

УДК 620.193.16:620.178.16

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

© Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко¹

Статья поступила 15 января 2015 г.

Определена продолжительность инкубационного периода кавитационного изнашивания методом измерения профиля поверхности. Проведены испытания сталей 38ХМ и 25Л на кавитационный износ на магнитострикционном вибраторе в пресной воде. По результатам испытаний построены зависимости потерь массы образцов и среднего арифметического отклонения профиля их поверхности от продолжительности кавитационного воздействия. Зависимость высоты неровностей от продолжительности кавитационного воздействия имеет вид ломаной линии, состоящей из трех участков. Точки перелома на ломаной линии указывают на смену ведущих процессов, ответственных за образование неровностей на поверхности. Ведущим процессом, обуславливающим увеличение высоты неровностей на первом (от начала координат) участке, является пластическое деформирование поверхности при ударах капель и микроструй жидкости; на втором — начавшийся процесс отделения частиц износа. Точка перелома, отделяющая первый участок от второго, соответствует окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания.

Ключевые слова: кавитационный износ; инкубационный период кавитационного изнашивания; сталь; магнитострикционный вибратор; высота неровностей профиля поверхности.

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый за последние десятилетия в борьбе с кавитационным из-

нашиванием, в некоторых областях техники этот вид изнашивания продолжает оставаться препятствием для более эффективной эксплуатации гидрооборудования [1]. В большинстве случаев внесение изменений в конструкцию или режим работы устройства, напри-

¹ Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, С.-Петербург;
e-mail: yuritsvet@mail.ru

мер судового движительного комплекса [2], нежелательно во избежание снижения его КПД, поэтому акцент в борьбе с кавитационным изнашиванием делается на разработку новых материалов, более стойких к кавитационному воздействию [3, 4].

Отличительная особенность кавитационного изнашивания металлов — наличие инкубационного периода, т.е. начального отрезка времени, когда потери массы с поверхности тела, подверженного кавитационному воздействию, практически отсутствуют. По истечении инкубационного периода скорость изнашивания быстро возрастает, достигает максимума, а затем в зависимости от условий кавитационного воздействия или снижается до какого-то постоянного значения [5], или продолжает уменьшаться, не достигая стабильного уровня [2]. В течение инкубационного периода происходит пластическое деформирование поверхностного слоя материала до исчерпания им запаса пластичности, после чего начинается отделение частиц с металлической поверхности [2, 6]. Процессы, происходящие в течение инкубационного периода, определяют кинетику последующего изнашивания: максимально достижимая скорость изнашивания, а также износ конкретного материала после различной термообработки или сплавов одной группы, испытанных в одинаковых условиях, однозначно зависят от продолжительности инкубационного периода [2, 6]. Иными словами, продолжительность инкубационного периода — наиболее емкая характеристика поведения металла при кавитационном воздействии, а поэтому при сравнительных испытаниях важно уметь ее надежно определять.

Методика оценки инкубационного периода должна удовлетворять двум условиям: однозначности получаемого результата и соответствия моменту смены ведущих механизмов изнашивания. В практике исследования кавитационного изнашивания окончание инкубационного периода чаще всего определяют двумя способами: 1) по моменту достижения износа определенной величины [7]; 2) по точке пересечения прямой, полученной экстраполяцией прямолинейного участка максимальной скорости изнашивания на кинетической кривой изнашивания, с осью абсцисс [2, 6, 8] (рис. 1, прямая 1). Первый способ применяется редко, так как он не только не привязан к особенностям кинетики кавитационного изнашивания, но и дает неоднозначную оценку. Ведь в зависимости от того, какую величину износа (а это часто определяется возможностью средств измерения) принять соответствующей окончанию инкубационного периода, продолжительность последнего может изменяться в несколько раз. Кроме этого, существенная ошибка может быть вызвана влиянием сопутствующих явлений иной природы, чем кавитационное изнашивание. К таким явлениям, прежде всего, относится электрохимическая коррозия — в этом случае потери массы образцов из угле-

