

Научная статья
УДК [629.5.083.5:621.824]:621.7
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-50-55>
EDN POEPPM

Восстановление деформированных судовых валов правкой

Виталий Валерьевич Вязанкин[✉], *Виктор Андреевич Мамонтов*

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, mogoy@mail.ru*[✉]

Аннотация. Проведено исследование коленчатого вала как одного из обязательных элементов судовых двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены типовые дефекты коленчатых валов судовых дизелей. Указаны нагрузки, вызывающие искривления оси коленчатого вала в условиях эксплуатации. Определены причины и природа нарушения геометрии оси вала. Отмечена необходимость статистической оценки случаев искривления оси во время эксплуатации дизеля. Рассмотрены рекомендации Российского морского регистра судоходства в отношении способов устранения искривления оси вала. Принят во внимание многолетний практический опыт правки коленчатых валов на предприятиях судоремонтной отрасли, описаны способы устранения прогибов валов в условиях ремонта. Рассмотрены способы механической правки без использования нагрева. Уточнены преимущества и недостатки механических методов правки валов. Описаны условия и необходимые требования к использованию термомеханической правки валов. Обоснованы условия применения термического метода правки судовых валов. Отмечена высокая трудоемкость и нестабильность формы валов после правки. Предложен метод правки коленчатых валов судовых двигателей внутреннего сгорания релаксацией напряжений на основе ползучести материала вала. Рассмотрены теоретические основы процессов ползучести и релаксации напряжения в материале вала. Определена необходимость дальнейшего продолжения исследования в области эксплуатационной надежности коленчатых валов судовых двигателей внутреннего сгорания после восстановления их методом релаксации напряжений.

Ключевые слова: коленчатый вал, правка, напряжение, шейка, биение

Для цитирования: Вязанкин В. В., Мамонтов В. А. Восстановление деформированных судовых валов правкой // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 1. С. 50–55. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-50-55>. EDN POEPPM.

Original article

Restoration of deformed ship crankshafts by straightening

Vitaly V. Vyazankin[✉], *Victor A. Mamontov*

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, mogoy@mail.ru*[✉]

Abstract. The article focuses on studying the crankshaft as an essential part of the marine internal combustion engine. Typical defects of crankshafts of marine diesel engines are considered. The loads causing the curvature of a crankshaft axis under operating conditions are indicated. The causes and nature of violation of the shaft axis geometry are determined. The statistical assessment in the cases of axle warping during diesel operation is found necessary. The recommendations of the Russian Maritime Register of Shipping on eliminating the curvature of the shaft axis are considered. A long-term practical experience of straightening crankshafts at the ship repair plants is taken into account. Methods for eliminating shaft deflections under repair conditions are described. Methods of mechanical straightening without heating are considered. The advantages and disadvantages of mechanical methods of shaft straightening are clarified. The conditions and necessary requirements for thermomechanical shafts straightening are described. The conditions for applying the thermal method of straightening ship shafts are substantiated. High labor intensity and instability of a shaft shape after straightening are pointed out. There has been proposed method of straightening crankshafts of marine internal combustion engines by stress relaxation based on the creep of the shaft material. Theoretical foundations of the processes of creep and stress relaxation in the shaft material are considered. There has been inferred a necessity of further research of operational reliability of crankshafts of marine internal combustion engines after their restoration by the stress relaxation method.

Keywords: crankshaft, straightening, stress, neck, runout

For citation: Vyazankin V. V., Mamontov V. A. Restoration of deformed ship crankshafts by straightening. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2023;1:50-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-50-55>. EDN POEPPM.

Введение

Коленчатые валы входят в число самых важных, сложно нагруженных деталей судовых двигателей внутреннего сгорания, они определяют ресурс дизеля. Стоимость их изготовления доходит до 20 %, а в отдельных случаях и более общей стоимости двигателя. При замене их стоимость может увеличиться значительно.

В Астраханском государственном техническом университете (ФГБОУ ВО «АГТУ») проводятся исследования в области эксплуатационной надежности деталей типа валов после их восстановления методом релаксации напряжений. При этом изучаются усталостные свойства и микроструктуры материала валов после их восстановления. Исследования доказали обоснованность и целесообразность восстановления деталей типа валов методом релаксации напряжений. Принимая во внимание сложность, высокую надежность коленчатых валов и отсутствие необходимых сведений для правки, установлена актуальность исследования, разработки и обоснования технологии правки валов методом релаксации напряжения.

