

8. Turkin, V.A. Jekologicheskaja bezopasnost' i ee mera - risk: aspekty teorii i praktiki / Turkin V.A., Chura N.N. //Bezopasnost' v tehnosfere. – 2007. – № 2. – S. 11-16.
9. Tihomirov N.P. Metody analiza i upravleniya jekologo-jekonomicheskimi riskami. M.:JuNITI-DANA. 2003, 350 s.
10. García-Onetti, J. Integrated and ecosystemic approaches for bridging the gap between environmental management and port management/García-Onetti, J., Scherer, M. E. G., Barragán, J. M. //Journal of environmental management. – 2018. – T. 206. – p. 615-624.
11. Kozar Ł. Zarządzanie ryzykiem środowiskowym w przedsiębiorstwie jako kierunek wspierania budowy zielonej gospodarki / Kozar Ł.// Research Papers of the Wrocław University of Economics / Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu . 2017, Issue 470, p. 62-74.
12. Fedorec, A.G. Koncepcija riska v zhizni i dejatel'nosti cheloveka /Fedorec, A.G.// Zh-l «Bezopasnost' v tehnosfere». – T. 2. – №1. – 2013. – S. 3-13.
13. Metodika opredelenija raschetnyh velichin požarnogo riska v zdaniyah, sooruzhenijah i požarnyh otsekah razlichnyh klassov funkcional'noj požarnoj opasnosti, prikaz MChS ot 30.06.2009 g. № 382 "Ob utverzhdenii metodiki opredelenija raschetnyh velichin požarnogo riska v zdaniyah, sooruzhenijah i stroenijah razlichnyh klassov funkcional'noj požarnoj opasnosti" (s izmenenijami i dopolnenijami). Sistema GARANT: <http://base.garant.ru/12169057/#ixzz5aOsl2wYC>.
16. Borodin E.L., Bidenko S.I., Travin S.V., Hekert E.V., Hramov I.S. Geoinformacionnaya podderzhka upravleniya morskoy transportnoj aktivnost'yu: metodi-cheskij aspekt.// EHkspluatatsiya morskogo transporta. 2018. № 2 (87). S. 80-84.
17. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ehkspluatatsiej sudovyh ehlektroenergeticheskikh sistem. (chast' 1).//EHkspluatatsiyamorskogotransporta. 2017. № 2 (83). S. 114-122.

УДК 621.431.74

DOI: 10.34046/aumsuomt90-15

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

*С.А. Худяков, доктор технических наук, профессор
М.М. Фролов, кандидат технических наук, доцент*

В статье анализируется усталостная прочность деталей судовых технических средств на примерах ряда повреждений и отказов техники, которые происходили на судах по причине знакопеременных нагрузок. Рассматриваются основные факторы, влияющие на усталостную прочность деталей судовой техники, которые необходимо учитывать на стадии проектирования и в процессе её эксплуатации. Основной причиной появления усталостных трещин и разрушения деталей судовых технических средств являются резонансные колебания упругих систем, при которых значительно возрастают амплитудные значения напряжений при асимметричном цикле нагружения. Поэтому в рекомендациях, касающихся эксплуатационных факторов, влияющих на усталостную прочность, приводятся требования по предотвращению резонансов в колебаниях судовых упругих систем.

Ключевые слова: усталостная прочность, детали, судовая техника, проектирование, эксплуатация.

The article analyzes the fatigue strength of parts of ship technical equipment using examples of a number of damage and equipment failures that occurred on ships due to alternating loads. The main factors affecting the fatigue strength of parts of ship equipment, which must be considered at the design stage and during its operation, are considered. The main cause of the fatigue cracking and destruction of parts of ship technical means are the resonant oscillations of elastic systems, which significantly increases the stress amplitude values in an asymmetric loading cycle. Therefore, in the recommendations on the operational factors that affect durability are requirements to prevent resonances in ship vibrations of elastic systems.

Key words: fatigue strength, parts, ship equipment, design and maintenance.

В статье приведены сведения по усталостным повреждениям и отказам судовых технических средств (СТС) и корпусных конструкций (КК) и методике их определения, которая используется длительное время авторами и гарантирует положительный результат. Это даёт возможность объективно определить причины возникновения повреждений и отказов деталей СТС или КК, т.е. четко оценить недостаток усталост-

ной или предельной прочности. Таким образом, в результате исследования удастся разрабатывать способы для предотвращения повреждений и отказов при дальнейшей эксплуатации СТС и КК. В частности, по всем пунктам таблицы были приняты рекомендации авторов, которые дали положительный результат и проблемы судовладельцев были сняты (подробнее материалы, касающиеся каждого судна, будут приведены в

монографии по усталостной прочности деталей СТС, которая запланирована к печати в 2019 году) [1, 2, 4-8, 10].

