

УДК 629.5.064

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

**Горбачев Максим Михайлович**<sup>1</sup>, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство»

e-mail: [max9999\\_9@mail.ru](mailto:max9999_9@mail.ru)

**Заботкин Николай Васильевич**<sup>1</sup>, аспирант

e-mail: [nik-30rus@mail.ru](mailto:nik-30rus@mail.ru)

<sup>1</sup> 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 проекта 1582УД 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. Gorbachev**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Operation of Water Transport and Industrial Fishing

e-mail: [max9999\\_9@mail.ru](mailto:max9999_9@mail.ru)

**Nikolai V. Zabotkin**<sup>1</sup>, Doctoral Student

e-mail: [nik-30rus@mail.ru](mailto:nik-30rus@mail.ru)

<sup>1</sup> 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 1582УД 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 «МТС») 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<sup>-1</sup> [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 частоты 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  $\nu$  – частота колебаний, кол/мин;

$\Delta$  – квадрат частоты колебаний, Гц;

$M_0$  – момент инерции массы, принятой в системе за основную, кг · см · с<sup>2</sup> или (кг·м<sup>2</sup>);

$e_0$  – податливость вала, принятого за основной в системе, рад/(кг · см) или (рад/(Н·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].

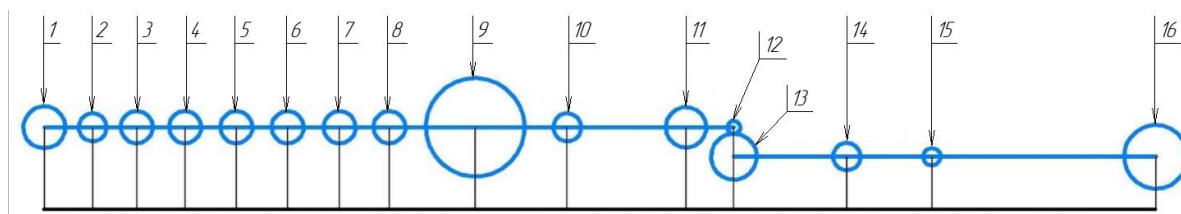


Рисунок 1 – Дискретная схема МДК судна

Согласно рисунка 1: 1 – силиконовый демпфер; 2 – шкив для ременной передачи приводных механизмов; 3 – шестой цилиндр; 4 – пятый цилиндр; 5 – четвертый 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  $W$  (м<sup>3</sup>) из формулы (5) возникающих в процессе скручивания вала касательных напряжений:

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

где  $\tau$  – 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 «MTS», 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  $W = 24,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, 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.

### **Заключение**

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.

### **Благодарность**

*Настоящее исследование выполнено в рамках государственного задания на выполнение НИОКР от Федерального агентства по рыболовству №1025071400020-2 на тему: «Применение полимерно-композиционных валов в судовых энергетических установках для снижение крутильных колебаний»*

### **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.

