

УДК 629.5.035

А.В. Струтынский, С.А. Худяков

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ СУДОВОГО ГРЕБНОГО ВАЛА

Объектом исследования являются судовой валопровод левого борта СЯМ «К. Эмеральда», гребной вал которого разрушился после наматывания сети. Разрушение произошло в зоне повышенной концентрации напряжений на стыке наплавленного слоя нержавеющей стали при наличии язвенной коррозии. Цель выполненного исследования – определение причин разрушения гребного вала.

Ключевые слова: валопровод, гребной вал, наплавка, разрушение, усталостная прочность, концентрация напряжений.

A.V. Strutinskiy, S.A. Hudjakov

THE ANALYSIS OF REASONS OF PROPELLER SHAFT DAMAGES

The investigation object is left ship's shafting of vessel «K. Emerald». The propeller shaft was damaged after fishing net winding. Damage took place at the area of boost stress concentration in site of conjunction of built-up stainless steel layer, under presence of ulcerous corrosion. The goal of the investigation is identification of real reasons of propeller damage.

Key words: shafting, propeller shaft, built-up, damage, fatigue resistance, stress concentration.

Общие характеристики т/х «К. Эмеральда», построенного в декабре 1982 г. в п. Стефенсфилд, США, и его гребной установки следующие:

- основные размерения судна: 38,19×10,36×6,71 м. Дедвейт – 230 т;
- главные дизели – 2 типа 341E DITA мощностью 537 кВт при частоте вращения 1500 мин⁻¹, изготовлены в 2008 г., г. Гриффин, США;
- гребные винты – 2 диаметром 1670 мм, 4-лопастные из нержавеющей стали 66X5056;
- гребные валы – 2 из углеродистой стали 25 диаметром 152,4 мм (Carbon Steel ABS Grade 2). Шейки подшипников плакированы нержавеющей сталью (подслой из стали ABS ER309L и нержавеющей сталью ER308L ER316L) до диаметра 165,1 мм (толщина слоя – 6,3 мм). Остальные поверхности вала покрыты антикоррозионной защитой из стеклоткани с эпоксидной смолой. Поверхность излома вала расположена по нормали к его оси, что свидетельствует о действии изгибных напряжений в сечении.

Аналогичное разрушение промежуточного вала у фланца соединения с гребным валом произошло на т/х «Дилан» [10]. Причиной этого разрушения явилась просадка главного дизеля относительно гребного вала из-за износа клиньев под фундаментной рамой.

Зазоры в подшипниках левого гребного вала при освидетельствовании:

- в кронштейне – 1,50 мм (предельные – 3,8 мм);
- в кормовом – 1,25 мм (предельные 3,8 мм).

Центровка гребного вала (с редуктором):

верх-низ		борт-борт
смещение	0	0,01 мм
излом	0,09	0,02 мм/м.

По результатам освидетельствования вала – состояние «годное» (Акт МРС № 07.02847.294 от 24.10.2007 г.).

С 1994 г. судно под флагом МРС.

Для установления причин разрушения левого гребного вала судовладельцем предоставлена часть вала (далее по тексту «вырезка») длиной 70 мм от поверхности излома, отрезанная механически.

Основные события, предшествующие разрушению вала:

- последнее до аварии освидетельствование – 24.10.2007 г., п. Пусан;
- наматывание сети на гребной винт – 8.04.2009 г.;
- работа гребной установки после удаления сети до аварии с 13.04.2009 г. по 3.05.2009 г., когда произошло разрушение гребного вала (20 сут).

Наработка левого валопровода (максимальная) при номинальной частоте вращения за указанный выше период времени составила $t = 480$ ч. Тогда число циклов изгибающего момента с частотой f_1 1-го порядка составляет

$$N_u = t \times 24 \times 3600 \times f_1 = 1,037 \times 10^7 \text{ циклов.}$$

Необходимо учитывать, что на промысле коэффициент технического использования главных двигателей на режиме полного хода составляет не более 0,5. Постановка промыслового оборудования и сам режим лова выполняется на малом и среднем ходах. Поэтому количество циклов, определенное выше, необходимо редуцировать с коэффициентом 0,7. В таком случае реальное число циклов действия изгибающего момента составит

$$N_d = 0,7 N_u = 0,7 \times 10^7.$$

Полученное значение значительно меньше порогового значения при расчетах усталостной прочности сталей – 2×10^7 . Этот факт свидетельствует о том, что разрушение гребного вала произошло от малоциклового усталости, т.е. при значениях циклических нормальных напряжений от изгиба вала значительно выше предела усталости.

