Пилипенко О.І., Колесник Д.М., Березняк А.М., Шоха В.М. Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ І РУЙНУВАННЯ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ РЕДУКТОРІВ ВЕРТОЛЬОТІВ Ми-8 ТА ЙОГО МОДИФІКАЦІЙ

Представлені в узагальненому вигляді результати кількісного фактографічного дослідження зубчастих коліс редукторів вертольотів Ми-8 та його модифікацій, з різним типом зубчастого зачеплення, руйнування яких мало місце під час польоту по причині наявності попередніх пошкоджень матеріалу, на стадії виробництва зубчастих коліс і в процесі їх експлуатації. Розглянуті контактні руйнування зубців як основна причина відмов швидкохідних зубчастих коліс у добре змащуваних закритих передачах. Виявлені причини зношування і заїдання зубців на їх бічних поверхнях, задирів та руйнувань у залежності від місця зародження тріщин.

Ключові слова: *Зубчасті передачі та колеса вертольотних редукторів, втомне та контактне руйнування*

Постановка проблеми. Найбільш напруженими деталями редукторів є зубчасті передачі. При збільшенні напруження редуктора відбувається накопичення пошкоджуваності його деталей, яка по-різному проявляється у вигляді дефектів. Втомному руйнуванню деталей передують накопичення пошкоджуваності, яка зростає зі збільшенням часу роботи редуктора.

Проблема полягає у виявленні можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема, головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій. Для цього необхідно виявити основні причини пошкоджуваності та руйнування зубчастих передач вертольотних редукторів, місць розташування та зародження вогнищ втомних тріщин, розглянути види контактних та втомних руйнувань, зумовлених різними причинами.

Аналіз досліджень і публікацій. З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що пошкоджуваність деталей редуктора визначається не тільки напруженнями на постійних режимах, що перевищують навантаження, які відповідають тривалій границі контактної витривалості. Вона виникає і під час роботи на нестійких (перехідних) режимах, пов'язаних із запуском двигуна і виходом його на режим, а також із резонансними явищами в системі деталей редуктора на перехідних режимах.

Мета статті. Розглянути пошкоджуваність і руйнування зубчастих передач вертольотних редукторів

Виклад основного матеріалу. Пошкоджуваність деталі редуктора характеризується ступенем пошкоджуваності, яка на i -му режимі роботи визначається як [1]

$$P_i = t_{\phi i} / T_i$$

де $T_{\phi i}$ – фактичний час роботи деталі на i -му режимі; T_i – обмежена довговічність деталі на i -му режимі.

Якщо ступінь пошкоджуваності $P = 1$, настає руйнування.

Пошкоджуваність деталей редуктора визначається не тільки напруженнями на постійних режимах, що перевищують навантаження, які відповідають тривалій границі контактної витривалості. Вона виникає і під час роботи на нестійких (перехідних) режимах, пов'язаних із запуском двигуна і виходом його на режим, а також із резонансними явищами [2] в системі деталей редуктора на перехідних режимах. У складі редуктора зубчасті колеса зазнають двовісного розтягу від дії динамічного навантаження [3] в результаті обертання.

Динамічне навантаження дисків зубчастих коліс від їх обертання пошкоджує матеріал коліс в області багатоциклової втоми по причині повторюваності польотних циклів навантаження.

Потужність редукторів і розміри зубчастих коліс такі, що одночасно реалізувати високочастотне і високоамплітудне навантаження не є можливим. Тому, під час зростання частот коливань зубчастого колеса від гармонік більш високого порядку з частотами 10^4 Гц і більше його навантаження одночасно супроводжується зниженням амплітуди коливань. У зв'язку з цим просування втомної тріщини здійснюється в умовах, як правило, навантаження з високоасиметричним циклом. Все це призводить до руйнування матеріалу в області низьких припорогових швидкостей росту тріщини тільки на I стадії, коли домінуючим механізмом руйнування є процес зсувоутворення [4, 5].

У більшості випадків експлуатації спостерігалися руйнування зубчастих коліс головних редукторів ВР-8А вертольотів Ми-8 та його модифікацій [5].

У таблиці 1, 2 [6, 7] наведені в узагальненому вигляді результати кількісного фактографічного дослідження зубчастих коліс редукторів вертольотів Ми-8, Ми-8 МТВ з різним типом зубчастого зачеплення, руйнування яких мало місце під час польоту по причині наявності попередніх пошкоджень матеріалу на стадії виробництва зубчастих коліс і в процесі їх експлуатації.

Таблиця 1

Типи вертольотів, їх напрацювання і причини появи втомних тріщин
в зубчастих колесах редуктора

№ п/п	Тип вертольоту	Напрацювання, год./п.ос. ремонту	Вид пошкодження	Розмір вогнища, мм
1	Ми-8	4486/18	Статична кутова тріщина	4
2	Ми-8	6242/73	Статична наскрізна тріщина	2
3	Ми-8	6686/458	Статична тріщина від отвору	2,5
4	Ми-8	5109/918	Окисні плівки в центрі зуба	-
5	Ми-8 МТВ	740	Окисні плівки	-

Таблиця 2

Приклад параметрів зубчастого колеса, втомні руйнування якого мали
місце під час експлуатації

Параметри	Ведуче гелікоїдальне зубчасте колесо першої ступені редуктора ВР-8А
Число зубців	95
Модуль, мм	4,5
Діаметр кола колеса, мм	454
Частота обертання колеса, хв^{-1}	4200
Обертний момент, Н·м	2510
Час напрацювання між ремонтами, год.	1000

При напрацюванні редуктора в експлуатації більше 10000 годин число циклів навантаження кожного зуба колеса, за умови його входження в контакт, за кожний оберт складає 10^9 циклів. Під час роботи зубчастих передач у складі редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій виникають втомні руйнування зубчастих коліс по ободу. Такі руйнування зумовлені згинальними резонансними коливаннями коліс у робочому діапазоні частоти обертання [2].

