

В. Г. ДРОКОВ¹, *д-р техн. наук*

В. В. ДРОКОВ², *канд. техн. наук*

А. Д. КАЗМИРОВ¹, *канд. физ-мат. наук*

А. А. КУЗНЕЦОВ³, *д-р техн. наук, проф.*

В. В. МУРЫЩЕНКО⁴, *канд. техн. наук*

¹Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)

²Байкало-Амурский институт железнодорожного транспорта, филиал
Дальневосточного государственного университета путей сообщения в г. Тында
(Тында, Россия)

³Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Россия)

⁴ООО «ЦСД-ТМХ» (Москва, Россия)

ОЦЕНКА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ МАСЛОСИСТЕМЫ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЧКИ ОТБОРА

Аннотация: Рассмотрена эффективность двух точек отбора диагностического материала для оценки технического состояния узлов маслосистемы тепловозного дизеля по параметрам частиц изнашивания. В качестве более эффективной предложена точка отбора пробы с центробежного фильтра (ЦФ) тепловоза. Данная точка позволяет исключить (снизить) влияния, связанные с недостаточной представительностью анализируемой пробы. Разработана конструкция пробоотборника, методика отбора с ротора ЦФ и методика пробоподготовки для проведения анализа на СВЧ плазменном анализаторе. Показано, что частицы по высоте ротора распределены достаточно равномерно и отбор пробы на анализ можно производить из любой области ротора. Предложено использовать значение рейтинга «сложных» частиц в качестве количественной оценки степени повреждения узла и продемонстрировано, что «сложные» частицы позволяют идентифицировать поврежденный узел дизеля.

Ключевые слова: дизель, тепловоз, центробежный фильтр, частицы изнашивания, элементный состав частиц, СВЧ плазменный анализ.

Оценка технического состояния узлов, смазываемых маслом, тепловозных дизелей регламентируется ГОСТом 20759-90. Для этого, на работающем дизеле, с прогретого до рабочей температуры, отбирается проба масла и направляется в лабораторию на спектральный анализ для измерения массовой доли нескольких элементов. По величине измеренной массовой доли судят о техническом состоянии узлов маслосистемы дизеля.

Длительный опыт использования на железнодорожном транспорте данного подхода показал, что величина массовой доли не всегда достоверно отражает техническое состояние дизеля [1].

Нами предпринята попытка использования СВЧ плазменного (сцинтилляционного) метода для разработки технологии оценки состояния узлов маслосистемы тепловозного дизеля. СВЧ плазменный метод, в отличие от рекомендуемого ГОСТом 20759-90 атомно-эмиссионного, позволяет производить комплексное измерение параметров частиц изнашивания. За время

10 минут выдается информация по массовой доле элементов в виде раствора, массовой доле элементов в виде частиц изнашивания, количестве, размерам и элементном составе частиц. Всего измеряется более 40 параметров. Число одновременно измеряемых элементов-12. Принцип действия метода описан в работе [2].

В процессе разработки новой технологии столкнулись с проблемой представительности отбора пробы на анализ с точек отбора, рекомендуемых ГОСТом. Проблемы с недостаточной представительностью пробы возникали, например, при отборе в зимний период с замороженного дизеля, в летний период с заглушенного дизеля, влияние представительности сказывалось, когда в заведомо неисправном дизеле в пробе масла регистрировалось очень малое количество частиц, не характерное для неисправного дизеля, либо частицы в пробе вообще отсутствовали. Нередко возникала необходимость оценки состояния дизеля, в котором масло было слито, и непонятны были действия в такой ситуации. На некоторых тепловозах, по разным причинам, приходилось отбирать пробу со сливной трубы картера. Здесь зачастую сливали до десятков литров воды и эмульсии, и не было уверенности, отражают ли частицы изнашивания в отобранной пробе состояние дизеля.

Изначально СВЧ плазменный метод успешно применялся для оценки состояния узлов маслосистемы автомобильных и авиационных газотурбинных двигателей [3, 4]. Высокая достоверность диагностирования в авиационной отрасли была достигнута нами, в том числе, за счет отбора пробы с маслофильтра. Данная точка отбора всегда обеспечивала необходимую представительность пробы и несла достаточное количество диагностической информации для достоверной оценки технического состояния узлов маслосистемы авиадвигателя.

В настоящей работе предпринята попытка адаптации подхода, разработанного при диагностировании авиационных ГТД для оценки состояния узлов маслосистемы тепловозного дизеля. Цель работы заключалась в поиске альтернативной, представительной точки отбора пробы, характеристики которой (пробы) не зависят от конструктивных особенностей маслосистемы, внешних температурных условий, а измеренные параметры частиц изнашивания коррелируют с техническим состоянием тепловоза.

