

*Дослідження присвячено експериментальному визначенню критичних зон максимальних значень механічних напружень в суднових корпусних конструкціях. За допомогою коерцитиметричного моніторингу визначені осередки підвищених значень механічних напружень корпусів досліджуваних суден. Встановлено, що впровадження на морських судах автоматичного моніторингу технічного стану в процесі їх експлуатації дозволить збільшити надійність і безпеку роботи морського флоту*

*Ключові слова: корпус судна, технічний стан, коерцитиметричний моніторинг*

*Исследование посвящено экспериментальному определению критических зон максимальных значений механических напряжений в судовых корпусных конструкциях. С помощью коэрцитиметрического мониторинга определены районы повышенных значений механических напряжений корпусов исследуемых судов. Установлено, что внедрение на морских судах автоматического мониторинга технического состояния в процессе их эксплуатации позволит увеличить надежность и безопасность работы морского флота*

*Ключевые слова: корпус судна, техническое состояние, коэрцитиметрический мониторинг*

УДК 629.5.023, 620.179.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50613

# АВТОМАТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОРПУСУ СУДНА В ПРОЦЕСІ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**О. П. Завальнюк**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра експлуатації судового  
електрообладнання і засобів автоматики  
Херсонська державна морська академія  
пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000  
E-mail: olga-zavalnjuk@mail.ru

## 1. Вступ

Технічний стан суднових корпусних конструкцій під час їх експлуатації повинен забезпечувати плавання та збереження вантажів, що перевозяться. Проблеми підвищення безпеки мореплавства та забезпечення охорони навколишнього морського середовища досить тісно пов'язані між собою. Аварії морських суден через руйнування корпусних конструкцій (розрив зв'язків, пробіони, тріщини) і супутні їм розливи палива та інших нафтопродуктів особливо впливають на морську природу і атмосферу. В даний час обстановка в судноплаванні, зокрема в нашій державі, склалася таким чином, що багато торгових суден виробили свій розрахунковий ресурс або близькі до його вичерпання, але продовжують експлуатуватися [1]. Такі судна, як правило, були розраховані з достатнім запасом міцності, але питання визначення межі надійності і безпечної експлуатації суден та їх залишкового ресурсу надалі залишаються достатньо актуальними.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Технічний стан корпусу судна [2] є сукупністю параметрів, що визначають міцність, жорсткість і непроникність корпусу (корпусних конструкцій), схильних до зміни в процесі експлуатації. Враховуючи дію на корпус трьох основних видів навантажень [3]: на тихій воді, на хвилюванні чи від взаємодії з льодом, більшість науковців – провідних фахівців в галузі міцності судна у своїх працях здебільшого спільні у думці щодо розташування критичних зон суднових корпусів. Так відповідно до статистики пошкодження [3] найчастіше місця підвищених механічних напружень, залишкові деформації чи тріщини виникають у середній частині корпусу. У роботі

[4] відмічається систематичне виникнення конструкційних ушкоджень саме у районі мідель-шпангоута судна в ході проведення вантажних та баластних операцій. У дослідженні [5] наголошується на те, що особливо велика кількість пошкоджень конструкцій спостерігається на судах, які експлуатуються у складних метеорологічних умовах і відмічає критичними зонами корпусу судна місця, які знаходяться в чверті довжини судна від носового і кормового перпендикулярів. Згідно із [6] місцями підвищених механічних напружень переважно є поперечні перетини корпусу, близькі до міделя судна. Напруження також значно збільшуються в конструкціях з різко змінними перетинами (наприклад, район переходу палуби у надбудову). Також через явище слемінгу (гідродинамічні навантаження, що мають характер удару) критичні зони можуть зосереджуватися в районі плоскої ділянки днища і початку скулового пояса [7], а залишкові деформації від льодових навантажень захоплюють ще й весь скуловий пояс, піднімаючись навіть вище рівня настилу другого дна [8].

Відповідно до рекомендацій Міжнародної морської організації та провідних Класифікаційних товариств по установці систем моніторингу механічних напружень корпусу для підвищення безпечної експлуатації суден [9–11], всі судна повною вантажопідйомністю від 20000 тонн необхідно обладнати системами автоматичного моніторингу технічного стану корпусу. Проте з різних причин судновласники ухиляються від встановлення такого обладнання на своїх судах. Всесвітньо відомі фірми-виробники провідних морських держав розробили ряд систем автоматичного моніторингу технічного стану суднових корпусів [12–15]. Давачі механічних напружень корпусу судна – основні складові таких систем – згідно [10] встановлені в його середній частині і в місцях, що знаходяться в чверті довжини судна від

