

Научная статья  
УДК [629.5.083.5:621.824]:621.7  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-32-37>  
EDN GBNQMQ

## Методика циклических испытаний образцов-моделей коленчатого вала судового двигателя внутреннего сгорания на изгиб с кручением

*Виталий Валерьевич Вязанкин<sup>✉</sup>, Виктор Андреевич Мамонтов,  
Константин Николаевич Сахно*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, [mogoy@mail.ru](mailto:mogoy@mail.ru)<sup>✉</sup>*

**Аннотация.** Предложено рассматривать изгибную усталостную прочность коленчатого вала как основной критерий его работоспособности за время эксплуатации. Отмечено, что термомеханическая правка с нагревом методом релаксации напряжений наиболее приемлема для правки ответственных валов, получивших искривление продольной оси за время эксплуатации. Для обоснования технологии правки, отработки режимов и оценки результатов правки проведены изгибные усталостные испытания круглых образцов диаметра 20 мм в опасном сечении. Установлено, что увеличение диаметра приводит к снижению предела выносливости конструкционных сталей. Принята схема нагружения экспериментального образца – поперечный изгиб с кручением. Использована полукруглая выточка в образце для сосредоточения места излома, рассчитан радиус выточки. Размер выточки образца определен по формуле на основе критерия подобия, принятого в статистической теории подобия усталостного разрушения деталей, предложенного В. П. Когаевым. Установлены требования к шероховатости поверхности круговой выточки не менее Ra 0,16. Отмечена необходимость контроля технологии изготовления экспериментального образца. Предложена экспериментальная установка для испытаний на изгибную усталостную прочность. Для надежного закрепления и предотвращения проворачивания образца во время эксперимента использован конусный патрон. Использованы экспериментальные образцы-модели со стрелками прогиба 1, 2, 3, 4 и 5 мм. Определены способ и оборудование для получения образцов с необходимыми стрелками прогиба. Приведены схемы образца-модели для испытаний на консольный изгиб с кручением, экспериментальной установки для испытаний образцов-моделей, изгиба на заданную стрелку прогиба, образца-модели с искривленной продольной осью.

**Ключевые слова:** образец-модель, схема нагружения, ось, правка, выточка

**Для цитирования:** Вязанкин В. В., Мамонтов В. А., Сахно К. Н. Методика циклических испытаний образцов-моделей коленчатого вала судового двигателя внутреннего сгорания на изгиб с кручением // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-32-37>. EDN GBNQMQ.

Original article

## Method of cyclic testing of sample-models of the crankshaft of a marine internal combustion engine for bending with torsion

*Vitaly V. Vyazankin<sup>✉</sup>, Viktor A. Mamontov, Konstantin N. Sakhno*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, [mogoy@mail.ru](mailto:mogoy@mail.ru)<sup>✉</sup>*

**Abstract.** It is proposed to consider the bending fatigue strength of the crankshaft as the main criterion of its operability during operation. It is noted that thermomechanical straightening with heating by stress relaxation method is most acceptable for straightening critical shafts that have received a curvature of the longitudinal axis during operation. Bending fatigue tests of round samples with a diameter of 20 mm in a dangerous section were carried out to substantiate the correction technology, test modes and evaluate the results of the correction. It was found that an increase in diameter leads to a decrease in the endurance limit of structural steels. The loading scheme of the experimental sample is adopted – transverse bending with torsion. A semicircular notch in the sample was used to focus the fracture site,

and the radius of the notch was calculated. The size of the sample tuck is determined by the formula based on the similarity criterion adopted in the statistical theory of similarity of fatigue failure of parts, proposed by V. P. Kogaev. The requirements for the roughness of the surface of a circular groove of at least Ra 0.16 are established. The need for control of the manufacturing technology of the experimental sample is noted. An experimental installation for testing flexural fatigue strength is proposed. A cone cartridge was used to securely fasten and prevent the sample from turning during the experiment. Experimental samples were used-models with deflection arrows of 1, 2, 3, 4 and 5 mm. The method and equipment for obtaining samples with the necessary deflection arrows have been determined. Diagrams of a model sample for testing cantilever bending with torsion, an experimental installation for testing model samples, bending to a given deflection arrow, and a model sample with a curved longitudinal axis are presented.

**Keywords:** sample model, loading scheme, axis, straightening, recess

**For citation:** Vyazankin V. V., Mamontov V. A., Sakhno K. N. Method of cyclic testing of sample-models of the crankshaft of a marine internal combustion engine for bending with torsion. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2024;1:32-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-32-37>. EDN GBNQMQ.