В тепловозах для разделения частиц изнашивания и смазочного масла применяются центробежные масляные фильтры (ЦФ).

В процессе эксплуатации тепловоза на стенку ротора ЦФ осаждаются углеродистые отложения и различные частицы изнашивания. Понятно, что отбор пробы со стенки ротора ЦФ устраняет проблемы, связанные с недостаточной представительностью пробы и влиянием температурных и конструктивных факторов.

При оценке состояния дизеля по результатам анализа пробы масла диагностическим признаком является абсолютная величина массовой доли. В исправном дизеле массовая доля характеризует равновесное значение системы и ее увеличение свидетельствует о повышенном износе.

В отличие от анализа проб масла, использование абсолютных значений массовой доли при анализе пробы с ЦФ при диагностировании невозможно связать с техническим состоянием дизеля. Указанные параметры зависят от времени накопления на ЦФ продуктов износа, индивидуальных особенностей дизеля, технологии отбора, степени разбавления пробы и других факторов, которые невозможно учесть в реальной практике. Поэтому нами использовались относительные значения диагностических признаков, рейтинговый подход [5]. Рейтинг частиц износа рассчитывался как количество частиц определенного сорта, приходящихся на 1000 частиц износа.

Работа проводилась на базе СЛД «Зиминское» Иркутской области. На исследование были предоставлены, поступившие в ремонт тепловозы серии ТЭ10 с дизелями 10Д100 и Д49:

1. дизель 10Д100, 2ТЭ10М №3152Б. Были отобраны три пробы из ЦФ (низ, середина, верх) и проба масла из картера. Пробу масла отобрали со сливной трубы картера после слива 10 литров воды и 40 литров густой эмульсии (дизель зашел в ремонт по обводнению);
2. дизель 10Д100, 2ТЭ10М №0441, зашел в депо на плановый ремонт, пробу масла отобрать не было возможности, дизель был без масла;
3. дизель Д49, 2ТЭ10МК №0096. Отобрана «общая» проба из ЦФ и проба масла со сливной трубы картера.

Для отбора проб с ЦФ снимался защитный кожух. Осадок частиц и сажи, как правило, был плотно распределен по внутренней стенке ротора. Толщина слоя осадка могла составлять от 2 до 5 см. Пробы для анализа отбирались специальным пробоотборником.

Анализ на СВЧ плазменном анализаторе проводился без специальной подготовки, аликвоты исходной пробы объемом $0,5 \text{ см}^3$ вводились в 200 мл «чистого» масла МС-8П. Пробы обрабатывались в УЗ ванне в течение 20 мин, затем анализировались с подбором степени разбавления.

Была проверена неоднородность осаждения частиц изнашивания по высоте ротора. Для этого пробы из ЦФ отбирались из нижней, средней и верхней части ротора. Полученные результаты свидетельствовали, что частицы по высоте ротора распределены достаточно равномерно и отбор пробы на анализ можно производить из любой области ротора.

Одним из важных диагностических признаков является рейтинг общего количества частиц – $R_0(\text{Эл})$ [5]. Рейтинг рассчитывается как отношение количества частиц определенного элемента к общему количеству частиц, зарегистрированного за измерение и нормированного на 1000.

$$R_0(\text{Эл.}) = \frac{n_0(\text{Эл.})}{N_0} \times 1000$$

где $n_0(\text{Эл.})$ – общее число частиц всех типов (составов), содержащих данный элемент, зарегистрированных в пробе за измерение или, что одно и то же, число всех импульсов, зарегистрированных за экспозицию на канале этого элемента;

N_0 – число частиц всех типов (составов), зарегистрированных в пробе за измерение.

Из тепловоза 2ТЭ10М №3152Б были отобраны пробы масла с ЦФ и картера дизеля. В табл. 1 приведены значения R_0 для указанных проб.

