

УДК 519.246.539.3/4 + 629.7

ТРИБОДИАГНОСТИКА ДЕТАЛЕЙ РЕДУКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2015 Л. А. Шабалинская¹, В. В. Голованов¹, Е. С. Бубнова¹,
Л. В. Милинис¹, Е. С. Проданов²

¹Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И.Баранова, г. Москва

²Открытое акционерное общество «Климов», г. Санкт-Петербург

Рассмотрена трибодиагностика технического состояния деталей редукторной установки летательного аппарата (на примере коробки самолётных агрегатов (КСА)). Используются методы испытания параметров продуктов изнашивания: ASTM D 6595 – 00 для атомно-эмиссионного спектрального анализа, ASTM D 6786 – 02 для морфологического и дисперсионного анализа частиц износа, ASTM D 7690 – 11 для феррографического анализа на аналитическом и прямопоказывающем феррографах. Путём статистического анализа 120 проб масла, отобранных в процессе стендовых испытаний из десяти редукторов пяти коробок самолётных агрегатов КСА-33М, определены экспериментальные и расчётные значения повышенных и предельно допустимых значений концентраций элементов и частиц продуктов изнашивания в смазочном масле. Для определения предельно допустимых, повышенных и нормальных значений диагностических параметров изнашивания и проведения их нормирования был выполнен статистический анализ проб. В результате были определены расчётные значения повышенных и предельно допустимых концентраций элементов износа и частиц изнашивания в смазочном масле коробки приводов самолётных агрегатов КСА-33М. На основании проведённого исследования, а также данных, полученных ранее, разработан метод трибодиагностики деталей коробки самолётных агрегатов КСА-33М, который позволяет проводить оценку её технического состояния без разборки и снятия с летательного аппарата, а при наличии каких-либо отклонений от нормы прогнозировать наработку её до аварийного состояния.

Коробка самолётных агрегатов, редуктор, трибодиагностика, продукты изнашивания в масле, частицы износа, спектральный анализ, феррография, дисперсионный анализ.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-222-227

Настоящая работа направлена на обеспечение раннего диагностирования технического состояния деталей редукторных установок типа коробок самолётных агрегатов (КСА-2, КСА-3, КСА-54 и др., применяемых в составе силовых установок для самолётов МиГ-29 и его модификаций) путём применения метода трибодиагностики.

Для проведения оценки технического состояния узлов трения методом трибодиагностики необходимо иметь нормы предельно допустимых, повышенных и нормальных значений диагностических параметров (ДП) продуктов изнашивания в масле.

При этом имеются в виду два обстоятельства:

1) диагностическими параметрами выбираются концентрации элементов химического состава частиц износа (C_{Σ} , г/т) и концентрации частиц в масле по видам изнашивания ($C_{\text{усталостное}}$, $C_{\text{скольжения}}$, $C_{\text{микрорезания}}$, ШТ./мл);

2) значения повышенных концентраций (ПК) элементов химического состава частиц износа и их количества являются такими, при которых редукторная установка ставится на особый контроль, а значения предельно допустимых концентраций (ПДК) становятся такими, при которых она снимается с эксплуатации.

Целью работы является разработка методических рекомендаций по трибодиагностике деталей коробки самолётных агрегатов КСА-33М – сдвоенной выносной коробки самолётных агрегатов, входящей в состав силовой установки самолётов МиГ-29К/КУБ.

Для достижения поставленной цели была проведена работа по исследованию кинетики процессов изнашивания деталей опытных образцов КСА-33М ОП-3, ОП-7, ОП-10, ОП-11 в процессе 360-часовых и КСА-33М ОП-12 в процессе 1200-часовых

длительных стендовых испытаний на ресурс 1000 часов.

Были использованы методы испытания параметров продуктов изнашивания, соответствующие: ASTM D 6595 -00 для атомно-эмиссионной спектроскопии (Spectroil M, Spectro Inc), ASTM D 6786 – 02 для морфологического и дисперсионного анализа частиц износа (LaserNet Fine C, Spectro Inc.), ASTM D 7690 – 11 для феррографического анализа на аналитическом (T2FM, Spectro Inc.) и прямопоказывающем (Predict DR III) феррографах.

