

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ***Нестеренко В.Б., Завальнюк О.П.,**Херсонская государственная морская академия*

Рассмотрены способ и методика оценки технического состояния судовых конструкций длительной эксплуатации. Проанализированы напряженно-деформированное состояние и степень усталости корпуса исследуемого судна во время грузовых операций, для чего был использован метод неразрушающего контроля путем измерения коэрцитивной силы. По результатам коэрцитиметрических измерений получены числовые характеристики.

Ключевые слова: техническое состояние корпуса судна, напряженно-деформированное состояние, усталость, неразрушающий контроль, коэрцитивная сила, диагностика.

Введение. Техническое состояние судовых корпусных конструкций в эксплуатации [1] должно обеспечивать безопасность плавания и сохранность перевозимого груза.

В настоящее время в эксплуатации находится большое число судов типа «река-море», которые выработали свой расчетный ресурс, тем не менее, продолжают работать далее, т.к. их замена требует значительных капитальных вложений. Техническое состояние таких судов различно, поэтому требуется способ и методика экспертной оценки их состояния для подтверждения возможности их безопасной эксплуатации или проведения восстанавливающего ремонта либо для принятия решения относительно вывода судна из эксплуатации для утилизации.

Актуальность исследований. Согласно правилам технической эксплуатации РТМ 31.2003-77 [2] судовой экипаж обязан регулярно наблюдать за корпусом и конструкциями, восстанавливать покрытие металла, выполнять ремонт поврежденных элементов конструкции. Класс приводит в [3] нормы износа элементов конструкции, обшивки и палуб, по изменениям которых устанавливают районы и объемы замены металла. Однако на сегодняшний день приборный контроль напряженно-деформированного и усталостного состояний корпуса судна – как основного несущего элемента сложного инженерного сооружения – отсутствует.

Цель работы состоит в том, чтобы используя один из методов неразрушающего контроля, выполнить экспертную оценку технического состояния корпуса судна типа «река-море» и проанализировать его напряженно-деформированное состояние во время грузовых операций.

Результаты исследований. Под напряженно-деформированным состоянием корпуса судна [4] понимают пространственное распределение напряжений и деформаций в судовой корпусной конструкции. Напряженно-деформированное состояние корпуса судна является его важной эксплуатационной характеристикой, так как превышения определенного

уровня напряжения могут привести к деформациям или разрушению судовых конструкций.

Согласно [5] техническое состояние корпуса судна (корпусных конструкций) – это совокупность параметров, определяющих прочность, жесткость и непроницаемость корпуса (корпусных конструкций), подверженных изменению в процессе эксплуатации. Техническое состояние корпусов судов устанавливается в зависимости от степени износа их основных связей, от характеристик остаточных деформаций и других дефектов.

Для корпуса судна Регистром [5] установлены следующие виды технического состояния: *годен* – для корпуса судна, количественные характеристики дефектов которого удовлетворяют требованиям нормативной документации; *ограниченно годен* – для корпуса судна, количественные характеристики дефектов которого удовлетворяют требованиям нормативной документации только для ограниченных (по сравнению с первоначально установленными) условий эксплуатации, регламентируемых Регистром; *не годен* – для корпуса судна, количественные характеристики дефектов которого не удовлетворяют требованиям нормативной документации.

Техническое состояние корпусов судов по Правилам Регистра регламентируют по остаточным толщинам основных групп связей, параметрам деформаций и повреждений, уменьшающих общую и местную прочность корпуса.

Изменение технического состояния корпуса [1] обуславливается дефектами, возникающими при эксплуатации. Дефекты проявляются в виде постепенных износов, остаточных технологических или эксплуатационных деформаций и внезапных отказов (разрушений). Износы представляют собой закономерное уменьшение построечных толщин элементов корпусных конструкций, вызываемое коррозией, эрозией или истиранием. Остаточные эксплуатационные деформации возникают из-за перегрузок отдельных участков или всей корпусной конструкции. Разрушения проявляются в виде разрывов связей, пробоин и трещин. Явление разрушения при многократном повторении напряжений называют [4] усталостью металла. Усталостное разрушение наблюдается при наличии одной из следующих особенностей нагружения: при многократном нагружении одного знака или при многократном нагружении, периодически изменяющемся не только по величине, но и по знаку. Для разрушения от усталости недостаточно переменности напряжений. Необходимо также, чтобы напряжения имели определенную величину.

