

УДК 621.831

Кравцов В. В.

аспирант Запорожского национального технического университета,
Запорожье, Украина, e-mail: ki70791@gmail.com

ВИДЫ КОНТАКТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГЛАВНЫХ ВЕРТОЛЕТНЫХ РЕДУКТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Цель работы. Недостаточное качество изготовления зубчатых передач в значительной степени ограничивает повышение характеристик вертолетных редукторов. Для повышения качества изготовления зубчатых колес главных вертолетных редукторов необходимо установить основные виды их контактных повреждений в процессе эксплуатации.

Методы исследования. Анализ контактных повреждений зубчатых колес главных вертолетных редукторов при визуальном осмотре после их эксплуатации.

Полученные результаты. В работе, на основании результатов дефектирования деталей главного вертолетного редуктора при капитальном ремонте и анализа контактных повреждений цементированных и азотированных зубчатых колес, установлены и рассмотрены основные виды повреждений. Причинами повреждений являются: повышенная концентрация нагрузки по длине и по профилю зубьев; высокие внешние перегрузки; повышенный тепловой эффект при шлифовании боковых поверхностей зубьев; искажение профиля боковых поверхностей зубьев; неправильный подвод смазки к зацеплению; наличие ε - фазы в азотированном слое; попадание посторонних твердых частиц в зацепление зубьев; заниженная глубина поверхностно упрочненного слоя зубьев; большая концентрация нитридов по границам зерен в азотированном слое; заниженная твердость упрочненного слоя зубьев и т.д.

Научная новизна. В данной работе установлены и представлены основные виды контактных повреждений зубчатых колес главных вертолетных редукторов в процессе их эксплуатации и выполнена их классификация по причинам возникновения.

Практическая ценность. На основании установленных видов контактных повреждений зубчатых колес главных вертолетных редукторов и причин их возникновения, возможно их предотвращать конструктивными и технологическими мероприятиями в процессе производства.

Ключевые слова: работоспособность зубчатых передач; контактная прочность; контактные повреждения; зубчатые колеса; главный вертолетный редуктор.

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность зубчатых передач главных вертолетных редукторов может снижаться в процессе эксплуатации из-за возникновения: несплошностей материала на рабочих поверхностях деталей; контактных повреждений поверхностных слоев материала; износа и заедания деталей передачи, повышенных уровней вибрации и шума; увеличения энергетических потерь; различных повреждений в механизмах зубчатых передач.

В зависимости от вида повреждения и ремонтпригодности зубчатой передачи в целом и ее отдельных частей различают полную и частичную утрату их работоспособности. В последнем случае работоспособность зубчатой передачи можно поддерживать на требуемом уровне путем предупреждения, своевременного обнаружения и устранения повреждений в процессе эксплуатации и ремонта.

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В практике эксплуатации вертолетной техники одной из причин отказов является нарушение

устойчивой работы главного редуктора, что сопровождается аварийными ситуациями.

Зубчатые передачи относятся к числу наиболее ответственных и сложных элементов вертолетных редукторов, определяющих во многом их технический уровень и работоспособность. В настоящее время недостаточное качество зубчатых передач в значительной степени ограничивает повышение характеристик вертолетных редукторов. Технологии изготовления зубчатых передач главных вертолетных редукторов рассмотрены в ограниченном числе работ, изданных еще в 60–80-е годы прошлого столетия.

Контактная прочность – важнейшее условие работоспособности и надежности зубчатых колес главных вертолетных редукторов, которое определяет сопротивляемость поверхностных слоев материала зубьев контактным напряжениям. Основной причиной выхода из строя зубчатых колес являются контактные повреждения.

Несмотря на достигнутые успехи в изучении проблемы образования контактных повреждений зубчатых колес главных вертолетных редукторов, разработка мер по их предотвращению остается актуальной [1]–[3].

© Кравцов В. В., 2018

DOI 10.15588/1727-0219-2018-1-10

2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – установить основные виды контактных повреждений зубчатых колес главных вертолетных редукторов.

3 ВИДЫ КОНТАКТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Анализируя контактные повреждения цементованных и азотированных прямозубых зубчатых колес, установлены основные виды повреждений, причинами которых являются:

- повышенная концентрация нагрузки по длине и по профилю зубьев;
- высокие внешние перегрузки;
- повышенный тепловой эффект при шлифовании боковых поверхностей зубьев;
- искажение профиля боковых поверхностей зубьев в процессе эксплуатации;
- неправильный подвод смазки к зацеплению;
- наличие ε - фазы в азотированном слое;
- попадание посторонних твердых частиц в зацепление зубьев.

