

УДК: 620.193.16

DOI: 10.37890/jwt.vi70.235

## **Механизм воздействия на поверхность материалов при изнашивании в условиях ультразвуковой кавитации**

**Я. О. Фиактистов<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1800-5569>

**Ю. Н. Цветков<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2089-1299>

<sup>1</sup>*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Проведены две серии опытов на отожжённых сплавах: технической меди, латуни Л60 и алюминиевом сплаве АМг4,0. В первой серии цилиндрические образцы из указанных материалов сначала осаживали на прессе до разных степеней деформации, затем разрезали образцы и измеряли их микротвёрдость в районах, примыкающих к центру образца. По результатам первой серии опытов строили калибровочные графики – зависимости микротвёрдости от интенсивности деформаций. Во второй серии экспериментов проводили испытания этих же сплавов на кавитационное изнашивание на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе в пресной воде при частоте колебаний концентратора равной 22 кГц и амплитуде колебаний его торца около 28 мкм. В течение инкубационного периода изнашивания проводили регистрацию максимально достижимого значения микротвёрдости. По полученному максимальному значению микротвёрдости с калибровочных графиков «снимали» значение критической степени деформации, соответствующее началу разрушения поверхности при кавитационном воздействии. Указанное значение деформации позволило произвести оценку жёсткости напряжённого состояния поверхности металлов при кавитационном воздействии на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе. Полученные значения коэффициентов жёсткости напряжённого состояния позволили сделать вывод, что кавитационное воздействие на поверхность материала при его испытании на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе осуществляется посредством ударов микроструй.

**Ключевые слова:** кавитационное изнашивание, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, латунь, техническая медь, алюминиево-магниевый сплав, инкубационный период изнашивания, пластическая деформация, упрочнение металла, ударные волны, микроструйки.

## **Mechanism of the attack on metal surface in wear under ultrasonic cavitation**

**Yaroslav O. Fiaktistov<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1800-5569>

**Yuriy N. Tsvetkov<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2089-1299>

<sup>1</sup>*Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping», Saint-Petersburg, Russia*

**Abstract.** Two series of tests of annealed metal materials — copper, brass L60 and aluminum-magnesium alloy AMg4,0 — were carried out. The first series consists firstly in upsetting the cylindrical samples of the listed above alloys on a press to a different strain rate, then cutting the deformed samples and measuring the microhardness of the area

adjacent to the center of the samples. The first series results in constructing the calibration plots of microhardness as a function of strain. During the second series the tests of the same materials for cavitation wear in the fresh water on the ultrasonic vibratory apparatus were carried out. The frequency and the amplitude of the apparatus horn vibration were 22 kHz and 28  $\mu\text{m}$  respectively. The microhardness of the surface samples exposed to cavitation attack was measured after the definite time periods within the incubation period and the maximum value of microhardness was registered. Marking the maximum microhardness value on the calibration plot yields the strain rate reached on the surface under cavitation attack before the removal of wear particles begins. On the basis of the found values of the strain the stress state rigidity of the surface layers under cavitation attack was evaluated. The obtained coefficients of stress state rigidity allowed drawing the conclusion, that cavitation attack on the material being tested on the ultrasonic vibratory apparatus occurs through the microjets impacts.

**Keywords:** cavitation wear, mechanism of cavitation attack, ultrasonic vibratory apparatus, brass, technical copper, aluminum-magnesium alloy, incubation period of wear, plastic deformation, cold-working of metal, shock waves, microjets.

### **Введение**

Кавитационное изнашивание — разрушение поверхности в потоке жидкости при ударах струй или воздействии ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных каверн — может быть серьёзным препятствием для эффективной эксплуатации судового оборудования. Кавитационный износ возникает на водоохлаждаемых поверхностях втулок и блоков цилиндров судовых высокооборотных дизелей [1, 2] и является частой причиной ремонта элементов судового движительного комплекса — лопастей и направляющих насадок гребных винтов [3, 4]. Перечисленные элементы судового оборудования относятся к ответственным элементам, от состояния которых зависит безопасность плавания судна. Поверхность очагов кавитационного износа на лопастях винтов имеет рваный рельеф, поэтому очаги износа могут снижать КПД гребных винтов в случае возникновения их в концевых сечениях лопастей или прочность движителя при возникновении износа в корне лопасти. На поверхностях втулок цилиндров кавитационный износ представляет собой скопление отдельных очень глубоких язвин, глубина которых может достигать половины толщины втулки, что чревато нарушением герметичности рабочего пространства цилиндра и, как следствие, возникновением аварийной ситуации. Основной путь снижения и предотвращения кавитационного износа — увеличение износостойкости материалов, применяемых для изготовления и ремонта изнашиваемых элементов судового оборудования [5–9]. Однако успешная реализация указанного направления зависит от правильного выбора режимов лабораторных испытаний на кавитационный износ разрабатываемых материалов.

В настоящее время такие испытания проводят чаще всего в условиях вибрационной кавитации на ультразвуковых магнитострикционных вибраторах (МСВ) [10]. Однако до сих пор не выяснены все особенности испытаний на МСВ: открытым остаётся вопрос, каким образом осуществляется перенос энергии от кавитационного облака к поверхности изнашиваемого сплава. Например, в работах [11] и [12] был проведён анализ энергии и характера импульсов давления, измеренного с помощью миниатюрных датчиков, установленных под торец концентратора, при этом выводы получились разными. Авторы работы [11] пришли к заключению, что основной механизм переноса энергии от кавитационного облака к поверхности — ударные волны от кооперативного схлопывания пузырьков. Тогда как

в работе [12] утверждается, что разрушение производится вследствие ударов микроструй от отдельно схлопывающихся пузырьков.

Вопрос о механизме кавитационного воздействия на ультразвуковом МСВ важен для обоснованного выбора установки для проведения испытаний судостроительных сплавов на кавитационный износ, а также для объяснения многих эффектов, сопровождающих процесс кавитационного изнашивания на МСВ.

Цель работы — анализ механизма передачи энергии от кавитационной зоны к поверхности, подвергающейся изнашиванию в условиях ультразвуковой кавитации на МСВ.

