

Динамическая усталость

© С.Н. Буравова, С.М. Гаврилкин, Ю.А. Гордополов

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
142432 Черноголовка, Московская область, Россия
e-mail: gordop@ism.as.ru

(Поступило в Редакцию 29 марта 2004 г. В окончательной редакции 28 декабря 2004 г.)

Динамическая усталость отличается от квазистатической откольной природой повреждаемости. Следствием откольной природы является поочередное возникновение продольных трещин, каждая из которых сама становится источником разгрузки. Фокусировка или интерференция волн разгрузки определяет место зарождения и развития канальных и кольцевых трещин, поэтому дефекты поверхности, существующие изначально, остаются „неработоспособными“. Другим следствием откольной природы повреждаемости является определяющее влияние ориентации боковых граней ударников ограниченных размеров, от которых зависит интенсивность возникающей боковой волны разгрузки.

Введение

Импульсное нагружение отличается от квазистатического волновым характером нагружения. Повреждаемость имеет откольную природу и локализуется в местах встречи волн разгрузки, сопровождающих импульс сжатия. В настоящее время достаточно хорошо изучены одномерные откольные разрушения, показан временной характер накопления повреждений в процессе растяжения образца однократными волнами разгрузки [1]. Однако существует множество объектов техники, подвергающихся действию ударников ограниченных размеров при малых скоростях удара, когда разрушение происходит после накопления повреждений в результате многократных нагружений. К таким объектам относятся паровые турбины, обшивки летательных аппаратов, винты быстроходных судов, горелки пылевидного топлива, железнодорожные рельсы. Важнейшей проблемой путевого хозяйства стали контактно-усталостные повреждения головок рельсов в области, где возникают сжимающие напряжения. Причина появления продольных и поперечных трещин там, где они по всем правилам не должны появляться, не ясна [2]. Нагружение поверхности при скоростях удара ниже $200\text{--}300\text{ ms}^{-1}$ принято рассматривать в квазистатическом приближении. Это очень распространенное мнение. Видимо, это одна из причин, почему не удается объяснить возникновение дефектов рельсов, появление поперечных трещин на стационарной стадии капельной эрозии, образование раковин в кратерах при кавитационных воздействиях, колотых трещин на лопатках паровых турбин и т. д. Целью работы является выявление особенностей усталостного разрушения поверхности в условиях многократных импульсных низкоскоростных нагружений.

Экспериментальные данные

Экспериментальное исследование особенностей распространения волновой нагрузки рассматривается на примере воздействия импульсного лазерного облучения.

Детонационные покрытия из карбида хрома, плакированного никелевой связкой (размер частиц $40\text{--}60\text{ }\mu\text{m}$), толщиной до $500\text{ }\mu\text{m}$ облучались импульсным лазерным излучением с длиной волны $1.06\text{ }\mu\text{m}$ и длительностью $8\text{--}10\text{ ms}$. Напыление проводилось на автоматической установке „Корунд“ продуктами детонации смеси пропана–бутана с кислородом. Обработанные образцы подвергались металлографическому анализу на приборе Neophot-30. Интенсивность ударных волн, возникающая при лазерном облучении, близка к той, которая создается при ударе частиц со скоростью $50\text{--}250\text{ ms}^{-1}$ ($M_0 = 0.01\text{--}0.05$ — число Маха, равное отношению скорости удара к скорости звука). На рис. 1 приведены поперечные шлифы облученных образцов. Из рисунка видно, что облучение создает на поверхности преграды кратер и продольную трещину под ним и поперечная трещина локализуется рядом с зоной приложения нагрузки (рис. 1, *a*). Увеличение мощности облучения сопровождается образованием системы более мелких продольных трещин, сопутствующих основной, центральной (рис. 1, *b*). Система продольных трещин наблюдается при облучении хрупких плавящихся покрытий из оксида алюминия. Облучение детонационных покрытий из карбида вольфрама с никелевой связкой (размер частиц около $100\text{ }\mu\text{m}$) также сопровождается образованием продольных трещин. Однако глубина их проникновения существенно меньше, поскольку более крупные частицы в покрытии способны препятствовать распространению трещин в глубь преграды.