Материалы исследования

На коленчатый вал по оси рабочего цилиндра двигателя действуют силы давления газов, веса поступательно-движущихся частей и силы инерции поступательно-движущихся масс кривошипно-шатунного механизма. Результирующая всех этих сил направлена вниз по вертикали и действует на колено мотыля коленчатого вала. Моменты от действующих сил знакопеременны, они скручивают и изгибают коленчатый вал. Вращающий момент, изменяясь периодически, приводит к скручиванию вала, сжатию и растягиванию вдоль оси и прогибам в поперечном сечении вследствие действия сил инерции.

По статистике самые распространенные повреждения валов связаны с износом вследствие трения поверхности шеек коленчатого вала в виде широких и глубоких борозд по ходу вращения коленчатого вала, наволакиванием металла вкладыша на шейке коленчатого вала при работе пары трения-скольжения [1]. Все перечисленное сопровождается значительным повышением температуры, увеличением зазора в сопряжении, а также интенсивным истиранием сопрягаемых поверхностей. Высокий нагрев рабочей поверхности приводит к структурным изменениям в металле. При остывании вал будет деформироваться, образуются

микротрещины [2]. Ось вращения вала получает изгиб, нарушается соосность рамовых шеек. Статистические данные, полученные из дефектовочных актов судоремонтных предприятий, подтверждают, что более чем в 90 % случаев задиры шеек происходят из-за искривления оси коленчатого вала [1]. Следует отметить, что на большинстве судоремонтных предприятий стараются по возможности не фиксировать биение рамовых шеек. По результатам обмеров назначают ремонт в виде шлифования шеек, что является недостаточной мерой.

В методических рекомендациях по техническому наблюдению за ремонтом морских судов указывается использование технологии для правки деталей класса валов, одобренной Российским морским регистром судоходства [3]. Правку валов необходимо исполнять квалифицированными работниками судоремонтного предприятия, имеющими достаточный опыт.

Рекомендованы следующие способы правки искривленных осей валов:

- механическая обработка посадочных поверхностей и шеек;
- асимметричное поверхностное пластическое деформирование путем направленной обкатки роликом или шаром;
- термопластический нагрев;
- местный наклеп;
- упругопластический изгиб.

На судоремонтных предприятиях изгибы оси коленчатого вала исправляют различными способами согласно многолетнему практическому опыту. Применение этих способов не всегда возможно и обосновано, т. к. они не гарантируют надежность дальнейшей эксплуатации коленчатого вала после его восстановления. Описанные в технической литературе способы правки деталей типа валов не всегда соответствуют установленным требованиям надежности и долговечности после ремонта. Они не могут гарантировать стабильность формы коленчатого вала после исправления прогиба.

Устранение искривлений оси деталей класса валов разделим на четыре группы:

- без использования нагрева – механическая правка;
- с нагревом – термическая правка;
- термомеханическая правка валов;
- методом релаксации напряжений.

Рассмотрим подробно механическую холодную правку изгибом. Коленчатый вал укладывают на призмы выпуклостью вверх и фиксируют от про-

ворачивания. Нагружают коленчатый вал гидравлическим домкратом в месте максимального прогиба рамовой шейки, используя прокладку, изготовленную из алюминиевого листа, тем самым предохраняя шейку от повреждения. Прогибают обычно в два и более раз от величины первоначально определенной стрелки прогиба, т. к. после снятия нагрузки возможен возврат к первоначальному прогибу из-за упругости коленчатого вала. При изгибе в одной плоскости вал правят за одну установку, при изгибе в нескольких плоскостях делят на участки, и правка начинается с участка с максимальным прогибом. При пространственном искривлении оси коленчатого вала и угле между плоскостями изгиба отдельных шеек не более 45° правку производят в средней плоскости, нагружая вал в сечении с максимальной стрелкой прогиба. Для сохранения формы вала после правки и снятия остаточных напряжений его нагревают до $450\text{--}500^\circ\text{C}$ и выдерживают в течение часа [4].

Преимущество данного способа правки заключается в исключении термического воздействия, что не вызовет структурных изменений в металле.

Применяемые методики вычисления стрелки прогиба не совсем достоверны, вследствие этого правят коленчатый вал не за один прием. При каждом следующем нагружении необходимо изменять величину нагрузки исходя из полученного результата предшествующего нагружения.

