

УДК 629.5.064

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИЦИОННОГО ВАЛА В СУДОВОМ ВАЛОПРОВОДЕ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ЗАПРЕТНЫХ ЗОН, ВЫЗВАННЫХ КРУТИЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Горбачев Максим Михайлович¹, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство»

e-mail: max9999_9@mail.ru

Заботкин Николай Васильевич¹, аспирант

e-mail: nik-30rus@mail.ru

¹ Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена возможность снижения крутильных колебаний судовых валопроводов путем замены стальных элементов на полимерно-композиционные валы. На примере судна бункеровщика «Лиман» выполнен расчёт свободных колебаний для двух вариантов: замена промежуточного вала и замена вала крепления демпфера. Показано, что установка композиционного вала в зоне крепления демпфера позволяет снизить моторную форму колебаний на 12% и сместить запретные зоны частот вращения главного двигателя в зону начального разгона.

Ключевые слова: судовой валопровод, крутильные колебания, полимерно-композиционные материалы, промежуточный вал, запретные зоны частот.

USE OF POLYMER-COMPOSITE SHAFTS IN MARINE SHAFTING TO ELIMINATE TORSIONAL VIBRATION-INDUCED PROHIBITED SPEED RANGES

Maxim M. Gorbachev¹, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Operation of Water Transport and Industrial Fishing

e-mail: max9999_9@mail.ru

Nikolai V. Zabotkin¹, Doctoral Student

e-mail: nik-30rus@mail.ru

¹ Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract. The article considers the possibility of reducing torsional vibrations of marine shafting by replacing steel elements with polymer-composite shafts. Using the bunker vessel “Liman” as an example, free vibration calculations were performed for two options: replacement of the intermediate shaft and replacement of the damper mounting shaft. It is shown that installing a composite shaft in the damper attachment zone makes it possible to reduce the engine-order vibration mode by 12% and shift the prohibited speed ranges of the main engine into the engine start-up zone.

Keywords: marine shafting, torsional vibration, polymer-composite materials, intermediate shaft, prohibited speed ranges.

Актуальность

В последние десятилетия полимерно-композиционные материалы (ПКМ) все более активно внедряются в судостроение и судовые энергетические установки. Высокий интерес к подобному типу материалов обусловлен следующими преимуществами, такие как: коррозионная стойкость, низкая масса, высокое значение временного сопротивления, коррозионная стойкость [1]. Одним из перспективных направлений применения ПКМ для валов, находящихся в составе судовых валопроводов, является их высокая податливость, что может повлиять на характер крутильных колебаний и позволяет варьировать параметрами дискретной крутильной схемы, которая описывает поведение судового машинно-двигательного комплекса при крутильных колебаниях [2]. Изменение податливости соединений в дискретных схемах для устранения опасных резонансов из рабочего диапазона частот вращения коленчатых валов главных двигателей рассматривалось многими специалистами, такими как: Алексеев В.В., Бухарина Г.И., Истомин П.А., Ефремов Л.В., Минасян М.А. и др. В качестве известных технических решений для снижения опасности крутильных колебаний валопроводной формы можно выделить: упругие (эластичные муфты) и валы с подвижными соединениями, например, фирмы «Centa» [3]. Упругое крепление демпфера дизельного двигателя для изменения частоты моторной формы колебаний предложили еще отечественные ученые: Истомин П.А., Терских В.П. и другие [4], но в связи с ограниченностью технологий того времени и отсутствия ПКМ, данный метод крепления применялся редко.

Особый интерес применения валов из ПКМ для изменения параметров крутильных колебаний приобретает для судов, у которых или с постройки, или после модернизации главной энергетической установки возникает превышение допустимых касательных напряжений в промежуточных, гребных и других валах, а установка упругой муфты невозможна из-за конструктивных особенностей судового валопровода. Примером может послужить судно-бункеровщик проекта 1582УД, на котором после замены главных двигателей на новые марки Zichai Z6170ZLCZ-1 (Китай), специалистами испытательного центра «Marine Technology Service» (ИЦ «MTS») ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», после проведения комплексного тензометрирования установки были выявлены зоны превышения допустимых касательных напряжений и назначение запретных зон в диапазонах частот вращения коленчатого вала главного двигателя от 535 до 635 и от 720 до 835 мин⁻¹ [5].