Эрозионная повреждаемость поверхности при низкоскоростных нагрузках

Действие ударника ограниченных размеров сопровождается возникновением волн сжатия во взаимодействующих телах и одновременно с ними центрированной волны разгрузки, центром которой является граница контактной поверхности контактирующих тел, а ис-

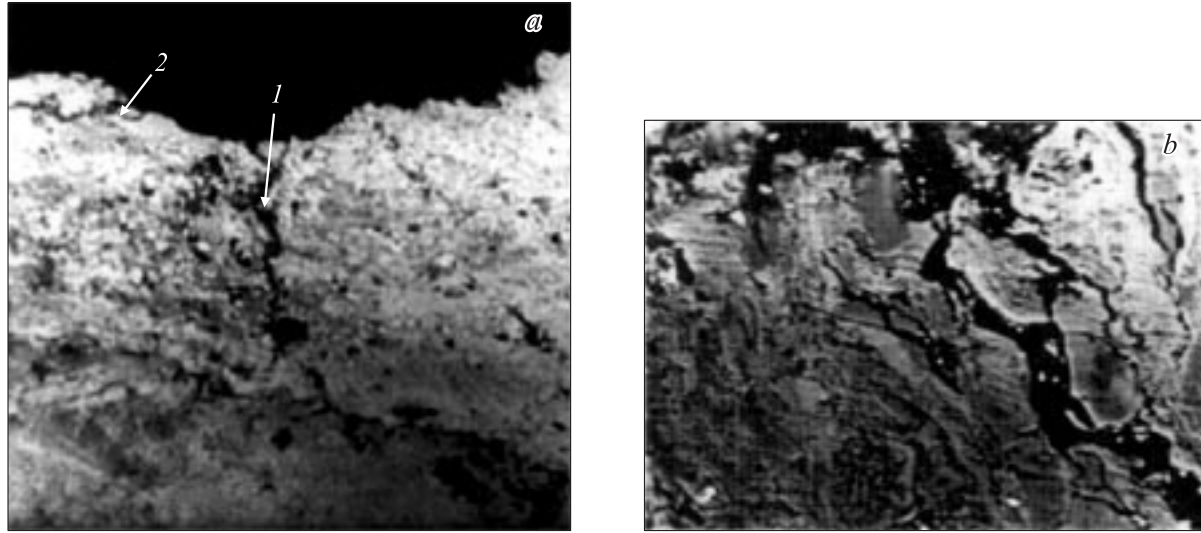


Рис. 1. Поперечные шлифы облученного образца с детонационным покрытием из карбида хрома, плакированного никелем, после импульсного лазерного облучения: *a* — продольная трещина, *b* — поперечная.

точником волны разгрузки является пространство, куда входит импульс сжатия. Волна разгрузки ослабляет и искривляет ударную волну [3,4]. Распространение волн рассматривается в двумерном приближении. Система уравнений сохранения, описывающая процесс взаимодействия деформированных тел, решается методом характеристик с использованием малого параметра $\sigma = 0.5(n+1)u/c_0 = 0.5(n+1)P/\rho_0 c_0^2$, через который можно выразить все характеристики потока. Здесь u — массовая скорость; P — давление; n — показатель энтропии; ρ_0 , c_0 — плотность и скорость звука невозмущенного материала. Каждое состояние на искривленном фронте, характеризуемое параметром σ , перемещается в пространстве по прямолинейным траекториям, угол наклона которых с лицевой поверхностью преграды определяется выражением

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{1 + 2\sqrt{\sigma\sigma_0} - 0.5\sigma_0 - \sigma}{2\sqrt{\sigma} - \sqrt{\sigma_0}}. \quad (1)$$

Здесь $\sigma_0 = 0.5(n+1)u_0/c_0$, u_0 — массовая скорость входящей ударной волны. Интенсивность ударной волны на боковой грани σ_b с произвольным углом наклона φ_0 определяется из (1) подстановкой $\psi = \varphi_0$. Из выражения (1) также видно, что импульс сжатия распространяется внутри конической поверхности, угол которой ψ_0 определяется подстановкой в (1) $\sigma = 0$. Внутри этой конической поверхности материал упрочняется. Интенсивность искривленной ударной волны, движущейся вдоль боковой грани частицы σ_b , ниже начальной. Для боковых граней с перпендикулярной ориентацией к поверхности образца давление составляет четвертую часть начального ($\sigma_b = \sigma_0/4$). Оставшееся давление снижается второй волной разгрузки, источником которой является боковая грань частицы. Взаимодействие ударников ограниченных размеров с массивной мишенью сопровождается образованием двух волн разгрузки, когда угол наклона боковой грани не превышает угол конуса сжатия.

