

УДК 543.422.8

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ КОНТРОЛЬ НЕОДНОРОДНОСТИ ОСАДКОВ ОТРАБОТАННОГО МАСЛА АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© Г. В. Павлинский, Л. И. Владимирова, В. Г. Дроков, Т. Д. Степук¹*Статья поступила 18 ноября 2014 г.*

Предложен новый подход в экспресс-диагностике технического состояния эксплуатируемых авиационных двигателей, основанный на оценке неоднородности осадков отработанного авиационного масла. Неоднородность обусловлена появлением в осадках крупных металлических частиц, размер и число которых возрастают по мере износа трущихся поверхностей двигателя. Степень неоднородности определяли рентгенофлуоресцентным методом. Измеренные на спектрометре интенсивности рентгеновской флуоресценции осадков позволили путем однофакторного дисперсионного анализа установить, что фактор неоднородности анализируемого осадка оказался существенным на уровне статистических вариаций аналитического сигнала. Предельно допустимое значение фактора определяли на массиве измеренных интенсивностей осадков масел исправных двигателей, что позволило выявить двигатели, масла которых характеризуются высоким содержанием крупных частиц. По элементному составу частиц можно оценить степень износа отдельных узлов диагностируемого двигателя.

Ключевые слова: диагностика; отработанное авиационное масло; размер частиц; фактор неоднородности; рентгенофлуоресцентный сигнал; дисперсионный анализ; элементный состав.

Для диагностики системы смазки авиационных двигателей применяются атомно-эмиссионный и рентгено-спектральный методы. При этом согласно нормативным документам [1, 2] отдельные измерения, сильно отличающиеся от среднего значения, рассматриваются как ошибочные и исключаются из дальнейшего рассмотрения. Однако в отработанном авиационном масле такие отклонения могут быть обусловлены неоднородностью анализируемого материала (попаданием в изучаемый объем крупных металлических частиц). Поскольку наличие крупных частиц в отработанном масле — важная характеристика степени износа авиадвигателя, то выявление и изучение фактора неоднородности отработанного масла является значимой аналитической задачей.

Цель работы — определение степени неоднородности смазочного масла и использование этого критерия в качестве диагностического признака для выявления крупных частиц в его составе.

Осадок отработанного авиационного масла представляет собой смесь мелкодисперсных частиц кальция, оксидов кремния, алюминия и др., набранных из пыли воздушной среды (примерно 70 – 80 %), и металлических частиц разной крупности, возникших в процессе износа трущихся деталей двигателя (примерно 20 – 30 %). В начальный период эксплуатации размер металлических частиц невелик и осадок в первом приближении близок к однородному. По мере износа двигателя число и размер частиц возрастают, что через некоторое время оказывается критическим.

Приповерхностный слой осадка после появления крупных частиц становится неоднородным. На интенсивность его рентгеновской флуоресценции оказывает влияние набор крупных металлических частиц, попавших в зону облучения. Зависимость интенсивности флуоресценции от неоднородности проявляется тем значительней, чем сильнее различаются ослабляющие свойства отдельных частиц и образца в целом [3, 4].

Интенсивность рентгеновской флуоресценции мелкодисперсного образца при монохроматическом первичном излучении в первом приближении (без учета избирательных эффектов) определяется зависимостью

$$I_i = \text{const} \frac{c_i}{\frac{\mu_m}{\sin \varphi} + \frac{\mu_{mi}}{\sin \psi}}, \quad (1)$$

где c_i — содержание флуоресцирующего элемента; μ_m и μ_{mi} — массовые коэффициенты ослабления в образце первичного и флуоресцентного излучений соответственно; φ и ψ — углы падения первичного и выхода флуоресцентного излучений.

В случае преобладания крупных металлических частиц в приповерхностном слое массовые коэффициенты ослабления в уравнении (1) для образца в целом следует заменить на массовые коэффициенты ослабления излучения в этих частицах — $(\mu_m)_{\text{мет}}$ и $(\mu_{mi})_{\text{мет}}$ соответственно. Содержание флуоресцирующего элемента c_i остается неизменным, так как предполагается, что крупные металлические частицы просто

¹ НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск, Россия.

составляют всю совокупность таких частиц в мелко-дисперсной среде.

Знаменатель в уравнении (1) можно рассматривать как фактор ослабления. Его расчетные величины для флуоресцентного $K\alpha$ -излучения атомов железа, никеля и меди при длине волны первичного излучения (λ) 0,7 Å приведены в табл. 1. Расчеты выполнены при условии, что $\varphi = \psi = 45^\circ$ и осадок имеет следующий состав, %: 30 — металлические частицы, 10 — CaO, 30 — SiO₂, 30 — С.