Методика определения характера разрушений отдельных деталей будут полезна для исследователей, особенно начинающих, работать в области прочности любой техники.

Анализ повреждений и отказов СТС и КК свидетельствует о том, что в большинстве случаев нарушается *усталостная прочность* отдельных деталей и конструкций, подверженных циклическим нагрузкам от действия внешних волновых и ударных нагрузок на корпус судна или неуравновешенных сил и моментов главных движителей и гребных винтов [1-5, 10].

Усталостное разрушение является одним из основных видов повреждений от действия циклических нагрузок [2-8, 11].

Усталость – накопление повреждений в материале, вследствие циклических нагрузок, которые проявляются в виде усталостных трещин.

Различают много цикловую и малоцикловую усталость. Четко обозначенной границы между ними нет. Условно считается, что многоцикловая усталость определяется числом циклов – $N_P > 10^4$ до возникновения разрушения, если $N_P < 10^4$, то это относится к малоцикловой.

При неправильных циклических нагрузках, под влиянием быстро меняющихся воздействий, например, обусловленных вибрацией, критическое число циклов, т.е. число циклов до разрушения, составляет $N_P < 10^6$. Долговечность, или число циклов до разрушения простых деталей можно определить, используя известные расчетные зависимости из теории прочности.

Предел усталости материала является его свойством, однако, на интенсивность развития трещин оказывают влияние условия эксплуатации.

При разрушении деталей, вследствие усталости, на поверхности излома наблюдаются две четко разграниченные зоны. Одна представляет собой гладкую (притертую) поверхность, которая образуется в результате трения поверхностей трещины при ее смыкании и размыкании, под действием циклических нагрузок – называется *зоной разрушения вследствие усталости*. Другая образуется в результате излома по границам зёрен – кристаллический излом, при этом поверхность имеет грубую, шероховатую поверхность и является *зоной заключительного разрушения* – называется зоной мгновенного действия.

Усталостные разрушения происходят без внешних признаков пластической деформации. Развитие трещины начинается с образования мик-

ротрещин, растрескивания по границам зерен, а также вокруг твердых включений. Развитие и распространение микротрещин идет от одного слабого места к другому, ослабля сечение детали. Когда она охватывает значительную часть сечения, быстро разрушается и остальная её часть [9].

Микротрещины в отдельных разрозненных зернах неоднородны, аналогично неоднородности структуры – неметаллические включения, поры и др. Наличие только микротрещин, недостаточно для возникновения усталостного разрушения. Для развития явления усталости необходимо, чтобы вблизи находилось несколько зерен с усталостной трещиной. Вероятность усталостного разрушения зависит от вероятности нахождения рядом нескольких зерен, в которых напряжения могут достичь значения равного пределу хрупкой прочности. Подобная вероятность увеличивается с ростом размеров детали.

На предел усталости существенно влияет ряд факторов, которыми являются: концентраторы напряжений, масштабный фактор, внешняя среда и коррозия, фреттинг-коррозия, технологические факторы (особенно термическая обработка), внутренние напряжения, возникающие в результате термической обработки, протяжки, поверхностное пластическое деформирование, некачественная сварка и т.п. Следует отметить влияние температуры на предел усталости. При температурах от +40 °С до +200 °С, изменения предела усталости не наблюдается. Для углеродистых сталей, при температурах более +200 °С, предел усталости повышается вследствие увеличения пластичности и уменьшения возможности появления трещин. При температурах +375 °С предел усталости выше на 40%, чем при комнатной температуре. При низких температурах предел усталости падает.

До 80% деталей СТС, воспринимающих циклические нагрузки, выходят из строя по причине усталостных разрушений.

Внешним проявлением усталости является возникновение и распространение усталостных трещин при многократных нагрузках. Данные трещины наиболее интенсивно образуются в местах расположения концентраторов напряжения (следы от механической обработки). В зависимости от условий эксплуатации и методов обработки, усталостные трещины могут образовываться как на поверхности, так и на некотором расстоянии от неё. В настоящее время не существует единой общепринятой теории усталостного разрушения. Наибольшее распространение получила теория дислокаций, согласно которой причинами зарождения усталостных трещин является:

- 1) взаимные дислокации в нагромождениях;
- 2) взаимные дислокации, движущиеся в пересекающихся плоскостях скольжения;
- 3) отсутствие препятствий для перемещения дислокаций.

