

Корнеева В.К., кандидат технических наук, доцент;
Капцевич В.М., доктор технических наук, профессор;
Закревский И.В., старший преподаватель;
Спиридович П.М., аспирант

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧАСТИЦ ИЗНОСА В МОТОРНОМ МАСЛЕ *SHELL RIMULA 10W-40*

Аннотация. Представлены результаты морфологического анализа частиц износа, содержащихся в моторном масле *Shell Rimula 10W-40* с наработкой 100 ч. Исследование выполнено на фильтрограммах, полученных с помощью металлографического микроскопа *Polyvar*. С использованием инструмента *Analyze Particles* программы *ImageJ* определены морфологические характеристик частиц износа: площадь, периметр, диаметры Фере, круглость, сплошность и др. Показано, что методы металлографии в сочетании с цифровой обработкой изображений позволяют эффективно выявлять и количественно оценивать морфологию частиц износа в моторных маслах.

Abstract. The article presents the results of a morphological analysis of wear particles contained in Shell Rimula 10W-40 motor oil with 100 hours of service life. The study was performed on filtergrams obtained using a Polyvar metallographic microscope. Using the Analyze Particles tool in ImageJ, the morphological characteristics of the wear particles were determined, including area, perimeter, Feret diameters, roundness, continuity, and others. It is demonstrated that metallographic methods combined with digital image processing enable the effective detection and quantitative assessment of wear particle morphology in motor oils.

Ключевые слова. Моторное масло, фильтрограмма, металлография, частицы износа, *ImageJ*, *Analyze Particles*, морфологический анализ.

Keywords. Motor oil, filtergram, metallography, wear particles, ImageJ, Analyze Particles, morphological analysis.

Надежность и долговечность ДВС во многом определяются интенсивностью процессов изнашивания трущихся поверхностей. В процессе эксплуатации двигателя продукты износа попадают в моторное масло, которое становится носителем диагностической информации о техническом состоянии узлов трения [1]. Анализ частиц износа позволяет выявлять характер развивающихся дефектов, оценивать интенсивность изнашивания и прогнозировать остаточный ресурс ДВС.

Среди существующих методов исследования продуктов износа особое место занимает металлографический анализ. В отличие от спектральных методов, определяющих главным образом элементный состав, металло-

графия позволяет исследовать форму, размеры, распределение и морфологические особенности частиц. Именно геометрия частиц часто несет информацию о механизме их образования. Так, вытянутые частицы могут свидетельствовать об абразивном износе, пластинчатые – об усталостном разрушении поверхностных слоев, а мелкодисперсные округлые частицы – о нормальном эксплуатационном изнашивании [2].

Металлографический подход особенно эффективен при исследовании фильтрограмм моторных масел, полученных методом мембранной фильтрации [1]. Мембранная фильтрация обеспечивает концентрирование твердых загрязнений и частиц износа на поверхности фильтра, что создает благоприятные условия для последующего микроскопического анализа.

Современные цифровые методы обработки изображений значительно расширяют возможности металлографических исследований. Использование программного обеспечения *ImageJ* [3] позволяет автоматизировать процедуру измерения морфологических характеристик частиц и получать статистически достоверные данные по большим массивам объектов.

Целью работы является морфологический анализ частиц износа в моторном масле *Shell Rimula 10W-40* с использованием металлографической микроскопии и программной обработки изображений в среде *ImageJ*.

В качестве объекта исследования выбраны цифровые изображения фильтрограммы моторного масла *Shell Rimula 10W-40* с наработкой 100 ч, полученные с помощью металлографического микроскопа *Polyvar* на трех участках с увеличением 500× (рисунок 1). Выбор объекта обусловлен широким применением данного масла в ДВС автотракторной техники, а также необходимостью изучения динамики деградации масла и формирования продуктов износа при данной наработке.

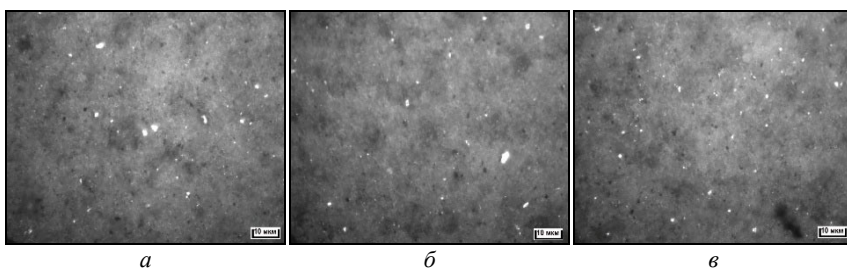


Рисунок 1 – Цифровые изображения фильтрограммы моторного масла *Shell Rimula*:
а – участок 1; б – участок 2; в – участок 3

На металлографических изображениях фильтрограммы наблюдаются светлые отражающие частицы и темные участки различной формы и размеров. Светлые частицы, обладающие высокой отражательной способно-

стью, с высокой вероятностью соответствуют металлическим частицам износа. Их яркий контраст в отраженном свете обусловлен высокой отражательной способностью металлической поверхности.

