

УДК 620.193.16:629.12.004.67

ИСПЫТАНИЯ СТАЛЕЙ НА КАВИТАЦИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

© Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко¹*Статья поступила 2 февраля 2016 г.*

Разработана экспресс-методика определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания сталей по результатам измерения профиля поверхности. Проведены испытания сталей 25Л, 08Х14НДЛ и 08Х15Н4ДМЛ на кавитационный износ на магнитострикционном вибраторе в пресной воде при разных амплитудах колебаний торца концентратора. В процессе испытаний периодически измеряли потери массы образцов и регистрировали профилограммы изнашиваемой поверхности. Зависимость высоты неровностей от продолжительности кавитационного воздействия имеет вид ломаной с двумя точками перелома. Первая точка перелома соответствует окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания. Значение высотного параметра шероховатости, соответствующее первой точке перелома, не зависит для конкретного сплава от интенсивности кавитационного воздействия. На основании выявленных закономерностей предложена методика ускоренных испытаний сталей для определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания.

Ключевые слова: кавитационный износ; инкубационный период кавитационного изнашивания; сталь; магнитострикционный вибратор; высотный параметр шероховатости.

На водном транспорте кавитационное изнашивание — одна из самых распространенных причин ремонта судовых движителей [1 – 3]. Например, гребные винты судов на подводных крыльях подлежат ремонту практически после каждой навигации для устранения наплавкой образующихся в корне лопастей очагов кавитационного износа. Очаги износа представляют собой локальные язвы глубиной до 10 мм с губчатой рваной поверхностью. Корневые сечения лопастей являются наиболее нагруженными при работе гребного винта, поэтому такие очаги при обнаружении устраняют в обязательном порядке, так как они являются сильными концентраторами напряжений и могут быть причиной обрыва лопасти при работе винта и, как следствие, потери хода судном.

На морских водоизмещающих судах кавитационному изнашиванию подвержены концевые сечения лопастей движителей примерно каждого четвертого судна [1]. На прочность лопасти очаги кавитационного износа в концевых ее частях почти не влияют, но от качества поверхности этих мест лопастей зависит КПД гребного винта, снижение которого даже на несколько процентов ведет к существенному перерасходу топлива.

Поэтому сплавы, применяемые для изготовления гребных винтов, должны иметь удовлетворительную кавитационную износостойкость, оцениваемую по результатам лабораторных испытаний.

Наибольший практический интерес при оценке кавитационной износостойкости сплавов представляет продолжительность инкубационного периода. Инкубационный период кавитационного изнашивания — это отрезок времени (после начала кавитационного воздействия), в течение которого потери массы с поверхности тела практически отсутствуют. В течение инкубационного периода происходит наклеп поверхностных слоев металла [3, 4], и после исчерпания металлом запаса пластичности начинается образование трещин с последующим отделением частиц износа. Процессы, происходящие в течение инкубационного периода, определяют кинетику последующего изнашивания. По соотношению продолжительностей инкубационных периодов сплавов одной группы можно оценить соотношение их износостойкости и скоростей изнашивания [1, 5].

Испытания на кавитационную износостойкость проводят чаще всего на магнитострикционных вибраторах (МСВ) [3, 4, 6, 7]. Заключаются они в периодическом прекращении кавитационного воздействия и оценке износа, например, взвешиванием образца. По результатам таких взвешиваний строят график потерь массы в зависимости от продолжительности кавитационного воздействия, по которому и определяют продолжительность инкубационного периода. Обычно процесс испытаний одного образца занимает от нескольких до двадцати – тридцати часов, в зависимости от износостойкости сплава и режима испытаний.

В целях сокращения продолжительности испытаний перспективным можно считать применение мето-