Нагромождение дислокаций возникает из-за препятствий их движению: границы блоков и зёрен; чужеродных включений, в том числе легирующих металлов.

При взаимодействии дислокаций упругая энергия концентрируется в определённом участке детали. При достижении максимально допустимой концентрации упругой энергии в локальном объёме происходит пластическая деформация, вследствие которой и образуется зародыш трещин.

Существует 2 взгляда на причины образования усталостных трещин:

- 1) разрушение в результате исчерпания пластичности металла;
- 2) разрушение в результате перенаклепа материала впереди трещины.

Техническое состояние изделий определяется совокупностью свойств его элементов, которые характеризуются текущими значениями параметров, которые зависят от наработки. Нарботка – это продолжительность работы СТС, измеряемая единицами времени, пробега или числом циклов работы изделия.

Различают наработку с начала эксплуатации до предельного состояния и интервальную наработку, например, после восстановления за счет технического обслуживания (ТО) или ремонта.

Таблица – Усталостные повреждения деталей судовых технических средств

№ п/п	Судно	Механизм, устройство	Деталь	Характер повреждения	Примечание
1	Алагез	ГД 68Г-6	Коленчатый вал	Разрушение	Рис. 1
2	Москва	ГДГ 9МН51	Коленчатый вал	Разрушение	Рез. КК
3	Ардатов	ГД 8ZL40/48	Противовес	Обрыв болтов	Рез. «Х»
4	Варнемюнде	ГД K8Z70/120E	Св. верх. кр.	Разрушение	
5	Восток Орион	ГД 12V92TA	Виброизоляторы	Разрушение	Рез. труб
6	П/б пр. В-69	ГД 6ДКРН62/140	Газовый тракт	Разрушение	
7	Пр. 1288	ГД 6ЧН40/46	Противовес	Обрыв болтов	Рис. 2
8	Поллукс	ГД 6ЧН40/46	Противовес	Обрыв болтов	
9	Альпинист	ГД 8NVD48A-2U	Блок цилиндров	Трещины	Рис. 3
10	Самотлор	ГД 6ДКРН74/160-3	Детали остова	Трещины	Рез. КК
11	Капитан Куров	ГД 8М601	Шпильки кр. цил.	Разрушение	Рез. КК
12	То же	ВРШ	Лопасты	Разрушение	
13	Охотское море	ВРШ	Болты лопастей	Разрушение	Рис. 4, 5
14	Сестрорецк	Валопровод	Гребной вал	Фреттинг-кор.	
15	И. Ильинский	Валопровод	Гребной вал	Трещина	Рис. 6
16	К. Эмиральда	Валопровод	Гребной вал	Разрушение	Рис. 7, 8
17	А. Дуденко	ДГ S6B-MPTK	Коленчатый вал	Разрушение	
18	Вау	ДГ 6QTSW	Шатунный болт	Разрушение	Рез. «L»
19	Зверобой	ДГ 3A25/30	Рама	Трещины	
20	МРС	ДГ К-962M1	Поршн. палец	Разрушение	

По мере увеличения наработки параметры технического состояния изменяются (ухудшаются) по значениям от номинальных до предельных, при которых дальнейшая эксплуатация недопустима (по «надежности» – предельное состояние или по «диагностике» – неудовлетворительное состояние).

Основные причины изменения технического состояния СТС и их деталей:

- 1) несовершенство конструкции, деталей, узлов, агрегатов и изделий;
- 2) некачественное изготовление заготовок, выполнение сборочных операций и механической и физико-химической обработки деталей;
- 3) несовершенные конструкционные материалы;
- 4) некачественные эксплуатационные материалы, например, смазка;
- 5) эксплуатационные факторы: кинематическое возмущение от работы других механизмов, взаимное перемещение деталей и узлов, циклическое нагружение элементов, воздействие тепловой и электрической энергии, случайные факторы – скрытые дефекты детали, перегрузки конструкции и т. п.

В таблице приведены основные сведения о повреждениях и отказах СТС морских судов, вызванных недостаточной усталостной прочностью деталей и конструкций, приведенных в работах [2, 4, 5]. Все приведенные повреждения и отказы деталей СТС вызывали аварийные ситуации и большие материальные затраты у судовладельцев.