носового і кормового перпендикулярів. У якості давачів механічних напружень, як правило, застосовуються тензорезистори [16] чи волоконно-оптичні тензометри [17]. Разом з цим є досить широко уживаними засоби контролю механічних напружень феромагнітних сталевих конструкцій, що базуються на магнітних методах неруйнівного контролю [18]. Очевидним є використання саме магнітних властивостей феромагнітного корпусу судна з метою визначення у ньому механічних напружень для того, щоб за їх величиною оцінювати технічний стан і надійність суднового корпусу під час його експлуатації.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є експериментальне визначення критичних зон максимальних значень механічних напружень в суднових корпусних конструкціях для здійснення контролю загальної міцності судна у реальному часі та автоматичного моніторингу технічного стану корпусу в процесі його експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні задачі:

- експериментально обрати найбільш придатні для контролю загальної міцності судна несучі елементи суднового корпусу;
- користуючись одним з методів неруйнівного контролю для ряду досліджуваних суден, визначити осередки підвищених значень механічних напружень їх корпусів.

### 4. Методика експерименту на досліджуваних суднах

Визначення критичних зон базувалося на класичному положенні про еквівалентний брус [7] і проводилося на чотирьох досліджуваних суднах з перевищенням терміном експлуатації – більше 25 років (т/х «Volgo-Balt 130», т/х «LEDA», т/х «Сибирский-2101», т/х «DIVA»). Суцільний комінгс вантажних трюмів [19, 20] є одним з найважливіших несучих подовжніх зв'язків корпусу судна і тому є доступним і найбільш зручним у якості об'єкту контролю загальної міцності судна та механічних напружень суднового корпусу в процесі його експлуатації. При повному розкритті палуб подовжні комінгси [19, 20], як правило, конструюють безперервними, і вони є частиною еквівалентного бруса. У звичайних умовах, коли над палубою є два подовжні безперервні комінгси, нормуються напруження у верхній палубі. Для сприйняття більш високих механічних напружень в комінгсах їх виконують з міцніших сталей, здатних сприймати більші напруження, аніж напруження у верхній палубі.

Разом з тим, частиною еквівалентного бруса є і горизонтальний кіль суднового корпусу, який являється потовщеним поясом обшивки днища, симетричним щодо діаметральної площини. Горизонтальний кіль, як і безперервний комінгс, може сприймати механічні напруження стиснення і розтягування. Слід зазначити, що для великотоннажних суден характерний коробчастий або тунельний кіль [19], утворений двома вертикальними стрингерами, зазвичай симетричними діаметральної площині, з відстанню не більше 1,8 м між ними.

Для виявлення осередків підвищених значень механічних напружень корпусів досліджуваних суден був використаний магнітний метод неруйнівного

контролю шляхом вимірювання коерцитивної сили матеріалу несучих суднових конструкцій [21, 22], якими в даних польових умовах найбільш доступними та зручними для контролю були суцільні комінгси вантажних трюмів з обох бортів судна.

Відповідно до [18] в ході коерцитиметричного моніторингу на несучих елементах суднового корпусу розміщують давачі, за допомогою яких вимірюють магнітну характеристику матеріалу (коерцитивну силу), значення якої використовують для оцінки технічного стану корпусу судна. У якості давачів магнітної характеристики застосовуються давачі коерцитивної сили.

Вимірювання коерцитивної сили здійснювалося за допомогою магнітного структуроскопа КРМ-Ц-К2М з автоматичним живленням, оснащеного П-подібним приставним перетворювачем на основі давача Холла [23]. Діапазон вимірювання коерцитивної сили – від 1 до 60 А/см. Похибка вимірювання не перевищувала 5 %. Тривалість вимірювального циклу складала 6 с. Точки контролю коерцитивної сили на комінгсах обиралися таким чином, щоб їх положення можна було точно визначити і перенести на план загального розташування досліджуваного судна, використовуючи відповідні координати. У якості координатних осей слугували вісі X та Y, причому вісь Y перпендикулярна осі X у основній площині і направлена у бік правого (+) або лівого (–) борту. Вісь X з початком відліку від носового або кормового перпендикулярів в залежності від напрямку відліку шпангоутів співпадає з лінією кіля (лінією перетину основної та діаметральної площин судна). Вісь Y є відстанню контрольованої точки від діаметральної площини судна – подовжньої площини симетрії судна. Для контрольованих точок для зручності приймалися значення вісі X, які збігаються з кожним п'ятим шпангоутом судна (елементом поперечного набору корпусу). Відстань між кожним п'ятим шпангоутом досліджуваного судна дорівнювала 2,5 м.

