

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-64-70>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИНКУБАЦИОННОГО ПЕРИОДА ПОЛИМЕРОВ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ МЕТОДОМ ПРОФИЛОМЕТРИИ

© Юрий Николаевич Цветков*, Ярослав Олегович Фиактистов

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7; *e-mail: yuritsvet@mail.ru

*Статья поступила 12 июля 2022 г. Поступила после доработки 26 августа 2022 г.
Принята к публикации 30 августа 2022 г.*

Цель работы — исследование возможности применения метода профилометрии для определения продолжительности инкубационного периода полимерных материалов при их испытании на кавитационный износ. На кавитационное изнашивание испытывали шесть полимерных материалов: оргстекло, фторопласт, полиэтилен низкого давления, капролон, полимер Thordon SXL и эпоксидный компаунд. Эксперименты проводили в пресной воде температурой 20 ± 3 °C на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора, равными соответственно 22 кГц и 28 мкм. Расстояние между торцом концентратора и торцевой поверхностью цилиндрических образцов устанавливали равным 0,5 мм. Периодически в процессе испытаний образцы взвешивали, оценивали шероховатость их изнашиваемой поверхности и строили зависимости потерь массы и среднего арифметического отклонения профиля от продолжительности испытаний. Кавитационное изнашивание полимеров так же, как и металлов, характеризуется наличием инкубационного периода, в течение которого отделение частиц износа практически отсутствует. Показано, что определение продолжительности инкубационного периода многих полимеров по зависимости потерь массы от времени испытаний отличается большой трудоемкостью, а из-за водопоглощения — большими погрешностями. Для сокращения времени и повышения точности определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания полимерных материалов предложено использовать метод профилометрии. Для этого в процессе испытаний на кавитационное изнашивание периодически измеряют среднее арифметическое отклонения профиля изнашиваемой поверхности. Продолжительность инкубационного периода находят по абсциссе точки, в которой нарушается монотонность и (или) гладкость графика — зависимости среднего арифметического отклонения профиля изнашиваемой поверхности от продолжительности кавитационного воздействия.

Ключевые слова: кавитационное изнашивание; инкубационный период; полимер; шероховатость поверхности; высотный параметр шероховатости.

EVALUATION OF THE INCUBATION PERIOD OF POLYMERS IN CAVITATION WEAR BY THE METHOD OF PROFILOMETRY

© Yuriy N. Tsvetkov*, Yaroslav O. Fiaktistov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str., St. Petersburg, 198035, Russia; *e-mail: yuritsvet@mail.ru

Received July 12, 2022. Revised August 26, 2022. Accepted August 30, 2022.

The possibility of using profilometry for determining the duration of the incubation period of polymeric materials upon their testing for cavitation wear is considered. Six polymeric materials were tested for cavitation wear: plexiglass, fluoroplastic, low-pressure polyethylene, caprolon, Thordon SXL polymer, and epoxy compound. All the polymers were tested in fresh water kept at 20 ± 3 °C, using an ultrasonic magnetostrictive vibrator, the vibration frequency and amplitude of the device horn butt were 22 kHz and 28 μ m, respectively. The distance between horn butt and the butt-end surface of the cylindrical polymer sample was set at 0.50 mm. The samples were periodically weighed during testing, the roughness of their worn surface was evaluated, and sample mass loss and arithmetical mean deviation of the assessed profile of its surface were plotted as a function of the test duration. Like the cavitation wear of metals, the cavitation wear of polymers is also characterized by the presence of an incubation period, during which the separation of the wear particles from the sample surface does not take place yet. It is shown, that determination of the incubation period from the dependence of the mass loss vs test duration distinguishes is rather laborious, and, moreover, is accompanied by large errors due to water absorption. The use of profilometry

was proposed to shorten the time and increase the accuracy of the determination of the incubation period of the cavitation wear of polymers. The arithmetical mean deviation of the profile of the surface under study is measured periodically during testing for cavitation wear. The duration of the incubation period is determined using the dependence of the arithmetic mean deviation of the wear surface profile on the duration of the cavitation impact by the abscissa of the point, in which the monotony and/or smoothness of the dependence (plot) is violated.

