***УДК 629.1***

# ТЕОРИЯ КАВИТАЦИОННОГО ИЗНОСА ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ

**Глущенко А.А., кандидат технических наук, доцент,**
**тел. 89374564933, oildel@yandex.ru**
**ФГБОУ ВО Ульяновский государственный университет**
**Салахутдинов И.Р., кандидат технических наук, доцент,**
**тел. 8(8422)-55-95-13, ilmas.73@mail.ru**
**Ширнин Е.О., магистрант,**
**тел. 89093592901, zhenek202@yandex.ru**
**ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ**
**Салахутдинова З.И., курсант,**
**тел. 89378731990, zarrina.7300@mail.ru**
**ФГКОУ ВО Волгоградская академия МВД России**

***Ключевые слова:*** *кавитация, гипотеза, износ, гильза цилиндров, вибрация, теория кумулятивных струй, пластическая деформация*

*Кавитация – это образование и схлопывание пузырьков пара в жидкости системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания, находящейся в состоянии, близком к кипению, приводящее к разрушению стенок цилиндров двигателя. В результате кавитации кавитационная прочность снижается по ряду показателей, в том числе и долговечности поверхностей деталей. В связи с этим задачей данной работы является теоретическое исследование кавитации гильз цилиндров и проверка их устойчивости к кавитационному разрушению.*

**Введение.** Выход из строя поршневой группы двигателя автомобиля – крайне неприятная проблема, решение которой обычно требует обширного обслуживания. Одной из деталей этой группы, которая может быть повреждена, является гильза блока цилиндров. Износ внешней поверхности гильзы блока цилиндров, пожалуй, самая распространенная проблема этой детали. Во время работы вся наружная поверхность гильзы блока цилиндров контактирует с охлаждающей жидкостью. В охлаждающей жидкости образуются мелкие пузырьки, они «взрываются» на поверхности гильзы цилиндров, что вызывает

возникновение процесса кавитации. Это приводит к образованию кавитационного износа на внешней поверхности гильзы цилиндра.

В дизелях вибрация гильз цилиндров возникает при прохождении поршня двигателя через ВМТ, т.е. при переходе с одной стороны цилиндра на другую («перекладка»). Между поршнем и зеркалом цилиндра имеется зазор, и поршень перемещается с возникновением удара. При этом изменяется давление на стенки цилиндра. Вибрация цилиндра вызывает его кавитационное изнашивание.

В бензиновых двигателях кавитационное разрушение гильз цилиндров почти не встречается. Эти двигатели, как правило, работают с низкой степенью сжатия, вследствие чего давление на поршень при сгорании рабочей смеси значительно ниже, чем в дизеле. В бензиновом двигателе зазор между поршнем и гильзой цилиндра небольшой, и в процессе работы он уменьшается. Поэтому сильного удара и высокой вибрации гильзы при движении поршня в ВМТ не возникает [1].

**Материалы и методы исследования.** В настоящее время существует пять теорий кавитационного износа деталей: коррозионная, механическая, гидроэлектрическая, обобщённая и теория кумулятивных струй [2].

*Гипотеза о коррозионном поведении кавитационного разрушения* металла основана на химическом воздействии жидкости, то есть источника коррозии.

*Гипотеза о механической природе кавитационных повреждений* основана на испытаниях образцов материалов под действием струеударной установки с целью установления глубины проникновения повреждений в процессах кавитации и коррозии в морской воде.

*Гипотеза о воздействии кумулятивных струй* (рис. 1) основана на воздействии кумулятивных струй, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков. В результате постоянного воздействия этих микроструй, когда на поверхности детали образуются дыры, происходит унос материала с образованием лунок.

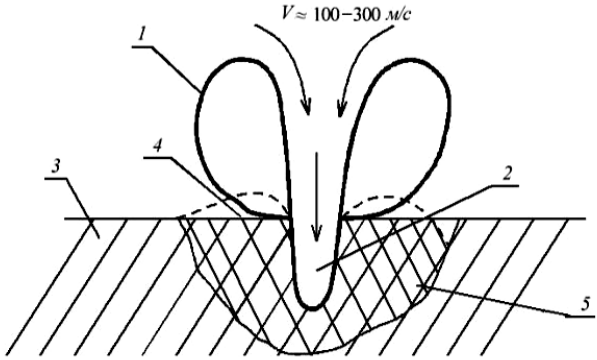
**Рисунок 1 - Гидродинамическая кавитация на поверхности детали**

*Гипотеза вихревой природы кавитационных повреждений*. При столкновении быстрого потока жидкости с препятствием возникают завихрения, которые периодически срываются и уносятся потоком. Участки пола корпуса (или стенки канала), попадающие в зону вихревого отрыва, подвержены высокочастотному отрыву жидкости и могут быть разрушены.