Здебільшого матеріалом комінгсу вантажних трюмів досліджуваних суден являлася конструкційна сталь 09Г2С [24].

Вимірювання коерцитивної сили  $H_c$  матеріалу можна було проводити навіть через невеликий шар (до 6 мм) захисного покриття (фарбу, іржу тощо) [23]. Спочатку вимірювалися значення магнітної характеристики (коерцитивної сили) матеріалу комінгса, визначався розподіл магнітної характеристики матеріалу несучого елемента за шпангоутами вздовж судна, за яким визначалися критичні зони, де магнітна характеристика матеріалу в процесі експлуатаційних навантажень мала максимальні значення.

### 5. Результати експериментального визначення критичних зон в суднових корпусних конструкціях

За вище описаною методикою експерименту на досліджуваних суднах отримано графіки розподілів коерцитивної сили  $H_c$  вздовж комінгса трюмів. На рис. 1 представлений графік розподілу коерцитивної сили уздовж комінгсів трюмів одного з досліджуваних вантажних суден від шпангоута № 50 – в кормовій частині до шпангоута № 210 – в носовій частині (на рис. 1 номера шпангоутів не вказані).

Схема розташування давачів коерцитивної сили уздовж комінгсів трюмів вантажного судна зображена на рис. 2.

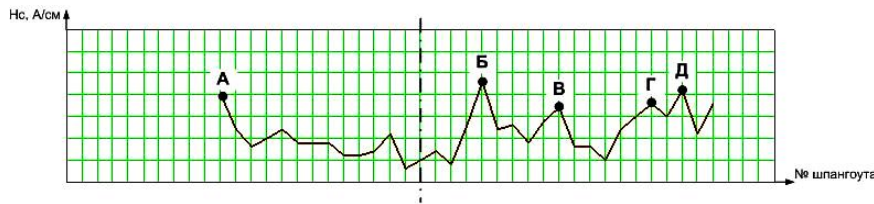


Рис. 1. Графік розподілу коерцитивної сили уздовж комінгсів трюмів вантажного судна: А, Б, В, Г, Д — критичні зони несучих суднових конструкцій

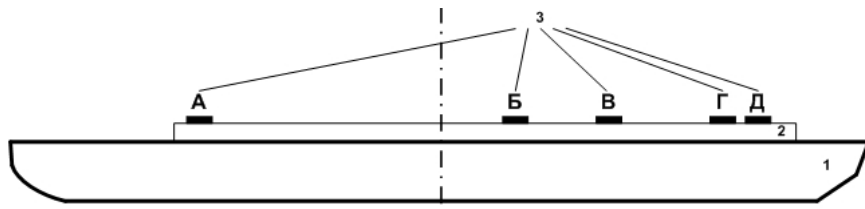


Рис. 2. Схема розташування датчиків коерцитивної сили уздовж комінгсів трюмів вантажного судна: 1 — корпус судна; 2 — комінгс трюмів; 3 — датчик коерцитивної сили

За графіками розподілу коерцитивної сили  $H_c$  було визначено критичні зони корпусу досліджуваного судна, в яких коерцитивна сила набуває максимального значення (зони А, Б, В, Г, Д). Порівнюючи отримані графіки, очевидно [18], що при будь-яких станах завантаження/баластування досліджуваного судна критичні зони у даному випадку виділяються в зонах А, Б, В, Г, Д, підтвержуючи факт того, що виявлені максимальні значення коерцитивної сили являють собою тенденцію, яка має місце при будь-якому стані завантаження/баластування досліджуваного судна.

### 6. Обговорення результатів експериментального визначення критичних зон корпусів суден

Отже коерцитивна сила  $H_c$  матеріалу дозволяє безпосередньо визначити механічні напруження  $\sigma$  в судновій конструкції без її руйнування на основі відповідної кореляційної залежності між напруженим станом  $\sigma$  і коерцитивною силою матеріалу  $H_c$ . Напружений стан  $\sigma$  контрольованих елементів конструкції в критичних зонах [21, 22] використовують для визначення технічного стану несучих елементів конструкції судна в цілому. Зокрема, за коерцитивною силою можна визначити, чи перевищують напруження  $\sigma$  матеріалу в даний момент експлуатації судна значення, що відповідають умовній межі плинності  $\sigma_{0,2}$  або межі міцності  $\sigma_b$ , так як для кожного із цих параметрів для даного матеріалу існують значення коерцитивної сили  $H_c^m$  і  $H_c^b$  відповідно [21, 22, 24].