Keywords: cavitation wear; incubation period; polymer; surface roughness; arithmetical mean deviation of the assessed profile.

Введение

Кавитационное изнашивание — разрушение поверхности материалов в потоке жидкости при воздействии ударных струй и волн, возникающих при схлопывании кавитационных каверн вблизи поверхности [1, 2]. Очень часто очаги кавитационного износа образуются на лопастях гидротурбин [3, 4] и гребных винтов [5, 6]. Например, на морских судах кавитационный износ появляется на гребных винтах (ГВ) каждого четвертого судна. Высокая вероятность эрозии лопастей ГВ обусловлена нестационарным характером кавитации, так как ГВ работают в неравномерном поле скоростей. При этом кавитационный износ может возникать или в корневых сечениях лопастей, что типично для судов на подводных крыльях, или в концевых районах лопастей, что характерно для водоизмещающих судов. Ухудшение качества поверхности концевых сечений лопастей оказывает отрицательное влияние на КПД судового движителя [7, 8]. Поскольку концевые сечения лопастей находятся в существенно менее напряженном состоянии, чем корневые, то при их ремонте обращают внимание на восстановление не прочности лопасти, а качества ее поверхности. В этом случае перспективны технологии ремонта, основанные на применении полимерных составов. Такие технологии существенно снижают стоимость ремонта ГВ по сравнению с традиционными способами, основанными на наплавке очагов износа.

Разработка новых полимерных материалов требует испытания их на кавитационную износостойкость. Кавитационное изнашивание характеризуется наличием начального (инкубационного) периода, в течение которого потери материала с поверхности отсутствуют, а в поверхностных слоях идет накопление повреждений; после окончания инкубационного периода начинается отделение частиц износа [1, 2]. Для материалов ГВ наиболее перспективна оценка кавитационной износостойкости не по потерям массы материала, а по продолжительности инкубационного периода. Это связано с тем, что при первом же обнаружении на лопастях ГВ (во время очередного докования судна) признаков отделения материала с поверхности лопастей в результате кавитационного воздействия они подлежат ремонту. Продол-

жительность инкубационного периода кавитационного изнашивания металлических материалов во время лабораторных испытаний оценивают или по достижении потерь массы определенной (заранее установленной) величины [4], или в результате анализа кинетической кривой потерь массы [9]. Недостатки этих способов проанализированы в работе [10], при этом ни один из них в большинстве случаев не применим для испытаний полимерных материалов. Причина заключается в том, что почти все полимерные материалы в разной степени поглощают воду [11], поэтому оценка их износа методом взвешивания требует применения специальных процедур, например, предварительной выдержки в вакуумных камерах [12], что существенно осложняет процесс проведения экспериментов. В работе [10] показана перспективность применения метода профилометрии изнашиваемой поверхности для определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания металлических материалов. Однако применимость данного метода для случая кавитационного изнашивания полимеров не исследована.

Цель работы — исследование возможности применения метода профилометрии для определения продолжительности инкубационного периода полимерных материалов при их испытании на кавитационный износ.

Материалы и методы исследования

Для испытаний были выбраны следующие полимеры: полиметилметакрилат (оргстекло); политетрафторэтилен (фторопласт); полиэтилен низкого давления; полиамид блочный (капролон); полимер Thordon SXL; эпоксидный компаунд. Данные полимеры имеют разное водопоглощение — от нулевого (фторопласт) до нескольких процентов по массе (капролон) [11].

Из полимеров изготавливали образцы цилиндрической формы диаметром около 16 мм и высотой 10 – 12 мм. Для проведения испытаний образец крепили в специальной оправке, которую затем устанавливали в емкость с пресной водой (рис. 1). Испытывали по два образца каждого полимера.