В процессе исследования были использованы пробы масла ВНИИ НП 50_1_4у, отобранные при стендовых испытаниях пяти опытных образцов КСА-33М из правого и левого редукторов, и сведения по трибологическим аспектам, результатам разборки, дефектации и микрообмера объектов исследования. Испытания всех КСА-33М проводились на масле ВНИИ НП 50-1-4у.

Анализ результатов спектрального анализа, полученных на приборе Spectroil M для проб масла ВНИИ НП 50-1-4у, отобранных из блока редукторов коробки приводов КСА- 33М ОП12, при 1200 - часовых испытаниях, представленный на рис. 1 (в качестве примера только для правого редуктора), показывает характер протекания нормальных процессов изнашивания деталей, содержащих железо, медь, олово и цинк. Оценка кинетики изнашивания поверхностей пар трения в правом и левом редукторах КСА-33М ОП12 методом атомно-эмиссионной спектроскопии выявила следующие диапазоны концентраций основных элементов продуктов износа и скорости изнашивания в области дисперсной фракции частиц $d_{эф} \leq 10$ мкм:

- по железу: $C_{Fe} = (0,03 - 8,1)$ г/т
и $V_{Fe} = (2 - 2,88)$ г/т/ч;
- по меди: $C_{Cu} = (0,2 - 3,33)$ г/т
и $V_{Cu} = (0,16 - 1,88)$ г/т/ч.

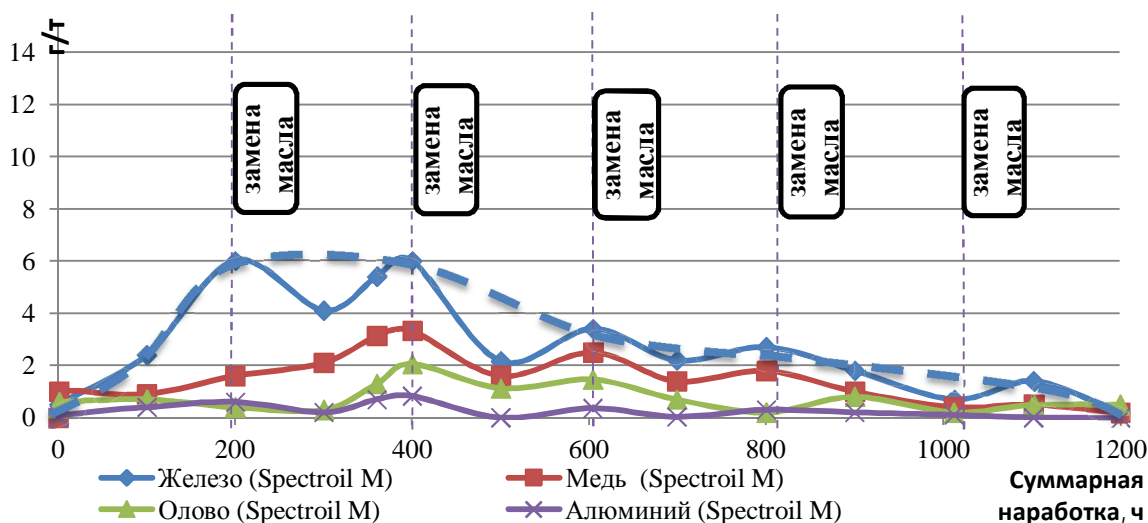


Рис. 1. Кинетика процессов изнашивания деталей КСА-33М ОП-12 в процессе 1200 - часовых испытаний

Кинетика процессов изнашивания деталей КСА-33М по результатам рентгенолюминесцентного анализа (АДК «Призма») и атомно-эмиссионного анализа (Spectroil M), в случаях нормальной эксплуатации (КСА-33М ОП-12) и выявленного дефекта (КСА-33М ОП-10, этап 1), показана на рис. 2. Видно возрастание концентрации железа при наработке 175 ч от 4,73 г/т до 12,9 г/т за 25 ч и далее от

концентрации железа 12,9 г/т при наработке 195 ч до концентрации 39,2 г/т при наработке 265 ч, когда произошёл отказ. Следовательно, можно сказать, что от предаварийного состояния со значением концентрации железа в масле 13,9 г/т до аварийного состояния, возникшего при содержании железа 39,2 г/т, прошло 70 ч.

