

ОЦЕНКА РЕСУРСА ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК ДВС ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ КАВИТАЦИИ

А.Г. Валишин, к.т.н.

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Описываются методы определения ресурсных показателей цилиндровых втулок ДВС вследствие вибрационной кавитации. Предложена усовершенствованная методика оценки долговечности (ресурса) втулок в форме алгоритма, предусматривающего последовательность определения характеристик, влияющих на процесс их кавитационного разрушения. Приведены экспериментальные зависимости скорости эрозионного изнашивания цилиндровых втулок от продолжительности аккумуляционного периода эрозионного разрушения, представленного как функция частоты свободных колебаний втулки.

Охлаждаемые водой поверхности цилиндровых втулок и блоков цилиндров высокооборотных (ВОД) и среднеоборотных двигателей (СОД) подвергаются локальным разрушениям (гидроэрозии), которые формируются в виде скопления раковин в плоскости качания шатуна или в виде канавок в зазорах между втулкой и блоком в верхней части детали (разновидность щелевой эрозии).

Повреждения в средней части втулки связаны с так называемой вибрационной кавитацией, т. е. с образованием и с последующим замыканием (продавливанием) парогазовых полостей охлаждающей жидкостью, динамически воздействующей на поверхность втулок в виде кумулятивных струек.

Щелевая эрозия в узостях и сопряжениях инициирует развитие фреттинг-коррозии, а также возникновение трещин под опорным буртом втулок, что является одной из причин отрыва части буртов от втулок.

В зависимости от конструкции втулок, рабочих характеристик и условий эксплуатации двигателей скорость роста кавитационно-эрозионных раковин может изменяться в очень широком диапазоне — от 0,05 до 10 мкм/ч [1–5]. Во многих случаях выбраковка цилиндровых втулок производится по критической глубине эрозионных раковин на охлаждаемой водой поверхности, а не по износу внутренней стороны, так называемого «зеркала» цилиндра.

В настоящее время проблема борьбы с кавитационно-эрозионными разрушениями деталей ВОД и СОД еще далека до своего окончатель-

ного решения. Это обусловлено высокой степенью сложности и многообразием процессов вибрационной кавитации и эрозии деталей двигателей, отсутствием достоверных физических и математических моделей кавитационно-эрозионного разрушения материалов и конкретных деталей и, как следствие, — ограниченностью имеющихся расчетных методов оперативной оценки долговечности (ресурса) деталей при гидроэрозии.

В настоящее время кавитационно-эрозионную стойкость втулок оценивают в основном по статистическим данным, полученным из ремонтных ведомостей и актов освидетельствования состояния деталей при разборках двигателей. Для снижения негативных последствий вибрационной кавитации в двигателях требуется проведение ресурсных стендовых испытаний и создание методов расчета долговечности деталей при кавитационной эрозии [5].

В усовершенствованной методике оценки долговечности цилиндровых втулок дизелей предложен алгоритм расчета, состоящий из пяти этапов, при выполнении которых последовательно определяются следующие характеристики, влияющие на процесс разрушения деталей.

1. Амплитуда вибрации втулки A (мкм), как разность между наибольшей амплитудой A_{\max} , возникающей при динамическом воздействии боковой силы удара поршня P_{\max} и амплитудой статического отклонения втулки $A_{\text{ст}}$ при воздействии силы P_{\max} в статике [2], т. е.

$$A = A_{\text{дин}} - A_{\text{ст}} \quad (1)$$

2. Напряжение (МПа), возникающее в материале втулки при вибрационных нагрузках с амплитудой A [5]

$$\begin{aligned} \sigma &= 180A^{0,33} \quad (\text{при } A \leq 5 \text{ мкм}); \\ \sigma &= 7,5A + 335 \quad (\text{при } A \geq 5 \text{ мкм}). \end{aligned} \quad (2)$$

Формулы (2) получены в результате обработки опытных данных К.М. Прис [6].