Встреча боковых волн разгрузки на оси симметрии приводит к образованию канальной зоны растягивающих напряжений. Растяжение обязано второй волне разгрузки, именно она сообщает поступательную скорость боковым граням частицы $u_b/c_0 = 0.5(n+1)\sigma_b \sin \varphi_0$. При низкоскоростном нагружении напряжение в зоне растяжения существенно меньше откольной прочности материала P_s $u_s/c_0 = P_s/\rho_0 c_0^2$. Поэтому нарушение сплошности происходит после накопления деформации в режиме динамической усталости. Число циклов нагружения N_0 , необходимое для достижения откольной прочности, определяется выражением

$$N_0 = \frac{1}{\xi} \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_b \sin \varphi_0} - 1 \right). \quad (2)$$

Здесь ξ — упруго-пластический гистерезис. Число N_0 характеризует сопротивляемость материала эрозионно-му изнашиванию. На поверхности возникает разрыв, пора, которая при дальнейшем нагружении прорастает в глубь материала в виде канальной трещины. Однако канальная трещина сама становится источником волны разгрузки. Это создает условия для накопления повреждений в кольцевой области. В результате к моменту, когда число циклов удвоится ($N = 2N_0$), вокруг канальной трещины возникнет кольцевая трещина первого поколения, а рост канальной трещины прекратится, что связано с уменьшением расстояния между источниками разгрузки. Максимальная глубина канальной трещины L_0 (безразмерная величина, отнесенная к радиусу частицы) определяется из условия накопления критической деформации на кончике растущей трещины. Поскольку растяжение создает радиальная составляющая скорости разгрузки, глубина трещины равна $L_0 = \operatorname{tg} \beta$. Угол β определяется из выражения, $\cos \beta = \sigma_s / (1 + \xi N_0) \sigma_b \sin \varphi_0$. Последующие

циклические нагрузки приводят к образованию системы более мелких кольцевых откольных трещин.

Характер продольной повреждаемости изменяется, когда угол наклона боковой грани частиц превышает угол конуса сжатия $\varphi_0 \geq \psi_0$. В этом случае интенсивность ударной волны на боковой грани становится нулевой и вторая волна разгрузки не возникает. Такая ситуация имеет место для сферической частицы. Однако и в этом случае под зоной контакта возникают растягивающие напряжения σ_a , обусловленные расходимости потока $\sigma_a = 0.5\sigma_0 \operatorname{tg} 0.5(\psi_0 - 90^\circ)$. Критическое число циклов, необходимое для возникновения канальной трещины, определяется из уравнения (2), где следует заменить $\sigma_b \sin \varphi_0$ на σ_a . Как правило, $\sigma_a \leq \sigma_b$ и нарушение сплошности происходит при большем количестве нагружений. Из экспериментов [5–8] известно, что плоскосторцевой эродент быстрее разрушает преграду по сравнению со сферической частицей того же размера.

Наличие в упрочненном слое множества продольных трещин приводит к фрагментации материала в процессе нагружения и выносу осколков из зоны контакта. Процесс эрозии, удаления материала из зоны контакта в настоящее время не изучен. В результате потери материала из зоны контакта на поверхности образуется впадина. Формирование впадины заканчивается тогда, когда угол наклона стенки становится меньше угла конуса сжатия ψ_0 . В этом случае при ударе в дно впадины возникает ударная волна, способная проходить через стенку в преграду [3]. Выход такого импульса на лицевую поверхность сопровождается образованием отраженной волны разгрузки. Интерференция ее с падающей волной создает поперечную зону растягивающих напряжений. На расстоянии $\sigma = 0.125\sigma_0 h$ от лицевой поверхности начинает формироваться лицевая откольная трещина (для случая перпендикулярной ориентации стенок), где h — высота боковой стенки впадины. Длина трещины λ зависит от угла траектории состояния ψ^* , где деформация достигает критических значений $\sigma^* = \sigma_s / (8\sigma_s / \sigma_0 - 1)$ при числе циклов $N = 2N_0$. Угол ψ^* находится подстановкой σ^* в уравнение (1), при этом длина поперечной трещины равна $\lambda = \operatorname{htg}(\psi^* - 90)$. Величины λ и δ определяют размер формирующегося осколка.

