

Энергетика и электротехника

УДК 62-121; 621.41

Механизм прогара поршня, выполненного из высококремниевого алюминиевого сплава, для двигателей внутреннего сгорания^{*}

А.И. Дойников, Н.Ю. Дударева

ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий

Burnout mechanism of a piston made of high-silicon aluminum alloy for internal combustion engines

A.I. Doynikov, N.Yu. Dudareva

Ufa University of Science and Technology

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и долговечности поршней двигателей внутреннего сгорания, работающих в экстремальных условиях высоких температур, давлений и механических нагрузок. Прогар поршня — одна из самых существенных проблем, приводящих к снижению эффективности двигателя внутреннего сгорания и дорогостоящему ремонту. Исследован механизм прогара поршней, изготовленных из высококремниевого алюминиевого сплава M244 (по классификации фирмы Mahle), применяемых в двухтактных двигателях внутреннего сгорания. Сочетание металлографического анализа и 3D-моделирования позволило установить взаимосвязь между температурным полем в головке поршня и формированием пористой структуры, приводящей к разрушению материала. Установлено, что прогар обусловлен зарождением и ростом пор преимущественно в приповерхностной зоне головки поршня. Показано, что пористость зависит от температуры и описывается линейной функцией. Выявлена корреляция между размерами пор и кремниевых включений, что позволяет предположить, что образование пор связано с термомеханическим воздействием на границы раздела фаза/включение. Разработана модель прогара, учитывающая тепловое и структурное состояние материала, что представляет практический интерес для повышения термической устойчивости поршней и предотвращения их разрушения при эксплуатации.

EDN: TWEULP, <https://elibrary/tweulp>

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, прогар поршня, высококремниевый алюминиевый сплав

The relevance of this study is driven by the need to enhance the reliability and durability of internal combustion engine pistons operating under extreme conditions of high tempera-

^{*} Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНиТ).

ture, pressure, and mechanical loads. Piston burn-through is one of the most severe problems, leading to reduced engine efficiency and costly repairs. This article investigates the mechanism of burn-through in pistons made of the high-silicon aluminum alloy M244 (according to the Mahle classification), used in two-stroke engines. The combination of metallographic analysis and 3D modeling established the relationship between the temperature field in the piston crown and the formation of a porous structure that leads to material failure. It has been established that burn-through is caused by the nucleation and growth of pores, predominantly in the near-surface zone of the piston crown. It is demonstrated that material porosity depends on temperature and is described by a linear function. A correlation between pore size and silicon inclusion dimensions was identified, suggesting that pore formation is associated with thermomechanical effects at the phase/inclusion interfaces. A model of burn-through was developed, accounting for the material's thermal and structural state. This work holds practical significance for improving the thermal stability of pistons and preventing their failure during operation.

EDN: TWEULP, <https://elibrary/tweulp>

Keywords: internal combustion engine, burnout, high-silicon aluminum alloy

Условия работы деталей (особенно поршней) современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) являются сложными и многофакторными. Поршни ДВС работают в экстремальных условиях высоких температур, давлений и механических нагрузок. В камере сгорания температура может достигать 2500...2700 °С, в результате чего днище поршня нагревается до 300...400 °С, что создает значительные термические градиенты и риск деформации материала [1, 2]. Кроме того, поршни ДВС испытывают значительные механические нагрузки, включая ударные и вибрационные. Механические и термические нагрузки, являясь циклическими, могут привести к усталости материала поршня.

В результате комплексного воздействия механических и термических нагрузок материал поршня деформируется и разрушается. Достаточно часто встречающимся видом разрушения поршней является прогар в виде сквозного отверстия в днище или участков с обожженным металлом [3–6].

Основным признаком прогара поршня служит снижение компрессии вследствие утечки газов из камеры сгорания, что приводит к потере мощности ДВС и ухудшению его динамики, особенно при высокой нагрузке [7, 8]. Нарушение герметичности цилиндра вызывает попадание масла в камеру сгорания, что увеличивает его расход и сопровождается появлением синего, серого или даже черного дыма из выхлопной трубы. В общем случае при появлении прогара поршней работа ДВС становится неустойчивой, сопровождается вибрациями и перебоями [9], причем ДВС также

может издавать нехарактерные шумы и стуки из-за неправильного движения поршня. Прогар способствует повышению температуры ДВС и снижению давления масла, что приводит к дополнительным повреждениям ДВС и его окончательной поломке. Обычно после прогара поршня требуется дорогостоящий и сложный ремонт всего ДВС.

В связи с этим выявление причин прогара и разработка методов его предотвращения становятся актуальными задачами современного двигателестроения. Анализ научной литературы показал, что основным направлением снижения вероятности возникновения прогара поршня является уменьшение его температуры. Это достигается организацией более эффективной системы охлаждения поршня, либо использованием термостойких вставок или покрытий [10–14].