При анализе факторов, вызвавших разрушение вала, проведены следующие исследования:

- выполнен расчет неспецификационных нагрузок на гребной вал;
- определены марки материалов;
- произведен анализ строения наплавки;
- выполнен ультразвуковой контроль качества наплавки;
- произведен фрактографический анализ.

Оценка неспецификационных нагрузок на гребной вал

К неспецификационным нагрузкам, действующим на гребной вал, следует отнести усилия на гребном винте при наматывании дели сети. При этом действует радиальная нагрузка на винт от натяжения сети, переводя работу гребной установки на более крутую винтовую характеристику со значительным снижением частоты вращения валопровода и дизеля. В нашем случае номинальная частота вращения – 1500 мин^{-1} – снизилась до 500 мин^{-1} .

Крутящий момент, передающийся от дизеля на валопровод с учетом потерь мощности в редукторе, составит

$$M_e = N_e / \omega = 505 \times 1,36 \times 75 / 2\pi f_1 = 1366 \text{ кгм,}$$

где $N_e = N_n \eta_p = 537 \times 0,94 = 505 \text{ кВт}$, $\omega = 2\pi f_1 = 37,7 \text{ с}^{-1}$, здесь $f_1 = 6 \text{ Гц}$ – частота 1-го порядка валопровода при номинальной частоте вращения, равной 360 мин^{-1} .

Крутящий момент при наматывании сети на винт определяется с учетом ограничительной характеристики дизеля при частоте вращения коленчатого вала 500 мин^{-1} (мощность равна $0,5 N_n$) равен

$$M_{500} = N_{500} / \omega = 252,5 \times 1,36 \times 75 / 2\pi f_1 = 2049 \text{ кгм},$$

где $N_{500} = 252,5 \text{ кВт}$, $\omega = 2\pi f_1 = 12,57 \text{ с}^{-1}$, здесь $f_1 = 2 \text{ Гц}$ – частота 1-го порядка валопровода при частоте вращения, равной 120 мин^{-1} .

Радиальная сила, действующая на гребной винт, при наматывании сети равна

$$R = M_{500} / r = 2049 / 0,835 = 2454 \text{ кг},$$

где $r = 0,835 \text{ м}$ – радиус гребного винта.

При вращении гребного винта радиальная сила R , действующая перпендикулярно к оси вала, вызывает изгибные циклические напряжения во всех сечениях валопровода как многоопорной неразрезной балки с заделкой в сечении фланцевого соединения с муфтой вала редуктора (значительно большего сечения). Подшипниковые опоры валов (3 шт.) в расчетной схеме заменяются шарнирами, так как в них большие зазоры (более 1 мм).

Изгибающий момент от радиальной силы, действующий на концевой вал, равен

$$M_u = R \times L = 2454 \times 0,643 = 1578 \text{ кгм},$$

где $L = 0,643 \text{ м}$ – расстояние от центра конуса винта до центра подшипника в кронштейне.

Напряжения от изгиба в сечении вала диаметром 152,4 мм равны

$$\sigma = M_u / W = 157800 / 172 = 915 \text{ кг/см}^2,$$

где $W = 172 \text{ см}^3$ – момент сопротивления рассматриваемого сечения.

Напряжения кручения в том сечении вала, диаметром 152,4 мм,

$$\tau = M_{500} / W_p = 204900 / 344 = 595 \text{ кг/см}^2,$$

где $W_p = 344 \text{ см}^3$ – полярный момент сопротивления рассматриваемого сечения.



Рис. 1. Общий вид вырезки
и излома
Fig. 1. General view of break
and cutting

Суммарные напряжения в сечении от изгиба и кручения равны

$$\sigma_c = (\sigma^2 + 4 \tau^2)^{0,5} = (915^2 + 4 \times 594^2)^{0,5} = 1500 \text{ кг/см}^2.$$

Концентрация напряжений в галтелях вала – переход с диаметра 165 мм на 152,4 мм при радиусе 10 мм – оценивается коэффициентом концентрации, равным 1,3 [8]. Значительно выше концентрация напряжений в районах коррозионных разрушений вала (язвенная коррозия), что наблюдается на носовой шейке (рис. 2, 3).