Таким образом, многократные действия ударника ограниченных размеров приводят к образованию микро- и макротрещин. На начальном этапе канальная и кольцевые трещины ориентированы в продольном направлении, а на заключительном этапе лицевой откол ориентирован в поперечном.

Особенности динамической природы повреждаемости преграды при низкоскоростных нагрузках

Сравнение морфологии повреждаемости поверхности под действием импульсного лазерного облучения с высокоскоростным нагружением обнаруживает сходство их

разрушения [9]. Действительно, взаимодействие брускообразного ударника с металлической преградой [10] при скорости удара 1 kms^{-1} ($M_0 = 0.2$) приводит к образованию на поверхности мишени вмятины с воронкой в центре, от которой внутрь распространяется продольная трещина. Поперечная трещина локализуется рядом с кратером под кромкой выступа рельефа поверхности. Такое же сходство показывают экспериментальные исследования эрозионного процесса под действием низкоскоростного потока частиц [5–8]. Одиночные достаточно малые частицы (размером $70 \mu\text{m}$), которые при ударе не разрушаются ($M_0 = 0.02$) [11], создают на дне кратера поры, которые в глубь материала идут в виде продольных микротрещин. Причина гомогенного зарождения трещины, как отмечают авторы [11], не ясна. На стационарной стадии эрозии наблюдается интенсивная потеря материала, характерной особенностью является образование поперечных трещин, наклоненных под малым углом к лицевой поверхности мишени, в результате чего продукты изнашивания приобретают пластинчатую, хлопьевидную форму [6–8]. Для кавитационной повреждаемости характерно образование изолированных вмятин, в центре которых имеются глубокие раковины с идущими вглубь продольными трещинами [12]. Давление в преграде, возникающее от периодического нагружения поверхности сферическими волнами, идущими из зоны схлопывания кавитационных пузырьков, оценивается в пределах 50–1000 МПа [12–14]. Такое же давление возникает в преграде от удара капли при скоростях $M_0 = 0.005$ – 0.03 [8,14]. Для кавитационной повреждаемости на стационарной стадии характерно возникновение крупных выбоин, потеря материала идет через разрушения кромок таких язвенных образований [12–14]. Продольные трещины возникают и при детонационном напылении, при котором скорость потока расплавленных частиц составляет 300–500 ms^{-1} . После отрыва покрытия в круглых вмятинах на поверхности подложки, возникших от удара капель, можно видеть застрявшие зернышки напыленного материала. Продольная трещина успевает образоваться до того, как расплавленный материал затвердеет. Поперечные трещины при напылении локализируются только в вершинах крупных выступов рельефа поверхности.

Таким образом, из анализа экспериментальных данных следует, что независимо от вида импульсной нагрузки (кавитационной, капельной, пылевой, лазерного облучения или детонационного напыления) результат многократных импульсных низкоскоростных воздействий на преграду идентичен с разрушением при высокоскоростном нагружении, что является основанием для применения законов волновой механики к низкоскоростному нагружению. Динамическая усталость должна отражать специфические особенности распространения волновых процессов. В условиях нагружения поверхности ударниками ограниченных размеров повреждаемость обязана неоднородным откольным разрушениям и является следствием фокусировки или интерференции волн разгрузки, возникающих на боковых гранях ударника.

Числовой пример

В работе проведен расчет взаимодействия брускообразных частиц с квадратным сечением и трапециевидным, угол наклона боковых граней последней совпадает с углом конуса сжатия $\varphi_0 = \psi_0$. В этом случае перемещение граней отсутствует, а растягивающие напряжения в канальной зоне обязаны только расходимости потока. Предполагается, что разрушение происходит мгновенно, как только растягивающие напряжения достигнут критической величины. Результаты расчета представлены на рис. 2–4. Позиции 1, 2, указанные на рисунках, относятся к квадратному и трапециевидному сечению соответственно. Расчет проведен для $\sigma_s = 0.0313$. Диапазон скоростей нагружения включает область динамической усталости и переход к высокоскоростному