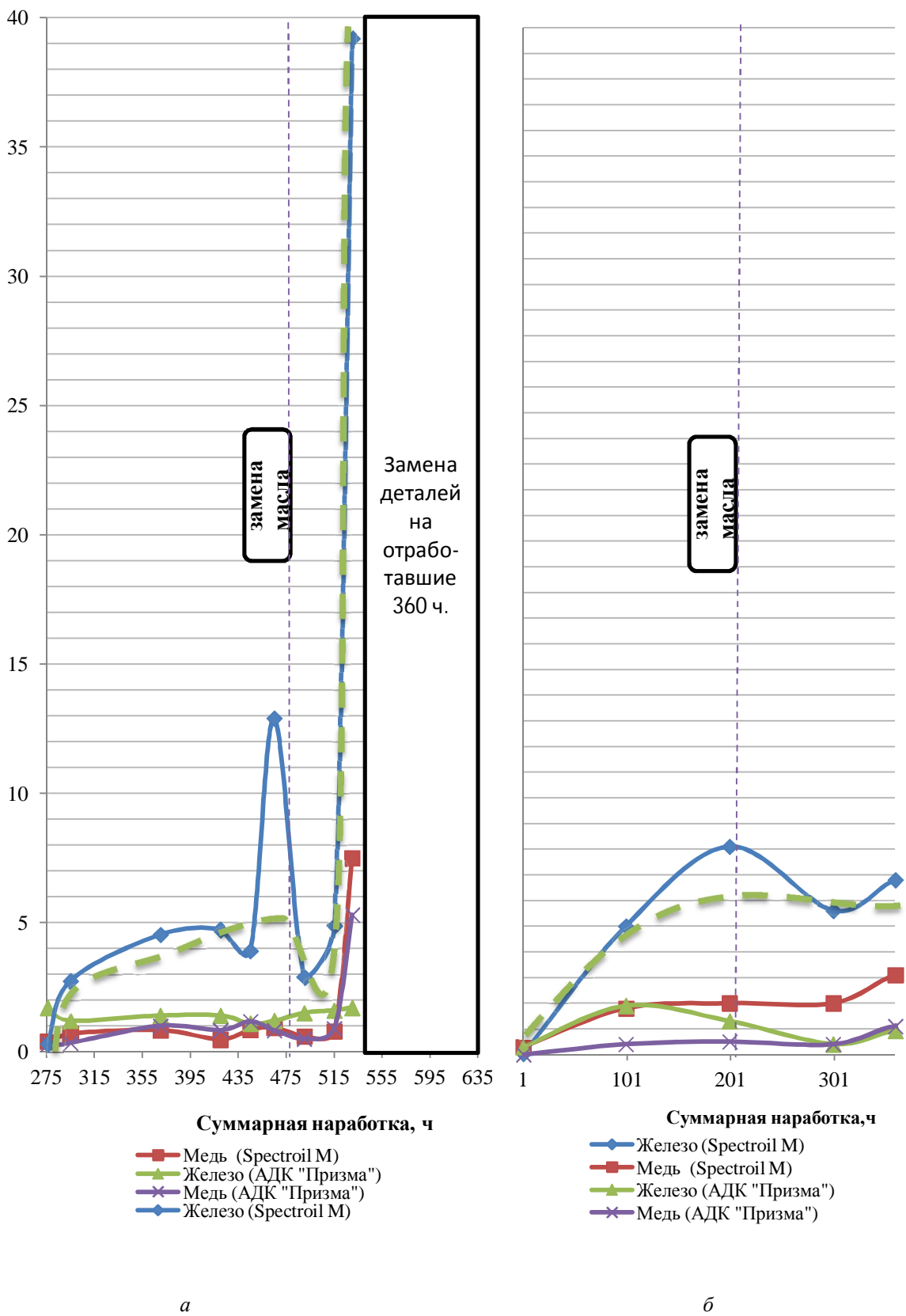


Рис. 2. Кинетика процессов изнашивания деталей КСА-33М ОП-10 (а) и ОП-12 (б)

По результатам морфологического анализа частиц износа дисперсной фракции в тех же пробах масла ВНИИ НП 50-1-4у, полученным на классификаторе частиц износа LaserNet Fines C (Spectro Inc.) ($d_{3\phi} \geq 20$ мкм), можно сделать вывод, что в процессе стендовой эксплуатации КСА-33М наиболее интенсивный темп изнашивания имеют интенсивный износ при трении скольжения (Severe Sliding Wear (C_{SSW})) и усталостный износ (Fatigue Wear ($C_{FW} -_{FW}$)).

