

УДК 5433.42.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЦ ИЗНАШИВАНИЯ В ПРОБАХ МАСЕЛ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ АНАЛИЗАТОРОМ «ФОКУС-2»

© В. Г. Дроков¹, Г. В. Павлинский¹, А. В. Сеницкая², А. Ю. Ходунаев¹*Статья поступила 8 июля 2016 г.*

Приведены результаты измерения параметров отдельных металлических частиц в пробах масел авиационных газотурбинных двигателей микрорентгенофлуоресцентным анализатором «Фокус-2». Показано, что предел обнаружения по легирующим элементам в сталях снижается с ростом размеров частиц. При размерах частиц 100 мкм и более становится возможным определение практически полного набора легирующих элементов во всех сплавах. Разработан алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного определения марки стали износных частиц, включая случаи, когда частица представлена двумя сплавами. Алгоритм основан на расчете разницы относительных интенсивностей элементов искомой стали в сравнении со средними значениями таковых для известных сплавов. Проведена проверка алгоритма на выборке из частиц размером свыше 100 мкм из 11 различных сталей. В 95 % случаев марка стали, определяемая алгоритмом, совпадала с реальной. При проверке алгоритма на 25 частицах, представленных двумя сплавами типа сталь – бронза, точность определения марок составляющих частицу сплавов составляла не менее 92 %.

Ключевые слова: диагностика; анализ пробы масла; частицы изнашивания; элементный состав; тип сплава; размер частиц изнашивания; микрорентгенофлуоресцентный анализатор «Фокус-2»; газотурбинный двигатель; диагностическое решение.

Для диагностирования узлов трения авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) используют рентгенофлуоресцентный метод анализа. По величине содержания металлической примеси в пробах смазочных масел ГТД судят об их техническом состоянии [1 – 2].

Более чем тридцатилетний опыт применения рентгенофлуоресцентных анализаторов показал, что вероятность выявления дефектов в узлах трения по результатам измерения содержания металлических частиц изнашивания в пробах авиационных масел не превышает 7 % [3]. Поэтому в последнее время анализаторы типа «СПЕКТРОСКАН-JV», «ПРИЗМА» применяют для определения марки сплава частиц изнашивания (стружки), чтобы выявить источник разрушения [4].

В работе [5] показано, что с помощью аппаратуры с широким рентгеновским пучком («ПРИЗМА», X-50, РЛП) возможно определение марок сплавов, если размер частиц превышает 1000 мкм. При уменьшении размера часть легирующих элементов (Cr, V, Ni и др.), содержание которых менее 0,5 %, не определяется, что приводит к ошибке в идентификации марки сплава анализируемой частицы.

Вместе с тем точное определение сплава в случае малых частиц позволяет прогнозировать развитие де-

фекта, уверенно обнаруживать дефектный узел на ранних стадиях развития. Для решения этой задачи представляется перспективным использование рентгенофлуоресцентных анализаторов с малым диаметром фокусного пятна.

Цель работы — оценка возможности применения анализатора с поликапиллярной оптикой «Фокус-2» для определения марки стали отдельных металлических частиц размером 40 – 500 мкм и разработка алгоритма и программного обеспечения для автоматизации процесса определения в случаях, когда износная частица представлена одним либо несколькими сплавами.

Предел обнаружения измерительной аппаратуры определяется зависимостью [6]:

$$C_{\text{пред}} = 3\sigma_{\text{хол}}/D, \quad (1)$$

где 3 — коэффициент, соответствующий доверительной вероятности $P = 0,997$ (при вероятности $P = 0,95$ он равен 2); $D = \Delta I / \Delta C$ — концентрационная чувствительность в области малых содержаний анализируемого элемента (ΔI — приращение интенсивности аналитического сигнала при увеличении содержания на ΔC); $\sigma_{\text{хол}}$ — среднеквадратическая погрешность измерения величины фона.