Не менее важно исследовать механизм возникновения этого явления, для борьбы с которым надо понимать комплекс и последовательность физических процессов, протекающих в ходе прогара. Обычно под прогаром понимают разрушение материала поршня вследствие расплавления под действием высоких температур и давлений. Однако в современной научной литературе практически отсутствуют исследования, в которых описывается механизм прогара.

Наиболее устойчивыми к прогару являются поршни из высококремниевых алюминиевых сплавов, но и они прогорают.

Цель работы — исследование механизма возникновения прогара на примере поршня из высококремниевого сплава.

Методика исследования. Исследование механизма возникновения прогара включало в себя два этапа. На первом проводили металлографические исследования материала реальных поршней до и после прогара, что позволило выявить изменения в структуре их материала при возникновении этого дефекта. На втором этапе с помощью компьютерного 3D-моделирования исследовали распределение температуры в материале головки поршня [15].

Методика исследования материала поршней до и после прогара. В качестве объекта исследования выступал штатный поршень двухцилиндрового двухтактного бензинового двигателя РМЗ-551i, оснащенного электронной системой впрыска топлива, отдельной системой подачи смазки и жидкостным охлаждением. Рабочий объем ДВС — 553 см³, развиваемая мощность — 65 л.с. (47,8 кВт) [16]. Испытуемый поршень изготовлен из алюминиевого сплава М244 по классификации фирмы Mahle (AlSi26CuNiMg) с содержанием кремния 23...26 % масс. Химический состав сплава М244 приведен в табл. 1 [17].

Для исследования механизма прогара проводили поэтапный анализ материала поршня

Таблица 1

Химический состав сплава М244

Компонент	Содержание, % масс.	Компонент	Содержание, % масс.
Si	23,0...26,0	Mg	0,8...1,3
Cu	0,8...1,5	Ti	0,2
Zn	0,2	Ni	0,8...1,3
Fe	0,7	Al	Остальное
Mn	0,2	—	—

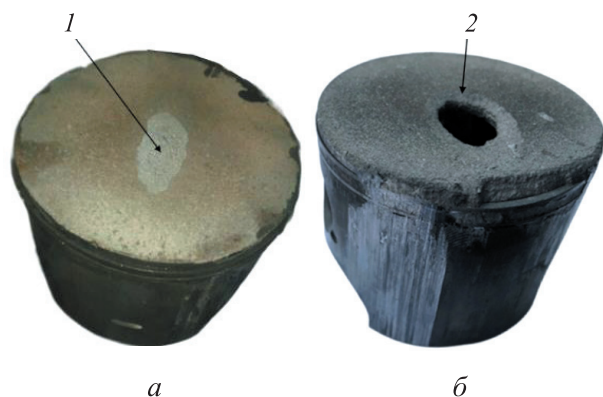


Рис. 1. Внешний вид поршня в начальной (а) и конечной (б) стадиях прогара
1 — область начала прогара; 2 — прогар

в области головки. Рассматривали материал трех поршней: 1) нового поршня, который еще не работал и, соответственно, не имел каких-либо дефектов; 2) поршня после эксплуатации в начальной стадии прогара (рис. 1, а); 3) поршня с явным прогаром в виде сквозного отверстия в центре днища (рис. 1, б).

Для получения таких поршней ДВС эксплуатировали в режиме максимальной мощности, при котором происходит прогар. Режим максимальной мощности обеспечивали при моторных испытаниях, выполненных на стенде AVL-DP80, полным открытием дроссельной заслонки и установлением частоты вращения коленчатого вала $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$. В качестве индикатора процесса начала прогара выступала температура ДВС, измеряемая термопарой под свечой. Резкое увеличение этой температуры указывало на начало процесса прогорания поршня. В этот момент ДВС останавливался. Испытания подробно описаны в работе [16].

У поршня с начальной стадией прогара этот дефект представлял собой углубление на поверхности его днища, которое еще не превратилось в сквозное отверстие (см. рис. 1, а). Поршень разрезали и из днища в области появления начального прогара изготавливали поперечный микрошлиф, который фотографировали, что позволило получить представление о состоянии материала в начальной стадии прогара.

Затем проводили испытания ДВС с поршнем, доведенным до состояния полного прогара (см. рис. 1, б). Этот поршень также разрезали и из материала головки в области прогара выполняли шлифы, что дало возможность проанализировать состояние материала поршня на конечной стадии разрушения.

Изображения шлифов получали и анализировали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV и оптического микроскопа Olympus GX51. Эти приборы обеспечивали высокую точность исследований, позволяя проводить детальный анализ поверхности образцов с увеличением до $\times 300\,000$, включая фрактографическое изучение изломов и деформационного рельефа, а также определение размеров частиц и пор [18].