Аналогичные сведения по речным судам даны в работе [3]. Те же сведения о повреждениях и отказах КК приведены в работе проф. Аносова А.П. (коллега автора по совместной работе в ДВ политехническом институте на кафедре конструкции судов под руководством д.т.н., проф. Барабанова Н.В.) и они также были вызваны циклическими напряжениями от резонансных колебаний КК [1].

В большинстве случаев детали, разрушенные от действия циклических нагрузок и недостаточной усталостной прочности, испытывали асимметричный цикл нагружения. Прежде всего, это детали крепления (п.п. 3, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 18 и 19 или 45% от всех рассматриваемых случаев), испытывающие средние напряжения σ_m от предварительного затягивания шпилек (или гаек болтов) и σ_a от циклической нагрузки. 25% составляют повреждения, вызванные крутильными колебаниями валопроводов (приведено в таблице).

Остальные – по разным причинам, но во всех случаях детали подвергались знакопеременным нагрузкам, особенно коленчатые валы (п. 1 и 17), блоки цилиндров и рамы (п. 9 и 19). Сокращения: Св. верх. кр. – связи верхнего крепления остова дизеля; Рез. КК – резонанс крутильных колебаний валопровода; Рез. «Х» и «L» – резонанс «Х» и «L»-форм колебаний [4, 5].

Характерны повреждения и разрушения деталей, вызванные резонансами крутильных колебаний валопроводов. Например, разрушение коленчатого вала главного ДГ л/к «Москва», которое произошло по причине старения силикона в демпфере КК, отработавшем более 30 тыс. часов, что недопустимо по рекомендациям фирмы Холзет (изготовитель).

Возникали многочисленные трещины по сварным швам деталей остовов дизелей на танкерах типа «Самотлор» и фреттинг-коррозия во фланцевых соединениях валов и на конусных поверхностях соединения гребного винта с валом на т/х «Сестрорецк» (рисунки 4 и 5). Это вызвало длительные простои судов для устранения трещин и замены гребных валов и винтов на всех судах типа «Сестрорецк». К сожалению, ограничение крутильных колебаний судовых валопроводов производится только уровнем касательных напряжений (чаще в промежуточных валах, имеющих диаметры меньше чем гребные и шейки коленчатых валов).

При этом не учитывается действие эластического момента, который трансформируется в переменную составляющую опрокидывающего момента, и вызывает при резонансах определенные проблемы с точки зрения усталостных повреждений в конструкциях остовов дизелей [2, 4, 5, 8].



Рисунок 1 – Излом коленчатого вала дизеля 68Г-6 т/х «Алагеэ»

Примечание. На поверхности излома доля усталостной составляющей – 45%. Действующие напряжения на момент разрушения – не менее $0,55 \sigma_{0.2}$. Излом многоочаговый, зарождение – от продольных трещин на шейке, переходящих на галтель



Рисунок 2 – Расположение трещины на носовой щеке 1-го колена коленчатый вал главного дизеля 6ЧН40/46 т/х «Полукс» (проект 1288)

Недостаточно изучен вопрос о нарушениях в системах газораспределения МОД с механическим приводом и электронным управлением тоже. Это, особенно, касается изменения углов опережения подачи топлива, которые зависят от режима работы дизеля, при резонансах КК в тех случаях, когда амплитуды угловых перемещений превышают 10° - 15° (п. 10 в таблице, амплитуды КК достигали $\pm 28^{\circ}$, а напряжения – 92 МПа в промежуточном вале, что значительно выше допускаемых) [2, 4].

Определенное внимание следует уделить проблеме недостаточной прочности болтов крепления противовесов (п. 3,7,8 в таблице), а,

вернее, контролю моментов затягивания болтов, значения которых рекомендуют фирмы дизелестроители (в нашем случае ZGODA – Sulzer и Pielstick). В условиях эксплуатации нарушаются эти рекомендации, динамометрические ключи отсутствуют на судах. Поэтому после ревизии противовесов обжатие болтов производится произвольно, при этом напряжения растяжения в них от затягивания и центробежных сил σ_m превышают допускаемые. Амплитудные напряжения цикла σ_a остаются постоянными, что связано с частотой вращения дизелей, которая для СОД постоянна.