Изнашиванию подвергали торцевые поверхности образцов, которые предварительно шли-

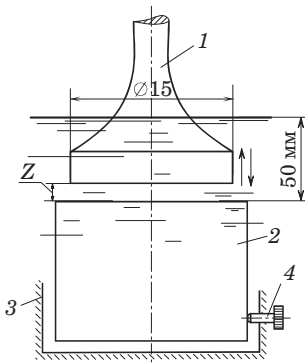


Рис. 1. Схема испытаний на ультразвуковом МСВ: 1 — концентратор; 2 — образец; 3 — крепежная оправка; 4 — крепежный винт

Fig. 1. Scheme of testing using a magnetostrictive vibratory device: 1 — horn; 2 — sample; 3 — fixing mandrel; 4 — fixing screw

фовали на шкурках разной зернистости, а потом полировали на влажном сукне. Кавитационное воздействие осуществляли на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе УЗДН-2Т при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора, равными примерно 22 кГц и 28 мкм (см. рис. 1). Расстояние Z между поверхностями образца и торца концентратора составляло 0,5 мм. В процессе испытаний поддерживали температуру воды $20 \pm 3^\circ\text{C}$.

По мере испытаний кавитационное воздействие периодически прерывали, образцы высушивали и взвешивали на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг. Во избежание большого разброса результатов все образцы перед взвешиванием выдерживали в течение 24 ч в помещении с постоянными влажностью и температурой.

После взвешивания измеряли шероховатость поверхности на приборе MahrSurf PS1 [13]. По результатам измерений определяли среднее арифметическое отклонение профиля R_a . Базовую длину при измерениях выбирали равной 0,8 мм, при этом оценивали пять базовых длин. При измерениях щуп прибора передвигался от центра очага износа в радиальном направлении к периферии. За результат брали среднее значение трех измерений.

Обсуждение результатов

По результатам экспериментов строили зависимости потерь массы ΔM (1) и среднего арифметического отклонения профиля R_a (2) от продолжительности t кавитационного воздействия (рис. 2, 3).

По зависимости $\Delta M(t)$ для фторопласта (см. рис. 2, а), который отличается нулевым водопоглощением [11], видно, что его кавитационное

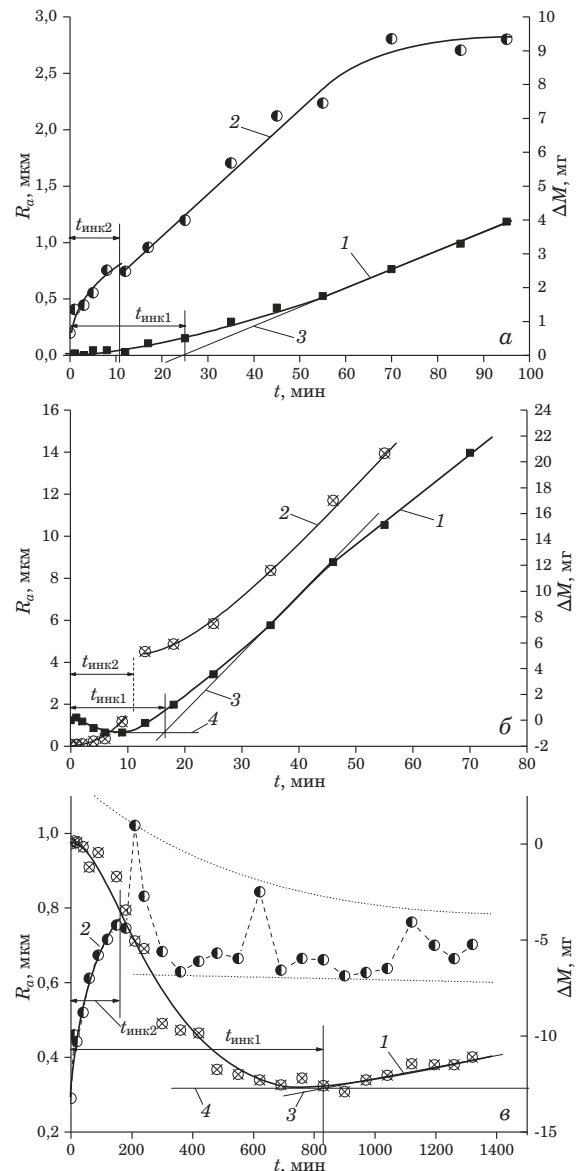


Рис. 2. Зависимости потерь массы (1) и высотного параметра шероховатости (2) от продолжительности кавитационного воздействия на фторопласт (а), оргстекло (б), капролон (в)