Количественную оценку структуры материала поршня выполняли путем обработки фотографий микрошлифов в программе ImageJ [19], где оценивали размеры и распределение частиц кремния в материале нового поршня. Также

определяли размеры и плотность дефектов (пор) в материале поршней с прогаром. Чтобы оценить пористость, на разном расстоянии от поверхности прогара с шагом 200 мкм выделяли области материала. Исследования проводили как минимум на пяти фотографиях микрошлифов для одной области. Общая глубина исследования материала поршня после прогара составила 1000 мкм.

Методика моделирования теплового состояния головки поршня. На втором этапе исследования выполняли 3D-моделирование теплового состояния материала поршня в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, используя программный комплекс SolidWorks [20] и приложение SolidWorks Simulation [3]. Трехмерная модель поршня с визуализацией его геометрических характеристик приведена на рис. 2, а.

Для моделирования теплового состояния материала головки в среде SolidWorks Simulation сначала задавали материал поршня и его основные физические параметры, указанные в табл. 2 [21].

Затем к поверхностям поршня прикладывали тепловые нагрузки, представленные температурами и коэффициентами теплоотдачи. Схема приложения тепловых нагрузок к поверхностям головки, огневого пояса, юбки и внутренним поверхностям поршня показана на рис. 3, а, а схема приложения тепловых нагрузок в области поршневых канавок — на рис. 3, б. Значения температур и коэффициентов теплоотдачи (табл. 3) взяты из работы [22].

В связи с тем, что 3D-моделирование в среде SolidWorks Simulation осуществляется методом конечных элементов, перед проведением расче-

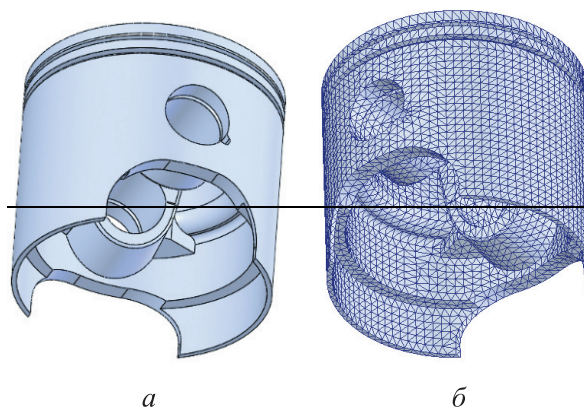


Рис. 2. Трехмерная (а) и конечно-элементная (б) модели поршня, построенные в среде SolidWorks

тов в модели поршня создавали сетку конечных элементов с размером ячеек 2,4...2,7 мм. Конечно-элементная модель, использованная для численного анализа, изображена на рис. 2, б.

Следует отметить, что наибольшее тепловое воздействие испытывает область головки поршня, расположенная вблизи свечи зажигания, что обусловлено особенностями процесса сгорания топливовоздушной смеси в ДВС. По этой причине выполнено исследование распределения температуры методом зондирования днища поршня в области, прилегающей к свече зажигания, — в центре головки поршня [23, 24]. Это позволило более детально проанализировать распределение температуры в наиболее термически нагруженной области, где и наблюдался прогар у реального поршня. Зондирование температуры головки поршня выполняли вдоль оси поршня на глубину 1000 мкм с шагом 50 мкм по аналогии со схемой исследования дефектов поршня с прогаром. Также проводили сквозное зондирование по всей тол-

Таблица 2

Физические параметры алюминиевого сплава М244

Параметр	Значение
Плотность, ρ , кг/м ³	2650
Предел текучести σ_t , МПа, при температуре 20 °С	170...200
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа, при температуре 20 °С	170...210
Модуль упругости E , ГПа	90
Коэффициент Пуассона μ	0,33
Модуль сдвига G , ГПа	27
Коэффициент теплового расширения α , 1/К	$23 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	145

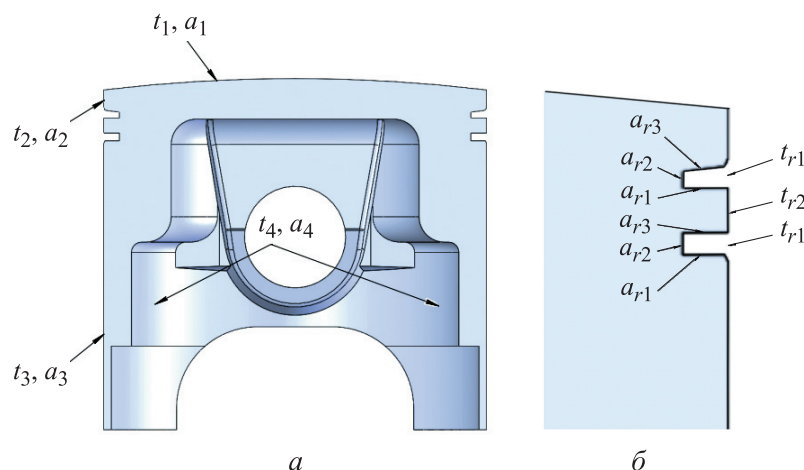


Рис. 3. Схемы приложения тепловых нагрузок к базовым элементам поршня (а) и областям поршневых канавок (б)