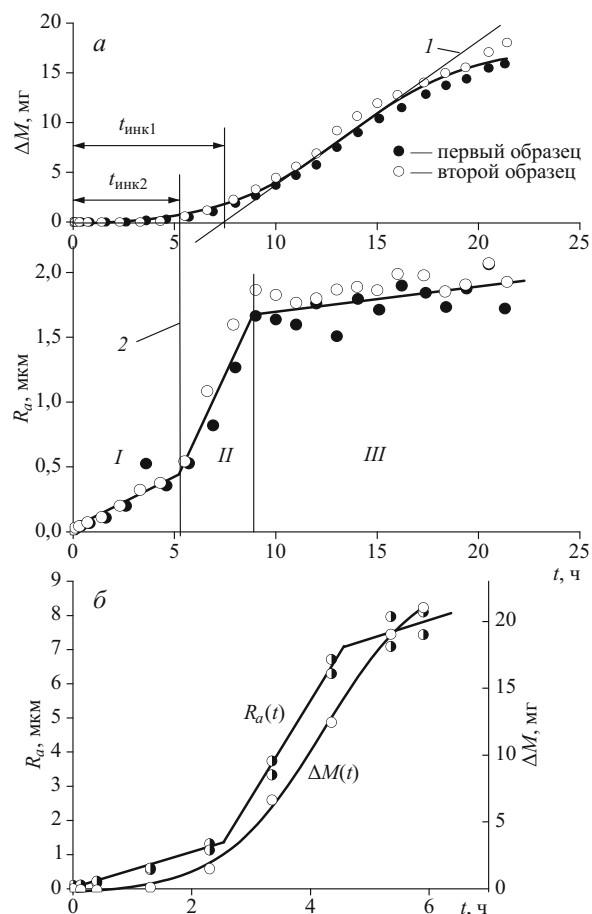


Рис. 1. Изменение потерь массы образцов и среднего арифметического отклонения профиля в зависимости от продолжительности кавитационного воздействия на стали 38ХМ (а) и 25Л (б)

родистых и низколегированных сталей могут регистрироваться с первых минут испытания.

Второй способ лишен неоднозначности — экстраполировать на кривой износ — время прямолинейный участок, соответствующий максимальной скорости изнашивания, можно только единственным образом (см. рис. 1). Однако оценка получается условной, так как точка окончания инкубационного периода, получаемого таким образом, не отражает смену механизмов или кинетику изнашивания, а ее положение во многом зависит от формы кривой износ — время, а также, как и в первом способе, от электрохимической коррозии и других факторов.

Перечисленным условиям может удовлетворить способ оценки продолжительности инкубационного периода, основанный на применении метода измерения профиля поверхности. Профилограммы поверхности после кавитационного и каплеударного воздействия использовали для анализа характера деформации поверхности многие исследователи [9, 10]. Однако в последние десятилетия развитие техники и технологий позволило настолько ускорить регистрацию и обработку профилограмм поверхности, что введение этой процедуры в эксперимент практически

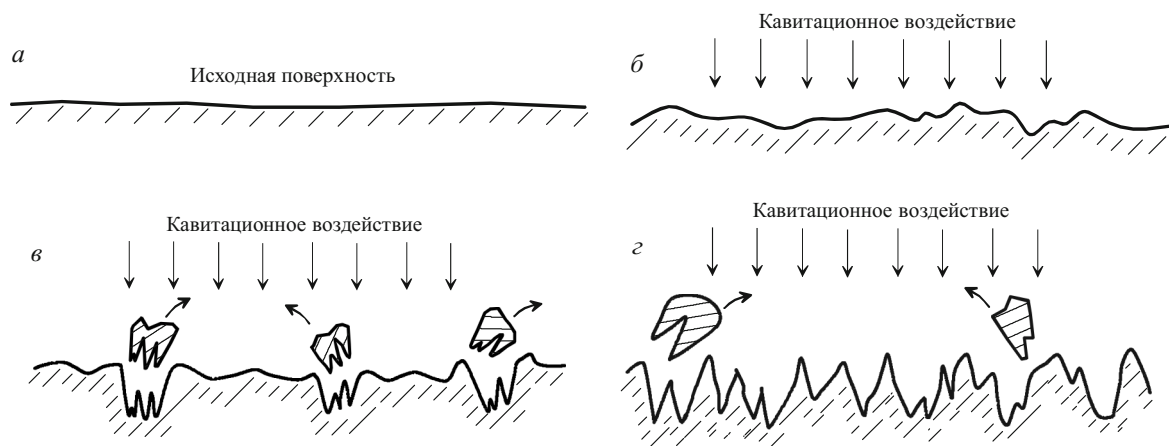


Рис. 2. Изменение профиля поверхности при кавитационном воздействии: *a* — до кавитационного воздействия; *б* — пластическое деформирование поверхности в пределах инкубационного периода (рис. 1, зона I); *в* — начало отделения частиц износа с наклепанной поверхности (рис. 1, зона II); *г* — стабильное состояние (рис. 1, зона III)

не сказывается на его продолжительности и трудоемкости.