3. Продолжительность аккумуляционного периода $\tau_{\text{ак}}$, в течение которого износ отсутствует; по данным о поверхностной усталости чугуна и стали 38ХМЮА, полученным на основании результатов испытаний образцов на магнито-стрикционном вибраторе (МСВ) при постоянной частоте $f_{\text{св}}$ и различных амплитудах колебаний концентратора

$$\tau_{ак} = \kappa_{\tau}(\tau_{ак})_{МСВ} / \kappa_{\epsilon_{св}}, \quad (3)$$

где $\kappa_{\epsilon_{св}}$ — коэффициент, равный отношению частоты свободных колебаний втулки исследуемого двигателя к частоте свободных колебаний втулки двигателя, принятого за эталон; κ_{τ} — коэффициент, равный отношению $\tau_{ак}$ на кинетической функции кавитационно-эрозионного изнашивания эталонного ДВС к $(\tau_{ак})_{МСВ}$, определенному при испытании образцов из материала втулки на МСВ; для эталонного двигателя Ч15/18 значение $\kappa_{\tau} = 858/42 = 19$.

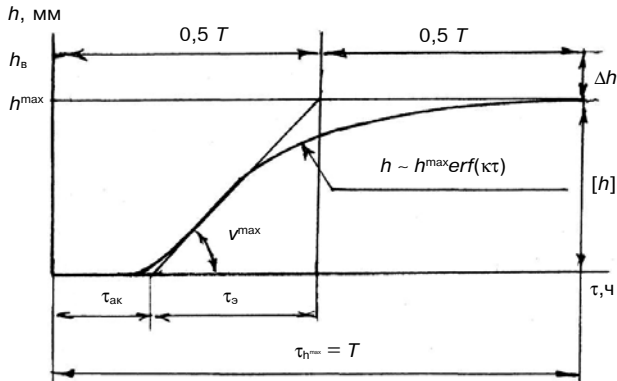


Рис. 1. Упрощенная схема оценки долговечности цилиндрических втулок ДВС при вибрационной кавитации по кинетической функции эрозии в виде интеграла вероятностей $h = h^{max} \text{erf}(k\tau)$ [7]

4. Наибольшая скорость изнашивания v^{max} , определяемая (геометрически) по кинетической функции кавитационной эрозии как тангенс угла наклона прямолинейного участка кривой изнашивания к оси времени (рис. 1). Необходимая для расчетов долговечности втулок зависимость v_3^{max} от аккумуляционного периода $\tau_{ак}$ показана на рис. 2.

5. Долговечность втулки T , равная периоду эксплуатации ДВС, в течение которого наибольшая глубина эрозионных раковин на водоохлаждаемой поверхности достигнет 75% от толщины втулки в зоне наибольших эрозионных повреждений

$$T = k_T \left(\tau_{ак} + \frac{[h]}{v^{max}} \right), \quad (4)$$

где $[h]$ — допускаемая глубина эрозионных раковин, равная 3/4 от толщины стенки втулки h_B ; k_T — коэффициент, учитывающий полный период времени, по истечении которого глубина раковин становится наибольшей (h^{max}) и эрозия прекращается. Анализ кинетических функций эрозии деталей в условиях эксплуатации показывает, что при вибрационной и гидродинамической кавитации $k_T \approx (5,3-6)\tau_{ак}$ [7]. Из упрощенной схемы, приведенной на рис.1 следует, что $h^{max} = [h]$, а $\Delta h = h_B - [h]$ является запасом,

