

УДК 517.958:539.3

Инженерно-технический метод оценки герметичности прокладки крышки клапанов двигателей внутреннего сгорания

А.И. Недобитков, Б.М. Абдеев

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева

Engineering and technical methods of accessing the tightness of the valve cover gasket of the internal combustion engine

A.I. Nedobitkov, B.M. Abdeyev

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University

Обеспечение безопасности продукции автомобилестроения и защита прав потребителей являются актуальной задачей. Однако в научных публикациях и нормативных источниках отсутствуют обоснованные технические данные об оценке качества проектирования в рамках экспертизы качества автотранспортных средств. Приведены полученные с помощью растрового микроскопа результаты микроанализа как на участке с необеспеченной герметичностью прокладки, подвергшейся горению, так и на участке, не имевшем термических повреждений. Экспериментально подтверждено оптимальное соотношение высоты и ширины прямоугольной прокладки, используемой для уплотнения разъема крышки клапанов, и гарантирующее обеспечение контактного давления и отсутствие перекоса при монтаже. Разработана прикладная математическая модель для определения геометрических характеристик деформированного поперечного сечения прокладки крышки клапанов двигателя внутреннего сгорания. Полученные расчетно-теоретические данные наглядно описывают механизм течи моторного масла по причине несовершенства конструкции изделия. Результаты исследования могут быть использованы при проведении как пожарно-технической экспертизы в целях установления причины пожара автомобиля, так и экспертизы качества автотранспортных средств.

EDN: ZRMNGS, <https://elibrary/zrmngs>**Ключевые слова:** герметичность прокладки, работоспособность прокладки, эксплуатационный недостаток, контактное давление, растровый микроскоп

Ensuring safety of car manufacturing products and protecting consumer rights is a relevant task. However, scientific publications and regulatory sources lack well-grounded technical data on assessing design quality as part of the vehicle quality assessment. The paper includes images from a scanning electron microscope to illustrate the results of microanalyses made both on a section of the gasket that was not tightened properly and was exposed to combustion and a section that had no thermal damage. An optimal value of the height to width ratio has been experimentally verified for a rectangular gasket used to tighten the valve cover joint ensuring contact pressure and preventing from any misalignment during installation. An applied mathematical model has been developed to determine the geometric characteristics of a deformed cross-section of the engine valve cover gasket. The results of the theoretical calculation obtained clearly illustrate a mechanism of oil leakages in engines caused by

an inadequate design of the product. The attained results can be used in forensic studies to determine causes of vehicle fires and also in the context of the vehicle quality assessment.

EDN: ZRMNGS, <https://elibrary/zrmngs>

Keywords: gasket tightness, gasket performance, operational defect, contact pressure, scanning microscope

Сектор производства транспортных средств является одним из крупнейших потребителей сырья и продолжает расти [1]. Глобальные продажи легковых автомобилей удвоились за последние 30 лет и имеют дальнейшую тенденцию роста.

В то же время развитие двигателей внутреннего сгорания (ДВС) основано на уменьшении и оптимизации габаритных размеров [2]. Это связано с тем [3], что силовые агрегаты современных транспортных средств, особенно легковых автомобилей и фургонов, должны соответствовать все более строгим стандартам, которые направлены на сокращение выбросов CO₂ (например, глобальные инициативы GHGs, CARB-CAR).

Как отмечено в работе [4], рынки координируют не только спрос и предложение товаров, но и коллективное переосмысление того, каким товар может и должен быть. На основе результатов исследования безопасности автомобилей Volvo показано, что современная экономика Швеции меньше подвержена влиянию государственных органов и профсоюзов, чем в 1950-е или 1970-е годы. На сегодняшний день процессы рефрейминга чаще связаны с неправительственными организациями, которые преодолевают границу между корпоративным профессионализмом и политическими страстями. Особый интерес представляет то, как такие организации осмысливают сферу будущих возможностей, строя планы на основе объективно предсказуемых и субъективно желаемых сценариев будущего. Их цель — убедить корпоративных партнеров в неизбежности их видения будущего [4].

Негативными сторонами автомобилизации являются дорожно-транспортные происшествия и пожары транспортных средств, унесшие с момента изобретения автомобиля 60...80 млн жизней и травмировавшие не менее 2 млрд человек [5]. В настоящее время каждая тридцать четвертая смерть вызвана автомобилем.