### Введение

Судовые двигатели внутреннего сгорания (СДВС) за время эксплуатации должны поддерживать высокие технические характеристики. Постоянно меняющиеся условия эксплуатации и, как следствие, ухудшение технического состояния дизеля может привести к внезапным отказам и необходимости планового ремонта.

Коленчатый вал (КВ) из всех деталей СДВС самый ответственный и сложно нагруженный [1]. Стоимость КВ может достигать 25 % от стоимости нового двигателя, а при замене значительно возрастает. В процессе эксплуатации КВ судового дизеля испытывает переменные нагрузки, создаваемые рабочим циклом и силами инерции поступательно движущихся и вращающихся масс, которые, изменяясь, периодически изгибают, скручивают, сжимают и растягивают его. В результате продольная ось получает искривление выше предельных значений, установленных заводом-изготовителем. Дальнейшая эксплуатация его невозможна. Необходимо устранить прогиб с помощью существующих способов правки. Термомеханическая правка с нагревом методом релаксации напряжений является наиболее приемлемой для ответственных валов с искривленной продольной осью. После правки сохраняется надежность до планового ремонта [1].

### Материалы исследования

Изгибная усталостная прочность – основной критерий надежной работы КВ за время эксплуатации, поэтому необходимо обосновать и отработать технологию правки. Для этого необходимо провести усталостные испытания образцов-моделей КВ после правки на изгибную усталостную прочность и оценить степень влияния правки на их усталостные характеристики, сконструировать конфигурацию экспериментального образца, разработать схему нагружения, подобрать оборудование для экспериментов.

Для образцов принята схема нагружения, представляющая собой консольный изгиб с кручением [2]. Консольный изгиб с кручением является наиболее приемлемой схемой нагружения, в полной мере приближенной к условиям, в которых работают судовые КВ.

Конструкция экспериментальных образцов выбрана с учетом принятой схемы нагружения. Руководствуясь методом отбора, приведенным в ГОСТ 25.505-79, образцы изготовили цилиндрической формы, поверхность гладкая, сечение круглое. Образец-модель для испытания на консольный изгиб с кручением представлен на рис. 1.

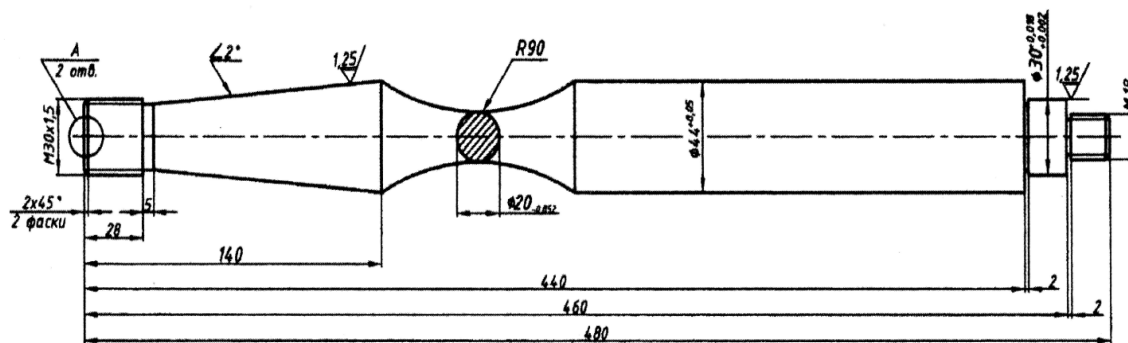


Рис. 1. Образец-модель для испытаний на консольный изгиб с кручением

Fig. 1. Sample model for testing cantilever bending with torsion

В месте, где предполагается разрушение образца при испытании, принята полукруглая выточка. Конусный патрон экспериментальной машины надежно удерживает образец и предотвращает его проворачивание во время эксперимента. С проти-

воположного конца на образце имеется резьба для закрепления нагрузочного узла с помощью стопорной гайки.

Заготовки образцов изготовлены из круглого проката стали 35 по ГОСТ 1050-88 (табл. 1, 2).

