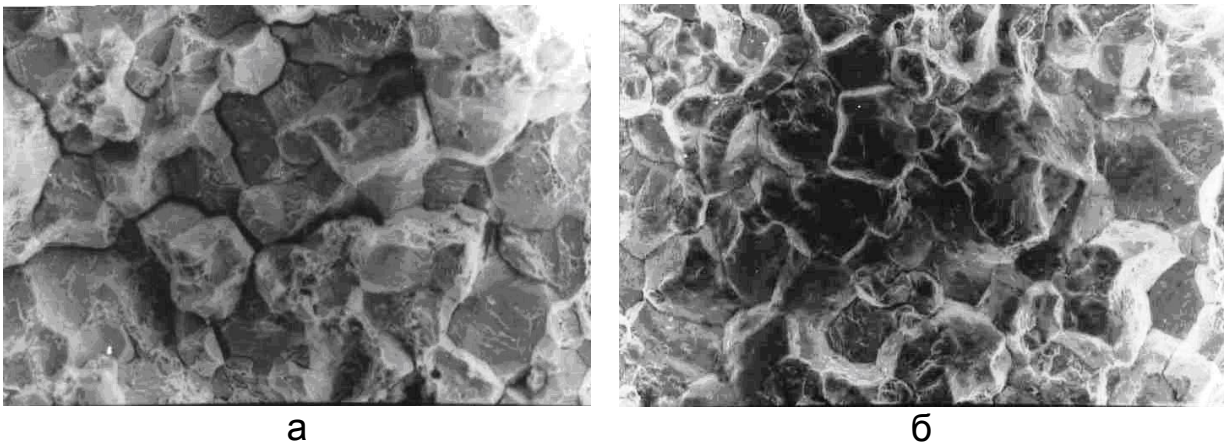


Рисунок 4 – Характер разрушения оси в зоне зарождения трещины 1 (а) и зоне 2 (б), х 1000

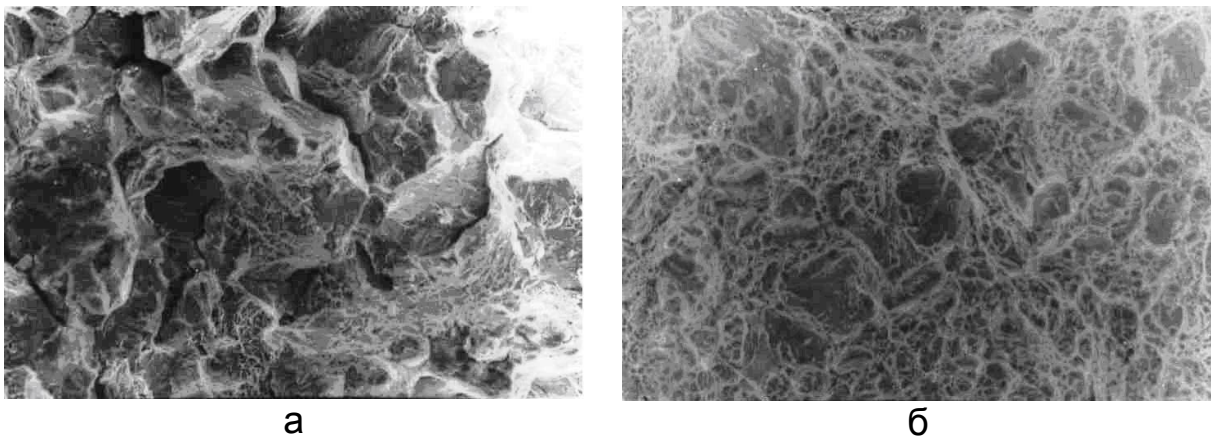


Рисунок 5 – Микрорельеф разрушения на границе зон 2 и 3 (а), в зоне 3 (б), х 1000

В связи с существенным отличием в долговечности и характере разрушения осей при испытаниях и в эксплуатации был проведен анализ факторов, которые повлияли на эксплуатационную надежность конструкции.

При ресурсных стендовых испытаниях разрушение оси колес произошло при наработке, значительно большей назначенного ресурса, по усталостному механизму и в месте запрессовки оси в рычаг, то есть не там, где в эксплуатации.