Темные участки фильтрограммы могут быть связаны с агломератами сажи, продуктами окисления масла, органическими загрязнениями и дисперсными углеродистыми образованиями. Фоновая структура фильтрограммы характеризуется относительно равномерным распределением мелкодисперсных загрязнений, что указывает на присутствие продуктов старения масла и мелкодисперсной сажи.

Обработка изображений выполнялась в программном комплексе *ImageJ*. Проводили предварительную обработку изображения, включающую создание копии, перевод ее в формат *8-bit*, калибровку (масштабирование) изображения, коррекцию контрастности и яркости и использование различных фильтров для улучшения изображения. Далее преобразовывали изображение в бинарное с выделением частиц износа, разделяли соприкасающиеся частицы и выбирали область интереса. На рисунке 2 представлено изображение фильтрограммы, готовое для проведения морфологического анализа.

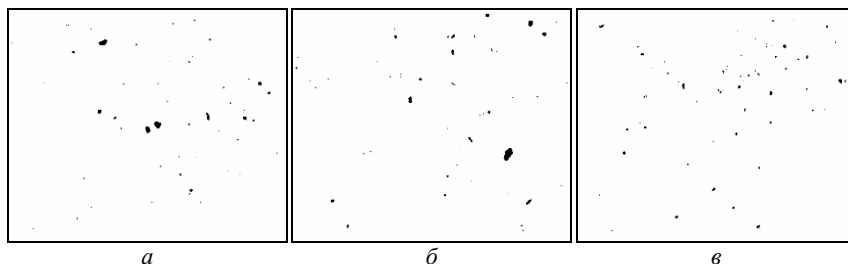
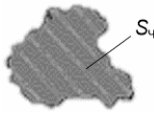
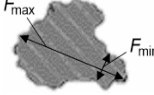
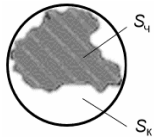
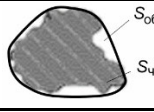
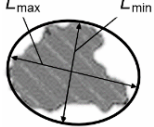


Рисунок 2 – Изображения фильтрограммы, готовое для морфологического анализа:
a – участок 1; *б* – участок 2; *в* – участок 3

Морфологический анализ проводили с использованием инструмента *Analyze Particles*, позволяющего, во-первых, задавать диапазоны размеров (площади) анализируемых частиц и их формы (круглость) и, во-вторых, получать результаты морфологических характеристик для каждой частицы по 25 параметрам.

Морфологический анализ частиц износа проводили по размерным характеристикам и характеристикам формы, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Морфологические характеристики частиц

Характеристики	Изображение	Обозначение, формула
<i>Area</i> (площадь частицы)		S_q – площадь частицы
<i>Perimeter</i> (периметр)		P_q – периметр частицы
<i>Max (Min) Feret</i> (максимальный (минимальный) Фере)		$F_{\max}$ и $F_{\min}$ – максимальный и минимальный диаметры Фере
<i>Circularity</i> (круглость)	–	$C = 4\pi S_q / P_q^2$
<i>Roundness</i> (округлость)		$R = S_q / S_k$, S_k – площадь наименьшей описывающей окружности
<i>Solidity</i> (сплошность)		$S = S_q / S_{об}$, $S_{об}$ – площадь описывающей выпуклой оболочки
<i>Aspect ratio (AR)</i> (соотношение сторон)		$AR = L_{\max} / L_{\min}$, $L_{\max}$ и $L_{\min}$ – длина главной и малой оси описывающего эллипса

В результате обработки изображений было проанализировано 192 частицы. Результаты описательной статистики представлены, включающие минимальное Min , максимальное Max и среднее значение μ морфологических характеристик, стандартное отклонение σ , также рассчитанные значения медианы Me , первого Q_1 и третьего Q_3 квартилей и межквартильного размаха IQR [4] и коэффициента вариации CV , представлены в таблице 2.

Для оценки морфологических характеристик частиц проводили статистический анализ, чтобы выявить взаимосвязи между параметрами и сделать выводы о свойствах частиц.

