

УДК 620.179.16; 621.791.925
DOI: 10.37890/jwt.vi85.614

Оценка структурных изменений основного металла валов, восстановляемых многократной наплавкой

В. М. Родюшкин¹

ORCID: 0000-0002-3081-0288

А. Б. Корнев²

ORCID: 0009-0006-1954-2004

Е. А. Давыдов²

К. О. Каразанов²

ORCID: 0009-0000-8746-1691

¹*Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Восстановление геометрических размеров изношенных деталей в ряде случаев осуществляется путем многократной наплавки. В этом процессе возможно изменение структурного состояния металла под наплавленным слоем. Такие изменения могут свидетельствовать об ослаблении несущей способности основного металла. В статье разрабатывается технология контроля материала деталей типа «вал» с целью поиска критерия допустимого количества ремонтов детали путем наплавки.

На специально подготовленных образцах, вырезанных из судового вала с различным количеством наплавок, проведен металлографический анализ. Результат свидетельствует о стабильности структуры и свойств металла под наплавкой вне зависимости от числа наплавленных слоев. Ультразвуковой метод, основанный на измерении скорости упругих продольных волн с использованием прецизионной аппаратуры, подтвердил полученные выводы. Микронарушений структуры основного металла вала в пределах чувствительности прибора не выявлено. Продемонстрированы возможности серийно выпускаемого дефектоскопа УСД-50 по реализации методики контроля качества восстановления вала многократной наплавкой.

Ключевые слова: многократная наплавка, ультразвуковой контроль, скорость упругой волны, микротвердость, микроструктура, гребной вал.

Structural changes assessment in the base metal of shafts restored by repeated surfacing

Vladimir M. Rodyushkin¹

ORCID: 0000-0002-3081-0288

Andrey B. Kornev²

ORCID: 0009-0006-1954-2004

Evgeny A. Davydov²

Kirill O. Karazanov²

ORCID: 0009-0000-8746-1691

¹*Machine Building Problems Institute, Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. In some cases, restoration of the geometric dimensions of worn parts is carried out by multiple surfacing. In this process, it is possible to change the structural state of the metal under the deposited layer. Such changes may indicate a weakening of the bearing capacity of the base metal. The article develops a technology for controlling the material of «shaft» type parts in order to find a criterion for the permissible number of part repairs of by surfacing.

Metallographic analysis was conducted on specially prepared samples taken from the ship's shaft, with varying amounts of surfacing. The results indicate the stability of the structure and properties of the metal after surfacing, regardless of the number of deposited layers. The results were validated by the ultrasonic technique, which employs precise instruments to measure the velocity of elastic longitudinal waves. No microstructural flaws of the shaft's base material are detected within a range of device's sensitivity. The capabilities of a mass-produced flaw detector make it possible to implement a quality control technique for shaft restoring by repeated surfacing, which is demonstrated using the UCD-50 flaw detector.

Keywords: multiple surfacing, ultrasonic control, elastic wave speed, microhardness, microstructure, propeller shaft.

Введение

При восстановлении детали количество допустимых наплавочных слоев в руководящем документе¹ не указано однозначно. Известна прямая связь структурных изменений материала с его прочностью [1]. Поэтому существует необходимость в контроле структурного состояния основного металла в процессе нанесения многократной наплавки. Для решения этой задачи применен ультразвуковой метод [2] на образцах из участков судового валопровода с различным числом слоев многократной наплавки. Выбор метода обусловлен возможностью контроля структуры основного металла без разрушения детали, не подвергая ее манипуляциям, не совместимым с возможностью дальнейшей эксплуатации. В качестве арбитражного метода применен металлографический анализ структуры. Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния многократной наплавки на состояние основного металла восстанавливаемой детали.

Материалы и методы

Для исследований были изготовлены образцы с одной, двумя и тремя слоями наплавки сварочной проволокой Св-06Х19Н9Т [3], показанные на рисунке 1. Материал основы судового валопровода – сталь 35.



Рис. 1. Изготовленные образцы многократной наплавки

Для проведения металлографических исследований образцы были подготовлены путем шлифования, полирования, а также травления в 5% растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Фотографии получены при помощи оптического светового

¹РД 31.52.12-88 Судовые гребные валы. Восстановление электродуговой наплавкой перлитными и аустенитными сталими

микроскопа БиОптикСМІ-400, микротвердость была измерена на микротвердомере ПМТ-3М по методике Виккерса с нагрузкой в 100 г при выдержке в 10 с.