Таблица 1

Table 1

**Химический состав материала образцов  
Chemical composition of the sample material**

Элемент	Содержание, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Cu
Сталь 35 по ГОСТ 1050-88	0,32–0,40	0,50–0,80	0,17–0,0,37	0,25	0,25	0,035	0,04	0,25

Таблица 2

Table 2

**Механические свойства образцов  
Mechanical properties of the samples**

Элемент	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	HB
Сталь 35 по ГОСТ 1050-88	275	530	20	40	156–197

В исследовании принят диаметр образца величиной 20 мм. Увеличение диаметра приводит к снижению предела выносливости конструкционных сталей, что приближает испытания к эксплуатационным условиям, в которых работают судовые КВ. Установлены требования к шероховатости поверхности круговой выточки не менее Ra 0,16. Металл для изготовления образцов выбран структурно однородным [3].

Выточка на образцах-моделях является концентратором напряжений. Восприимчивость изменяется с увеличением базы испытаний и уменьшением относительного градиента напряжений. В своих исследованиях В. П. Когаев обосновал влияние геометрических размеров и концентрации напряжений на сопротивление усталости материалов и характеристик выносливости. Определение усталостной прочности материалов образцов-моделей с концентраторами напряжений необходимо для установления абсолютных значений предела их выносливости, т. к. они близки к пределам выносливости натуральных деталей.

Основным условием подобия усталостного разрушения при использовании критерия разрушения в виде амплитуды наибольших напряжений является уравнение

$$\lg(\sigma_{\max} - \sigma_0) = A - B \lg \frac{L}{\bar{G}} + ZpS,$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение в зоне концентрации;  $A$  и  $B$  – постоянные материалы;

$\frac{L}{\bar{G}}$  – критерий подобия усталостного разрушения;  $L$  – часть периметра опасного поперечного сечения, в точках которого действуют максимальные напряжения, пропорциональная характерному размеру сечения;  $\bar{G}$  – относительный максимальный градиент напряжений в зоне концентрации, определяемый по формуле

$$\bar{G} = \frac{d\sigma}{dr} \frac{1}{\sigma_{\max}}$$

(приближенное значение  $\bar{G} = \frac{2}{p} + \frac{2}{d}$ ).

Размеры выточек образцов определяются по нижеприведенным формулам на основе критерия подобия, принятого в статистической теории подобия усталостного разрушения деталей, предложенного В. П. Когаевым [4]. Статистическая теория подобия усталостного разрушения описывает зависимость как конструктивное изменение размеров и формы поперечного сечения, вид нагружения изменяет предел выносливости:

$$L_{об} / G_{об} = L_B / G_B;$$

$$G_{об} = (d\sigma_{об} / dx)(1 / \sigma_{об}) \alpha_{об};$$

$$G_B = (d\sigma_B / dx)(1 / \sigma_B) \alpha_B;$$

где  $L_B$  – длина окружности шейки вала в опасном сечении, мм;  $L_{об}$  – длина окружности образца в опасном сечении, мм;  $\sigma_{об}$  и  $\sigma_B$  – амплитуды номинальных напряжений в опасном сечении образца и шейки вала, МПа;  $G_{об}$  и  $G_B$  – относительные градиенты напряжений в опасном сечении образца и шейки вала,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $\alpha_{об}$  и  $\alpha_B$  – теоретические коэффициенты концентрации напряжений образца и шейки вала;

$$L_{об} = \pi d_o,$$

где  $d_o$  – диаметр шейки выточки образца;

$$L_B = \pi d_B,$$

где  $d_B$  – диаметр шейки вала в опасном сечении;

$$\bar{G} = \frac{2}{p} + \frac{2}{d},$$

где  $p$  – радиус выточки образца.

Образцы были изготовлены на станке 16К20Ф3С32 с числовым программным управлением. Токарный фасонный резец с заменяемой пластиной из твердого сплава Т5К10 использовали для изготовления полукруглой выточки. При обработке образцов, как черновой, так и чистовой, применялось обильное охлаждение многокомпонентной смазочно-охлаждающей жидкостью, предотвращающей сильный нагрев, наклеп поверхности и образование остаточных напряжений.

Исходя из поставленных задач в исследовании, а также из-за высокой стоимости машин для усталостных испытаний экспериментальную установку изготовили на базе внутришлифовального станка модели ЗА240. Схема экспериментальной установки для испытаний на консольный изгиб с кручением образцов-моделей представлена на рис. 2.