По данным Национальной ассоциации пожарной защиты (National Fire Protection Association), пожары на транспорте стали причиной

большого числа жертв среди гражданского населения, чем пожары в нежилых и жилых зданиях. Причем в половине случаев гибели мирных жителей в результате пожара легкового автомобиля эксплуатационный недостаток был признан фактором, способствующим возгоранию.

Как показано в работе [6], возгорания автомобилей происходят из-за утечки горючесмазочных жидкостей, сбоев в работе электрооборудования, перегрева ДВС и плохого технического обслуживания.

В свою очередь, ГОСТ Р 58197–2018, регламентирующий порядок проведения экспертизы качества автотранспортных средств, выделяет три вида недостатков: деградационный, производственный и эксплуатационный. Если деградационный и эксплуатационный недостатки напрямую связаны с изнашиванием и нарушением правил эксплуатации, то производственный — с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта. Но, как отмечено авторами работы [2], в результате оптимизации закладываются заведомо низкие конструктивные параметры, которые в процессе эксплуатации могут привести к материальному ущербу или человеческим жертвам.

В частности, найдена прямая взаимосвязь между уменьшением объема ДВС и управляемостью, а также снижением скорости движения [7]. В документе Р 50-605-80–93 (Рекомендации. Система разработки и постановки продукции на производство. Термины и определения) приведено более точное определение: конструктивный недостаток — недостаток продукции, соответствующей всем требованиям конструкторской и технологической документации, выявленный в процессе ее производства или эксплуатации.

Одним из примеров даунсайзинга является эволюция конструкции прокладок крышки клапанов ДВС, совершивших переход от простых плоских прокладок до прецизионных литых компонентов со встроенными уплотнительными элементами, конструктивные недо-

статки которых приводили к возгораниям автомобилей. Известны случаи отзыва автомобилей по причине течи моторного масла из-под крышки клапанов. Так, корпорация General Motors отзывала автомобили Buick Regal, Chevrolet Impalas и Chevrolet Monte Carlos. Компания Hyundai отзывала автомобили Hyundai Veracruz 2007–2012 гг. выпуска из-за утечки масла в ДВС через клапанную крышку, а также провела сервисную кампанию для некоторых автомобилей Santa Fe, выпущенных в 2007–2009 гг.

В книге [8] отмечено, что один и тот же резиновый уплотнитель в зависимости от конкретных условий применения требует различного подхода к конструированию сопряженных деталей, но на это обстоятельство не всегда обращают внимание разработчики машин.

Продукция должна соответствовать установленным на нее требованиям, которые характеризуют качество выпускаемых изделий в целом: назначению, безопасности, экологичности, надежности, эргономичности, ресурсосбережению, технологичности и эстетичности [9].

Эффективность любой прокладки зависит от конструкции крышки клапанов, также прошедшей эволюцию от металлической до пластиковой. Основным критерием работоспособности прокладки клапанной крышки, как и любого другого разъемного герметизирующего соединения, является отсутствие утечек масла из-под нее [10], а также предотвращение его попадания в свечные колодцы и на поверхность каталитического нейтрализатора.

Как отмечено в работе [11], за критерий герметичности принимают минимальную удельную нагрузку на уплотняющий элемент, при которой соединение считают герметичным. Критерий герметичности зависит от различных факторов: материала уплотнителя, точности изготовления и чистоты обработки его уплотняющих поверхностей, давления и свойств уплотняемой среды, ее температуры и др. Такая многофакторная зависимость критерия герметичности существенно затрудняет его оценку аналитическими методами, вследствие чего его определяют экспериментально на моделях разъемных соединений или на реальных конструкциях.

Цель статьи — разработка модели оценки работоспособности прокладки крышки клапа-



Рис. 1. Внешний вид сквозного локального термического повреждения пластиковой крышки клапанов и двусторонних термических повреждений прокладки

нов на примере ДВС HFC4GB2.3E автомобиля JAC S3, позволяющей проводить экспертизу качества автотранспортных средств или пожарно-техническую экспертизу.