Цель данной работы — проверка возможности определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания методом измерения профиля поверхности.

Эксперименты на кавитационное изнашивание проводили на магнестрикционном вибраторе (МСВ) [2] в мягкой пресной воде при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Частота колебаний концентратора МСВ составляла около 22 кГц, а амплитуда колебаний его торца — 28 мкм. Диаметр торца концентратора — 15 мм. Образцы для испытаний имели форму цилиндров диаметром 15,2 мм и высотой примерно 10 мм. Изготавливали образцы из горячекатанной стали 38ХМ и литой стали 25Л.

Перед испытанием рабочую поверхность образцов шлифовали сначала на абразивных шкурках разной зернистости, а затем полировали на сукне. Испытываемый образец крепили в специальной оправке и устанавливали в емкость с водой объемом 4 л так, чтобы расстояние между плоской поверхностью образца и торцом концентратора равнялось 0,5 мм.

Поскольку размеры кавитационных пузырьков при испытаниях на МСВ сравнительно малы, а следовательно малы неровности, образующиеся на поверхности, то достаточно было ограничиться измерениями неровностей с относительно малыми шагами, т.е. шероховатости. Поэтому в экспериментах использовали профилометр MarSurf PS1 с опорным датчиком. Шероховатость измеряли в процессе испытаний периодически, для чего образцы вынимали из оправки, промывали и высушивали.

После измерений шероховатости определяли также износ образцов по потерям их массы, для чего образцы взвешивали на аналитических весах с точностью 0,1 мг.

Во время измерений шероховатости выбирали базовую длину 0,8 мм, а длина оценки равнялась пяти

базовым длинам, т.е. 4,0 мм. Регистрировали два высотных параметра по ИСО 4287–1997: среднее арифметическое отклонение профиля R_a и максимальную высоту профиля R_z . Базовую длину выбирали таким образом, чтобы траектория движения шупа прибора пересекала как можно больший участок кругового очага износа, но не выходила за его площадь. Впоследствии от параметра R_z отказались, так как использование среднего арифметического отклонения профиля R_a давало более стабильные результаты.

На рис. 1 представлены результаты экспериментов, полученные на стали 38ХМ (*a*) и стали 25Л (*б*). Рассматриваемые графики для обеих сталей оказались схожими. Более подробный анализ полученных зависимостей проведем на примере стали 38ХМ.

Как видно из рис. 1, *a*, зависимость $R_a(t)$ представляет собой ломаную линию, что позволяет выделить на ней три характерные участка (обозначены римскими цифрами I, II и III). Наличие точек перелома на зависимости $R_a(t)$ указывает на смену факторов, ответственных за образование неровностей. Сравнительный анализ зависимостей $\Delta M(t)$ и $R_a(t)$ позволяет предположить, что на участке I параметр R_a увеличивается за счет образования вмятин при ударах капель и микроструй о поверхность (рис. 2, *б*). На участке II параметр R_a возрастает в основном благодаря начавшемуся процессу отделения частиц износа с поверхности. На такой поверхности наряду с деформированными участками, с которых частицы еще не отделялись, имеются участки, с которых материал уже отделился (рис. 2, *в*). Участок III характеризует процесс стабилизации: слой исходной поверхности полностью удален в виде частиц износа и продукты изнашивания начинают отделяться уже с изношенной поверхности (рис. 2, *г*), при этом скорость увеличения высоты неровностей резко замедляется.

На зависимости $\Delta M(t)$ (см. рис. 1, *a*) отмечены продолжительности инкубационного периода $t_{\text{инк1}}$ и $t_{\text{инк2}}$, определенные двумя способами: 1) традицион-

ным — по точке пересечения прямой I , проведенной через прямолинейный участок кривой $\Delta M(t)$, соответствующий максимальной скорости изнашивания, с осью абсцисс; 2) предлагаемым в данной работе, т.е. по точке пересечения с осью абсцисс перпендикуляра 2 , проведенного из первой точки перелома на ломаной $R_d(t)$. Разница между продолжительностями $t_{\text{инк1}}$ и $t_{\text{инк2}}$ в рассматриваемом частном случае составила около 30 %. Если аналогично определить эти величины для стали 25Л (см. рис. 1, б), то окажется, что $t_{\text{инк1}} \approx t_{\text{инк2}}$. В данном случае между $t_{\text{инк1}}$ и $t_{\text{инк2}}$ нет существенной разницы, однако преимущество величины $t_{\text{инк2}}$ состоит в том, что она привязана к моменту смены одного ведущего фактора (пластического деформирования поверхности) в образовании неровностей на другой (отделение частиц износа). А поэтому в случаях вывода аналитических соотношений между параметрами кавитационного изнашивания и продолжительностью инкубационного периода, когда имеется заметная разница между $t_{\text{инк1}}$ и $t_{\text{инк2}}$, использование величины $t_{\text{инк2}}$ позволит избежать грубых ошибок.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Зависимость высоты неровностей от продолжительности кавитационного воздействия имеет вид ломаной линии, которая делится точками перелома на три участка.