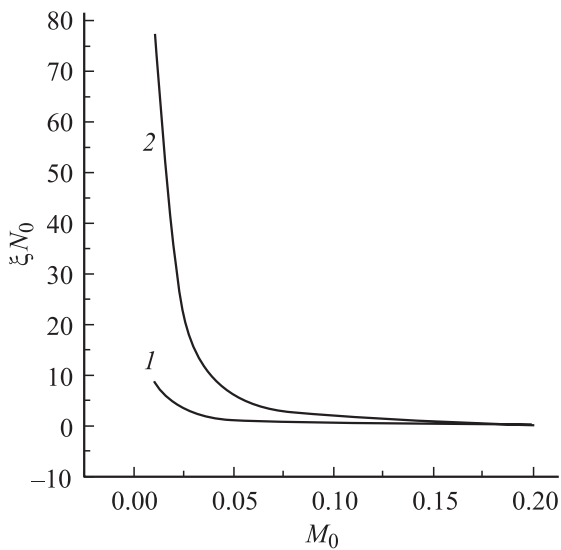


Рис. 2. Зависимость критического числа циклов от числа Маха.

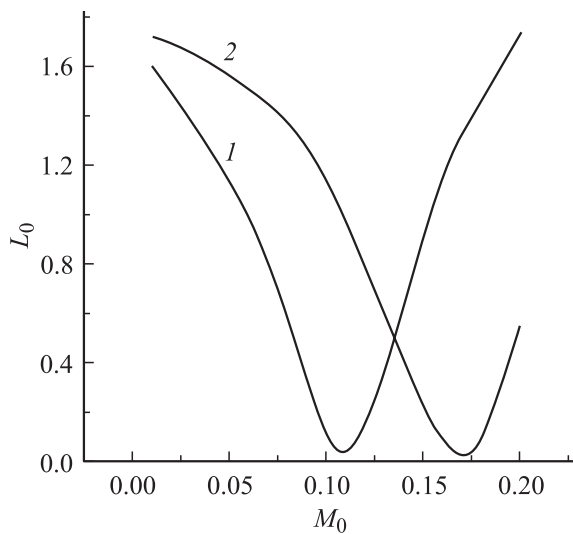


Рис. 3. Зависимость глубины канальной откольной трещины от числа Маха.

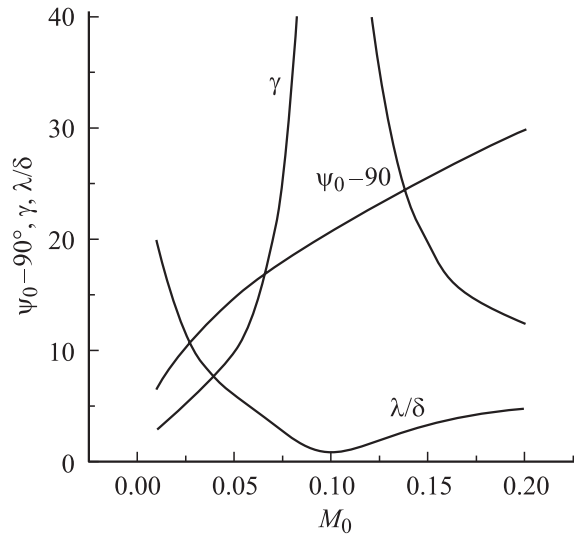


Рис. 4. Зависимость параметров поперечной повреждаемости от числа Маха.

нагружению, когда разрушение возникает при однократном нагружении и $N_0 = 0$. Как видно из рисунков, реакция материала преграды на импульсное нагружение в значительной мере определяется геометрией частиц. Число циклов нагружения зависит от формы частиц и может отличаться значительно при одних и тех же скоростях нагружения. Для каждой ориентации боковых граней ударников ограниченных размеров имеется своя критическая скорость M_k перехода в высокоскоростную область. Когда ударник и преграда выполнены из одного материала $M_k = 2u_b/c_0 = 4\sigma_b/(n+1)$, на поверхности преграды возникает только зародыш нарушения сплошности в виде поры. Увеличение скорости удара при одинаковых циклах нагружения сопровождается ростом глубины проникновения трещины, однако в области низкоскоростного удара чрезмерное возрастание критического числа циклов приводит к увеличению глубины продольной трещины при снижении импульсной нагрузки (рис. 3). Интересно поведение поперечной трещины, являющейся основной причиной уноса материала на стационарной стадии изнашивания. На малых скоростях удара продукты эрозионного изнашивания имеют пластинчатую форму. По мере увеличения скорости отношение длины лицевой трещины к расстоянию δ , где она зарождается под поверхностью (λ/δ), сокращается, достигая нулевой величины при критической скорости удара (угол наклона поперечной трещины $\gamma = \delta/\lambda$ ведет себя противоположным образом). Последующее увеличение скорости приводит к росту отношения λ/δ . Таким образом, хлопьевидная форма продуктов изнашивания, известная из экспериментов, может обнаруживаться вне небольшого диапазона скоростей вблизи критической. Следует напомнить, что неоднородные откольные разрушения не изучены, откольная прочность и упруго-пластический гистерезис в условиях фокусирующего действия волн разгрузки неизвестны, поэтому приведенный расчет является формальным. Тем не менее он