Оценку технического состояния [5] производят по различным характеристикам: по основному моменту сопротивления поперечного сечения корпуса и остаточной площади расчетной палубы; по остаточным характеристикам поперечного сечения связей корпуса; по остаточным характеристикам отдельного элемента корпуса (листовые связи, набор); по

остаточным деформациям; по состоянию сварных швов и заклепочных соединений.

Для выполнения поставленной задачи был выбран, как наиболее оптимальный [6, 7], магнитный метод неразрушающего контроля по измерениям магнитной характеристики материала конструкции – коэрцитивной силы. Экспертная оценка технического состояния корпуса судна типа «река-море» осуществлялась на основании распределения значений коэрцитивной силы материала судовых конструкций по шпангоутам.

Коэрцитивной силой H_c называют напряженность магнитного поля, необходимую для полного размагничивания предварительно намагниченого ферромагнетика (получения $B=0$ по предельной петле гистерезиса) [8].

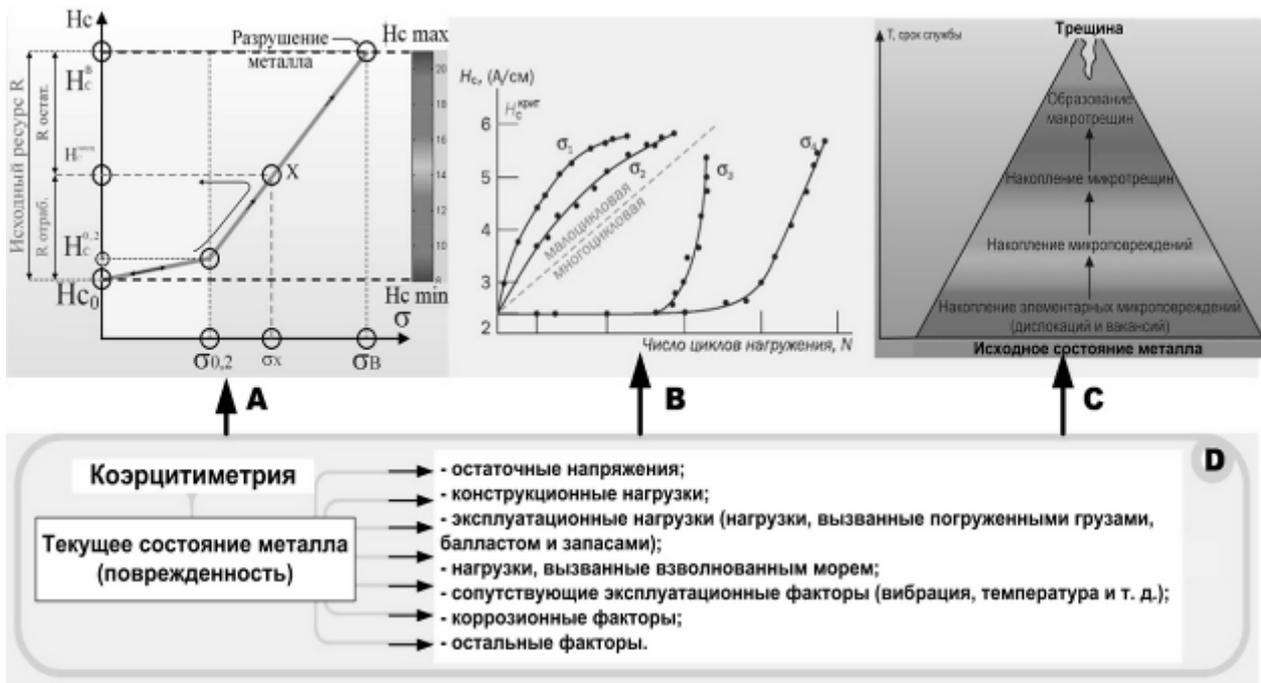


Рисунок 1 – Условные (А, В, С) разновидности развития деградации металла по усталостному типу и эксплуатационные факторы судов (D)