При помощи наклепа в холодном состоянии без выгиба, что является разновидностью механического способа правки валов, возможно править валы всех диаметров с содержанием углерода в металле не более 0,4 %, с содержанием всех легирующих добавок не более 2,5 % при стреле прогиба не более 0,5 мм. Для правки используют два и более люнета в зависимости от длины вала и закрепленных на продольных направляющих токарно-валового станка. Проверяют радиальное биение и на вогнутой части и при помощи подобранного по весу чекана наклепывают. Металл уплотняется, вал выправляется. При радиальном биении менее 0,06 мм вал считают выправленным, если более – операцию правки повторяют. После правки деталь подвергают стабилизирующему нагреву до температуры не более 450°C , выдерживая до одного часа [4].

Механическую правку коленчатого вала методом наклепа производят с внешней или внутренней сторон шеек мотыля, что зависит от направления прогиба. Восстановление прямолинейности оси коленчатого вала происходит в результате деформации щеки. Волокна в зоне наклепа деформируются. При правке методом наклепа используют специальный молоток с бойком в виде шара или пневматический молоток-чекан. Необходимая величина деформации для устранения изгиба вала

получается сложением деформаций, полученных при наклепе на нескольких щеках [5].

В отличие от правки наклепом прямолинейных валов, коленчатый вал деформируется вне зоны концентрации максимальных рабочих напряжений, поэтому циклическая прочность его после правки практически не изменится. Не произойдет и повреждение рабочих шеек коленчатого вала, следовательно, нет необходимости в их шлифовании.

Преимущество правки методом наклепа: достигается высокая точность при малых деформациях щеки (смещения в валу незначительные), а также высокая стабильность оси вала после правки.

Недостатком данного способа является возможность применения для правки валов со стрелкой прогиба до 0,2 мм/м. Повторный наклеп по тем же участкам не дает результата. Метод наклепа применяют для коленчатых валов с диаметром шеек до 100 мм в небольших судоремонтных мастерских с ограниченным набором технологического оборудования.

К механическим методам правки деталей класса валов также относится и метод асимметричного поверхностного пластического деформирования путем направленной обкатки роликом или шаром. Метод заключается в обкатывании вращающегося вала роликом, асимметричным в осевом сечении. Наряду с участком, имеющим радиусную образующую, такой ролик имеет также участок с прямолинейной образующей, который расположен противоположно первому. Радиус деформирующего участка ролика на основании опытных данных составляет от 0,01 до 0,1 его диаметра, при этом диаметр ролика должен быть равен диаметру обрабатываемого вала [5].

Обработка ведется при постоянном давлении ролика на вал. Благодаря разной кривизне контактных поверхностей на различных участках ролика обрабатываемый вал получает непостоянную по окружности степень поверхностной пластической деформации. Равенство диаметров ролика и вала приводит к тому, что повышенная степень поверхностной деформации приходится при каждом обороте вала на одну и ту же зону окружности в сечении вала по его длине. Обкатка асимметричным роликом ведется без смазки, т. к. в противном случае эффект проскальзывания может привести к недопустимому смещению радиусной части ролика по отношению к вогнутой поверхности вала.

Для получения поверхностной пластической деформации с вогнутой стороны вала обкатывание начинают при соприкосновении ролика по радиусу образующей с серединой вогнутой поверхности.

Обкатку можно вести одним, двумя или тремя роликами. Применение нескольких роликов целесообразно в тех случаях, когда для обработки тре-

буются значительные усилия на ролик, которые необходимо уравновесить. В этом случае исходное положение роликов должно быть таким, чтобы при обкатывании вала на одни и те же его участки, вогнутый или выпуклый, действовали соответственно одни и те же участки роликов.

Данный метод позволяет осуществлять правку нежестких деталей класса валов, при этом значительно снижается тяжелый ручной труд, что в судоремонте является одной из основных задач.

