

Научная статья
УДК 620.178.74
doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-52-61

Исследование и разработка методики технической диагностики гребных валов

Юрий Иванович Матвеев^{1✉}, Александр Анатольевич Хлыбов²,
Владимир Васильевич Глебов³

^{1,3} Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижегород, Россия, matveevseu@mail.ru ✉

² Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, Нижегород, Россия

Аннотация. Гребные валы являются конструктивными узлами, требующими повышенного внимания. В соответствии с требованием безопасности представлены результаты исследований разрушения гребных валов на примере судов типа «Речной». Отмечено, что остаточные напряжения оказывают существенное влияние на надежность и работоспособность валов, являются одним из факторов их разрушения. Причиной возникновения остаточных напряжений является наплавка на гребной вал из стали СТ35 сварочной проволокой Св-08А. Рассматривается возможность определения величины остаточных напряжений акустическим методом в наплавке. Для оценки напряжений было использовано явление акустоупругости: зависимости скорости распространения упругих волн от величины действующих напряжений. Все исследования по определению коэффициентов акустоупругости проводились на стандартных образцах (согласно ГОСТ 1497). Изготовлены и испытаны образцы, моделирующие наплавку. Проведены металлографические исследования, позволяющие оценить влияние состава материала гребного вала на структуру и прочностные свойства гребных валов. Проведена оценка влияния структуры на величину остаточных напряжений. Выявлена зависимость скорости упругих волн от остаточных напряжений. Результаты работы могут быть использованы в производственных условиях при контроле изделий из стали 35 с наплавкой. Сделаны выводы о возможности определения остаточных напряжений непосредственно на гребных валах в производственных условиях при проведении соответствующего технического обслуживания судов.

Ключевые слова: гребной вал, наплавка, акустоупругость, упругие волны, остаточные напряжения, поверхностная волна

Финансирование: Исследование выполнено по гранту РНФ №19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях»

Для цитирования: Матвеев Ю. И., Хлыбов А. А., Глебов В. В. Исследование и разработка методики технической диагностики гребных валов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 4. С. 52–61. doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-52-61.

Original article

Studying and developing methods of propeller shaft technical diagnostics

Yuri I. Matveev^{1✉}, Aleksandr A. Khlybov², Vladimir V. Glebov³

^{1,3} Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia, matveevseu@mail.ru ✉

² Nizhny Novgorod State Technical University,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The propeller shafts are the structural components that require increased attention. The results of studying the damage of propeller shafts are presented in accordance with the safety

requirements (a case of the river vessels). It is shown that residual stresses greatly impact the reliability and operability of the shafts becoming a damaging factor. The residual stresses occur due to surfacing the propeller shaft by ST35 steel with SV-08A welding wire. There is considered the possibility of determining the magnitude of residual stresses by the acoustic method in the surfacing. To estimate stresses the phenomenon of acoustoelasticity was used: the dependence of the elastic waves propagation velocity on the magnitude of the acting stresses. The process of determining the acoustoelasticity coefficients was carried out using standard samples (in accordance with GOST1497). Samples modeling surfacing were manufactured and tested. Metallographic studies were carried out to assess the influence of the material composition of the propeller shaft on the structure and strength properties of the propeller shafts. The influence of the structure on the amount of residual stresses was evaluated. It has been inferred from the tests results that the speed of elastic waves depends on the residual stresses. The results of the work can be used in production conditions for the control of products made of 35 steel with surfacing. In conclusion, the proposed method can be used to determine the residual stresses directly on the propeller shafts in operation conditions during the appropriate maintenance of ships.

Keywords: propeller shaft, surfacing, acoustoelasticity, elastic waves, residual stresses, surface wave

Funding: Studying was carried out under the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00332 “Development of scientifically based approaches and hardware and software tools for monitoring damage to structural materials using the artificial intelligence approaches to ensure the safe operation of engineering systems in Arctic conditions”

For citation: Matveev Yu. I., Khlybov A. A., Glebov V. V. Studying and developing methods of propeller shaft technical diagnostics. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2021;4:52-61. (In Russ.) doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-52-61.

Введение

Валопровод – один из основных элементов судна [1–3]. Безопасная и безаварийная эксплуатация – одно из основных требований для любой технической конструкции, в том числе для валопроводов. Преждевременное разрушение валопровода может привести к аварии судна. Простой судна влечет финансовые потери. Следует учитывать затраты на ремонтно-восстановительные работы, которые могут значительно превышать стоимость разрушенного вала. Использование средств неразрушающего контроля [4, 5], позволяющих определить место и характер разрушения, является одним из мероприятий, способствующих повышению надежности судов. Разработка методик и средств технической диагностики, их внедрение в техническое обслуживание судов способствует уменьшению аварийности на флоте.

