

В.М. Грень, В.І. Полуянов, Є.В. Чуловський

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

АНАЛІЗ ВИДІВ ПОШКОДЖЕНЬ ПІДШИПНИКІВ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

У статті розглянуто основні види пошкоджень підшипників авіаційних газотурбінних двигунів, що виникають у процесі експлуатації. Акцент зроблено на їх класифікації, характерних ознаках і впливі на ресурс двигунів. На основі проведеного аналізу встановлено, що найпоширенішими видами пошкоджень підшипників авіаційних газотурбінних двигунів є знос, вм'ятини, риски, поверхневі руйнування, корозія, втомлені раковини та тріщини. Їх своєчасне виявлення за допомогою сучасних методів діагностики дає змогу підвищити надійність і ресурс двигунів.

Ключові слова: підшипник, авіаційний газотурбінний двигун, знос, вм'ятини, риски, поверхневі руйнування, корозія, втомлені раковини, тріщини.

Вступ

Постановка проблеми. Одним із найактуальніших питань сьогодення є забезпечення високої технічної готовності та справності авіаційної техніки Збройних Сил України. Підтримання авіаційних газотурбінних двигунів у робочому стані є критично важливим для безпечного та ефективного виконання завдань, особливо в сучасних умовах, що характеризуються високим рівнем бойових та експлуатаційних навантажень.

У процесі експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), підшипники опор та агрегатів піддаються дії статичних і динамічних навантажень, температурних коливань, а також впливу конструктивно-виробничих дефектів. Крім того, пошкодження підшипників часто виникають унаслідок порушень технології технічного обслуговування та ремонту, що призводить до зниження ресурсу двигунів і можливих аварійних ситуацій.

Особливо вразливими елементами є підшипники агрегатів авіаційних двигунів, які виконують ключову функцію для забезпечення стабільної та довготривалої роботи вузлів і систем. Пошкодження підшипників авіаційних ГТД призводить до зростання вібрацій, перегріву, зниження ефективності та, у крайніх випадках, – до аварійних відмов. Тому своєчасна діагностика й ремонт авіаційної техніки є критично важливими завданнями ремонтних підприємств та інженерно-технічного складу авіаційних частин.

Для діагностування стану підшипників авіаційних ГТД використовують комплекс методів контролю.

Вібраційна діагностика. Реєстрація та аналіз спектра вібрацій дає змогу виявляти дисбаланс, знос тіл кочення, пошкодження доріжок кочення та сепаратора. Це один із найпоширеніших і ефективних методів контролю у процесі експлуатації [1, с. 162...170].

Акустико-емісійний контроль. Фіксує імпульсні хвилі, що виникають під час зародження й розвитку тріщин, відшарувань чи корозійних процесів, даючи змогу виявляти дефекти на ранніх стадіях.

Термографічний контроль (інфрачервона діагностика). Дає змогу виявляти перегрів підшипників через підвищене тертя або недостатнє мастило без розбирання агрегату.

Магнітопорошковий і рентгенографічний контроль. Застосовуються у процесі капітально-відновлювального ремонту для виявлення мікротріщин і прихованих дефектів.

Спектральний аналіз мастила. Дає змогу виявлення металевих частинок у мастилi, що свідчить про початкові стадії зносу підшипників, зубчастих передач та інших елементів і використовується як профілактичний метод оцінки стану двигуна.

Ультразвуковий контроль. Дає змогу діагностувати підповерхневі дефекти тіл кочення та доріжок, які не можна виявити візуально.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що на основі багаторічного досвіду експлуатації авіаційних ГТД можна виділити низку найпоширеніших видів пошкоджень підшипників [1, с. 163; 6, с. 288...292; 7]. Їх своєчасне виявлення та класифікація дають змогу не тільки планувати проведення ремонтів, а й попереджати відмови та оптимізувати міжремонтні інтервали.

До найхарактерніших пошкоджень належать: знос доріжок кочення та тіл кочення, поява вм'ятин і рисок, унаслідок дії абразивних частинок, поверхневі руйнування від перевантажень, корозійні ураження, втомні раковини та тріщини. Кожен із цих дефектів має власні діагностичні ознаки й потребує різних методів виявлення та усунення. Саме тому систематизація пошкоджень створює підґрунтя для розробки ефективних заходів з підвищення надійності роботи підшипників авіаційних двигунів.