Анализ действующих напряжений показал, что циклические напряжения в зоне поломки на стенде на 17,5 МПа больше, чем в зоне эксплуатационного разрушения. Постоянно действующие напряжения (во время стоянки) в обоих сечениях равны и составляют  $\sigma_{cm} = 250$  МПа.

Анализ конструкции стойки шасси показал, что в зоне эксплуатационного разрушения на ось действуют дополнительные три фактора, которые могут негативно влиять на долговечность детали, накладываясь на эксплуатационные нагрузки:

1. В зоне разрушения в непосредственном контакте при наличии коррозионной среды находятся три разнородных незащищенных материала:

- сталь 30ХГСН2МА-ВД (ось колес);
- алюминиевый сплав Д16 с поврежденным анодным покрытием (распорная втулка);
- титановый сплав ВТ9 (корпус тормоза).

2. Распорная втулка, изготовленная из алюминиевого сплава Д16, имеет внутренние бортики и не имеет дренажных отверстий в нижней зоне, что дает возможность скапливаться конденсату как раз в очаге эксплуатационного разрушения.

3. На распорной втулке, которая служит для ограничения перемещения корпуса тормоза к рычагу и не воспринимает рабочих нагрузок, в зоне разрушения обнаружено повреждение анодного слоя, в то время как по всей остальной поверхности он хорошо сохранился.

Учитывая хрупкий межзеренный характер эксплуатационного разрушения, присущий для коррозии под напряжением, было предложено считать ее первопричиной преждевременного выхода из строя оси колес. Данное предположение подтверждалось также наличием коррозионных язвин на оси колес в зоне шлицевой части, в том числе и возле очага разрушения. Однако обязательным условием для коррозионного растрескивания является превышение критических напряжений, которые для стали 30ХГСН2МА-ВД составляют  $\sigma_{кр} = 650 \dots 750$  МПа, а действующие напряжения, как было сказано ранее, составляют только 250 МПа. Таким образом, действием только коррозионного фактора разрушение объяснить нельзя.

С другой стороны, наличие контакта алюминиевого сплава со сталью и износ анодного слоя при отсутствии перемещения деталей, образование язвин на стальной оси свидетельствуют о наличии фреттинга в зоне разрушения. Известно, что при фреттинг-контакте алюминия со сталью разрушается именно стальная деталь.

Исходя из условий циклического нагружения оси колес, следует ожидать усталостное разрушение под действием коррозионной среды. Однако в изломе виден только межзеренный характер разрушения без каких-либо микро- и макропризнаков усталости.

Единственно возможным объяснением эксплуатационного разрушения может быть одновременное совместное действие трех факторов – фреттинг-износа, коррозии под напряжением и знакопеременных нагрузок.

Учитывая конструктивные особенности стойки шасси, действующие нагрузки и результаты выполненных исследований, была предложена модель кинетики разрушения оси колес самолета Ан-124 «Руслан». Под действием вибрации между алюминиевой распорной втулкой и стальной осью (при отсутствии смазки) в максимально удаленной от запрессовки оси в рычаг зоне, которая характеризуется максимальной амплитудой вибрационных колебаний, произошло разрушение (по механизму фреттинг-износа) анодного слоя на втулке и образование язвин на стальной оси. Снятие анодной пленки на втулке привело к образованию электрохимической пары алюминий-сталь в нижней зоне оси, где скапливался конденсат. Электрохимический эффект может усиливаться контактом оси с титановым корпусом тормоза. Образование и начальный рост трещины проходили по границам бывшего аустенитного зерна, как по наименее прочному участку уже поврежденной язвинами поверхности стальной оси. Наиболее вероятным механизмом образования и начального роста трещины была усталость, усиленная коррозионной средой и фреттингом, поскольку очаг разрушения находился в зоне растягивающих напряжений, вызванных внешними нагрузками на ось, которая совпадает с местом скопления конденсата и максимальной амплитуды вибрационных перемещений. Действующие знакопеременные нагрузки в этой зоне (с учетом усиливающих факторов) больше постоянно действующих и выше предела выносливости.