Требования классификационных обществ

Согласно правилам Российского морского регистра судоходства (РМРС), а именно, в части VII [6], применение ПКМ для промежуточных валов допускается при соблюдении ряда основных условий:

1. Центральные секции промежуточных валов и муфт могут изготавливаться из стекловолокна или углеродного волокна. Металлические концевые соединения (фланцы) остаются обязательными.
2. Необходима комплексная проверка на прочность, жесткость и устойчивость подобного типа валов. При этом, прочность соединений композиционных валов с металлическими креплениями должна быть не ниже прочности соединяемых деталей.
3. Минимальный диаметр промежуточного вала определяется по формуле (1):



$$d_{\text{пр}} = F \cdot \sqrt[3]{P/n}, \quad (1)$$

где $F = 100$ для ДВС (или 95 при наличии упругой муфты)

4. Допускаемые напряжения от суммарных крутильных колебаний вычисляется по формуле (2):

$$\tau_c = \pm 1,38 \cdot \frac{R_m + 160}{18} \cdot C_k \cdot C_d, \quad (2)$$

где R_m – временное сопротивление материала;

C_k – коэффициент, учитывающий внутреннее сверление в валу;

C_d – коэффициент, учитывающий величину внешнего диаметра

5. В документации к валам из ПКМ должны быть указаны критерии дефектов. А периодичность неразрушающего контроля – не реже 1 раза в 5 лет.

Таким образом, нормативная база РМРС допускает применение промежуточных валов из ПКМ в составе судового валопровода, но требует детального обоснования прочности, специальных методов контроля и согласования расчётных методик с ними.

Расчет свободных и вынужденных колебаний

Методика расчёта базируется на переходе от реального валопровода к дискретной схеме с моментами инерции масс M_i и податливостью участка e_i и дальнейшим расчетом частот свободных колебаний методом цепных дробей Терских В.П. [7]. Расчет частот свободных крутильных колебаний выполнен по формуле (3):

$$\nu = 9,55 \cdot \frac{1}{(M_0 \cdot e_0)^{0,5}} \cdot \sqrt{\Delta}, \quad (3)$$

где ν – частота колебаний, кол/мин;

Δ – квадрат частоты колебаний, Гц;

M_0 – момент инерции массы, принятой в системе за основную, $\text{кг} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$ или $(\text{кг} \cdot \text{м}^2)$;

e_0 – податливость вала, принятого за основной в системе, $\text{рад}/(\text{кг} \cdot \text{см})$ или $(\text{рад}/(\text{Н} \cdot \text{м}))$.

На рисунке 1 представлена дискретная схема МДК судна, при этом следует отметить, что для Zichai Z6170ZLCZ-1 согласно инструкции по эксплуатации нумерация цилиндров идет от маховика [8].

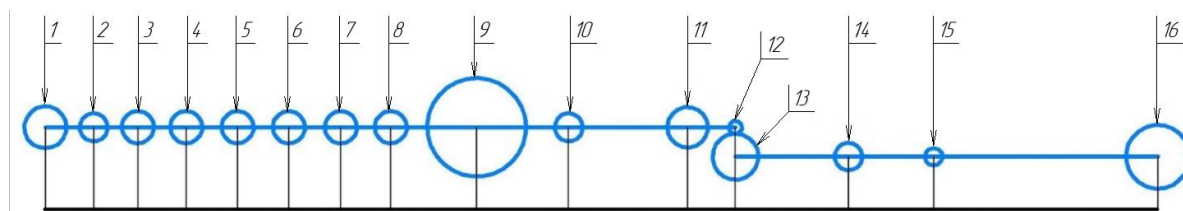


Рисунок 1 – Дискретная схема МДК судна

Согласно рисунка 1: 1 – силиконовый демпфер; 2 – шкив для ременной передачи приводных механизмов; 3 – шестой цилиндр; 4 – пятый цилиндр; 5 – четвёртый цилиндр; 6 – третий цилиндр; 7 – второй цилиндр; 8 – первый цилиндр и фланец; 9 – маховик; 10 – входная часть реверс-редуктора (РР); 11 – ведущий ротор РР; 12 – ведущая шестерня РР; 13

– ведомая шестерня РР; 14 – выходной фланец РР и муфта промежуточного вала; 15 – муфта гребного вала; 16 – гребной винт.