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

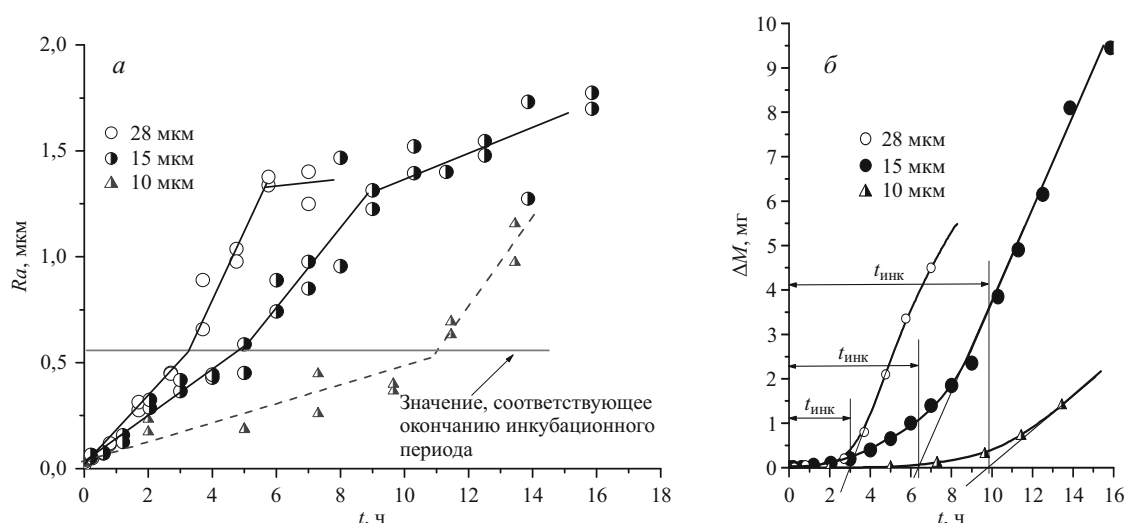


Рис. 1. Изменения среднего арифметического отклонения профиля (*a*) и потерь массы (*б*) в зависимости от продолжительности кавитационного воздействия на сталь 08X15N4ДМЛ при амплитуде колебаний 28, 15 и 10 мкм

да измерения микрорельефа изнашиваемой поверхности. Как установлено [8], зависимость высотного параметра шероховатости от продолжительности кавитационного воздействия в пределах инкубационного периода линейна, а по окончании инкубационного периода скорость этого параметра резко возрастает: на рассматриваемой зависимости образуется перелом. Значение параметра шероховатости, соответствующее точке перелома, может быть использовано для ускоренной оценки продолжительности инкубационного периода при лабораторных испытаниях на кавитационную износостойкость.

Цель данного исследования — разработка экспресс-методики определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания сталей по результатам измерения профиля поверхности.

Эксперименты на кавитационное изнашивание проводили на МСВ [1] в мягкой пресной воде при температуре 20 ± 2 °С. Частота колебаний концентратора составляла около 22 кГц; диаметр торца концентратора — 15 мм. Образцы испытывали при амплитудах колебаний торца концентратора МСВ, равных 10, 15 и 28 мкм. Образцы для испытаний имели форму цилиндров диаметром 15,2 мм и высотой примерно 10 мм. Изготавливали их из литых сталей 25Л, 08X14НДЛ и 08X15N4ДМЛ.

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

Для измерения шероховатости использовали профилометр MarSurf PS1 с опорным датчиком. Профиль изношенной поверхности регистрировали в процессе испытаний периодически, для чего образцы вынимали

из оправки, промывали и высушивали. При измерениях шероховатости базовая длина составляла 0,8 мм, а оценку проводили на длине, равной пяти базовым длинам, т.е. 4,0 мм. Фиксировали среднее арифметическое отклонение профиля R_a (ИСО 4287–1997). Каждый раз R_a регистрировали дважды в разных направлениях по площади очага износа. Базовую длину выбирали таким образом, чтобы траектория движения щупа прибора пересекала как можно больший участок кругового очага, но не выходила за его площадь.

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

По результатам опытов строили зависимости среднего арифметического отклонения профиля R_a и потерь массы ΔM от продолжительности испытаний t .

На рис. 1 приведены зависимости $R_a(t)$ и $\Delta M(t)$ для стали 08X15N4ДМЛ. Как видно, зависимости $R_a(t)$ представляют собой ломаные линии. Причем если по кривым $\Delta M(t)$ на рис. 1, б примерно оценить продолжительности инкубационных периодов $t_{\text{инк}}$ (экстраполяцией участка максимальной скорости изнашивания до оси абсцисс) и сопоставить результаты с данными рис. 1, а, то видно, что первая от начала координат точка перелома на каждой зависимости $R_a(t)$, как уже было показано [8], может служить показателем продолжительности инкубационного периода.

