

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА IMAGEJ ЧАСТЬ 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАГИНА EXTENDED PARTICLE ANALYZER ДЛЯ РАСШИРЕННОГО МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЧАСТИЦ ИЗНОСА

В.К. Корнеева,

доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.М. Капцевич,

зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В статье представлена методика морфологического анализа продуктов износа с использованием плагина Extended Particle Analyzer программного комплекса ImageJ. Проведена оценка формы и размеров 135 частиц, выделенных на фильтрограмме моторного масла Shell Rimula 10W40 с наработкой 250 часов. Определены основные морфологические параметры, проведены статистический и корреляционный анализы, на основании которых выявлены устойчивые связи между параметрами формы и предполагаемыми механизмами изнашивания. Полученные результаты подтверждают высокую диагностическую значимость морфологических характеристик частиц износа при оценке состояния трибосопряжений ДВС.

Ключевые слова: моторное масло, продукты износа, морфологический анализ, ImageJ, Extended Particle Analyzer, статистический и корреляционный анализ, механизмы изнашивания.

The article presents a method for morphological analysis of wear products using the Extended Particle Analyzer plug-in of the ImageJ software package. The shape and size of 135 particles isolated on a filterogram of Shell Rimula 10W40 engine oil with 250 hours of operation have been evaluated. The main morphological parameters have been determined, statistical and correlation analyses have been carried out, on the basis of which stable relationships between the parameters of form and the presumed wear mechanisms have been identified. The obtained results confirm the high diagnostic significance of the morphological characteristics of wear particles in assessing the state of ICE tribocouplings.

Keywords: engine oil, wear products, morphological analysis, ImageJ; Extended Particle Analyzer, statistical and correlation analysis; wear mechanisms.

Введение

Абразивные частицы и продукты износа ДВС по своему отрицательному воздействию являются наиболее опасными загрязнениями, влияющими как на состояние моторного масла, так и на работу двигателя [1]. Анализ морфологических характеристик частиц износа, выделенных из моторного масла, является эффективным инструментом диагностики технического состояния трибосопряжений ДВС и идентификации доминирующих механизмов изнашивания, и при этом позволяет выявить потенциальные нарушения в работе двигателя до наступления внезапных отказов. Так, параметры размера и формы частиц, такие как периметр, площадь, соотношение размеров сторон, округлость, компактность и др., служат количественными признаками, отражающими особенно-

сти процессов абразивного, усталостного, адгезионного и коррозионного изнашивания [2-5]. Современные исследования показывают [3, 4; 6], что статистическая обработка морфологических данных и корреляционный анализ позволяют выявлять устойчивые связи между морфологическими характеристиками частиц и типами износа. Например, установлено [3; 5], что вытянутые частицы с высокой величиной соотношения сторон и низкой округлостью характерны для абразивного изнашивания, тогда как частицы с формой, близкой к сферической, соответствуют условиям усталостного изнашивания.

Разработка и применение методов компьютерного анализа изображений в сочетании со статистическими и корреляционными методами обработки данных открывают новые возможности для автоматиза-

ции диагностики технических систем на основе анализа продуктов износа [6, 7].

Ранее в работе [8] предложена методика и алгоритм анализа цифрового изображения частиц износа на фильтрограмме, полученной методом мембранной фильтрации, с применением встроенного в программный комплекс *ImageJ* [9] инструмента *Analyze Particles*. Использование разработанного алгоритма, включающего три стадии: подготовку изображения, его сегментацию и непосредственный анализ, позволило определить площади частиц, их количество и сферичность (круглость). Однако такой анализ размеров и формы частиц не позволяет в полной мере оценить морфологию продуктов износа, по которой можно судить о механизмах изнашивания трибосопряжений ДВС.