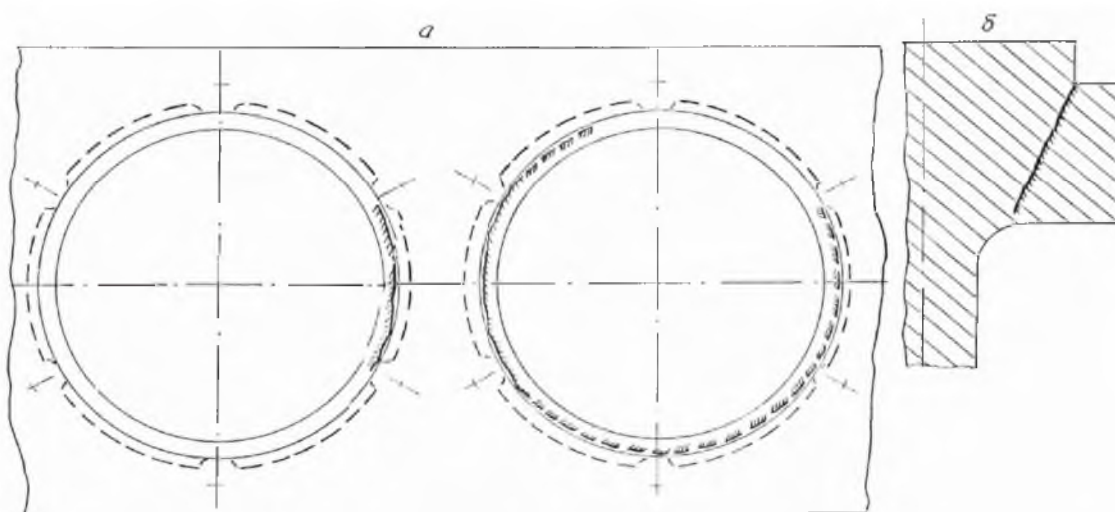


Рисунок 3 – Расположение трещин по буртам блока цилиндров дизеля 8NVD48A-2U т/х «Альпинист»: а – трещины по галтели посадочного бурта, б – трещина по сечению бурта



Рисунок 4 – Фреттинг-коррозия на поверхности конуса гребного вала с глубиной до 2,5 мм т/х «Пионер Владивостока» (типа «Сестрорецк»), видны следы сдвига металла после разобращения конусного соединения взрывом)

При анализе условий и причин всех аварийных ситуаций, приведенных в таблице, использовалась отработанная методика, которая предусматривала выполнения ряда работ, а именно:

1) анализ информации о повреждении или отказе детали СТС (деталь, узел, расположе-

ние, материал, термообработка или специальная упрочняющая технология, состояние поверхности: шероховатость, износ, покрытия зоны повышенной концентрации напряжений, расположение и направление трещин, вид поверхности излома – фрактографический анализ); расположение СТС в машинном отделении [2, 4, 5].

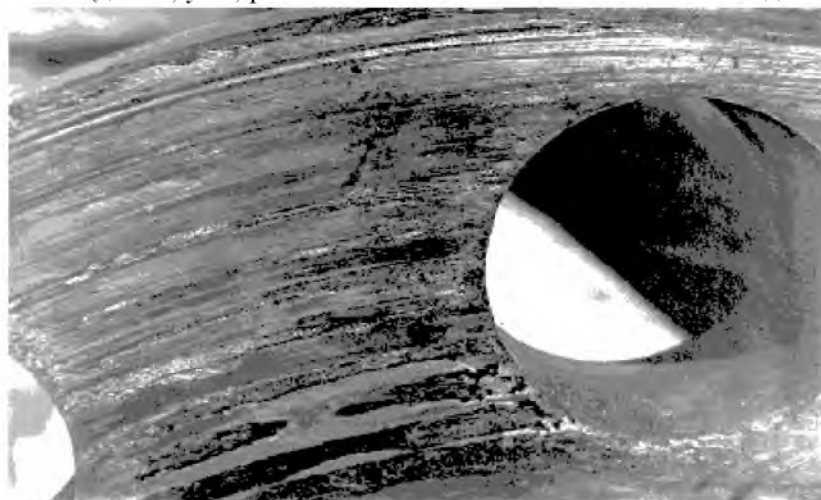


Рисунок 5 – Фреттинг-коррозия на фланце гребного вала т/х «Пионер Владивостока» глубиной до 2,0 мм

