

Цветков Ю. Н., Погодаев Л. И.

**Методика ускоренных лабораторных испытаний
по определению относительной
кавитационной износостойкости сплавов**

Относительная кавитационная износостойкость сплавов, определенная по результатам испытаний в лабораторных условиях, как правило, не совпадает с данными эксплуатации натурных объектов. Ряд исследователей видели причину этого в различной интенсивности коррозионного фактора в натурных и лабораторных условиях и строили свои методики лабораторных испытаний на основе интенсификации электрохимической коррозии. Вместе с тем имеются работы, в которых указывается на необходимость осуществлять выбор параметров эксперимента с учетом типа разрушения (хрупкое, пластическое), присущего испытываемому материалу в условиях эксплуатации. Решение вышеупомянутой проблемы еще далеко от завершения. Задача целенаправленного выбора режима испытаний на лабораторных установках тем более важна, что количество их разновидностей довольно велико. Это обстоятельство выдвигает проблему сопоставимости данных по относительной кавитационной износостойкости материалов, полученных разными авторами.

Цель данной работы заключается в попытке разработать методические основы стандартизации режима эксперимента на различных лабораторных установках.

Ранее на основе анализа кривых усталости поверхностных слоев стали и сплавов меди при кавитационном изнашивании на магнитострикционном вибраторе МСВ сделаны следующие выводы [1, 2].

1. На кривых усталости поверхностных слоев, построенных в логарифмических координатах, обнаружены переломы, характеризующие переход от мало- к многоцикловой усталости и наоборот и смена соответствующих механизмов, определяющих характер и интенсивность эрозии.

2. Точка перелома делит кривую усталости на характерные участки, аналитический вид которых для области малоцикловой усталости:

$$\tau_{ak} = const_1 / \sigma^{1,9...2,2} \quad (1)$$

и для многоциклового области

$$\tau_{ak} = const_2 / \sigma^{5,1...6,5} \quad (2)$$

3. Точки перелома разных материалов, близких по механическим свойствам, соответствуют примерно одному и тому же приложенному напряжению, а любую кривую усталости можно получить простым параллельным переносом другой кривой вдоль оси абсцисс; в этом заключается свойство подобия кривых усталости поверхностных слоев металлов при кавитационном изнашивании; все вышеизложенное остается верным и при испытании в 3%-ном растворе NaCl.

4. Относительная износостойкость сравниваемых сплавов в мягкой пресной воде (влиянием коррозионного фактора можно пренебречь) с изменением энергии кавитационного воздействия в пределах одного характерного участка кривой усталости остается постоянной - смена механизмов разрушения при переходе к режиму испытаний, соответствующему

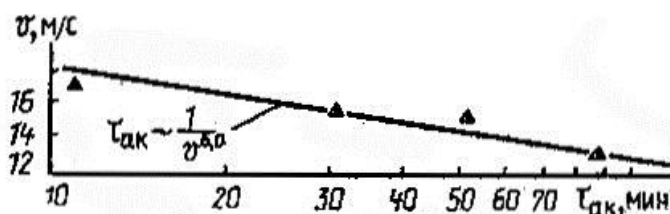


Рис. 1. Соотношение между скоростью потока в гидродинамической трубе от продолжительности акумуляционного периода кавитационного изнашивания свинцовых образцов. Обработка данных работы [7].

другому характерному участку кривой усталости, приводит к скачкообразному изменению относительной износостойкости металлов.

Последний вывод указывает на то, что при сопоставлении данных лабораторных экспериментов и эксплуатации натурных гидромашин, а также при сравнении результатов испытаний, проведенных на разных типах лабораторных установок, необходимо кроме коррозионного фактора, учитывать и то, что интенсивность микроударного воздействия кавитации в сравниваемых случаях должна обеспечивать одинаковый механизм разрушения поверхности. Для определения возможности и способов выполнения последнего условия

проведена обработка литературных данных по испытаниям на кавитационную эрозию, полученных на различных лабораторных установках (рис. 1-5). Следует отметить, что, принимая во внимание существование прямой пропорциональности между $N_{кр}$ и τ_{ak} и между v и σ , при построении зависимостей, указанных на рис. 1-5, по аналогии с традициями, сложившимися при построении кривых усталости в случае объемного нагружения, величины v откладывались по оси ординат, а продолжительность τ_{ak} (или $N_{кр}$) - по оси абсцисс. Хотя, строго говоря, τ_{ak} является функцией параметра внешнего нагружения (v или σ), а не наоборот.