В результате проведенного расчета были получены данные, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Частоты свободных колебаний при использовании стального промежуточного вала в составе валопровода судна

Форма колебаний	Частота, кол/мин	Частота, Гц
Одноузловая форма	1479,7	24,66
Двухузловая	5126,2	85,44
Трехузловая	6972	116,21

Далее было предложено заменить стальной промежуточный вал на вал из ПКМ, при этом параметры податливости и моментов инерции остальных элементов системы не изменялись, кроме самого промежуточного вала.

Стоит учесть, что валы из ПКМ изготавливаются полыми. В качестве внешнего диаметра был взят диаметр ранее установленного стального вала (110 мм). Внутренний диаметр можно найти по формуле (4) для определения полярного момента сопротивления:

$$W = \frac{\pi \cdot d_{\text{внеш}}^3}{16} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_{\text{внут}}}{d_{\text{внеш}}} \right)^4 \right), \quad (4)$$

где $d_{\text{внеш}}$ – (м)
 $d_{\text{внут}}$ – (м)

Величину полярного момента сопротивления W (м³) из формулы (5) возникающих в процессе скручивания вала касательных напряжений:

$$\tau = \frac{M}{W}, \quad (5)$$

где τ – фактические касательные напряжения, возникающие при скручивании вала, Па;

M – крутящий момент, Н·м.

Крутящий момент после редуктора находится исходя из произведения крутящего момента, который передает маховик дизельного двигателя на редуктор и передаточного отношения самого редуктора, в данном случае он равен 4685 Н·м.

Ожидаемые касательные напряжения для промежуточного вала из ПКМ были взяты исходя из лабораторных испытаний композитных валов на крутильные колебания в ИЦ «МТС», на лабораторном стенде, моделирующем работу ДВС с прямой передачей на винт. Соотношение касательных напряжений в стальном валу и полимерно-композиционном составило 1,65. Исходя из этого, фактические касательные напряжения в промежуточном валу из ПКМ составило $10 \cdot 10^6$ Па.

Расчет допускаемых касательных напряжений для полого промежуточного вала из ПКМ выполнен по формуле РМРС (2), и их величина составила $\tau_c = 19,14$ МПа (расчетные не превышают допускаемые). Полярный момент сопротивления составляет $W = 24,9 \cdot 10^{-6}$ м³, откуда по формуле (4) внутренний диаметр равен 55 мм.

При этом, податливость промежуточного вала при замене стали на ПКМ изменяется от $3,248 \cdot 10^{-7}$ до $3,555 \cdot 10^{-6}$ рад/(Н·м). Результаты расчётов представлены в таблице 2:

Таблица 2. Частоты свободных колебаний при использовании промежуточного вала из ПКМ в составе валопровода судна

Форма колебаний	Частота, кол/мин	Частота, Гц
Одноузловая форма	1121	18,68
Двухузловая	5075	84,59
Трехузловая	6967	116,12

Из полученных результатов видно, что промежуточный вал из ПКМ позволил снизить частоту одноузловой формы, при этом частоты оставшихся форм практически не изменились.

Далее на рис. 2 и 3 представлены графики свободных крутильных колебаний одноузловой формы валопровода МДК судна со стальным промежуточным валом и валом из ПКМ.