Одним из преимуществ программного комплекса *ImageJ* является возможность использования более тысячи плагинов, которые расширяют функциональность программы для решения различного рода технических задач. Для анализа частиц разработаны такие плагины, как *ParticleSizer*, *ND (Nearest Distances)*, *Extended Particle Analyzer*, *Custom Particle Analyzer* и др. [10]. Среди перечисленных плагинов наибольший интерес для анализа продуктов износа представляет *Extended Particle Analyzer* (расширенный анализатор частиц) [11], который расширяет возможности встроенного инструмента *Analyze Particles* и обладает рядом ключевых преимуществ по сравнению с традиционными методами и плагинами. Он обеспечивает более точный набор морфологических характеристик частиц, включая показатели формы и структуры, позволяет проводить комплексный анализ пространственного распределения частиц, в том числе кластеризацию и взаимное расположение, что значительно превосходит возможности узкоспециализированных плагинов (например, *ND*). Данный плагин оптимизирован для работы с широким диапазоном размеров и типов частиц, а также обладает средствами визуализации и автоматизации пакетной обработки больших объемов данных, что позволяет интегрировать результаты анализа для последующих исследований.

Целью настоящей работы является проведение расширенного морфологического анализа продуктов износа с использованием плагина *Extended Particle Analyzer* и последующей статистической и корреляционной обработки результатов для выявления механизмов изнашивания трибосопряжений ДВС.

Основная часть

Для проведения морфологического анализа продуктов износа выбрано оригинальное цифровое изображение фрагмента фильтрограммы (диаметр 3 мм) моторного масла марки *Shell Rimula 10W40* с наработкой 250 ч (рис. 1), полученное с помощью беззеркального фотоаппарата *Canon EOS M50*. Изображение фильтрограммы, готовое к проведению анализа в программном комплексе *ImageJ* после стадий подготовки и сегментации [8], представлено на рис. 2.

Для непосредственного анализа количества, размеров и формы частиц воспользуемся плагином *Extended Particle Analyzer*, в окне которого (рис. 3)

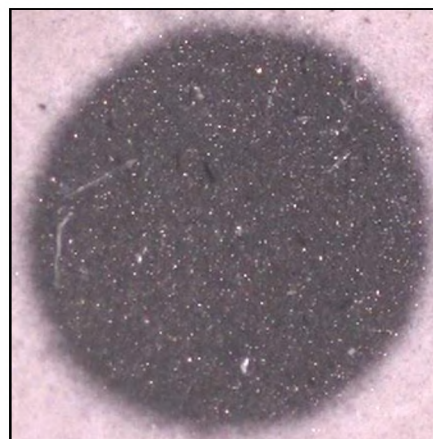


Рисунок 1. Оригинальное цифровое изображение фильтрограммы

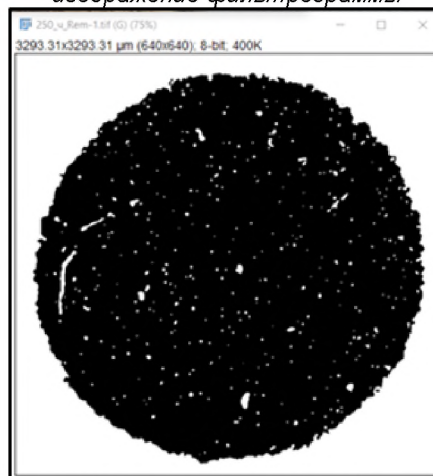


Рисунок 2. Окончательное изображение, готовое для анализа

устанавливаем режимы для проведения исследования и задаем диапазоны значений анализируемых морфологических характеристик частиц.

Морфологические характеристики анализируемых частиц, диапазоны значений которых задаются в плагине, представлены в таблице 1. Выбор этих диапазонов значений позволяет определять морфологические величины и проводить анализ частиц с конкретными выбранными параметрами. Если параметры, характеризующие частицы, не попадают в заданные диапазоны, частицы исключаются из результатов анализа.

Проведем анализ морфологических характеристик продуктов износа, учитывая, что наиболее опасными являются частицы, размер которых превышает 20 мкм [12]. Для этого в окне плагина ограничиваем только минимальное значение площади частиц *Area*, равное 300 мкм², а все остальные значения размеров и формы устанавливаем во всем возможном диапазоне их изменений.