В качестве объекта исследования выступал ДВС HFC4GB2.3E автомобиля JAC S3, у которого на пробеге 800 км произошло возгорание в моторном отсеке, приведшее к сквозному локальному термическому повреждению пластиковой крышки клапанов (рис. 1).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать элементный состав поверхности прокладки как подвергшейся горению на участке необеспеченной герметичности, так и не подвергавшейся;
- разработать простой инженерно-технический метод оценки герметичности прокладки крышки клапанов;
- представить метод в виде простых расчетных формул, позволяющих оценивать герметичность прокладки крышки клапанов при проведении экспертизы качества автото-

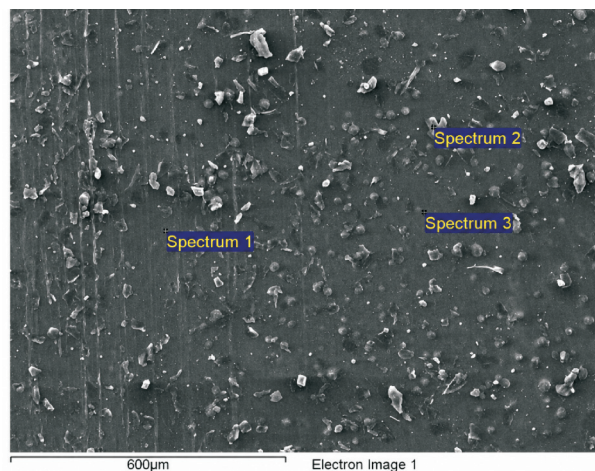


Рис. 2. Результаты микроанализа участка прокладки, не подвергшегося горению, при увеличении $\times 100$

Таблица 1

Результаты микроанализа участка прокладки, не подвергшегося горению, в разных точках измерения

Точка измерения	Содержание химического элемента, % масс.											
	C	O	Mg	Na	K	Si	S	P	Zn	Al	Ca	Cl
Spectrum 1	83,77	15,30	–	–	–	0,17	0,22	0,20	–	–	0,10	0,07
Spectrum 2	80,9	16,30	–	–	–	0,53	1,01	–	–	0,22	0,72	0,34
Spectrum 3	84,06	15,26	0,08	–	–	0,17	0,21	0,22	–	–	–	–

транспортных средств или пожарно-технической экспертизы;

- провести расчетную оценку герметичности на примере прокладки крышки клапанов ДВС HFC4GB2.3E автомобиля JAC S3.

Исследования выполнены в Центре превосходства «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой энергодисперсионного микроанализа. Анализ поверхностей прокладки проведен без предварительной пробоподготовки.

Результаты микроанализа участка прокладки с обеспеченной герметичностью, не подвергшегося горению (и не имевшего течи моторного масла), приведены на рис. 2 и в табл. 1. Для измерения элементного состава выбраны три точки (Spectrum 1–Spectrum 3).

Результаты микроанализа участка прокладки с необеспеченной герметичностью, где зафиксировано горение моторного масла, приведены на рис. 3 и в табл. 2. Для измерения элементного состава выбраны десять точек (Spectrum 1–Spectrum 10). Данные, указанные в табл. 1 и 2, различаются по содержанию магния, кремния, фосфора, цинка и свидетельствуют о горении моторного масла, поскольку магний в моторном масле присутствует как элемент моющих присадок, кремний — как антипенная присадка и т. п.

Конструктивно исследуемая прокладка крышки клапанов относится к прямоугольным и имеет высоту $h_o = 8,0$ мм. Особенность этой прокладки заключается в разной ширине по длине: на двух участках фиксации прокладки в канавке крышки клапанов ширина $b_o = 9$ мм, на участках технологических выступов — 4 мм, в областях между указанными участками — 3 мм. Уменьшение ширины прокладки с 9 до 4 и 3 мм обусловлено уменьшением размеров как крышки, так и прокладки и экономией материалов.

Следует отметить [8], что вертикальная ось прямоугольной прокладки сохраняет положение только при условии (рис. 4, а и б)

$$b_o / h_o \geq 1. \quad (1)$$

В случае другого соотношения параметров b_o и h_o уплотнитель потеряет устойчивость при монтаже.

Таким образом, на участках шириной 9 мм условие (1) выполняется, а по всей остальной длине нет, что по данным работы [8] неизбежно приведет к перекоосу при монтаже (рис. 4, в).