Последующий анализ графиков рис. 1-5 и уравнений (1) и (2) показал, что все кривые усталости поверхностных слоев материалов при микроударном воздействии вне зависимости от того, на каком типе лабораторной установки они получены, можно представить в виде

$$N_{кр} = \text{const}_3 / v^n, \quad (3)$$

где вместо величин $N_{кр}$ и v могут стоять соответственно τ_{ak} и σ . При этом показатель степени n , равный тангенсу угла наклона кривой усталости к оси ординат, может принимать два уровня

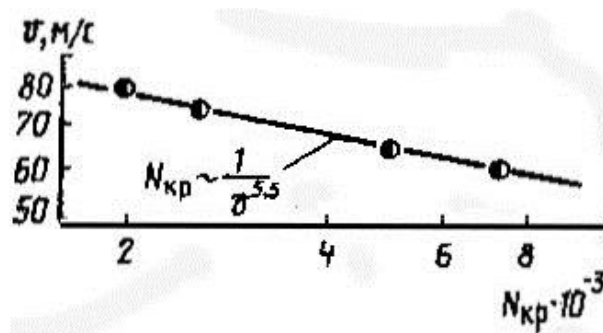


Рис. 2. Кривая усталости поверхностных слоев для технического алюминия АЛ1, испытанного на ударно-эрозионном стенде [5].

значений, на каждом из которых n колеблется в сравнительно узком диапазоне: в области малоциклового усталости (первый уровень) $n \approx 1,8...2,7$ и в области многоциклового усталости (второй уровень) $n \approx 5,0...6,5$. Основываясь на работах [1, 2 и 8] вышеперечисленные значения можно подтвердить теоретическим путем.

Тот факт, что для различных схем микроударного воздействия на поверхность металла (капле- и струеударные стенды, магнитострикционные вибраторы, гидродинамические трубы,

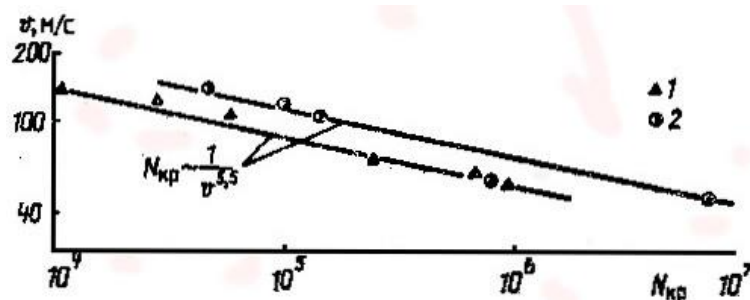


Рис. 3. Кривые усталости поверхностных слоев металлов при испытании на ударно-эрозионном стенде: 1 - алюминиевый сплав, 2 - мягкая сталь

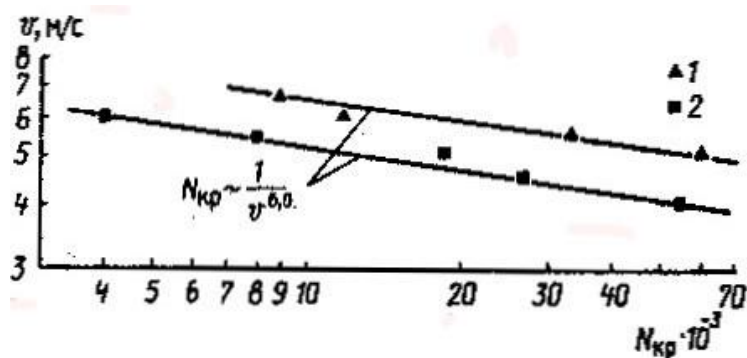


Рис. 4. Кривые усталости поверхностных слоев металлических образцов, испытанных на установке с вращающимся кавитатором, моделирующей процесс кавитационной эрозии гребных винтов: 1- бронза; 2 – алюминий.