Для вывода результатов анализа частиц фиксируем следующие опции. Выбираем режим *Outlines* в опции *Show*, чтобы получить изображение контура частиц с номерами в отдельном окне. Отмечаем опции *Display results* и *Summarize*, позволяющие вывести на экран в виде отдельных окон таблицу с результатами анализа для каждой частицы и сводную

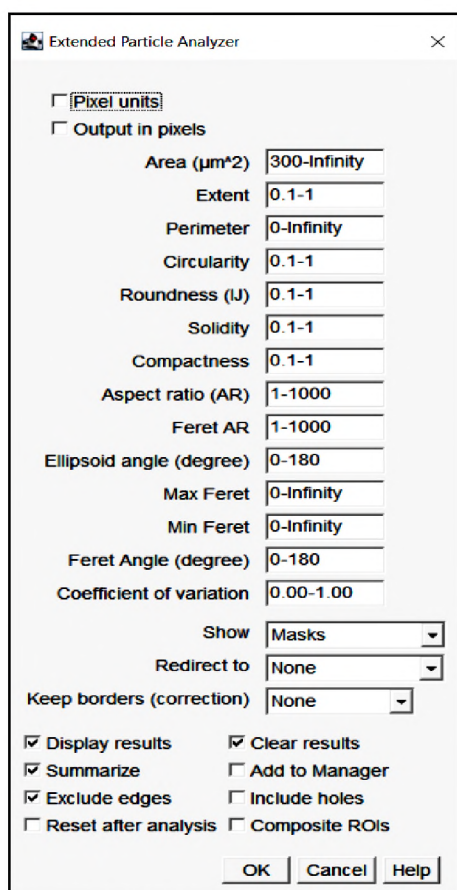


Рисунок 3. Интерфейс окна плагина
Extended Particle Analyze

таблицу с общими статистическими данными для всех параметров соответственно. Включаем опции *Exclude edges* для исключения частиц, обрезанных краями изображения, и *Include holes* для учета присутствия отверстий и трещин на частицах при расчете их площади и других параметров.

Окончательный результат анализа частиц получаем в виде трех отдельных окон (рис. 4): *Summary* – таблица средних значений анализируемых морфологических характеристик частиц; *Drawing of Mask* – изображение контуров частиц с номерами; *Results* – таблица значений анализируемых морфологических характеристик каждой частицы.

В таблице (окно *results*, рис. 4) получены результаты измерений размеров, формы и ориентации 135 продуктов износа по 40 параметрам. Для оценки морфологических характеристик частиц проведем статистический и корреляционный анализ, чтобы выявить взаимосвязи между параметрами и сделать выводы о свойствах частиц.

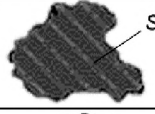
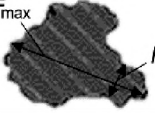
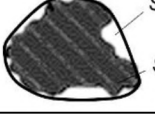
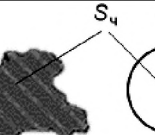
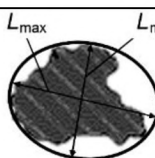
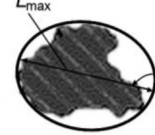
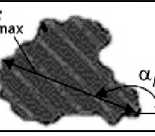
Статистические данные основных морфологических характеристик, включающие диапазоны их значений, среднее значение μ , стандартное отклонение σ , а также рассчитанные значения коэффициента вариации CV , медианы Me , первого Q_1 и третьего Q_3 квартилей и межквартильного размаха IQR [13], представлены в таблице 2.

Медиана (50-й перцентиль) представляет значение, ниже которого находится 50 % наблюдений, и служит устойчивой характеристикой центральной тенденции, особенно в распределениях с выбросами. Первый квартиль (25 %) и третий квартиль (75 %) позволяют оценить интервал, в котором находится основная масса данных (межквартильный размах, IQR). Эти статистические характеристики служат для оценки однородности и выявления аномальных частиц.

Для визуальной интерпретации распределения морфологических параметров частиц износа были построены диаграммы «Ящик с усами» (рис. 5), отражающие основные статистические показатели: среднее значение (крестик «x»), медиану (центральная линия в прямоугольнике), первый (нижняя граница прямоугольника) и третий (верхняя граница прямоугольника) квартили, минимальные (нижний «ус») и максимальные (верхний «ус») значения без выбросов, а также сами выбросы (точки за пределами «усов» (на рис. 5 выбросы скрыты)). В качестве примеров на рис. 5а представлена диаграмма площади S_q , на рис. 5б – соотношения сторон AR , на рис. 5в – максимального диаметра Фере F_{max} и длины главной оси L_{max} , а на рис. 5г – круглости C и округлости R .