Рабочая поверхность вырезки имеет значительные коррозионные повреждения в виде язвенной коррозии (рис. 2, а, б).



а



б

Рис. 2. Коррозионные повреждения рабочей поверхности:
а, б – язвенная коррозия глубиной до 8 мм в пределах наплавленного слоя
Fig. 2. Corrosive damage of of working face (*Ulcerous corrosion has depth up 8 mm
in the limits of built-up layer*)

Определение марок сталей

Марки сталей определялись с целью уточнения их химического состава (процент содержания легирующих элементов) и соответствия американским или отечественным стандартам, что даёт возможность установить исполнителя наплавки носовой дейдвудной шейки гребного вала и примерный срок выполнения этой технологической операции (до 1994 г. или после, когда судно было приобретено русским судовладельцем).

Для определения марки материалов гребного вала и наплавки проводился спектральный полуколичественный анализ – стилоскопирование и химический анализ металла гребного вала. Установлено, что металл наплавки содержит около 18 % хрома и 10 % никеля, 1,5 % марганца и 2 % молибдена. Следы титана и ниобия отсутствуют. Материал наплавки соответствует марке стали X18H10M2, наплавочный материал ER316 или ER316L по AWS A5.9. Титан и ниобий вводятся в стали подобного класса для стабилизации коррозионной стойкости.

В материале гребного вала легирующие элементы не выявлены. По результатам химического анализа установлено, что содержание кремния составляет 0,21 %, углерода – 0,26 %. Материал гребного вала соответствует стали 25, американский аналог – low carbon steel grade 2.

Определение твердости и прочностных характеристик сталей

Для оценки прочностных характеристик металлов вала и наплавки проведено измерение твердости по Бринеллю. Условия измерения – испытательная нагрузка 3000 кг, диаметр стального шарика 10,0 мм, время выдержки под нагрузкой 10 с. Оценка прочностных характеристик проводилась по формулам пересчета [3,4]. Установлено, что средняя твердость материала вала составляет 153 НВ, материала наплавки – 229 НВ. Временное сопротивление материала вала R_m – 520 МПа, предел текучести $R_{p0,2}$ – 340 МПа. Временное сопротивление материала наплавки R_m – 680 МПа, предел текучести $R_{p0,2}$ – 500 МПа.

Полученные результаты использовались для расчета на прочность.

Анализ строения наплавленного слоя

Для изучения строения наплавки выполнялся металлографический анализ макрошлифа на участке предоставленной вырезки. Выявление макроструктуры проводилось электрохимическим травлением в растворе щавелевой кислоты. Установлено, что наплавка выполнена в четыре слоя с механической обработкой каждого слоя перед нанесением последующих слоев. Наибольшее отличие в травимости выявлено между первым и вторым, а также третьим и четвертым слоями. Отсчет слоев – от основного металла вала.

Для оценки механических свойств слоев наплавки проводилось измерение микротвердости с испытательной нагрузкой 200 г.

Установлено, что микротвердость находится в пределах 216-242 HV_{0,2}.

Существенной разницы твердости слоев не выявлено.

Ультразвуковой контроль качества наплавленного слоя

Ультразвуковым контролем нарушения сплошности наплавки и отслоения наплавки от основного металла на вырезке не выявлено. Структурные шумы наибольшей амплитуды выявлены по границе четвертого и третьего слоев наплавки. Отсчет слоев – от основного металла вала (рис. 3).