Для экспериментального определения концентрационной чувствительности D и среднеквадратической погрешности измерения величины фона $\sigma_{\text{хол}}$ использовали стандартные образцы предприятия (СОП). Исследуемые марки сталей СОП (95X18Ш, ЭИ-347Ш,

¹ НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск, Россия; e-mail: dtech@api.isu.ru

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия.

ЭИ-415, ШХ15-Ш, 12Х2Н4ВА, 60С2А) широко применяются при производстве авиационных ГТД.

Пробу (стружку), изготовленную из СОП, располагали на предметном столике микроанализатора «Фокус-2» (размер фокусного пятна — 100 мкм) таким образом, чтобы исключить комкование. С помощью встроенных в анализатор микроскопа и лазерного луча, совмещенного с рентгеновским пучком, оценивали размер отдельной частицы и методом фундаментальных параметров рассчитывали элементный состав.

Частицы группировали по четырем диапазонам: 25 – 50, 50 – 80, 80 – 110 и 110 – 500 мкм. Интенсивности рентгеновской флуоресценции измеряли для линий семи элементов при экспозиции 200 с (табл. 1).

Интенсивность рентгеновской флуоресценции частицы определяется ее размером (пропорциональна площади, т.е. примерно квадрату линейного размера) [7, 8]. При этом даже самые мелкие частицы (в нашем случае 25 мкм) превышают критерий «толстого» слоя, который для железа характеризуется величиной порядка 20 мкм.

Среднеквадратическую погрешность $\sigma_{\text{хол}}$ рассчитывали по формуле

$$\sigma_{\text{хол}} = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_i (I_i - I_{\text{ср}})^2}, \quad (2)$$

где $I_{\text{ср}}$ — среднее из n параллельных измерений интенсивности I_i .

Наблюдаемый большой разброс $\sigma_{\text{хол}}$ (см. табл. 1), а следовательно I_i , объясняется широкой вариацией интенсивностей частиц при использовании данного фокуса (100 мкм). Поэтому полученные результаты следует рассматривать как оценочные.

Зависимость интенсивности рентгеновской флуоресценции I_i от содержания i -го элемента c_i определяется выражением [8]

$$I_i = \text{const} \frac{c_i}{\frac{\mu_m}{\sin \varphi} + \frac{\mu_{mi}}{\sin \psi}}, \quad (3)$$

где μ_m и μ_{mi} — массовые коэффициенты ослабления в образце первичного и флуоресцентного излучений; φ и ψ — углы падения первичного и выхода флуоресцентного излучений. (Зависимость (3) осложняется эффектами избирательного возбуждения, которые для разных типов сплавов могут оказаться весьма значительными.)

Из уравнения (3) следует, что концентрационная чувствительность D (для малых содержаний c_i) существенно зависит от ослабляющих свойств исследуемого материала. Хотя для рассматриваемых сплавов высокое содержание железа ограничивает вариации их ослабляющих характеристик, оценка влияния состава на концентрационную чувствительность необходима.

Концентрационную чувствительность СОП рассчитывали с учетом эффекта избирательного возбуж-

дения для неоднородного первичного излучения рентгеновской трубки с молибденовым анодом, работающей при напряжении 40 кВ [8]. Результаты представлены в табл. 2.

Видно, что полученные значения близки, если не принимать во внимание результаты по стали ЭИ-347Ш, содержащей 9 % вольфрама, который сильно поглощает излучение V, Cr и Mn. Так, массовый коэффициент ослабления $\text{CrK}\alpha$ -линии в вольфраме примерно в четыре раза больше коэффициента ее ослабления в железе. Поэтому концентрационная чувствительность для ЭИ-347Ш оказывается примерно в 1,5 раза ниже, чем для других сталей.

Концентрационная чувствительность для хрома в стандарте 95Х18Ш также выпадает из общего ряда, поскольку его содержание в стали (порядка 18 %) велико и не соответствует понятию малой примеси.

Наблюдаемая высокая концентрационная чувствительность для хрома и ванадия объясняется возбуждением их атомов флуоресцентным излучением железа (избирательное возбуждение).