Дальнейшее развитие трещины вплоть до вязкого долома происходило по механизму коррозионного растрескивания под действием постоянных (стояночных) нагрузок на ось, которые увеличивались по мере роста трещины. Наличие в зоне первичной трещины коррозионно-активной среды, электрохимической пары и фреттинга способствовало образованию в вершине трещины дополнительных напряжений, которые в сумме с внешними стояночными превысили критическое для коррозии под напряжением. Коррозионное повреждение поверхности излома уничтожило признаки усталостного роста начальной трещины. Действующие на ось циклические напряжения при развитии коррозионных процессов не были определяющими, подтверждением чему является факт завершающего разрушения оси во время стоянки самолета на аэродроме, а не при посадке или маневрировании. Предлагаемый механизм позволяет объяснить незначительную наработку детали по циклическим нагрузкам и межзеренный характер трещины.

С учетом предложенного механизма разрушения для исключения подобных аварий в эксплуатации по всему парку самолетов Ан-124 «Руслан» были выполнены следующие мероприятия:

- для исключения фреттинга и контактной коррозии в распорную алюминиевую втулку была запрессована стальная вставка;
- для исключения скопления влаги в распорной втулке выполнен дренаж, установку ее на ось выполняют на консистентной смазке АМС-3;
- установку корпуса тормоза выполняют на консистентной смазке АМС-3;
- убраны следы коррозии на всех осях.

После выполнения указанных мероприятий с 1999 года разрушений осей колес на самолетах Ан-124 «Руслан» не было, хотя назначенный ресурс их давно превышен.

### **Разрушение шар-баллонов из стали 07Х16Н6**

На фирме «АНТОНОВ» были разработаны кислородные баллоны УБШ 25/150 сферической формы из стали 07Х16Н6, которые показали свою надежность и весовую эффективность, и поэтому были приняты для оснащения самолетов и вертолетов других фирм. Баллоны были рассчитаны на рабочее давление 150 атм и имели объем 25 л, при этом расчетное давление разрушения составляло 650 атм.

В 1987 году на самолете Ил-76 произошел взрыв баллона. Поскольку разрушение было на самолете Ил-76, то сначала специалистов фирмы «АНТОНОВ» для исследований не пригласили. Предварительно отраслевой институт указал в качестве причины разрушения недостаточный контроль на отсутствие трещин в конструкторской документации. Проведенные специалистами фирмы «АНТОНОВ» более детальные исследования показали, что характер разрушения, в частности зарождение и начальное развитие трещины в зоне сварного соединения горловины со сферой (рис. 6), был хрупким (рис. 7) и не характерным для вязкой пластичной коррозионностойкой стали 07Х16Н6. Поэтому не была принята версия о предполагаемой при изготовлении (сварке) начальной трещины, которая стала причиной разрушения.

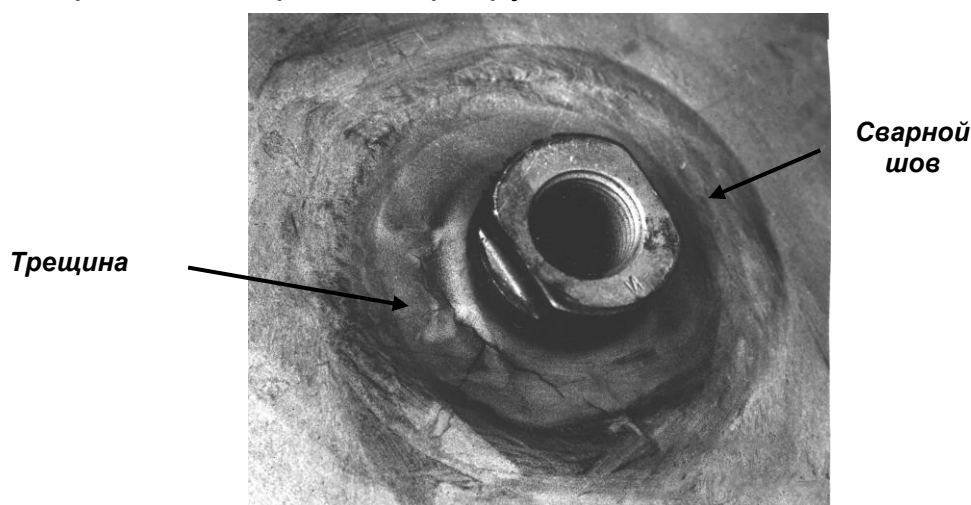


Рисунок 6 – Внешний вид горловины с трещиной в зоне сварного соединения



Дополнительно в зоне зарождения трещины при металлографическом анализе в материале баллона была обнаружена карбидная сетка (рис. 8), которая по требованиям нормативных отраслевых документов на стали 07X16H6 не допускается.