### **Выбор метода исследования**

В представленной работе использовали подход, изложенный в работе [13], т. е. проводился анализ механизма передачи энергии кавитационной зоны к поверхности металла по реакции металла на кавитационное воздействие. Такой подход обусловлен тем, что непосредственное определение механизма передачи энергии в условиях, когда осуществляется кооперативное схлопывание множества пузырьков, невозможно.

Как известно, на начальной стадии кавитационного изнашивания металлических материалов, называемой инкубационным периодом, потеря массы практически нет. На этой стадии происходит упрочнение поверхностных слоёв. И именно характер упрочнения металла в пределах инкубационного периода, т. е. до начала отделения частиц износа может пролить свет на механизм воздействия на поверхность со стороны кавитационного облака. Известно, что по сравнению со статическим приложением нагрузки, силовое воздействие с ультразвуковой частотой изменяет характер пластического течения металла. Например, деформирование металла незакреплёнными (свободными) шариками (без применения прижимного усилия), ударяющими по поверхности с ультразвуковой частотой [14], ведёт к большему повышению твёрдости, а упрочнение получается более равномерным и стабильным по сравнению со статическим прижатием индентора к поверхности. В машиностроении широко применяются технологии обработки, основанные на приложении ультразвуковых колебаний к деформирующему или режущему инструменту [15]. Ультразвуковые колебания повышают подвижность дислокаций, появляется возможность их «переползания» из заблокированных плоскостей скольжения [16], как следствие, пластическая деформация сопровождается более существенным повышением плотности дислокаций, а значит и твёрдости, так как с увеличением плотности дислокаций твёрдость увеличивается [17].

При кавитационном изнашивании имеет место повторяющееся ударное воздействие струй (или волн) на поверхность, при этом при каждом ударе возникают большие пластические деформации, которые постепенно накапливаются до достижения критической величины, при которой происходит образование трещин и последующее отделение частиц износа. То есть, по сути, пластическое деформирование происходит не непрерывно, как при традиционном статическом нагружении, например сжатии, а разбивается на отдельные шаги. Сравнивая максимальную степень упрочнения — её можно оценить, измеряя микротвёрдость поверхности — при кавитационном воздействии на МСВ и при статическом одноосном сжатии, можно сделать вывод о том, с какой частотой происходит нагружение поверхности при испытании на ультразвуковом МСВ и, как следствие, о механизме кавитационного воздействия на поверхность.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие задачи:

- получить зависимость изменения микротвёрдости металла в течение инкубационного периода кавитационного воздействия на ультразвуковом МСВ и определить максимально достижимое в пределах инкубационного периода значение микротвёрдости;
- построить зависимость микротвёрдости от степени деформации при статическом сжатии образцов металла;
- определить по зависимости микротвёрдости от степени деформации значение деформации, соответствующее значению микротвёрдости, максимально достижимому при кавитационном воздействии.

**Методика эксперимента**

Для испытаний были выбраны три сплава с преимущественно однофазной структурой: техническая медь МЗ, латунь Л60, алюминиевый сплав АМг4,0. Исходное состояние материалов и их термообработка перед испытаниями приведены в таблице.

Эксперименты включали в себя предварительные и основные испытания, причём все эксперименты, относящиеся к конкретному сплаву из вышеперечисленных, проводили на образцах, изготовленных из одного и того же прутка (таблица).

Предварительные испытания проводили для определения характеристик пластичности, необходимых для анализа результатов основных испытаний. В рамках предварительных опытов определяли истинное удлинение сплавов при одноосном растяжении. Испытания на одноосное растяжение проводили на цилиндрических образцах, изготовленных по рекомендациям ГОСТ 1497-84, с отношением рабочей длины к диаметру, равным пяти. Диаметр образцов из меди и сплава АМг4,0 равнялся 5,0 мм, а латуни Л60 — 6,0 мм. По результатам опытов регистрировали относительное сужение при разрыве (таблица 1), и определяли диаметр  $d_{ш}$  шейки и радиус  $R$  контура шейки (рис. 1).

Таблица 1

**Термообработка и характеристики пластичности испытанных металлических материалов**

Материал	Исходное состояние	Термообработка	Относительное сужение при разрыве	$d_{ш}$ , мм	$R$ , мм
Медь техническая	Катаный пруток Ø16	Отжиг при 700 °С	0,87	1,75	1,4
Латунь Л60	Катаный пруток Ø16	Отжиг при 650 °С	0,64	3,57	4,9
Алюминиевый сплав АМг4,0	Катаный пруток Ø16	Отжиг при 310 °С	0,69	2,78	2,50

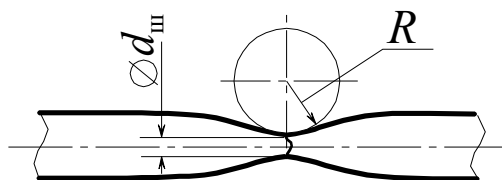


Рис. 1 Схема измерений шейки разорванного образца

Как видно из таблицы, для испытаний были выбраны именно деформируемые сплавы, так как опыт применения для этих целей литейных сплавов, в частности силумина [13], оказался неудачным. Дело в том, что для литейных сплавов значение относительного сужения при разрыве, определённое по результатам на одноосное растяжение, сильно зависит от технологии литья, т. е. наличия дефектов, а поэтому не отражает пластичность собственно материала. В то же время при кавитационном воздействии важна пластичность микрообъёмов сплава, т. е. макродефекты литья, по всей видимости, не оказывают влияния на характер упрочнения сплава при кавитационном воздействии.

Основные испытания состояли из двух серий. В первой серии определяли упрочнение сплавов в условиях кавитационного изнашивания. Во второй серии опытов исследовали упрочнение сплавов при статическом нагружении в условиях одноосного сжатия.

Образцы в основных испытаниях имели форму цилиндров диаметром  $d_0 \approx 16$  мм и высотой  $h_0 \approx 24$  мм. Перед испытаниями на кавитационное изнашивание рабочую (торцевую) поверхность образцов шлифовали на шкурках разной зернистости, а затем полировали. А торцевые поверхности образцов, испытываемых на сжатие, только шлифовали.