Схильність до руйнування коліс від резонансних вібрацій притаманна більше всього колесам конічних передач під час коливання їх в осьовому напрямку. Втомне руйнування конічного колеса, як правило, починається по ободу в основі зуба, і далі тріщина

розвивається в колесі по формі його коливань (рис. 1) [4]. При великих резонансних напруженнях в радіальному напрямку можливий початок руйнування у маточини.

Рис. 1. Характерний вид втомного руйнування авіаційного конічного зубчастого колеса (а) і місце зародження та розвитку втомної тріщини (б)

Втомні руйнування від резонансних вібрацій можливі також у циліндричних зубчастих колесах під час їх коливань в радіальному напрямку, як маси обода колеса на пружній основі – діафрагмі колеса [2, рис.4].

У зв'язку з відмовами редукторів по причині руйнування їх зубчастих коліс, виникла необхідність пошуку підходів і шляхів вирішення задачі кількісної оцінки довготривалості зростання тріщин в зубчастих колесах під час проведення розслідувань тяжких льотних подій. **Довготривалість експлуатації між двома сусідніми оглядами редуктора не повинна перевищувати час росту тріщини до критичних розмірів [5].**

Всі експлуатаційні руйнування зубчастих коліс першої ступені редуктора ВР-8А вертольоту Ми-8, що мали місце, були пов'язані з наявністю в них дефектів матеріалу. Принципова різниця руйнувань полягала лише в тому, що попередньо зони дефектів матеріалу мали різні місця розташування, різну протяжність і форму. Під час руйнувань у двох випадках вогнища розташовувалися в частині ободу колеса біля зубців, а в одному випадку вогнище розташовувалося у технологічному отворі, недалеко від центрального отвору колеса [6, 7]. При цьому фізична сутність виникаючих пошкоджень і кінетика виникнення від них та розвитку подальших втомних тріщин були подібні.

Під час контакту зубців виникають розтягуючі напруження. Стосовно зубчастих коліс з напрацюванням в експлуатації 9313 годин втомна тріщина, в процесі свого розвитку, перетнула обод зубчастого вінця, далі вона увійшла в стінку діафрагми і від цієї первинної втомної тріщини здійснилося відгалуження вторинної тріщини, як показано в [7, рис. 6]. Ця тріщина повернулася до ободу, в результаті чого від зубчастого колеса відділився уламок зубчастого вінця, що містив шість зубців.

У двох випадках спочатку утворювалась зона вогнища руйнування кутової форми в районі обода поза навантаженою зоною зубчастого колеса (рис. 2).

Рис. 2. Загальний вигляд:

- (а) втомного зламу зубчастого колеса вертольоту Ми-8;
- (б) рельєф зламу на межі переходу від вогнища руйнування до втомного росту тріщини;
- (в) особливості міжзеренного рельєфу зламу у вогнищі руйнування

На всьому протязі росту тріщин, у зламах зубчастих коліс ясно виднілися втомні макролінії, відстань між якими зростала в напрямку розвитку руйнування (рис. 3). Найбільш помітна ця закономірність у западинах зубів, де виникають максимальні розтягуючі напруження. На межі зламу втомні лінії викривлені, і закономірність їх формування вказує на утворення блоку параметрів рельєфу у вигляді найтоншої лінії і згладженого рельєфу між ними. Описана закономірність притаманна розвитку тріщин на всіх ділянках зламу. Відстань між втомними лініями і ширина самих ліній збільшуються в напрямку розвитку тріщини від обода до маточної частини.

Еквівалентний рівень напружень у зубчастих колесах не перевищує 300 МПа в таких зонах, де може мати місце найбільший напружений стан. Порогова величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th} , при пульсуючому циклі навантаження, складає біля 20 МПа для сталі 12Х2Н4ВА, з якої виготовляють зубчасті колеса. У зонах дії контактних навантажень зубці коліс мають цементовані поверхні глибиною до 1,5 мм, що безумовно суттєво впливає на підвищення порогової величини коефіцієнта інтенсивності напружень. Тим не менш несучільності та ушкодження, що з'являються, можуть перевищувати за розмірами глибину цементованого шару. Тому вказана вище величина K_{th} дозволяє оцінити глибину допустимого дефекту матеріалу, при якому початок розвитку втомної тріщини в зубчастому колесі стає можливим. Ця глибина складає біля 2 мм, тобто суттєво перевищує глибину цементованого шару [8].

Контактні руйнування зубців є основною причиною відмов швидкохідних зубчастих коліс у добре змащуваних закритих передачах. Під час ремонту авіаційних двигунів із загальної кількості відбракованих зубчастих коліс до 85% відкидаються за наявності контактних руйнувань зубців: вищерблення і відшарування.