Таблица 3

Граничные условия для теплового расчета

Коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	Значение	Температура, К	Значение
a_1	592	t_1	1413
a_2	148	t_2	1413
a_3	1485	t_3	473
a_4	174	t_4	363
a_{r1}	11 609	t_{r1}	573
a_{r2}	97	t_{r2}	423
a_{r3}	1818	t_{r2}	423

щине головки поршня (на глубину 8 мм) вдоль центральной оси с шагом 500 мм.

Результаты и обсуждение. Микроструктура поперечного шлифа материала поршня в исходном состоянии, который не испытал ни механического, ни температурного воздействия в процессе работы, показана на рис. 4. Видно, что материал поршня содержит крупные частицы кремния, размер которых составляет в среднем 42 ± 5 мкм, а объемная доля — 14 ± 3 %. В структуре материала также присутствует эвтектический кремний в виде пластинчатых включений.

Микроструктуры поперечных шлифов материала днища поршня в начальной и конечной стадиях прогара приведены на рис. 5, а и б, где ППП — поверхность головки поршня.

Анализ микроструктур (см. рис. 4 и 5) выявил, что при прогаре в поверхностной области материала образуются поры. В начальной стадии прогара размер пор составил $29,4 \pm 5$ мкм (см. рис. 5, а), а в конечной — $67,5 \pm 5$ мкм (см. рис. 5, б). Размер пор, особенно на ранней ста-

дии термического разрушения, сопоставим с характерным размером кремниевых частиц. Это может свидетельствовать о взаимосвязи между структурой частиц кремния и зарождением пор, в частности, за счет термомеханических напряжений на границах раздела матрица/включение.

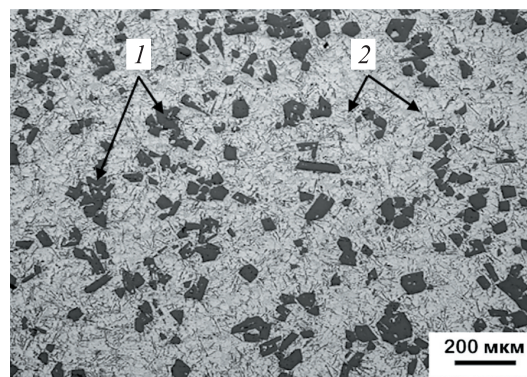


Рис. 4. Микроструктура поперечного шлифа материала поршня в исходном состоянии:
1 — крупные кристаллы первичного кремния;
2 — эвтектический кремний в виде пластин

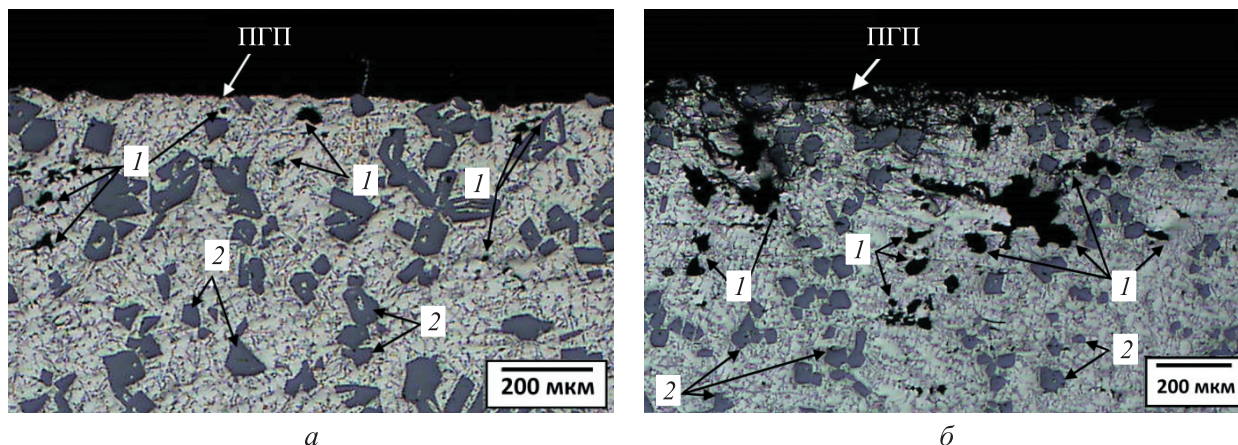


Рис. 5. Микроструктуры поперечных шлифов материала дна поршня в начальной (а) и конечной (б) стадиях прогара:
1 — поры; 2 — кристаллы первичного кремния