Таблица 2 – Описательная статистика морфологических параметров частиц износа

Параметр	Min	Max	μ	σ	Q_1	Me	Q_3	IQR	$CV, \%$
S_q , мкм ²	0,01	9,38	0,45	0,93	0,06	0,16	0,44	0,38	206,67
P_q , мкм	0,32	12,69	1,99	1,75	0,86	1,49	2,55	1,69	87,94
L_{max} , мкм	0,13	4,71	0,74	0,62	0,35	0,55	0,93	0,58	83,78
L_{min} , мкм	0,13	2,54	0,49	0,38	0,23	0,36	0,64	0,41	77,55
F_{max} , мкм	0,16	4,86	0,81	0,64	0,41	0,64	1,04	0,63	79,01
F_{min} , мкм	0,11	2,79	0,52	0,41	0,22	0,44	0,67	0,45	78,85
C	0,38	1,00	0,92	0,12	0,88	0,98	1,00	0,12	13,04
R	0,20	1,00	0,70	0,17	0,56	0,68	0,81	0,25	24,29
S	0,67	1,00	0,89	0,07	0,86	0,89	0,93	0,07	7,87
AR	1,00	5,11	1,55	0,51	1,24	1,46	1,79	0,55	32,90

Полученные результаты показывают, что основная часть частиц характеризуется небольшими размерами и высокой округлостью. Среднее значение C , близкое к единице, свидетельствует о преобладании относительно компактных частиц. Значение $AR = 1,55$ указывает на наличие умеренно вытянутых частиц. Подобная морфология характерна для частиц, возникающих при процессах абразивного и усталостного изнашивания. Высокие значения S свидетельствуют об отсутствии значительной фрактальности контуров большинства частиц.

Проведенный статистический анализ морфологических параметров частиц позволяет более детально оценить характер загрязнений и особенности процессов изнашивания.

Наиболее высокими коэффициентами вариации характеризуются параметры S_q и P_q . Значение CV для S_q частиц превышает 200 %, что свидетельствует о крайне неоднородном гранулометрическом составе загрязнений. В исследуемом масле одновременно присутствуют как мелкодисперсные частицы, так и относительно крупные включения. Существенная вариабельность параметров L_{max} , L_{min} , F_{max} и F_{min} также указывает на широкий диапазон размеров частиц. Максимальные значения S_q и параметра F_{max} значительно превышают медианные значения, что свидетельствует о наличии единичных крупных частиц износа.

Распределение большинства размерных параметров имеет выраженную правостороннюю асимметрию. Это подтверждается значительным различием между средними и медианными значениями. Например, средняя S_q почти в три раза превышает медианное значение. Подобная закономерность характерна для систем, содержащих небольшое количество крупных частиц на фоне преобладающей мелкодисперсной фракции. Наличие единичных крупных частиц может указывать на локальные процессы интенсивного механического разрушения поверхностей трения.

Высокие значения C и S свидетельствуют о том, что значительная часть частиц обладает относительно компактной и сглаженной формой. Медианное значение C , близкое к единице, указывает на преобладание частиц без выраженной угловатости. Низкий коэффициент вариации параметра S показывает сравнительно устойчивую структуру контуров частиц и отсутствие большого количества сильно фрагментированных или дендритных образований.

Параметр AR характеризуется умеренной вариабельностью. Его медианное значение свидетельствует о наличии умеренно вытянутых частиц. Подобная морфология может быть связана с процессами микрорезания и абразивного изнашивания. При этом отсутствие экстремально высоких значений AR у большинства частиц позволяет сделать вывод о том, что в исследуемом масле не наблюдается массового присутствия длинных стружкообразных фрагментов. Параметр R имеет более низкие значения по сравнению с C , что свидетельствует о наличии определенной анизотропии формы частиц. Это может быть связано с деформацией частиц в процессе трения и последующим дроблением.

Анализ квартилей показывает, что основная масса частиц сосредоточена в области малых размеров. Межквартильный размах для большинства параметров существенно ниже максимальных значений, что дополнительно подтверждает присутствие ограниченного числа крупных частиц.

Таким образом, проведенные исследования показали, что методы металлографии в сочетании с цифровой обработкой изображений позволяют эффективно выявлять и количественно оценивать морфологию частиц износа, что делает данный подход перспективным для диагностики технического состояния ДВС.

Список использованной литературы

1. Капцевич, В.М. Экспресс-методы контроля свойств моторного масла автотракторных двигателей внутреннего сгорания в условиях организаций агропромышленного комплекса / В.М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2023. – 120 с.
2. Корнеева, В.К. Аналитическая феррография моторного масла – один из основных методов контроля износа трибосопряжений ДВС / В.К. Корнеева [и др.] // Агропанорама. – 2023. – № 4. – С. 26-33.
3. Ferreira, T. ImageJ user guide / Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.
4. Красько, О. В. Статистический анализ данных в медицинских исследованиях: в 2 ч. / О. В. Красько. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2014. – Ч. I. – 127 с.

Summary. The conducted studies have shown that metallography methods in combination with digital image processing allow for the effective detection and quantitative assessment of the morphology of wear particles, which makes this approach promising for diagnosing the technical condition of internal combustion engines.