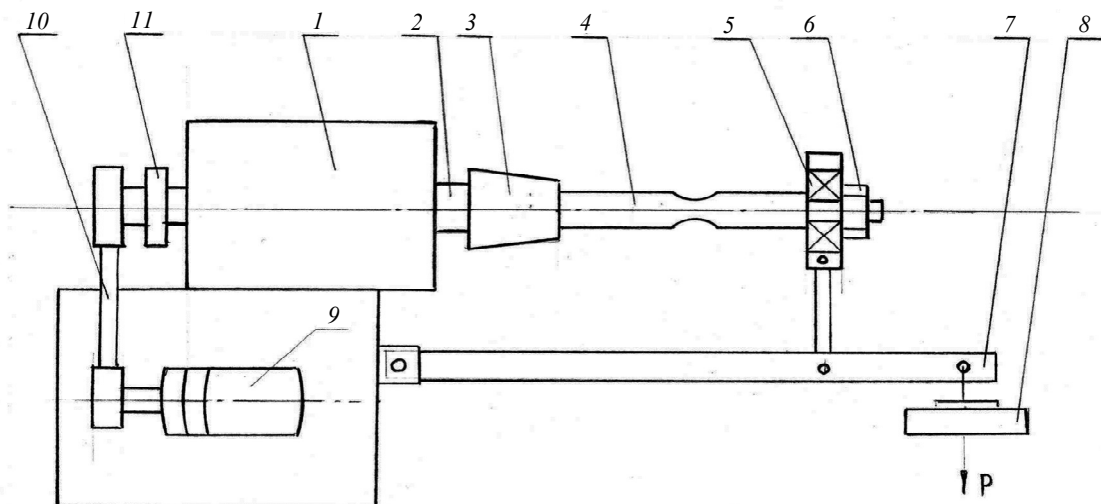


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для испытаний образцов-моделей на консольный изгиб с кручением:  
 1 – шпиндельная бабка; 2 – шпиндель; 3 – конусный захват; 4 – круглый образец; 5 – шарнирный подвес;  
 6 – стопорная гайка; 7 – консольный рычаг; 8 – сменный груз; 9 – электродвигатель; 10 – клиноременная передача;  
 11 – счетчик числа циклов

Fig. 2. Diagram of an experimental installation for testing model samples for cantilever bending with torsion:  
 1 – spindle headstock; 2 – spindle; 3 – cone gripper; 4 – round sample; 5 – hinged suspension; 6 – locking nut;  
 7 – cantilever lever; 8 – replaceable load; 9 – electric motor; 10 – V-belt transmission; 11 – cycle count

Экспериментальный образец крепится к шпинделю при помощи конусного захвата. На другом, свободном конце образец несет шарнирный подвес со сменными грузами, действующими как вертикальная нагрузка. Тяга, через которую рычагом создается нагрузка на конец образца, выполнена с использованием пружинного демпфера. Частота вращения экспериментального образца составляет 3 000 об/мин. Количество циклов контролируется счетным устройством.

При разрушении образца экспериментальная установка автоматически обесточивается с помощью конечного однополюсного выключателя.

Согласно предыдущим исследованиям, в работе принято использовать экспериментальные образцы со стрелками прогиба 1, 2, 3, 4 и 5 мм [5, 6]. Изгиб образцов (рис. 3) произвели люнетом токарным, у которого верхний ролик заменен призмой. Винт в верхней части люнета через призму создает усилие и изгибает образец, закрепленный в центрах.

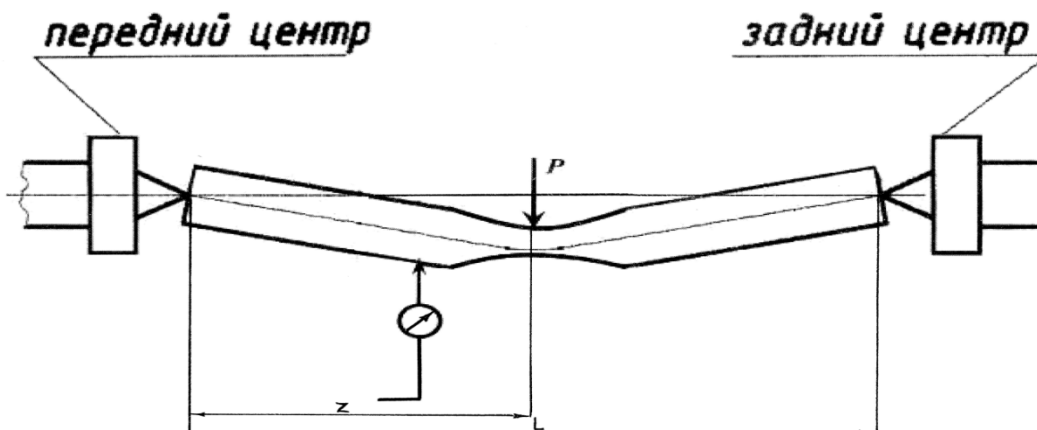


Рис. 3. Схема изгиба на заданную стрелку прогиба

Fig. 3. Bending diagram for a given deflection boom

Люнет установлен на направляющих станины станка и закреплен. Образец-модель с искривлен-

ной продольной осью представлен на рис. 4.