*Общая концепция кавитационных повреждений* показывает, что при кавитационном изнашивании материал подвергается локальному разрушению из-за особых условий, способствующих усилению скорости коррозии. Это связано с тем, что при схлопывании пузырьков поврежденная поверхность разрушается несколькими повторными гидроударами, что приводит к образованию различных напряженных зон [2].

По мнению многих исследователей, гипотеза о влиянии кумулятивных струй, возникающих при схлопывании кавитационного пузырька, более достоверна, чем любая другая.

В целом механизм разрушения конструкционных материалов можно представить следующим образом (рис. 2). При воздействии на обтекаемую поверхность производимом кумулятивными струйками (процесс является импульсным и нестационарным) поверхность деформируется и в результате усталостная прочность материала снижается, происходит выкрашивание и выбивание отдельных частиц [3:4].




*1* – коллапсирующий пузырек; *2* – кумулятивная струйка; *3* – стенка; *4* – «выдавленный» материал (стадия пластической деформации); *5* – зона пластической деформации

**Рисунок 2 - Механизм разрушения материала при кавитации:**

С этого времени скорость эрозии существенно возрастает и значительную роль начинают играть гидродинамические факторы, определяющие разрушение материала в рамках концепции ударной волны: вибрация, акустическое излучение и в ряде случаев химические и коррозионные факторы. среди прочего.

Традиционным критерием эрозионной стойкости материала является потеря массы (объема) с течением времени. Этот стандарт не учитывает условия нагружения, физику процесса и свойства материала. При схлопывании в точке *O* над поверхностью кавитационных пузырьков на расстоянии $r_0$ от неё (рис.3) на ней образуется пластический кратер *a* с пластическим ядром *d* под ним. Критическое разрыхление $\theta$, приводящее к образованию очага разрушения глубиной *z*, образуется за время инкубационного периода *t* после схлопывания критического числа *N* пузырьков.

В этом случае количество поврежденного и удаленного материала из кратера $V_Д$ будет пропорционально $z^3$. Значение z определяется выражением:

$$z = d\left\{1 - \frac{1}{\gamma}\ln\left[\left(\frac{C_o}{\lambda_T^s}\right)^{\frac{1}{2}} + 1\right]\right\}, \qquad (1)$$

где $\gamma$ - параметр, связанный с размерами ядра $d$ и глубиной кратера $h$; $C_0$ - постоянная Л. Коффина; $\lambda_T$ = 0,002; $s$ –постоянная материала ($s$=2 в случае линейного упрочнения); $p$ – давление при схлопывании пузырьков.

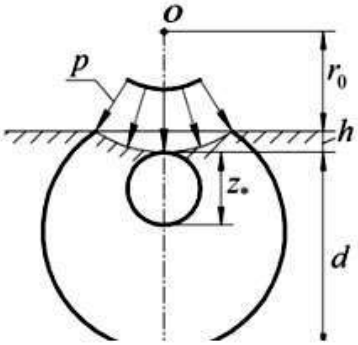



**Рисунок 3 - Очаг повреждения при кавитационной эрозии**

Предложенная модель формирования эрозионных повреждений учитывает упругие, пластические и циклические свойства материала и позволяет определить продолжительность инкубационного периода эрозии.

$$t = \tau\left\{1 + \frac{1}{s\beta}in\left[\frac{C_o}{\lambda_T^s}\cdot\frac{1}{\left[\exp\gamma\left(1 - \frac{z_o}{d}\right) - 1\right]^s} - 1\right]\right\}, \qquad (2)$$

В выражении (2) $\tau$ определяется конкретным типом и процессом кавитации в жидкости. Для его определения необходимо исследовать процесс с позиций гидромеханики. Чтобы оценить кавитационную стойкость материала на стадии образования эрозионных повреждений в качестве критерия используем параметр $R = E_t\ N/z^3$, в котором $E_t$ - энергия, поглощенная в очаге эрозии при схлопывании пузырька. Этот параметр адекватен удельной энергии, поглощённой в единице объёма удаляемого материала за время инкубационного периода [5,6].

Для описания уровня эрозионных повреждений воспользуемся соотношением К. Стеллера для уравновешивания работы внешних сил и произведённой работы при постоянстве мощности, затрачиваемой на разрушение:

$RV=P_t$ (3)

где $V$ – эрозионные потери объёма материала за время $t$, *мм*$^3$; $R$ – удельная поглощённая в объёме энергия (сопротивление металла эрозии), мм$^3$/ч, Дж; $P_t$ – мощность, затрачиваемая на разрушение, Вт·ч.