Отже місцями підвищених механічних напружень переважно є поперечні перетини корпусів, близькі до міделя судна. В період важких штормових умов плавання при ударах судна носом об воду і ударах води, що потрапляє через носову частину судна на палубу районами підвищених напружень також можуть бути поперечні перетини корпусу, розташовані приблизно на відстані чверті довжини судна від носового перпендикуляра. Напруження також значно збільшуються в конструкціях з різко змінними перетинами (наприклад, район переходу палуби в надбудову), тому зонами підвищених напружень є і поперечні перетини корпусу, розташовані приблизно

на відстані чверті довжини судна від кормового перпендикуляра (рис. 1).

Але у кожного судна можуть бути індивідуальні критичні зони, розташування яких залежить від його конструкції, віку, технічного стану, умов експлуатації тощо. Тому, визначаючи критичні зони суднових корпусних конструкцій, слід проводити аналіз за експериментально отриманим розподілом значень коерцитивної сили матеріалу суднових конструкцій за шпангоутами.

У загальному випадку кількість таких критичних зон суднового корпусу може бути відмінною від представлених на рис. 2. При більшій кількості певних критичних зон поліпшується достовірність моніторингу за рахунок введення нових (характерних для даної конкретної конструкції судна) критичних районів.

Таким чином, запропонована методика встановлення критичних зон суднових корпусних конструкцій, яка базується на коерцитиметричному моніторингу, дозволяє найбільш точно визначати зони максимальних значень напружень в суднових конструкціях, на відміну від рекомендацій Міжнародної морської організації, а також збільшує достовірність при визначенні напруженого стану несучих елементів за рахунок об'єктивного і обґрунтованого визначення критичних зон конструкції конкретного судна.

### 7. Висновки

В ході проведеного дослідження було експериментально визначено найбільш придатні для контролю загальної міцності судна несучі елементи суднового корпусу. Користуючись одним методом коерцитиметрії для ряду досліджуваних суден, визначено осередки підвищених значень механічних напружень їх корпусів, встановлено критичні зони.

Використовуючи датчики коерцитивної сили, стаціонарно встановлені у відповідних точках на горизонтальній поверхні комінгса трюмів, можна отримувати інформацію про фактичний стан навантажень на корпус судна в реальному часі, а також здійснювати контроль поздовжньої міцності судна та моніторинг технічного стану корпусу. Впровадження на морських торгових суднах автоматичного моніторингу технічного стану суднових корпусів в процесі їх експлуатації дозволить збільшити надійність і безпеку роботи флоту в цілому.

У перспективі подальших досліджень – створення експертної системи експериментальної оцінки технічного стану корпусу судна за результатами інформації від магнітометричних перетворювачів, за допомогою яких можна вимірювати не тільки коерцитивну силу, але й і магнітну проникність та залишкову намагніченість, що значно збільшить достовірність контролю. Також подальший розвиток даного напрямку дозволяє перейти від контролю величини механічних напружень до визначення залишкового ресурсу роботи контрольованого об'єкта. При

цьому результати обстеження області не залежатимуть від кваліфікації фахівця, який проводить контроль. Це забезпечить об'єктивність контролю і дозволить створювати паспорти надійності морських торгових суден.

## 8. Подяка

Дослідження виконані у науково-дослідній навчальній лабораторії «Експертне оцінювання та моніторинг загальної міцності суден для забезпечення мореплавства»

Херсонської державної морської академії в межах роботи над держбюджетною темою № 6/13 «Розробка концепції неруйнівного контролю несучих елементів суднових конструкцій у процесі їх експлуатації», затвердженою Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України № 1193 від 25.10.2012 р. (№ 0113U003114). Також прикладні дослідження виконувалися в рамках договору про науково-технічне співробітництво № 1 від 19.11.2010 р. між Херсонською державною морською академією та судноплавною компанією «VESTRA ltd», яка надавала свої судна для проведення наукових вимірювань.