Усталостное разрушение гребного вала

Наиболее частым случаем разрушения валов является усталостное разрушение [6]. Зону разрушения гребного вала контролировали с помощью поверхностных волн (ПВ), направление распространения которых обозначено на рис. 1.

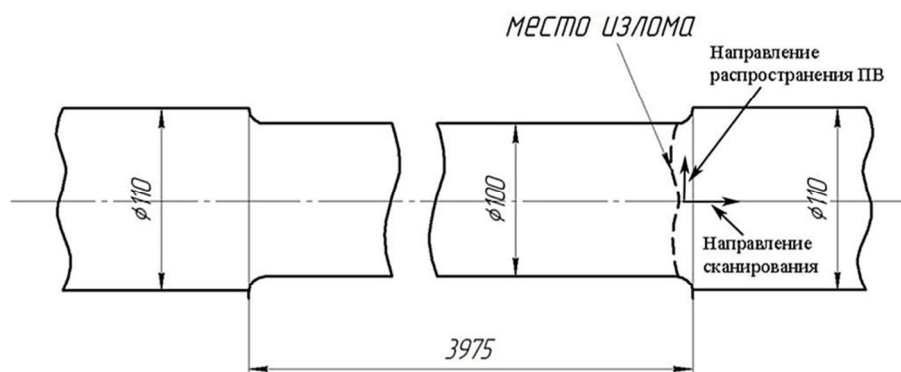


Рис. 1. Схематичное положение зоны разрушения

Fig. 1. Schematic position of the destruction zone

Визуальный осмотр свидетельствует, что разрушение носит признаки усталостного разрушения [2, 3]. Фотография излома представлена на рис. 2.

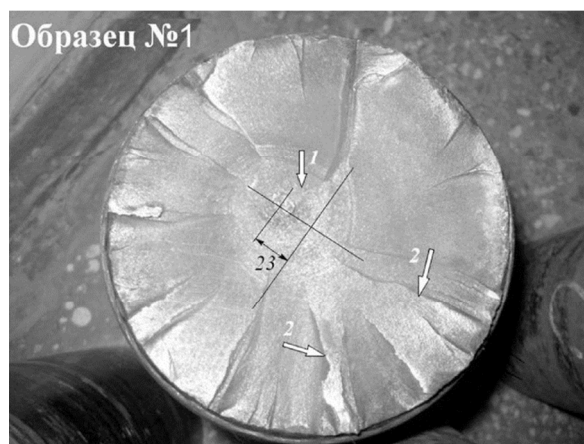


Рис. 2. Характерный вид области разрушения гребного вала, проект 908 (типа «Речной»):
1 – зона зарождения усталостного разрушения; 2 – направление долома вала

Fig. 2. Typical view of destruction area of the propeller shaft, project 908 (river type):
1 - fatigue fracture initiation zone; 2 - direction of the shaft break

Характер и место излома являются типичными для всех исследованных случаев разрушения (рис. 2). Зона зарождения и развития усталостной трещины перпендикулярна оси вала, «ось излома» смещена относительно оси вращения гребного вала на 15–23 мм.

Одной из причин разрушения валов является износ. Технология восстановления гребного вала – наплавка. Для судов проекта 908 наплавочным материалом становится малоуглеродистая сварочная проволока Св-08А; диаметр проволоки – 2 мм; толщина наплавленного слоя – 6 мм.

Химический состав проволоки Св-08А: 2 % марганца Mn и 1 % кремния Si. Качество проволоки Св-08А контролируется согласно ГОСТ 2246-70. При наплавке проводят подогрев вала до температуры 200–250 °С. После наплавки термообработку не производят. Температура в зоне наплавки достигает 1 000 °С и более (температура плавления металла). При таких температурах возникают структурные изменения, что приводит к значительным остаточным напряжениям, к локальным пластическим деформациям. В итоге происходит снижение ресурса эксплуатируемого вала.

Экспериментальная оценка величины остаточных напряжений [4, 7, 8], накопления повреждений является актуальной и представляет практический интерес для обеспечения безопасной эксплуатации сложных технических объектов. Для решения задач оценки остаточных напряжений можно использовать акустические методы, основанные на анализе распространения упругих волн в ультразвуковом диапазоне в контролируемом изделии [9–20].

Материалы и методика исследования

В настоящей работе были исследованы образцы из стали 35. Сталь 35 используется при изготовлении гребных валов судов проекта 908 (типа «Речной»). Химический состав стали представлен в таблице.