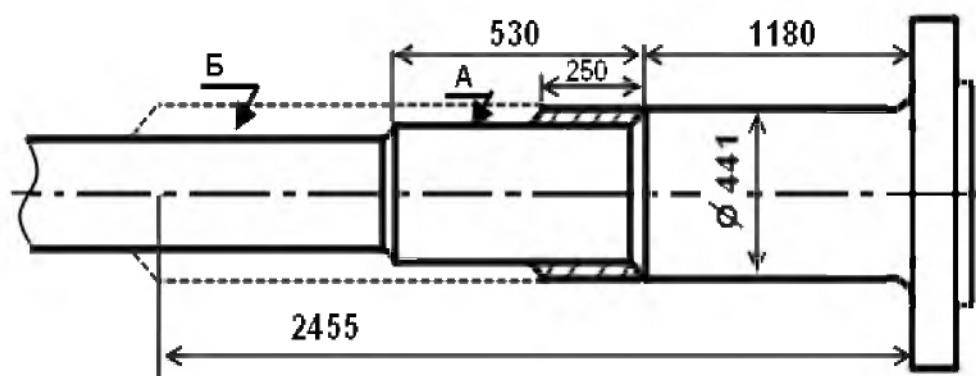


Рисунок 6 – Гребной вал т/х «Е. Шатрова»: зоны А и Б проточены для удаления трещин, зона наплавки выделена пунктиром

2) наработка СТС и гребной установки на момент рассматриваемого события с постройки судна и после последнего восстановления упомянутого объекта. Если событие (отказ) связан с элементами самой гребной установки, то дополнительно – наработки по режимам работы: полным, средним ходом и на маневрах (возможно число пусков и реверсов. Например, п. 10 в таблице, где зона резонанса КК располагалась между малым и средним ходами и это было необходимо для установления полного пакета циклов нагружения деталей остова от воздействия эластического момента, как переменной составляющей опрокидывающего момента);

3) оценка динамики главного дизеля, особенно МОД, (неуравновешенность, полный спектр возмущающих сил и моментов; наличие резонансов основных форм колебаний – L, H и Хупругой системы «дизель-днище» в зоне рабочих частот вращения; наличие специальных устройств: компенсатора неуравновешенного момента 2-го порядка, демпфера КК, связей верхнего крепления остова, противовесов на коленчатом вале;

4) конструкция гребной установки в целом (вид передачи крутящего момента, наличие муфт, редуктора, валогенератора, МИШ);

5) гребной винт (ВФШ или ВРШ, число лопастей, форма лопастей, наличие кавитации по результатам измерений вибрации в кормовой

оконечности и обследования концевых поверхностей лопастей);

6) выполнение проверочных расчетов прочности, КК и собственных частот колебаний проблемных СТС.

Выполнение исследований по установлению причин повреждений или отказов и характера разрушения деталей СТС с выполнением приведенных работ даёт возможность предпринимать радикальные меры по предотвращению подобных случаев в дальнейшем.

После установления причин повреждений или отказов деталей СТС целесообразно выполнить экспериментальные исследования на судне с целью уточнения причин появления повреждений или отказов и разработки мер по их предотвращению с привязкой по месту на судне.

Ходовые испытания судна выполняются с измерениями вибрации и напряжений в деталях проблемных СТС (использование тензометрии). Данные измерения выполняются на всех спецификационных режимах движения судна, а также на «проходах» по точкам с разным шагом по частоте вращения при уточнении резонансных зон колебаний. Далее производится сопоставление результатов расчетов и экспериментов.

После этого выполняется разработка мер по предотвращению проблем недостаточной усталостной или предельной прочности деталей СТС (согласование конструктивных документов с МРС или фирмой изготовителем).



Рисунок 7 – Расположение поверхностей излома по 4-й рамовой шейке коленчатого вала дизеля вспомогательного дизеля типа S6B-MPTK

Выполнение повторных ходовых испытаний с проверкой эффективности принятых мер (модернизации) следует считать обязательным.

Приведенные сведения об усталостных повреждениях деталей СТС и КК свидетельствуют о

том, что на стадии проектирования судов необходимо выполнять (более тщательно) расчеты прочности, крутильных колебаний и свободных колебаний многочисленных упругих систем на судах и, особенно, в машинных отделениях [2,4,5,7,8].



Рисунок 8 – Фрагмент излома на рисунке 7. Трещина по образующей шейки – вершина трещины по щеке

Помимо этого, необходимо учитывать ряд факторов, возникающих в процессе эксплуатации СТС, экстремальных условий плавания и т. п. Одновременно с этим, разрабатывать меры по повышению усталостной прочности деталей СТС, подверженных циклическим нагрузкам, используя при этом современные технологии.