Вищерблення матеріалу на зубцях [7, рис.7] може бути обмеженим або прогресуючим. Обмежене вищерблення виникає після нетривалої роботи на виступах нерівностей робочих поверхонь зубців у вигляді дрібного «висипу», потім поступово зникає

і тому не являє собою небезпеки для подальшої експлуатації зубчастих коліс. Прогресуюче вищерблення матеріалу, як правило, виникає у зубчастих колесах з твердими зубцями, розвивається з часом до значних розмірів і може викликати руйнування зубчастих коліс, а тому зубчасті колеса з таким вищербленням матеріалу на зубцях непридатні для подальшої експлуатації.

Рис. 3. Макролінії (а), (б) втомного руйнування зубчастого колеса вертольоту Ми-8 на різній відстані від вогнища руйнування і залежність кроку ліній h і числа блоків ліній N_p від довжини тріщини a

Відшарування або глибинне контактне руйнування матеріалу [7, рис. 8], що іноді має місце у зубчастих колесах з поверхнево-зміцненими (цементованими і загартованими, азотованими і т. п.) зубцями, значно небезпечніше поверхневого вищерблення матеріалу тому, що при цьому від зубців відділяються досить великі ділянки зміцненого шару матеріалу, які можуть швидко вивести всю передачу з ладу.

Основними причинами контактних руйнувань зубців є: концентрація навантаження по довжині і профілю зубців, наявність залишкових розтягуючих напружень на робочих поверхнях зубців, несприятливі експлуатаційні пошкодження профілів зубців і несприятливі впливи на зубці змащувальної рідини.

Контактні руйнування, зумовлені концентрацією навантаження по довжині і профілю зубців, є найбільш розповсюдженими для твердих зубців, що пояснюється їх поганою припрацьованістю.

Концентрація навантаження на зубцях викликається локалізацією контакту зубців у зачепленнях зубчастих коліс по причинах: дефектів виготовлення деталей зубчастих передач та їх складання; несприятливих пружних деформацій деталей у зв'язку з недостатньою їх жорсткістю; виборки зазорів у з'єднаннях, що визначають взаємне розташування зубчастих коліс; нерівномірного зношування зубців з'єднання зубчастого колеса з валом при

несиметричному розташуванні зацеплення і з'єднання колеса; незадовільного взаємного розташування зношених діляниць зубців раніш експлуатованих зубчастих коліс [5].

Чим більше концентрація навантаження по довжині зубців, тим більш зосереджений характер мають виникаючі при цьому контактні руйнування. У більшості випадків контактні руйнування такого виду розташовуються в одного з країв зубця. Крайові контактні руйнування виникають переважно на зубцях конічних зубчастих коліс, що пов'язано з недосконалістю технології складання передач з конічними зубчастими колесами: якість складання часто перевіряють по плямі контакту зубців на фарбу в ненавантаженій передачі, а розміри плями контакту приймають настільки заниженими, що навіть після довготривалої роботи передачі довжина фактичної плями контакту зубців іноді не перевищує $1/3$ їх робочої довжини. Під час перекосів зубців у площині, дотичній до їх бокових поверхонь у місці контакту, можливе виникнення серединного зосередженого контакту і серединних локальних руйнувань матеріалу зубців [3]. Концентрація навантаження по довжині зубців може бути викликана нерівностями робочих поверхонь зубців, що утворилися під час їх кінцевої механічної обробки і, зокрема, так званою діагональною хвилястістю. Виникаючі при цьому контактні руйнування матеріалу зорієнтовані по виступах нерівностей.

У випадках використання зубчастих коліс з деяким зносом зубців, що буває нерідко під час ремонту авіатехніки, можливі локальні контактні руйнування зубців по причині попадання в контакт раніш незношених, виступаючих діляниць зубців

Контактні руйнування, зумовлені наявністю залишкових розтягуючих напружень на робочих поверхнях зубців, виникають переважно у зубчастих колесах з цементованими і загартованими, а потім шліфованими зубцями, у зв'язку з утворенням під час шліфування структурних концентраторів напружень. Встановлено, що на прошліфованих зубцях з утворенням структурних концентраторів напружень початкові тріщини вищерблення матеріалу виникають, як правило, у відпущених зонах зуба, а розвиток контактних руйнувань на початкових стадіях орієнтується в напрямку шліфувальних штрихів [1, 9]. Грубе шліфування бічних поверхонь цементованих і загартованих зубців призводить іноді і до утворення крупних відшарувань поверхневих шарів матеріалу.

Такі контактні руйнування можуть розташовуватись на будь-якій ділянці зуба, починаючи від поперечних шліфувальних тріщин [1]. При зміцненні зубців тільки по бічних ділянках залишкові напруження стиску у торців зубців різко знижуються, а в процесі експлуатації іноді виникають сколи матеріалу на профільних краяхах зубців [1, 10].

Контактні руйнування, зумовлені несприятливими експлуатаційними спотвореннями профілів зубців, проявляються у нерухомих зубчастих колесах високонапружених планетарних передач і у ведених коліс ряду рядових передач. Виникненню таких руйнувань передують спотворення робочих поверхонь зубців з утворенням поздовжньо орієнтованих ребер в полюсній частині і поглиблення в основі зубців. У коліс з фланкованими голівками зубців, у випадку збільшеної величини фланка, при вершині ділянці голівок зубців не приймають участі в зацепленні. Зі збільшенням тривалості експлуатації передачі радіус кривини в полюсній ділянці зубців безперервно зменшується, а контактні напруження зростають. При деякому значенні радіуса кривини контактні напруження в зоні полюсного зацеплення досягають границі контактної витривалості, а потім і перевищують її, призводячи до поздовжньо орієнтованих контактних руйнувань матеріалу зубців [1]. Мають місце також контактні руйнування матеріалу і в місці виходу поглиблення в основі зуба на його бічну поверхню, навпроти полюсного ребра.