Испытания на кавитационное изнашивание проводили на ультразвуковом магнестрикционном вибраторе (МСВ) (рис. 2) в мягкой пресной воде при температуре  $20 \pm 3$  оС. Частота колебаний концентратора 4 составляла около 22 кГц, а амплитуда колебаний его торца — примерно 28 мкм. В процессе испытаний МСВ периодически выключали, образцы 5 вынимали из оправки 6, высушивали и взвешивали на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг, а затем проводили измерения микротвёрдости.

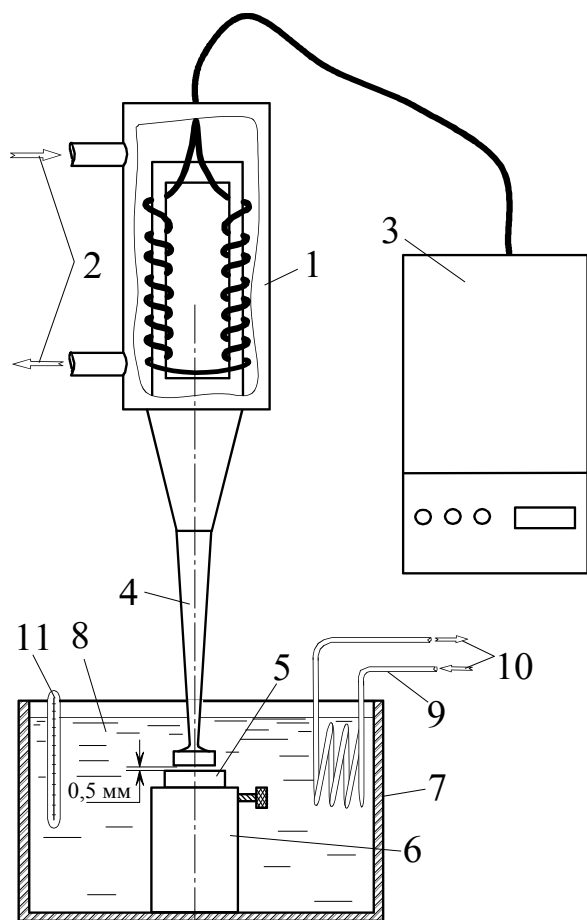


Рис. 2. Схема испытаний на магнестрикционном вибраторе: 1 — ультразвуковой излучатель; 2 и 10 — подвод охлаждающей воды; 3 — генератор ультразвуковых колебаний; 4 — концентратор колебаний; 5 — образец; 6 — крепёжная оправка; 7 — ванночка с водой; 8 — вода; 9 — охлаждающий змеевик; 11 — термометр

Значения микротвёрдости определяли на приборе ПМТ-3 при трёх нагрузках на индентор Виккерса: 0,196; 0,49 и 0,98 Н. При каждой нагрузке наносили шесть отпечатков — по три отпечатка на каждом из двух испытанных образцов — всего 18 отпечатков, и за результат брали среднее арифметическое значение.

По результатам испытаний строили зависимости потерь массы и микротвёрдости от продолжительности кавитационного воздействия.

Для испытаний на сжатие брали по несколько образцов каждого сплава и осаживали образцы каждого сплава на прессе до разной степени деформации (рис. 3). Интенсивность деформации  $e_i$  вычисляли по формуле:

$$e_i = -\ln \frac{h_k}{h_0},$$

где  $h_0$  и  $h_k$  — высота образца до и после сжатия.

После сжатия образцы меди разрезали вдоль оси образца (вариант А, рис. 3), а образцы латуни и алюминиевого сплава — по меридиональному сечению (вариант Б, рис. 3).

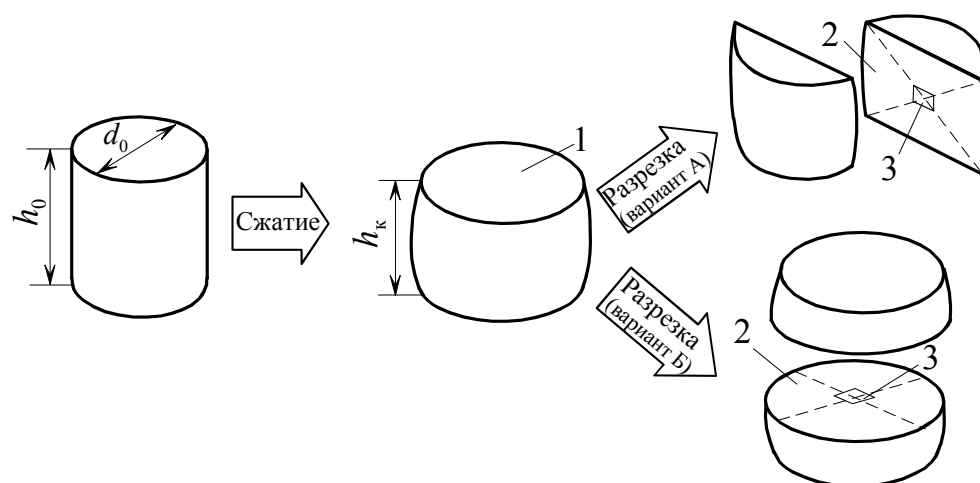


Рис. 3. Вид образца в исходном состоянии, после сжатия и последующей разрезки

После разрезки образцов полученную поверхность 2 (рис. 3) шлифовали на разных абразивных шкурках, начиная с грубой и заканчивая мелкозернистой, а затем тщательно полировали на влажном сукне. Такая обработка была необходима, чтобы убрать наклёпанный слой с поверхности 2, образующийся после разрезки. Несмотря на то, что на торцы 1 образцов перед осаждением на прессе наносили смазочный материал, не удалось избежать «бочкообразности» сжатых образцов, т. е. в районах, которые примыкали к торцевым и исходно цилиндрическим поверхностям образцов, напряжённое состояние отклонялось от одноосного. Поэтому измерения микротвёрдости проводили в центре 3 сечений. Применяемые нагрузки на индентор и количество отпечатков были такими же, что и при измерении микротвёрдости поверхности после кавитационного воздействия. По результатам измерений строили зависимость микротвёрдости от интенсивности деформации.