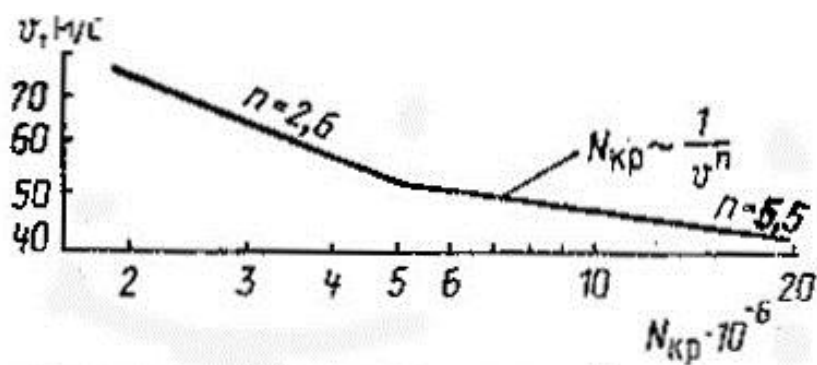


Рис. 5. Соотношение между скоростью удара водяной струи и числом ударов до разрушения при испытании стали 1X18H9T на ударно-эрозионном стенде [6].

установки с нестационарной гидродинамической кавитацией) получен одинаковый спектр значений n в уравнении (3), позволяет говорить о показателе степени при напряжении (скорости удара) в уравнениях усталости поверхностных слоев материалов как об универсальном параметре для процессов изнашивания при микроударном воздействии воды.

Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что идентифицировать механизм разрушения поверхности при кавитационном воздействии можно по показателю степени в уравнении усталости или, что то же самое, по тангенсу угла наклона характерного участка кривой в логарифмических координатах к оси ординат. В этой связи интересно узнать, какому характерному участку кривой усталости соответствует интенсивность микроударного воздействия кавитации на рабочие органы натуральных гидромашин. Как видно из рис. 6 и 7, процесс кавитационного изнашивания рабочих колес центробежных насосов и лопастей гребных винтов (ГВ) морских транспортных судов (МТС) идет в области многоциклового усталости, так как показатель степени при скорости потока в уравнении кривой усталости равен 5,5.

Как показали предварительные исследования на магнитострикционном вибраторе (МСВ) [1], с увеличением агрессивности среды переход от испытаний в мягкой пресной воде к 3%-ному раствору NaCl лишь смещает кривую усталости вдоль оси абсцисс, не изменяя тангенсы углов наклона характерных участков кривой в логарифмических координатах к оси ординат. Из рис. 8 и 9 видно, что если при испытании в мягкой пресной воде (электрохимической коррозией можно пренебречь) коэффициент относительной кавитационной износостойкости сплавов k_h , вычисленный как отношение глубины износа стали 25Л (эталон) к глубине износа сравниваемого сплава после определённой продолжительности испытания, претерпевает скачкообразное изменение при переходе от мало- к много цикловой усталости и наоборот, то при испытании в 3%-ном растворе NaCl коррозионный фактор как бы сглаживает скачкообразное изменение коэффициента k_h , делает его более плавным вследствие сильного влияния в этих условиях коррозионных потерь на общий износ. Коррозионное растворение

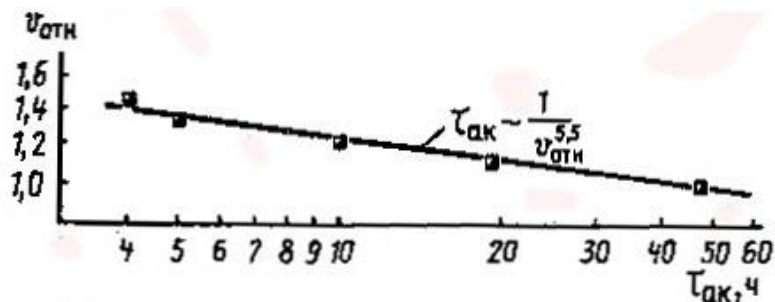


Рис. 6. Соотношение между относительной окружной скоростью вращения рабочих колес центробежных насосов и продолжительностью аккумуляционного периода кавитационного изнашивания образцов, установленных в рабочем колесе насоса: (по В. Я. Карелину).