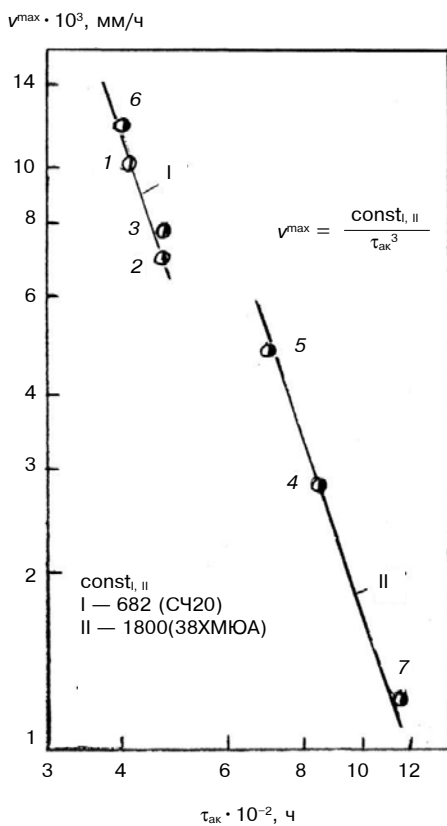


Рис. 2. Зависимость наибольшей скорости эрозии (см. рис. 1) от периода $\tau_{ак}$

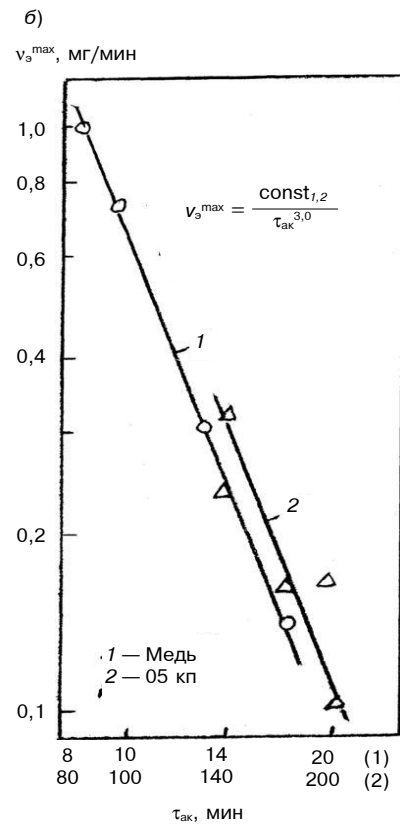
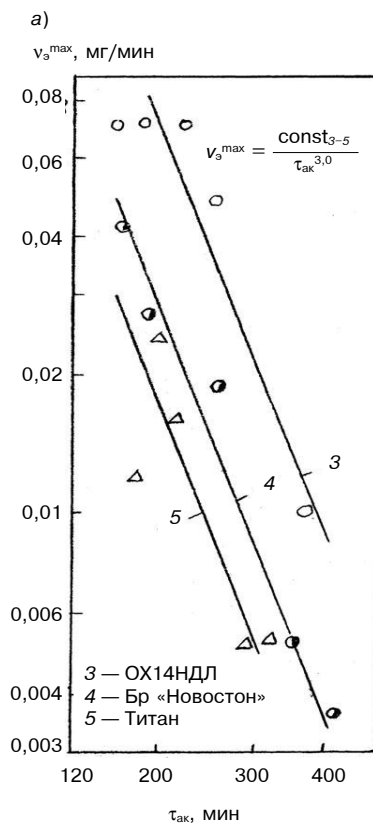


Рис. 3. Зависимость наибольшей скорости эрозии образцов из различных материалов от аккумуляционного периода $\tau_{ак}$ при испытании на МСВ в пресной воде при изменении выходной мощности в пределах от 100 до 330 Вт

Алгоритм оценки долговечности цилиндрических втулок ДВС при вибрационной кавитации