На рисунке 1 модельно показаны основные варианты А, В, С зарождения, накопления и развития необратимых усталостных изменений металла конструкционных марок сталей широкого применения. Часть D рис. 1 показывает главные эксплуатационные факторы судов, являющиеся непосредственной причиной этого процесса деградации или своеобразными его катализаторами. Часть А рис. 1 соответствует доведению металла до разрушения при статическом нагружении за счет механического истощения запаса пластичности и прочности металла. Этот вариант проще всего имитировать при стендовых испытаниях образцов металла на растяжение. В условиях конструкционной деформационной закрепощенности металла имеет место другая крайность деградации металла по усталостному типу (рис. 1, С), когда развитие и накопление микроповреждений в объеме металла происходит без его выраженного макропластического

деформирования. Часть В – смешанный механизм усталостной деградации, когда накопление микрповреждений происходит совместно с невыраженным макропластическим деформированием конструкции.

В процессе накопления микрповреждений и исчерпания запаса пластичности величина коэрцитивной силы H_c возрастает на 300-400% для таких сталей, как, например, Ст3 или 09Г2С. Для каждой марки металла имеются свои величины коэрцитивной силы в состоянии поставки, H_c^0 , и в состоянии, эквивалентном напряжениям на пределе прочности, H_c^B . Разница $\Delta H_c = H_c^B - H_c^0$ характеризует потенциальный эксплуатационный ресурс металла. В зависимости от сочетания эксплуатационных факторов, (рис. 1, D) и интенсивности нагружения ресурс может расходоваться с разной скоростью (рис. 1, B). Скорость и величину исчерпания ресурса возможно контролировать на практике измерениями коэрцитивной силы металла, особенно в идущих с опережением зонах концентрации нагружений и напряжений, являющих собой самые опасные области судового корпуса.

Эксперименты осуществлялись на одном и том же судне типа «река-море» в процессе погрузки семян подсолнечника. Грузовые операции проводились в пресноводном порту: на терминале с. Львово (Херсонская обл., р. Днепр). Исследуемое судно имело около 1200 т балласта и 1800 т груза.

Измерения выполнялись согласно временной методике экспертной оценки и технического диагностирования судовых конструкций коэрцитиметрическим методом [9].

Для измерений использовался магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М, который предназначен для контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, изготовленных из магнитных марок конструкционных сталей. Прибор «различает» по коэрцитивной силе механические свойства и структурное состояние конструкционных марок сталей широкого применения на основных стадиях диаграммы нагружения – упругой, упругопластической и пластической. Диапазон измерения коэрцитивной силы прибором составляет 1,00÷40,00 А/см. Пределы основной допускаемой погрешности измерения коэрцитивной силы не превышают $\pm(0,025/H_c + 0,03)$. Длительность цикла измерения не более 8 с.

Принцип действия прибора основан на вычислении коэрцитивной силы по измеряемому току компенсации остаточной магнитной индукции в замкнутой магнитной цепи, составленной из магнитопровода преобразователя и контролируемой конструкции.

Цикл измерений включает этапы:

- магнитная подготовка (продолжительность 3 с);
- компенсация остаточной намагниченности (продолжительность 3 с);
- вычисление коэрцитивной силы (продолжительность 1-2 с);
- индикация результата измерения.

В процессе магнитной подготовки область исследуемой конструкции между полюсными наконечниками магнитной системы преобразователя

періодически намагнічується до насичення імпульсами тока с амплітудою не менше 2,0 А. Затем здійснюється автоматическая компенсація поля остаточной намагніченности. По величині тока компенсації магнітного поля автоматически вичислюється значення коерцитивной сили. После чего происходит включение цифровой индикации.

В целом, тактика оценки технического состояния судна предполагала измерение коерцитивной силы в различных точках на поверхности горизонтальной пластины комингса трюмов, как верхней поверхности объемного бруса. Сплошной комингс грузовых трюмов является одной из важнейших несущих продольных связей и поэтому может использоваться в качестве объекта контроля прочностно-усталостных характеристик судна типа река-море.