Самая большая пористость наблюдается возле поверхности, подвергшейся наибольшему термическому и механическому воздействиям. Поры образуются не только возле поверхности прогара, но и в глубине материала — на расстоянии 1100...2600 мкм от поверхности. Графическая зависимость доли пор в полностью прогревшем поршне P от глубины материала h , отражающая изменение пористости структуры по сечению поршня, приведена на рис. 6.

Анализ этого графика позволил получить уравнение, описывающее распределение пор по глубине материала головки поршня в области прогара:

$$P = 10,64 - 0,0093h, \% \quad (1)$$

Уравнение (1) получено линейной аппроксимацией экспериментальных данных по пористости и соответствует пунктирной линии на рис. 6.

Результаты 3D-моделирования позволили оценить градиент температуры в головке поршня. Согласно результатам моделирования,

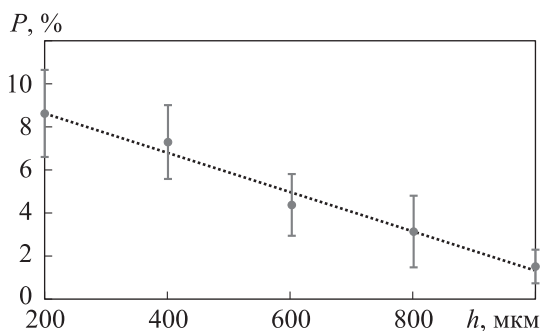


Рис. 6. Зависимость доли пор P от глубины материала поршня h

максимальное значение температуры в центральной зоне составило 677,1 К (403,95 °С), и оно постепенно снижается по направлению к периферийным участкам детали. Значения температур в отдельных точках, полученные при сквозном зондировании, приведены на рис. 7, где пунктирная линия соответствует уравнению аппроксимации температурного поля.

Средний температурный градиент в области дна поршня составил ~2,5 К/мм. Зависимость температуры головки поршня T от глубины материала поршня максимально точно описывается уравнением аппроксимации температурного поля

$$T = 677,1 - 0,0026h + 0,1 \cdot 10^{-6}h^2, \text{ К.}$$

Результаты измерения температуры в поверхностном слое материала головки поршня на глубине 1000 мкм, позволившие детализировать картину теплового состояния материала в критически нагруженном поверхностном слое, приведены на рис. 8.

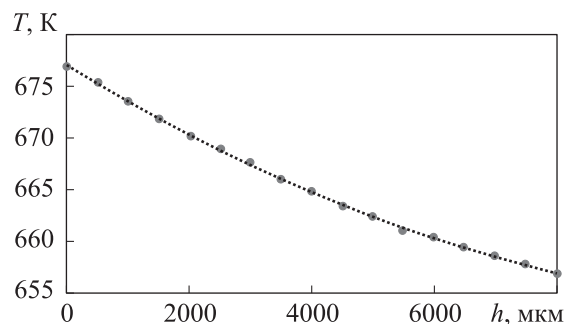


Рис. 7. Зависимость температуры поршня T от глубины его материала h при сквозном зондировании

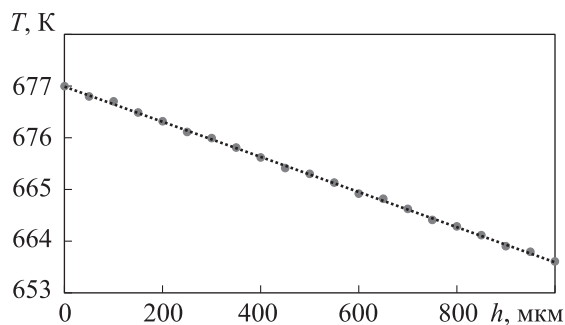


Рис. 8. Распределение температуры по глубине материала головки поршня

Зависимость температуры головки поршня в локальном приповерхностном слое, показанном на рис. 8, описывается линейным уравнением

$$T = 677 - 0,0034h. \quad (2)$$

Пунктирная линия на рис. 8 соответствует уравнению (2).

Средний температурный градиент снижения температуры в пределах первых 1000 мкм возле поверхности головки составил 3,43 К/мм, что указывает на более интенсивное падение температуры в приповерхностной зоне днища поршня, чем в глубинных слоях.