Поскольку уменьшение амплитуды колебаний торца концентратора МСВ влечет за собой снижение интенсивности кавитационного воздействия, то очевидно, что продолжительность инкубационного периода при этом увеличивается, а поэтому, как видно из графиков $R_a(t)$, точка перелома, соответствующая окончанию инкубационного периода, сдвигается при уменьшении амплитуды колебаний вправо по оси абсцисс. При этом выявлен интересный факт — указанный перелом на всех трех зависимостях, соответ-

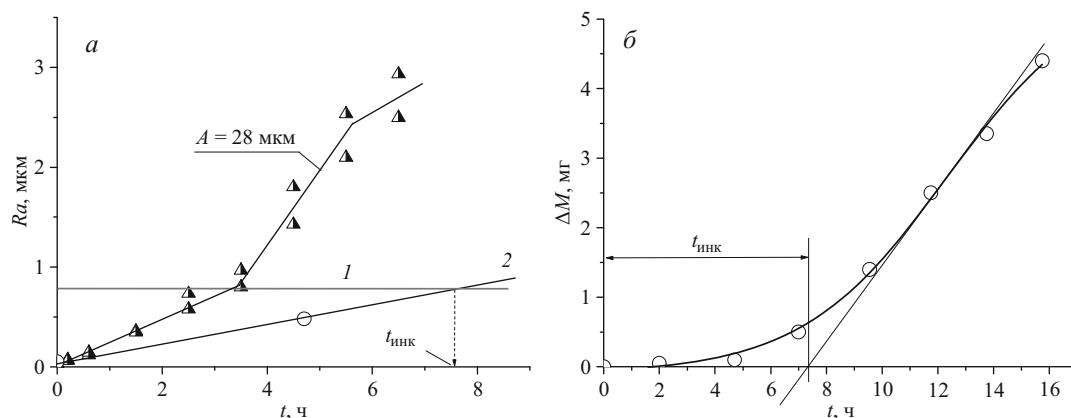


Рис. 2. Прогнозирование продолжительности инкубационного периода стали 08Х14НДЛ при кавитационном изнашивании на МСВ при амплитуде колебаний 10 мкм (*а*) и зависимость кавитационного износа образца из этой стали от продолжительности испытаний при амплитуде колебаний 10 мкм (*б*)

ствующих амплитудам 10, 15 и 28 мкм, происходит при одинаковом значении R_a , равном в рассматриваемом случае примерно 0,55 мкм, т.е. все три точки перелома лежат на одной горизонтальной прямой (см. рис. 1, *а*).

Отмеченная особенность подтвердилась на всех испытанных сплавах. Например, для стали 25Л значение R_a , соответствующее окончанию инкубационного периода, составило примерно 1,5 мкм. Таким образом, значение высотного параметра шероховатости (в нашем случае R_a), соответствующее окончанию инкубационного периода, т.е. точке перелома на зависимости $R_a(t)$, не зависит от интенсивности кавитационного воздействия. Это подтверждается и в случае использования других высотных параметров, например R_z или R_{max} (ИСО 4287–1997). Однако на практике удобнее пользоваться параметром R_a как более стабильной величиной, поскольку он определяется по нескольким тысячам точек профиля, в отличие, например, от параметра R_z , рассчитываемого лишь по 10 точкам.

Отметим характерные особенности изменения шероховатости металлической поверхности при кавитационном воздействии: 1) линейная зависимость высотного параметра шероховатости от продолжительности кавитационного воздействия в пределах инкубационного периода; 2) нечувствительность значения высотного параметра, соответствующего окончанию инкубационного периода, к интенсивности кавитационного воздействия. Эти особенности позволили предложить следующую методику ускоренного определения продолжительности инкубационного периода стали.

Для осуществления этой методики необходимо располагать тремя значениями высотного параметра шероховатости R_a :

исходной поверхности, т.е. до начала кавитационного воздействия;

поверхности в момент окончания инкубационного периода;

поверхности после кавитационного воздействия произвольной продолжительности в пределах инкубационного периода.

Продemonстрируем реализацию методики на примере стали 08Х14НДЛ, испытываемой на МСВ. Определим продолжительность инкубационного периода изнашивания этой стали при разных интенсивностях кавитационного воздействия.

Сначала измеряли шероховатость исходной поверхности образцов из стали 08Х14НДЛ, подготовленных для испытаний на кавитационную износостойкость. Затем проводили испытание этой стали при максимально возможной амплитуде колебаний торца концентратора МСВ (в нашем случае 28 мкм). На построенной зависимости $R_a(t)$ по точке перелома определяли значение R_a , соответствующее моменту окончания инкубационного периода: оно оказалось равным около 1,6 мкм (рис. 2, *а*).