Из табл. 1 следует, что частицы железа и меди ослабляют первичное и флуоресцентное рентгеновское излучения примерно в 1,5–2 раза сильнее, чем осадок в целом. Другими словами, влияние неоднородности приповерхностного слоя должно существенно сказываться на интенсивности рентгеновского излучения в случае присутствия в осадке крупных металлических частиц.

Кроме обычно рассматриваемого излучения железа и меди в табл. 1 приведены значения фактора ослабления для излучения никеля, содержащегося в сплавах на основе железа. При расчетах предполагали следующий состав осадка, %: 29 — Fe, 1 — Ni, 10 — CaO, 30 — SiO₂, 30 — С. Несмотря на контрастность ослабляющих характеристик эксперимент проводили для рентгеновской флуоресценции железа, поскольку последнее всегда присутствует в стальных частицах, чего не скажешь о никеле.

Экспериментальную проверку влияния неоднородности смылов отработанного масла на интенсивность его рентгеновской флуоресценции осуществляли с использованием энергодисперсионного рентгеновского спектрометра РЛП-2. Режим работы спектрометра: напряжение на рентгеновской трубке 40 кВ, вольфрамовый анод. Для подавления первичного характеристического L -излучения вольфрама в интересующей нас области спектра использовали толстый алюминиевый фильтр.

Образцы готовили следующим образом. Диагностический слой маслофильтра каждого авиационного двигателя промывали и готовили суспензию, содержащую твердый осадок. Из суспензии после перемешивания для каждого образца отбирали три навески объемом 5 мл, каждую из которых осаждали на химические фильтры при равномерном распределении анализируемого материала по поверхности. Площадь анализируемого осадка составляла примерно 80 мм². Увеличение числа навесок показало, что для выявления неоднородности вполне достаточно трех. Каждую навеску измеряли три раза. Обработка полученных результатов по схеме однофакторного дисперсионного анализа [5] позволила разделить суммарную погрешность для каждого образца на две составляющие: обусловленную воспроизводимостью измерений и неоднородностью флуоресцирующего материала.

Сначала были обработаны интенсивности рентгеновской флуоресценции 30 образцов смылов, взятых с

исправных газотурбинных двигателей. Оказалось, что практически для всех образцов для элементов Fe и Cu погрешность неоднородности значима на фоне погрешности воспроизводимости. Ее абсолютная величина зависит от интенсивности рентгеновской флуоресценции. Чтобы снять эту зависимость, рационально отнести ее к интенсивности рентгеновской флуоресценции самого образца: $(\Delta I_i)_{\text{неодн}}/I_i$. Эту величину назовем фактором неоднородности.

Полученный массив относительных погрешностей неоднородности был обработан по стандартной схеме статистической обработки данных. Для Fe средняя относительная погрешность неоднородности $(\Delta I)_{\text{Fe неодн}}/I_{\text{Fe}} = 6,32\%$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_{\text{Fe}} 4,49\%$, для Cu — $(\Delta I)_{\text{Cu неодн}}/I_{\text{Cu}} = 6,44\%$ при $\sigma_{\text{Cu}} 4,90\%$.

Доверительный интервал полученных результатов вычисляли по формуле:

$$\delta = \frac{t\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где t — односторонний критерий Стьюдента, который при уровне надежности 0,95 равен 1,76. Расчет для 30 образцов [величина n в формуле (2)] дал следующие величины доверительного интервала, %: $\delta_{\text{Fe}} = 2,35$ и $\delta_{\text{Cu}} = 2,57$.

Верхнюю границу погрешности (допуск), обусловленную влиянием неоднородности осадка отработанного масла, определяли как

$$\text{Допуск} = (\Delta I_i)_{\text{неодн}}/I_i + \delta. \quad (3)$$

Следовательно, для Fe имеем

$$\text{Допуск}_{\text{Fe}} = 6,32 + 2,35 \approx 8,7\%,$$

для Cu —

$$\text{Допуск}_{\text{Cu}} = 6,44 + 2,57 \approx 9,0\%.$$

Исследовали 17 двигателей для выявления тех, у которых фактор неоднородности $(\Delta I_i)_{\text{неодн}}/I_i$ отработанного масла превышал величину допуска (по Fe и Cu). Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1. Зависимость фактора ослабления $\left(\frac{\mu_m(\lambda)}{\sin \varphi} + \frac{\mu_{mi}(\lambda_i)}{\sin \psi} \right)$, см²/г от длины волны флуоресцентного $K\alpha$ -излучения (λ_i)

	λ_i		
	Fe	Ni	Cu
Весь осадок	96	229	79
Металлические частицы*	140	564	147

* Металлические частицы включают частицы стали (основа — железо), а также бронзы или латуни (основа — медь).