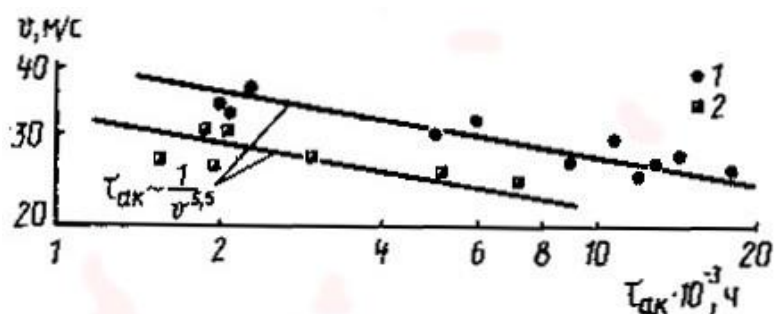


Рис. 7. Соотношение между окружной скоростью вращения сечений лопастей, на которых возникают очаги износа, и продолжительностью аккумуляционного периода кавитационной эрозии гребных винтов {кривые усталости поверхности материала лопастей): 1 – бронза; 2 – латунь.

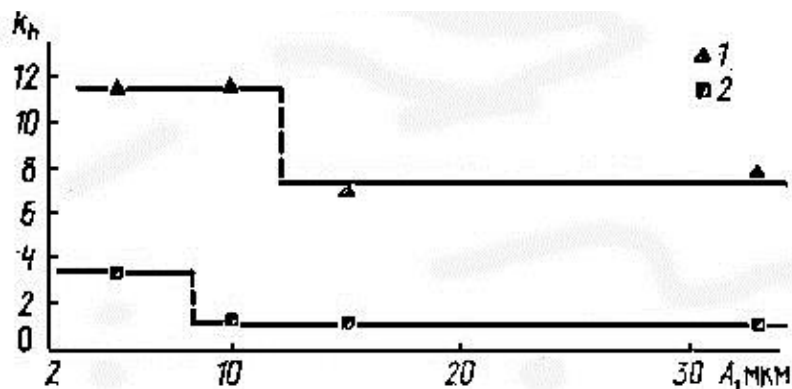


Рис. 8. Зависимость относительной кавитационной износостойкости материалов от амплитуды колебаний торца концентратора МСВ при испытании в мягкой пресной воде. Здесь и далее на рис. 9: 1 — бронза «Новостон»; 5 — сталь 08X14НДЛ.

металла имеет принципиально иную физическую природу и не зависит от механического фактора. Следовательно, в условиях сильного влияния коррозии на общий износ единственным способом смоделировать тот же тип разрушения под действием механического фактора, что имеет место в натуре, является сравнение углов наклона характерных участков лабораторной и эксплуатационной усталостных кривых к оси абсцисс (ординат), поскольку тангенс этих углов, как было показано, является универсальным параметром кавитационно-эрозионного

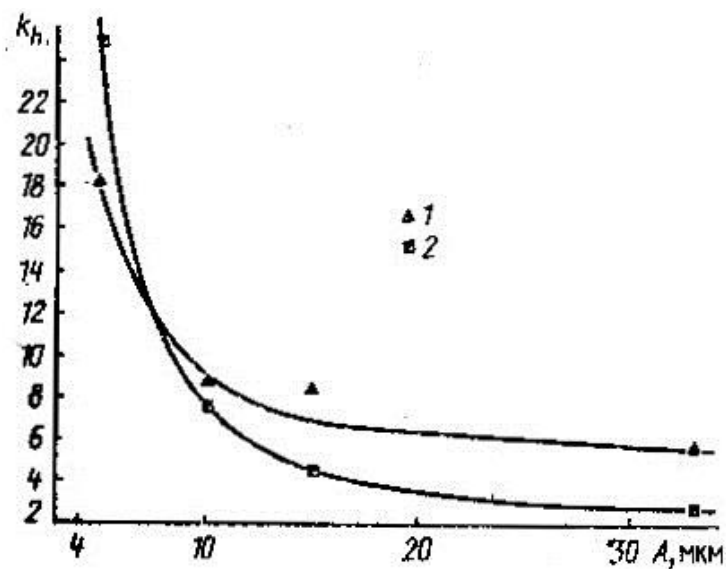


Рис. 9. Зависимость относительной кавитационной износостойкости металлических материалов от амплитуды колебаний торца концентратора магнитостриктора при испытании в 3%-ном растворе NaCl. Эксперименты для увеличения разницы в коррозионной стойкости исследуемого сплава и металла-эталона (сталь 25Л) проводили при контакте образца с крепежной оправкой, которая служила катодом по отношению к стали 25Л и анодом по отношению к исследуемым сплавам.