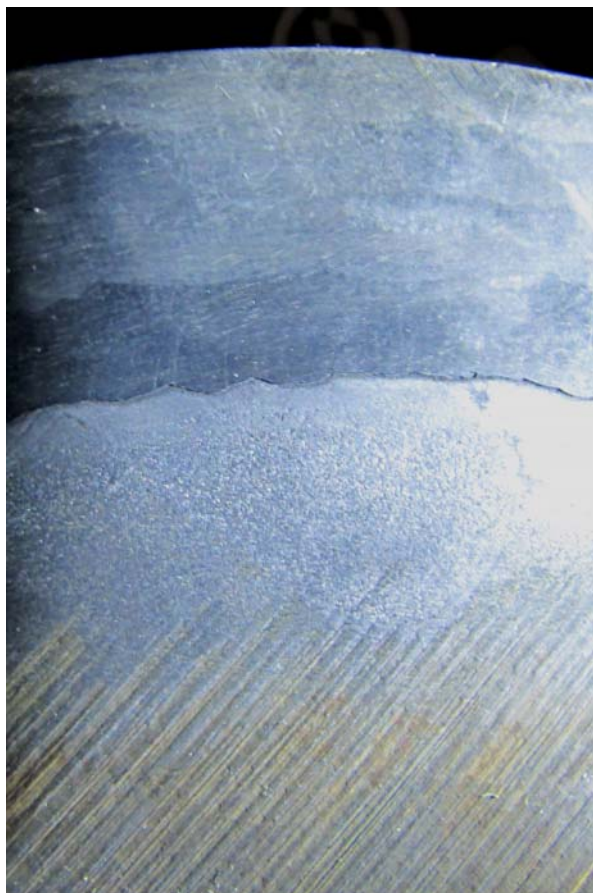


Рис. 3. Макрошлиф. Строение наплавки (просматриваются 4 слоя)
Fig. 3. Microsection. Costruction of overlaying (There are 4 lays)

Фрактографический анализ

Перед проведением анализа поверхность излома очищалась раствором уксусной кислоты.

Расположение поверхности излома перпендикулярно оси вала характерно при действии циклических изгибных напряжений.

Линии останковки трещины, являющиеся признаками действия циклических нагрузок и усталостного разрушения, выявлены в двух зонах излома:

- от наружного диаметра в четвертом слое наплавки, глубина зоны – около 3 мм;
- от линии сплавления с углеродистой сталью на глубину около 6 мм.

Разрушение 1-3-го слоев наплавки произошло под действием динамической нагрузки.

Зарождению трещины в опасном сечении способствовали коррозионные повреждения – коррозионно-усталостный механизм.

По результатам обследования вырезки вала установлена следующая динамика разрушения вала:

- 1) начало разрушения – зарождение коррозионно-усталостной трещины в верхнем слое наплавки (рис. 4);
- 2) временное торможение трещины в межваликовой зоне термического влияния вследствие увеличения прочности этой зоны по сравнению с прочностью наплавки;
- 3) разрушение внутренних слоев наплавки под воздействием непроектной динамической нагрузки;

4) торможение разрушения под влиянием двух факторов – окончания динамического воздействия и перехода в более мягкую и вязкую зону термического влияния в углеродистой стали;

5) распространение усталостной трещины в углеродистой стали при воздействии проектных нагрузок при наличии изгиба вала после динамического воздействия;

6) долом под воздействием изгибных напряжений, затем напряжений скручивания. Зона скручивания имеет прямоугольную форму с отношением сторон 1:3 и смещена от центра, что свидетельствует о наличии прогиба вала.