Для определения предельно допустимых, повышенных и нормальных значений ДП изнашивания и проведения их нормирования был выполнен статистический анализ 120 проб, отобранных из десяти редукторов пяти КСА-33М. В результате были определены расчётные значения повышенных и предельно допустимых концентраций элементов износа и частиц изнашивания в смазочном масле коробки приводов самолётных агрегатов КСА-33М (табл.1).

Таблица 1. Результаты расчёта характеристик диагностических параметров КСА-33М

№ п/п	Наименование параметра	CFe	CCu	CCW	CSSW	CFW
1	Математическое ожидание (среднее статистическое) - $m^{(*)}$, г/т, шт./мл.	2,71	0,68	13,66	24,21	20,07
2	Среднее квадратичное отклонение $\sigma^{(*)}$ от математического ожидания, г/т, шт./мл.	3,58	1,01	8,88	17,14	17,84
3	Повышенная концентрация, г/т, шт./мл.	13,48	3,70	40,29	75,63	73,58
4	Предельно допустимая концентрация, г/т, шт./мл.	20,65	5,72	58,05	109,92	109,26

Сравнение расчётных данных повышенных и предельно допустимых значений диагностических параметров (г/т и шт./мл) с экспериментальными, представленными на рис. 2, показывает, что они могут быть рекомендованы для подконтрольной эксплуатации КСА-33М.

По результатам феррографического анализа частиц износа в тех же пробах масла наблюдалась типичная для всех рассмотренных образцов КСА-33М картина, показывающая то, что ведущим процессом изнашивания в обоих редукторах КСА-33М является усталостное выкрашивание.

На феррограммах проб масла с наработкой не более 800 часов количество частиц выкрашивания незначительное (до 10 шт.), и их размер не превышает 20 мкм. При дальнейшей наработке интенсивность изнашивания увеличивается, о чём свидетельствует появление более крупных частиц усталостного выкрашивания: в пробе масла с наработкой в 1012 часов – до 55 мкм, в пробе масла с наработкой в 1200 часов – до 70 мкм. Начинается образование усталостных микротрещин в подшипниках качения (появление сферических

частиц размером до 6 мкм). Процесс развития усталостных микротрещин в зубчатых зацеплениях, как правило, сопровождается появлением сферических частиц большего размера (до 10-15 мкм).

Для того, чтобы выявить начало этапа развития усталостного выкрашивания (питтинга) на поверхностях зубьев шестерён и подшипников, необходимо учитывать и такой диагностический параметр трибодиагностики, как форма, цвет и размер частиц износа по микрофотографиям феррограмм или фильтрограмм. Характеристики этого параметра выявляются путём аналитической работы с Атласом частиц износа [1].

На основании проведённого исследования, а также данных, полученных ранее [2,3], авторами разработан метод трибодиагностики деталей коробки самолётных агрегатов КСА-33М, который позволяет проводить оценку её технического состояния без разборки и снятия с летательного аппарата, а при наличии каких-либо отклонений от нормы прогнозировать наработку её до аварийного состояния.

Библиографический список

1. Wear Particle Atlas. Version 2.0., Australia, Lubrisoft, 1997.
2. Степанов В.А. Особенности диагностирования усталостного выкрашивания поверхностей трения подшипников качения и зубчатых передач газотурбинных двигателей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 9. С. 3-6.
3. Шабалинская Л.А., Милинис Л.В., Жук В.В., Дробот С.И. Разработка и стандартизация диагностики узлов трения в машинах и механизмах методом феррографии // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы машиноведения: Трибология – машиностроению». Т. 1. М.: ИМАШ РАН, 2012. С. 198-202.

Информация об авторах

Шабалинская Людмила Александровна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: tribochem2013@yandex.ru. Область научных интересов: трибодиагностика, трибофизика.