Контактні руйнування, зумовлені несприятливими впливами на зубці змащувальної рідини, мають місце у швидкохідних передачах (при колових швидкостях зубчастих коліс 100 м/с і більше) при струминному змащуванні зубців на виході їх із зацеплення. У цьому випадку на робочих поверхнях зубців спочатку виникають ерозійні пошкодження у вигляді мікролунок від механічної дії струменя масла, які розташовуються тільки на голівках зубців, в зонах впливу на них струменя масла з форсунки, а площа, яку вони займають, обмежується приблизно круговим сегментом з основою у вершині зуба. Інтенсивність ураження дефектом поступово зростає у напрямку від початкового кола

зубчастого колеса до вершини зуба [1]. Виникаючі ерозійні пошкодження викликають збільшення місцевих контактних напружень внаслідок підвищення нормальних тисків на виступах між ними і сил тертя на них, по причині погіршення умов для утворення гідродинамічної змащувальної плівки, а це призводить до розвитку вторинних втомних вищерблень матеріалу зубців [1, 9].

Зношування і заїдання зубців по їх бічних поверхнях, як правило, мають місце внаслідок недостатньої несучої здатності масляного шару, розривів масляної плівки в місцях контакту, відсутності або тимчасового припинення доступу масла, невідповідності сорту масла і неминучого змішаного тертя під час пусків (рис. 4) [9], зупинок і особливо по причині попадання в зачеплення разом з маслом абразивних частинок, сумірних з товщиною масляної плівки.

Рис. 4. Зона крайкової взаємодії зубців,
де K_1 – точка ударної взаємодії зубців, знаходиться поза лінією зачеплення;
 a'_1 – точка виходу з крайкового контакту (вихід зуба на лінію зачеплення);
 $\Delta\epsilon$ – зміна кута нахилу лінії зачеплення (відхилення нормалі по лінії зачеплення
в точці крайкового контакту від теоретично правильного зачеплення)

Дільниця зуба від точки K_1 до точки a'_1 є найбільш навантаженою та напруженою, на ній і здійснюється зародження перших контактних руйнувань на бічній поверхні зуба шестерні. Під час ударної взаємодії в точці K_1 має місце стрибок температури під час контакту зубців, що сприяє розриву масляної плівки і утворенню металевому контакту. В місці контакту відбувається як би зварювання частинок металу з наступним відривом їх від менш міцної поверхні. Нарости, що утворилися при цьому, задирають робочі поверхні зубців у напрямку ковзання. Таким чином, крайковий удар сприяє заїданню.

На процес заїдання зубчастих пар і задиру поверхні, що є його наслідком, а також зношування деталей здійснюють вплив: властивості поверхневих шарів матеріалу деталей, деформація, тиск, швидкість ковзання, температура, а також теплофізичні характеристики мастильних і конструкційних матеріалів, що утворюються під час взаємодії поверхневих структур, зношування і ряд інших факторів.

Під час контакту реальних зубчастих коліс відбуваються складні нелінійні процеси, які залежать від великого числа взаємопов'язаних факторів, що утворюють неоднорідну систему нелінійних функціональних залежностей: періодичні контактні взаємодії, зближення шорсткісних поверхонь зубців під високими навантаженнями, теплові ефекти під час тертя, що викликають десорбцію і руйнування граничних змащуваних шарів. Такий процес може проходити в локальних точках на плямі контакту.

З ростом тиску і температури зони руйнування збільшуються в розмірах і об'єднуються. Процес може прийняти лавиноподібний – прискорений характер, що призводить до дотику вершин мікронерівностей деталей на численних площинах контакту, що веде до зростання адгезії контактуючих матеріалів, короткочасного зварювання, викидання досить великих фрагментів матеріалу. При цьому різко збільшується коефіцієнт тертя, температура, рівень автоколивань у вузлі. В умовах наростання заїдання посилюється прогресуюче зношування деталей, різко знижується їх несуча здатність.

Слід зазначити, що знос у звичайних умовах експлуатації, пов'язаний з періодичними контактними взаємодіями зубців, для більшості закритих змащуваних зубчастих передач не здійснює суттєвого впливу на їх ресурс. Величина цього зносу може бути спрогнозована розрахунковим шляхом по експериментально перевіреним методикам [1].

Задири зубців виникають внаслідок молекулярного зчеплення їх матеріалів на ділянках безпосереднього контакту і руйнування контактів з вириванням частинок матеріалів, що пошкоджують зубці. Звичайно, заїдання відбуваються при поєднанні високих тисків у контакті зубців і великих колових швидкостей коліс. Заїдання зубців коліс, звичайно, не призводить до негайного виходу передачі з ладу [1].