Табл. 1. Значения параметра R_0 в пробах с ЦФ и масла, слитого с картера дизеля тепловоза 2ТЭ10М №3152Б

Элемент	R_0		
	3152Б		
	ЦФ	масло	$C_v, \%$
Al	10,6	15,5	26,6
Cr	29,1	38,1	18,9
Ni	2,5	2,7	5,4
Mg	0	0	-
Fe	766,2	734,9	2,9
Cu	185,3	195,1	3,6
Ag	0,1	4,2	-
V	0	0	-
Mn	5,8	7,5	18,1
Mo	0,3	1,3	-
Ti	0,2	0,8	-

Отбор пробы масла с картера дизеля считается, согласно ГОСТ 20759-90, эффективной диагностической точкой. При использовании СВЧ плазменного метода количественным значением данной точки являются величины R_0 . С другой стороны, рейтинги R_0 при отборе пробы с ЦФ должны быть сопоставимы с соответствующими рейтингами пробы масла. В пределах погрешности измерений данное утверждение наблюдается в табл. 1. Видно, что для основных элементов (Al, Cr, Ni, Fe, Cu, Mn) погрешность измерений не превышает 30%. Следовательно, точка отбора пробы с ЦФ может являться альтернативой точке отбора пробы масла с картера дизеля.

Еще одним важным диагностическим признаком является рейтинг «сложных» частиц (частиц, состоящих из двух и более элементов), который рассчитывается как

$$R_0(\text{Эл. 1} - \text{Эл. 2} - \dots) = \frac{n_0(\text{Эл. 1} - \text{Эл. 2} - \dots)}{N_0} \times 1000$$

где $n_0(\text{Эл. 1} - \text{Эл. 2} - \dots)$ – количество частиц определенного состава, зарегистрированных в пробе за измерение; N_0 – число частиц всех типов (составов), зарегистрированных в пробе за измерение.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения рейтингов для «сложных» частиц дизеля тепловоза 2ТЭ10М №3152Б в пробах, отобранных с ЦФ и картера дизеля. Для пробы с ЦФ, в таблице приведены первые 13 составов «сложных» частиц. Из табл. 2 видно, что ситуация с параметрами «сложных» частиц аналогична с поведением параметра R_o . Составы «сложных» частиц не только совпадают по значению рейтинга в пределах погрешностей, но и совпадает порядок составов.

Табл. 2. Параметры «сложных» частиц в пробах из ЦФ и пробы масла, отобранных из дизеля тепловоза 2ТЭ10М №3152Б

3152Б			
ЦФ		масло	
Состав	Рейтинг	Состав	Рейтинг
-Fe-Cu	19,49	-Fe-Cu	19,18
-Cr-Fe	2,78	-Fe-Mn	3,74
-Fe-Mn	2,66	-Cr-Fe	2,99
-Ni-Fe	1,04	-Cr-Fe-Cu	2,24
-Al-Fe	0,63	-Cr-Fe-Cu-Ag	1,49
-Al-Cu	0,54	-Al-Cu	1
-Fe-Cu-Mn	0,38	-Cr-Cu	0,75
-Ni-Cu	0,13	-Fe-Cu-Ag	0,75
-Cr-Fe-Cu	0,13	-Al-Cr-Fe-Cu-Ag	0,5
-Ni-Fe-Cu	0,09	-Ni-Fe	0,5
-Cu-Mn	0,09	-Al-Cr-Fe-Cu	0,5
-Cr-Cu	0,09	-Ni-Fe-Cu	0,25
-Fe-Mo	0,06	-Fe-Ag	0,25

В табл. 3 приведены сравнительные данные по параметрам частиц изнашивания для исследованных дизелей тепловозов 2ТЭ10М №3152Б (10Д100), 2ТЭ10М №0441 (10Д100) и 2ТЭ10МК №0096 (Д49). Результаты, приведенные в табл. 3, свидетельствуют, что с большой вероятностью в обоих дизелях 10Д100 имеются проблемы с поршневой частью. На это указывают составы Fe-Mn, Ni-Fe, Cr-Fe, а в дизеле №3152Б, кроме поршневой группы, дополнительно велика вероятность повреждения вкладышей коленвала (состав Fe-Cu).

В работе [5] отмечалось, чем большее число зарегистрированных составов «сложных» частиц, тем хуже состояние двигателя. Наибольшее количество составов «сложных» частиц показал дизель тепловоза №0096, G=31 состав.

Дизель Д49 конструктивно принципиально отличается от 10Д100, как более ресурсный. Тем не менее, параметры частиц изнашивания Д49 по сравнению с дизелями 10Д100 отличаются в большую сторону. Больше

зарегистрировано и количество составов «сложных» частиц, $G = 31$. Отсюда следует, что износ сопряженных деталей, омываемых смазочным маслом Д49 больше, чем у дизелей 10Д100, а состав «сложных» частиц указывает на повышенный износ цилиндропоршневой группы дизеля. По сведениям, полученным из СЛД, в дизеле тепловоза №0096 была произведена замена двух комплектов цилиндропоршневой группы.