Содержание химических элементов в стали, %
Content of chemical elements in steel

Кремний	Марганец	Медь	Мышьяк	Никель	Сера	Углерод	Фосфор	Хром
0,17–0,37	0,5–0,8	0,3	0,08	0,3	0,04	0,32–0,4	0,035	0,25

Для проверки результатов, полученных на лабораторных образцах [2, 3], были проведены испытания. Образцы вырезали в соответствии со схемой на рис. 3.

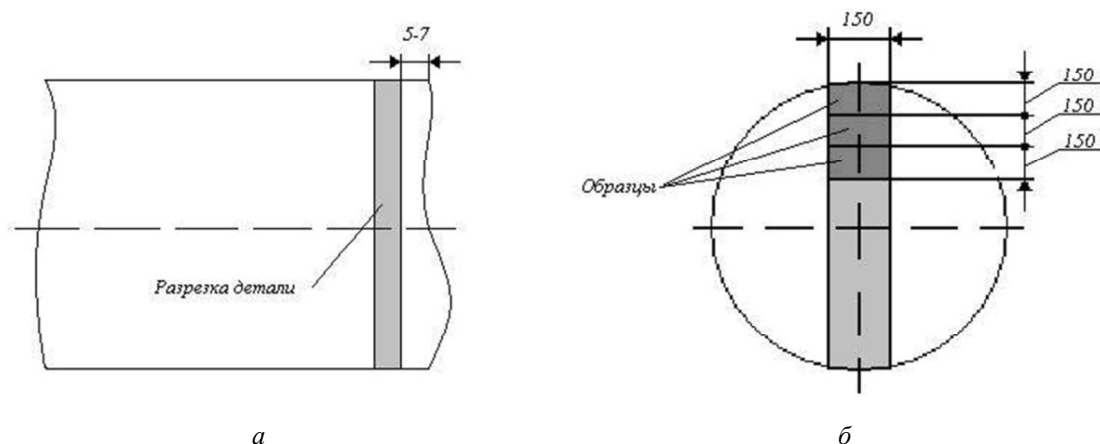


Рис. 3. Схема изготовления образцов в зоне разрушения гребного вала:
а – вид перпендикулярно оси вала; б – вид вдоль оси вала

Fig. 3. Scheme of making samples in the destruction area of the propeller shaft:
a - the view perpendicularly to the shaft axis; б - the view along the shaft axis

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Кейпсе VHX-1000. Образцы подготавливали по стандартной методике. Измерение твердости по Роквеллу осуществляли на твердомере ТК-2М. Твердость зоны сплавления определяли с помощью микротвердомера Struers Duramin – 1 при нагрузке 1 кг.

В качестве измеряемого параметра было использовано время распространения упругих волн в исследуемой среде. Время распространения измеряли с помощью измерительно-вычислительного комплекса «Астрон» [1, 4]. Для измерения возбуждали и принимали поверхностные волны (резонансная частота – 5 МГц).

В основе определения остаточных напряжений лежит эффект акустоупругости: зависимость скорости распространения упругих волн от величины остаточных напряжений. Для исследования полей механических напряжений обычно используют продольные и поперечные волны [1, 7, 9, 21–23]. Для гребных валов использование этого типа волн невозможно вследствие сложной формы вала, поэтому была разработана методика измерений остаточных напряжений, основанная на использовании поверхностных акустических волн.

Была разработана и применена схема измерений на фиксированной длине между излучающим и приемным датчиками. Соответствующий алгоритм определения остаточных напряжений может быть записан следующим образом:

$$\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1(0)} = A_1\sigma_1 + A_2\sigma_2;$$

$$\frac{\Delta\tau_2}{\tau_2(0)} = A_1\sigma_2 + A_2\sigma_1,$$

где σ_1 и σ_2 – значения напряжений вдоль и перпендикулярно оси образца соответственно; $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ – изменения времени распространения поверхностных волн; $\tau_1(0)$ и $\tau_2(0)$ – время распространения поверхностных волн в эталонном образце; A_1, A_2 – коэффициенты акустоупругой связи. Коэффициенты получают экспериментально.

Возбуждение и прием поверхностных волн осуществляли клиновидным преобразователем (рис. 4). В основе получения поверхностных волн лежит метод клина.

Между излучающим и приемным датчиками выбиралась жесткая база, равная 25 мм. Для этого датчик поверхностной волны изготавливали в одном корпусе из оргстекла. Термодатчик предназначен для компенсации влияния изменений температуры, при которой проводятся измерения. Положение «термоимпульса» зависит от окружающей температуры. Практические измерения автоматически учитывают изменение температуры, при которой проводятся испытания.