В залежності від ступеня розвитку заїдання розрізняють декілька видів пошкоджень від заїдання на зубцях: натир (початкова форма задиру); тонкі риски, розвинуті риски, неглибокі борозни (задир середньої інтенсивності), що злилися одна з одною; глибокі борозни, що злилися одна з одною (сильний задир) і глибокі борозни, що злилися, з наявністю виривів, наростів і оплавлення поверхневих шарів матеріалу зубців (дуже сильний задир). Перехід від одної стадії задиру до іншої звичайно відбувається послідовно.

Всі типи зубчастих передач по опірності заїданню, від максимальної до мінімальної, розташовуються в наступному порядку [1]: циліндричні з внутрішнім зачепленням; циліндричні з зовнішнім зачепленням; конічні з прямими, косими та спіральними зубцями; гіпоїдні; гвинтові.

Руйнування (злами) зубців є найбільш розповсюдженим видом руйнувань зубчастих коліс. Руйнування зубців бувають втомними, змішаними і невтомними.

Поглибленість увігнутого зламу в тіло зубчастого колеса зростає зі збільшенням кута профілю вихідного контуру зубців, зі зменшенням радіуса кривини перехідної поверхні і зі зменшенням радіальної товщини обода (при її значенні не більше $2,5m$, де m – модуль зачеплення зубців).

Опуклі злами виникають під час статичного і ударного навантажень зубців [10]. Поступовий перехід від увігнутих зламів зубців до опуклих від зрізу можна іноді спостерігати і в межах одного колеса при послідовному руйнуванні декількох зубців.

Похили та криволінійні, по відношенню до лінії зуба, поздовжні контури зламів вказують на нерівномірний розподіл навантаження по довжині зуба з максимальним значенням погонного навантаження на частині зуба, що відділяється від зубчастого колеса. У зубчастих передачах, які не мали ремонтів, нерівномірний розподіл навантаження по довжині зубців зубчастих коліс може бути пов'язаний з недостатньою жорсткістю деталей передачі, з неточностями виготовлення деталей і складання передачі, а також з підвищеною нерівномірністю зношування елементів від тертя і опорних елементів у вузлах, які визначають положення зубчастих коліс. Для відремонтованої зубчастої передачі причиною нерівномірного розподілу навантаження по довжині зубців, окрім перелічених, може бути також незадовільна комплектація зубчастих коліс та інших деталей передачі, що зумовлює погіршення контакту зубців коліс в складеному вузлі. У зубчастих колесах з не шліфованими, після загартування, перехідними ділянками зубців, але шліфованими по їх бічних поверхнях з врізанням крайки шліфувального круга в тіло зуба, втомні руйнування зубців можуть відбуватися по місцю переходу шліфованої ділянки зуба до нешліфованої. Такі руйнування, зокрема, виникають тоді, коли місце переходу від шліфованої ділянки зуба до нешліфованої розташовується дуже близько до поверхні западин, а радіус кривини шліфованої ділянки в місці його виходу на нешліфовану поверхню суттєво менше радіуса кривини перехідної ділянки (рис. 5).

Рис. 5. Руйнування зуба від втоми:

А – точка виникнення втомної тріщини; АВ – лінія розвитку тріщини;
ВС – область доламування зуба

У зубчастих колесах з великими кутами профілю вихідного контуру зубців або з додатнім зміщенням їх вихідного контуру небезпечний переріз зуба при згині, а, отже, і місце руйнування зуба можуть значно зміститися в бік вершини, наближаючись до неї зі збільшенням зміщення інструменту, яким оброблювалося зубчасте колесо.

Додаткові місцеві поля залишкової напруженості в зубцях, які в ряді випадків є причиною поломок зубців, створюються пластичними деформаціями матеріалів зубчастих коліс навколо зубців, на торцях і вершинах зубців (наприклад, від нанесення монтажних міток кернуванням, від нанесення ударних тавр, від випробувань твердості матеріалу), втулок (для здійснення їх тангенціальної фіксації в зубчастих колесах з тонкостінним ободом), а також при застосуванні циліндричних шпонок-штифтів для з'єднань зубчастих коліс один з одним.

Про важливість дослідження ділянок зубців з пошкодженнями робочих поверхонь свідчить локалізація задирів на голівках і ніжках зубців, представлена на рис. 6 [11].

а)

б)

Рис. 6. Типове пошкодження робочих поверхонь швидкохідних зубчастих передач:

а) локалізація задирів на цементованому зубчастому колесі;
б) розподіл напружень в елементах зуба приводного колеса

Руйнування ободів, дисків і маточин [1]. Втомні руйнування зубчастих коліс з початком їх розвитку від обода виникають у випадках, коли міцність обода менше, ніж зубців або при збудженні в тілі зубчастих коліс резонансних коливань по формі з вузловими діаметрами [2]. Розвиток руйнування зубчастого колеса при цьому, в залежності від конструкції зубчастого колеса, а також від характеру і місця розташування дефектів пошкоджень, може починатися від западин між зубцями, торця обода або від внутрішньої його поверхні.

Втомні руйнування зубчастих коліс з початком їх розвитку від внутрішньої поверхні обода зустрічаються, передусім, у зубчастих колесах, внутрішня поверхня обода яких є доріжкою кочення вбудованого роликового або голчастого підшипника. Первинні втомні руйнування таких зубчастих коліс, звичайно, пов'язані з наявністю на внутрішній поверхні

обода шліфувальних припалів. Вторинні втомні руйнування зустрічаються у сателітів з конструктивно неправильно вбудованими в них дворядними голчастими підшипниками.