разрушения. В ином случае, моделируя в лаборатории условия кавитационного изнашивания с учетом лишь коррозионного фактора, можно прийти к некоторому заблуждению. Например, Тимербулатов [3] предлагал выбирать режимы испытаний из условия равенства коэффициентов относительной износостойкости двух эталонных материалов, рассчитанных для натурных и лабораторных условий, а затем при этом режиме проводить испытания других материалов. В качестве эталонных материалов выбирали сплавы, значительно отличающиеся друг от друга по

коррозионной стойкости — нержавеющей и углеродистой стали. Так как с варьированием интенсивности механического фактора будет изменяться и вклад коррозии в общий износ, то будет меняться и коэффициент относительной кавитационной стойкости этих материалов. Однако исследования показали, что коэффициент относительной стойкости k_h стали 08Х14НДЛ по сравнению со сталью 25Л, составляющий примерно 3,0, в пресной воде достигается при $A \approx 5$ мкм, а в морской — при $A \approx 33$ мкм. Но амплитуде колебаний 5 мкм соответствует область многоциклового, а амплитуде 33 мкм — область малоциклового усталости, а значит, относительный вклад коррозионного и механического факторов в общий износ, этих материалов при $A \approx 5$ мкм и при $A \approx 33$ мкм различен, т. е., несмотря на равенство коэффициентов k_h при $A \approx 5$ в пресной и при $A \approx 33$ мкм в морской водах, физическая картина изнашивания в этих двух условиях различна. Поэтому для другого какого-то сплава коэффициенты k_h , вычисленные для этих условий, не будут равны между собой и режимы испытания, выбранные по коэффициенту относительной износостойкости двух различающихся по сопротивлению коррозии сплавов, могут не подойти для остальных материалов.

С учетом вышеизложенного можно предложить следующую методику ускоренных лабораторных испытаний сплавов для оценки их относительной износостойкости в условиях эксплуатации гидромашин.

1. По результатам эксплуатации определяют участок кривой усталости, характерный для кавитационного изнашивания рабочих деталей конкретной гидромашин. Определяют параметр n этого участка (показатель степени при скорости удара, скорости потока или напряжении). Для ГВ-МТС $n \approx 5,5$ (рис. 7).

2. По результатам испытаний эталонного сплава на лабораторной установке определяют кривую усталости его поверхностных слоев при варьировании режимов генерирования кавитации. По точкам излома на кривой, построенной в логарифмических координатах, разбивают ее на характерные области. Выделяют участок, для которого параметр n совпадает с таковым для условий эксплуатации. Применительно к ГВ МТС такой участок при испытании на МСВ (см. работу [1]) соответствует амплитудам колебаний торца концентратора в районе $A \approx 5$ мкм при зазоре между торцом и образцом $\Delta \approx 0,5$ мм.

3. По результатам эксплуатации двух сплавов, резко отличающихся друг от друга по сопротивлению коррозии, определяют их коэффициент относительной кавитационной стойкости в условиях эксплуатации.

4. Варьированием интенсивности коррозии (заменой пресной воды на морскую и наоборот или наложением тока внешней анодной поляризации) при режиме генерирования кавитации, определенном в п. 2, добиваются равенства коэффициента относительной износостойкости двух сплавов значению, установленному в п. 3.

5. Проводят испытания исследуемых сплавов при режиме генерирования кавитации, установленном в п. 2, и уровне интенсификации коррозии, установленном в п. 4, и определяют их относительную кавитационную стойкость по сравнению с металлом-эталоном.

Интересно отметить, что М. Г. Тимербулатов [4] в результате анализа кавитационной эрозии рабочих деталей гидромашин и расчета коэффициента k_h износостойкости нержавеющей стали относительно углеродистой выделил несколько условий кавитационного воздействия: умеренная кавитация — лопасти турбины Волжской ГЭС ($k_h = 17...27$, достигает 73); условия повышенной интенсивности кавитационного воздействия — турбины Братской ГЭС ($k_h = 3...5$, достигает 8); жесткие кавитационные условия — детали клапанного устройства мощных гидравлических прессов ($k_h \approx 1,0$).