К факторам, повышающим риск потери устойчивости при монтаже относится малая жесткость уплотнителей из синтетической резины вследствие низкого модуля упругости $E_u = 1,5...21,0$ Н/мм² [12], который на много порядков меньше, чем аналогичные механические характеристики материала крышки E_k (твердой пластмассы) и блока цилиндров из алюминиевого сплава E_b , т. е. $E_u \ll E_k$ и $E_u \ll E_b$.

Как отмечено в работе [13], большая эластичность и мягкость резиновых изделий при малых значениях модуля упругости — один из

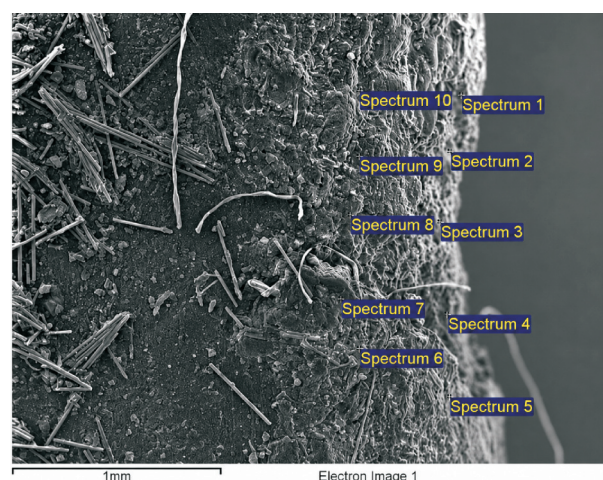


Рис. 3. Результаты микроанализа участка прокладки, подвергшегося горению, при увеличении $\times 45$

Таблица 2

Результаты микроанализа участка прокладки, не подвергшегося горению, в разных точках измерения

Точка измерения	Содержание химического элемента, % масс.											
	C	O	Mg	Na	K	Si	S	P	Zn	Al	Ca	Cl
Spectrum 1	86,02	12,18	0,23	0,22	–	0,17	0,29	0,35	–	–	0,40	0,14
Spectrum 2	81,48	17,45	0,16	0,18	–	0,18	0,14	0,06	–	0,06	0,14	0,14
Spectrum 3	87,79	11,76	0,19	–	–	0,09	0,08	–	–	–	0,08	–
Spectrum 4	79,59	18,31	0,46	0,49	–	0,08	0,10	0,06	–	–	0,66	0,25
Spectrum 5	77,43	18,66	0,50	0,83	0,12	0,29	0,34	0,53	0,22	–	0,77	0,30
Spectrum 6	86,09	12,50	–	0,32	0,10	0,10	0,27	–	–	0,04	0,19	0,40
Spectrum 7	86,06	10,32	0,18	0,19	0,12	1,14	0,39	0,47	–	0,09	0,76	0,28
Spectrum 8	84,94	11,99	0,19	0,48	0,13	0,21	0,51	–	–	0,08	0,29	1,18
Spectrum 9	80,45	17,51	0,24	0,21	0,07	0,28	0,21	0,05	0,15	0,08	0,35	0,41
Spectrum 10	76,04	19,34	0,40	–	–	2,05	0,23	0,90	0,38	–	0,52	0,14

существенных факторов, способствующих скручиванию уплотнительной прокладки (см. рис. 4) при несоблюдении граничного неравенства (1). Кроме того, согласно данным справочника [12], значительная релаксация резины при заданной постоянной абсолютной

деформации Δ обуславливает снижение напряжения сжатия с течением времени и, как следствие, начального контактного давления q (см. рис. 4, б).

При расчетно-теоретическом обосновании критерия течи моторного масла в показанном