#### Анализ результатов эксперимента

На рис. 4–6 приведены зависимости потерь массы  $\Delta M$  от продолжительности  $t$  кавитационного воздействия. По этим зависимостям определяли условную продолжительность инкубационного периода, используя рекомендации [10], т. е. по точке пересечения с осью времени касательной  $I$ , проведенной к участку наибольшей скорости изнашивания. Для наглядности на рис. 4–6 наряду с графиками  $\Delta M(t)$  приведены также зависимости микротвёрдости  $H_\mu$  от продолжительности  $t$  испытаний на МСВ. Если сопоставить графики  $\Delta M(t)$  и  $H_\mu(t)$ , то видно, что инкубационный период делится на чередующиеся стадии упрочнения и разупрочнения. На стадиях упрочнения микротвёрдость возрастает, а на стадиях разупрочнения снижается. По зависимостям  $H_\mu(t)$  определяли максимальное значение микротвёрдости, получаемое в конце стадии упрочнения, которое затем необходимо было сравнивать со значением максимального упрочнения, достигаемого при статическом деформировании.

Зависимости микротвёрдости от интенсивности деформаций, полученные по результатам испытаний на одноосное сжатие, представлены на рис. 7, 8 и 9.

Горизонтальные прямые 1 на рис. 7–9 соответствует предельному значению микротвёрдости  $H_{\mu}$ , зарегистрированному на поверхности сплавов при кавитационном воздействии (рис. 4–6). Если предположить, что зависимость твёрдости от интенсивности деформаций является единой независимо от схемы напряжённого состояния [18], а ультразвуковая частота не оказывает влияние на кинетику упрочнения сплава, то по точке пересечения линии 1 с графиком  $H_{\mu}(e_i)$  можно получить критическое значение деформации, т.е. соответствующее началу разрушения материала при кавитационном воздействии.

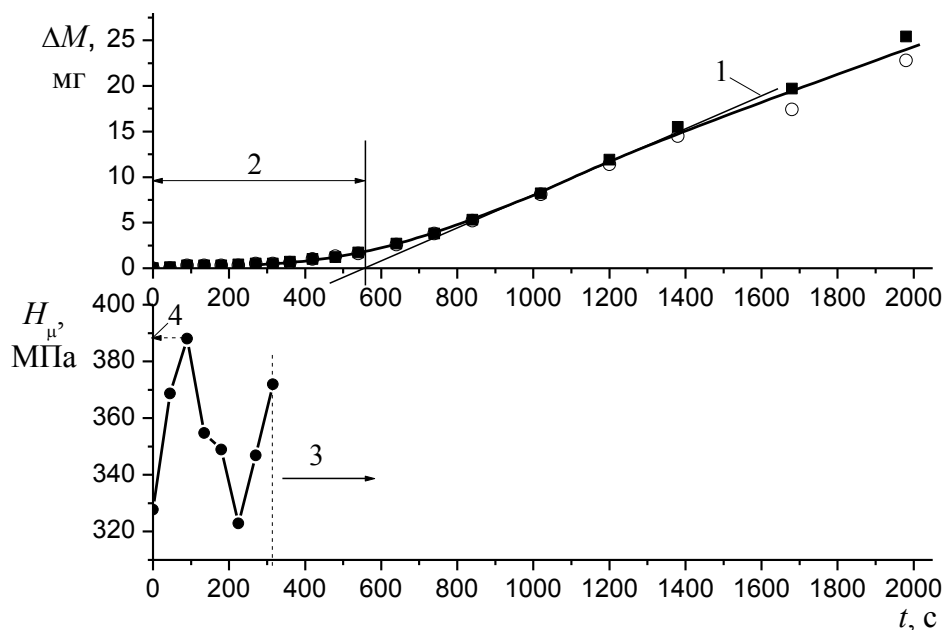


Рис. 4. Кинетика изменения потерь массы (вверху) и упрочнения поверхности (внизу) при кавитационном изнашивании технической меди: ■ — первый образец; ○ — второй образец; 1 — касательная (см. текст); 2 — условный инкубационный период; 3 — зона развитого рельефа (чёткие отпечатки не получаются); 4 — максимальная микротвёрдость



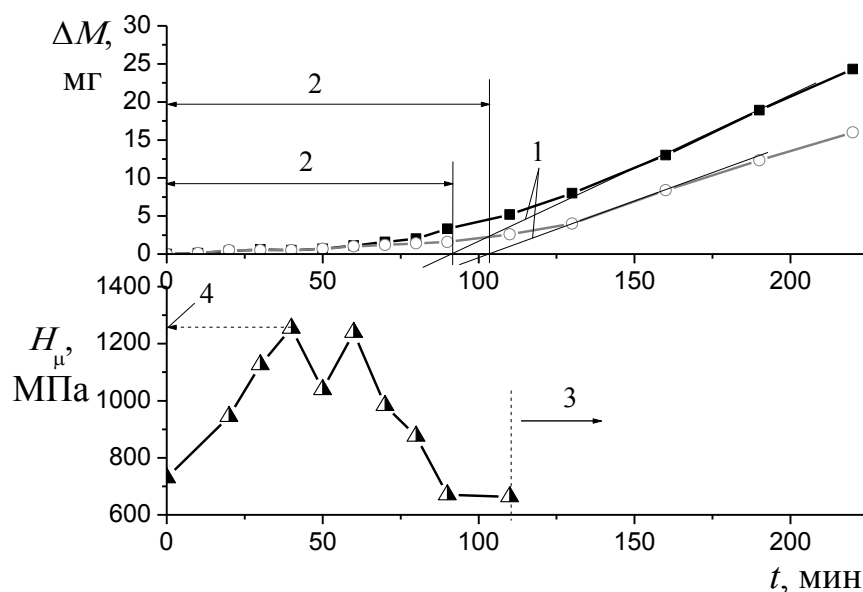


Рис. 5. Кинетика изменения потерь массы (вверху) и упрочнения поверхности (внизу) при кавитационном изнашивании латуни Л60: ■ — первый образец; ○ — второй образец; 1 — касательная (см. текст); 2 — условный инкубационный период; 3 — зона развитого рельефа (чёткие отпечатки не получаются); 4 — максимальная микротвёрдость