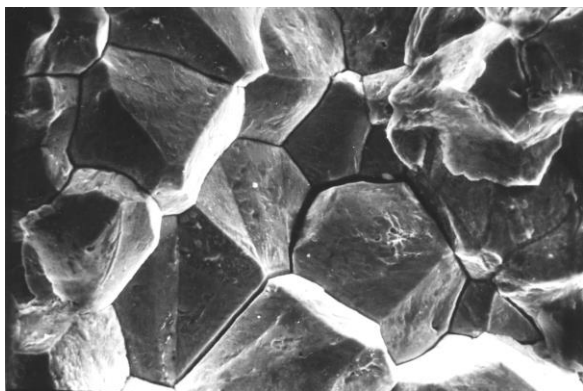


Рисунок 7 – Фрактограмма излома, х 720



Рисунок 8 – Карбидная сетка в микроструктуре полусферы (травление электролитическое в 10%-ном растворе щавелевой кислоты), х 500

В других зонах баллона карбидная сетка отсутствовала. Исследователи также обратили внимание на наличие подварки сварного шва в зоне зарождения трещины, которая в принципе допускается нормативными документами. Проведенные модельные испытания доказали, что после подварки на заводе-изготовителе не была проведена повторная термическая обработка, которая растворяет карбидную сетку, образующуюся при сварке в зоне термического влияния. Карбидная сетка, в свою очередь, вызывает склонность материала к хрупкому замедленному коррозионному разрушению под постоянно действующим напряжением, которое меньше предела текучести для стали 07X16H6.

За период, пока продолжались исследования, были разрушены еще два баллона, что свидетельствовало о явном нарушении технологии изготовления – подварку дефектов сварных швов выполняли без повторной термической обработки. Поскольку баллоны УБШ 25/150 применялись довольно широко, то на стали 07X16H6 были выполнены дополнительные исследования, которые показали, что не всегда выполнение закалки баллонов на воду позволяет растворить карбидную сетку по границам бывших аустенитных зерен. Для устранения такого явления сталь 07X15H6 была дополнительно легирована молибденом (Mo), а для повышения скорости охлаждения закалку проводят в 10%-ном щелочном растворе.

### ***Разрушение ниппелей из стали ЭИ961 с карбонитрацией***

Отраслевыми стандартами ОСТ1 14520-88 – ОСТ1 14522-88 предусмотрено изготовление ниппелей герметизации трубопроводов

высокого давления гидравлической системы самолета из коррозионно-стойкой стали ЭИ961 (13X11H2B2MФ). Для предотвращения фреттинга ниппели подвергали жидкостной карбонитрации в расплаве меламин. В процессе проведения отработки гидравлической системы самолета Ан-124 «Руслан» были обнаружены сколы карбонитрированного слоя на рабочей сферической поверхности ниппеля. При исследованиях было установлено, что сколы появляются при монтаже соединений в случае превышения микротвердости карбонитрированного слоя более 10000 МПа, хотя отраслевой документацией регламентировалась только нижняя граница микротвердости (7500 МПа). Для обеспечения микротвердости карбонитрированного слоя была отработана технология смягчающего вакуумного отжига. Хрупкость исчезла, однако с карбонитрацией обнаружилась новая проблема – даже в условиях климата Ташкента через несколько месяцев на ниппелях обнаружилась равномерная коррозия. При карбонитрации происходило связывание хрома в карбиды, что переводило коррозионно-стойкую сталь в разряд некоррозионно-стойких. За этим фактом последовало кардинальное решение – заменить карбонитрацию на технологию ионно-плазменного напыления многослойным покрытием Ti-Ti<sub>2</sub>N-TiN, которое применяется и сегодня, причем не только в самолетах «Ан».