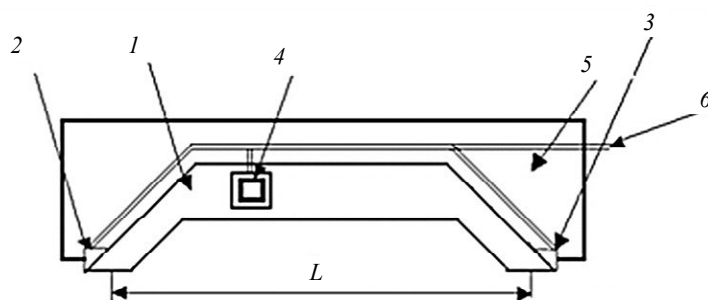


Рис. 4. Датчик поверхностных волн: 1 – двусторонний клин; 2 – излучатель; 3 – приемник; 4 – термодатчик; 5 – защитный корпус; 6 – кабель; L – база преобразователя, равная 25 мм

Fig. 4. Surface wave sensor: 1 - double-sided wedge; 2 - emitter; 3 - receiver; 4 - thermal sensor; 5 - case; 6 - cable; L - base of the transducer (25 mm)

Типичная осциллограмма с термоимпульсом и импульсом поверхностной волны представлена на рис. 5.

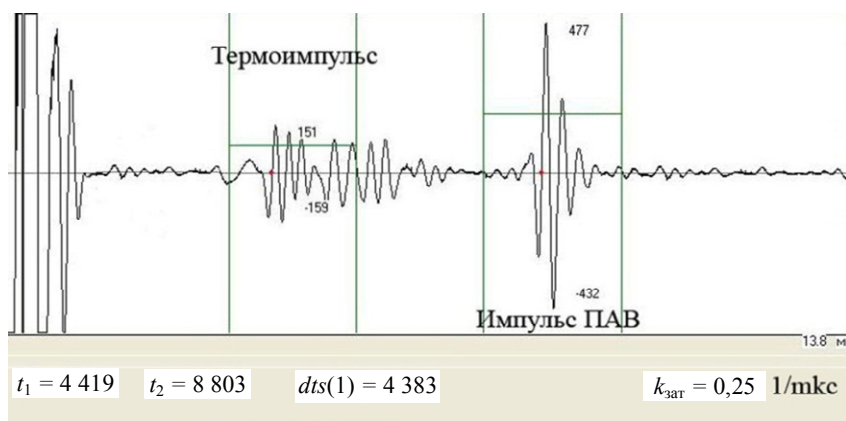


Рис. 5. Типичная осциллограмма измерений:

t_1 соответствует времени распространения термоимпульса, нс;

t_2 – время распространения поверхностной волны, нс;

$dts(1)$ – время распространения поверхностной волны относительно термоимпульса, нс

Fig. 5. Typical oscillogram of readings: t_1 corresponds to the thermal pulse propagation time, ns;

t_2 - surface wave propagation time, ns; $dts(1)$ - surface wave propagation time relative to thermal pulse, ns

Контроль осуществляется следующим образом: очищают поверхность образца от следов грязи, масла и т. д. Далее поверхность обезжиривают, устанавливают датчик и проводят измерения. Шероховатость – на уровне $Rz\ 40$. Поверхностные волны обеспечивают контроль с односторонним доступом к поверхности вала.

Отработка методики контроля проводилась на специально изготовленных плоских образцах (по ГОСТ 1497), на которые устанавливались датчики поверхностных волн.

Коэффициенты акустоупругой связи (A_1, A_2) [1, 4] получали на плоских стандартных образцах (по ГОСТ 1497) с рабочим сечением 20×5 мм. Для этого образцы нагружали в упругой области. Для акустических измерений датчик поверхностной волны устанавливали на поверхности образца. Измерения проводили не менее 5 раз в режиме «нагрузка – разгрузка».

В результате обработки получены следующие значения акустоупругих коэффициентов A_1, A_2 для исследуемой стали:

$$A_1 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1},$$

$$A_2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ результатов металлографических исследований иллюстрирует микроструктуры исследуемых образцов: феррит, перлит (рис. 6).