Таким образом, наблюдения и измерения выполнялись по верхней поверхности горизонтального листа сплошного комингса люка с правого и левого бортов. Комингс исследуемого судна простирается от шпангоута №50 до шпангоута №210. Материал контрольного листа – сталь 09Г2С.

Механические и магнитные свойства листов толщиной 5-20 мм конструкционной стали 09Г2С приведены в таблице 1. Энергетическая теория разрушения [10] позволяет определить базовые параметры контроля состояния металла магнитных методом по величине коерцитивной силы, а именно: H_c^0 – исходное значение коерцитивной силы (в первоначальном ненапряженном состоянии значение коерцитивной силы является наименьшим для какой-либо марки стали), H_c^T – соответствует уровню внутренних напряжений, равных пределу текучести стали, H_c^B – отвечает достижению предела прочности стали.

Таблица 1 – Механические и магнитные свойства листов толщиной 5-20 мм конструкционной стали 09Г2С

Марка стали	Механические свойства			Магнитные свойства, А/см			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	H_c^0	H_c^T	H_c^B	$H_c^{уст}$
09Г2С	470	325	21%	3.0	7.5	9.5	9.5

Граничное допустимое значение коерцитивной силы для стали марки 09Г2С составляет 9,5 А/см. В процессе экспериментальных измерений показания коерцитиметра не превышали 6÷7 А/см, поэтому уровень безопасной работы судна являлся приемлемым, т.к. это значение соответствует напряжениям при растяжении и сжатии образца на пределе текучести. В реальном металле корпуса при этом текучесть отсутствует. В сварной конструкции предельное допустимое значение коерцитивной силы будет несколько больше до 7,5÷8 А/см, за счет армирующего действия более прочного металла сварных швов и за счет стесненности свободы пластического деформирования металла обшивки несущих элементов каркаса, как особенности конструкции корпуса.