Виникнення резонансних коливань в тілі зубчастого колеса на робочих режимах його роботи пов'язано з невдалим вибором форм або розмірів обода і діафрагми колеса. Руйнування зубчастого колеса від резонансних коливань по формі з вузловими діаметрами [4] починається від западин між зубцями і розвивається спочатку в радіальному напрямку, а потім поступово змінює свій напрямок на тангенціальний і знову на радіальний, з виходом зламу до другої міжзубцевої западини, що відстоїть від першої западини на число зубців, що складає парну долю від числа зубців зубчастого колеса.

Втомні руйнування зубчастих коліс з початком їх розвитку від діафрагми мають місце у коліс з відносно тонкими діафрагмою та ободом, а також у коліс з фасонною діафрагмою (наприклад, у дзвіноподібних коліс). Руйнування коліс викликані виникаючими в діафрагмі високими згинальними напруженнями в першому випадку від резонансних коливань по формах з вузловими колами, а в другому – від наявності на ній різних концентраторів напружень, які допущені під час остаточної механічної обробки деталі на заводі-виробнику або під час її ремонту. Розвиток втомної тріщини, що виникла в діафрагмі колеса, йде по колу, іноді з розгалуженнями до зубчастого вінця.

Втомні руйнування зубчастих коліс з початком їх розвитку від маточини виникають в процесі експлуатації рідко. Такі руйнування відбуваються переважно у коліс з тонкостінними маточинами, що розташовуються поряд з зубчастими вінцями, і основними їх причинами є недоліки конструкції та складання зубчастих коліс. Зокрема, відомі випадки, коли причиною таких руйнувань зубчастих коліс було застосування кернування в якості знаряддя для осьової фіксації циліндричних штифтів-шпонок та гвинтів у з'єднанні одного зубчастого колеса з маточиною другого, при малій радіальній товщині маточини і наявності на ній поверхневого зміцнення у вигляді цементації та загартування поблизу місць кернування.

Всі зруйновані під час експлуатації зубчасті колеса виготовлені з матеріалу 12X2H4BA (12 Cr – 2N–4V) у відповідності з вимогами креслень на їх виготовлення. Вони мають однакові фізико-механічні характеристики, вказані в кресленнях на їх виготовлення. Матеріал має наступний елементний склад (у %): С – 0,1-0,15; Cr – 1,25-1,75; Ni – 3,25-3,75; Mn – 0,3-0,6; Si – 0,17- 0,37; S < 0,03, P < 0,03. Границя міцності і текучості матеріалу складає 1000 і 80 МПа відповідно при відносному зруженні 50-55% [5].

Зубці коліс цементовані на глибину 0,8-1,5 мм. Твердість основного матеріалу і цементованого шару за шкалою HRC не перевищувала 60 одиниць і знаходилась в інтервалі 31-42 одиниць відповідно.

Спостерігалася різка зміна рівня навантаження під час роботи редуктора, яка була однократною, що характеризує перший тип роботи вертольоту за політ, коли кожний переліт здійснюється з вантажем [3, (рис.1)].

Виявлені особливості процесу руйнування свідчать про регулярне просування тріщини від польоту до польоту [5]. За умови роботи зубчастого колеса його регулярне глобальне навантаження відноситься тільки до повного циклу запуску і зупинки редуктора або розвантаження вертольоту в польоті, що в розгляданому випадку відповідає циклу роботи вертольоту за один політ. Тому кількість виявлених втомних ліній відповідає кількості польотів вертольоту.

За умовами роботи зубчастих коліс головного редуктора напрацювання розглянутих коліс на момент їх руйнування склали $2,25 \cdot 10^9$ і $3,1 \cdot 10^9$ циклів відповідно для більш короткого та тривалого періодів росту тріщини. Середня тривалість польоту вертольоту Ми-8 складає 0,38 годин. Отже, період розповсюдження втомних тріщин склав 45,6 і 53,5 годин для зубчастих коліс з напрацюванням в експлуатації 4496 і 6242 годин відповідно [5].

Другий тип руйнування розглядуваного зубчастого колеса був реалізований від одного з технологічних отворів недалеко від центрального отвору (рис.7) [5]. Спочатку у технологічного отвору виникала міжзеренна тріщина, а далі відбувалося розповсюдження

втомної тріщини на довжину 270 мм при діаметрі колеса 463 мм. При цьому, вертоліт здійснював польоти за другим типом його навантаження [3, рис. 1].

Рис. 7. Зруйноване зубчасте колесо вертольоту Ми-8 і здвоєні макролінії втомного руйнування. Величина h характеризує середній крок макроліній

Навантаження вертольоту здійснювалося через зовнішню підвіску вантажу, коли вертоліт знаходився у повітрі. Після завершення нетривалого перельоту з вантажем вертоліт вивільнявся від нього і здійснював переліт з метою повторного навантаження. Таким чином, блок з двох втомних ліній характеризував однотипне, повторюване навантаження вертольоту за один польотний цикл при його двократному знаходженні у повітрі.

На основі аналізу зламу, з врахуванням навантаженості вертольоту, була встановлена тривалість росту тріщини не менше, ніж 300 годин. З початку експлуатації вертоліт налітав 6686 годин, включаючи 458 годин після останнього ремонту. Розрахунок тривалості росту тріщини показує, що її розповсюдження в зубчастому колесі почалося після останнього ремонту [5].