Представленные диаграммы «Ящик с усами» позволяют не только визуализировать статистические характеристики, но и выявить потенциально важные особенности, недоступные при анализе только по средним значениям. Так, например, для площади частиц S_q первый квартиль Q_1 составил 344 мкм², медиана Me – 450 мкм², третий квартиль Q_3 – 662 мкм², при максимальном значении до 14 458 мкм², что свидетельствует о том, что основная масса частиц имеет средние размеры, но в системе присутствуют единичные крупные фрагменты, обусловленные интенсивным изнашиванием или локальными дефектами деталей двигателя. Анализ соотношения сторон AR показал, что 50 % частиц находятся в диапазоне от 1,15 до 1,65, что указывает на незначительное удлинение частиц и преобладание форм, близких к округлым. Однако значение максимального $AR = 8,87$ подтверждает наличие отдельных, сильно вытянутых фрагментов, характерных для абразивного изнашивания. Значения округлости R и круглости C для большинства частиц превышают 0,75 и приближаются к 1, что указывает на преобладание частиц с изотропной формой, типичной для усталостного изнашивания и нормальной работы узлов трения, однако присутствие частиц с низкой округлостью ($R < 0,5$) может быть результатом абразивного изнашивания. Высокое значение сплошности S также подтверждает, что частицы имеют компактную форму, без выраженных фрагментаций или сложной геометрии. Для характеристик углов α и α_F наблюдается широкий межквартильный размах IQR , равный 108° и 74° соответственно, что указывает на высокую дисперсию ориентации частиц. Анализ совокупности параметров позволяет заключить, что изнашивание в данной системе преимущественно носит усталостно-абразивный характер. Частицы демонстрируют признаки изнашивания с частичной пластической деформацией, что типично для условий, сопровож-

Таблица 1. Морфологические характеристики частиц, задаваемые для анализа

Характеристики	Диапазоны	Схематическое изображение	Обозначение, формула
<i>Area</i> (μm^2) (площадь частицы (мкм ²))	0–infinity		$S_{\text{ч}}$ – площадь частицы
<i>Perimeter</i> (μm) (периметр (мкм))	0–infinity		$P_{\text{ч}}$ – периметр частицы
<i>Max Feret</i> и <i>Min Feret</i> (максимальный Фере и минимальный Фере)	0–infinity		F_{max} и F_{min} – максимальный и минимальный диаметры Фере
<i>Circularity</i> (круглость)	0–1,0	–	$C = 4\pi S_{\text{ч}} / P_{\text{ч}}^2$
<i>Extent</i> (степень заполнения)	0–1,0		$E = S_{\text{ч}} / S_{\text{п}}$, $S_{\text{п}}$ – площадь прямоугольника, описывающего контуры частицы
<i>Roundness</i> (округлость)	0–1,0		$R = S_{\text{ч}} / S_{\text{к}}$, $S_{\text{к}}$ – площадь наименьшей описывающей окружности
<i>Solidity</i> (сплошность)	0–1,0		$S = S_{\text{ч}} / S_{\text{об}}$, $S_{\text{об}}$ – площадь описывающей выпуклой оболочки
<i>Compactness</i> (компактность)	0–1,0		$K = P_{\text{к}} / P_{\text{ч}}$, $P_{\text{к}}$ – периметр круга, площадь которого соответствует площади частицы
<i>Feret AR</i> (соотношение Фере)	1–infinity	–	$AR_F = F_{\text{max}} / F_{\text{min}}$
<i>Aspect ratio (AR)</i> (соотношение сторон)	1–infinity		$AR = L_{\text{max}} / L_{\text{min}}$, L_{max} и L_{min} – длина главной и малой оси описывающего эллипса
<i>Ellipsoid angle (degree)</i> (угол эллипсоида (град))	0–180		α – угол наклона L_{max}
<i>Feret Angle (degree)</i> (угол Фере (град))	0–180		α_F – угол наклона F_{max}
<i>Coefficient of Variation</i> (коэффициент вариации)	0–1,0	–	$CV = \sigma / \mu$, σ – стандартное отклонение μ – среднее значение