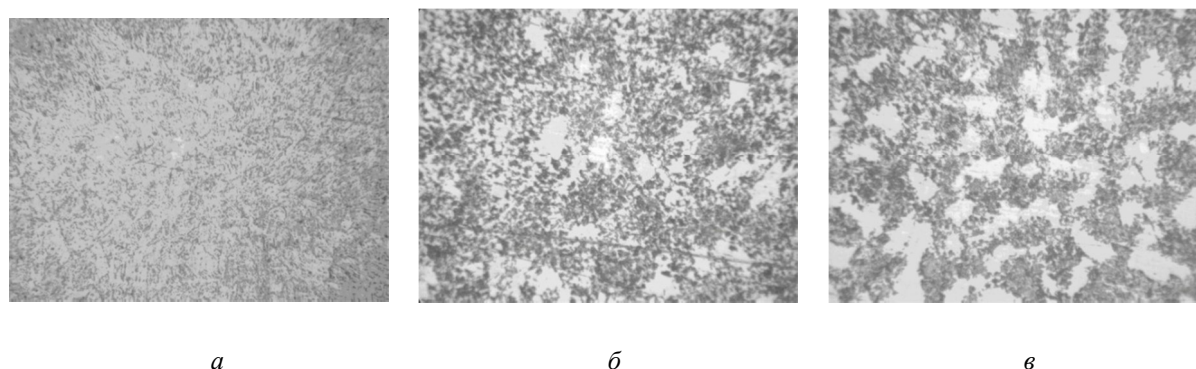


Рис. 6. Микроструктура $\times 450$: *a* – наплавка; *б* – зона термического влияния; *в* – основной металл

Fig. 6. Microstructure $\times 450$: *a* - surfacing; *б* - heat-affected zone; *в* - base metal

В наплавленном слое наблюдаем мелкозернистую структуру (рис. 6, *a*). У основного металла структура крупнозернистая (рис. 6, *в*). Зона термического влияния характеризуется промежуточной структурой: между мелкозернистой и крупнозернистой (рис. 6, *б*). Данные по изменению микроструктуры свидетельствуют об ускоренном охлаждении наплавленного слоя при медленном охлаждении основного металла. Неоднородность температурных полей (от температуры плавления до температуры контролируемого вала), различия в структурных изменениях являются причинами возникновения остаточных напряжений.

Изменение твердости по Роквеллу в исследуемом сечении представлено на рис. 7. Данные подтверждают результаты металлографических исследований. Измерения твердости подтвердили, что в зоне термического влияния протекает ускоренное охлаждение, твердость возрастает.

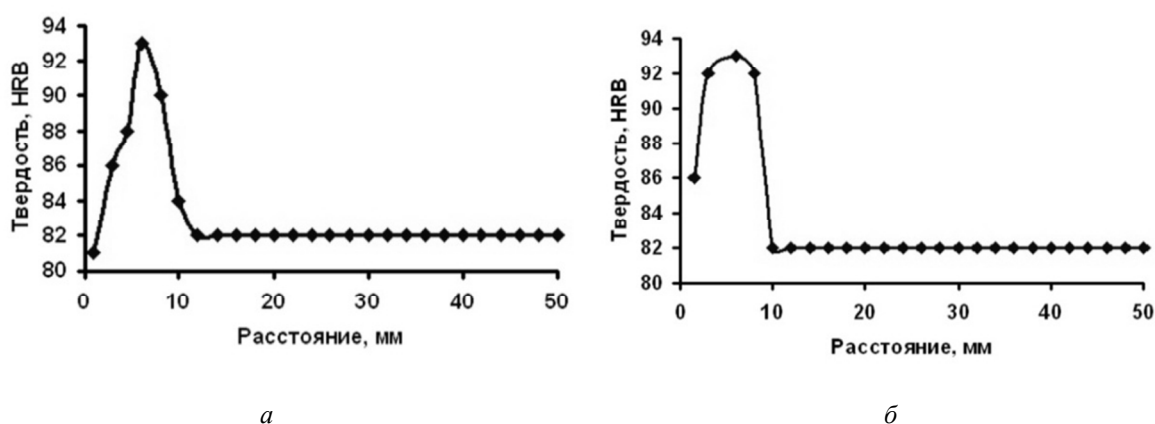


Рис. 7. Результаты измерения твердости: *a* – вал № 1; *б* – вал № 2

Fig. 7. Results of hardness readings

Результаты исследований времени распространения поверхностных волн (для 2-х валов) представлены на рис. 8.

Измерения проводили вдоль оси вала. Точка начала измерений – зона разрушения. Соответственно, на рис. 8, *a* представлены данные для вала № 1, а на рис. 8, *б* – для вала № 2. Данные акустических измерений свидетельствуют, что валы изготовлены по одной технологии.