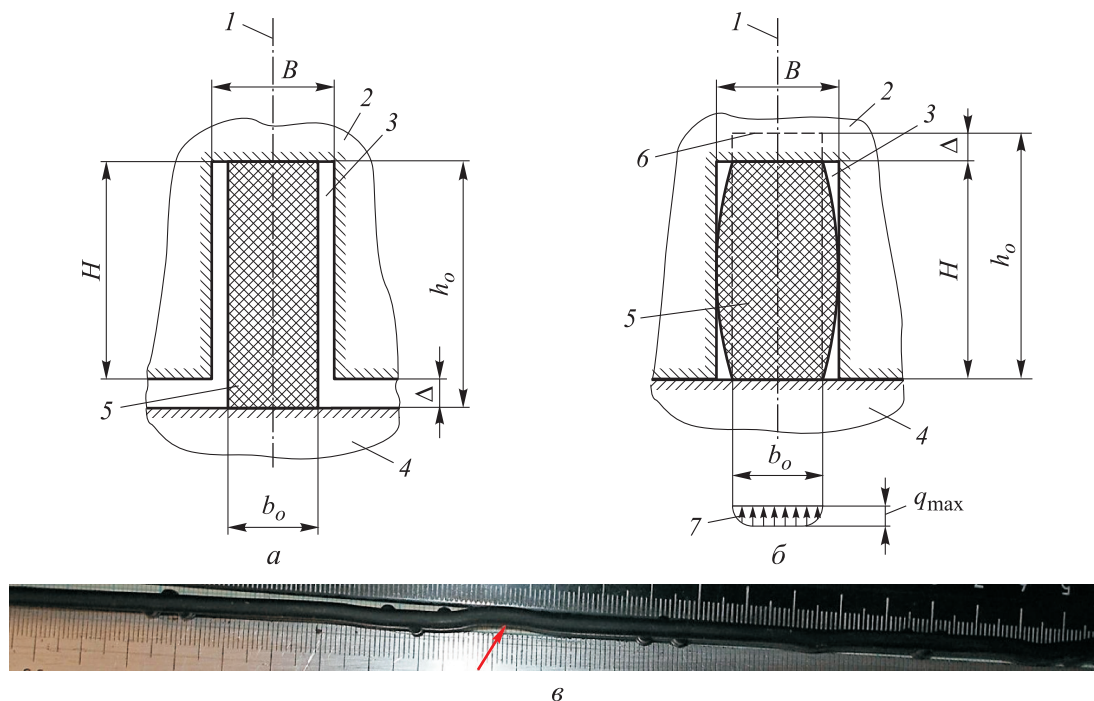


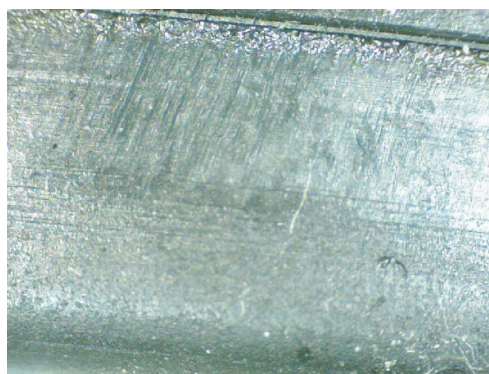
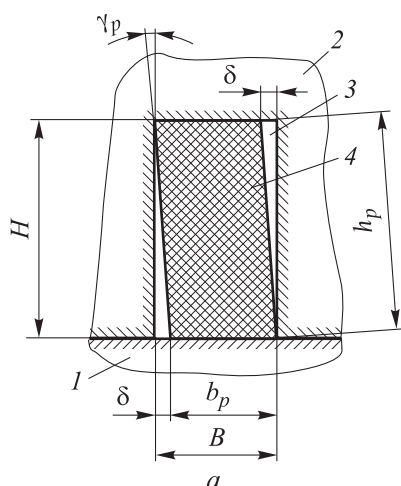
Рис. 4. Результаты моделирования положения прокладки крышки клапанов:

а — схема поперечного сечения разъемного уплотнительного соединения до затяжки крышки;

б — оптимальная модель напряженно-деформированного состояния прокладки;

в — область потери устойчивости при монтаже, показанная стрелкой;

1 — ось симметрии; 2 — крышка клапанов; 3 — посадочная канавка крышки клапанов глубиной H и шириной B ;4 — блок цилиндров; 5 — сечение прокладки высотой h_o и шириной b_o ; 6 — исходный прямоугольный профильпрокладки; 7 — эпюра нормативного контактного давления с экстремумом $q_{\max}$



б

Рис. 5. Результаты исследования перекоса прокладки в пазе крышки клапанов:
 а — схема деформированного состояния на участке между конструктивно-технологическими выступами, фиксирующими прокладку в канавке крышки клапанов;
 б — царапины и задиры в области боковой поверхности прокладки при перекосе