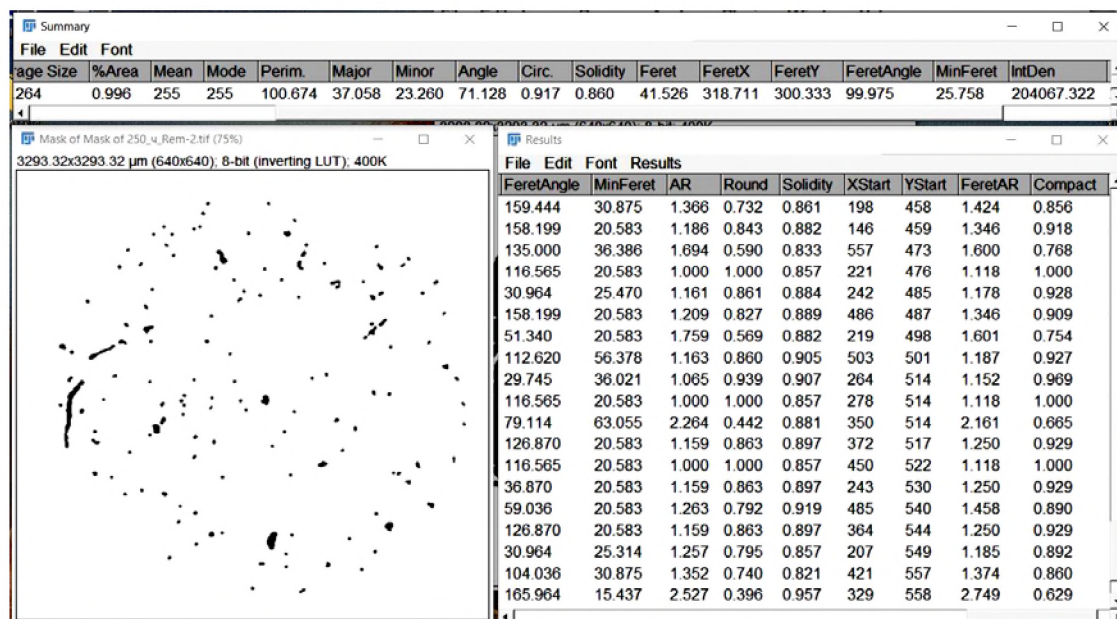


Рисунок 4. Вывод результатов в виде трех отдельных окон

Таблица 2. Статистические данные основных морфологических характеристик

Параметр	Диапазон	μ	σ	CV	Q_1	Me	Q_3	IQR
$S_{\text{ч}}$, мкм ²	318–14458	800	± 1399	1,75	344	450	662	318
$P_{\text{ч}}$, мкм	58–1145	101	± 106	1,05	61	73	97	36
L_{max} , мкм	20–337	37	± 37	1,00	23	27	38	15
L_{min} , мкм	15–57	23	± 7	0,30	19	21	23	4
C	0,14–1,00	0,92	$\pm 0,15$	0,16	0,88	1,00	1,00	0,12
F_{max} , мкм	23–513	42	± 47	1,12	26	30	41	15
F_{min} , мкм	15–94	26	± 11	0,42	21	21	26	5
AR	1,00–8,87	1,52	$\pm 0,95$	0,63	1,15	1,26	1,65	0,5
R	0,11–1,00	0,75	$\pm 0,2$	0,27	0,61	0,79	0,87	0,26
S	0,45–1,00	0,86	$\pm 0,06$	0,07	0,85	0,86	0,90	0,05
AR_F	1,09–5,94	1,50	$\pm 0,61$	0,41	1,20	1,35	1,60	0,4
K	0,34–1,00	0,86	$\pm 0,13$	0,15	0,78	0,89	0,93	0,15
E	0,21–1,00	0,72	$\pm 0,12$	0,17	0,65	0,75	0,8	0,15
α , град	0–180	71	± 57	0,80	20	58	128	108
α_F , град	17–166	100	± 44	0,44	52	117	127	75