### **Усталость**

Современное состояние науки о прочности и долговечности материалов позволяет прогнозировать поведение стальных деталей при действии на них знакопеременных циклических нагрузок, поэтому усталостных разрушений конкретных конструкций самолета без действия дополнительных факторов практически не бывает. При исследовании усталостных разрушений всегда выявляются дополнительные факторы, которые вызывают разрушения до назначенного ресурса [4 – 5].

### ***Разрушение траверсы из стали 30ХГСНА***

Усталостное разрушение траверсы из стали 30ХГСНА амортизационной стойки произошло при наработке 21506 посадок (назначенный ресурс – 35000 посадок). Зарождение трещины происходило во многих очагах на внешней поверхности трубы. Металлографические исследования показали наличие обезуглероженного слоя, который образовался при термической обработке и не был удален последующей механической обработкой. Наличие такого слоя спровоцировало образование на поверхности сетки микротрещин, которые и стали очагами усталостной трещины, а также преждевременного разрушения траверсы.

Для предупреждения подобных разрушений было предложено провести удаление обезуглероженного слоя на всех траверсах, которые находились в эксплуатации, и выполнить местное поверхностное упрочнение в зоне возможного разрушения. После проведения указанных мероприятий разрушений траверс не было.

### **Разрушение вала из стали 95X18**

В механизме управления предкрылком самолета Ан-124 «Руслан» конструкторской документацией предусмотрен игольчатый подшипник, внутренняя обойма которого изготовлена из стали 95X18 в виде оси-болта (рис. 9), что позволяет упростить и облегчить конструкцию подшипника. В процессе эксплуатации самолета было обнаружено разрушение указанного вала по усталостному механизму на первом витке резьбы, то есть классически, и разрушение было квалифицировано как ошибка конструктора. Более детальные исследования разрушенных деталей выявили в зоне зарождения трещин недопустимые растравы в виде сетки микротрещин на поверхности резьбы (рис. 10). При этом в очаге зарождения трещины были обнаружены фрагменты хрупкого межзеренного разрушения с дальнейшим развитием по усталостному механизму. Такой дефект резьбы был связан с высокой твердостью детали и нарезкой резьбы до термической обработки. Другие поверхности вала шлифовали после термической обработки, а резьбу травили. Для предотвращения термических растравов были выполнены работы по защите резьбы во время термической обработки, которые не позволяли полностью исключить повреждение поверхности из-за высокой температуры закалки. На Ташкентском авиационном заводе было принято волевое кардинально решение – нарезку резьбы выполнять точением алмазным инструментом, который для этого был закуплен в Институте сверхтвердых материалов (Киев). После этого усталостных разрушений указанных деталей больше не было.



Рисунок 9 – Общий вид оси-болта из стали 95X18

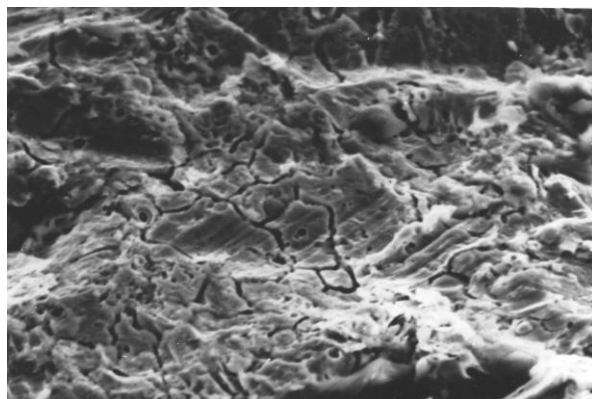


Рисунок 10 – Микротрещины на поверхности резьбы оси-болта из стали 95X18, x 3200

### **Износ**

В узлах трения, которые есть обязательно в любом механизме, применяют материалы триботехнического назначения, при этом (как правило) одна из деталей трибопары – стальная. Поэтому вопросы износа для стальных деталей механизмов самолета являются актуальными [8].