Контактные повреждения, обусловленные повышенной концентрацией нагрузки по длине и профилю зубьев, являются наиболее распространенными. Это объясняется недостаточной прирабатываемостью твердых зубьев.

Из-за упругих деформаций, погрешностей изготовления, упругих смещений в подшипниках и взаимных угловых перемещений, зубчатые колеса перекашиваются относительно друг друга. Концентрация нагрузки по длине зубьев увеличивается при:

- увеличении угла взаимного перекоса валов сопряженных зубчатых колес;
- уменьшении жесткости валов и валов-шестерен;
- увеличении ширины зубчатых венцов.

Чем больше концентрация нагрузки по длине зубьев, тем более сосредоточенный характер имеют возникающие при этом контактные повреждения. Чаще всего контактные повреждения такого вида располагаются у одного из краев зуба (рис. 1, 2).

При перекосе зубьев в плоскости, касательной к их боковым поверхностям в месте контакта, возможно возникновение срединного сосредоточенного контакта и срединных локальных контактных повреждений материала на зубьях (рис. 3).



Рисунок 1. Контактные повреждения материала цементованных и закаленных зубьев при наличии небольшого взаимного перекоса в зацеплении



Рисунок 2. Контактные повреждения материала цементованных и закаленных зубьев при наличии значительного взаимного перекоса в зацеплении

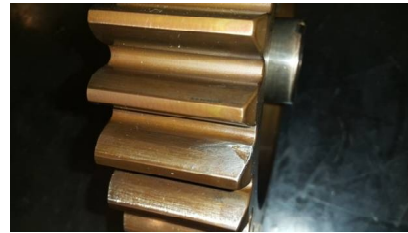


Рисунок 3. Контактные повреждения материала цементованных и закаленных зубьев при наличии перекоса в плоскости, касательной к их боковым поверхностям в месте контакта

Концентрация нагрузки по длине зубьев может быть вызвана неровностями рабочих поверхностей зубьев, которые были образованы при их окончательной механической обработке. В таком случае сопряжение зубьев происходит не по всей длине, а отдельными, изолированными друг от друга, пятнами. Такой характер контакта приводит к перегрузке контактирующих участков зубьев. Возникающие при этом контактные повреждения материала ориентируются по выступам неровностей (рис. 4).

К категории локальных контактных повреждений также относятся краевые сколы материала на зубьях колес (рис. 5). Контактная прочность азотированных зубьев ниже цементованных и закаленных, но из-за относительно меньшей толщины азотированного слоя они более чувствительны к перегрузкам и к неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий зубьев. Известно, что кратковременные перегрузки снижают долговечность азотированных зубчатых колес в 2–7 раз.

При азотировании зубьев только по профилирующим поверхностям остаточные напряжения сжатия у торцов зубьев резко снижаются



Рисунок 4. Выкрашивание материала на зубьях колеса при волнистом зацеплении

(рис. 6) и упрочняющее влияние азотирования на контактную прочность поверхностных слоев материала зубьев около их торцов ослабевает.



Рисунок 5. Скол материала на зубьях азотированного колеса

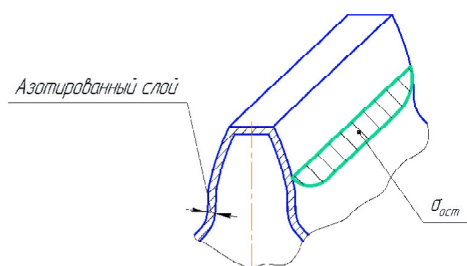


Рисунок 6. Эпюра распределения остаточных сжимающих напряжений $\sigma_{ост}$ в азотированном слое вдоль зуба при неазотированных торцах

Этим объясняются имеющие место в процессе эксплуатации сколы материала на профильных кромках азотированных зубьев. Чтобы повысить контактную прочность зубьев при неравномерном распределении нагрузки по их длине, необходимо азотировать не только профильные поверхности, но и торцы зубьев.

Также существуют контактные повреждения, вызванные резко выраженным кромочным контактом зубьев (рис. 7).