Були зіставлені між собою відносні живучості зубчастих коліс для всього періоду експлуатації та по відношенню до останнього ремонту. Вони були відповідно $300/6686 - 0,045$ і $300/458 - 0,655$ або 4,5 і 65,5%. До моменту руйнування зубчасте колесо було піддано $1,68 \cdot 10^9$ циклів навантаження від числа його обертань у складі редуктора.

У редукторі ВР-8А мало місце руйнування зубчастого колеса з відділенням шматка розміром $27 \times 7 \times 10$ мм (рис. 8) [5].

Втомні тріщини зародилися у внутрішніх об'ємах матеріалу зуба від попередньо утвореного тут протяжного і розгалуженого розшарування матеріалу по металургійних дефектах у вигляді окисних плівок. Оцінка по регулярних макролініях тривалості росту втомної тріщини показала, що період росту тріщини склав біля 30 польотів. Така тривалість тріщини склала менше 0,3% від загального напрацювання зубчастого колеса 10200 польотів з розрахунку середньої тривалості польоту вертольоту 30 хвилин.

В експлуатації ще мало місце руйнування проміжної шестерні-сателіта редуктора ВР-14 вертольоту Ми-8МТВ. Руйнування шестерні полягало у відділенні від неї частини обода з зубом і відбулося практично до основи сусіднього з цим зубом, на полотні зубчастого колеса утворилася тріщина довжиною біля 110 мм, що йшла приблизно по хорді від зони відсутньої частини обода до маточини (рис. 9).

Рис. 8. Зруйноване проміжне зубчасте колесо № 6 редуктора ВР-8А вертольоту Ми-8 (а) і рельєф зламу зуба (б)

Рис. 9. Руйнування проміжної шестерні № 9 редуктора ВР-14 вертольоту Ми-8МТВ і діляниці з боку зубчастого вінця в районі зародження втомних тріщин

Встановлено, що руйнування зубчастого колеса є результатом утворення та подальшого злиття між собою двох втомних тріщин від западин зуба, який відділився. У вогнищі одної тріщини, що виникла попередньо, були діляниці міжзеренного розтріскування матеріалу, а в іншому вогнищі – металургійні дефекти матеріалу у вигляді окисних плівок.

Висновки. Контактні руйнування зубців є основною причиною відмов швидкохідних зубчастих коліс у добре змащуваних закритих передачах. Під час ремонту авіаційних двигунів із загальної кількості відбракованих зубчастих коліс до 85% відкидаються по причині контактних руйнувань зубців: вищерблення і відшарування, втомні руйнування.

При збільшенні напруження редуктора відбувається накопичення пошкоджуваності його деталей, яка по-різному проявляється у вигляді дефектів. Втомному руйнуванню деталей передують накопичення пошкоджуваності, яка зростає зі збільшенням часу роботи редуктора.

Виявлені основні причини пошкоджуваності та руйнування зубчастих передач вертольотних редукторів, місць розташування та зародження вогнищ втомних тріщин. розглянуті види контактних та втомних руйнувань, зумовлених різними причинами.

Динамічне навантаження дисків зубчастих коліс від їх обертання пошкоджує матеріал коліс в області багатоциклової втоми по причині повторюваності польотних циклів навантаження.

Всі експлуатаційні руйнування зубчастих коліс першої ступені редукторів ВР-8А вертольоту Ми-8, що мали місце, були пов'язані з наявністю в них дефектів матеріалу.

Прогресуюче вищерблення матеріалу, як правило, виникає у зубчастих коліс з твердими зубцями, розвивається з часом до значних розмірів і може викликати руйнування зубчастих коліс, а тому зубчасті колеса з таким вищербленням матеріалу на зубцях нездатні до подальшої експлуатації.

Відшарування або глибинне контактне руйнування матеріалу, що іноді має місце у зубчастих колесах з поверхнево-зміцненими (цементованими і загартованими, азотованими і т. п.) зубцями, значно небезпечніше поверхневого вищерблення матеріалу тому, що при цьому від зубців відділяються досить крупні ділянки зміцненого шару матеріалу, які можуть швидко вивести всю передачу з ладу.

Основними причинами контактних руйнувань зубців є: концентрація навантаження по довжині і профілю зубців, наявність залишкових розтягуючих напружень на робочих поверхнях зубців, несприятливі експлуатаційні пошкодження профілів зубців і несприятливі впливи на зубці змащувальної рідини.

Для підвищення плавності роботи зубчастих передач, яка впливає на точність позиціонування, зменшення зношуваності під час припрацювання, шуму, вилучення передчасного заїдання, в кінцевому рахунку – для підвищення ресурсу, очевидно, необхідно вилучити крайкову взаємодію зубців, яка викликає їх підвищене зношування. Ця вимога