Причину такого изменения относительной износостойкости сплавов М. Г. Тимербулатов видит в увеличении относительной доли коррозии в общем износе с уменьшением интенсивности кавитационного воздействия.

Поскольку анализ Тимербулатова относится к гидромашинам, работающим в пресной воде, то, возможно, причина изменения коэффициента k_h скрывается не только в изменении влияния коррозионного фактора. Как видно из представленной градации, каждому условиям кавитации соответствует свой коэффициент k_h (скачкообразный переход). Тот факт, что k_h колеблется в некотором интервале, говорит лишь о том, что в зависимости от конкретной гидромашин для сравнения берутся разные марки углеродистых и нержавеющей сталей. Возвращаясь к относительной стойкости сталей 08X14НДЛ и 25Л (рис. 8), нетрудно заметить, что амплитуде $A \approx 10...33$ мкм соответствуют жесткие условия, согласно градации Тимербулатова ($k_h \approx 1,0$), а амплитуде $A \approx 5$ мкм — условия повышенной интенсивности

кавитации ($k_h \approx 3,5$). Таким образом, вполне возможно, что изменение коэффициента k_h при переходе от условий эксплуатации турбин Братской ГЭС к условиям работы клапанных деталей связано с переходом от многоциклового к малоциклового усталости. Лопасты турбины Волжской ГЭС, вероятно, работают уже в условиях эрозионной коррозии при кавитации. Последние выводы подтверждаются следующим. Как показано на рис. 6, изнашивание рабочих колес лопастных насосов соответствует участку кривой усталости с параметром $n \approx 5,5$, т. е. области многоциклового усталости. Если это так, то коэффициент k_h в пресной воде, согласно градации М. Г. Тимербулатова, должен в условиях эксплуатации лопастных насосов составлять 3—5 (может достигать 8).

В работе [7] приводятся данные по кавитационной эрозии рабочих колес насоса СОР-30 в пресной воде, в соответствии с которыми относительная кавитационная стойкость стали 12Х18Н10Т по сравнению со сталью 45 равна 5,7, что соответствует ожидаемому значению. Такая относительная износостойкость указанных сталей достигается при испытаниях на МСВ в пресной воде при амплитуде 5 мкм, однако авторы работы [7] коэффициент $k_h = 5,7$ предлагают получить ускоренными испытаниями при $A=40$ мкм с наложением внешнего тока анодной поляризации. Но такая интенсивность кавитационного воздействия без усиления коррозионного фактора соответствует коэффициенту $k_h \approx 2,5$, а поэтому доведение его до 5,7 с помощью анодной поляризации осуществляется вследствие большей относительной доли коррозии в общем износе стали 45, чем это имеет место в природе, что не отвечает истинности физической картины явления.

Возвращаясь к предложенной методике ускоренных лабораторных испытаний, покажем, как, например, определить относительную кавитационную износостойкость сплавов для условий эксплуатации ГВ МТС по результатам экспериментов на МСВ. Согласно п. 1 методики для условий кавитационного изнашивания лопастей ГВ, $n \approx 5,5$ (рис. 7). Результаты работы [1] показывают, что при испытании на МСВ участок кривой усталости с тангенсом угла наклона к оси ординат с логарифмической шкалой, равным 5,5, реализуется при амплитуде колебаний $A \approx 5$ мкм и расстоянии между образцом и торцом колеблющегося концентратора $\Delta \approx 0,5$ мм. Согласно данным статистического анализа по кавитационной эрозии лопастей ГВ из различных материалов (табл. 1),

Таблица 1. Средние скорости кавитационной эрозии
и относительная износостойкость лопастей ГВ МТС.

Марка сплава	Средняя скорость кавитационного изнашивания, мкм/ч	Износостойкость материалов по отношению к стали 25Л	Износостойкость материалов по отношению к латуни ЛЦ40МцЗЖ
Сталь 25Л	2,8	1,0	0,5
08Х14НДЛ	0,6	4,7	2,3
ЛШОМцЗЖ	1,4	2,0	1,0
Бронза «Новостон»	0,6	4,7	2,3
БрА9Ж4Н4	0,5	5,6	2,8

Таблица 2. Средние скорости кавитационного изнашивания и относительная износостойкость сплавов, применяемых для литья ГВ, при испытании на МСВ в 3%-ном растворе NaCl ($A=5$ мкм, $\Delta=0,5$ мм)