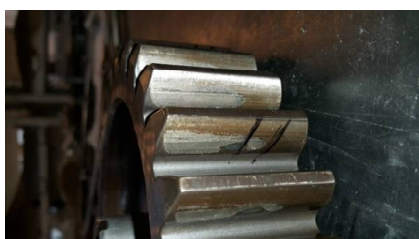


Рисунок 7. Контактное повреждение материала цементированных и закаленных зубьев при наличии резко выраженного кромочного контакта

Контактные повреждения, обуславливаемые внешними перегрузками. Известно, что для термически улучшенных зубчатых колес кратковременные перегрузки не всегда являются причиной контактных разрушений, так как до определенной величины такие перегрузки способствуют повышению сопротивления усталости поверхностных слоев материала зубьев.

С возрастанием величины нагрузки и продолжительности ее действия, размеры язвин и общей площади, занимаемой контактными напряжениями, увеличиваются.

Контактные повреждения, обусловленные тепловым эффектом шлифования боковых поверхностей зубьев, встречаются преимущественно у цементованных и закаленных колес в связи с образованием при этом структурных концентраторов напряжений.

Выкрашивание материала на цементированных и закаленных зубьях, проточенных с образованием структурных концентраторов напряжений, возникает, в отпущенных зонах зуба, а развитие контактных повреждений в начальных стадиях полностью ориентируется в направлении шлифовочных штрихов.

Грубое шлифование боковых поверхностей цементованных и закаленных зубьев иногда приводит к образованию крупных локальных контактных повреждений (рис. 8), напоминающих отслаивания поверхностных слоев материала на азотированных зубьях. Такие контактные повреждения могут располагаться на любом участке зуба. При этом они начинаются от поперечных трещин шлифовочного происхождения.

Контактные повреждения, обусловленные искажением профилей боковых поверхностей зубьев в процессе эксплуатации, имеют место даже при достаточной исходной контактной прочности материала зубьев. Чаще всего они отчетливо проявляются на неподвижных шестернях высоконапряженных планетарных передач, а также на ведомых колесах ряда простых передач.



Рисунок 8. Локальное контактное повреждение материала на рабочей поверхности цементированного и закаленного зуба

Образованию таких контактных повреждений поверхностных слоев материала способствуют вполне закономерные искажения профилей рабочих поверхностей зубьев. При этом в полюсной части зуба возникает отчетливо видимое продольно ориентированное ребро, а в основании — продольно ориентированное углубление. У фланкированных колес при нефланкированных парных колёсах, в случае увеличенной глубины фланка, в верхней части головок зубьев имеется зона, не принимавшая участия в зацеплении (рис. 9).

Образование продольного ребра в полюсной части рабочей поверхности зубьев связано с не-

равномерным изнашиванием и пластическим деформированием их поверхностных слоев материала. Пластические деформации зубьев таких шестерен направлены к полюсу зацепления.

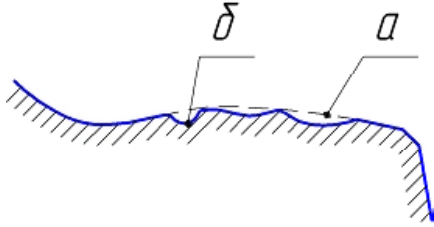


Рисунок 9. Искажение контура рабочей боковой поверхности зубьев шестерни, возникающие в процессе эксплуатации: *a* – начальный контур, *b* – искаженный контур

Низкое значение фактического коэффициента перекрытия в зацеплении, обусловленное повышенной глубиной фланкирования, приводит к ударному входу колес в зацепление. Это, в свою очередь, ускоряет изнашивание и пластическое деформирование поверхностных слоев материала зубьев.

При увеличении длительности эксплуатации зубчатой передачи, развиваются отмеченные искажения профилей рабочих боковых поверхностей зубьев. В результате, радиус кривизны в полюсной части зубьев непрерывно уменьшается, а удельные контактные нагрузки в этой зоне возрастают.

Если фактические напряжения от изгиба в опасном сечении зуба и в зоне расположения начального контактного разрушения ниже предела прочности материала, то поломки зубьев при дальнейшей эксплуатации колес не происходит. Контактное повреждение при этом распространяется на значительную часть боковой поверхности зубьев и может охватить даже всю активную часть боковой поверхности. Одновременно с этим происходит изнашивание выступающих участков поврежденной поверхности и их смятие, а за счет этого повреждения выглаживаются. Профиль боковой поверхности зубьев с течением времени становится вогнутым.