№ на рис. 2	ДВС	$\tau_{ак}^{отн} = \frac{1}{(\sigma_{отн})^{5,5}} f_{св}$	$A = A_{дин} - A_{ст},$ МКМ	$\hat{\sigma}_{акj} = \tau_{ак}^{отн}(\tau_{ак})_{j,3},$ ч	$\tau_{акj}^p = k HV^3(\tau_{ак})_{j,3},$ ч	$v_3^{max} = \frac{const}{\tau_{ак}^3},$ мм/ч	$T = 2 \left(\frac{[h]_l}{v_3^{max}} + \tau_{ак}^p \right),$ ч	$\frac{T}{\tau_{ак}}$
1		2	3	4	5	6	7	8
1	Ч8,5/11	$\left(\frac{378}{373}\right)^{5,5} \frac{1310}{1250} = 0,94$	5,7	858/0,94 = 910	$0,76^{3,0} \cdot 910 = 400$	$10 \cdot 10^{-3}$	$2 \left(\frac{3 \cdot 10^3}{10} + 400 \right) = 1400$	3,5
2	Ч10,5/13	$\left(\frac{357}{373}\right)^{5,5} \frac{1290}{1250} = 0,81$	5,3	858/0,81 = 1059	$0,76^{3,0} \cdot 1059 = 465$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$2 \left(\frac{4,9 \cdot 10^3}{7} + 465 \right) = 2330$	5,0
3	Ч12/14	$\left(\frac{354}{373}\right)^{5,5} \frac{1330}{1250} = 0,80$	4,3	858/0,8 = 1071	$0,76^{3,0} \cdot 1071 = 470$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$2 \left(\frac{6 \cdot 10^3}{7,8} + 470 \right) = 2478$	5,3
4	Ч15/18	$1,0 \cdot 1,0 = 1,0$	5,1	858/1,0 = 858	$1,0 \cdot 858 = 858$	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$2 \left(\frac{4,9 \cdot 10^3}{2,85} + 858 \right) = 5150$	6,0
5	Ч18/20	$\left(\frac{402}{373}\right)^{5,5} \frac{1000}{1250} = 1,22$	8,9	858/1,22 = 703	$1,0 \cdot 703 = 703$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$2 \left(\frac{4,5 \cdot 10^3}{4,8} + 703 \right) = 3281$	4,7
6	Ч23/30	$\left(\frac{423}{373}\right)^{5,5} \frac{590}{1250} = 0,95$	11,7	858/0,95 = 899	$0,76^{3,0} \cdot 899 = 359$	$11,6 \cdot 10^{-3}$	$2 \left(\frac{11,5 \cdot 10^3}{11,6} + 395 \right) = 2772$	7,0
7	Ч23/30	$\left(\frac{403}{373}\right)^{5,5} \frac{625}{1250} = 0,77$	9,0	858/0,77 = 1114	$1,0 \cdot 1114 = 1114$	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$2 \left(\frac{9,8 \cdot 10^3}{1,22} + 1114 \right) = 18293$	16,4

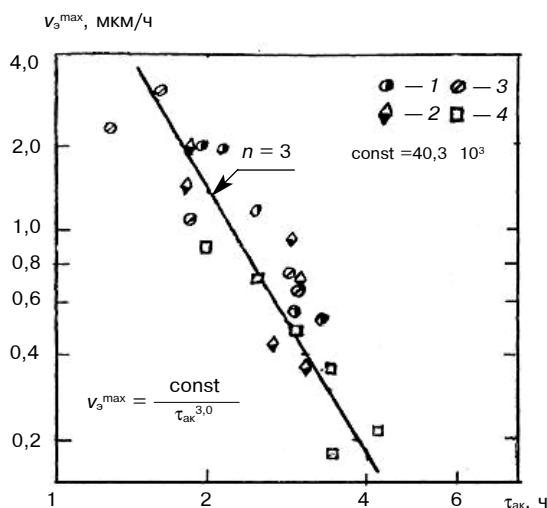


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости эрозии от $\tau_{ак}$ при испытании сплавов на МСВ в синтетической морской воде при частоте 22 кГц и амплитуде вибрации 5, 15 и 33 мкм:

1 — Бр «Куманал»; 2 — Бр «Новостон»; 3 — БР «Нева-70»; 4 — Бр А9Ж4Н4

предохраняющим втулку от появления сквозных эрозионных повреждений в условиях эксплуатации ДВС. Если в формуле (4) принять $k_T = 1$, то запас Δh увеличится, так как $[h]$ уменьшится примерно на 25–50 %, с 0,75 до 0,6–0,5 от толщины стенки втулки h_b .