Fig. 2. Dependences of the mass loss (1) and height parameter of the roughness (2) on the duration of cavitation attack on PTFE (a), plexiglass (b), caprolon (c)

изнашивание характеризуется наличием инкубационного периода. Условную продолжительность инкубационного периода $t_{\text{инк1}}$ определяли согласно методике [9] по точке пересечения прямой линии 3, проведенной через участок максимальной скорости изнашивания, с линией абсцисс.

В отличие от фторопласта, у полимеров, поглощающих воду, например, оргстекла (см. рис. 2, б) и капролона (см. рис. 2, в), в течение инкубационного периода наблюдается прирост массы образцов. Для таких полимеров приходится корректировать положение оси абсцисс: можно считать, что она проходит через минимум кривой

$\Delta M(t)$ (прямая 4 на рис. 2, б, в), т.е. точка минимума соответствует нулевым потерям массы.

На рис. 3 зависимости $\Delta M(t)$ для полимера Thordon SXL и эпоксидного компаунда показаны в уже откорректированном виде, когда начальный участок кривой $\Delta M(t)$, соответствующий приросту массы образца в результате поглощения воды, исключен из рассмотрения.

Очевидно, что точка минимума на кривой $\Delta M(t)$ (см. рис. 2, б, в) соответствует моменту, когда скорость потерь массы в результате отделения частиц износа с поверхности сравнивается со скоростью поглощения воды. На самом деле отделение частиц износа начинается раньше момента наступления минимума на кривой $\Delta M(t)$, а поэтому значение $t_{инк1}$, определенное по точке пересечения линии 3 с осью абсцисс после коррекции зависимости, и положение функции $\Delta M(t)$ (см. рис. 3) являются завышенными. Метод определения инкубационного периода по точке пересечения линии, проходящей через участок максимальной скорости изнашивания, с осью абсцисс [9], является условным, так как он основан на допущении, что до указанной точки пересечения потери массы полностью отсутствуют, а после этой точки, т.е. достижения момента времени $t_{инк1}$, сразу начинается отделение частиц износа.

В работе [10] применительно к кавитационному изнашиванию металлов показано, что на кривой $R_a(t)$ присутствует «особая» точка, соответствующая смене ведущих механизмов, контролирующих увеличение шероховатости поверхности в течение кавитационного воздействия. В течение инкубационного периода шероховатость металлов становится больше за счет пластического деформирования: на поверхности образуются вмятины, количество их увеличивается, они перекрываются, пластическая деформация поверхности повышается до достижения критического значения. Когда инкубационный период заканчивается, шероховатость начинает контролироваться процессом отделения частиц износа.

Аналогичная точка, видимо, должна присутствовать и на зависимостях $R_a(t)$, построенных по результатам кавитационного изнашивания полимеров. Последующий анализ изменения высотного параметра шероховатости R_a показал, что начальный участок зависимости $R_a(t)$, соответствующий продолжительности $t_{инк2}$ инкубационного периода, можно аппроксимировать монотонно возрастающей функцией (см. рис. 2, 3). Окончание инкубационного периода $t_{инк2}$ соответствует нарушению гладкости функции, когда на зависимости $R_a(t)$ появляются разрывы и смещения (см. рис. 2, а, б) или нарушению монотонности (см. рис. 2, в; 3), которое сопровождается