Подобный механизм развития контактных повреждений встречается на зубьях азотированных неподвижных колес внешнего зацепления планетарных передач при зацеплении их с цементированными и закаленными зубьями одновременно нескольких сателлитов. Контактные повреждения зубьев сателлитов в таком случае незначительны, что объясняется относительно меньшей частотой нагружений их в сравнении с зубьями неподвижной шестерни.

Также имеют место контактные повреждения и по другому продольно ориентированному ребру на зубьях, образующемуся в месте выхода уг-

лубления в основании зуба на его боковую поверхность и располагающемуся против полюсного ребра. Такие контактные повреждения возникают как на цементованных, так и на азотированных колесах.

Контактные повреждения, обусловленные неправильным подводом смазки к зацеплению колес, встречаются в быстроходных передачах (при окружных скоростях $v_{окр.} \approx 100$ м/сек и более) при струйной смазке зубьев. По внешнему виду они напоминают распределенное выкрашивание материала, однако место их расположения не характерно для обычно наблюдаемых выкрашиваний (рис. 10).

Дефекты располагаются только на головках зубьев, на рабочих их сторонах, в зонах воздействия на них струй масла из форсунок, а занимаемая ими зона ограничивается приблизительно круговым сегментом с основанием у вершины зуба. Интенсивность поражения дефектом постепенно нарастает в направлении от начальной окружности шестерни к вершинам зубьев. Дефекты представляют собой совокупность микролуннок в сочетании с абразивным износом выступов между ними. В некоторых из них обнаруживаются микротрещины, указывающие на развитие выкрашивания в поверхностных слоях материала зубьев.



Рисунок 10. Зубчатое колесо с контактными повреждениями на зубьях от неправильного подвода смазки

Контактные повреждения, обусловленные наличием ϵ - фазы в поверхностном слое материала зубьев, встречаются у колес с азотированными зубьями и распределяются по всей активной части боковой поверхности зубьев. Глубина таких повреждений и ϵ - фазы незначительна.

Контактные повреждения, связанные с попаданием посторонних твердых частиц в зацепление зубьев, можно наблюдать у колес с поверхностью упрочненными зубьями (цементированными, азотированными и др.).

Твердые посторонние частицы, попавшие в зацепление зубьев, вдавливаются в поверхностный слой материала и вызывают местные контактные перегрузки.

При этом вокруг контура вдавленной частицы материал зуба, за счет пластического деформирования, несколько вспучивается, а после

образования лунки контактного повреждения обминается и изнашивается. Последние обстоятельства приводят к образованию видимой светлой каймы вокруг контура образовавшейся лунки, что и отличает данный вид контактного разрушения от всех других.

Кроме перечисленных видов контактных повреждений материала иногда встречаются и другие, которые обусловлены:

- заниженной глубиной поверхностно упрочненного слоя зубьев;
- большой концентрацией нитридов по границам зерен в азотированном слое;
- заниженной твердостью упрочненного слоя зубьев и т. д. [4].

ВЫВОДЫ

Установлены и рассмотрены основные виды контактных повреждений зубчатых колес главных вертолетных редукторов, причинами которых являются:

- повышенная концентрация нагрузки по длине и по профилю зубьев;
- высокие внешние перегрузки;
- повышенный тепловой эффект при шлифовании боковых поверхностей зубьев;
- искажение профиля боковых поверхностей зубьев в процессе эксплуатации;
- неправильный подвод смазки к зацеплению;

- наличие ε - фазы в азотированном слое;
- попадание посторонних твердых частиц в зацепление зубьев.

Возможность появления таких повреждений зубчатых колес главных вертолетных редукторов предотвращается конструктивными и технологическими мероприятиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учеб. пособие / под ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. – СПб. : Профессия, 2007. – 832 с.
- [2]. Мнацаканян В. У. Нарезание зубчатых колес: учеб. пособие / В. У. Мнацаканян, А. П. Гаевой, П. Ф. Бойко. – Старый Оскол : ТНТ, 2015. – 96 с.
- [3]. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий / Н. Н. Сиротин, Е. Ю. Марчуков, А. С. Новиков, А. Г. Пайкин и др. – 2-е изд. – М. : Наука, 2011. – 431 с.
- [4]. Кораблев А. И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1968. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 28.03.2018

Кравцов В. В. аспирант Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: ki70791@gmail.com

ВИДИ КОНТАКТНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ГОЛОВНИХ ВЕРТОЛЬОТНИХ РЕДУКТОРІВ В ПРОЦЕСІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Мета роботи. Недостатня якість виготовлення зубчастих передач в значній мірі обмежує підвищення характеристик вертольотних редукторів. Для підвищення якості виготовлення зубчастих коліс головних вертольотних редукторів необхідно встановити основні види контактних пошкоджень в процесі експлуатації.