Табл. 3. Сравнение параметров «сложных» частиц изнашивания для исследованных дизелей тепловозов №3152Б-10Д100, №0441 -10Д100 и №0096- Д49

3152Б - 10Д100		0441 - 10Д100		0096 - Д49	
Состав	Рейтинг	Состав	Рейтинг	Состав	Рейтинг
-Fe-Cu	19,49	-Fe-Cu	6,87	-Cr-Ni	11,09
-Cr-Fe	2,78	-Fe-Mn	3,12	-Cr-Fe	9,29
-Fe-Mn	2,66	-Ni-Fe	1,28	-Fe-Mn	5,48
-Ni-Fe	1,04	-Cr-Fe	0,35	-Cr-Ni-Fe	3,43
-Al-Fe	0,63	-Al-Cu	0,28	-Fe-Cu	2,91
-Al-Cu	0,54	-Fe-Cu-Mn	0,21	-Ni-Fe	1,28
-Fe-Cu-Mn	0,38	-Cr-Ni-Mo	0,07	-Cr-Fe-Mn	0,9
-Ni-Cu	0,13	-Fe-Mo	0,07	-Al-Fe	0,34
-Cr-Fe-Cu	0,13	-Cr-Ni	0,07	-Cr-Ni-Mo	0,3
-Ni-Fe-Cu	0,09	-Cr-Fe-Mn	0,07	-Al-Cu	0,26
-Cu-Mn	0,09	-Cu-Ag	0,07	-Fe-Mo	0,21
-Cr-Cu	0,09	-Al-Mn	0,07	-Cr-Ni-Fe-Mn	0,21
-Fe-Mo	0,06			-Ni-Mo	0,13
G = 22		G = 12		G = 31	

Таким образом, предложена точка отбора пробы с центробежного фильтра тепловоза на СВЧ плазменный анализ для оценки состояния узлов маслосистемы. Данная точка позволяет исключить (снизить) влияния, связанные недостаточной представительностью анализируемой пробы. Разработана конструкция пробоотборника, методика отбора с ротора ЦФ и методика пробоподготовки для проведения анализа на СВЧ плазменном анализаторе. Показано, что частицы по высоте ротора распределены достаточно равномерно и отбор пробы на анализ можно производить из любой области ротора. Показано, что параметры частиц в пробе масла, в пределах погрешности измерений, соответствуют параметрам частиц в пробе с центрифуги. Это означает, что проба, отобранная с ЦФ является эффективной альтернативой пробе масле, слитой с картера дизеля. Предложено использовать значение рейтинга «сложных» частиц в качестве количественной

оценки степени повреждения узла и продемонстрировано, что «сложные» частицы позволяют идентифицировать поврежденный узел дизеля.

Список литературы

1. Минаков, В. А. Совершенствование технологии диагностирования тепловозного дизеля по результатам контроля содержания продуктов износа в моторном масле : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Минаков Виталий Анатольевич ; Омский техн. ун-т путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ)). – Омск, 2019. – 19 с.
2. СВЧ плазменный атомно-эмиссионный спектральный способ диагностирования тепловозных дизелей по параметрам частиц изнашивания / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, А. А. Кузнецов, Л. И. Докалов // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы VI всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2025. – С. 31-37
3. Атомно-эмиссионный сцинтилляционный анализатор для комплексного измерения параметров металлических частиц в смазочном масле двигателей внутреннего сгорания (ДВС) / Дроков В.Г., Дроков В.В., Мурыщенко В.В., Скудаев Ю.Д. // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 6-й Международной научно-технической конференции / Иркутский нац. исслед. техн. ун-т. – Иркутск, 2017. – С. 222-230.
4. Техническая справка №44-517141. Двигатели Д-30КП/КУ/КУ154, имевшие неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом, при контроле сцинтилляционным методом за период 2000–2007. – Рыбинск, ПАО "НПО "САТУРН", 2008. – 15 с.
5. Дроков, В. Г. Повышение достоверности диагностирования ГТД сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.14, 05.26.02 / Дроков Виктор Григорьевич ; ГосНИИГА. – М., 2009. – 42 с.

Контакты:

spectrosib@gmail.com (Дроков Виктор Григорьевич)
drokovviktor@yandex.ru (Дроков Виктор Владиславович)
kadm0909@gmail.com (Казмиров Александр Дмитриевич)
kuznetsova.omgups@gmail.com (Кузнецов Андрей Альбертович)
spectrosib@gmail.com (Мурыщенко Владимир Валерьевич)