Марка сплава	Средняя скорость кавитационного изнашивания, мкм/ч	Износостойкость материалов по отношению к стали 25Л	Износостойкость материалов по отношению к латуни ЛЦ40МцЗЖ
Сталь 25Л	1,14	1,0	0,5
08Х14НДЛ	0,28	4,1	1,9
ЛЦ40МлЗЖ	0,52	2,2	1,0
Бронза «Новостон»	0,28	4,1	1,9
БрА9Ж4Н4	0,20	5,7	2,6
08Х15Н4ДМЛ	0,08	14,3	6,5

износостойкость стали 08Х14НДЛ по отношению к углеродистой стали 25Л как материалов с резко отличающейся коррозионной стойкостью в морской воде составляет $k_h \approx 4,7$, а износостойкость бронзы «Новостон» по отношению к латуни ЛЦ40МцЗЖ $k_h \approx 2,3$.

Затем, следуя п. 4 предложенной методики, проводим испытания на МСВ при выбранных выше параметрах режима генерирования кавитации и варьированием коррозионной активности воды (например, изменяя концентрацию поваренной соли) определяем, что

равенству лабораторных и натурных коэффициентов относительной износостойкости соответствует 3%-ная концентрация NaCl (табл. 2).

Таким образом, установлено, что при определении относительной кавитационной износостойкости сплавов для условий эксплуатации ГВ МТС испытания образцов на МСВ необходимо проводить в 3%-иом растворе NaCl при амплитуде колебаний торца концентратора $A \approx 5$ мкм и расстоянии между торцом и образцом $\Delta \approx 0,5$ мм. Например, по результатам испытания бронзы БрА9Ж4Н4 в вышеуказанном режиме ее износостойкость относительно стали 25Л, 08Х14НДЛ, латуни ЛЦ40Мц3Ж и бронзы «Новостон», рассчитанная по данным табл. 2, составит соответственно 5,7; 1,4; 2,6; 1,4, что с приемлемой для практики точностью совпадает с аналогичными показателями 5,6; 1,2; 2,8; 1,2, если их определить для условий эксплуатации ГВ МТС по данным табл. 1. Это указывает на достоверность результатов, получаемых с помощью предлагаемой методики [1,2,8,9].

Коэффициенты относительной кавитационной износостойкости, полученные по разработанной методике (табл. 2) для ряда сплавов, применяемых для литья ГВ, позволяют сделать вывод, что сталь 08Х15Н4ДМЛ с точки зрения кавитационной износостойкости предпочтительна для изготовления гребных винтов морских транспортных судов.

Обозначения

τ_{ak} — продолжительность аккумуляционного периода кавитационной эрозии;
 σ — напряжения, периодически возникающие на поверхности испытываемых образцов при микроударах жидкости; v — скорость удара водяной струи (рис. 2, 3, 5) или набегающего потока (рис. 1, 4, 7); $v_{отн}$ — относительная окружная скорость вращения рабочих колес центробежных насосов; $N_{кр}$ — число ударов водяной струи до разрушения поверхности сплава; n — показатель степени при напряжении или скорости удара в уравнениях кривых усталости; k_h — коэффициент относительной износостойкости; A — амплитуда колебаний; Δ — зазор между торцом концентратора и образцом.

Литература

1. Цветков Ю. Н., Погодаев Л. И. //Трение и износ. 1994. Т. 16, №2. С. 276-281.
2. Погодаев Л. И. Протопопов А. С. // Трение и износ. 1989. Т. 10, № I. С 13—23.
3. Тимербулатов М. Г. // Зав. лаб. 1968. № 12. С. 1508-1511.
4. Тимербулатов М. Г. // Зав. лаб. 1977. № 3. С. 339-342.
5. Козырев. С. П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М., Машиностроение, 1971.
6. Пылаев Н. И., Эдель Ю.У. Кавитация в гидротурбинах. Л., 1974.
7. Некоз А. И., Стечишин М. С., Сологуб Н. А., Белый В. И. //Проблемы трения и изнашивания. 1983. Вып. 24. С. 97— 103.
8. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. СПб.: Академия транспорта РФ, 2006. – 608 с.
9. Погодаев Л. И. Надежность судового оборудования / Погодаев Л. И., Кузьмин А. А., Лопарев Ю. К. – СПб., ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015, 124 с.