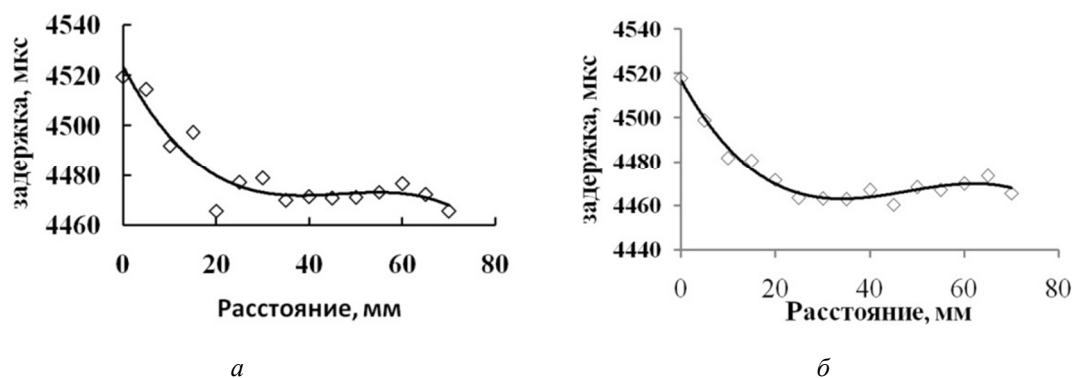


Рис. 8. Распределение значений времени распространения поверхностной волны вдоль оси гребного вала: а – вал № 1; б – вал № 2

Fig. 8. Distribution of values of the surface wave propagation time along the propeller shaft axis: а - shaft 1; б - shaft 2

Согласно рис. 8 зона разрушения достигает 20 мм. Эта зона характеризуется значительным изменением акустического параметра (скорость распространения поверхностной волны). Так как скорость является структурно-чувствительным параметром, то этот результат свидетельствует о необратимых структурных изменениях в зоне разрушения гребного вала. Изменение времени распространения поверхностной волны может быть использовано для разработки методики оценки остаточного ресурса гребного вала.

Выводы

1. Место расположения разрушения – район галтели носовой шейки, причина разрушения – переменные нагрузки (усталость).
2. Предложенный алгоритм и методика измерений свидетельствует, что акустический метод может быть использован для определения остаточных напряжений.
3. Акустические измерения в зоне разрушения гребного вала свидетельствуют о чувствительности предложенного акустического метода в задачах оценки состояния металла гребных валов. Данные подтверждаются результатами металлографических исследований и результатами измерения твердости материала.
4. Акустический метод оценки усталостной поврежденности металла может быть использован на практике как для определения наиболее вероятных зон разрушения, так и для количественной оценки поврежденности контролируемого материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хлыбов А. А. Оценка накопления повреждений в конструкционных металлических материалах акустическими методами для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов: дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 2011. 394 с.
2. Хлыбов А. А., Колыванов В. В. Методика оценки технического состояния гребных валов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2010. № 1. С. 167–171.
3. Хлыбов А. А., Колыванов В. В. Экспериментальные исследования разрушения гребных валов судов типа «Речной» // Контроль. Диагностика. 2010. № 4. С. 43–48.
4. Никитина Н. Е., Казачек С. В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестн. науч.-техн. развития. 2010. № 4 (32). С. 18–28.
5. Трофимов В. В., Башкарев А. Я., Краус Иво. Неразрушающий метод рентгеновской тензометрии для контроля напряжений в поверхностных слоях деталей и изделий. URL: <https://textarchive.ru/c-1486683.html> (дата обращения: 20.09.2021).
6. Хлыбов А. А., Углов А. Л. Экспериментальное исследование закономерностей накопления усталостных повреждений в стали 08X18H10T при малоцикловом блочном нагружении с использованием акустического метода // Физ. мезомеханика. 2015. Т. 18. № 6. С. 111–115.
7. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 162 с.

8. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Рассторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 2012. 632 с.
9. Алешин Н. П., Углов А. Л., Хлыбов А. А., Прилуцкий М. А. Акустический метод определения осевых напряжений для произвольного участка трубопровода // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. № 3. С. 14–19.
10. Камышев А. В., Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Измерение остаточных напряжений в ободьях железнодорожных колес методом акустоупругости // Дефектоскопия. 2010. № 3. С. 50–54.
11. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В., Балабанов Е. Н., Волкова Л. В. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 16–28.
12. Yashar Javadi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Mehdi Akhlaghi. Residual stress evaluation in dissimilar welded joints using finite element simulation and the 1cr ultrasonic wave // Дефектоскопия. 2012. № 9. С. 48–61.
13. Хлыбов А. А. Влияние термической обработки на остаточные напряжения в зоне сплавления аустенитной и корпусной сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. Т. 733. № 7. С. 47–51.
14. Хлыбов А. А. Оценка напряженного состояния гильотинных ножей, подвергаемых термической обработке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 4. С. 54–57.
15. Хлыбов А. А., Ошурина Л. А. Сравнительный анализ определения величины остаточных напряжений в стали 6ХС акустическим и рентгеновским способами // Приволж. науч. журн. 2010. № 2. С. 16–21.
16. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
17. Углов А. Л., Хлыбов А. А., Пичков С. Н., Шишулин Д. Н. Акустический метод оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 3–10.
18. Романишин Р. И., Романишин И. М. Оценка рассеянной поврежденности конструкционных материалов // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 25–36.
19. Arguelles A. P., Turner J. A. Ultrasonic attenuation of polycrystalline materials with a distribution of grain sizes // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. Vol. 141. P. 4347–4353.
20. Carreón H., Barrera G., Natividad C., Salazar M., Contreras A. Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints // Nondestructive Testing and Evaluation. 2016. Vol. 31. N. 2. P. 97–108.
21. Li J., Rokhlin S. I. Elastic wave scattering in random anisotropic solids // International Journal Solids and Structures. 2016. N. 78-79. P. 110–124.
22. Van Pamel A., Sha Gaofeng, Rokhlin S., Lowe M. J. S. Numerical and analytical modelling of elastodynamic scattering within polycrystalline materials // The Journal of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 143. P. 2394–2408.
23. Rzy M., Grabec T., Veres Istvan Attila. Influence of grain morphology on ultrasonic wave attenuation in polycrystalline media with statistically equiaxed grain // The Journal of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 143. P. 219–229.

REFERENCES

1. Khlybov A. A. Otsenka nakopleniia povrezhdenii v konstruktsionnykh metallicheskikh materialakh akusticheskimi metodami dlia obespecheniia bezopasnoi ekspluatatsii tekhnicheskikh ob"ektov: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Evaluating damage accumulation in structural metal materials by acoustic methods to ensure safe operation of technical objects: diss. ... dr. tech. sci.]. Nizhnii Novgorod, 2011. 394 p.
2. Khlybov A. A., Kolyvanov V. V. Metodika otsenki tekhnicheskogo sostoianiia grebnykh valov [Methods of assessing technical condition of propeller shafts]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiya, 2010, no. 1, pp. 167-171.
3. Khlybov A. A., Kolyvanov V. V. Eksperimental'nye issledovaniia razrusheniia grebnykh valov sudov tipa «Rechnoi» [Experimental studies of propeller shafts damage in river ships]. Kontrol'. Diagnostika, 2010, no. 4, pp. 43-48.
4. Nikitina N. E., Kazachek S. V. Preimushchestva metoda akustouprugosti dlia nerazrushaiushchego kontroliia mekhanicheskikh napriazhenii v detaliakh mashin [Advantages of acoustoelasticity method for non-destructive testing mechanical stresses in machine parts]. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiia, 2010, no. 4 (32), pp. 18-28.
5. Trofimov V. V., Bashkarev A. Ia., Kraus Ivo. Nerazrushaiushchii metod rentgenovskoi tenzometrii dlia kontroliia napriazhenii v poverkhnostnykh sloiakh detalei i izdelii [Non-destructive method of X-ray tensometry for stress control in surface layers of parts and products]. Available at: <https://textarchive.ru/c-1486683.html> (accessed: 20.09.2021).
6. Khlybov A. A., Uglov A. L. Eksperimental'noe issledovanie zakonomernostei nakopleniia ustalostnykh povrezhdenii v stali 08Kh18N10T pri malotsiklovom blochnom nagruzhenii s ispol'zovaniem akusticheskogo

metoda [Experimental study of regularities of fatigue damage accumulation in 08Kh18N10T steel under low-cycle block loading using acoustic method]. *Fizicheskaya mekhanika*, 2015, vol. 18, no. 6, pp. 111-115.

7. Guz' A. N., Makhort F. G., Gushcha O. I. *Vvedenie v akoustoprugost'* [Principles of acoustoelasticity]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 162 p.

8. Umanskii Ia. S., Skakov Iu. A., Ivanov A. N., Rastorguev L. N. *Kristallografiia, rentgenografiia i elektronnaia mikroskopiia* [Crystallography, X-ray and electron microscopy]. Moscow, Metallurgii Publ., 2012. 632 p.

9. Aleshin N. P., Uglov A. L., Khlybov A. A., Prilutskii M. A. Akusticheskiy metod opredeleniia osevykh napriazhenii dlia proizvol'nogo uchastka truboprovoda [Acoustic method for determining axial stresses for arbitrary section of pipeline]. *Zavodskaya laboratoriia. Diagnostika materialov*, 2008, no. 3, pp. 14-19.