Литература

1. Аносов А.П. Вопросы циклической прочности судовых конструкций: учеб. пособие / А.П. Аносов, А.В. Славгородская. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2003. – 160 с.
2. Худяков С. А. Повреждения и отказы судовых технических средств: учеб. пособие / С. А. Худяков, А.В. Струтынский. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. – 150 с.
3. Токарев А.О. Отказы узлов и деталей машин. Анализ причин и профилактика / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик// Deutschland, Saarbrücken: Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 195 с. ISBN:978-3-659-53981-7.
4. Худяков С.А. Практика решения проблем вибрации судовых дизелей. – Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2006. – 172 с.
5. Худяков С.А. Практические проблемы вибрации судов: монография / С. А. Худяков, Н.А. Тарануха.–Deutschland, Saarbrücken: Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 352 с. ISBN:978-3-659-93539-8.
6. Худяков С.А. Вибрационные повреждения дизеля типа 5L60MC / С.А. Худяков // Матер. 5-й междунауч. конф.: «Проблемы транспорта Дальнего Востока». – Владивосток: Дальневосточная государственная академия, 2003. – С. 432–435.
7. Худяков, С.А. Усталостная прочность корпусных конструкций специальных судов / С.А. Худяков // Сб. докл. междунауч. конф. «Кораблестроение и океанотехника. Проблемы и перспективы». SOPP-98. – Владивосток, 1998. – С.408–410.
8. Худяков, С.А. Устранение трещин в остовах малооборотных дизелей / С.А. Худяков // Исследования по повышению эффективности и качества судоремонта. – Владивосток, ДВВИМУ, 1985. – С.12–21.
9. Лекции по динамике машин. Раздел 11. Усталость материалов и конструкций.

<http://www.detalmach.ru/lectdinamika11.htm>.

10. Барабанов Н.В. Вибрационные повреждения на судах типа «Варнемюнде» / Н.В. Барабанов, В.И. Лактюнкин, С.А. Худяков // Науч.-техн. сб. Регистра СССР. Вып.9. – Л.: Транспорт, 1980. – С.56–63.
11. Худяков С. А. Эксплуатационные отказы коленчатых валов судовых дизелей / С.А. Худяков // Вестник МГУ: Сер. Судостроение и судоремонт. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2008. – Вып. 25. – С. 55–60.

References

1. Anosov A.P. Voprosy ciklicheskoj prochnosti sudovyh konstrukcij: ucheb. po-sobie / A.P. Anosov, A.V. Slavgorodskaja // – Vladivostok: Dal'rybvтуz, 2003. – 160 s.
2. Hudjakov S. A. Povrezhdenija i otkazy sudovyh tehničeskikh sredstv: ucheb. po-sobie / S. A. Hudjakov, A.V. Strutyński // – Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2013. – 150 s.
3. Tokarev A.O. Otkazy uzlov i detalej mashin. Analiz prichin i profilaktika / A.O. Tokarev, S.N. Ivanchik, I.S. Ivanchik// Deutschland, Saarbrücken: Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 195 s. ISBN: 978-3-659-53981-7.
4. Hudjakov S.A. Praktika reshenija problem vibracii sudovyh dizelej. - Vladivostok: MGU im. adm. G.I. Nevel'skogo, 2006. - 172 s.
5. Hudjakov S.A. Praktičeskie problemy vibracii sudov: monografija /
6. A. Hudjakov, N.A. Taranuha// Deutschland, Saarbrücken: Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 352 s. ISBN: 978-3-659-93539-8.
6. Hudjakov S.A. Vibracionnye povrezhdenija dizelja tipa 5L60MC / S.A. Hudjakov // Mater. 5-j mezhдun. nauch. konf.: «Problemy transporta Dal'nego Vostoka». – Vladivostok: Dal'nevostochnaja gosudarstvennaja akademija, 2003. – S. 432–435.
7. Hudjakov, S.A. Ustalostnaja prochnost' korpusnyh konstrukcij special'nyh sudov / S.A. Hudjakov // Sb. dokl. mezhдun. konf. «Korablestroenie i okeanotehnika. Problemy i perspektivy». SOPP-98. – Vladivostok, 1998. – S.408–410.
8. Hudjakov, S.A. Ustranenie treshhin v ostovah malooborotnyh dizelej / S.A. Hudjakov // Issledovaniya po povыsheniju jeffektivnosti i kachestva sudoremonta. – Vladivostok, DVVIMU, 1985. – S.12–21.