Если задаться законами изменения сопротивления $R$ эрозии на стадии развития эрозионных повреждений, как состоящей из периодов упрочнения и разупрочнения, соответственно в виде

$$R = R_g\left[1+\frac{1}{k}e^{k\left(t-t^{/}\right)}\right], \qquad (4)$$

тогда получим выражения, описывающие процесс эрозии в период упрочнения и разупрочнения соответственно:

$$V = V_u + \frac{C\left(t-t^{/}\right)}{1+\frac{1}{k}e^{-k\left(t-t^{/}\right)}}, \qquad (5)$$

В формулах (4) и (5) $Rg$, $V$ - сопротивление металла эрозии и первоначальные потери объёма в конце инкубационного периода, мм$^3$/ч; $C$ –постоянная; $k$ – коэффициент запаса сопротивления металла эрозии; $t$ и $t^{/}$ – продолжительность периода упрочнения и потери в конце его, ч.

Предложен параметр для оценки эрозионной стойкости материалов на стадии развития кавитационных повреждений:

$$\delta = \frac{1}{P\left(t-t^{/}\right)}\int_{t^{/}}^{t} R dt \qquad (6)$$

Зависимость (6), описывающая развитие эрозионных повреждений во времени, получена в предположении постоянства мощности $P$, затрачиваемой на разрушение. Однако в период разупрочнения, особенно при $t>t^{/}$, охлаждающая жидкость, заполняя глубокие кавитационные раковины, начинает оказывать буферное действие. Поэтому логично положить уменьшение $P$, которое выразим зависимостью

$$P_t = P_e^{-x\left(t-t^{/}\right)} \qquad (7)$$

где $x$ - постоянная.

Тогда, записывая работу внешних сил как

$$E_p = \int_{t^{/}}^{t} Pdt. \qquad (8)$$

Из уравнения баланса работ для периода кавитационного разупрочнения получим выражение для эрозионных потерь объёма материала в указанном периоде

$$V = V_u + \frac{C_1}{x} \cdot \frac{1 - e^{-x\left(t-t^{/}\right)}}{1 + \frac{1}{k} e^{-k\left(t-t^{/}\right)}}, \qquad (9)$$

Из уравнения (9) как частный случай при $\chi$ =0 следует вторая зависимость в выражении (5).

Кавитация представляет собой случайный микроударный процесс, поэтому эрозия материалов зависит от их структурных составляющих, характеристик зерен и строением тонкой структуры. Описанные выше модели эрозионного процесса это не учитывают. Следует также учитывать вероятностный характер процесса.

Положения современной физики твердого тела с учетом атомно-молекулярного строения предлагают явление деструкции, как процесс разрушения, связанный с дефектами кристаллической решетки или самих кристаллов и размерами этих дефектов. Это можно увидеть по различным макроскопическим параметрам тела. Это позволяет рассматривать вопрос кавитационного разрушения металла с помощью теории Гриффитса, согласно которой фактическая прочность такого материала меньше расчетной и обусловлена критическим напряжением, накопленным на краю образующейся каверны:

$$\sigma_{кр} = \left( \frac{2 \cdot E \cdot \gamma_i}{\pi \cdot \left(1 - \nu^2\right) \cdot r} \right)^{0,3}, \qquad (10)$$

где $E$ - модуль упругости, Па; $\gamma_i$ - плотность поверхностной энергии, Дж/мм$^3$; $\nu$ - коэффициент Пуассона; $r$ - радиус каверны, мм.

Тогда для объемного напряженного состояния стенки гильзы можно записать:

$$\sigma_{кр} = \frac{3}{2}\left(\frac{L \cdot E \cdot \gamma_i}{S_к}\right)^{0,3}, \qquad (11)$$

где $L$ - линейный размер тела (стенки цилиндра), мм; $S_к$ - площадь каверны, мм$^2$.

Если рассматривать процесс коррозии с точки зрения квантовой механики, где под фононом понимать колебательный квант, то взрывное разрушение твердого тела происходит внезапно, проявляя постоянное поведение во фрактальных измерениях, и атомные связи разрываются в короткое время $S_к$. Тогда с учетом потерь металла в виде кристалла в унитарной силе $\sigma_p$, она равна силе сцепления приходящимся на единицу площади. В этом случае уравнение (11) сводится к следующему виду:

$$2\left(\frac{\sigma_p^2}{E}\right) \cdot F_c \cdot a \succ 2F_c \cdot \gamma, \qquad (12)$$

где $a = 2\gamma \cdot \dfrac{E}{\sigma_p^2}.$ (13)

Последнее соотношение представляет собой необходимое и достаточное условие для разрушения твердого тела, а $F_c$ - является функцией его внутренней структуры, связанной с размерами кристалла или зерна, т.е $F_c=\sigma_0+kd^{-1/2}=\sigma_T$.