позволяет выявить особенности динамической усталости. Отклик материала на внешнее воздействие ударника ограниченных размеров проявляется в создании канальной трещины, именно она определяет максимальную глубину растущей каверны. Рост числа продольных трещин продолжается до тех пор, пока не появятся условия для возникновения лицевой откольной трещины.

Отличия динамической усталости от квазистатической

Основным результатом проведенной работы следует считать выявление отличной динамической усталости от квазистатической. При квазистатическом нагружении характерный размер нагрузки (произведение скорости звука на длительность нагрузки) превышает размер образца, на который нагрузка действует. Внедрение индентора в преграду сопровождается образованием веера растягивающих напряжений и зарождением радиальных трещин на дефектах, концентраторах напряжений, изначально существующих на поверхности. Развитие трещин происходит одновременно в процессе циклических нагрузок.

В условиях многоцикловых динамических нагрузок характерный размер нагрузки много меньше размера объекта и возникновение трещин обязано интерференции или фокусировке волн разгрузки. Откольные трещины строго локализованы и находятся в местах встречи волн разгрузки, ориентированы они в основном перпендикулярно лицевой поверхности мишени. Следствием откольной природы повреждаемости является тот факт, что дефекты-концентраторы напряжения не работают в условиях динамических нагрузок и не являются источниками зарождения разрушения. В условиях динамической усталости имеет место поочередное образование откольных трещин. На начальном этапе воздействия формируется канальная трещина. Частица „жалит“ поверхность при ударе! Продольная трещина сама становится источником волн разгрузки, поэтому вокруг канальной трещины последовательно зарождаются и прорастают кольцевые. Из-за сокращения расстояния между источниками волн разгрузки, которыми являются продольные трещины, глубина проникания кольцевых трещин каждого поколения сокращается по сравнению с предыдущим. Другим следствием откольной природы динамической повреждаемости является определяющая роль геометрической формы частицы, поскольку ориентация боковых граней определяет интенсивность возникающей волны разгрузки. Факт существенного влияния угла скоса угловатой частицы на повреждаемость при эрозии подтвержден экспериментально. Авторы [6,7] считают угол скоса частицы таким же важным параметром, как скорость и направление удара.

Авторы выражают благодарность А.Ф. Беликовой, А.А. Гончарову, Ю.Н. Киселеву за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов.

Список литературы

- [1] Златин Н.А., Пугачев Г.С., Воловец Л.Д., Леонтьев С.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 7. С. 1507–1514.
- [2] Лысюк В.С., Сазонов В.Н., Башкатова Л.В. Прочный и надежный железнодорожный путь. М.: Академкнига, 2003. 588 с.
- [3] Buravova S. // Wear. 1992. Vol. 157. P. 359–370.
- [4] Гриб А.А., Рябинин А.Г., Христианович С.А. // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. № 2. С. 532–536.
- [5] Эванс А.Г. // Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 11–79.
- [6] Рафф А.У., Видерхорн С.М. // Там же.
- [7] Cousins A.H., Hutching I.M. // Wear. 1983. Vol. 28. P. 335–348.
- [8] Брантон Дж.Х., Рочестер М.К. // Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 140–200.
- [9] Buravova S.N., Goncharov A.A., Kiselev Ju.N. // Tribology International. Vol. 29. N 5. P. 357–363.
- [10] Ададуров Г.А., Беликова А.Ф., Буранова С.Н. // ФГВ. 1992. № 4. С. 95–109.
- [11] Brown R., Kosko S., Jun E.J. // Wear. 1983. Vol. 88. P. 181–193.
- [12] Hanson I., Kristensen K.J. // J. Phys. d. 1978. N 11. P. 891–898.
- [13] Георгиевская Е.П. Кавитационная эрозия гребных винтов. Л.: Судостроение, 1978. 129 с.
- [14] Прис К. // Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 269–330.