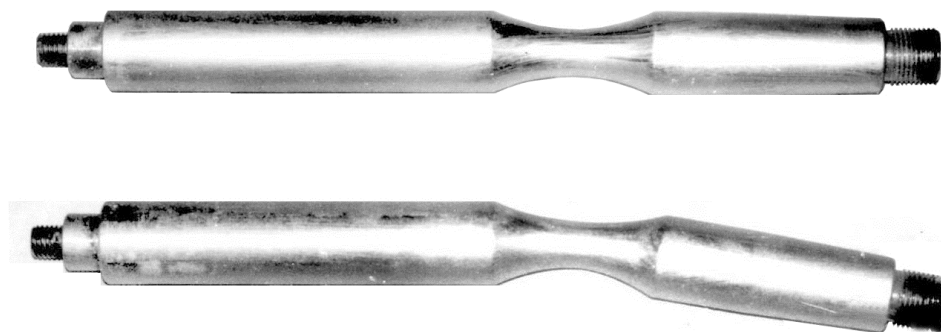


Рис. 4. Образец-модель с искривленной продольной осью

Fig. 4. A sample model with a curved longitudinal axis

Величину стрелки прогиба измеряли индикатором часового типа, закрепленным на штативе, установленном на направляющих станины.

#### Заключение

Для циклических испытаний образцов-моделей принят диаметр рабочей части, равный 20 мм. Увеличение диаметра даст возможность обеспечить большую достоверность полученных результатов

экспериментов. Полученные результаты позволят скорректировать технологический процесс термомеханической правки методом релаксации напряжений, определить возможную вероятность изменения предела выносливости материала экспериментальных образцов, установить закономерности влияния результатов правки на циклическую прочность образцов, отработать режимы правки.

#### Список источников

1. Вязанкин В. В., Мамонтов В. А. Восстановление деформированных судовых валов правкой // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2023. № 1. С. 50–55.
2. Испытательная техника: справ. / под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1982. 528 с.

3. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов / под ред. А. Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1974. Т. II. 321 с.
4. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

5. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний: справ. М.: Металлургия, 1975. 304 с.
6. Вязанкин В. В., Мамонтов В. А. Статистические

данные о прогибах коленчатого вала судового дизеля // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2023. № 3. С. 27–32.

#### References

1. Viazankin V. V., Mamontov V. A. Vosstanovlenie deformirovannykh sudovykh valov pravkoi [Restoration of deformed ship shafts by straightening]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2023, no. 1, pp. 50-55.
2. *Ispytatel'naia tekhnika: spravochnik* [Test equipment: reference]. Pod redaktsiei V. V. Kliueva. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 528 p.
3. *Metody ispytaniia, kontroliia i issledovaniia mashinostroitel'nykh materialov* [Methods of testing, control and research of engineering materials]. Pod redaktsiei A. T. Tumanova. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. Vol. II. 321 p.
4. Kogaev V. P. *Raschety na prochnost' pri napriazhe-*

*niakh, peremennykh vo vremeni* [Calculations for strength under stresses, variable in time]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 232 p.

5. Shkol'nik L. M. *Metodika ustalostnykh ispytanii: spravochnik* [Fatigue testing methodology: a reference book]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1975. 304 p.
6. Viazankin V. V., Mamontov V. A. Statisticheskie dannye o progibakh kolenchatogo vala sudovogo dizelia [Statistical data on crankshaft deflections of marine diesel engines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2023, no. 3, pp. 27-32.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 09.02.2024  
The article was submitted 04.12.2023; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 09.02.2024

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Виталий Валерьевич Вязанкин** — аспирант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; mogoy@mail.ru

**Vitaly V. Vyazankin** — Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; Astrakhan State Technical University; mogoy@mail.ru

**Виктор Андреевич Мамонтов** — доктор технических наук, доцент; профессор кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; mogoy@mail.ru

**Victor A. Mamontov** — Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; Astrakhan State Technical University; mogoy@mail.ru

**Константин Николаевич Сахно** — доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; mogoy@mail.ru

**Konstantin N. Sakhno** — Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; Astrakhan State Technical University; mogoy@mail.ru