на рис. 5, а разъемном уплотнении принимаем следующие допущения:

- крышка клапанов и блока цилиндров имеет абсолютную жесткость;
- исходное (до монтажа крышки) прямоугольное поперечное сечение прокладки принимает форму параллелограмма, имеющего исходные размеры сторон b_o и h_o (см. рис. 5, а), по аналогии с чистым сдвигом и кручением на угол [14]

$$\gamma_p = \arctg \frac{\delta}{H} = \arctg \frac{B - b_p}{H}, \quad \delta = B - b_p;$$

- постоянное расчетное значение коэффициента Пуассона резины согласно данным работ [13, 15] $\mu = 0,5$.

Здесь δ — абсолютная сдвиговая деформация вследствие перекоса уплотнителя.

Определяем начальный элементарный объем отрезка прокладки бесконечно малой длины dl (см. рис. 4)

$$dV_o = b_o h_o dl, \quad (2)$$

где l — общая длина уплотнителя.

По справочной формуле [8] находим площадь деформированного поперечного сечения уплотнителя (см. рис. 5)

$$F_d = b_p H,$$

и объем его бесконечно малого отрезка dl

$$dV_d = F_d dl = b_p H dl. \quad (3)$$

В случае соблюдения классического условия о несжимаемости материала прокладки [15–17] $dV_d = dV_o = \text{const}$,

Используя выражения (2) и (3), получаем

$$b_p = \frac{b_o h_o}{H}.$$

Определяем размер длинных сторон параллелограмма (см. рис. 5)

$$h_p = \sqrt{H^2 + \delta^2}$$

и соответствующий натяг

$$\Delta_p = h_o - h_p.$$

Результаты расчета геометрических характеристик Δ , b_p , δ , γ_p , h_p и Δ_p деформированного поперечного сечения прокладки при $h_o = 8$ мм, $b_o = 3$ мм, $H = 7$ мм и $B = 4$ мм приведены в табл. 3.

Полученные результаты подтверждают установленную в эксплуатационных условиях течь моторного масла в ДВС автомобиля вслед-

Таблица 3

Расчетные значения
геометрических характеристик прокладки

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Δ , мм	1	h_p , мм	7,023
b_p , мм	3,43	Δ_p , мм	0,977
δ , мм	0,57	$b_p - b_o$, мм	0,43
γ_p , град	4,65	$\Delta - \Delta_p$, мм	0,023

ствие снижения нормативного контактного давления q при увеличении на 0,43 мм поперечного размера b_0 поверхности контакта и уменьшении натяга Δ на 0,023 мм. Кроме того, они не противоречат обзорной работе по усталости резины [18].

В качестве конструктивного решения возможны следующие варианты исключения перекоса и утечки моторного масла из-под прокладки крышки клапанов:

- конструктивно обеспечить выполнение условия (1);
- заменить прокладку прямоугольного профиля на широко распространенный эластомерный уплотнитель круглого сечения с расчетным диаметром D , удовлетворяющим геометрическим условиям $B = D$ и $H > D/2$, гарантирующим равномерное осесимметричное заполнение канавки (паза) при создании необходимого контактного давления q , когда проектный зазор Δ уменьшится до нуля.

Выводы

1. Предложен простой инженерно-технический метод оценки герметичности прокладки крышки клапанов.

2. Модель оценки герметичности прокладки крышки клапанов представлена виде простых

расчетных формул, позволяющих оценивать работоспособность изделия при проведении экспертизы качества автотранспортных средств или пожарно-технической экспертизы.

3. На примере прокладки крышки клапанов ДВС HFC4GB2.3E автомобиля JAC S3 проведена расчетная оценка герметичности, результаты которой полностью соответствуют реальным условиям и доказывают, что утечка моторного масла неизбежна по причине перекоса (скручивания) резиновой прокладки и, как следствие, снижения требуемого нормативного контактного давления.

4. Исследован элементный состав поверхности участка с необеспеченной герметичностью прокладки со следами горения и неповрежденной области.

5. Показано, что распределение химических элементов в пределах участка горения моторного масла, отличающееся от такового в областях без перекоса прокладки, является важным криминалистическим признаком.