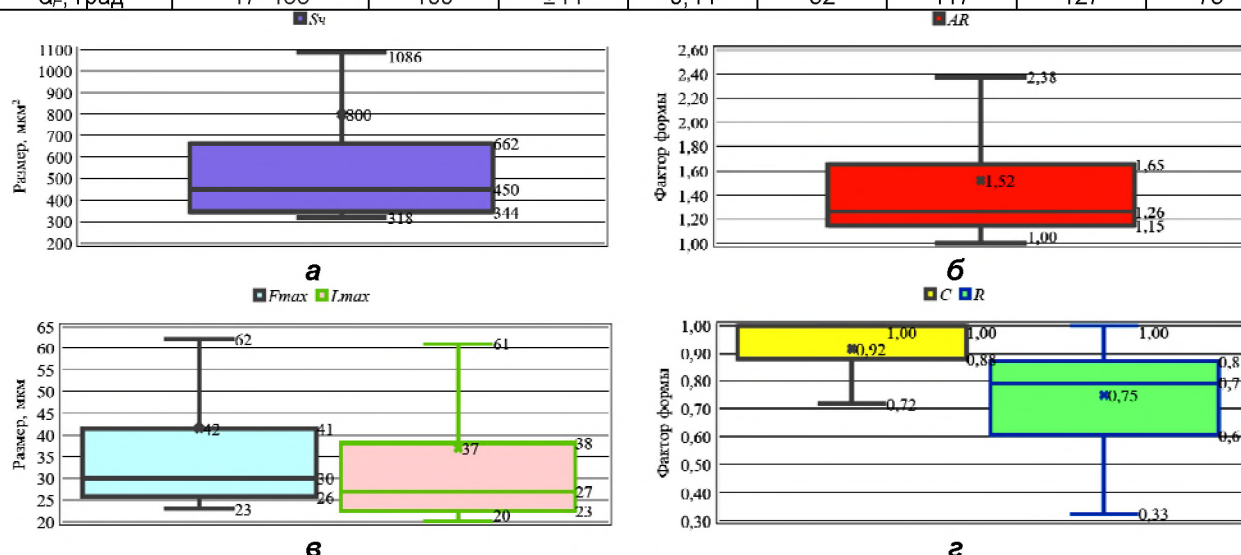


Рисунок 5. Диаграммы «Ящик с усами»: а – площади $S_{\text{ч}}$; б – соотношения сторон AR; в – максимального диаметра Фере F_{max} и длины главной оси L_{max} ; г – круглости C и округлости R

дающихся умеренными нагрузками и нестабильной масляной пленкой.

Проведенный статистический анализ позволил установить взаимосвязь между морфологическими характеристиками продуктов износа и доминирующими механизмами изнашивания. Установление такой взаимосвязи является важным элементом трибологического анализа, который позволяет не только диагностировать состояние узлов и систем ДВС, но и оценить тип изнашивания трибосопряжений. В таблице 3 представлен анализ морфологических параметров с учетом медианы Me и межквартильного размаха IQR , связывающих каждый параметр с потенциальными основными механизмами изнашивания (без учета водородного, коррозионно-механического и кавитационного изнашивания, при которых характерные размеры частиц износа составляют менее 10 мкм).

Для установления взаимосвязей между морфологическими характеристиками частиц был проведен корреляционный анализ [14], направленный на выявление статистически значимых зависимостей между определяемыми величинами.

Корреляционная матрица, рассчитанная с использованием коэффициента Пирсона r , в виде «тепловой карты» [15] представлена на рисунке 6. Считается [14], что если значения коэффициента Пирсона $|r|$ находятся в диапазоне 0-0,3 – слабая; 0,3-0,5 – средняя; 0,5-0,7 – высокая; 0,7-0,9 – очень высокая.

Анализ «тепловой карты» позволил определить как прямые, так и обратные зависимости между от-

дельными параметрами.

Наиболее выраженные положительные корреляции наблюдаются между следующими парами: S_c тесно коррелирует с P_c ($r = 0,95$); L_{max} ($r = 0,90$) и F_{max} ($r = 0,92$), что логично, поскольку увеличение площади частицы обычно сопровождается увеличением ее линейных размеров; L_{max} находится в очень высокой взаимосвязи с F_{max} ($r = 0,95$), а L_{min} с F_{min} ($r = 0,90$), показывая, что размеры частиц по основным направлениям (главной и малой осей) согласуются с габаритными характеристиками Фере. Высокая корреляция между AR и AR_F ($r = 0,95$) свидетельствует о том, что оба параметра эффективно характеризуют вытянутость частиц.