Концентрационные чувствительности хрома для разных частиц, измеренные на анализаторе «Фокус-2», представлены в табл. 3. Видно, что с увеличением размера частиц концентрационная чувствительность растет (значение для стали 12Х2Н4ВА (размер 50 – 80 мкм) признали выбросом и не учитывали).

Влияние вольфрама (сталь ЭИ-347Ш) также повышается с ростом размера.

Расчетные значения концентрационной чувствительности для $\text{MnK}\alpha$ -линии (см. табл. 3) не учитывают низкую разрешающую способность энергодисперсионного блока анализатора, в результате чего сравнительно слабая $\text{CrK}\beta$ -линия налагается на $\text{MnK}\alpha$ -излучение. Поэтому экспериментальная величина концен-

Таблица 1. Средние значения интенсивностей линий элементов (числитель) и $\sigma_{\text{хол}}$ (имп.) (знаменатель)

Аналитическая линия	Размер частиц, мкм			
	20 – 50	50 – 80	80 – 110	110 – 500
V	80/134	104/84	207/138	768/270
Cr	28/46	44/66	40/50	200/138
Mn	41/72	71/72	139/148	649/346
Ni	20/36	37/102	42/102	38/62
Cu	320/64	65/88	80/90	49/66
Mo	73/90	105/102	265/200	1016/440
W	30/38	40/18	74/76	166/120

Таблица 2. Концентрационная чувствительность (усл. ед.) СОП

Сталь	V	Cr	Mn	Ni	Mo	W
60С2А	—	6,7	4,7	—	—	—
12Х2Н4ВА	—	6,5	4,7	1,8	—	—
95Х18Ш	—	5,1	4,3	—	—	—
ЭИ-415	5,0	6,2	4,5	1,7	3,0	0,7
ЭИ-347Ш	3,8	4,6	3,7	1,9	2,7	0,8
ШХ15-Ш	—	6,6	4,7	1,8	3,0	—

Таблица 3. Концентрационная чувствительность Cr (имп/с)

Сталь	Содержание Cr, %	Размер частиц, мкм			
		20 – 50	50 – 80	80 – 110	110 – 500
12X2H4BA	1,45	94	455	340	1900
ШХ15-Ш	1,47	—	200	340	1880
ЭИ415	3,15	55	170	470	1890
ЭИ-347Ш	4,3	80	70	110	490
95X18Ш	18,00	82	150	410	1610

Таблица 4. Концентрационная чувствительность Mn (имп/с)

Сталь	Содержание марганца, %	Размер частиц, мкм			
		20 – 50	50 – 80	80 – 110	110 – 500
ШХ15-Ш	0,3	100	150	330	1000
12X2H4BA	0,45	—	—	260	1330
60C2A	0,75	90	160	180	920
Среднее		95	155	255	1080

Таблица 5. Предельные концентрации элементов $C_{пред}$ (%)

Элемент	Размер частиц, мкм			
	20 – 50	50 – 80	80 – 110	110 – 500
V	6,7	2,5	1,8	1,1
Cr	1,7	1,2	0,4	0,2
Cr (для ЭИ-347Ш)	1,7	2,8	1,4	0,8
Mn	2,3	1,4	1,7	1,0
Ni	2,7	4,1	1,8	0,2
Mo	1,2	1,0	1,0	0,5
W	1,5	0,4	1,0	0,5

Таблица 6. Элементы, определяемые в частицах разных размеров

Сталь	Размер частиц, мкм			
	20 – 50	50 – 80	80 – 110	110 – 500
60C2A	—	—	Cr, Mn	Cr, Mn
95X18	Cr	Cr	Cr	Cr, Mn
12X2H4BA	Cr, Ni, W	Cr, Ni, W	Cr, Ni, W	Cr, Ni, W
ШХ-15Ш	Cr	Cr	Cr	Cr
ЭИ-347Ш	Cr, W	Cr, W	Cr, W, V	Cr, Ni, W, V, Mo
ЭИ-415	Cr	Cr	Cr	Cr, Ni, W, V, Mo

трационной чувствительности Mn в стали 95X18Ш, содержащей 18 % хрома, оказывается сильно завышенной.