Преобразование уравнений (1) и (2) позволило получить зависимость пористости в материале поршня от температуры его нагрева для области возле прогара, расположенной на глубине 1000 мкм:

$$P = 2,73T - 1841,1. \quad (3)$$

Анализ результатов, полученных при металлографическом исследовании материала поршня до и после прогара, а также при 3D-моделировании, позволил получить представление о механизме прогара поршней, выполненных из алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния. Как видно из рис. 6, прогар связан с формированием пор в материале поршня. Плотность пор максимальна в области, прилегающей к поверхности прогара. Эти

поры, увеличиваясь в размере с ~30 мкм в начальной стадии прогара (см. рис. 6, а) до ~70 мкм в конечной стадии прогара, срastaются, образуя цепочки пор, напоминающие трещины (см. рис. 6, б). Подобные дефекты ослабляют материал поршня.

Таким образом, прогар в поршне, выполненном из высококремниевых алюминиевых сплавов, является результатом формирования пористой структуры, которая снижает прочность материала и в итоге приводит к его разрушению под действием циклических термических и механических нагрузок. Как видно из рис. 6–8 и уравнения (3), пористость, формируемая при прогаре поршня, напрямую зависит с температуры материала.

Анализ рис. 4 и 5 также показал, что форма и размеры пор коррелируют с таковыми частиц кремния. Это позволяет предположить, что поры при прогаре образуются как результат термического воздействия на кремниевые частицы, вследствие чего формируется дефектная структура, являющаяся причиной разрушения материала поршня при дальнейшей эксплуатации.

Выводы

1. Механизм прогара поршня, выполненного из высококремниевых алюминиевых сплавов, заключается в образовании пор, которые, увеличиваясь в размере, срastaются, образуя цепочки пор. В результате возрастания пористости происходит потеря прочности материала поршня и его разрушение при дальнейшей эксплуатации.

2. Пористость материала поршня, возникающая при прогаре, максимальна в области, прилегающей к поверхности головки, и составляет ~9 %.

3. Пористость, формируемая при прогаре, напрямую связана с распределением температуры в материале головки поршня и описывается линейной зависимостью.

Литература

- [1] Витковский С.Л. Разрушение элементов поршня ДВС. *Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки*, 2014, т. 1, с. 163–167.
- [2] Белов В.П., Апельский Д.В., Беженарь В.Н. Экспериментальная оценка температурного состояния поршней тракторных дизелей. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2022, т. 89, № 2, с. 111–120, doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-105717>
- [3] Никитин И.В. К вопросу оценки летной годности двигателей сверхлегких воздушных судов. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2005, № 85, с. 143–150.

- [4] Дударева Н.Ю., Кишалов А.Е., Кальщиков Р.В. и др. Разработка методики моделирования теплового состояния поршней двигателей внутреннего сгорания. *Вестник УГАТУ*, 2019, № 3, с. 46–54.
- [5] Петров В.И., Смирнов А.Г. Особенности тепловых процессов при прогаре поршня двигателя внутреннего сгорания. *Энергетика и теплотехника*, 2011, № 3, с. 28–33.
- [6] Воробьев В.Ю. Исследование прогара поршня в дизельном двигателе. *Двигатели внутреннего сгорания*, 2013, № 2, с. 53–58.
- [7] Козлов Д.М., Петров Н.И. Влияние прогара поршня на эксплуатационные характеристики дизельного двигателя. *Двигатели внутреннего сгорания*, 2015, № 4, с. 22–27.
- [8] Мацулевич М.А., Ломакина Н.М., Ломакин Г.В. Оценка тепломеханической нагруженности поршня бензинового двигателя при форсировании газотурбинным наддувом. *Транспорт Урала*, 2015, № 4, с. 78–80, doi: <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2015-4-78-80>
- [9] Макаров А.Р., Смирнов С.В., Осокин С.В. и др. Конструкционные материалы для поршней ДВС. *Известия МГТУ МАМИ*, 2013, т. 1, № 1, с. 118–122.
- [10] Заренбин В.Г., Чайнов Н.Д., Руссинковский С.Ю. и др. *Моделирование теплового состояния и расчет на заедание пар трения базовых теплонапряженных деталей поршневых двигателей*. Москва, Инфра-М, 2024. 202 с.
- [11] Казанцев И.А., Бычков В.И., Казанцев А.И. Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион*, 2018, № 2, с. 107–118, doi: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2018-2-10>
- [12] Мукасейев А.В. *Повышение эффективности судовых дизелей применением комбинированного метода восстановления поршней из алюминиевых сплавов*. Дисс. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2004. 108 с.
- [13] Аль-Бдейри М.Х., Красильников В.В., Сергеев С.В. Модифицированный квазистационарный метод изучения изменения температур перехода поршней дизельного двигателя, покрытых теплозащитными материалами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2020, т. 24, № 5, с. 954–965, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-954-965>
- [14] Дударева Н.Ю., Кальщиков Р.В., Домбровский О.П. и др. Экспериментальное исследование теплового состояния днища поршня ДВС с теплозащитным слоем, сформированным методом микродугового оксидирования. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 5. EDN: UBXQRR
- [15] Собачкин А.В., Логинова М.В., Яковлев В.И. и др. Исследование жаростойкости покрытия Ti-Al-Nb на модельных образцах поршневого алюминиевого сплава. *Ползуновский вестник*, 2020, № 3, с. 88–92, doi: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.016>
- [16] Валеев Р.С., Еникеев Р.Д., Сакулин Р.Ю. Повышение стойкости поршней двухтактных ДВС к прогару посредством нанесения МДО-покрытий. *Двигателестроение*, 2020, т. 280, № 2, с. 30–34.
- [17] Снегоход RM Vector 551i. *go-rm.ru: веб-сайт*. URL: https://go-rm.ru/rm_vector_551i_data.html (дата обращения: 22.07.2025).
- [18] Растровый электронный микроскоп JSM-6490LV. *uust.ru: веб-сайт*. URL: <https://uust.ru/eik/units/jsm-6490lv/> (дата обращения: 22.07.2025).
- [19] Зильберглейт М.А., Темрук В.И. Применение пакета ImageJ для обработки изображений, полученных электронной сканирующей микроскопией (на примере анализа бумаги). *Полимерные материалы и технологии*, 2017, т. 3, № 1, с. 71–74, doi: <https://pmt.mpri.org.by/wp-content/uploads/2024/07/zilbergleit.pdf>
- [20] Дударева Н.Ю., Загайко С.А. *Самоучитель SolidWorks 2010*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
- [21] *Pistons and engine testing*. Springer, 2016. 295 p.
- [22] Дударева Н.Ю., Коломейченко А.В., Кисель Ю.Е. Эффективность тепловой защиты поршней ДВС покрытием, сформированным микродуговым оксидированием. *Тракторы и сельхозмашины*, 2024, т. 91, № 1, с. 101–112, doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-586629>