В таблице приведены результаты расчетов долговечности цилиндрических втулок семи ДВС по предложенной схеме. За эталон для сравнения принят двигатель ЗД6 при следующих исходных данных: $h_b = 6,5$ мм; материал — сталь 38ХМЮА; частота свободных колебаний $f_{св} = 1250$ Гц; амплитуда колебаний: $A_{дин} = 41,5$ мкм, $A_{ст} = 36,4$ мкм [1–3].

Обоснованность использования степенной зависимости $\tau_{ак}^{отн} \sim 1/\sigma_{отн}^{5,5}$ в столбце 2 подтверждена результатами теоретических [4, 8] и экспериментальных исследований [9, 10]. Введение коэффициента k_{HV^3} в формулу для определения $\tau_{акi}^2$ (столбец 5) вызвано необходимостью учета твердости материала втулок: HV чугуна СЧ20/ HV стали 38ХМЮА = 0,76 при кубической зависимости эрозионной стойкости от твердости материалов [7]. И, наконец, определение скорос-

ти эрозии $v^{max} \sim 1/\tau_{ак}^3$ в столбце 6 обосновано результатами обработки опытных данных при испытании на МСВ чугуна СЧ20 и стали 38ХМЮА (рис. 2), а также результатами анализа многочисленных зависимостей v_3^{max} от $\tau_{ак}$ при испытании на МСВ сталей различных классов, цветных металлов, бронз и латуней, приведенных на рис. 3 и 4.

Значения долговечности T в таблице удовлетворительно согласуются с ресурсами втулок в условиях эксплуатации, в частности с ресурсом втулок двигателя ЗД6, равным 5150 ч, что составляет примерно 2 навигации на внутренних водных путях России.

Литература

1. Скуридин А.А. Развитие теории и создание методов расчета кавитационных разрушений полостей охлаждения дизелей. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Л., 1980.
2. Скуридин А.А. Метод расчета кавитационных разрушений гильз рабочих цилиндров дизелей / Вопросы износостойкости и надежности судовых дизелей. — Л.: Транспорт. 1973. — С. 99–105.
3. Иванченко Н.Н., Скуридин А.А., Никитин М.Д. Кавитационные разрушения в дизелях. — Л.: Машиностроение, 1970. — 270 с.
4. Погодаев Л.И., Пимошенко А.П., Капустин В.В. Эрозия в системах охлаждения дизелей. — Калининград: Академия транспорта РФ, 1993. — 324 с.
5. Погодаев Л.И., Кузьмин А.А. Эрозия материалов и судовых технических средств в неоднородных жидких и газообразных средах. — СПб.: СПГУВК, 2004. — 237 с.
6. Прис К.М. Эрозия / Под ред. К.М. Прис. — М.: Мир, 1982. — 464 с.
7. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. — СПб.: Академии транспорта РФ. — 2006. — 608 с.
8. Погодаев Л.И., Протасов А.С. Исследование закономерностей капельной эрозии материалов // Трение и износ. — 1989. — Т. 10. — № 1. — С. 13–23.
9. Спринджер Дж. Эрозия при воздействии капель жидкости. — М.: Машиностроение, 1981. — 199 с.
10. Погодаев Л.И., Цветков Ю.Н. Усталостно-энергетическая модель эрозии материалов и судового оборудования. Физико-химические основы действия ингибиторов коррозии. Сб. науч. тр. — Ижевск: Удм. гос. ун-т, 1991. — Вып. 2. — С.81–97.