Методи дослідження. Аналіз контактних пошкоджень зубчастих коліс головних вертольотних редукторів при візуальному огляді після їх експлуатації.

Отримані результати. В роботі, на основі результатів дефектування деталей головного вертольотного редуктора при капітальному ремонті та аналізу контактних пошкоджень цементованих та азотованих зубчастих коліс, встановлені та розглянуті основні види пошкоджень. Причинами пошкоджень ε : підвищена концентрація навантаження по довжині та по профілю зубів; високі зовнішні перевантаження; підвищений тепловий ефект при шлифуванні бокових поверхонь зубів; спотворення профілю бокових поверхонь зубів; неправильне підведення мастила до зчеплення; наявність ε - фази в азотованому шарі; потрапляння сторонніх часток у зчеплення зубів, занижена глибина поверхнево зміцненого шару зубів; велика концентрація нитридів по межі зерен в азотованому шарі; занижена твердість зміцненого шару зубів тощо.

Наукова новизна. В даній роботі встановлені та представлені основні види контактних пошкоджень зубчастих коліс головних вертольотних редукторів в процесі їх експлуатації та виконана їх класифікація за причинами виникнення.

Практична цінність. На основі встановлених видів контактних пошкоджень зубчастих коліс головних вертольотних редукторів та причин їх виникнення, можливо їх запобігати конструктивними та технологічними заходами в процесі виробництва.

Ключові слова: працездатність зубчастих передач; контактна міцність; контактні пошкодження; зубчасті колеса; головний вертольотний редуктор.

Kravtsov V. V. Postgraduate student of Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ki70791@gmail.com

TYPES OF CONTACT DAMAGES OF GEAR WHEELS OF THE MAIN HELICOPTER GEARBOXES IN OPERATION

Purpose. Insufficient quality of gear wheels production extensively restricts the improvement of characteristics of helicopter gearboxes. For improvement of production quality of gear wheels of the main helicopter gearboxes, it is necessary to establish main types of their contact damages in operation.

Research methods. Visual analysis of contact damages of gear wheels of the main helicopter gearboxes after their operation.

Findings. In the paper, based on the results of inspection of the parts of the main helicopter gearboxes during overhaul and based on the analysis of contact damages of the cemented and nitrided gear wheels, the main types of damages are established and considered. The reasons of damages are: the increased concentration of loading over the length and on the profile of teeth; high external overloads; the increased thermal effect when grinding side surfaces of teeth; shape distortion of teeth side surfaces; the wrong supply of lubricant to the gear mesh; existence of ϵ -phase in the nitrided layer; intrusion of foreign solid particles in gear mesh; the underestimated depth of surface strengthened layer of teeth; high concentration of nitrides on grain boundaries in the nitrided layer; the underestimated hardness of the strengthened layer of teeth, etc.

Scientific novelty. In this paper, the main types of contact damages of gear wheels of the main helicopter gearboxes in operation are established and presented. Also classification by their occurrence reasons is executed.

Practical value. Based on the established types of contact damages of gear wheels of the main helicopter gearboxes and the reasons of their occurrence, it is possible to prevent them by design and technological means in the course of production.

Keywords: operability of gear drives; contact durability; contact damages; gear wheels; main helicopter gearbox.

REFERENCES

- [1]. Starzhinskogo M. M., Kane V. E. (2007). Tehnologija proizvodstva i metody obespechenija kachestva zubchatyh koles i peredach: ucheb. Posobie SPb: Professija, 832.
- [2]. Mnacakanjan V. U., Gaevoj A. P., Bojko P. F. (2015). Narezanie zubchatyh koles: ucheb. Posobie. Staryj Oskol: TNT, 96.
- [3]. Sirotin N. N., Marchukov E. Ju., Novikov A. S., Pajkin A. G. (2011). Osnovy konstruirovaniya, proizvodstva i jekspluatacii aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok v sisteme CALS tehnologij. 2-e izd., Moscow: Nauka, 431.
- [4]. Korablev A. I., Reshetov D. N. (1968). Povyshenie nesushhej sposobnosti i dolgovechnosti zubchatyh peredach. Moscow: Mashinostroenie, 288.