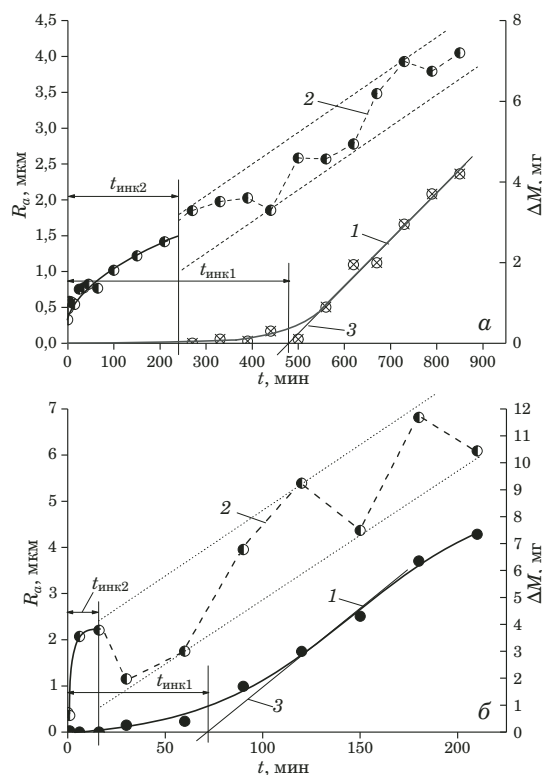


Рис. 3. Откорректированная зависимость потерь массы (1) и зависимость высотного параметра шероховатости (2) от продолжительности кавитационного воздействия на полимер Thordon SXL (а) и эпоксидный компаунд (б)

Fig. 3. Corrected dependence of the mass loss (1) and dependence of the height parameter of roughness (2) on the duration of cavitation attack on polymer Thordon SXL (a), epoxy compound (b)

увеличением разброса точек (полосы разброса ограничены пунктирными линиями).

Результаты испытаний металлических материалов показали [6, 10], что в пределах инкубационного периода имеет место линейная зависимость параметра R_a от продолжительности кавитационного изнашивания. Для полимеров же зависимость $R_a(t)$ в пределах инкубационного периода имеет нелинейный характер (см. рис. 2, 3). Такая разница обусловлена разными механизмами накопления повреждений у металлов и полимеров при нагружении, в том числе — при кавитационном изнашивании.

При кавитационном воздействии конкретный микроразмер поверхности подвергается циклическому (ударному) нагружению. У металлов при кавитационном воздействии происходит накопление пластической деформации от цикла к циклу — до достижения критической степени деформации. Полная зависимость интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций ϵ_i для металлов может быть аппроксимирована показательной функцией, согласно которой начиная с некоторого значения ϵ_i зависимость $\sigma_i - \epsilon_i$ становится практически параллель-

ной оси абсцисс [14]. Следовательно, при постоянном значении циклического напряжения, что характерно для стабильного режима кавитационного воздействия, каждому циклу будет соответствовать постоянный прирост деформации. В работе [6] показано, что в пределах инкубационного периода изнашивания имеется связь между деформацией поверхности и высотным параметром шероховатости, а значит, в пределах инкубационного периода зависимость $R_a(t)$ для металлов будет линейной.

У полимеров при кавитационном воздействии происходит разрыв напряженных межатомных связей и постепенное накопление «продуктов разрушения» в поверхностном слое. Так, в работе [15] отмечено снижение интенсивности характеристических пиков в инфракрасных спектрах эпоксидного компаунда после кавитационного воздействия. Применение методов электронного парамагнитного резонанса, масс-спектрографии и инфракрасной спектроскопии для обнаружения разрывов молекул в полимерах в условиях статического и циклического нагружений показало однотипную форму зависимостей количества молекулярных продуктов разрушения от времени — затухание с течением времени, подчиняющееся экспоненциальной зависимости [16]

$$n_p = pn_0(1 - \exp(-t/\tau)), \quad (1)$$

где n_0 — исходное количество молекул в полимере; p — число «осколков» от распада одной молекулы; n_p — количество продуктов распада молекул; τ — время до разрушения полимера.