особливо важлива для швидкохідних високонавантажених і високоресурсних передач, що підтверджується експериментальними і промисловими даними, приведеними в дослідженнях як вітчизняних так і зарубіжних авторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справочник; под ред. Э.Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение, 1982. – 375 с.
2. Шаповалов О.Л. Процеси в зубчастих передачах авіаційних редукторів та шляхи підвищення їх вібраційної міцності. / О. Шаповалов, Д. Колесник, О. Пилипенко // Технічні науки та технології. – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – №1(15). – С. 80-96. – ISSN 2411-5363 (Print). – ISSN 2519-4569 (Online).
3. Шаповалов О.Л. Навантаженість зубчастих передач вертольотних редукторів та їх напружено-деформований стан. / О. Шаповалов, Д. Колесник, О. Пилипенко // Технічні науки та технології. – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – №4(14). – С.41-54. – ISSN 2411-5363 (Print). – ISSN 2519-4569 (Online).
4. Gear Handbook. The Design Manufacture and Application of Gears. Darle W. Dudley. Editor Mc, Graw Hill Book Co. Inc. – New York, 1962.
5. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях: монография. –Уфа, 2003. – 804 с.
6. Шанявский А.А., Скворцов Г.В. // Труды ОРАП. – 1998. – Вып. № 10. – С. 106-116.
7. Пилипенко О. Вібраційна навантаженість та руйнування зубчастих передач вертольотних редукторів. / О. Пилипенко, Д. Колесник, А. Березняк, В. Шоха // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – Чернігів: Брагинець О.В., 2019. – Вип. № 2. – С.130-140. – ISSN 2706-7386. – DOI: 10.37701/dndivsovt.2.2019.18.
8. Shaniavski A.A., Skvortsov G.V. // Fatigue Fract. Engng, Mater. Struct. – 1999. – Vol. 22. – P 609-619.
9. Кобелева К.В. Обзор методов повышения долговечности авиационных зубчатых передач. / К.В. Кобелева, В.Р. Туктамышев // Аэрокосмическая техника. – Пермь: ПНИПУ, 2017. – № 50. – С. 128-138.
10. Кораблёв А.И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач. / А.И. Кораблёв, Д.Н. Решетов. –М.: Машиностроение, 1968. – 288 с.
11. Семенов М.Ю. Оценка сопротивления заеданию высоконагруженных зубчатых колёс на основе энергетической модели / М.Ю. Семенов, М.Ю. Рыжова // Технология машиностроения. – 2012. – № 5. – С. 64-69.

Пилипенко Олег Іванович

доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-0590-0107>
E-mail: opilip@ukr.net

Колесник Денис Миколайович

начальник відділення Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<http://orcid.org/0000-0001-8833-570X>
E-mail: denis1971@ukr.net

Oleg Pilipenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Lead Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-0590-0107>
E-mail: opilip@ukr.net

Denis Kolesnik

Chief of Section of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-8833-570X>
E-mail: denis1971@ukr.net

Березняк Анатолій Миколайович

старший науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна

<http://orcid.org/0000-0003-4081-9152>

E-mail: berezniak80@ukr.net

Шоха Вадим Миколайович

начальник відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна

<http://orcid.org/0000-0003-1950-0868>

+38 (093) 316-77-16

Anatoli Berezniak

Senior Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0003-4081-9152>

E-mail: berezniak80@ukr.net

Vadym Shokha

Chief of Section of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0003-1950-0868>

+38 (093) 316-77-16

**DAMAGING AND DESTRUCTION OF REDUCTION TRAINS OF MI-8 HELICOPTER
AND ITS MODIFICATIONS**

O. Pilipenko, D. Kolesnik, A. Berezniak, V. Shokha

The results of quantitative factographic study of the Mi-8 helicopter (its modifications) reduction trains with different types of gear coupling, the destruction of which occurred while in flight due to the presence of preliminary material damage at the stage of production of the gear wheels and during their operational employment are presented in a generalized form. Contact teeth destruction as the main cause of failures of high-speed gear wheels in well-lubricated enclosed gears are considered. The causes of the wearing and sticking of the teeth along their lateral surfaces as well as scoring and destruction depending on the origin of the cracks are revealed.

The main causes of damaging and destruction of helicopter reduction trains, locations and origination of fatigue cracks spots are identified. Different types of contact and fatigue destructions due to various reasons are considered.

Dynamic loading of gear wheels disks as a result of their rotation damages the material of the wheels in the area of multi-cycle fatigue due to the repeatability of flight load cycles.

Lamination or deep contact destruction of the material, which sometimes take place in gears with surface hardened (cemented, tempered, nitrided, etc.) teeth, are much more dangerous than surface destruction of the material since sufficiently large fractions of the hardened material layer are split away from the teeth that can quickly break down an entire gear train.

The main causes of contact teeth destruction are load concentration along the length and profile of the teeth, the presence of residual tensile stresses on the working surfaces of the teeth, adverse operational damage to the tooth profiles and negative effect of lubricating fluid on the teeth.

For a repaired gear train the cause of the uneven load distribution along the length of the teeth may be the poor assembly of the gear wheels and other transmission parts which leads to unsatisfactory contact of the gear teeth in the assembled unit.

The revealed peculiarities of the destruction process indicate regular crack proliferation from flight to flight. According to the operation conditions of the gear wheel, its regular extensive loading refers only to the full cycle of starting and stopping the reducer train or unloading the helicopter in flight, which in this case corresponds to the cycle of helicopter operation in one flight. Therefore, the number of detected fatigue lines corresponds to the number of helicopter flights.

To increase the smoothness of gear train running which affects positioning accuracy, reduce wear during running-in, decrease noise, eliminate early jamming, and ultimately, to increase the resource, it is necessary to eliminate the edge interaction of the teeth, which causes their excessive wear.

Keywords: gear trains and wheels of helicopter reducers, fatigue and contact destruction.