9. Lekcii po dinamike mashin. Razdel 11. Ustaloost' materialov i konstrukcij.
<http://www.detalmach.ru/lectdinamika11.htm>.
10. Barabanov N.V. Vibracionnye povrezhdenija na sudah tipa «Varnemjunde» / N.V. Barabanov, V.I. Laktjunki, S.A. Hudjakov // Nauch.-tehn. sb. Registra SSSR. Vyp.9. – L.: Transport, 1980. – S.56–63.
11. Hudjakov S. A. Jekspluatacionnye otkazy kolenchatyh valov sudovyh dizelej / S.A.Hudjakov // Vestnik MGU: Ser. Sudostroenie i sudoremont. – Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2008. – Vyp. 25. – S. 55–60.

УДК 629.12.037.21

DOI: 10.34046/aumsuomt90-16

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НА ТОРЦЕ ПОРШНЕВОГО КОЛЬЦА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ДО СТЕНКИ ЦИЛИНДРА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТОЧНОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

*В.П. Бушланов, доктор физико-математических наук, профессор
Э.А. Туманов, курсант*

На основе точного решения уравнений Навье-Стокса проведен расчет давления в непосредственной близости от угловой точки поршневого кольца, действующего со стороны смазки, построены графики зависимостей давления от расстояния от угловой точки и на основе расчетов предложены рекомендации проектным организациям и судовым механикам по предотвращению поломок угловых частей колец. В обзорной части рассмотрены актуальные вопросы анализа дефектов поршневых колец судовых дизелей, возникающих в процессе эксплуатации, представлены материалы по устройству судовых дизелей и деталей цилиндропоршневой группы и чертежи указанных механизмов и деталей, и проведен анализ поломок колец поршней.

Ключевые слова: Износ, поршневые кольца, предел текучести, уравнения Навье – Стокса.

Based on the exact solution of the Navier-Stokes equations, pressure was calculated in the immediate vicinity of the corner point of the piston ring acting on the lubricant side, graphs of pressure versus distance from the corner point were plotted, and based on the calculations, recommendations were made to design organizations and ship mechanics on preventing breakages in corner pieces rings. In the review part, the topical issues of analysis of piston rings defects of ship diesel engines arising during operation are reviewed, materials on the arrangement of ship diesel engines and parts of the cylinder-piston group and drawings of these mechanisms and parts are presented, and an analysis of piston ring breakdowns has been performed.

Keywords: Wear, piston rings, yield strength, Navier – Stokes equations.

Введение. Условия работы цилиндропоршневой группы (ЦПГ) судовых дизелей определяются совместным влиянием множества факторов, к основным факторам относятся снабжение воздухом, нагрузка, условия смазки, охлаждение, материал, качество монтажа и технологических операций при изготовлении и ремонте. Отказ, потеря работоспособности деталей ЦПГ, влечет за собой значительные материальные и трудовые затраты на их восстановление. Актуальность изучения указанных отказов подтверждает статистика – при удовлетворительном уровне технической эксплуатации до 25% трудозатрат при обслуживании дизеля приходится на детали ЦПГ. С ухудшением качества эксплуатации доля их резко возрастает.

1. Проблема износа колец в работах, представленная в литературных источниках. Кольца ЦПГ подразделяют на кольца компрессионные и маслосъемные. Компрессионные (уплотнительные) кольца служат для уплотнения зазора между поршнем и цилиндром, отвода теплоты от головки поршня к цилиндровой втулке и да-

лее в охлаждающую воду, распределения масла по зеркалу цилиндра, а маслосъемные кольца — для снятия излишков масла, забрасываемого снизу на нижнюю часть втулки цилиндра и регулирования поступления его на верхнюю часть. Уплотняющее действие компрессионных колец обеспечивается прижатием их к зеркалу цилиндра и стенкам поршневых канавок и лабиринтным действием пакета колец. К зеркалу цилиндра кольцо прижимается силой собственной упругости и силой давления газов, проникающих через зазор между поршнем и цилиндром в над кольцевое и за кольцевое пространства (рис. 1.1). Величина удельного давления под действием сил упругости относительно невелика и составляет 0,5-2,0 бар (нижние цифры — малооборотные двигатели, верхние — среднеоборотные). Основной составляющей силы прижатия колец к стенке цилиндра является сила давления газов. Лабиринтное действие колец заключается в перетекании газа ряд объемов, сообщающихся узкими щелями. Перетекание сопровождается последовательным расширением газов и расходами энер-