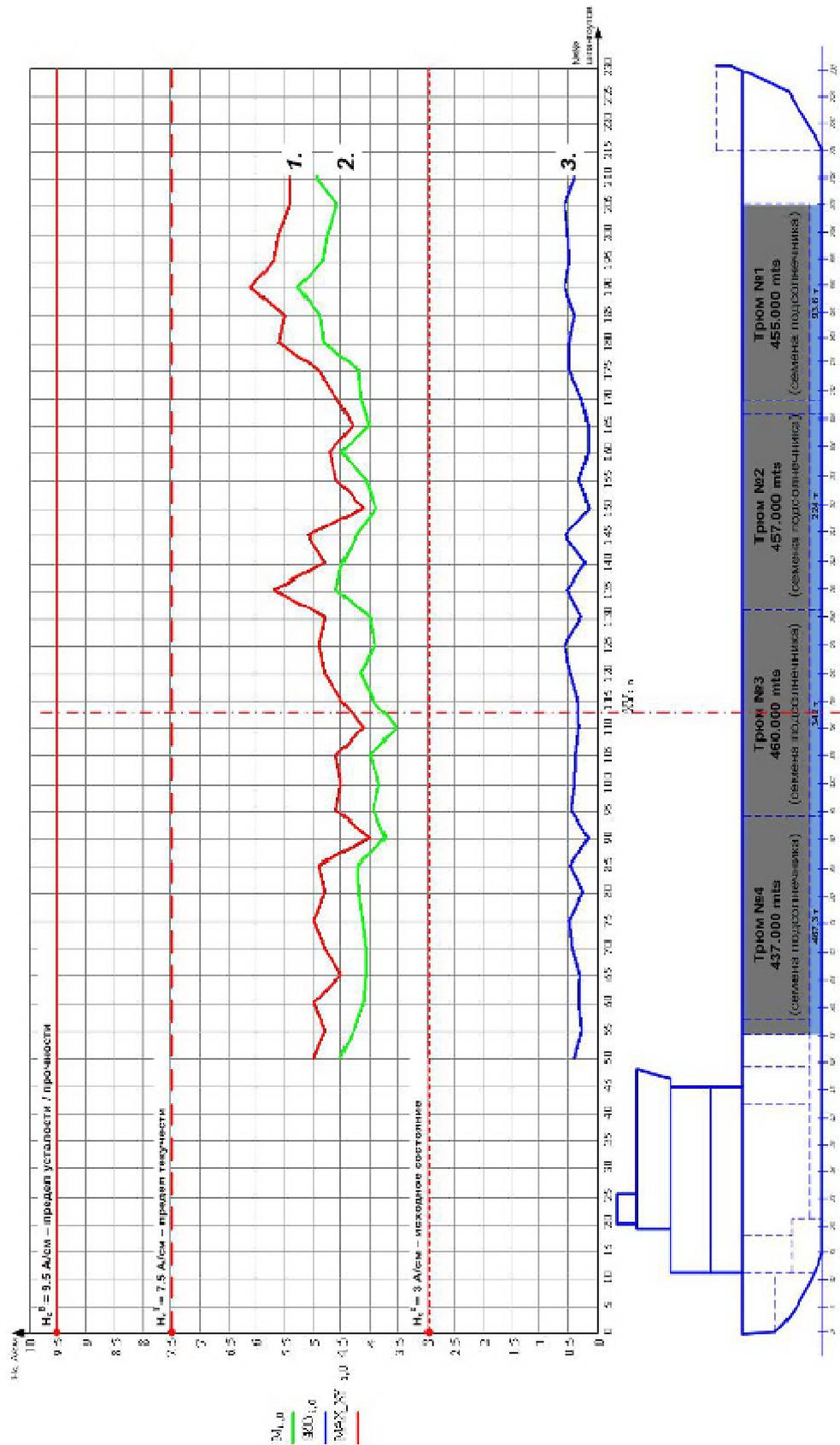


Рисунок 2 – Числовые характеристики, полученные по результатам коэрцитиметрических измерений:

- 1 – наибольшее выявленное в данной зоне значение H_c^{\max} ;
 2 – математическое ожидание; 3 – среднеквадратическое отклонение

По результатам коэрцитиметрических измерений получены следующие числовые характеристики (рис. 2): математическое ожидание (МО); наибольшее выявленное в данной зоне значение H_c^{\max} ; среднеквадратическое отклонение (СКО) в каждом сечении шпангоута, характеризующее степень разброса состояний металла относительно его текущего усредненного состояния, характеризуемого величиной МО. С течением срока службы числовые значения МО и СКО очевидно будут возрастать. Скорость их роста по годам будет означать скорость истощения ресурса. Это численная характеристика величины накопленной усталости и скорости ее роста.

Также в ходе визуального осмотра судовых конструкций были выявлены следующие деформации и повреждения: деформация стоек фальшборта в области соединения их с главной палубой в районе 135 шпангоута правого и левого бортов; разрыв стойки фальшборта в районе 177 шпангоута левого борта; разрыв вертикальной стенки комингса люка в районе 100-110 шпангоутов правого борта; разрыв настила главной палубы в районе 110 шпангоута правого борта.

Выводы:

1. Используя метод коэрцитиметрии, выполнена экспертная оценка технического состояния корпуса судна типа «река-море».

2. Измерения не установили перенапряжений в корпусе судна, по-видимому, осуществляемый вариант погрузки может считаться наиболее благоприятным с позиции сохранности корпуса.

3. С помощью измерений коэрцитивной силы по горизонтальным поверхностям комингсов трюмов установлено, что наибольшие напряжения корпус испытывает в сечениях шпангоутов № 50; 135; 190-185; 205-210. В районе шпангоута № 50 наблюдается повышенная напряженность главной палубы в месте перехода от комингсов люка к рубке. Значительные напряжения сконцентрированы в районе 132-142 шпангоутов правого и левого бортов.