У роботах [6, с. 28; 7] зазначається, що критичним фактором у виникненні більшості пошкоджень є порушення умов змащення.

Так, вищезазначені роботи [1, 6, 7] висвітлюють лише деякі найпоширеніші види пошкоджень підшипників, не представляючи їх у систематизованому та комплексному вигляді. Тому **метою статті** є представити та систематизувати можливі види пошкоджень підшипників авіаційних ГТД у процесі експлуатації, зокрема підшипників агрегатів паливної системи, коробки літакових агрегатів та опор двигуна.

Виклад основного матеріалу

Виробництво підшипників кочення здійснюється за умов суворого дотримання технологічних процесів і жорстких вимог до якості продукції. Підшипники належать до одного з найточніших і найвідповідальніших елементів машинобудівних виробів. За ідеальних робочих умов вони здатні безперервно функціонувати протягом багатьох років, забезпечуючи надійну та стабільну роботу механізмів.

Проте, в реальних умовах експлуатації підшипники рідко працюють за оптимальних параметрів, і тому їх фактичний ресурс значно менший від потенційного. Термін служби підшипників кочення визначається комплексом факторів: якістю виробництва, умовами зберігання, правильністю обслуговування, точністю встановлення, характером навантажень і режимами експлуатації.

З метою підвищення надійності роботи підшипників важливо знати типові види пошкоджень, які можуть виникати в процесі експлуатації. До основних видів пошкоджень належать [5...7] такі.

Знос. У звичайних умовах експлуатації помітного зносу підшипника не спостерігається, знос спостерігається коли в підшипник потрапляють сторонні частинки або в ньому недостатньо мастила.

Знос під дією абразивних частинок. Мас вигляд малих вм'ятин на доріжках кочення кілець підшипників і тіл кочення. Матова, зношена поверхня доріжок кочення. Потемніння пластичної змазки. Причинами таких явищ може бути недостатня чистота до та після монтажу підшипника, неефективне ущільнення, пластична змазка, забруднена частинками зносу сепаратора.

Заходи щодо недопущення таких випадків. Розпаковувати підшипники безпосередньо перед монтажем, застосовувати свіжі та чисті змащувальні матеріали.

Знос внаслідок недостатнього змащування. Стійкий несучий мастильний шар не може виникнути в підшипнику, якщо кількості мастила недостатньо, а також коли мастило втратило свої властивості. У таких умовах можуть виникати металеві контакти між тілами кочення та доріжками кочення

Коли мастило повністю витрачено, відбувається значне зростання температури. Загартована підшипникова сталь втрачає свою твердість, і на поверхні виникають кольори мінливості – блакитний і коричневий. При цьому температура може бути настільки високою, що підшипник заклинює.

Таке явище спостерігається, коли поверхня зношена, іноді із дзеркальним блиском (начебо полірована). Причина такого явища – мастило поступово вичерпується та втрачає свої властивості. У зв'язку з цим необхідно перевіряти, чи надходить мастило в підшипник.

Знос внаслідок вібрацій. Під час зупинки підшипника між тілами кочення та доріжками кочення зникає шар мастила і виникає металевий контакт. Вібрації підшипника, який не обертається, породжують малі відносні переміщення між тілами кочення і кільцями підшипника. Під впливом такого процесу згодом на доріжках кочення виникають заглиблення. Це пошкодження відоме як “хибне бринелювання”.

Що вище енергія коливань, то більші пошкодження. На розмір пошкоджень також впливають тривалість дій вібрацій і величина зазору в підшипнику. Частота коливань суттєвого значення не має.

Роликopідшипники чутливіші до вібрацій, ніж кулькопідшипники, причому серед роликopідшипників найбільш схильними до пошкоджень такого роду є циліндричні роликopідшипники. Це пов'язано з тим, що кульки можуть крутитися в будь-якому напрямку, а ролики тільки в одному, в інших випадках можуть лише ковзати.