При трении одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные и химические процессы. Трение может упрочнять или смягчать металл, увеличить или уменьшить содержание в нем углерода и водорода, превратить золото и платину в их оксиды, отполировать металлы и сварить их. Трение является процессом, при котором в определенной последовательности и довольно «разумно» проходят явления, направленные на разрушение поверхности или, наоборот, создание целой серии систем, которые уменьшают износ (в частности, эффект безизностного трения).

Сегодня с трением связана одна из наиболее острых проблем современности – износ машин и механизмов. Исследования показывают, что потери от трения в развитых странах составляют около 5 % национального продукта. Значительная часть мировых энергетических ресурсов тратится на трение, 80...90 % подвижных сопряжений выходят из строя вследствие износа. При этом резко снижается КПД, надежность, точность, экономичность и долговечность, существенно ухудшаются динамические и акустические характеристики.

Развитие техники, в частности машиностроения, придало проблеме долговечности машин и механизмов огромную значимость с точки зрения экономии материальных ресурсов и рабочей силы и задействовало в решении этих проблем широкий круг конструкторов, технологов, эксплуатационников, а также ученых различных специальностей. Это позволило на основе достижений физики, химии и материаловедения заложить основу науки о трении, износе и смазке машин. Однако состояние науки о трении сегодня таково, что не позволяет рассчитывать детали, которые изнашиваются, на долговечность и прогнозировать срок их эксплуатации. Прогнозирование срока работы пар трения выполняют по качественным зависимостям, полученным по результатам эксплуатации и экспериментальных испытаний на различных машинах трения или стендах, имитирующих работу конкретного узла или механизма. Такие исследования довольно дорогие и занимают много времени.

**Трибология** как научно-техническая дисциплина объединяет проблемы трения, износа и смазки и изучает процесс взаимодействия поверхностей во время их относительного движения [9].

Трибология различает два основных вида трения – качение и скольжение, возможно и их совмещение. Оба вида трения используются в технике, в том числе и авиационной. Различают следующие виды износа:

- окислительный (нормальный);
- адгезионный (создание и разрушение мостиков сварки);
- абразивный;
- эрозионный;
- фреттинг-износ.

Особенно опасным для узлов авиационной техники является фреттинг, поскольку результаты износа не всегда очевидны при осмотре, что приводит к эксплуатационным разрушениям.

### **Разрушение винтов из стали 38ХМЮА**

При проведении в Ульяновске регламентных осмотров самолетов Ан-124 «Руслан» на винтах подъемников закрылков были обнаружены питтинговые повреждения на дорожке, по которой движется шарик подшипника (рис. 11 – 12).

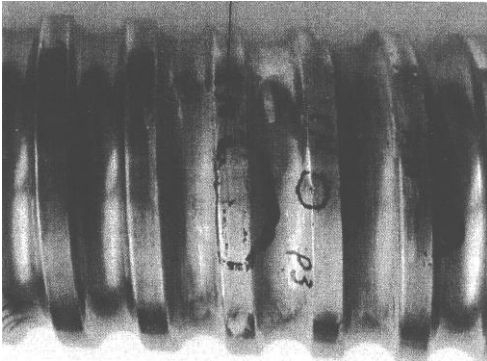


Рисунок 11 – Общий вид фрагмента винта подъемника закрылка

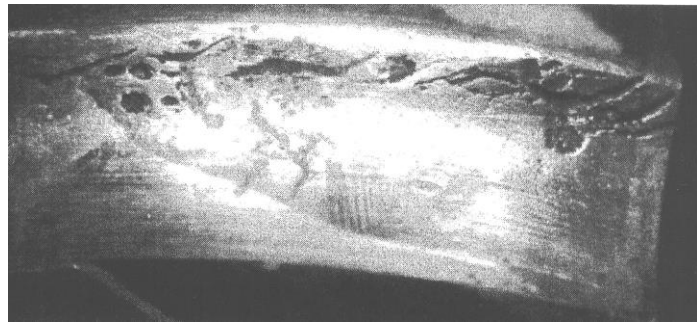


Рисунок 12 – Видимые микротрещины со следами зачистки вдоль фаски гребня резьбы, обнаруженные в эксплуатации

Эти повреждения сначала квалифицировали как питтинговую коррозию. Более внимательное изучение повреждений выявило некоторые противоречия предварительному предположению:

- коррозионные повреждения не были обнаружены в «мертвой» зоне винта, куда гайки со сферами не доходят, а значит, условия для развития коррозии намного вероятнее, поскольку не удаляются продукты коррозии;

- коррозионные повреждения были не по всей длине винта, а в определенной зоне, которая совпадала (как потом обнаружилось) с размещением гайки на винте при стояночном положении закрылков;

- коррозионные повреждения отсутствовали на самолетах, которые эксплуатировались в Киеве (Гостомель).