С другой стороны, были выявлены очень высокие отрицательные корреляции, указывающие на противоположную направленность изменений характеристик: $AR - R$ ($r = -0,90$) и $AR_F - R$ ($r = -0,85$), показывая, что вытянутые частицы имеют меньшую округлость; $AR - C$ ($r = -0,80$) – чем больше вытянутость частицы, тем меньше ее приближенность к окружности; $R - AR_F$ ($r = -0,85$) – округлость также обратно пропорциональна степени вытянутости, измеренной по Фере. Следует также отметить, что параметры C и R показывают высокую корреляцию ($r = 0,75$), доказывая, что более компактные частицы обычно более округлые. Параметр E положительно коррелирует с большинством линейных параметров, особенно с F_{min} ($r = 0,80$).

Таким образом, корреляционный анализ подтверждает наличие устойчивых зависимостей между различными морфологическими характеристиками частиц. Выявленные взаимосвязи, как и статистиче-

Таблица 3. Взаимосвязь морфологических характеристик продуктов износа и механизмов изнашивания

Параметр	Me	IQR	Интерпретация механизмов изнашивания
S_c , мкм ²	450	318	Средняя площадь частиц – умеренная. Высокий IQR указывает на разнообразие размеров, что может свидетельствовать о комбинированном изнашивании: мелкие частицы от усталостного изнашивания, крупные – от абразивного
P_c , мкм	73	36	Значение периметра связано с неровностью формы. Высокое значение говорит о шероховатых, рваных краях, что типично для абразивного и адгезионного изнашивания
L_{max} , мкм	27	15	Разница между осями указывает на вытянутость частиц, что характерно для абразивного изнашивания
L_{min} , мкм	21	4	
C	1,00	0,12	Значение параметра, близкое к 1, свидетельствует о почти идеальной геометрии частиц. Однако такая форма может быть не только следствием усталостного механизма изнашивания, но и результатом цифровой обработки изображения
F_{max} , мкм	30	15	Разница между максимальным и минимальным диаметром говорит о вытянутой форме частиц. Подтверждает абразивное или адгезионное происхождение
F_{min} , мкм	21	5	
AR	1,26	0,5	Указывает на вытянутую форму ($AR > 1$). Значение 1,26 подтверждает наличие частиц, полученных при сдвиговых напряжениях
R	0,79	0,26	Высокая округлость свойственна усталостному изнашиванию, когда частицы отделяются плавно, без острых граней
S	0,86	0,05	Значение около 0,85 указывает на плотную структуру частиц, не содержащих внутренних пустот, что часто встречается при коррозионно-усталостном механизме
AR_F	1,35	0,4	Подтверждает умеренную вытянутость, что характерно для абразивного и сдвигового изнашивания
K	0,89	0,15	Высокое значение параметра показывает, что частицы имеют плотную, компактную форму, свойственную усталостному и коррозионному изнашиванию
E	0,75	0,15	Параметр имеет граничное значение: если его величина меньше 0,7 – коррозионное изнашивание, больше 0,75 – усталостное

	S_q	P_q	L_{max}	L_{min}	C	F_{max}	F_{min}	AR	R	S	AR_F	K	E
S_q	1	0,95	0,9	0,85	-0,4	0,92	0,8	-0,3	0,35	0,6	-0,25	0,45	0,7
P_q	0,95	1	0,88	0,82	-0,45	0,9	0,78	-0,35	0,3	0,55	-0,3	0,4	0,65
L_{max}	0,9	0,88	1	0,7	-0,5	0,95	0,65	-0,4	0,25	0,5	-0,35	0,35	0,6
L_{min}	0,85	0,82	0,7	1	-0,2	0,75	0,9	-0,15	0,4	0,65	-0,1	0,5	0,75
C	-0,4	-0,45	-0,5	-0,2	1	-0,55	-0,25	-0,8	0,85	0,3	-0,75	0,7	0,25
F_{max}	0,92	0,9	0,95	0,75	-0,55	1	0,7	-0,45	0,2	0,45	-0,4	0,3	0,55
F_{min}	0,8	0,78	0,65	0,9	-0,25	0,7	1	-0,2	0,45	0,7	-0,15	0,55	0,8
AR	-0,3	-0,35	-0,4	-0,15	-0,8	-0,45	-0,2	1	-0,9	-0,1	0,95	-0,6	-0,05
R	0,35	0,3	0,25	0,4	0,85	0,2	0,45	-0,9	1	0,2	-0,85	0,75	0,15
S	0,6	0,55	0,5	0,65	0,3	0,45	0,7	-0,1	0,2	1	-0,05	0,4	0,6
AR_F	-0,25	-0,3	-0,35	-0,1	-0,75	-0,4	-0,15	0,95	-0,85	-0,05	1	-0,55	0
K	0,45	0,4	0,35	0,5	0,7	0,3	0,55	-0,6	0,75	0,4	-0,55	1	0,35
E	0,7	0,65	0,6	0,75	0,25	0,55	0,8	-0,05	0,15	0,6	0	0,35	1