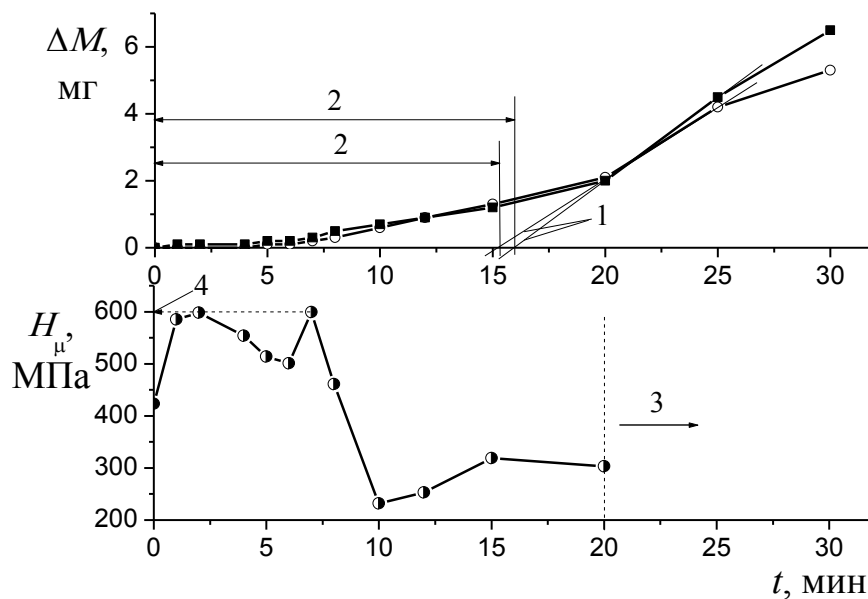


Рис. 6. Кинетика изменения потерь массы (вверху) и упрочнения поверхности (внизу) при кавитационном изнашивании сплава АМг4,0: ■ — первый образец; ○ — второй образец; 1 — касательная (см. текст); 2 — условный инкубационный период; 3 — зона развитого рельефа (чёткие отпечатки не получаются); 4 — максимальная микротвёрдость

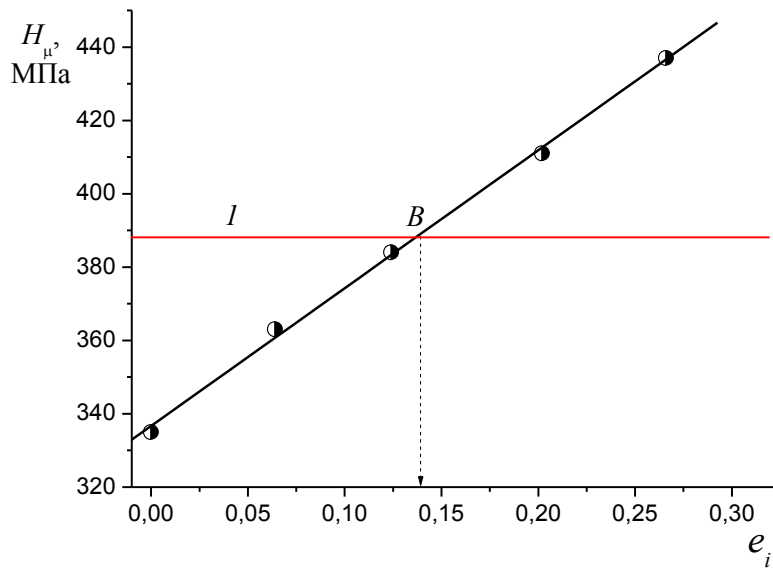


Рис. 7. Зависимость микротвёрдости меди от интенсивности деформации при одноосном сжатии

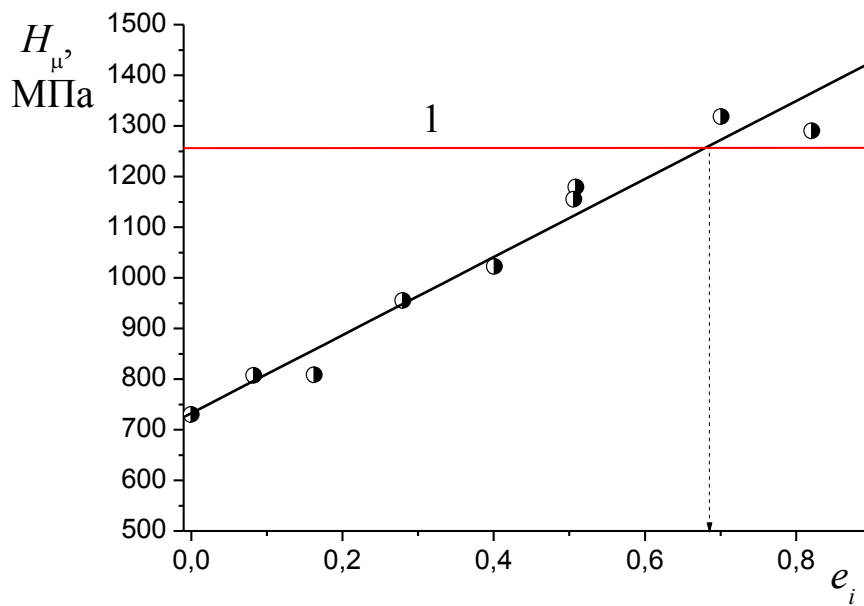


Рис. 8. Зависимость микротвёрдости латуни Л60 от интенсивности деформации при одноосном сжатии