## Література

1. Регістрова книга суден [Електронний ресурс]. – Класифікаційне товариство Регістр судноплавства України. – Режим доступу: <http://www.shipregister.ua/>. – 16.09.2015.
2. Томашевский, В. Т. Машиностроение. Энциклопедия. Расчет и конструирование машин. Раздел IV. Корабли и суда. Т. IV-20. Проектирование и строительство кораблей, судов и средств океанотехники. Кн. 2 [Текст] / В. Т. Томашевский, В. М. Пашин, В. Л. Александров и др.; под ред. В. Т. Томашевского, В. М. Пашина. – СПб.: Политехника, 2004. – 882 с.
3. Максимаджи, А. И. Капитану о прочности корпуса судна: Справочник [Текст] / А. И. Максимаджи. – Л.: Судостроение, 1988. – 224 с.
4. Павленко, Л. В. Особенности эксплуатации балкеров: учеб. Пособие [Текст] / Л. В. Павленко, Л. А. Козырь. – Одесса: ЛАТ-СТАР, 2002. – 80 с.
5. Барабанов, Н. В. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций [Текст] / Н. В. Барабанов, Н. А. Иванов, В. В. Новиков, Г. П. Шемендук; 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
6. Білокурць, А. О. Керівництво з оновлення суден внутрішнього та змішаного плавання [Текст] / А. О. Білокурць. – Київ: Регістр судноплавства України, 2015. – 32 с.
7. Rawson, K. J. The ship girder. Basic Ship Theory [Text] / K. J. Rawson, E. C. Tupper. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2001. – P. 177–236. doi: 10.1016/b978-075065398-5/50009-1
8. Vhanmane, S. Estimation of ultimate hull girder strength with initial imperfections [Text] / S. Vhanmane, B. Bhattacharya // Ships and Offshore Structures. – 2008. – Vol. 3, Issue 3. – P. 149–158. doi: 10.1080/17445300802204389
9. Common Structural Rules for Bulk Carriers [Electronic resource]. – International association of classification societies, 2006. – Available at: <http://www.ias.org.uk/> – 16.09.2015.
10. MSC/Circ.646. Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems [Electronic resource]. – International marine organization. – Available at: <http://www.imo.org/> – 16.09.2015.
11. Investigation Report on Structural Safety of Large Container Ships, September [Electronic resource]. – Nippon Kaiji Kyokai (Class NK), 2014. – Available at: <http://www.classnk.or.jp/> – Title from the screen.
12. Hull Stress Monitoring System «HULLMOS» [Electronic resource]. – The official website of company ROUVARI OY (Finland). – Available at: <http://www.rouvari.fi/> – 16.09.2015.
13. The fiber optic hull stress monitoring system «SENSFIB» [Electronic resource]. – The official website of company Light Structures AS (Norwegian). – Available at: <http://www.lightstructures.no/> – 16.09.2015.
14. Hull Condition Monitoring System «HMON» [Electronic resource] / The official website of the WEIR-JONES GROUP (Canada). – Available at: <http://www.weir-jones.com/> – 16.09.2015.
15. Integrated Marine Monitoring System [Electronic resource]. – The official website of the BMT Scientific Marine Services (USA). – Available at: <http://www.scimar.com/> – 16.09.2015.
16. Ștefănescu, D. M. Handbook of Force Transducers [Text] / D. M. Ștefănescu. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – 612 p. doi: 10.1007/978-3-642-18296-9
17. Krohn, D. A. Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications [Text] / D. A. Krohn, W. MacDougall, A. Mendez. – Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2014. – 317 p. doi: 10.1117/3.1002910
18. Мирошников, В. В. Контроль прочности корпуса судна [Текст] / В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко. – Херсон: Гринь Д. С., 2015. – 108 с.
19. Papanikolaou, A. Ship Design. Methodologies of Preliminary Design [Text] / A. Papanikolaou. – Springer Netherlands, 2014. – 628 p. doi: 10.1007/978-94-017-8751-2
20. Eyres, D. J. Ship Construction. Decks, hatches, and superstructures [Text] / D. J. Eyres, M. Sc., F.R.I.N.A. – Springer, 2007. – P. 209–225. doi: 10.1016/B978-075068070-7/50021-9
21. Пат. № 76864 Україна, МПК В63В 9/08. Спосіб моніторингу технічного стану несучих елементів суднових конструкцій [Текст] / Нестеренко В. Б., Учанін В. М., Завальнюк О. П., Безлюдько Г. Я. – заявник та власник патенту Херсонська державна морська академія. – № у 2012 04407; заявл. 09.04.12; опубл. 25.01.13, Бюл. № 2. – 4 с.
22. Пат. № 106099 Україна, МПК В63В 9/08 (2006.01). Спосіб моніторингу технічного стану несучих елементів конструкції судна [Текст] / Завальнюк О. П., Учанін В. М. – заявники та власники патенту Херсонська державна морська академія, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – № а 2012 07675; заявл. 22.06.2012; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. – 4 с.
23. Магнітний структуроскоп КРМ-Ц-К2М [Електронний ресурс]. – НВФ «Специальные Научные Разработки». – Режим доступу: <http://www.snr-ndt.com/> – 16.09.2015.
24. Eyres, D. J. Ship Construction. Steels [Text] / D. J. Eyres, M. Sc., F.R.I.N.A. – Springer, 2007. – P. 42–49 doi: 10.1016/B978-075068070-7/50006-2