При термическом методе правки коленчатый вал устанавливается на прочные опоры выпуклой стороной погнутой шейки вверх и нагревается газовой горелкой. Температура нагрева и время в каждом случае уточняется опытным путем и зависит от материала, из которого изготовлен коленчатый вал, и диаметра его шеек. Время нагрева может составлять от 5 до 10 мин, температура поверхности шейки – в пределах 300–400 °С. После нагрева шейку покрывают листовым асбестом для медленного остывания. При нагреве металла происходит расширение в месте нагрева, но окружающие его холодные участки вызывают сжимающие усилия. При изгибе коленчатого вала в нескольких плоскостях правка его производится последовательным нагревом и охлаждением погнутых шеек. При жестком закреплении коленчатого вала прогиб устраняется быстрее. Заключительная операция при данном способе правки – отжиг с нагревом до температуры 550–600 °С для снятия остаточных напряжений. Эту технологию исправления оси можно применять для валов из углеродистых сталей марок 35 и 40 и низколегированных сталей при прогибах не более 1 мм. При правке возможно появление дефектов в виде мелких поверхностных трещин, которые появляются в результате ограниченного нагрева и, как следствие, появления больших растягивающих напряжений на границах между нагретой и холодной поверхностями коленчатого вала. Также возможна поверхностная закалка металла мест, где происходил нагрев. Есть вероятность появления напряжений выше предела прочности материала вала [4].

Термомеханический метод правки основан на прогреве искривленного вала в месте наибольшего прогиба по всему сечению с последующим воздействием на него внешним усилием. Прогрев сечения вала осуществляют газовыми горелками или индуктором в пределах 700–800 °С, что соответствует температуре отжига. Правильно подобранная температура нагрева, продолжительность выдержки, скорость охлаждения позволяют восстановить структуру металла. При выдержке не допускается значительных колебаний температуры. Контроль температуры ведется термопарами или тепловизором. Вал выправлен, если квалифицированно осу-

ществлен контроль температуры нагрева и режима правки [4]. Нагрузку, создаваемую нажимным устройством, рассчитывают по формуле

$$P = \frac{\sigma_T W l}{ab},$$

где σ_T – предел текучести материала, МПа; W – момент сопротивления сечения детали, м³; l – расстояние между опорами, м; a , b – расстояние опор до точки приложения силы, м.

Допустимая величина стрелы прогиба в процессе правки вычисляется по формуле

$$f = \left(\frac{\sigma_T W}{27EI} \right) (a+2b) \sqrt{3a(a+2b)},$$

где E – модуль упругости материала, МПа; I – момент инерции сечения детали, м².

После прогрева и создания усилия нажимным устройством вал выдерживают в течение трех часов. После правки медленно охлаждают и отжигают. При применении термомеханического способа правки значительно снижаются остаточные напряжения в металле, при этом пластичность материала не изменяется, существенно уменьшается нажимное усилие.

Для судовых коленчатых валов наиболее приемлемой является термомеханическая правка, основанная на явлении ползучести и релаксации напряжений. При данном способе правки коленчатый вал укладывают на прочные опоры с приспособлением для его вращения. Величина наибольшего искривления должна оказаться между опорами. Для нагрева рамовых шеек целесообразно использовать газовые горелки или индукционные нагреватели. При нагреве шеек вала газовыми горелками необходимо коленчатый вал вращать для равномерного прогрева по всему сечению. Нагрев мотылевых шеек производят индукционным нагревателем. Температуру нагрева необходимо контролировать в пределах 600–650 °С. Оплавление шеек в местах нагрева недопустимо. Нагрузочным устройством создают усилие в месте, приближенном к максимальному прогибу рамовой шейки в зависимости от того, какую шейку вала нагревали, рамовую или мотылевую. Время выдержки под нагрузкой зависит от материала вала и его релаксационных характеристик. Нагрузку, которую создает нагружающее устройство, рассчитывают по формулам сопротивления материалов [4].

По окончании выдержки и снятия нагрузки шейку вала изолируют асбестом и охлаждают при его вращении для исключения прогиба вала. Полное снятие внутренних напряжений произойдет, если правильно подобрать температуру, время выдержки под нагрузкой, величину усилия, прило-

женного к месту прогиба. Данная технология правки деталей типа валов позволяет исправить достаточно значительные величины прогибов в широком диапазоне диаметров валов.