Голованов Виктор Васильевич, начальник отдела авиационных приводов, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: vvg@ciam.ru. Область научных интересов: трибодиагностика, исследования в обеспечении безопасности эксплуатации авиационной техники.

Бубнова Елена Сергеевна, инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: bubnova-

elena2008@yandex.ru. Область научных интересов: трибодиагностика, избирательный перенос при трении.

Милинис Людмила Васильевна, инженер-исследователь, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: quality@ciam.ru. Область научных интересов: трибодиагностика, атомно-эмиссионная спектроскопия, феррография.

Проданов Евгений Степанович, заместитель главного конструктора, Открытое акционерное общество «Климов», г. Санкт-Петербург. E-mail: evgenyprodanov@yandex.ru. Область научных интересов: трибодиагностика и триботехника деталей энергетических установок летательных аппаратов.

TRIBODIAGNOSTICS OF AIRCRAFT REDUCTION GEAR ELEMENTS

© 2015 L. A. Shabalinskaia¹, V. V. Golovanov¹, E. S. Bubnova¹,
L. V. Milinis¹, E. S. Prodanov²

¹Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation
²Joint Stock Company «Klimov», Sankt-Petersburg, Russian Federation

The paper is devoted to the tribodiagnostics of the technical condition of aircraft reduction gear elements (exemplified by the aircraft gear box). The following methods of testing the parameters of wear products are used: atomic-emission spectroscopy (ASTM D 6595-00), ferrography (ASTM D7690 – 11), dispersion and morphological analysis (ASTM D – 6786 – 002). Experimental and design increased and admissible-limit values of concentrations of wear product elements and particles in the lubricant oil have been determined by statistical analysis of 120 lubricant samples selected in the process of rig testing of ten gears of five KSA-33M accessory gear boxes. Statistical analysis of the samples has been carried out to determine the maximum permissible, increased and normal values of diagnostic parameters of wear and to carry out their standardization. As a result,

design values of increased concentration (IC) and maximum permissible concentration (MPC) of wear elements and particles in the lubricant oil of the KSA-33M accessory gear box have been found. A method of tribodiagnostics of components of the KSA-33M accessory gear box has been developed on the basis of the research carried out and the data obtained earlier. The method makes it possible to assess the technical condition of the part without its disassembly and removal from the aircraft, and, in case of any deviations from the norm, to predict its running hours before the state of emergency.

Aircraft gear box, friction, tribodiagnostics, ferrography, atomic- emission spectrometry, types of wear, wear particles, dispersion analysis.

References

1. Wear Particle Atlas. Version 2.0., Australia, Lubrisoft, 1997.
2. Stepanov V.A. Tribological testing and diagnostics. *Friction and lubrication in machines and mechanisms*. 2006. No 9. P. 3-6. (In Russ.)
3. Shabalinskaia L.A., Milinis L.V., Juk V.V., Drobot S.I. The research and standardization into diagnostics of friction pairs in machines and mechanisms. *Tribology for mechanical engineering*. V. 1. Moscow: Institute of Machines Science Publ., 2012. P. 198-202. (In Russ.)

About the authors

Shabalinskaia Lyudmila Alexandrovna, Doctor of Science (Chemistry), Senior Researcher (Physical Chemistry), Head of the Department of Tribology, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: tribochem2013@yandex.ru. Area of Research: tribology, tribophysics.

Golovanov Victor Vasilievich, Head of Department of aviation drives, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: vyg@ciam.ru. Area of Research: tribodiagnostics, safety of operation of aeronautical equipment.

Bubnova Elena Sergeevna, Master Student, first-rank engineer, the Department of Tribology, Central Institute of Aviation

Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: bubnova-elena2008@yandex.ru. Area of Research: tribodiagnostics, selective transfer in friction.

Milinis Lyudmila Vasilievna, research engineer, the Department of Tribology, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: quality@cjam.ru. Area of Research: tribodiagnostics, ferrography, atomic emission spectroscopy.

Prodanov Evgeny Stepanovich, Deputy Chief Designer, Joint Stock Company «Klimov», St. Petersburg, Russian Federation. E-mail: evgenyprodanov@yandex.ru. Area of Research: tribodiagnostics, triboengineering of aircraft power installation components.