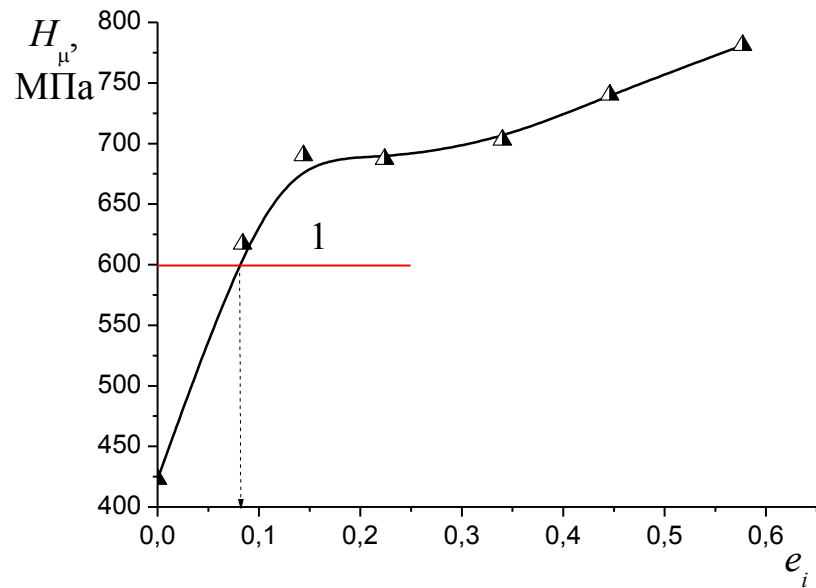


Рис. 9. Зависимость микротвёрдости алюминиевого сплава АМг4,0 от интенсивности деформации при одноосном сжатии

Обработка данных различных исследователей, приведённых в работе [19], позволила получить принципиальный вид зависимости критической степени деформации  $e_{кр}$  от коэффициента жёсткости напряжённого состояния  $\Pi$ , предложенного Г. А. Смирновым-Аляевым [20] в форме:

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения,  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Для уточнения вида зависимостей  $e_{кр}(\Pi)$  для испытанных меди, латуни Л60 и сплава АМг4,0 необходимо было найти значения неизвестных постоянных коэффициентов. Значения постоянных в зависимостях  $e_{кр}(\Pi)$  получили следующим образом. По результатам обмера шеек разорванных образцов вычисляли степень деформации в шейке по формуле

$$e_{кр} = \ln \frac{1}{1 - \psi},$$

где  $\psi$  — относительное сужение при разрыве (см. табл. 1).

А, основываясь на работах Н.Н. Давиденкова и Н. И. Спиридоновой, по радиусу контура шейки и её диаметру вычисляли коэффициент  $\Pi$ :

$$\Pi = 1 + \frac{3 d_{ш}}{4 R}.$$

Подстановка найденных значений  $e_{кр}$  и  $\Pi$  для области шейки разорванных образцов позволила вычислить неизвестные коэффициенты и получить для меди, латуни Л60 и сплава АМг4,0 соответственно следующие зависимости  $e_{кр}(\Pi)$ :

$$e_{кр} = 2,55(1 - 0,1 П) \quad (2)$$

$$e_{кр} = 4,45 \exp(-0,95П) \quad (3)$$

$$e_{кр} = 1,98 \exp(-0,286П) \quad (4)$$

Как видно из графиков рис. 7–9, критические значения деформации, т. е. значения, соответствующие началу разрушения при кавитационном воздействии, составили: для меди  $e_{кр} = 0,14$  (рис. 7), для латуни Л60  $e_{кр} = 0,68$  (рис. 8), а для алюминиевого сплава АМг4,0  $e_{кр} = 0,08$  (рис. 9). Подставив перечисленные значения в выражения (2), (3) и (4) соответственно, получим следующие значения коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния, реализуемой на поверхности при кавитационном воздействии: для меди  $П \approx 9,5$ ; латуни  $П \approx 2,0$ ; алюминиевого сплава АМг4,0  $П \approx 11$ .

Согласно формуле (1) одноосному растяжению соответствует  $П = +1$ , при двухосном равном растяжении  $П = +2$ , а при трёхосном равном растяжении  $П = +\infty$ . Таким образом, значения коэффициентов жёсткости схемы напряжённого состояния, полученные для условий кавитационного воздействия на ультразвуковом МСВ указывает на то, что на поверхности сплавов возникает очень жёсткое напряжённое состояние, более жёсткое, чем при одноосном растяжении. Так для латуни оно соответствует двухосному равному растяжению, а в случае изнашивания меди и алюминиевого сплава в схеме появляется третье главное напряжение.

На первый взгляд, полученные значения коэффициента жёсткости кажутся завышенными и следовало бы ожидать их скорее отрицательными, чем положительными. Однако, если принять, что основной механизм воздействия — удары микроструй, то такие значения коэффициента  $П$  объяснимы. Известно, что вдавливание индентора в поверхность сопровождается поднятием металла вокруг отпечатка, т. е. образованием валика. Опыты по статическому вдавливанию конусов в поверхность показывают, что наибольшие значения коэффициента  $П$  (в упомянутых опытах они соответствовали чистому сдвигу, т. е.  $П = 0$ ), оказались у металла именно на контуре пятна контакта [1]. При схлопывании кавитационных пузырьков удары (см. стрелки на рис. 10) происходят с очень высокими скоростями, и при одновременном ударе нескольких струй в соседние участки поверхности образуются несколько близко расположенных вмятин, а металл между ними выжимается с большой скоростью вверх. Образуется валик (гребень) А и очевидно, что в первую очередь трещины образуются у вершины гребня, так как именно у вершины возникают растягивающие напряжения в плоскости параллельной поверхности. И чем выше гребень, и меньше радиус его скругления, тем больше доля растягивающих напряжений в материале, примыкающем к вершине гребней [21]. Образование частиц износа происходит, по всей видимости, в результате передеформирования материала гребней [22].

Возникновение объёмного напряжённого состояния, когда все три главных напряжения являются растягивающими, указывает на то, что скорости удара очень высоки и достигают нескольких сот метров в секунду. При таких больших скоростях течения металла гребня (см. чёрную стрелку), что наблюдается у сравнительно мягких металлов (меди, сплава АМг4,0), возникают также нормальные напряжения перпендикулярные поверхности из-за большого градиента скорости течения металла, т.е. напряжённое состояние становится объёмным.