2. Точки перелома указывают на смену ведущих процессов, ответственных за образование неровностей на поверхности.

3. Ведущим процессом, обуславливающим увеличение высоты неровностей на первом (от начала координат) участке, является пластическое деформирование поверхности при ударах капель и микроструй жидкости; на втором — начавшийся процесс отделения частиц износа.

4. Точка перелома, отделяющая первый участок от второго, соответствует окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hattori S., Ogisoo T., Minanib Y., Yamadab I. Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure / *Wear*. 2008. Vol. 265. P. 1619 – 1625.

2. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
3. Kim J. H., Na K. S., Kim G. G., Oh J. Y., Yoon C. S., Kim S. J. The effects of Mn and B on the cavitation erosion resistance of austenitic Fe-base hardfacing alloys / *Mater. Sci. Engin. A*. 2008. Vol. 477. P. 204 – 207.
4. Mesaa D. H., Garzonc C. M., Tschiptschina A. P. Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels / *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 1372 – 1377.
5. Thiruvengadam A., Preiser H. S. On testing materials for cavitation damage resistance / *J. Ship Res.* 1964. Vol. 8. P. 39 – 56.
6. Погодаев Л. И., Шевченко П. А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с.
7. Iwai Y., Okada T., Tanaka S. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 2: estimation of erosion from distribution of bubble collapse pressures / *Wear*. 1989. Vol. 133. N 2. P. 233 – 243.
8. Steller J., Krella A., Koronowicz J., Janicki W. Towards quantitative assessment of material resistance to cavitation erosion / *Wear*. 2005. Vol. 258. P. 604 – 613.
9. Богачев Н. И., Минц Р. И. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин. — М.: Машиностроение, 1964. — 144 с.
10. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.

REFERENCES

1. Hattori S., Ogisoo T., Minanib Y., Yamadab I. Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure / *Wear*. 2008. Vol. 265. P. 1619 – 1625.
2. Tsvetkov Yu. N. Kavitatsionnoe iznashivanie metallov i oborudovaniya [Cavitation wear of metals and machinery parts]. — St. Petersburg: Izd. SPbGPU, 2003. — 155 p. [in Russian].
3. Kim J. H., Na K. S., Kim G. G., Oh J. Y., Yoon C. S., Kim S. J. The effects of Mn and B on the cavitation erosion resistance of austenitic Fe-base hardfacing alloys / *Mater. Sci. Engin. A*. 2008. Vol. 477. P. 204 – 207.
4. Mesaa D. H., Garzonc C. M., Tschiptschina A. P. Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels / *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 1372 – 1377.
5. Thiruvengadam A., Preiser H. S. On testing materials for cavitation damage resistance / *J. Ship Res.* 1964. Vol. 8. P. 39 – 56.
6. Pogodaev L. I., Shevchenko P. A. Gidroabrazivnyi i kavitatsionnyi iznos sudovogo oborudovaniya [Hydroabrasive and cavitation wear of ship equipment]. — Leningrad: Sudostroenie, 1984. — 264 p. [in Russian].
7. Iwai Y., Okada T., Tanaka S. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 2: estimation of erosion from distribution of bubble collapse pressures / *Wear*. 1989. Vol. 133. N 2. P. 233 – 243.
8. Steller J., Krella A., Koronowicz J., Janicki W. Towards quantitative assessment of material resistance to cavitation erosion / *Wear*. 2005. Vol. 258. P. 604 – 613.
9. Bogachev N. I., Mints R. I. Povyshenie kavitatsionno-erozionnoi stoikosti detalei mashin [Increase of cavitation erosion resistance of machine parts]. — Moscow: Mashinostroenie, 1964. — 144 p. [in Russian].
10. Fomin V. V. Gidroeroziya metallov [Hydroerosion of metals]. — Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 287 p. [in Russian].