Кулькопідшипники не тільки менш чутливі до вібрацій, а й у них за допомогою пружин можливо

створювати попередній натяг, що перешкоджає розвитку пошкоджень від вібрацій.

Таке явище спостерігається, коли заглиблення на доріжках кочення роликотідишипників мають вигляд поздовжніх бороздок, а на доріжках кочення кулькотідишипників – круглих вм'ятин (лунок). Їх дно має або блискучий вигляд, або матовий і покритий іржею.

Вм'ятини. Вм'ятини на доріжках кочення та тілах кочення виникають у тих випадках, коли сили монтажу передаються на кільця через тіла кочення. Також вм'ятини виникають через надмірно великі навантаження на підшипник у той час, коли підшипник не обертається. Причиною вм'ятин може бути потрапляння у підшипник сторонніх частинок.

Вм'ятини, які виникають через надмірне навантаження або неправильний монтаж. Відстань між двома вм'ятинами відповідає відстані між сусідніми тілами кочення. Вм'ятини на доріжках кочення кулькотідишипників легко виникають, якщо зусилля монтажу чи демонтажу передаються через тіла кочення. Вм'ятини виникають під час посадки підшипників на вали та в корпус з надмірним натягом, а також під час надмірного натягу внутрішніх кілець на конічні шийки валу.

Вм'ятини, які виникають під дією сторонніх частинок. Сторонні частинки, наприклад металева стружка, проникаючи в підшипник, утворюють вм'ятину, коли тіло кочення зачухе стружку в доріжку кочення.

Вм'ятини можуть виникати не тільки внаслідок потрапляння стружки, а й через потрапляння волокон тканини та паперу. Вм'ятини здебільшого маленькі та розгалужені по всій поверхні доріжки кочення.

Риски. Якщо дві недостатньо змащені поверхні ковзають одна об одну під навантаженням, то відбувається перенос частинок металу з однієї поверхні на іншу. Таке явище називають ризкою. Поверхні при цьому мають вигляд шорстких. Під час виникнення ризок матеріал підшипника нагрівається до температури, при якій відбувається відпуск. Виникає місцева концентрація напружень, внаслідок яких відбуваються утворення тріщин і раковин.

У роликотідишипників тертя ковзання відбувається переважно між торцями роликів і направляючими бортами кілець. Такі ризки можуть виникати, якщо тіла кочення входять у навантажену зону з великим прискоренням.

Риски, які утворюються на торцях роликів і направляючих бортах. У циліндричних і конічних підшипників, а також у сферичних підшипників з направляючими бортами ризки можуть виникати на

поверхнях бортів і на торцях роликів. Причиною такого явища є недостатнє змащування сполучень торців роликів з бортами. Ризки виникають і тоді, коли на роликотідишипник діє тривалий час велика осьова сила, наприклад, коли конічні роликотідишипники встановлені в парі із занадто великим попереднім натягом.

Риски на доріжках кочення на відстані тіл кочення. Одна з найпоширеніших причин пошкоджень під час монтажу циліндричних роликотідишипників полягає в тому, що в процесі монтажу кільце підшипника з сепаратором і тілами кочення перекошують щодо іншого кільця і при цьому не обертають одне кільце відносно іншого.

При цьому ролики ковзають по сполученій доріжці кочення другого кільця, внаслідок чого виникають ризки у вигляді смужок, спрямованих перпендикулярно до площини обертання, одночасно також можуть бути пошкоджені й ролики. Таких пошкоджень можна запобігти, якщо в процесі збирання підшипника добре змащувати доріжки кочення і повертати кільця один щодо одного.

Риски на роликах і доріжках кочення. Іноді за певних умов виникають ризки на роликах і доріжках кочення сферичних і циліндричних роликотідишипників. Це має місце тоді, коли ролики гальмуються в ненавантаженій зоні, оскільки кільця більше не ведуть їх (немає достатньої сили тертя). Тому, під час входу в навантажену зону, вони одразу отримують настільки значне прискорення, що прослизують щодо доріжки кочення, породжуючи ризки.