Для определения продолжительности инкубационного периода при других амплитудах колебаний не следует проводить трудоемкие многочасовые испытания с периодической регистрацией потерь массы. Например, для ускоренной оценки продолжительности $t_{инк}$, соответствующей амплитуде 10 мкм, действовали по следующей схеме. Провели испытания при амплитуде колебаний 10 мкм продолжительностью, заведомо меньшей $t_{инк}$, например, в течение 4,7 ч, и измерили полученную шероховатость поверхности: $R_a = 0,48$ мкм (как среднее арифметическое двух измерений в разных направлениях по площади очага износа).

При наличии трех необходимых значений R_a , перечисленных выше, процедура определения продолжительности $t_{инк}$ для амплитуды колебаний 10 мкм свелась к следующему:

1) в координатах $R_a - t$ на оси ординат отметили точкой значение $R_a = 1,6$ мкм, соответствующее окончанию инкубационного периода, и через эту точку параллельно оси абсцисс провели линию 1 (см. рис. 2, *а*);

2) нанесли на график (см. рис. 2, а) две точки (светлые кружки), первая из которых соответствует значению R_a исходной поверхности ($t = 0$), а вторая — значению $R_a = 0,48$ мкм, полученному после кавитационного воздействия в течение 4,7 ч;

3) через две точки, нанесенные на график, как указано в предыдущем пункте, провели линию 2 до пересечения с горизонтальной линией 1;

4) через точку пересечения линий 1 и 2 опустили перпендикуляр на ось абсцисс; точка пересечения перпендикуляра с осью абсцисс показала значение ожидаемой продолжительности инкубационного периода $t_{\text{инк}} \approx 7,5$ ч.

Для проверки найденного ускоренным методом значения $t_{\text{инк}}$ провели испытания стали 08Х14НДЛ при той же амплитуде (10 мкм), но с периодической регистрацией потерь массы в течение испытаний (см. рис. 2, б). Сравнение продолжительности $t_{\text{инк}}$, найденной экстраполяцией прямолинейного участка максимальной скорости изнашивания на зависимости $\Delta M(t)$ до пересечения с осью абсцисс (см. рис. 2, б), с прогнозным значением, полученным на рис. 2, а, подтверждает эффективность предложенной методики.

Можно заключить, что зависимость высоты неровностей металлической поверхности от продолжительности кавитационного воздействия имеет вид ломаной с двумя точками перелома. Первая от начала координат точка перелома соответствует окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания.

Величина высотного параметра шероховатости, соответствующая окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания, т.е. первой точке пе-

релома, не зависит от интенсивности кавитационного воздействия и является для конкретного сплава величиной постоянной.

На основе перечисленных выше особенностей изменения шероховатости в зависимости от продолжительности кавитационного воздействия предложена экспресс-методика для определения инкубационного периода кавитационного изнашивания. Для реализации методики необходимо располагать тремя значениями высотного параметра шероховатости, соответствующими: окончанию инкубационного периода; исходной поверхности; поверхности после кавитационного воздействия произвольной продолжительности в пределах инкубационного периода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
2. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
3. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.
4. Vyas B., Preece C. M. Cavitation erosion of face-centered cubic metals / Metallurg. Trans. A. 1977. Vol. 8A. P. 915 – 923.
5. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. — СПб.: Академия транспорта РФ, 2006. — 608 с.
6. Hattori S., Ogiiso T., Minami Y., Yamada I. Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure / Wear. 2008. Vol. 265. P. 1619 – 1625.
7. Haosheng C., Jiang L., Darong C., Jiadao W. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water / Wear. 2008. Vol. 265. P. 692 – 698.
8. Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О. Исследование кавитационного изнашивания сталей методом измерения профиля поверхности / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 11. С. 62 – 65.

UDC 620.193.16:629.12.004.67

PROFILOMETRIC MEASUREMENTS IN ACCELERATED TESTING OF STEELS FOR CAVITATION WEAR

© Yu. N. Tsvetkov and E. O. Gorbachenko

Submitted February 2, 2016.