4. Для данного судна, судя по его обзорной коэрцитиметрической экспертизе, наиболее характерен линейный вариант развития и накопления поврежденности. Корпус судна не имеет выраженных слабых мест с недопустимым уровнем накопленной усталости. Неравномерность деградации металла вполне соответствует его сроку службы. Если организовывать «режим эксплуатационного управления ресурсом», который в части состояния корпуса судна предполагает слежение в ручном режиме за выявленными зонами с самыми высокими значениями величины коэрцитивной силы, например, один раз в полгода, то график динамики изменений в этих точках покажет скорость нарастания деградации металла, если она будет иметь место. По этой скорости легко определить время, когда состояние металла станет несовместимым с безопасной эксплуатацией судна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машиностроение : энциклопедия в 40 т. / Редсовет : Фролов К. В., председатель и др. – М. : Машиностроение. Разд. 4: Расчет и конструирование машин, Т. 4-20. Корабли и суда, Кн. 2. Проектирование и строительство кораблей, судов и средств океанотехники / В. Т. Томашевский, В. М. Пашин, В. Л. Александров [и др.] ; Ред.-сост. В. Т. Томашевский, отв. ред. В. М. Пашин. – 2004. – 882 с.
2. Руководящий технический материал. РТМ 31.2003-77 «Корпус, помещения, устройство и системы судна. Правила технической эксплуатации». – ЦРИА «Морфлот». Министерство морского флота СССР, 1988. – 97 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов: в 2 т. / Рос. мор. регистр судоходства. – СПб. : [б. и.]. Т. 1. – 2003. – 492 с.
4. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.; Отв. ред. Г. С. Писаренко – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Наук. думка, 1988. – 736 с.
5. Сборник нормативно-методических материалов. Книга четвертая / Регистр СССР. – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1986. – 136 с.
6. Безлюдько Г. Я. Применение коэрцитиметрии для мониторинга продольной прочности корпуса судна в условиях эксплуатации / Г. Я. Безлюдько, Е. И. Елкина, Р. Н. Соломаха, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко // В мире неразрушающего контроля. – СПб, 2011. – № 3(53). – С. 19-23.
7. Завальнюк О. П. Мониторинг прочности судна как один из путей обеспечения безопасности мореплавания / О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2011. – № 4. – С. 53-56.
8. Машиностроение: энциклопедия в 40 т. / Редсовет : Фролов К. В., председатель и др. – М. : Машиностроение. Разд. 3: Технология производства машин, Т. 3-7. Измерения, контроль, испытания и диагностика / В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, Н. П. Валуев и др. – 2. изд., испр. и доп. – 2001. – 462 с.
9. Методика експертної оцінки і технічного діагностування суднових конструкцій коерцитиметричним методом (тимчасове видання) / В. Б. Нестеренко, Завальнюк О.П. – Херсон : ХДМА. Науково-дослідна лабораторія «Експертна оцінка і моніторинг загальної міцності суден для забезпечення безпеки мореплавства», 2012. – 36 с.
10. Машиностроение: энциклопедия в 40-ка т. / Редсовет: Фролов К. В., председатель и др. – М. : Машиностроение. Разд. 1: Инженерные методы расчетов, Т. 1-3, Кн. 1. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин / К. С. Колесников, Д. А. Александров, В. К. Асташев и др. – 1994. – 533 с.

Нестеренко В.Б., Завальнюк О.П. ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розглянуто спосіб і методика оцінки технічного стану суднових конструкцій тривалої експлуатації. Проаналізовано напружено-деформований стан і ступінь втоми корпусу досліджуваного судна під час вантажних операцій, для чого був використаний метод неруйнівного контролю шляхом вимірювання коерцитивної сили. За результатами коерцитиметричних вимірювань отримані числові характеристики.

Ключові слова: технічний стан корпусу судна, напружено-деформований стан, втома, неруйнівний контроль, коерцитивна сила, діагностика.

Nesterenko V.B., Zavalniuk O.P. ASSESSMENT OF TECHNICAL STATE OF LONG-TERM USE OF SHIP CONSTRUCTION

The methods and assessment methodology the technical state of ship structures long-term operation are considered. Analyzed the stress-strain state and the degree of fatigue of the investigated ship's hull during cargo operations, which used the method of non-destructive control by measuring the coercive force. According to the results of measurements obtained coercimetric numerical characteristics.

Keywords: technical condition of the hull, the stress-strain state, fatigue, non-destructive control, coercive force, diagnostics.