Таблица 2. Величина фактора неоднородности ($\Delta I_i/I_i$) для осадков отработанного авиационного масла и его отношение к величине допуска [$(\Delta I_i/I_i)/\text{Допуск}$], найденного по 30 образцам исправных двигателей

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$(\Delta I/I)_{\text{Fe}}$	9,5	6,1	0	8,7	2,0	12,2	29,9	48,7	4,8	5,9	15,5	9,9	4,0	22,3	7,7	0	2,6
$(\Delta I/I)_{\text{Fe}}/\text{Допуск}$	1,1	0,7	0	1,0	0,2	1,4	3,4	5,6	0,6	0,7	1,7	1,1	0,5	2,6	0,9	0	0,3
$(\Delta I/I)_{\text{Cu}}$	12,0	0	11,4	5,5	1,6	11,7	22,4	58,7	10,3	9,1	8,2	12,7	5,3	33,2	1,8	0,6	0
$(\Delta I/I)_{\text{Cu}}/\text{Допуск}$	1,3	0	1,3	0,6	0,2	1,3	2,5	6,7	1,1	1,0	0,9	1,4	0,6	3,7	0,2	0,1	0

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют об изношенности трех двигателей (№ 7; 8 и 14) — фактор неоднородности более чем в 2 раза превысил допустимое значение, установленное для исправных двигателей. Еще у трех двигателей (№ 1, 6 и 11) допуск оказался также превышен, но не столь значительно.

Таким образом, предложенный подход позволяет определить одну из важных характеристик степени износа газотурбинного двигателя — наличие крупных частиц в отработанном авиационном масле.

Для каждого авиадвигателя факторы неоднородности рентгеновской флуоресценции частиц железа и меди существенно различны. Следовательно, появляется возможность после элементного анализа металлических частиц выявлять степень износа его контактирующих поверхностей и оценивать перспективы дальнейшей эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аттестат методики измерения концентрации продуктов изнашивания на установках типа МФС при диагностике авиационных двигателей. — М., 1993. — 20 с.
2. Аттестат методики измерения концентрации продуктов изнашивания на установке типа БАРС при диагностике авиационных двигателей. — М., 1993. — 20 с.
3. Лосев Н. Ф., Глотова А. Н., Афонин В. П. О влиянии крупности частиц порошковой пробы на интенсивность аналитических линий при

рентгеноспектральном флуоресцентном анализе / Заводская лаборатория. 1963. Т. 29. № 4. С. 421 – 426.

4. Лосев Н. Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ. — М.: Наука, 1969. — 336 с.
5. Смагунова А. Н., Карпукова О. М. Методы математической статистики в аналитической химии: учебн. пособие. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2012. — 346 с.

REFERENCES

1. Attestat metodiki izmereniya kontsentratsii produktov iznashivaniya na ustanovkakh tipa MFS pri diagnostike aviatsionnykh dvigatelei [The certificate of measurement of concentration of product of determination on MFS equipment in the diagnosis of aircraft engines]. — Moscow, 1993. — 20 p. [in Russian].
2. Attestat metodiki izmereniya kontsentratsii produktov iznashivaniya na ustanovke tipa BARS pri diagnostike aviatsionnykh dvigatelei [The certificate of measurement of concentration of product of determination on BARS equipment in the diagnosis of aircraft engines]. — Moscow, 1993. — 20 p. [in Russian].
3. Losev N. F., Glotova A. N., Afonin V. P. O vliyaniy krupnosti chastits poroshkovoi proby na intensivnost' analiticheskikh linii pri rentgenospektral'nom fluorestsennom analize [About influence of particle size of powder sample on an analytical line in the x-ray fluorescence analysis] / Zavod. Lab. 1963. Vol. 29. N 4. P. 421 – 426. [in Russian].
4. Losev N. F. Kolichestvennyi rentgenospektral'nyi fluorestsennyi analiz [The quantitative x-ray fluorescent analysis]. — Moscow: Nauka, 1969. — 336 p. [in Russian].
5. Smagunova A. N., Karpukova O. M. Metody matematicheskoi statistiki v analiticheskoi khimii: uchebn. posobie [The methods of mathematical statistics in the analytical chemistry (textbook)]. — Rostov-on-Don: Feniks, 2012. — 346 p. [in Russian].