Рисунок 6. «Тепловая карта» корреляционной матрицы морфологических характеристик

ский анализ, можно использовать при интерпретации механизмов изнашивания. Например, существенная отрицательная корреляция между коэффициентами формы AR , AR_F и R , C указывает на различие в морфологии частиц, характерное для разных механизмов изнашивания. Вытянутые формы чаще связаны с абразивным типом, округлые – с усталостным. Такой анализ также может быть использован при кластеризации частиц и разработке автоматизированных алгоритмов их распознавания.

Закключение

Проведенный морфологический анализ частиц износа, извлеченных из моторного масла, позволил количественно охарактеризовать их геометрию и установить связи между формой частиц и механизмами изнашивания. Использование плагина *Extended Particle Analyzer* программного комплекса *ImageJ* обеспечило расширенные возможности анализа и точную фильтрацию частиц по множеству параметров. Статистический анализ (медиана, межквартильный размах, коэффициент вариации) подтвердил высокую вариативность в размерах и форме частиц, тогда как корреляционный анализ выявил устойчивые связи между параметрами вытянутости и округлости. Полученные данные указывают на доминирование усталостного и абразивного изнашивания в исследуемом образце.

Методика, представленная в работе, может быть рекомендована для автоматизированной оценки состояния узлов трения и мониторинга ресурса машин в агропромышленном комплексе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Венцель, С.В. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – 240 с.
2. Roylance, B.J. Wear debris and associated wear phenomena: Fundamental research and practice / B.J. Roylance, J.A. Williams, R. Dwyer-Joyce // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2000. – Vol. 214 (1). – P. 79-105.

3. Roylance, B.J. Wear Debris Analysis / B.J. Roylance, T.M. Hunt. – Oxford: Coxmoor Publishing Co., 1999. – 144 p.
4. Williams, J.A. Wear and wear particles – some fundamentals / J.A. Williams. // Tribology International. – 2005. – Vol. 38 (10). – P. 863-870.
5. Glaeser, W.A. Wear debris classification / W.A. Glaeser // Modern Tribology Handbook. – Boca Raton: CRC Press, 2001. – P. 301-315.
6. Peng, Z. Wear particle classification in a fuzzy grey system / Z. Peng, T.B. Kirk // Wear. – 1999. – Vol. 225-229(2). – P. 1238-1247.
7. Raadnui, S. Wear particle analysis – utilization of quantitative computer image analysis: a review / S. Raadnui // Tribology International. – 2025. – Vol. 38 (10). – P. 871-878.
8. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса ImageJ. Часть 3. Метод оценки размеров, количества и формы частиц / В.К. Корнеева [и др.] // Агропанорама. – 2025. – № 2. – С. 32-37.
9. Ferreira, T. ImageJ user guide / Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.
10. Schindelin, J. The ImageJ Ecosystem: An Open Platform for Biomedical Image Analysis / J. Schindelin [et al.] // Molecular Reproduction & Development. – 2015. – Vol. 82. – P. 518-529.
11. Brocher, J. The BioVoxxel Toolbox for ImageJ / Fiji: Extended Particle Analyzer and Shape Descriptor Maps // BioVoxxel Toolbox – ImageJ Wiki. – URL: https://imagej.net/imagej-wiki-static/BioVoxxel_Toolbox (date of access: 06.07.2025).
12. Zhu, L. Qualitative Classification of Lubricating Oil Wear Particle Morphology Based on Coaxial Capacitive Sensing Network and SVM / L. Zhu [et al.] // Sensors. – Vol. 22. – 2022. – P. 6653.
13. 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.
14. Баврина, А.П. Современные правила применения корреляционного анализа / А.П. Баврина, И.Б. Борисов // Медицинский альманах. – 2021. – № 3 (68). – С. 70-79.