- [23] Аптуков В.Н., Ильющенко П.Н., Фонарев А.В. Моделирование трещинообразования в материалах под действием взрывных нагрузок. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2010, т. 3, № 1, с. 5–12.
- [24] Бугаро Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2008, т. 1, № 4, с. 5–20.

References

- [1] Vitkovskiy S.L. Destruction of internal combustion engine piston elements. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2014, vol. 1, pp. 163–167. (In Russ.).
- [2] Belov V.P., Apelinskiy D.V., Bezhenar V.N. Experimental assessment of the temperature state of tractor diesel pistons. *Traktory i selkhoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2022, vol. 89, no. 2, pp. 111–120, doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-105717> (in Russ.).
- [3] Nikitin I.V. To a question of an estimation of the validity to flights of engines of ultralight air courts. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2005, no. 85, pp. 143–150. (In Russ.).
- [4] Dudareva N.Yu., Kishalov A.E., Kalshchikov R.V. et al. Development of the simulation technique of the piston heat conditions of the internal-combustion engine. *Vestnik UGATU*, 2019, no. 3, pp. 46–54. (In Russ.).
- [5] Petrov V.I., Smirnov A.G. Features of thermal processes during piston burnout in an internal combustion engine. *Energetika i teplotekhnika*, 2011, no. 3, pp. 28–33. (In Russ.).
- [6] Vorobyev V.Yu. Study of piston burnout in a diesel engine. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2013, no. 2, pp. 53–58. (In Russ.).
- [7] Kozlov D.M., Petrov N.I. Effect of piston burnout on the performance characteristics of a diesel engine. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2015, no. 4, pp. 22–27. (In Russ.).
- [8] Matsulevich M.A., Lomakina N.M., Lomakin G.V. Evaluation of thermal and mechanical load of piston in turbocharged gasoline engine. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2015, no. 4, pp. 78–80, doi: <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2015-4-78-80> (in Russ.).
- [9] Makarov A.R., Smirnov S.V., Osokin S.V. et al. Engineering materials for pistons of internal combustion engines. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 118–122. (In Russ.).
- [10] Zarenbin V.G., Chaynov N.D., Russinkovskiy S.Yu. et al. *Modelirovanie teplovogo sostoyaniya i raschet na zaedanie par treniya bazovykh teplonapryazhennykh detaley porshnevnykh dvigateley* [Modeling of the thermal state and calculation of the friction pairs of the basic heat-stressed parts of piston engines]. Moscow, Infra-M Publ., 2024. 202 s. doi: <https://doi.org/10.12737/2083543> (in Russ.).
- [11] Kazantsev I.A., Bychkov V.I., Kazantsev A.I. Impact of thermophysical properties of piston on the operational characteristics of internal combustion engines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2018, no. 2, pp. 107–118, doi: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2018-2-10> (in Russ.).
- [12] Mukaseev A.V. *Povyshenie effektivnosti sudovykh dizeley primeneniem kombinirovannogo metoda vosstanovleniya porshney iz alyuminievykh splavov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of marine diesel engines using a combined method of restoring pistons from aluminum alloys. Kand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2004. 108 p. (In Russ.).
- [13] Al-Bdeyri M.Kh., Krasilnikov V.V., Sergeev S.V. Modified quasi-stationary method for studying changes in transition temperatures of diesel engine pistons coated with heat-shielding materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2020, vol. 24, no. 5, pp. 954–965, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-954-965> (In Russ.).
- [14] Dudareva N.Yu., Kalshchikov R.V., Dombrovskiy O.P. et al. Experimentally studied thermal piston-head state of the internal-combustion engine with a thermal layer formed by micro-arc oxidation method. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2015, no. 5. EDN: UBXQRR (in Russ.).