Риски на посадкових поверхнях. Ризки можуть виникати на посадкових поверхнях і важко навантажених підшипниках, вони є наслідком переміщення кілець підшипників щодо валу або корпусу.

Ризок в отворах внутрішніх кілець на посадкових поверхнях зовнішніх кілець або на торцях кілець можна запобігти, правильно вибираючи посадку кілець підшипників. Посадки повинні бути достатньо щільними, щоб не допускати відносного зміщення кілець підшипників і сполучених деталей.

Риски в опорних кулькотідишипниках. Ризки на доріжках кочення опорних кулькотідишипників можуть виникати в тих випадках, коли частота обертання відносно навантаження занадто висока.

При цьому відцентрові сили виштовхують кульки на краї доріжок кочення, що призводить до виникнення великої складової ковзання на поверхні контакту кульки з доріжкою кочення. Також таке явище призводить до утворення діагонально

спрямованих синусоїдальних рисок на зовнішніх ділянках доріжки кочення.

Корозія. Якщо в підшипник проникає вода або агресивні середовища в такому обсязі, що мастильні матеріали не можуть захищати сталеві поверхні, виникає корозія. Процес глибокої (щілинної) корозії швидко призводить до утворення явних слідів корозії – корозійних виразок. Іншим видом корозії є контактна корозія, так звана фретинг-корозія.

Глибока корозія. На світлій сталевій поверхні, де є доступ повітря, утворюється тонкий захисний шар оксидів. Однак, цей шар не є непроникним. Щойно вода або агресивні середовища контактують зі сталеву поверхню, виникають хімічні реакції та утворюються корозійні виразки (іржа).

Глибока або “щілинна” корозія становить велику небезпеку для підшипників, оскільки під час такого явища розвиваються раковини та тріщини. Кислоти впливають на сталь інтенсивніше, ніж розчини їдкого лугу рис. 1.



Рис. 1. Корозія обидви підшипника
Джерело: розроблено авторами

Солі утворюють у поєднанні з водою електроліти, що зумовлюють гальванічну корозію. Або її називають водяним травленням. Соляні розчини та морська вода особливо небезпечні.

Такі явища мають вигляд, ніби сіро-чорні смуги, спрямовані впоперек доріжок кочення, і розташовані здебільшого на відстані тіл кочення. У пізнішій стадії наскрізна корозія спостерігається на доріжках кочення та інших поверхнях підшипника.

Контактна (фретинг) корозія. Коли тонкий шар оксидів на поверхні деталі підшипника пошкоджений, процес окислення поширюється вглиб матеріалу. Такий процес відбувається під час відносного руху в місцях сполучення (посадках) кілець підшипників з валами і корпусами та

обумовлений посадками підшипника із зазором. Описане явище називають контактною корозією.

У розвиненій стадії руйнування корозія може місцями проникати глибоко в матеріал підшипника. Завдяки відносному руху маленькі частинки матеріалу відокремлюються від поверхні. На повітрі ці частинки швидко окислюються, утворюючи шар контактної іржі. Контактна корозія призводить до того, що кільця підшипників нерівномірно прилягають до посадкових поверхонь. Це несприятливо впливає на розподіл навантаження в підшипнику.

Крім того, окислені частинки діють як абразив.

Такі явища спостерігаються, коли посадкова поверхня зовнішнього кільця або поверхня отвору внутрішнього кільця вкриті іржею. Сліди кочення дають змогу виявити значне зношування на відповідних місцях доріжок кочення.

Втомні раковини. Втомні раковини є наслідком нормального втомного пошкодження поверхні підшипника.

Якщо раковини досягли певної стадії розвитку, наявність пошкодження виявляють за наявністю шуму та вібрацій.

Причинами передчасного виникнення раковин можуть бути: перевищення допустимого навантаження, надмірний внутрішній попередній натяг внаслідок занадто тугої посадки кільця підшипника на вал, деформації, зумовлені некруглістю посадкових місць під підшипник, додаткові осьові навантаження (наприклад, що виникають внаслідок температурних деформацій).

Раковини також можуть виникати внаслідок інших пошкоджень, зокрема, вм'ятини, корозії, ризи.