Все это дало возможность переqualифицировать повреждения из коррозионных во фреттинговые. Поскольку стоял вопрос о допуске высоконагруженных и ответственных механизмов в дальнейшую эксплуатацию, то правильная квалификация повреждений имела принципиальное значение. Если это питтинговая коррозия, повреждения которой не поддаются прогнозу, то механизмы необходимо менять и из какого материала их изготавливать – неизвестно. Если это фреттинг, то необходимо регулярно смазывать пару трения согласно регламенту (что не делалось в эксплуатации), а для предотвращения возможного дальнейшего развития обнаруженных питтингов изменить положение закрылков при стоянке самолета (что было сделано).

### **Выводы**

1. На основе углубленного анализа и обобщения результатов предшествующих исследований вскрыты основные виды и причины разрушения стальных деталей узлов и агрегатов отечественных воздушных судов транспортной категории.

2. Показано, что наиболее ответственными из высоконагруженных узлов самолета, в которых эффективно используются конструкционные стали типа 30ХГСН2МА, являются узлы шасси. Эти стали наряду с высокой удельной прочностью обладают повышенной выносливостью, однако имеют невысокую коррозионную стойкость и чувствительны к конструктивно-технологическим концентраторам напряжений.

В связи с этим в последнее время во всем мире все чаще изготовление узлов шасси, способных без разрушения выдержать ресурс 40000...50000 посадок, осуществляют из высокопрочных титановых сплавов.

Для оценки вероятности возникновения коррозионных повреждений в определенных местах конструкции за период между осмотрами используют статистический метод оценки скорости их роста по данным осмотра конструкций в период эксплуатации (такой подход использован для назначения ресурсов самолетов Ан-22, Ан-24 и др.).

### **Список использованных источников**

1. 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.

2. 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.

3. Конструкционные материалы в самолетостроении [Текст] / А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко. – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.

4. Трощенко, В.Т. Соппротивление усталости металлов и сплавов. Ч. 1 [Текст] / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – К.: Наук. думка, 1987. – 602 с.

5. Трощенко, В.Т. Соппротивление усталости металлов и сплавов. Ч. 2 [Текст] / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – К.: Наук. думка, 1987. – 1303 с.

6. Трофимов, В.А. Особенности эксплуатационных разрушений деталей шасси самолета Ан-124 «Руслан» [Текст] / В.А. Трофимов, А.Г. Моляр // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2001. – № 2. – С. 170 – 174.
7. Трофимов, В.А. Некоторые причины разрушений силовых деталей шасси из высокопрочных сталей на самолетах АН [Текст] / В.А. Трофимов, А.Г. Моляр // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2002. – № 3. – С. 107 – 109.
8. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
9. Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст]: довід. 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.
10. Трибологія: підручник [Текст] / В.М. Кіндарчук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашенко, Є.В. Корбут. – К.: НАУ-друк, 2009. – 392 с.
11. Голего, Н.Л. Фреттинг-коррозія металів [Текст] / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.
12. Авиационные материалы: справ. в 2 т. Т. 1 [Текст]. – М.: ВИАМ, 1975. – 431 с.
13. Перкас, М.Д. Высокопрочные мартенситно-стареющие сплавы [Текст] / М.Д. Перкас, В.М. Кардонский. – М.: Металлургия, 1970. – 224 с.
14. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов [Текст] / Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1979. – 320 с.
15. Марочник сталей и сплавов [Текст] / Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 638 с.
16. Ульяновкин, Е.А. Коррозионностойкие стали [Текст] / Е.А. Ульяновкин. – М.: Металлургия, 1983. – 208 с.

*Поступила в редакцию 12.02.2016.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Король,*

*Государственное предприятие «Антонов», г. Киев.*