- [15] Sobachkin A.V., Loginova M.V., Yakovlev V.I. et al. Effect of gamma irradiation on the structural and phase characteristics of products obtained by SPS sintering. *Polzunovskiy vestnik*, 2020, no. 3, pp. 88–92, doi: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.016> (In Russ.).
- [16] Valeev R.S., Enikeev R.D., Sakulin R.Yu. Micro-weld oxidation as a means to prevent burn-out of 2-stroke engine piston. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2020, vol. 280, no. 2, pp. 30–34. (In Russ.).
- [17] Snegokhod RM Vector 551i [Snowmobile RM Vector 551i]. *go-rm.ru: website*. URL: https://go-rm.ru/rm_vector_551i_data.html (accessed: 22.07.2025). (In Russ.).
- [18] Rastrovyy elektronnyy mikroskop JSM-6490LV [Scanning electron microscope JSM-6490LV]. *uust.ru: website*. URL: <https://uust.ru/eik/units/jsm-6490lv/> (accessed: 22.07.2025). (In Russ.).
- [19] Zilbergleyt M.A., Temruk V.I. Package ImageJ application for image processing obtained scanning electronic microscopy (paper analysis). *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2017, vol. 3, no. 1, pp. 71–74, doi: <https://pmt.mpri.org.by/wp-content/uploads/2024/07/zilbergleyt.pdf> (in Russ.).
- [20] Dudareva N.Yu., Zagayko S.A. *Samouchitel SolidWorks 2010* [SolidWorks 2010 self-study guide]. Sankt-Peterburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 416 p. (In Russ.).
- [21] Pistons and engine testing. *Springer*, 2016. 295 p.
- [22] Dudareva N.Yu., Kolomeychenko A.V., Kisel Yu.E. The efficiency of thermal protection of ICE pistons with the micro-arc oxidation. *Traktory i selkhoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2024, vol. 91, no. 1, pp. 101–112, doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-586629> (in Russ.).
- [23] Aptukov V.N., Ilyushchenko P.N., Fonarev A.V. Modeling of crack formation in materials under explosion loads. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2010, vol. 3, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.).
- [24] Bugaro N.G. Modeling of crack formation in materials under explosion loads. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2008, vol. 1, no. 4, pp. 5–20. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.09.2025

Информация об авторах

ДОЙНИКОВ Антон Игоревич — инженер, аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания. ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий (450076, Уфа, Российская Федерация, ул. 3. Валиди, д. 32, e-mail: anton.doinikov2013@yandex.ru).

ДУДАРЕВА Наталья Юрьевна — доктор технических наук, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания. ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий (450076, Уфа, Российская Федерация, ул. 3. Валиди, д. 32, e-mail: dudareva.nyu@ugatu.su).

Information about the authors

DOINIKOV Anton Igorevich — Engineer, Postgraduate, Department of Internal Combustion Engines. Ufa University of Science and Technology (450076, Ufa, Russian Federation, Z. Validi St., Bldg. 32, e-mail: anton.doinikov2013@yandex.ru).

DUDAREVA Natalia Yuryevna — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Internal Combustion Engines. Ufa University of Science and Technology (450076, Ufa, Russian Federation, Z. Validi St., Bldg. 32, e-mail: dudareva.nyu@ugatu.su).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дойников А.И., Дударева Н.Ю. Механизм прогара поршня, выполненного из высококремниевое алюминиевого сплава, для двигателей внутреннего сгорания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 122–131.

Please cite this article in English as:

Doynikov A.I., Dudareva N.Yu. Burnout mechanism of a piston made of high-silicon aluminum alloy for internal combustion engines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 122–131.