Отметим, что участок зависимости $R_a(t)$, соответствующий инкубационному периоду, можно аппроксимировать следующими функциями: для фторопласта —

$$R_a - R_0 = 1,622(1 - \exp(-t/19,1)); \quad (2)$$

для капролона —

$$R_a - R_0 = 0,475(1 - \exp(-t/49,1)); \quad (3)$$

для полимера Thordon SXL —

$$R_a - R_0 = 0,328(1 - \exp(-t/117)), \quad (4)$$

где R_0 — среднеарифметическое отклонение профиля исходной поверхности, т.е. до начала кавитационного воздействия.

Если сравнить зависимости (2)–(4) с зависимостью (1), то видно, что кинетика изменения высотного параметра шероховатости в пределах инкубационного периода и кинетика увеличения продуктов разрушения молекул при механическом нагружении полимера совпадают. Такое

возможно, если предположить, что в пределах инкубационного периода кавитационного изнашивания полимеров имеется линейная зависимость высотного параметра шероховатости R_a изнашиваемой поверхности от ее деформации.

Методика определения продолжительности инкубационного периода

Выявленные особенности изменения шероховатости изнашиваемой при кавитации поверхности полимеров позволили предложить следующий алгоритм определения продолжительности инкубационного периода полимеров при испытаниях на кавитационный износ:

1) в процессе испытаний периодически измеряют шероховатость поверхности и определяют среднеарифметическое отклонение профиля;

2) экспериментальные точки наносят на график в осях $R_a - t$;

3) окончание инкубационного периода $t_{\text{инк2}}$ определяют по абсциссе точки, в которой происходит нарушение гладкости функции — на зависимости $R_a(t)$ появляются разрывы и смещения или происходит нарушение монотонности, которое может сопровождаться увеличением разброса точек.

Покажем пример реализации этого способа при испытании полиэтилена низкого давления. Полиэтилен обладает высокой кавитационной износостойкостью, потери массы образцов после 32 ч испытаний не превышают 0,5 мг, что делает определение инкубационного периода, основанного на построении кривой ΔM , очень трудоемким. А с учетом того, что полиэтилен незначительно поглощает воду, возможны большие погрешности.

Рассмотрим кривую $R_a(t)$, построенную по результатам испытаний полиэтилена (рис. 4). Видно, что до момента времени ~ 330 мин имеет место ее монотонное увеличение, причем начальный участок зависимости $R_a(t)$ можно аппроксимировать функцией

$$R_a - R_0 = 2,062(1 - \exp(-t/135)),$$

по форме совпадающей с выражениями (2), (3) и (4).

В точке, соответствующей $t \approx 330$ мин, монотонность функции нарушается — наблюдаем существенный разброс точек вследствие наступления циклического характера изменения параметра R_a , что означает смену механизма, контролирующего процесс увеличения высоты неровностей поверхности (в пределах инкубационного периода контролирующим был процесс деформации поверхности под действием кавитации, а по-

сле достижения $t \approx 330$ мин сменился периодическим отделением частиц износа). Итак, продолжительность инкубационного периода полиэтилена низкого давления $t_{\text{инк2}} \approx 330$ мин.

Преимущество предложенного способа состоит в следующем.

1. В отличие от способа определения инкубационного периода, основанного на методе взвешивания и анализе кривой $\Delta M(t)$ [9], способ, основанный на применении метода профилометрии, лишен условности. В этом случае значение инкубационного периода имеет четкий физический смысл: оно привязано к моменту смены одного ведущего фактора в образовании неровностей на поверхности полимера на другой, а именно — деформирование поверхности и, следовательно, накопление разорванных связей в молекулах (продуктов разрушения) уступает место процессу отделения частиц износа.

2. Значение высотного параметра шероховатости поверхности полимера не чувствительно к содержанию воды в полимере, т.е. значение R_a не зависит от того, сколько времени высушивали образец после испытаний перед взвешиванием. Таким образом, метод профилометрии позволяет избежать грубых ошибок при определении инкубационного периода.