10. Kamyshchev A. V., Nikitina N. E., Smirnov V. A. Izmerenie ostatochnykh napriazhenii v obod'iakh zheleznodorozhnykh koles metodom akoustoprugosti [Measurement of residual stresses in rims of railway wheels by acoustoelasticity method]. *Defektoskopiia*, 2010, no. 3, pp. 50-54.

11. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Strizhak V. A., Priakhin A. V., Balabanov E. N., Volkova L. V. Otsenka ostatochnykh napriazhenii v obod'iakh vagonnykh koles elektromagnitno-akusticheskim metodom [Estimating residual stresses in rims of wagon wheels by electromagnetic-acoustic method]. *Defektoskopiia*, 2011, no. 6, pp. 16-28.

12. Yashar Javadi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Mehdi Akhlaghi. Residual stress evaluation in dissimilar welded joints using finite element simulation and the 1cr ultrasonic wave. *Defektoskopiia*, 2012, no. 9, pp. 48-61.

13. Khlybov A. A. Vliianie termicheskoi obrabotki na ostatochnye napriazheniia v zone splavleniia austenitnoi i korpusnoi stali [Influence of heat treatment on residual stresses in fusion zone of austenitic and hull steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2016, vol. 733, no. 7, pp. 47-51.

14. Khlybov A. A. Otsenka napriazhennogo sostoiianiia gil'otinnykh nozhei, podvergaemykh termicheskoi obrabotke [Assessment of stress state of guillotine knives subjected to heat treatment]. *Zavodskaya laboratoriia. Diagnostika materialov*, 2009, vol. 75, no. 4, pp. 54-57.

15. Khlybov A. A., Oshurina L. A. Sravnitel'nyi analiz opredeleniia velichiny ostatochnykh napriazhenii v stali 6KhS akusticheskim i rentgenovskim sposobami [Comparative analysis of determining residual stresses in steel 6KhS by acoustic and X-ray methods]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*, 2010, no. 2, pp. 16-21.

16. Shermergor T. D. *Teoriia uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of microheterogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 399 p.

17. Uglov A. L., Khlybov A. A., Pichkov S. N., Shishulin D. N. Akusticheskiy metod otsenki povrezhdenosti austenitnoi stali pri termopul'satsiakh [Acoustic method for assessing damage of austenitic steel during thermal pulsations]. *Defektoskopiia*, 2016, no. 2, pp. 3-10.

18. Romanishin R. I., Romanishin I. M. Otsenka rasseiannoi povrezhdennosti konstruktsionnykh materialov [Estimation of scattered damage of structural materials]. *Defektoskopiia*, 2019, no. 2, pp. 25-36.

19. Arguelles A. P., Turner J. A. Ultrasonic attenuation of polycrystalline materials with a distribution of grain sizes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, vol. 141, pp. 4347-4353.

20. Carreón H., Barrera G., Natividad C., Salazar M., Contreras A. Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016, vol. 31, no. 2, pp. 97-108.

21. Li J., Rokhlin S. I. Elastic wave scattering in random anisotropic solids. *International Journal Solids and Structures*, 2016, no. 78-79, pp. 110-124.

22. Van Pamel A., Sha Gaofeng, Rokhlin S., Lowe M. J. S. Numerical and analytical modelling of elastodynamic scattering within polycrystalline materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, vol. 143, pp. 2394-2408.

23. Rzy M., Grabec T., Veres Istvan Attila. Influence of grain morphology on ultrasonic wave attenuation in polycrystalline mediawith statistically equiaxed grain. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, vol. 143, pp. 219-229.

Статья поступила в редакцию 02.10.2021; одобрена после рецензирования 15.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.
The article was submitted 02.10.2021; approved after reviewing 15.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Иванович Матвеев – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой эксплуатации судовых энергетических установок; Волжский государственный университет водного транспорта; 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5; matveevseu@mail.ru

Александр Анатольевич Хлыбов – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой материаловедения, технологии материалов и термической обработки металлов; Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева; 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24; Hlybov_52@mail.ru

Владимир Васильевич Глебов – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта; Волжский государственный университет водного транспорта; 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5; vladimir_vasg@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri I. Matveev – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Operation of Ship Power Plants; Volga State University of Water Transport; 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5; matveeveseu@mail.ru

Aleksandr A. Khlybov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals; Nizhny Novgorod State Technical University; 603950, Nizhny Novgorod, Minina St., 24; Hlybov_52@mail.ru

Vladimir V. Glebov – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Hoisting-and-Transport Machines and Machine Repair; Volga State University of Water Transport; 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5; vladimir_vasg@rambler.ru