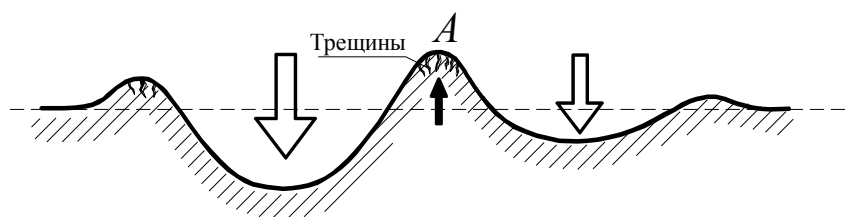


Рис. 10. Схема возникновения растягивающих напряжений в поверхности при ударах микроструй (направление ударов показано стрелками)

Если бы основным механизмом передачи энергии к поверхности были ударные волны от кооперативного схлопывания пузырьков в кавитационном облаке, то тогда было бы зарегистрировано значительно более высокое упрочнение поверхности, так как механическое воздействие на поверхность происходило бы с частотой колебаний концентратора МСВ, т. е. около 22 кГц. Использование в этом случае зависимости  $H_{\mu}(e_i)$ , полученной по результатам пластического деформирования образцов в условиях статического нагружения, для оценки критической степени деформации при кавитационном воздействии, показало бы существенно более высокие значения критической степени деформации.

При передаче энергии от кавитационного облака к поверхности ударными струями, маловероятно попадание микроструй на один и тот же микроучасток поверхности, а значит, и частота нагружения конкретного микрообъёма поверхности будет существенно ниже частоты колебания концентратора МСВ, и эффект влияния ультразвуковой частоты пропадает.

#### **Заключение**

В результате анализа напряжённого состояния поверхности металлов при кавитационном воздействии на ультразвуковых МСВ получены положительные значения коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния. Таким образом, пластическое деформирование поверхности испытанных сплавов происходит в условиях преобладания в схеме напряжённого состояния растягивающих напряжений.

Влияние ультразвуковой частоты на кинетику упрочнения металла при испытании на ультразвуковом МСВ может проявиться только в том случае, если воздействие на поверхность осуществляется посредством ударных волн, образующихся в результате коллективного схлопывания пузырьков в каждом цикле колебаний торца концентратора. В этом случае, при использовании зависимости микротвёрдости от интенсивности пластических деформаций, построенной по результатам одноосного сжатия образцов, были бы получены существенно более высокие значения критической степени деформации поверхностных слоев при кавитационном воздействии, чем зарегистрированные в настоящей работе, а значит, и значения коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния были бы отрицательными.

Основным механизмом передачи энергии от кавитационного облака к поверхности металла, испытываемого на ультразвуковом МСВ, являются ударные микроструи. Вследствие случайного распределения пузырьков в кавитационном облаке под концентратором представляется маловероятным, что в каждом цикле колебаний торца концентратора удар микроструй будет приходиться на один тот же микрообъём поверхности, т. е. исключается влияние ультразвуковой частоты. В то же время одновременный удар нескольких микроструй в участки, окружающие конкретный микрорайон поверхности, может привести к возникновению в последнем значительных растягивающих напряжений.

**Список литературы**

1. Погодаев Л. И., Шевченко П. А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. — Л.: Судостроение, 1984. — 263 с.
2. Gravalos, I., Kateris, D., Xyradakis, P., Gialamas, Th. Cavitation erosion of wet-sleeve liners: Case study // *Journal of Middle European Construction and Design of Cars (MECCA)*. — 2006. — Vol. IV. — No. 3. — p. 10–16.
3. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней. — Л.: Судостроение. — 1978. — 206 с.
4. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
5. Sreedhar B. K., Albert S. K., Pandit A. B. Cavitation damage: Theory and measurements – A review // *Wear*. — 2017. — V. 372–373. — P. 177–196.
6. Петров А. И., Скобелев М. М., Ханычев А. Г. Исследование сравнительной стойкости и кавитационной эрозии образцов материалов и покрытий проточной части гидромашин // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. — 2015. — № 2. — С. 128–137.
7. Kwok C. T., Man H. C., Cheng F. T., Lo K. H. Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion // *Surface and Coatings Technology*. — 2016. — No. 291. — P. 189–204.
8. Qiao Y., Cai X., Chen Y., Cui J., Tang Y., Li H., Jiang Z. Cavitation erosion properties of a nickel-free high-nitrogen Fe-Cr-Mn-N stainless steel // *Materials and technology*. — 2017. — Vol. 51. — No. 6. — P. 933–938.
9. Momeni S., Tillmann W., Pohl M. Composite cavitation resistant PVD coatings based on NiTi thin films // *Materials and Design*. — 2016. — No. 110. — P. 830–838.
10. Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. ASTM 2010. G32-10.
11. Vyas B., Preece C. M. Stress produced in a solid by cavitation // *Journal of Applied Physics*. — 1976. — V.47. — No 12. — P. 5133–5138.
12. Okada T., Iwai Y. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion, Part 1: A method for measurement of collapse pressures // *Wear*. — 1989. — V. 133. — P. 219–232.
13. Tsvetkov Y., Gorbachenko E., Fiaktistov Y. Hardening Peculiarities of Metallic Materials During Wear Under Ultrasonic Cavitation. In: Murgul V., Pukhkal V. (eds) *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1258, pp.409–420, Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_35).
14. Кулёмин А. В., Кононов А. В., Стебельков И. А. Повышение усталостной прочности деталей путём ультразвуковой поверхностной обработки // *Проблемы прочности*. — 1981. — №1. — С. 70–74.
15. Марков А. И., Озерова М. А., Устинов И. Д. Применение ультразвука при алмазном выглаживании деталей // *Вестник машиностроения*. — 1973. — №9. — С. 57–61.
16. Абрамов О. В., Хорбенко И. Г., Швевла И. Г. Ультразвуковая обработка материалов М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
17. McLean D. *Mechanical properties of metals*. Wiley; First Edition, 1962, 403 p.
18. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости. — М.: Машиностроение, 1971. — 199 с.
19. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение. — М.: Металлургиздат, 1970. — 196 с.
20. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов. — Л.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
21. Bowden E. P., Brunton J. H. // *Proceedings of Royal Society, London*. — A282. — 1964. — V. 331. — P. 549–565.
22. Vyas B., Preece C. M. Cavitation erosion of face centered cubic metals // *Metallurgical Transactions A*. — 1977 June. — V.8A. — P. 915–923.