Three steels 25L, 08Kh14NDL, and 08Kh15N4DML are tested for cavitation wear on a magnetostrictive vibrator in fresh water at different oscillation amplitudes of the end face of the concentrator. The mass loss and profilograms of the wear surface are recorded. Dependence of the height of the irregularities on the duration of the cavitation impact is of the form of a polygonal line with two fracture points. The first fracture point corresponds to the end of the incubation period of cavitation wear. The value of the roughness height parameter corresponding to the first point of fracture does not depend on the intensity of cavitation impact for a given alloy. Proceeding from the results thus obtained a new technique for accelerated testing of steels is developed to determine the duration of the incubation period of cavitation wear.

Keywords: cavitation wear; incubation period of cavitation wear; steel; ultrasonic vibratory apparatus; surface roughness factor.

REFERENCES

1. Tsvetkov Yu. N. Cavitation wear of metals and machinery parts. — St. Petersburg: Izd. SPbGPU, 2003. — 155 p. [in Russian].
2. Georgievskaya E. P. Cavitation erosion of ship propellers and methods of its control. — Leningrad: Sudostroenie, 1978. — 206 p. [in Russian].
3. Fomin V. V. Hydroerosion of metals. — Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 287 p. [in Russian].
4. Vyas B., Preece C. M. Cavitation erosion of face-centered cubic metals / Metallurg. Trans. A. 1977. Vol. 8A. P. 915 – 923.
5. Pogodayev L. I., Kuzmin V. N. Structure-energy models of reliability of materials and machine parts. — St. Petersburg: Akademiya transporta RF, 2006. — 608 p. [in Russian].
6. Hattori S., Ogiso T., Minamib Y., Yamad I. Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure / Wear. 2008. Vol. 265. P. 1619 – 1625.
7. Haosheng C., Jiang L., Darong C., Jiadao W. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water / Wear. 2008. Vol. 265. P. 692 – 698.
8. Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko E. O. Research into cavitation wear of steel through measuring roughness / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 11. P. 62 – 65 [in Russian].

УДК 620.172

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИВОЙ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

© А. В. Коновалов¹, Д. И. Вичужанин¹, А. С. Партин¹, А. В. Козлов²*Статья поступила 29 марта 2016 г.*

Предложена методика построения кривой упрочнения материала оболочек твэлов в предположении изотропности его пластического упрочнения для случая больших пластических деформаций. Методика основана на последовательном применении трех видов испытаний по определению сопротивления пластической деформации: 1) растяжения продольных образцов, вырезанных из трубы, в условиях одноосного напряженного состояния; 2) сжатия с большой степенью пластической деформации кольцевого образца с внутренним цилиндрическим стержнем; 3) сжатия сегмента кольцевого образца. Величина степени деформации в стенке кольца во втором виде испытаний определяется по результатам конечно-элементного моделирования этого испытания.

Ключевые слова: кривая упрочнения; оболочка твэла; методика определения.

Оболочки тепловыделяющих элементов (твэл) ядерных реакторов представляют собой тонкостенные трубки малого диаметра и изготавливаются из сплавов алюминия, циркония, нержавеющей стали [1 – 3]. Характеристики деформационного поведения материала оболочки используются при проектных обоснованиях безопасной работы твэлов. Одной из таких характеристик является кривая упрочнения, выражающая функциональную зависимость меры напряженного состояния — сопротивления пластической деформации σ_s от накопленной пластической деформации ϵ_p . Предполагаем, что материал оболочки твэла изотропный и пластически изотропно упрочняемый. При моделировании напряженно-деформированного состояния оболочки твэла в упругопластической постановке нагружения изотропной и изотропно упрочняемой среды величина сопротивления пластической

деформации σ_s фигурирует в законе пластического нагружения Мизеса [4]:

$$S \cdot S - \frac{2}{3} \sigma_s^2 = 0,$$

где S — девиатор тензора напряжений Коши; двумя точками обозначено двойное скалярное произведение тензоров.

Стандарт [5] регламентирует метод статических испытаний на растяжение металлических труб наружного диаметра от 16 мм и выше при комнатной температуре для определения только стандартных механических характеристик, таких как предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение и сужение.

Поскольку при растяжении образцов одноосное напряженное состояние имеет место при небольших значениях деформации, то данный вид испытаний не позволяет построить кривую упрочнения (сопротивления деформации) для больших величин пластической деформации.

¹ Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: avk@imach.uran.ru

² АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловской области, Россия; e-mail: kozlov_av@irmatom.ru