Рисунок 2 – Одноузловая форма свободных крутильных колебаний валопровода МДК судна



Рисунок 3 – Одноузловая форма свободных крутильных колебаний валопровода МДК судна при установке промежуточного вала из ПКМ

Анализ форм колебаний показал, что узлами являются участки 10 - 11 (входная часть редуктора – ведущий ротор) и 14 - 15 (выходной фланец редуктора – муфта промежуточного вала). При этом увеличение податливости за счет установки промежуточного вала из ПКМ позволяет снизить частоту валопроводной формы колебаний на 24%, но при этом приводит к росту напряжений, возникающих в коленчатом валу. Таким образом, для данного судна такой способ снижения резонансных частот не эффективен. Наиболее эффективно промежуточные валы из ПКМ могут себя проявить в судовых МДК с прямой передачей на винт, где возникают наибольшие крутильные колебания именно валопроводной формы.

Альтернативный способ снижения крутильных колебаний

Далее был рассмотрен вариант замены стального вала крепления силиконового демпфера главного двигателя судна, а именно - между демпфером и фланцем ременного шкива.

Расчетные касательные напряжения для вала из ПКМ (крепление демпфера) составляют 10 МПа. При временном сопротивлении ПКМ в 540 МПа допускаемые напряжения согласно правилам РМРС составили 18,75 МПа. А при крутящем моменте в 2101 Н·м, полярный момент сопротивления равен $11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, откуда при внешнем диаметре 135 мм, внутренний диаметр вала составил 126,37 мм.

Далее также произведем расчет свободных крутильных колебаний с новым композитным креплением демпфера и результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3. Частоты свободных колебаний для крепления демпфера из ПКМ

Форма колебаний	Частота, кол/мин	Частота, Гц
Одноузловая форма	1480	24,66
Двухузловая	5079	84,66
Трехузловая	6100	101,68

Из таблицы 3 можно заметить, что по сравнению с предыдущими расчетами, в данном случае уменьшилась частота моторной формы колебаний на 12%. При этом снизились резонансные частоты для вращения главного двигателя со смещением их в зону разгона при пуске.

Таким образом, замена материала для вала крепления демпфера со стального на ПКМ, приведет к устранению запретных зон частот вращения главного двигателя судна.

Альтернативный способ снижения крутильных колебаний

По результатам проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Замена стального промежуточного вала на вал из ПКМ эффективно снижает частоту валопроводной формы крутильных колебаний, однако при наличии запретных зон, вызванных моторной формой, этого может быть недостаточно;
2. Для рассмотренного судна более эффективным является замена участка крепления демпфера на вал из ПКМ, что позволит снизить частоту моторной формы колебаний и снизить касательные напряжения от суммарных крутильных колебаний в коленчатом валу главного двигателя судна;
3. Предложенное техническое решение исключает запретные зоны для частот вращения главного двигателя судна и повышает безопасность его эксплуатации.

Список литературы:

1. Mouritz, A. P., Gellert, E., Burchill, P., & Challis, K. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. Composite Structures, 2001. - p. 53. 2.
2. Коршунов В.А., Мудрик В.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Прочностные расчеты судовых валов из полимерных композиционных материалов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4 часть 2. С. 38–44.
3. Centa. Carbon Fiber Technology. Carbonfaser Technology. Catalog Carbon-03-05, 2012. -р. 12.
4. Терских В.П. Крутильные колебания валопровода силовых установок: в 4 т. // В.П. Терских. – Ленинград: Судостроение, 1977. – Т. 2. – 312 с.
5. Торсиографирование машинно-двигательного комплекса: окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса №30-



158УД-04-2025 КК / Испытательный центр «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «АГТУ»; рук. М.Н. Покусаев. – Астрахань, 2025. – 27 с

6. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД №2 020101-174, СП-6. 2025. – 108 с. (электронное издание). (дата обращения – 02.04.26 г.)

7. Терских В.П. Метод цепных дробей в применении к исследованию колебаний механических систем: в 2 т. // В.П. Терских – Ленинград: Судпромгиз, 1955. – Т. 1: Простые линейные и нелинейные системы. – 375 с.

8. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы. НД №2 020101-174, СП-6. 2025. – 368 с. (электронное издание). (дата обращения – 03.04.26 г.)

9. Bilalis, E. Experimental and Numerical Study of Composite Shafts. Diploma Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering, Shipbuilding Technology Laboratory, National Technical University of Athens, 2016. – p. 154.