3. Использование метода сокращает время испытаний — их можно прекратить после надежной фиксации точки, в которой нарушается монотонность и(или) гладкость зависимости $R_a(t)$, тогда как при применении способа [9] необходимо проводить испытания до достижения максимальной скорости потерь массы. Кроме того, измерения шероховатости не требуют тщательной сушки образца полимера, что требуется при применении метода взвешивания.

Заключение

Определение инкубационного периода кавитационного изнашивания полимеров графическим способом по анализу кривой потерь массы от продолжительности кавитационного воздействия отличается большой трудоемкостью и может привести к ошибкам вследствие способности большинства полимеров поглощать воду.

Применение метода профилометрии позволяет существенно сократить продолжительность испытаний и избежать грубых ошибок. Способ определения продолжительности инкубационного периода, основанный на методе профилометрии, предполагает периодическое измерение шероховатости поверхности полимера в процессе кавитационного воздействия и построение зависимости $R_a(t)$.

В течение инкубационного периода имеет место монотонное увеличение среднеарифмети-

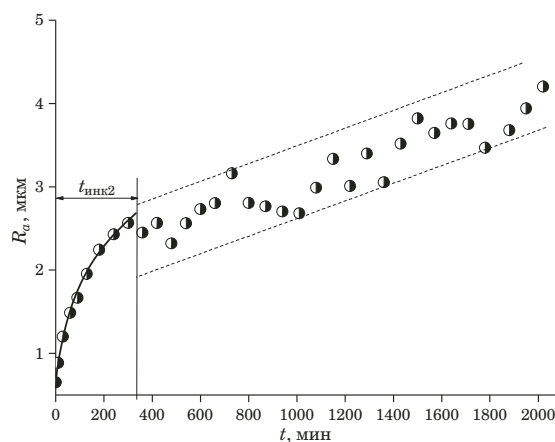


Рис. 4. Изменение высотного параметра шероховатости изнашиваемой поверхности полиэтилена низкого давления с течением времени кавитационного воздействия

Fig. 4. Change in the height parameter of the roughness of worn surface with the duration of cavitation attack on high-density polyethylene

ческого отклонения профиля поверхности с увеличением продолжительности кавитационного воздействия. Окончание инкубационного периода регистрируется по точке, в которой нарушается монотонность и(или) гладкость зависимости $R_a(t)$. Появление такой точки обусловлено сменой механизмов, контролирующих образование неровностей на изнашиваемой поверхности: в пределах инкубационного периода образование неровностей происходит за счет увеличения остаточной деформации поверхностного слоя при кавитационном воздействии, а после окончания инкубационного периода — вследствие отделения частиц износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Прис К. М.** Кавитационная эрозия. Эрозия / Пер. с англ.; под ред. К. М. Прис. — М.: Мир, 1982. С. 269 – 330.
2. **Ibanez I., Zegiri B., Hodnett M., Frota M. N.** Cavitation erosion measurements on engineering materials / Engineering Science and Technology, an International Journal. 2020. Vol. 23. P. 1486 – 1498. DOI: 10.1016/j.jestech.2020.06.001
3. **Габайдулин Г. Ю., Гречнева М. В.** Возможности восстановления лопастей гидротурбин, поврежденных кавитацией / Вестник ИрГТУ. 2012. № 12(71). С. 40 – 43.
4. **Пылаев Н. И., Эдель Ю. У.** Кавитация в гидротурбинах. — Л.: Машиностроение, 1974. С. 199 – 201.
5. **Георгиевская Е. П.** Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
6. **Горбаченко Е. О., Цветков Ю. Н.** Использование результатов измерения шероховатости поверхности для прогнозирования долговечности материалов гребных винтов при кавитационном изнашивании / Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Т. 4. № 390. С. 53 – 66. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-53-66
7. **Кацман Ф. М.** Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. — М.: Транспорт, 1987. — 223 с.
8. **Пустошный А. В., Сверчков А. В., Шевцов А. В.** Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики / Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Т. 4. № 390. С. 11 – 26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390 – 11 – 26