Проведя преобразование выражение (12), с учетом физических характеристик материала стенки гильзы цилиндров, получим условие обеспечения прочности кавитационному разрушению:

$$2\left(\frac{P \cdot \varepsilon \cdot E}{S_{кд}}\right) \cdot \sigma_T \cdot 2\gamma \cdot \frac{E}{\sigma_p^2} \le 2\sigma_T \cdot \gamma, \qquad (14)$$

где $P$ - сила воздействия кумулятивной струи, Н; $\varepsilon$- коэффициент запаса прочности; $\sigma_T$ - предел текучести материала, Па [5,7,8].

**Выводы.** Поэтому для предотвращения кавитационного повреждения стенки цилиндра необходимо использовать материал или защитный слой с высоким пределом текучести. Условие кавитационного повреждения, полученное теоретически, позволяет выбрать материал изготовления или покрытия гильз цилиндров,

обеспечивающий стойкость стенок цилиндров в процессе эксплуатации.

**Библиографический список:**

1. Дефекты гильзы в блоке цилиндров автомобильного двигателя Источник: https://okeydrive.ru/defekty-gilzy-v-bloke-cilindrov-avtomobilnogo-dvigatelya/

2. Мартынов, Н. Д. Исследования интенсивности кавитационного износа / Н. Д. Мартынов, С. А. Петрин, О. Ю. Бибик, А. С. Махетов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 18 (152). — С. 58-63. — URL: https://moluch.ru/archive/152/43174/ (дата обращения: 06.04.2024).

3. Результаты экспериментальных исследований износостойкости деталей с измененными физико-механическими характеристиками поверхности трения / И. Р. Салахутдинов, А. Л. Хохлов, А. А. Глущенко, К. У. Сафаров // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы II-ой Международной научно-практической конференции. Том 2010-3. – Ульяновск, 2010. – С. 107-116.

4. Симдянкин, А.А. Кавитационная стойкость гильз цилиндров высокофорсированных дизелей / А.А. Симдянкин, Б.П. Загородских, А.М. Хамсин // Нива Поволжья – 2009 - №2(11). – С.61-67.

5. Салахутдинов, И. Р. Теоретическое обоснование снижения интенсивности кавитационного изнашивания стенок гильзы цилиндров нанесением антикавитационного покрытия / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко, А. Л. Хохлов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 2(58). – С. 18-24. – DOI 10.18286/1816-4501-2022-2-18-24. – EDN PPSVKG.

6. Технология ремонта гильзы блока цилиндра двигателя внутреннего сгорания, подверженного кавитационному износу / Я.И. Заиченко // Вестник ИрГТУ №10 (105) 2015. С. 45-49.

7. Починов, В. Д. Повышение износостойкости гильз цилиндров путем нанесения электроизолирующего покрытия / В. Д. Починов, И. Р. Салахутдинов // Научно-технологические приоритеты в развитии агропромышленного комплекса России: Материалы 73-й

Международной научно-практической конференции. Часть II. – Рязань, 2022. – С. 120-124. – EDN NKIWYY.

8. Салахутдинов, И. Р. Теоретическое обоснование процесса снижения износа цилиндро-поршневой группы биметаллизацией методом вставок / И. Р. Салахутдинов, А. Л. Хохлов, А. А. Глущенко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2011. – № 2. – С. 42-45. – EDN NDIVKT.

## THEORY OF CAVITATION WEAR OF CYLINDER LINERS

**Glushchenko A.A., Salakhutdinov I.R., Shirnin E.O., Salakhutdinova Z.I.**

***Keywords:*** *cavitation, hypothesis, wear, cylinder liner, vibration, theory of cumulative jets, plastic deformation*

*Cavitation is the formation and collapse of vapor bubbles in the cooling system liquid of an internal combustion engine, which is in a state close to boiling, leading to the destruction of the walls of the engine cylinders. As a result of cavitation, cavitation strength decreases in a number of indicators, including the durability of the surfaces of parts. In this regard, the objective of this work is to theoretically study the cavitation of cylinder liners and test their resistance to cavitation destruction.*