**References**

1. Pogodayev, L.I., Shevchenko, P.A. *Gidroabrasivnyi i kavitatsionnyi iznos sudovogo oborudovaniya* [Hydroabrasive and cavitation wear of ship equipment]. L.: Sudostroyeniye, 1984. 263p. (In Russ).
2. Gravalos, I., Kateris, D., Xyradakis, P., Gialamas, Th. Cavitation erosion of wet-sleeve liners: Case study // *Journal of Middle European Construction and Design of Cars (MECCA)*. 2006. Vol IV. No. 3, Pp. 10–16.
3. Georgievskaya, E.P. *Kavitatsionnaya eroziya grebnyh vintov i metody borby s ney* [Cavitation erosion of ship propellers and methods of controlling it]. L.: Sudostroyeniye, 1978. 206p. (In Russ).
4. Tsvetkov, Y. N. *Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya* [Cavitation wear of metals and equipment]. SPb.: SPbGPU Publ, 2003. 155p. (In Russ).
5. Sreedhar B. K., Albert S. K., Pandit A. B. Cavitation damage: Theory and measurements – A review // *Wear*. — 2017. — V. 372–373. — P. 177–196.
6. Petrov, A. I., Skobelev, M.M., Hanychev, A.G. *Issledovaniye sravnitelnoy stoikosti i kavitatsionnoy erozii obraztsov materialov i pokrytiy protochnoy chasti gidromashin* [Research into the comparative resistance and cavitation erosion of materials samples and coatings of hydraulic machine water passages] // *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana. Seriya «Mashinostroyeniye»*. 2015. № 2. pp.128–137, (In Russ). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-2-128-137
7. Kwok C. T., Man H. C., Cheng F. T., Lo K. H. Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion // *Surface and Coatings Technology*. 2016. No. 291, Pp. 189–204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.019>
8. Qiao Y., Cai X., Chen Y., Cui J., Tang Y., Li H., Jiang Z. Cavitation erosion properties of a nickel-free high-nitrogen Fe-Cr-Mn-N stainless steel // *Materials and technology*. 2017. Vol 51. No. 6, Pp. 933–938.
9. Momeni S., Tillmann W., Pohl M. Composite cavitation resistant PVD coatings based on NiTi thin films // *Materials and Design*. 2016. No. 110, Pp. 830–838. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.054>
10. Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. ASTM 2010. G32-10.
11. Vyas B, Preece C. M. Stress produced in a solid by cavitation // *Journal of Applied Physics*. 1976. Vol 47. No 12, Pp. 5133–5138.
12. Okada T., Iwai Y. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion, Part 1: A method for measurement of collapse pressures // *Wear*. 1989. Vol 133, Pp. 219–232.
13. Tsvetkov Y., Gorbachenko E., Fiaktistov Y. Hardening Peculiarities of Metallic Materials During Wear Under Ultrasonic Cavitation. In: Murgul V., Pukhkal V. (eds) *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. EMMFT 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1258, pp.409–420, Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_35).
14. Kulemin, A.V., Kononov, A.V., Stebelkov I.A. *Povysheniye ustalostnoy prochnosti denaley putem ulltrazvukovoy poverhnostnoy obrabotki* [Increase in fatigue resistance of parts through ultrasonic surface treatment] // *Problemi prochnosti*. 1981. No.1, Pp. 70–74, (In Russ).
15. Markov, A. I., Ozerova M. A., Ustinov I. D. *Primeneniye ultrazvuka pri almaznom vyglazhivanii detaley* [Use of ultrasonic in diamond smoothing the parts] // *Vestnik mashinostroyeniya*.1973. No.9, Pp. 57–61, (In Russ).
16. Abramov, O.V., Horbenko I.G., Shveгла I.G. *Ultrazvukovaya obrabotka materialov* [Ultrasonic treatment of materials]. M.: Mashinostroyeniye, 1984. 280 p. (In Russ).
17. McLean D. *Mechanical properties of metals*. Wiley; First Edition, 1962, 403 p.
18. Del, G.D. *Opredeleniye napryazheniy v plasticheskoy oblasti po raspredeleniyu tverdsti* [Determination of stresses in plastic area by hardness distribution]. M.: Mashinostroyeniye, 1971. 199 p. (In Russ).
19. Kolmogorov, V. L. *Napryazheniya, deformatsii, razrusheniye* [Stresses, strains, failure]. M.: Metallurgizdat, 1970. 196 p. (In Russ).

20. Smirnov-Alyayev, G. A. *Mechanicheskiye osnovi plasticheskoy obrabotki metallov* [Mechanical basis of plastic metalworking]. L.: Mashinostroyeniye, 1968. 272 p. (In Russ).
21. Bowden E. P., Brunton J. H. // *Proceedings of Royal Society, London. A282.* 1964. Vol 331, pp. 549–565.
22. Vyas B., Preece C. M. Cavitation erosion of face centered cubic metals// *Metallurgical Transactions A.* 1977. Vol 8A. pp. 915–923.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Фиактистов Ярослав Олегович**, старший преподаватель кафедры технологии судоремонта Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7, e-mail: yaroslav3373@mail.com

**Yaroslav O. Fiaktistov** – senior lecturer of ship repair subdepartment Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, Russia, 198035, e-mail: yaroslav3373@mail.com

**Цветков Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой технологии судоремонта, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7, e-mail: yuritsvet@mail.ru

**Yuriy N. Tsvetkov** – doctor of engineering science, professor, head of ship repair subdepartment, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, d. 5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, Russia, 198035, e-mail: yuritsvet@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.12.2021; опубликована онлайн 21.03.2022.  
Received 02.12.2021; published online 21.03.2022.