При правке вала упругая деформация переходит в пластическую в результате ползучести материала при повышении температуры выдержки продолжительное время. Напряжения снизятся в зависимости от того, сколько упругой деформации перейдет в пластическую. При повышении температуры скорость релаксации напряжения меняется, и при достаточной выдержке произойдет уменьшение напряжений. Термомеханическая правка методом релаксации напряжений деталей класса валов основана на релаксационных характеристиках материала, они опосредованно учитывают явление ползучести – пластической деформации во времени, представляющей основу процесса выпрямления валов. Процесс выправления оси вала и релаксации внутренних напряжений можно изобразить двумя действиями, существующими неразрывно:

- приложением усилия к валу после сплошного нагрева искривленной части коленчатого вала;
- в нагретом и нагруженном состоянии вал выдерживают определенное время.

При нагреве предел текучести материала вала изменяется, что предполагает проявление явления ползучести. При нагрузке на вал меньше предела текучести он деформируется упруго в любом сече-

нии. При описанном методе нет возможности появления критических внутренних напряжений, т. к. процесс правки происходит при напряжении менее предела текучести, остаточные напряжения отсутствуют после правки, что сохранит стабильность геометрии вала в дальнейшем.

В технической литературе сведения по восстановлению деталей методом релаксации напряжений недостаточно изложены, что связано с отсутствием необходимых научных исследований по данному вопросу.

Правка методом релаксации напряжений деталей класса валов требует дальнейшего исследования. Необходимо определить параметры правки, влияние правки на циклическую прочность вала в зависимости от материала, величины прогиба, а также разработать необходимую оснастку.

Заключение

Предложен метод правки коленчатых валов судовых двигателей внутреннего сгорания релаксацией напряжений на основе ползучести материала вала. Рассмотрены теоретические основы процессов ползучести и релаксации напряжения в материале вала. Определена необходимость дальнейшего продолжения исследования в области эксплуатационной надежности коленчатых валов судовых двигателей внутреннего сгорания после восстановления их методом релаксации напряжений.

Список источников

1. Леонтьев Л. Б., Токликишвили А. Г. Причины отказов коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей и пути повышения их надежности // Вестн. Инженер. шк. Дальневосточ. федерал. ун-та. 2012. № 3 (12). С. 40–47.
2. Корнейчук Ю. А. Исследование предельного состояния коленчатого вала судового среднеоборотного дизеля // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 3. С. 53–61.
3. НД 2-039901-005. Методические рекомендации по техническому наблюдению за ремонтом морских судов. СПб.: Изд-во РМРС, 2018. С. 55–104.
4. Шестенко М. А., Шефер Б. А., Шефер И. Б. Технология монтажа и ремонта машин и механизмов промышленных судов. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. 263 с.
5. Гуревич И. М., Лопырев Н. К., Марденский В. П., Немков П. П. Технология судоремонта. М.: Транспорт, 1970. 376 с.

References

1. Leont'ev L. B., Toklikishvili A. G. Prichiny otkazov kolenchatykh valov sudovykh sredneoborotnykh dizelei i puti povysheniia ikh nadezhnosti [Causes of crankshaft failures in marine medium-speed diesel engines and ways to improve their reliability]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2012, no. 3 (12), pp. 40-47.
2. Korneichuk Yu. A. Issledovanie predel'nogo sostoiianiia kolenchatogo vala sudovogo sredneoborotnogo dizelia [Studying limit state of crankshaft in marine medium-speed diesel engine]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2017, no. 3, pp. 53-61.
3. ND 2-039901-005. *Metodicheskie rekomendatsii po tekhnicheskomu nabliudeniui za remontom morskikh sudov* [ND 2-039901-005. Guidelines for technical supervision of sea vessels repair]. Saint-Petersburg, Izd-vo RMRS, 2018. Pp. 55-104.
4. Shestenko M. A., Shefer B. A., Shefer I. B. *Tekhnologiia montazha i remonta mashin i mekhanizmov promyslovykh sudov* [Technology of installation and repair of machines and mechanisms of fishing vessels]. Moscow, Legkaia i pishchevaia promyshlennost' Publ., 1982. 263 p.
5. Gurevich I. M., Lopyrev N. K., Mardenskii V. P., Nemkov P. P. *Tekhnologiia sudoremonta* [Ship repair technology]. Moscow, Transport Publ., 1970. 376 p.

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; одобрена после рецензирования 30.01.2023; принята к публикации 09.02.2023
The article was submitted 24.01.2023; approved after reviewing 30.01.2023; accepted for publication 09.02.2023

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 Sciences in Technology, Assistant Professor; Professor of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; Astrakhan State Technical University; mogoy@mail.ru