Концентрационную чувствительность Mn определяли с использованием стандартов (ШХ15-Ш, 12X2H4BA и 60C2A), в которых содержание хрома не превышало 1,5 % (табл. 4).

Концентрационную чувствительность с помощью анализатора «Фокус-2» определяли также для V, Ni, Mo, W. Полученные результаты использовали для нахождения предельного содержания элементов.

При известной погрешности холостого опыта $\sigma_{хол}$ и концентрационной чувствительности (D) предельные содержания $C_{пред}$ рассчитывали по формуле (1) (табл. 5).

Сопоставляя $C_{пред}$ с содержанием легирующих элементов в СОП, устанавливали элементы, которые можно определить в частицах различных размеров (табл. 6). Видно, что начиная со 110 мкм, анализатор «Фокус-2» позволяет определять полный набор элементов в частице изнашивания независимо от марки стали (типа сплава).

Алгоритм для автоматизированного определения типа сплава износных частиц следующий.

Интенсивности элементов, полученные на «Фокус-2», нормируем на максимальную интенсивность элементов данной частицы (для сплавов на основе железа — на интенсивность железа, для медных сплавов — на интенсивность меди). Полученные для каждой частицы значения заносим в базу данных и рассчитываем средние значения величин по частицам каждой марки сплава. Для частицы, марку сплава которой нужно определить, аналогично рассчитываем относительные интенсивности. Далее поэлементно вычисляем отклонения значений по сравнению с таковыми для каждого сплава в базе данных. Частице присваиваем тип сплава, сумма отклонений от которого наименьшая. При несоответствии элементного состава сплава в базе данных и искомой частицы интенсивность отсутствующих элементов принимаем равной нулю.

Представленный алгоритм проверили на выборке из 11 эталонных сплавов (по 10 частиц каждый). Марка сплава корректно определялась в 95 % случаев. Исследованные сплавы: ВТ8М, 95X18, ШХ15-Ш, БрАЖМц, 60C2A, ЭИ678, 12X2H4A, 65C2A, ЭИ961, ЭИ962, ЭИ-347Ш.

При отработке методики определения типа сплава частицы группировали по диапазонам размеров. Оказалось, что при размерах частиц от 40 мкм интенсивности элементов возрастали и соотношение интенсивностей между элементами могло меняться. Однако при 110 мкм и более погрешность, вызванная увеличением размеров, недостаточна для того, чтобы повлиять на точность результатов определения для большинства сплавов.

Далее исследовали частицы изнашивания, уловленные контрольными элементами двигателя ПС-90А.

В процессе износа частицы, отделившиеся в результате трения, часто включают элементы взаимодействующих узлов. Для таких частиц, содержащих несколько «основных» элементов (Fe, Cu и др.) в доста-

точно больших количествах, определение типа сплава следует проводить дважды.

Из 25 исследованных частиц, состоящих из двойных сплавов (ШХ-15Ш — БрАЖМц и ЭИ-347Ш — БрАЖМц), в 23 случаях оба сплава были определены корректно.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Как и ожидалось, предел обнаружения снижается с ростом размеров частиц. Поэтому при больших размерах (100 мкм и более) становится возможным определение большего числа легирующих элементов (со 110 мкм практически во всех сплавах определяется полный набор легирующих элементов).

С помощью анализатора «Фокус-2» можно существенно снизить по сравнению с рентгенофлуоресцентными анализаторами с широким пучком предельный размер определяемых частиц, что способствует решению задачи по выявлению дефектов на ранней стадии их развития в авиационных ГТД.

Для частиц размером более 100 мкм предложен алгоритм и разработано программное обеспечение [9] для автоматического определения типа сплава. При этом для частиц, представленных двумя сплавами (типа сталь — бронза), точность определения составляет не менее 92 %.