6. Так как негерметичность прокладки крышки клапанов является неисправностью, знание ее технической причины даст возможность разработать профилактические мероприятия и конструктивные решения, направленные на ее устранение.

Литература

- [1] Ortego A., Iglesias-Émbil M., Valero A. et al. Disassemblability assessment of car parts: lessons learned from an ecodesign perspective. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 6, art. 2311, doi: <https://doi.org/10.3390/su16062311>
- [2] Szalek A., Pielecha I. The influence of engine downsizing in hybrid powertrains on the energy flow indicators under actual traffic conditions. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 10, art. 2872, doi: <https://doi.org/10.3390/en14102872>
- [3] Szpica D., Ashok B., Köten H. Development trends in vehicle propulsion sources—a short review. *Vehicles*, 2023, vol. 5, no. 3, pp. 1133–1137, doi: <https://doi.org/10.3390/vehicles5030062>
- [4] Palmås K. Design in marketization: the invention of car safety in automobile markets. *She Ji*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 5–20, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sheji.2023.04.001>
- [5] Miner P., Smith B.M., Jani A. et al. Car harm: a global review of automobility's harm to people and the environment. *J. Transp. Geogr.*, 2024, vol. 115, art. 103817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103817>
- [6] Zhu H., Gao Y., Guo H. Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle. *Case Stud. Therm. Eng.*, 2020, vol. 22, art. 100795, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100795>
- [7] Hu B., Turner J.W.G., Akehurst S. et al. Observations on and potential trends for mechanically supercharging a downsized passenger car engine: a review. *Proc. Inst. Mech. Eng. D*, 2017, vol. 231, no. 4, pp. 435–456, doi: <https://doi.org/10.1177/0954407016636971>
- [8] Аврущенко Б.Х. *Резиновые уплотнители*. Ленинград, Химия, 1978. 136 с.

- [9] Орлова А.А., Аникеева О.В., Ивахненко А.Г. Повышение эффективности метрологического обеспечения жизненного цикла продукции промышленного предприятия. *Современные материалы, техника и технологии*, 2019, № 6, с. 44–50.
- [10] Погодин В.К., Огар П.М. О необходимости уточнения терминов в герметологии разъемных соединений. *Системы. Методы. Технологии*, 2020, № 4, с. 39–46, doi: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-39-46>
- [11] Божко Г.В., Продан В.Д., Фокина М.С. и др. Анализ условий допустимой утечки из разъемных соединений технологического оборудования на основе российских и зарубежных стандартов. *Вестник ТГТУ*, 2020, № 3, т. 26, с. 450–458, doi: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.03>
- [12] Кондаков Л.А., Голубева А.И., ред. *Уплотнения и уплотнительная техника*. Москва, Машиностроение, 1994. 448 с.
- [13] Лепетов В.А., Юрцев Л.Н. *Расчеты и конструирование резиновых изделий*. Ленинград, Химия, 1987. 408 с.
- [14] Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. *Сопротивление материалов*. Москва, Высшая школа, 2000. 560 с.
- [15] Лавендел Э.Э. *Расчеты резинотехнических изделий*. Москва, Машиностроение, 1976. 232 с.
- [16] Филин А.П. *Прикладная механика твердого деформируемого тела. Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики*. Т. 1. Москва, Наука, 1975. 832 с.
- [17] Min Z., Ma D., Zhou Y. et al. The change of sealing property in the aging process of NBR sealing equipment based on finite element analysis. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 9, art. 1178, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14091178>
- [18] Wang X., Ramin S., Subhash R. et al. Rubber fatigue revisited: a state-of-the-art review expanding on prior works by Tee, Mars and Fatemi. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 7, art. 918, doi: <https://doi.org/10.3390/polym17070918>