Тріщини. Однією з найпоширеніших причин виникнення тріщин під час монтажу або демонтажу є неправильне обертання підшипника.

Також імовірною причиною виникнення тріщин є можливі удари, які завдаються інструментом безпосередньо або через загартовану оправку по кільцю підшипника, що можуть спричинити дрібні тріщини. Внаслідок цього, в процесі роботи підшипника від нього відламуються частинки металу.

Іншою причиною тріщин у кільцях може бути занадто туга посадка кільця на конічну шийку валу. Під час такого явища можуть виникнути великі розтягувальні навантаження, що призводять до деформації кільця під час роботи підшипника, а також до виникнення тріщин. Такий самий процес спостерігається під час гарячої посадки кільця підшипника на вал, якщо перевищена максимально допустима величина натягу в посадці.

Тріщини також можуть виникати внаслідок глибоких рисок, задир, при цьому вони спрямовані

перпендикулярно напрямку ковзання. Такі тріщини призводять до руйнування кілець. Втомні раковини також через деякий час призводять до руйнування кілець підшипників. Це стосується і контактної корозії.

Поверхневі руйнування. Якщо змащувальний шар між доріжками та тілами кочення занадто тонкий, то вершини шорсткості короточасно стикаються одна з одною. При цьому на поверхнях виникають дрібні тріщини. Такий процес називають поверхневим руйнуванням.

При достатньому змащуванні немає небезпеки виникнення руйнувань описаного виду доти, доки змащувальний шар не стає занадто тонким внаслідок зміни в'язкості мастила через підвищення температури або при надмірному зростанні навантаження.

Виявити такі пошкодження неозброєним оком неможливо. На наступних стадіях руйнування поверхні стають помітними маленькі пласкі лунки з кристалічним зламом.

Пошкодження сепаратора: пошкодження сепаратора внаслідок вібрацій. Якщо підшипник працює в умовах вібрацій, то сили інерції можуть виявитися настільки великими, що через деякий час у матеріалі сепаратора виникають втомні тріщини. З часом ці тріщини призводять до руйнування сепаратора.

Пошкодження сепаратора внаслідок зношування. Причинами зношування сепаратора можуть бути недостатнє змащування та абразивні частинки. Оскільки тертя ковзання між сепаратором та іншими компонентами підшипника усунути неможливо, при недостатньому змащуванні він виходить з ладу (рис. 2).

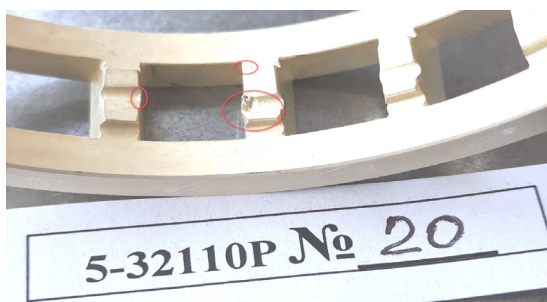


Рис. 2. Ушкодження сепаратора
Джерело: розроблено авторами

Пошкодження сепаратора внаслідок заклинювання. Викришені частинки матеріалу підшипника та зовнішні забруднення, потрапляючи між сепаратором і тілами кочення перешкоджають

обертанню, внаслідок чого відбувається заклинювання.

Пошкодження сепаратора внаслідок надмірно високої частоти обертання. Якщо підшипник працює з вищою частотою обертання, ніж це допускає конструкція сепаратора, виникають сили інерції, дія яких призводить до ламання сепаратора.

Висновки

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що довговічність підшипників визначається комплексом експлуатаційних і технологічних факторів. Найбільш суттєвими з них є:

1. Навантаження та умови експлуатації. Перевищення розрахункових навантажень, динамічні удари, вібрації та перекоси призводять до прискореного зношування та втомного руйнування робочих поверхонь.

2. Мастило та його характеристики. Якість і своєчасність змащування безпосередньо впливають на ресурс підшипника. В'язкість, термостійкість і протизношувальні властивості мастильних матеріалів є критично важливими.

3. Монтаж і центрування. Порушення технології встановлення та неспіввісність деталей зумовлюють додаткові напруження й нерівномірний розподіл навантажень, що скорочує строк служби.