UDC 5433.42.8

STUDY OF WEAR PARTICLES IN THE OIL SAMPLES OF GAS TURBINE AVIATION ENGINES USING “FOCUS-2” X-RAY FLUORESCENCE ANALYZER

© V. G. Drokov, G. V. Pavlinsky, A. V. Sinitskaya, and A. Yu. Khodunaev

Submitted July 8, 2016.

The parameters of individual metal particles present in oil samples of aviation gas turbine engines are measured on a “Focus-2” micro X-ray fluorescence analyzer. It is shown that the detection limit for alloying elements in steels decreases with increasing particle size. At a particle size of 100 μm and more it is possible to determine almost complete set of doping elements in all alloys. An algorithm and software are developed for automatic determination of the steel grade of wear particles including the cases when wear particle is represented by two alloys. The algorithm is based on calculation of the difference between relative intensities of the elements of the elements of the desired steel and their average values for known alloys. The algorithm and software are tested on the particles of 11 different alloys more than 100 μm in size. The steel grade determined by the algorithm is correct in 95%. When testing the algorithm for 25 particles represented by two alloys of steel-bronze type the accuracy of determination was at least 92%.

Keywords: diagnostics; oil sample analysis; wear particles; elemental composition; alloy type; size of wear particles; micro X-ray fluorescence analyzer “Focus-2”; gas-turbine engine; diagnostic decision.

REFERENCES

1. The method of diagnostics of oil-washed friction units in D-30KP and D-30KU engines by X-ray spectral analysis method. — Moscow, 1990. — 5 p. [in Russian].
2. Bratukhin A. G., Reshetnikov Yu. E., Inozemtsev A. A. (eds.). Technology basics of creating gas-turbine engines for long-haul aircrafts. — Moscow: Aviatekhinform, 1999. — 67 p. [in Russian].

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика диагностирования узлов трения, омываемых маслом, двигателей Д-30КП и Д-30КУ методом рентгеноспектрального анализа. — М., 1990. — 5 с.
2. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов / Под ред. Братухина А. Г., Решетникова Ю. Е., Иноземцева А. А. — М.: Авиатехинформ, 1999. — 67 с.
3. Дроков В. Г. Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.22.14, 05.26.02. — Иркутск, 2009. — 42 с.
4. Дасковский А. И. Обоснование диагностического критерия и разработка методики повышения достоверности его оценки при анализе концентрации продуктов изнашивания в работающем масле: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.14. — М., 2002. — 24 с.
5. Иноземцев А. А., Дроков В. Г., Дроков В. В. и др. Состояние и перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 2. Элементный состав частиц изнашивания, накапливаемых в системе смазки авиационных газотурбинных двигателей / Контроль. Диагностика. 2011. № 3(153). С. 52 — 61.
6. Смагунова А. Н., Карпукова О. М. Методы математической статистики в аналитической химии. — Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета, 2008. — 339 с.
7. Павлинский Г. В., Дроков В. Г., Баранов О. Е., Владимиров Л. И., Рыбакова А. А. Зависимость интенсивности рентгеновской флуоресценции отдельной частицы от ее формы, размеров и ориентации в пространстве / Контроль. Диагностика. 2001. № 6. С. 8 — 15.
8. Pavlinsky G. V. Fundamentals of X-Ray Physics. — Cambridge International Science Publishing Ltd. UK, 2008. — 244 p.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616927 / Ходунаев А. Ю. — Дата регистрации: 25.06.2015.

3. Drokov V. G. Increasing reliability of results of gas-turbine engines diagnostics by scintillation method to decrease risks of emergency situation appearance during aircraft exploitation. Author's abstract of doctoral thesis. — Irkutsk, 2009. — 42 p. [in Russian].
4. Daskovskii A. I. Rationale of diagnostic criterion and development of evaluation reliability increasing method when analyzing wear products concentration in working oil. Author's abstract of candidate's thesis. — Moscow, 2002. — 24 p. [in Russian].