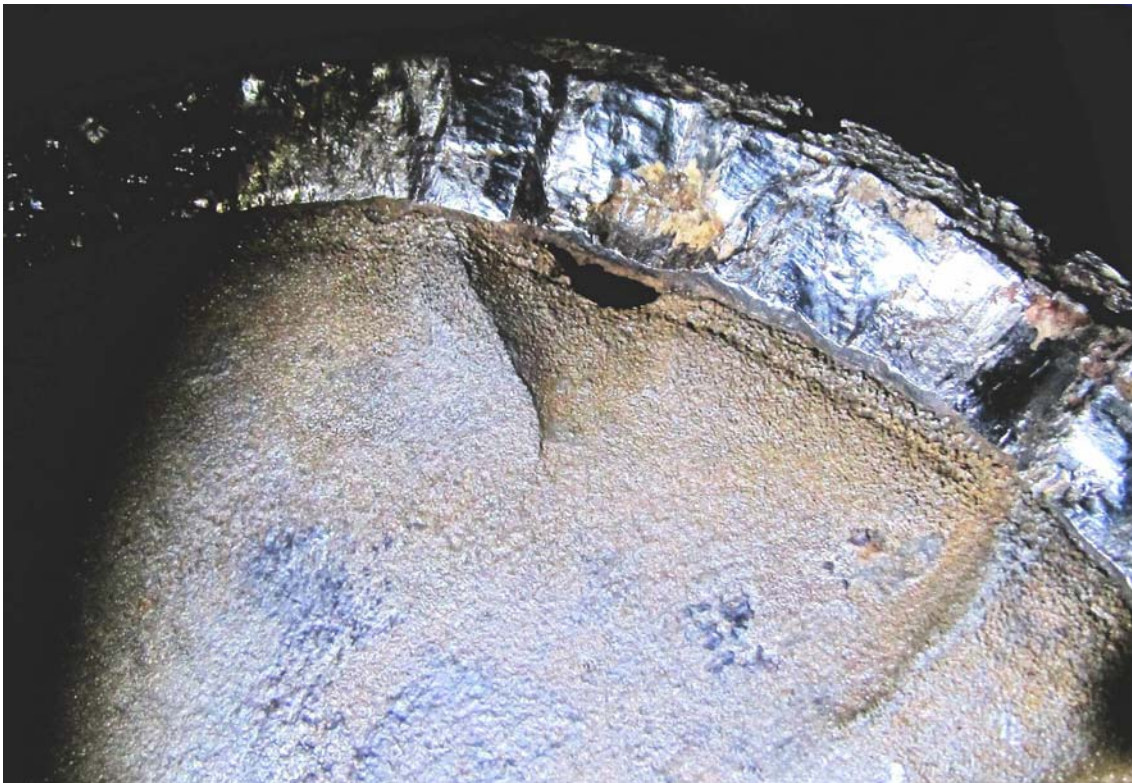


Рис. 4. Зоны зарождения и развития трещины
Fig. 4. Areas of initiation and crack propagation

Отношение остаточных площадей излома к общей площади следующее:

- после зарождения трещины – 93 %;
- после динамического воздействия – 69 %;
- после циклического развития в углеродистой стали – 56 %;
- после долома под воздействием изгибных напряжений – 4 %.

Следует также принять во внимание повышенную прочность наплавки по сравнению с основным металлом.

Выводы по результатам исследований:

1. Основной причиной разрушения левого гребного вала считаем неспецификационную нагрузку на вал, вызванную намотанной сетью и вызвавшую значительные изгибные напряжения в вале.

2. Наплавленная нержавеющая сталь на носовой шейке вала толщиной около 15 мм (с учетом фрикционного и коррозионного износа) соответствует по химическому составу приведенным на чертеже американским сталям.

3. Зарождение коррозионно-усталостной трещины произошло в зоне концентрации напряжений в галтели наплавленной нержавеющей стали и границе проточки основного материала (с диаметра 152,4 мм до 135 мм), что явилось «технологическим» концентратором напряжений с точки зрения остаточных сварочных напряжений.

4. Дальнейшее развитие трещины происходило под действием значительных циклических изгибных напряжений от неспецификационной нагрузки.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Ч. 1. Метод измерения.

2. ГОСТ 9012-59 (СТ СЭВ 468-88). Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.

3. ГОСТ 22761-77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.

4. РД ЭО 0027-2005. Руководящий документ. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости.

5. ГОСТ 1050-88. Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь.

6. ОСТ 5. 9287-78. Детали стальные изделий судового машиностроения и приборостроения, термически обработанные. Технические требования, правила приемки и методы испытания.

7. Надежность в машиностроении: справ. [Текст] /под общ. ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзона. – СПб.: Политехника, 1992.

8. Судовые установки с двигателями внутреннего сгорания [Текст] / В.А. Ваншейдт и др. – Л.: Судостроение, 1978.

9. Сюрвейерский отчет №01-064-09/AR/az/ M/V «К. Эмеральда».

10. Струтынский А.В. Оценка технического состояния сварного промежуточного вала судна [Текст] / А.В. Струтынский, С.А. Худяков // Исследования по повышению эффективности судостроения и судоремонта: сб. науч.тр. / под ред. Г.П. Турмова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. – Вып. 46. – С. 294-298.

Сведения об авторах: Струтынский Александр Владимирович, старший преподаватель; Худяков Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, профессор, e-mail: rogulin@msun.ru.