4. Температурний режим. Перегрів сприяє втраті захисних властивостей мастила, деформації деталей і може стати причиною відмови підшипника, тому контроль теплового балансу є обов'язковим.

5. Забруднення та його вплив. Навіть незначні домішки абразивних частинок у мастилі значно скорочують ресурс підшипника, що потребує якісної фільтрації та герметизації.

Отже, забезпечення довговічності підшипників можливе лише за умови комплексного підходу, який включає оптимальні режими навантаження, застосування високоякісних мастильних матеріалів, дотримання технології монтажу, контроль теплових режимів і захист від забруднень.

Подальші дослідження авторів буде зосереджено на вивченні умов навантаження, методів розрахунку, закономірностей напруженого стану та коливань типових деталей і вузлів авіаційних ГТД.

Список літератури

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. Технология эксплуатации и ремонта газотурбинных двигателей: — М.: Высшая школа, 2002. — 355 с.

2. Киселёв Ю.В. Диагностирование газотурбинных двигателей и их узлов по термогазодинамическим и вибро-акустическим параметрам: – Самара: Изд. Самарский гос. аэрокосм. университет., 2007. – 200 с.
3. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2007. – 242 с.
4. Сусликов Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. – 192 с.
5. Ярославцев Н.Л. Классификация дефектов ГТД и анализ причин их возникновения, М.: Изд. МАТИ, 2007. – 22 с.
6. Коросташевский Р.В., Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения, Москва: Гос научно-техн. изд. ОБОРОНГИЗ, 1963. – 342 с.
7. Сидоров В.А., Сотников А.Л. Эксплуатация подшипников качения: Монография / В.А. Сидоров. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 136 с.
8. Геворкян Е.С., Мельник О.М. Неруйнівні методи контролю якості: Конспект лекцій, Харків: УкрДАЗТ, 2015 – 42 с.
9. ДСТУ 2865-94 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення. К.: Держстандарт України 1995. – 55 с.

Надійшла до редколегії 20.10.2025

Схвалена до друку 19.11.2025

Відомості про авторів:

Грень Віталій Миколайович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8920-2351>

Полуянов Володимир Інокентійович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5123-120X>

Чуловський Євген Вікторович

діловод відділу персоналу та стройової
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-2702-2167>

Information about the authors:

Vitalii Gren

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8920-2351>

Volodymyr Poluyanov

Research Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5123-120X>

Chulovskyi Yevhen

Clerk of the Personnel and Military Department
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-2702-2167>

ANALYSIS OF TYPES OF DAMAGE TO BEARINGS OF AN AVIATION GAS TURBINE ENGINE

V. Gren, V. Poluyanov, Y. Chulovskyi

One of the most pressing issues today is ensuring high technical readiness and serviceability of the aviation equipment of the Armed Forces of Ukraine. Maintaining aviation gas turbine engines in working condition is critically important for the safe and effective performance of tasks, especially in modern conditions characterized by a high level of combat and operational loads.

During the operation of an aviation gas turbine engine (GTE), the bearings of the supports and units are exposed to static and dynamic loads, temperature fluctuations, as well as the influence of design and manufacturing defects. In addition, damage to the bearings often occurs as a result of violations of the maintenance and repair technology, which leads to a decrease in the engine resource and possible emergency situations.

Particularly vulnerable elements are the bearings of aircraft engine units, which perform a key function in ensuring stable and long-term operation of components and systems. Damage to aircraft GTE bearings leads to increased vibrations, overheating, reduced efficiency, and in extreme cases, to catastrophic failures. Therefore, timely diagnostics and repair of bearings are critically important tasks for repair companies and engineering and technical staff of aviation units.

The article presents the main types of damage to the bearings of aircraft gas turbine engine. These types of damage include: wear, dents, scratches, surface damage, corrosion, tired shells, cracks.

Further research by the authors will be focused on the study of load conditions, calculation methods, regularity of the stress state and fluctuations of typical parts and assemblies of the aircraft engines.

Keywords: bearing, aircraft gas turbine engine, wear, dents, risks, surface damage, corrosion, fatigue shells, cracks.