9. ASTM G32-10. Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. — ASTM International, 2010. — 19 p.
10. **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.
11. **Калиничев Э. Л., Саковцева М. Б.** Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. — Л.: Химия, 1983. — 288 с.
12. **Hattori S., Itoh T.** Cavitation erosion resistance of plastics / *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 1103 – 1108. DOI: 10.1016/j.wear.2011.05.012
13. **Табенкин А. Н., Тарасов С. Б., Степанов С. Н.** Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 136 с.
14. **Смирнов-Аляев Г. А.** Сопротивление материалов пластическому деформированию. — Л.: Машгиз, 1961. — 463 с.
15. **Deng W., Zhao X., Hao E., et al.** Influence of epoxy resin on the microstructure and cavitation erosion of as-sprayed 8YSZ coating / *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Issue 5. P. 5693 – 5702. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.12.034
16. **Регель В. Р., Слущкер А. И., Томашевский Э. Е.** Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
5. **Georgievskaya E. P.** Cavitation erosion of ship propellers and measures against it. — Leningrad: Sudostroeniye, 1978. — 206 p. [in Russian].
6. **Gorbachenko E. O., Tsvetkov Yu. N.** Cavitation wear prediction of propeller materials based on surface roughness measurement data / *Tr. Krylov. Gos. Nauch. Tsentra*. 2019. Vol. 4. N 390. P. 53 – 66 [in Russian]. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-53-66
7. **Katsman F. M.** Marine ship propulsion system operation. — Moscow: Transport, 1987. — 223 p. [in Russian].
8. **Pustoshny A. V., Sverchko A. V., Shevtsov A. V.** Roughness of propeller blade surface and its implications for propulsion performance / *Tr. Krylov. Gos. Nauch. Tsentra*. 2019. Vol. 4. N 390. P. 11 – 26 [in Russian]. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26
9. ASTM G32-10. Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. — ASTM International, 2010. — 19 p.
10. **Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko E. O.** Estimation of Incubation Period at Cavitation Wear of Steel through Measuring Roughness / *Zavod. Lab. Diagn. Mater*. 2015. Vol. 81. N 11. P. 62 – 65 [in Russian].
11. **Kalinichev E. L., Sakovtseva M. B.** Properties and processing of thermoplastics: Handbook. — Leningrad: Khimiya, 1983. — 288 p. [in Russian].
12. **Hattori S., Itoh T.** Cavitation erosion resistance of plastics / *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 1103 – 1108. DOI: 10.1016/j.wear.2011.05.012
13. **Tabenkin A. N., Tarasov S. B., Stepanov S. N.** Roughness, waviness, profile. International experience. — St. Petersburg: Izd. Politekh. Univ., 2007. — 136 p. [in Russian].
14. **Smirnov-Aliayev G. A.** Resistance of materials to plastic deforming. — Leningrad: Mashgiz, 1961. — 463 p. [in Russian].
15. **Deng W., Zhao X., Hao E., et al.** Influence of epoxy resin on the microstructure and cavitation erosion of as-sprayed 8YSZ coating / *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Issue 5. P. 5693 – 5702. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.12.034
16. **Regel V. R., Slutsker A. I., Tomashevskiy E. E.** Kinetic nature of the strength of solids. — Moscow: Nauka, 1974. — 560 p. [in Russian].

REFERENCES

1. **Preece C. M.** Cavitation erosion / *Treatise on Materials Science and Technology*. Vol. 16. Erosion. — New York: Academic Press, 1979. P. 249 – 308.
2. **Ibanez I., Zegiri B., Hodnett M., Frota M. N.** Cavitation erosion measurements on engineering materials / *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23. P. 1486 – 1498. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.06.001
3. **Gabaidulin D. Yu., Grechneva M. V.** Resources to repair hydroturbine blades affected by cavitation / *Vestn. IrGTU*. 2012. N 12(71). P. 40 – 43 [in Russian].
4. **Pylyayev N. I., Edel Yu. U.** Cavitation in hydroturbines. — Leningrad: Mashinostroyeniye, 1974. P. 199 – 201 [in Russian].