5. Inozemtsev A. A., Drokov V. G., Drokov V. V., et al. The state and development perspectives of spectral tribodiagnostics of aircraft gas-turbine engines. Part 2. Elemental composition of wear particles accumulated in lubrication system of aircraft gas-turbine engines / Kontr. Diagn. 2011. N 3(153). P. 52 – 61 [in Russian].
6. Smagunova A. N., Karpukova O. M. Mathematical statistics methods in analytical chemistry. — Irkutsk: Izd. Irkutsk. gos. univ., 2008. — 339 p. [in Russian].
7. Pavlinsky G. V., Drokov V. G., Baranov O. E., Vladimirova L. I., Rybakova A. A. Relation between X-Ray fluorescence intensity of specific particle and its shape, size and space orientation / Kontr. Diagn. 2001. N 6. P. 8 – 15 [in Russian].
8. Pavlinsky G. V. Fundamentals of X-Ray Physics. — Cambridge International Science Publishing Ltd. UK, 2008. — 244 p.
9. Certificate of state registration of the computer program N 2015616927 / Khodunaev A. Yu. — registered 25.06.2015 [in Russian].

УДК 621.642.3:539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКАХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

© М. И. Кожин¹, Г. Г. Кримчеева²

Статья поступила 5 августа 2016 г.

С использованием метода магнитной памяти металла исследованы дефектные участки резервуарных конструкций, характеризуемые аномальным распределением магнитных параметров: напряженности собственного магнитного поля рассеяния и локального изменения его градиента. Обследованы (с выводом из эксплуатации и без) более 80 вертикальных и горизонтальных резервуаров, изготовленных из сталей Ст3 и 09Г2С и расположенных в различных географических зонах (Европейский Север, Ямало-Ненецкий автономный округ, Восточная Сибирь и Дальний Восток). Установлено, что по характеру распределений напряженности собственного магнитного поля рассеяния и его градиента над повреждениями можно визуализировать и документировать коррозионные и трещиноподобные повреждения на магнитограммах, полученных с помощью малогабаритных магнитометрических приборов типа ИКН (измерителя концентрации напряжений). Показано, что по магнитному сигналу можно идентифицировать зоны концентрации напряжений без дополнительных дефектоскопических измерений, а по значениям магнитного поля и его градиента — определять параметры повреждений. В большинстве случаев (90 %) расположения магнитных аномалий и коррозионных трещиноподобных повреждений в резервуарных конструкциях совпадали с результатами индентификации дефектов с использованием традиционных методов неразрушающего контроля (вихретоковой, магнитопорошковой и ультразвуковой дефектоскопии, ультразвуковой толщинометрии, визуально-оптического, измерительного контроля и др.).

Ключевые слова: цилиндрические стальные резервуары (сосуды); магнитная память металла; линии концентрации напряжений; напряженность собственного магнитного поля рассеяния; неразрушающий контроль; коррозия; трещина.

Метод магнитной памяти металла (МПМ) — относительно новое направление в технической диагностике — основан на регистрации и анализе распределения напряженности собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) на поверхности изделий для определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений из ферромагнитных материалов [1 – 3]. МПМ-метод не требует специальной зачистки металла и искусственного намагничивания. СМПР возникают в зонах как скопления дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений, так и максимальной неоднородности структуры металла [3 – 6].

Установлено, что СМПР на поверхности объекта контроля (стального образца, трубопровода, резервуа-

ра) интегрально отображают дефекты и структурные неоднородности материала, а также фактические остаточные напряжения и деформации [7, 8]. Однако дешифрирование магнитных аномалий, выявляемых МПМ-методом, усложняется, если контроль возможен только с наружной поверхности (например, в случае контроля заполненного нефтепродуктового резервуара в целях выявления коррозионных поражений, расположенных с противоположной (внутренней) стороны поверхности). При этом для оценки и прогнозирования состояния объекта контроля (например, несущей способности резервуара) большое значение имеют точность измеряемых параметров дефектов и их классификация.

Цель работы — исследование характера распределения магнитных параметров на дефектных участках резервуарных конструкций с визуализацией повреждений на магнитограммах.

¹ Филиал ООО «Газмашпроект» «Нагатинский», Москва, Россия; e-mail: miikov@ya.ru

² Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия.