

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-54-64
УДК 629.12:532.528

ОЦЕНКА ДИАМЕТРА СТРУЙ ВОДЫ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЛОПАСТЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ

Ю. Н. Цветков, Я. О. Фиактистов, Е. О. Горбаченко

*Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Произведен анализ структуры очагов кавитационного износа на лопастях гребных винтов, изготовленных из алюминиевых бронз разного состава. Наиболее информативными в очаге износа являются зона наклепа и периферийная зона, по которым можно оценить параметры механического воздействия при схлопывании кавитационных каверн. Вмятины, образующиеся на поверхности металлов при изнашивании в условиях гидродинамической кавитации, имеют в донной части сферический участок, в который можно вписать окружность определенного диаметра. Проведены эксперименты по вдавливанию шаровых инденторов в поверхность металлических материалов. В первой серии экспериментов проводили вдавливание при нагрузках 1 470; 980 и 588 Н стального шарика диаметром 1,588 мм в поверхность 33 сплавов разной твердости. Диаметры отпечатков измеряли с использованием лупы Бринелля. Оказалось, что между деформацией во вмятинах на поверхности металлических материалов, испытанных в условиях гидродинамической кавитации, и твердостью материалов существует степенная зависимость, аналогичная зависимости, получаемой при вдавливании сферических инденторов в поверхность сплавов разной твердости. Во второй серии экспериментов произведено моделирование зоны наклепа очага кавитационного износа лопастей винтов многократным вдавливанием сферических инденторов диаметрами 1,588; 2,5; 3,175 и 5,0 мм в пластины из бронзы БрАЖНМц9-4-4-1, имеющие размеры 100 × 50 × 20 мм. Вдавливание осуществляли в поверхность 100 × 50 мм, предварительно отшлифованную и отполированную, при этом соблюдали условие одинаковой степени деформации в отпечатках разного диаметра. Получена прямая пропорциональная зависимость между средним арифметическим отклонением профиля поверхности и диаметром индентора. Применение полученной зависимости для случая кавитационного воздействия на поверхность лопастей позволило установить, что диаметр струй, ударяющих по поверхности лопасти винта диаметром 3 700 мм, составляет около 10 мм. Полученное значение позволит более обоснованно выбирать экспериментальное оборудование и режим испытаний материалов гребных винтов на кавитационное изнашивание.

Ключевые слова: лопасть гребного винта, кавитационное изнашивание, удары струй, диаметр струй, пластическая деформация, вмятина, шероховатость, алюминиевая бронза, шариковый индентор, отпечаток индентора.

Для цитирования: Цветков Ю. Н., Фиактистов Я. О., Горбаченко Е. О. Оценка диаметра струй воды, воздействующих на поверхность лопастей гребных винтов при кавитационном изнашивании // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 1. С. 54–64. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-54-64.

Введение

Кавитационное изнашивание – разрушение поверхности при воздействии струй жидкости и ударных волн, образующихся при схлопывании в жидкости кавитационных каверн вблизи поверхности. Очаги кавитационного износа на металлических деталях имеют грубую, рваную поверхность и оказывают отрицательное влияние на КПД и прочность оборудования. В сфере

водного транспорта с кавитационным изнашиванием часто сталкиваются при эксплуатации судовых движительных комплексов: гребных винтов (ГВ) и их направляющих насадок [1, 2]. Гребной винт – очень важное и дорогостоящее изделие, а ремонт изношенных лопастей ГВ является трудоемкой процедурой, в этой связи развитие технологий восстановления изношенной поверхности, позволяющих существенно сократить время ремонта, является актуальной проблемой. Разработка подобных технологий предполагает проведение испытаний новых материалов на кавитационную износостойкость на лабораторных установках. Достоверность результатов испытаний зависит от правильного выбора типа установки и режима испытаний. Как известно, возможны два механизма передачи энергии от области кавитации к поверхности: ударными волнами и ударными струями [3]. По нашему мнению, последний механизм является основным при изнашивании таких объектов, как гребные винты. Это подтверждается анализом геометрии вмятин на поверхности лопастей.

Большое влияние на механизм разрушения поверхности оказывает размер струй, действующих на поверхность при схлопывании кавитационных каверн, особенно когда речь идет о неоднородных материалах. Однако данные о размерах струй применительно к натурным объектам отсутствуют.

Прямые измерения струй, генерируемых при схлопывании кавитационных каверн, на натуральных объектах не применимы. В этой связи оправданным представляется применение косвенного метода, позволяющего по какой-либо характеристике изношенной поверхности, доступной для измерения, произвести оценку диаметра струй.

Цель настоящей работы – разработка методики косвенного определения диаметра струй воды, ударяющих по поверхности лопастей ГВ морских водоизмещающих судов при кавитационном изнашивании.

Выбор метода и методики исследований

На практике самой доступной информацией о характере кавитационных повреждений поверхностей, которую можно получить по результатам измерений и представить в виде однозначно трактуемых численных значений, является информация о геометрических параметрах очага износа и рельефе его поверхности. Очевидно, что чем больше диаметр струй, тем больше диаметр и глубина вмятин, поэтому было выдвинуто предположение о зависимости между диаметром струй, ударяющих по поверхности при кавитационном изнашивании, и высотой неровностей изнашиваемой поверхности. Таким образом, наиболее подходящим представляется проведение оценки диаметра струй по характеру неровностей, образующихся на поверхности, а для этого надо располагать калибровочной зависимостью высоты неровностей от диаметра струй. На практике такую зависимость представляется возможным смоделировать с использованием метода вдавливания в поверхность сферических инденторов разного диаметра. Значит, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать очаги кавитационного износа на ГВ для выбора характерных участков в пределах очага;
- провести сопоставительный анализ геометрии вмятин, образующихся на поверхности при гидродинамической кавитации и при вдавливании сферических инденторов, и деформаций в материале вмятин;
- получить график зависимости высоты неровностей от диаметра индентора.

Анализ очагов кавитационного износа на лопастях судовых движителей провели на нескольких морских судах: «Ангара», «Ариес», «Atlantic runner», «Belbek» и «Профессор Логачев». Все ГВ были изготовлены из алюминиевых бронз разных составов. На всех ГВ анализ очагов проводился визуально; при этом на ГВ двух судов – «Ариес» и «Профессор Логачев» – проводился также обмер профиля поверхности очагов кавитационного износа. Обмер проводили щуповым методом с помощью индикатора часового типа по методике, описанной в работе [4].

Для оценки геометрии отдельных кавитационных вмятин на лопастях ГВ с поверхности очага износа ГВ теплохода «Ангара» были сняты слепки, с помощью которых исследовали профиль отдельных вмятин. Так же, как и в случае обмеров очагов износа, профиль отдельных вмятин на слепках исследовали щуповым методом с помощью измерительной головки «Калибр» с ценой деления 0,002 мм. Головку устанавливали на магнитной стойке, а слепок укладывали на

микрометрический столик, наконечник измерительной головки прижимали к поверхности слепка и, вращая микрометрические винты столика, перемещали слепок с шагом 0,05 мм, регистрируя при этом показания головки.

Опыты по вдавливанию шаровых инденторов проводили на твердомере ТК-3, применяемом для измерений твердости по методу Роквелла, при разных нагрузках. Опыты состояли из двух серий.

В первой серии экспериментов проводили вдавливание стального шарикового индентора диаметром 1,588 мм в поверхность 33 сплавов разной твердости. В эту выборку входили все известные сплавы, применяемые для изготовления ГВ, а также литейные и деформируемые сплавы, используемые в судовом машиностроении и судоремонте. Вдавливание осуществляли при нагрузках 1 470; 980 и 588 Н. Диаметры отпечатков измеряли с использованием лупы Бринелля.

Вторую серию опытов проводили на пластинах из бронзы БрАЖМц9-4-4-1 – деформируемом аналоге литейной бронзы БрА9Ж4Н4Л, используемой для изготовления ГВ. Пластины имели размеры 100 × 50 × 20 мм. Одну из граней 100 × 50 мм шлифовали на шкурках разной зернистости и полировали на сукне. В эту грань вдавливали шариковые инденторы разного диаметра: 1,588; 2,5; 3,175 и 5,0 мм, при этом соблюдали условие одинаковой степени деформации в отпечатках разного диаметра. Каждый индентор вдавливали многократно в пределах небольшой квадратной площади S , отмеченной на поверхности пластины (табл.) таким образом, чтобы отпечатки многократно перекрывались, тем самым имитируя зону B – зону наклепа в очаге кавитационного износа ГВ (рис. 1).

Значения нагрузки на шарики разного диаметра при вдавливании их в бронзу БрАЖМц9-4-4-1 и размеры площадей, в пределах которых осуществляли вдавливание

Диаметр D , мм	Деформация в отпечатке $\varepsilon = 0,052$			Деформация в отпечатке $\varepsilon = 0,018$		
	Нагрузка на индентор F , Н	Площадь S , мм × мм	Количество отпечатков	Нагрузка на индентор F , Н	Площадь S , мм × мм	Количество отпечатков
1,588	350	5,0 × 5,0	300	100	10,0 × 10,0	1 000
2,5	867	7,9 × 7,9		248	15,7 × 15,7	
3,175	1 399	10,0 × 10,0		400	20,0 × 20,0	
5,0	3 470	15,7 × 15,7		993	31,5 × 31,5	

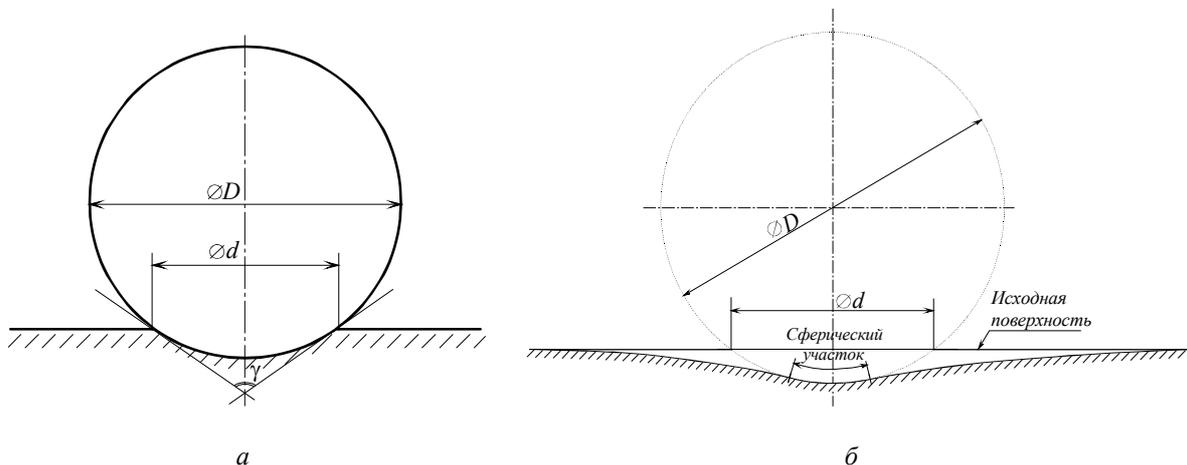


Рис. 1. Схема вдавливания шарового индентора в металл (а) и сфера, вписанная во вмятину (б), оставленную на поверхности алюминия при его испытании в диффузоре [5]

Значения площадей S при переходе к индентору другого диаметра рассчитывали по формуле

$$S_2 = S_1(D_2 / D_1)^2,$$

где S_1 и S_2 – значения площадей, в пределах которых происходило вдавливание инденторов диаметрами D_1 и D_2 соответственно.

Из предположения единой зависимости интенсивности деформации в сферическом отпечатке от давления на его стенки следует: чтобы создать одинаковое давление в отпечатке, необходимо обеспечить равенство соотношения F / D^2 , где F – нагрузка на шариковый индентор. Таким образом, рассчитали требуемое усилие для вдавливания шариков разного диаметра (см. табл.). При вдавливании шарика диаметром 5,0 мм для обеспечения деформации в отпечатке, равной 0,052, значение нагрузки вышло из диапазона, обеспечиваемого твердомером Роквелла (см. табл.), поэтому использовали в этом случае прибор ТШ-2М для измерения твердости по методу Бринелля. Значения деформаций (0,018 и 0,052) в отпечатках, указанные в таблице, выбирали таким образом, чтобы иметь возможность использовать для нанесения большинства отпечатков твердомер Роквелла с грузами, имеющимися в распоряжении.

Шероховатость в пределах каждой из площадей, указанных в таблице, измеряли щуповым методом. Для измерения шероховатости в пределах площадей вдавливания с деформацией в отпечатках 0,052 использовали измерительную головку «Калибр», установленную на магнитной стойке, по методике, описанной выше для случая обмера слепков. Для площадей вдавливания с деформацией в отпечатках 0,018 применяли прибор MahrSurf PS1. В последнем случае для того чтобы прибор не отфильтровывал гармоники большого шага, выбрали базовую длину, равную 2,5 мм, при этом с учетом чувствительности параметров шероховатости к значению базовой длины она была одинаковой во всех измерениях. Для того чтобы длина трассирования щупа помещалась в пределах очага вдавливания, количество базовых длин в пределах длины оценки назначили равным 2.

Деформация в отпечатке при вдавливании шарового индентора увеличивается с увеличением отношения диаметра отпечатка d к диаметру индентора D (рис. 1, *a*), т. к. при увеличении d / D уменьшается угол γ конуса, вписанного в отпечаток [6]. В настоящей работе интенсивность деформации в отпечатках рассчитывали по следующей зависимости [7]:

$$\varepsilon = 0,2 \frac{d}{D}. \quad (1)$$

Для сравнения с отпечатками, полученными при вдавливании шариковых инденторов, использовались не только результаты измерения профиля отдельных вмятин на лопастях ГВ после кавитационного воздействия, но также были обработаны результаты обмеров вмятин, образующихся на поверхности сплавов разной твердости – свинца, алюминия, меди, латуни Л62 и нержавеющей хромоникелевой стали – в условиях гидродинамической кавитации при испытании в диффузоре, представленные в работе [5].

Как оказалось, все вмятины имеют сферическое дно, в которое можно вписать сферу определенного радиуса (рис. 1, *б*), т. е. можно уподобить процесс внедрения струи в поверхность на начальной стадии процессу внедрения сферического индентора. При этом в отличие от вдавливания металлического индентора (рис. 1, *a*) при ударе струй в результате их последующего растекания происходит «завал» стенок вмятин, проявляющийся тем сильнее, чем меньше твердость сплава, и только на дне вмятин остается сферический участок. В случае испытаний в диффузоре образующиеся вмятины являются симметричными (рис. 1, *б*), при этом для сплавов твердостью, сопоставимой с твердостью бронз, применяемых для изготовления ГВ, отмеченным «завалом» можно пренебречь. Что касается вмятин на лопастях ГВ, то они имеют выраженный несимметричный характер, вызванный косым ударом струй, образующихся при схлопывании кавитационных каверн, по поверхности лопасти. Вместе с тем и на вмятинах, образующихся на ГВ, тоже существует сферический участок. Поэтому интенсивность деформации в материале вмятин, полученных при кавитации, оценивали также по формуле (1), предварительно определив диаметр D окружности, вписанной в сферический участок вмятины, и диаметр d условного отпечатка, определяемый как расстояние между точками пересечения вписанной окружности с линией, обозначающей уровень исходной поверхности (рис. 1, *б*).

Результаты экспериментов и их анализ

Измерения профиля поверхности очагов износа позволили выделить три зоны в пределах очага кавитационного износа (рис. 2): *C* – зону отделившегося материала, расположенную в центре очага; *B* – зону наклепа, расположенную вокруг зоны *C*; *A* – периферийную зону, являющуюся переходной от собственно очага износа к поверхности лопасти, незатронутой кавитаци-

онным воздействием. В пределах зоны *A* участки исходной поверхности чередуются с расположенными случайным образом неперекрывающимися вмятинами от ударов струй, образующихся при схлопывании кавитационной каверны. Наиболее информативными представляются зоны *A* и *B*.

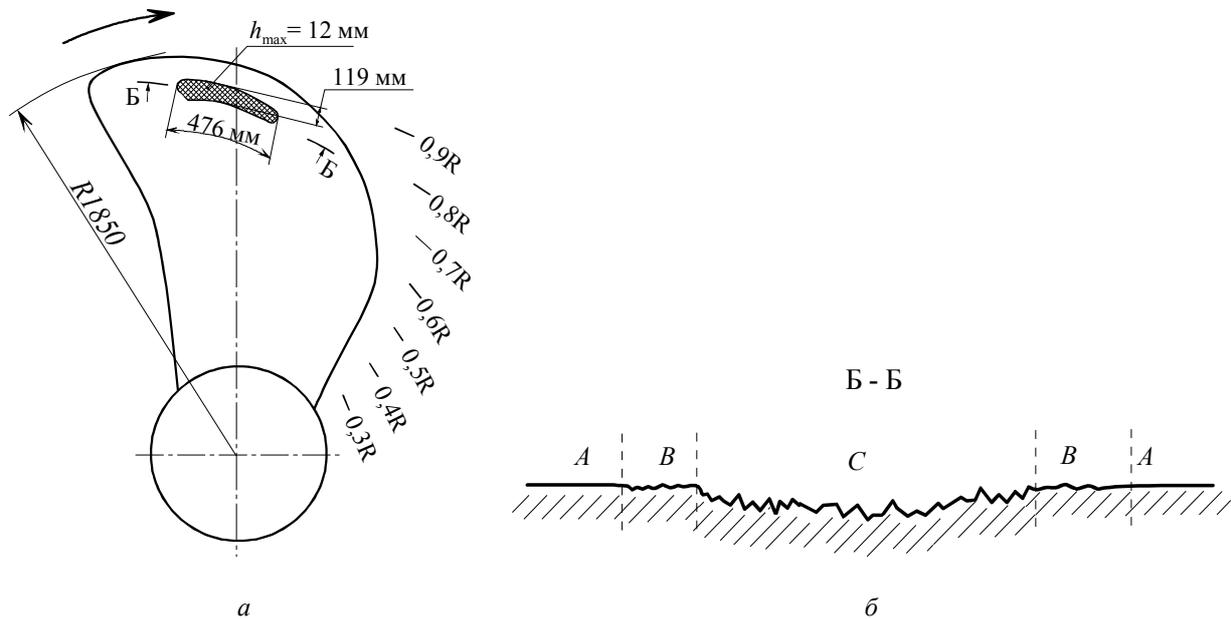


Рис. 2. Схема расположения: *a* – очагов кавитационного износа на лопастях бронзовых ГВ теплохода «Профессор Логачев»; *б* – отдельных зон очага износа

Опыты по вдавливанию шарового индентора диаметром 1,588 мм, проведенные на твердомере Роквелла, доказали, что между интенсивностью деформации в отпечатке, вычисленной по формуле (1), и твердостью сплавов существует зависимость степенного вида (рис. 3):

$$\varepsilon = \text{const}HV^n, \quad (2)$$

где *const* – опытная постоянная; *n* – показатель степени; *HV* – твердость по Виккерсу, МПа·10.

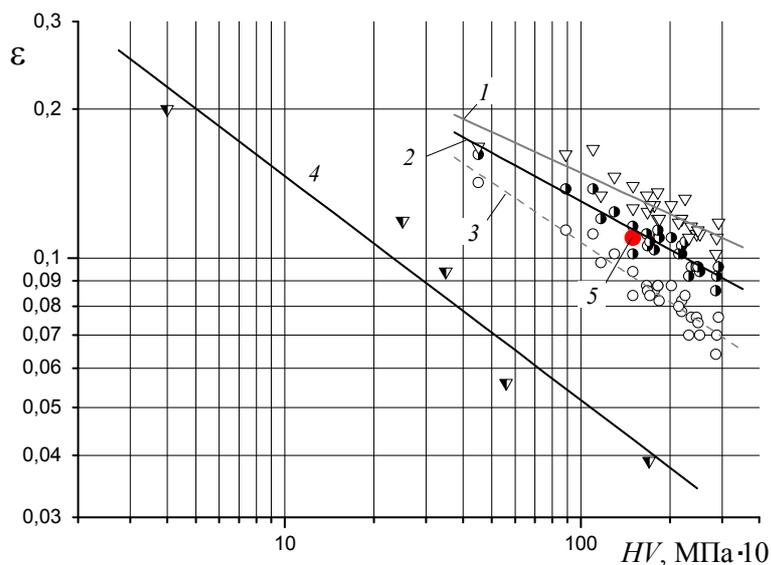


Рис. 3. Зависимости деформации ε в отпечатках, полученных при вдавливании шарика диаметром 1,588 мм на твердомере Роквелла при нагрузке 1 470 Н (1); 980 Н (2); 588 Н (3) и при схлопывании кавитационных каверн в диффузоре (4), от твердости сплава по Виккерсу *HV*: 5 – точка, соответствующая вмятинам на ГВ

Согласно рис. 3 с увеличением нагрузки на индентор зависимости $\epsilon(HV)$ опускаются ниже и показатель степени при HV при этом увеличивается: при нагрузке на индентор 1 470 Н показатель $n = -0,285$, при нагрузке 980 Н показатель $n = -0,336$, а при 588 Н показатель $n = -0,399$.

Оказалось, что для условий гидродинамической кавитации также действительно соотношение (2), но показатель степени $n = -0,450$, при этом линия графика $\epsilon(HV)$ еще больше опустилась вниз (см. 4 на рис. 3), т. е. имеют место общие закономерности в процессах деформирования металлической поверхности при вдавливании в нее сферического индентора и водяной струи.

Точка, соответствующая среднему значению интенсивности деформаций во вмятинах на лопастях ГВ теплохода «Ангара», также нанесена на график $\epsilon(HV)$ (см. 5 на рис. 3). Очевидно, что деформации во вмятинах на разных ГВ будут несколько отличаться, но с достаточной уверенностью можно сказать, что гипотетическая зависимость $\epsilon(HV)$ для ГВ укладывается между зависимостями 1 и 3 (рис. 3). То есть если сравнивать стационарную гидродинамическую кавитацию, генерируемую в диффузоре (зависимость 4), с кавитацией лопастей ГВ, имеющей выраженный нестационарный характер [1], то кавитация ГВ обладает существенно более высокой эрозионной способностью по сравнению с кавитацией в диффузоре.

С целью определения нагрузки на шариковый индентор диаметром 1,588 мм, обеспечивающей заданную интенсивность деформации в отпечатке при вдавливании индентора в материалы заданной твердости, графики на рис. 3 перестроили в осях $\epsilon(F)$ (рис. 4).

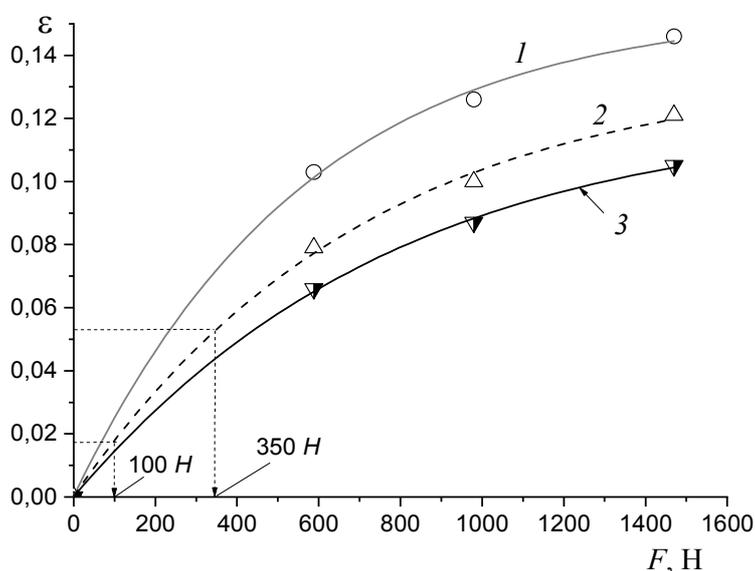


Рис. 4. Зависимости деформации ϵ в отпечатке от нагрузки F на шариковый индентор диаметром 1,588 мм при вдавливании его в сплавы твердостью по Виккерсу:
1 – 1 000 МПа; 2 – 2 000 МПа; 3 – 3 000 МПа

Для того чтобы определить нагрузку, обеспечивающую деформацию, равную 0,018 и 0,052, в отпечатках на поверхности пластин из бронзы БрАЖНМц9-4-4-1 твердостью около 2 000 HV , проведем горизонтальные линии от указанных значений деформации до зависимости 2 (рис. 4) и опустим от точек пересечения перпендикуляры на ось абсцисс. Для получения деформации 0,018 к индентору диаметром 1,588 мм необходимо приложить силу, равную 100 Н, а для получения деформации 0,052 – силу, равную 350 Н. На основе полученных нагрузок были рассчитаны по методике, изложенной выше, значения усилий, необходимые для обеспечения указанных значений деформаций в отпечатках при вдавливании шариковых инденторов диаметрами 2,5; 3,175 и 5 мм (см. табл.).

Затем каждым индентором в пределах площади S наносили большое количество отпечатков так, чтобы они несколько раз частично или полностью перекрывались, тем самым создавался модельный участок зоны B реального очага кавитационного износа. Измерения значения среднего арифметического отклонения профиля R_a в пределах каждой площади позволили получить зависимости параметра R_a от диаметра D индентора (рис. 5).

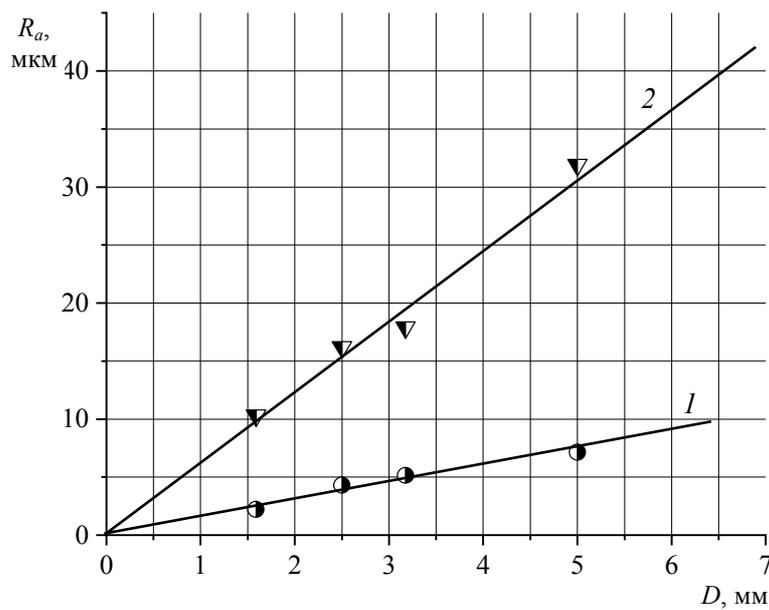


Рис. 5. Зависимость параметра R_a поверхности бронзы БрАЖНМц9-4-4-1, сформированной при многократном вдавливании в нее шарикового индентора, от диаметра индентора при обеспечении деформации в отпечатке: 1 – 0,018 мм; 2 – 0,052 мм

Графики $R_a(D)$ оказались линейными и проходящими через начало координат, т. е. их можно аппроксимировать зависимостями:

$$R_a = kD, \quad (3)$$

где R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; D – диаметр шарикового индентора, мм; k – коэффициент пропорциональности, $k = 6,15$ мкм/мм для деформации в отпечатке, равной 0,052 мм, и $k = 1,43$ мкм/мм для деформации в отпечатке, равной 0,018 мм.

Очевидно, что для случая $\varepsilon = 0$ угловой коэффициент $k = 0$. Полученные три точки после нанесения на график с координатами $\varepsilon - k$ сформировали полиномиальную зависимость $k(\varepsilon)$, аппроксимируемую функцией следующего вида

$$k = 67\varepsilon + 979\varepsilon^2, \quad (4)$$

где k – угловой коэффициент в уравнении (3); ε – интенсивность деформаций в отпечатке.

Измерения профиля вмятин на лопастях ГВ из бронзы Cunial теплохода «Ангара» и расчет деформации в них по формуле (2) свидетельствуют, что в среднем $\varepsilon \approx 0,09$. Подставив это значение в выражение (4), получим $k \approx 14$, т. е. для ГВ выражение (3) примет вид:

$$R_a = 14D. \quad (5)$$

В формуле (5) переменная D в отличие от выражения (3) обозначает диаметр головной части струи, ударяющей по поверхности лопасти при кавитационном воздействии.

Выражение (5) позволяет по известному значению R_a поверхности лопасти в зоне наклепа очага кавитационного износа произвести оценку диаметра струй воды, ударяющих по лопасти при кавитационном изнашивании. Для этого провели измерения шероховатости в зоне наклепа на ГВ судна «Профессор Логачев». Винт имел диаметр 3 700 мм и был изготовлен из бронзы БрА9Ж4Н4Л. График зависимости параметра R_a поверхности очага износа от расстояния L условного центра очага (рис. 6) можно разбить на три участка, соответствующих зонам А, В и С (см. рис. 2).

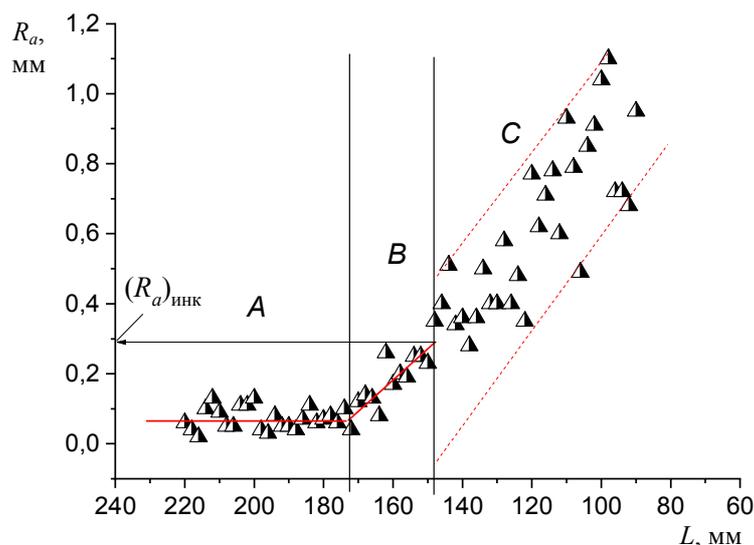


Рис. 6. Зависимость среднего арифметического отклонения R_a высоты неровностей профиля очага кавитационного износа на лопасти № 2 ГВ судна «Профессор Логачев» от расстояния L от условного центра очага износа

В формулу (5) надо подставить значение R_a , определенное по зоне B , т. е. зоне, в которой имеет место передеформирование металла под действием многократных ударов струй, но отделения металла еще нет. Однако возникают следующие вопросы. Во-первых, шероховатость в зоне B изменяется от некоторого исходного значения, соответствующего зоне A , до значения $(R_a)_{инк}$, соответствующего окончанию инкубационного периода и началу отделения частиц износа. Во избежание большой ошибки приняли решение взять в качестве расчетного для подстановки в уравнение (5) значение шероховатости, соответствующее середине зоны B , т. е. определить его как

$$R_a = [(R_a)_{исх} + (R_a)_{инк}] / 2, \quad (6)$$

где $(R_a)_{исх}$ – среднее арифметическое отклонение профиля исходной поверхности; $(R_a)_{инк}$ – значение среднего арифметического отклонения профиля поверхности, соответствующее окончанию инкубационного периода.

Средний участок зоны B , по всей видимости, в наибольшей степени соответствует модельной ситуации, воспроизводимой при многократных вдавливаниях индентора в бронзовую пластину. Во-вторых, при использовании формулы (6) необходимо решить, какое значение подставлять в качестве $(R_a)_{исх}$. Согласно ГОСТ 8054-81 параметр R_a поверхности концевых районов лопастей ГВ высшего класса не должен превышать 1,25 мкм; но согласно рис. 6 в зоне A параметр $R_a = 70\text{--}80$ мкм, что существенно выше значения, регламентируемого ГОСТ 8054-81. Отмеченный факт не может быть объяснен только наличием отдельно расположенных кавитационных вмятин в этой зоне. Основная причина увеличения шероховатости поверхности ГВ в эксплуатации – в коррозионном воздействии движущейся морской воды [8].

Очевидно, что неровности, образующиеся вследствие коррозионного воздействия, имеют шаг существенно меньше шага неровностей, образующихся при кавитационных ударах, поэтому было принято решение в формулу (6) подставить значение $(R_a)_{исх} = 1,25 \approx 0$ мкм. Так как $(R_a)_{инк} \approx 300$ мкм (рис. 6), то значение параметра шероховатости, рассчитанное по формуле (6), $R_a \approx 150$ мкм. Подставив это значение в (5), получим диаметр головной части струй, воздействующих на поверхность лопастей при схлопывании кавитационных каверн, $D \approx 10$ мм.

Полученное значение является лишь оценочным, полученным для ГВ диаметром 3 700 мм. Известно, что при прочих равных условиях с изменением диаметра ГВ пропорционально будут изменяться и размеры кавитационных каверн, а значит, и диаметры струй, образующихся при их схлопывании. Изменения могут быть очень большими, принимая во внимание, что диаметры ГВ морских судов варьируются от 1,0 до 7,5 м. При моделировании зоны наклепа очага кавитаци-

онного износа лопастей вдавливанием инденторов разного диаметра не принимали во внимание, что удар струй на натуральных ГВ происходит под углом к поверхности лопасти. Однако полученный результат очень важен. Он указывает на то, что диаметр струй, воздействующих на поверхность лопастей движителей водоизмещающих судов при кавитационном изнашивании, составляет как минимум несколько миллиметров, что позволяет обоснованно выбрать условия испытаний материалов на кавитационное изнашивание.

Выводы

1. В очаге кавитационного износа лопастей ГВ можно выделить три характерные зоны: зону отделившегося материала, зону наклепа и периферийную зону, являющуюся переходной от собственно очага износа к поверхности лопасти, незатронутой кавитационным воздействием. Наиболее информативными являются две последние зоны, по которым можно оценить параметры механического воздействия при схлопывании кавитационных каверн.

2. Вмятины, образующиеся на поверхности металлических материалов при изнашивании в условиях гидродинамической кавитации, имеют в донной части сферический участок, в который можно вписать окружность определенного диаметра. При этом между деформацией во вмятинах на поверхности металлических материалов, испытанных в условиях гидродинамической кавитации, и твердостью материалов существует степенная зависимость, аналогичная зависимости, получаемой при вдавливании сферических инденторов в поверхность сплавов разной твердости.

3. Обнаруженная аналогия позволила смоделировать зону наклепа на поверхности очага кавитационного износа лопастей ГВ многократным вдавливанием в материал, аналогичный материалу лопасти ГВ, сферических инденторов разного диаметра. Между средним арифметическим отклонением профиля поверхности и диаметром индентора существует прямая пропорциональная зависимость.

4. По полученной зависимости определено, что для случая кавитационного воздействия на поверхность лопастей ГВ диаметром 3 700 мм диаметр струй, ударяющих по поверхности лопастей, составляет около 10 мм.

5. Полученное значение диаметра струй позволит более обоснованно выбирать экспериментальную установку и режим испытаний материалов ГВ на кавитационное изнашивание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней. Л.: Судостроение, 1978. 206 с.
2. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. СПб.: Изд-во Акад. трансп. РФ, 2006. 608 с.
3. Preece K. M., Brunton J. H. A comparison of liquid impact erosion and cavitation erosion // Wear. 1980. Vol. 60. P. 269–284.
4. Горбаченко Е. О., Цветков Ю. Н. Прогнозирование инкубационного периода кавитационного изнашивания лопастей гребных винтов с использованием метода измерения профиля поверхности // Вестн. Волж. гос. акад. вод. трансп. 2017. № 52. С. 87–95.
5. Пылаев Н. И., Эдель Ю. У. Кавитация в гидротурбинах. Л.: Машиностроение, 1974. 256 с.
6. Васаускас С. С. О диаграмме твердости // Тр. метролог. ин-тов СССР. 1967. Вып. 91 (151). С. 33–38.
7. Tabor D. The Hardness and Strength of Metals // Journal of the Institute of Metals. 1951. Vol. 79. N. 1. P. 1–18.
8. Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987. 223 с.

Статья поступила в редакцию 05.11.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич – Россия, 198035, Санкт-Петербург; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; д-р. техн. наук, профессор; зав. кафедрой технологии судоремонта; yuritsvet@mail.ru.

Фиактистов Ярослав Олегович – Россия, 198035, Санкт-Петербург; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; аспирант кафедры технологии судоремонта; yaroslav3373@gmail.com.

Горбаченко Евгений Олегович – Россия, 198035, Санкт-Петербург; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; старший преподаватель кафедры технологии судоремонта; jenuyaqwerty@gmail.com.



MEASURING DIAMETER OF WATER JETS AFFECTING PROPELLER BLADE SURFACE UNDER CAVITATION WEAR

Yu. N. Tsvetkov, Ya. O. Fiaktistov, E. O. Gorbachenko

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

Abstract. The article analyses the structure of cavitated areas of the ship propeller blades made from aluminum bronzes with different composition. The most informative zones of cavitation wear are the cold-hardening zone and the peripheral one that help estimate the mechanical parameters causing the cavities to collapse. The dents formed on the metal surface in the process of hydrodynamic cavitation wear have spherical parts on their bottoms, in which it is possible to inscribe a circle of a definite diameter. There were conducted the experiments on forcing the ball indentors into the surface of different metal alloys. The first run of the experiments includes forcing of a steel ball with a diameter of 1.588 mm into the surface of 33 alloys with different hardness under the loads of 1 470, 980 and 588 N. The impression diameters were measured using Brinell magnifying glass. There has been found the power dependence between deformation of dents on the metals tested under hydrodynamic cavitation and hardness of the materials, which is similar to the dependence of deformation after forcing the ball indentors into the alloys of different hardness. The second run of the experiments included modeling the cold-hardening zone of the cavitation wear area by repeated forcing the ball indentors with the diameters of 1.588, 2.5, 3.175 and 5.0 mm into the bronze BrAZhNMts9-4-4-1 plates with area of $100 \times 50 \times 20$ mm. Forcing was made into the side 100×50 mm previously ground and polished. The equal strain rate in impressions of different diameters was observed during forcing. A direct proportional relationship was obtained between the arithmetic mean deviation of the surface profile and the indenter diameter. The arithmetical mean deviation of the assessed profile of the side plotted against the ball indenter yields a direct proportional relationship. Using the dependence for the case of cavitation attack on the propeller blades helps to infer that the diameter of water jets striking against the propeller blade surface with diameter of 3 700 mm makes about 10 mm. The obtained value allows to choose reasonably the experimental equipment and the parameters of testing the ship propeller materials for cavitation wear.

Key words: ship propeller blade, cavitation wear, impacts of jets, jets diameter, plastic strain, dent, roughness, aluminum bronze, ball penetrator, penetrator impression.

For citation: Tsvetkov Yu. N., Fiaktistov Ya. O., Gorbachenko E. O. Measuring diameter of water jets affecting propeller blade surface under cavitation wear. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;1:54-64. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-54-64.

REFERENCES

1. Georgievskaja E. P. *Kavitatsionnaja eroziia grebnykh vintov i metody bor'by s nei* [Cavitation erosion of propellers and methods of dealing with it]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 206 p.
2. Pogodaev L. I., Kuz'min V. N. *Strukturno-energeticheskie modeli nadezhnosti materialov i detalei mashin* [Structural and energy models of reliability of materials and machine parts]. Saint-Petersburg, Izd-vo Akademii transporta RF, 2006. 608 p.
3. Preece K. M., Brunton J. H. A comparison of liquid impact erosion and cavitation erosion. *Wear*, 1980, vol. 60, pp. 269-284.
4. Gorbachenko E. O., Tsvetkov Yu. N. Prognozirovanie inkubatsionnogo perioda kavitatsionnogo iznashivaniia lopastei grebnykh vintov s ispol'zovaniem metoda izmereniia profilja poverkhnosti [Predicting in-

cubation period of cavitation wear of propeller blades using surface profile measurement method]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta*, 2017, no. 52, pp. 87-95.

5. Pylaev N. I., Edel' Iu. U. *Kavitatsiia v gidroturbinakh* [Cavitation in hydroturbines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1974. 256 p.

6. Vasauskas S. S. O diagramme tverdsti [Hardness chart]. *Trudy metrologicheskikh institutov SSSR*, 1967, iss. 91 (151), pp. 33-38.

7. Tabor D. The Hardness and Strength of Metals. *Journal of the Institute of Metals*, 1951, vol. 79, no. 1, pp. 1-18.

8. Katsman F. M. *Ekspluatatsiia propul'sivnogo kompleksa morskogo sudna* [Operation of sea vessel propulsion system]. Moscow, Transport Publ., 1987. 223 p.

The article submitted to the editors 05.11.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich – Russia, 198035, Saint-Petersburg; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Ship Repair Technologies; yuritsvet@mail.ru.

Fiaktistov Yaroslav Olegovich – Russia, 198035, Saint-Petersburg; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Postgraduate Student of the Department of Ship Repair Technologies; yaroslav3373@gmail.com.

Gorbachenko Evgeniy Olegovich – Russia, 198035, Saint-Petersburg; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Senior Lecturer of the Department of Ship Repair Technologies; jenyraqwerty@gmail.com.