References

- [1] Ortego A., Iglesias-Émbil M., Valero A. et al. Disassemblability assessment of car parts: lessons learned from an ecodesign perspective. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 6, art. 2311, doi: <https://doi.org/10.3390/su16062311>
- [2] Szalek A., Pielecha I. The influence of engine downsizing in hybrid powertrains on the energy flow indicators under actual traffic conditions. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 10, art. 2872, doi: <https://doi.org/10.3390/en14102872>
- [3] Szpica D., Ashok B., Köten H. Development trends in vehicle propulsion sources—a short review. *Vehicles*, 2023, vol. 5, no. 3, pp. 1133–1137, doi: <https://doi.org/10.3390/vehicles5030062>
- [4] Palmås K. Design in marketization: the invention of car safety in automobile markets. *She Ji*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 5–20, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sheji.2023.04.001>
- [5] Miner P., Smith B.M., Jani A. et al. Car harm: a global review of automobility's harm to people and the environment. *J. Transp. Geogr.*, 2024, vol. 115, art. 103817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103817>
- [6] Zhu H., Gao Y., Guo H. Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle. *Case Stud. Therm. Eng.*, 2020, vol. 22, art. 100795, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100795>
- [7] Hu B., Turner J.W.G., Akehurst S. et al. Observations on and potential trends for mechanically supercharging a downsized passenger car engine: a review. *Proc. Inst. Mech. Eng. D*, 2017, vol. 231, no. 4, pp. 435–456, doi: <https://doi.org/10.1177/0954407016636971>
- [8] Avrushenko B.Kh. *Rezinovye uplotniteli* [Rubber seals]. Leningrad, Khimiya Publ., 1978. 136 p. (In Russ.).
- [9] Orlova A.A., Anikееva O.V., Ivakhnenko A.G. Improving the efficiency of metrological support of the life cycle of industrial enterprise products. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 44–50. (In Russ.).

- [10] Pogodin V.K., Ogar P.M. The need to clarify terms in hermetic sealing studies of detachable joints. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 4, pp. 39–46, doi: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-39-46> (in Russ.).
- [11] Bozhko G.V., Prodan V.D., Fokina M.S. et al. The analysis of the conditions of permissible leakage from detachable joints of process equipment based on Russian and foreign standards. *Vestnik TGTU* [Transactions of the Tambov State Technical University], 2020, no. 3, vol. 26, pp. 450–458, doi: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.03> (in Russ.).
- [12] Kondakov L.A., Golebeva A.I., eds. *Uplotneniya i uplotnitelnaya tekhnika* [Seals and sealing technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1994. 448 p. (In Russ.).
- [13] Lepetov V.A., Yurtsev L.N. *Raschety i konstruirovaniye rezinovykh izdeliy* [Calculations and design of rubber products]. Leningrad, Khimiya Publ., 1987. 408 p. (In Russ.).
- [14] Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 560 p. (In Russ.).
- [15] Lavendel E.E. *Raschety rezinotekhnicheskikh izdeliy* [Calculations of rubber products]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 232 p. (In Russ.).
- [16] Filin A.P. *Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruemogo tela. Soprotivleniye materialov s elementami teorii sploshnykh sred i stroitelnoy mekhaniki*. T. 1 [Applied mechanics of solids. strength of materials with elements of continuum theory and structural mechanics. Vol. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 832 p. (In Russ.).
- [17] Min Z., Ma D., Zhou Y. et al. The change of sealing property in the aging process of NBR sealing equipment based on finite element analysis. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 9, art. 1178, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14091178>
- [18] Wang X., Ramin S., Subhash R. et al. Rubber fatigue revisited: a state-of-the-art review expanding on prior works by Tee, Mars and Fatemi. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 7, art. 918, doi: <https://doi.org/10.3390/polym17070918>

Статья поступила в редакцию 24.11.2025

Информация об авторах

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (070004, Республика Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, д. 19, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru).

АБДЕЕВ Борис Масгутович — кандидат технических наук, профессор Школы архитектуры, строительства и энергетики. Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (070004, Республика Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, д. 19, e-mail: m.abdeeva@mail.ru).

Information about the authors

NEDOBITKOV Alexander Ignatievich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (070004, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; Serikbayev St., Bldg. 9, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru).

ABDEYEV Boris Masgutovich — Candidate of Science (Eng.), Professor, School of Architecture, Civil Engineering and Energy. D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (070004, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; Serikbayev St., Bldg. 19, e-mail: m.abdeeva@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Инженерно-технический метод оценки герметичности прокладки крышки клапанов двигателей внутреннего сгорания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 9, с. 11–19.

Please cite this article in English as:

Nedobitkov A.I., Abdeyev B.M. Engineering and technical methods of accessing the tightness of the valve cover gasket of the internal combustion engine. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 9, pp. 11–19.