Ультразвуковые исследования проводились на тех же образцах с целью разработки альтернативного метода оценки структурных изменений. Неразрушающий метод оценки структурных изменений базируется на связи скорости упругих ультразвуковых волн с упругими постоянными материала [4-6]. Для контроля скорости волн в образцах использованы две технологии, отличающиеся друг от друга используемой аппаратурой и, соответственно, метрологическими характеристиками. Более точная прецизионная технология контроля скорости описана в [7]. В качестве генератора электрических импульсов, возбуждающих пьезоэлектрический преобразователь, применили серийно выпускаемый УЗ-дефектоскоп А1214. Преобразователь излучает в исследуемый образец упругий импульс, который распространяется в металле, достигает противоположной стороны образца, отражается и возвращается обратно на преобразователь, где преобразуется в электрические сигналы и поступает на цифровой осциллограф RIGOL MSO5354 с разрешением по времени 0,1 нс. Время распространения, характеризующее скорость распространения упругих волн в образце, фиксировалось между первым и вторым отраженным импульсом по точкам пересечения нуля между максимумом и минимумом в ультразвуковом импульсе. Тем самым исключается погрешность, связанная с временем распространения волны в преобразователе. На рисунке 2 схематично показана типичная осциллограмма импульса при его возбуждении с помощью ПЭП, поясняющая используемый принцип.

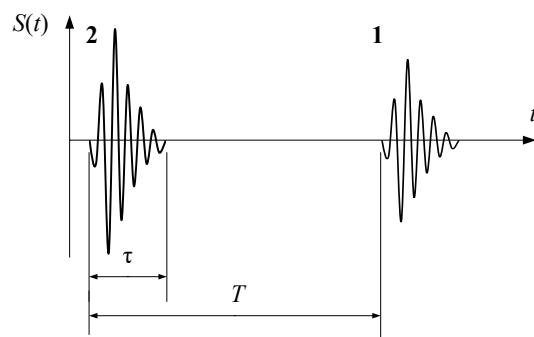


Рис. 2. Характерная форма импульса в исследуемом образце при его возбуждении с помощью ПЭП. T – задержка (время пробега волны расстояния L в металле образца, τ – длительность зондирующего импульса) между первым и вторым отраженным импульсом

Скорость упругих волн вычисляется по формуле $C = \frac{2L}{T}$, где L – толщина образца.

С практической целью максимально упростить процедуру контроля скорости волн и сделать ее доступной в условиях производства, апробирована технология на базе серийно выпускаемым дефектоскопом УСД-50 [8]. В этом случае в сервисных функциях УСД-50 задавалась фиксированная толщина образца. Измерение времени задержки между донными импульсами при помощи УСД-50 позволяет вычислить скорость упругой волны. На рисунке 3 показана процедура контроля скорости волн в образце.



Рис. 3. Контроль скорости упругой волны

Результаты и обсуждение

Измерение микротвердости в образцах с одной, двумя и тремя слоями наплавки (далее – образцы 1, 2 и 3 соответственно) показало, что нанесение второго и третьего слоев наплавленного материала не оказывает значительного влияния на микротвердость. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Микротвердость образцов с многократной наплавкой

Зона в образце	Образец 1, HV0.1	Образец 2, HV0.1	Образец 3, HV0.1
Зона сплавления	369 ± 16	314 ± 27	320 ± 31
Зона термического влияния	197 ± 14	186 ± 13	187 ± 20
Основной материал	152 ± 24	158 ± 16	150 ± 17

Значения оказались довольно близкими вне зависимости от количества слоев наплавки. Можно отметить локальное повышение микротвердости до $370 \text{ HV}_{0.1}$ в зоне сплавления, а также умеренно возросшую микротвердость в зоне термического влияния относительно основного металла, что связано с мелкокристаллической структурой переходной зоны и образованием упрочняющих частиц из легирующих элементов наплавочного материала. Ширина зоны сплавления с повышенной микротвердостью оценивается в 200 мкм. Характерная микроструктура образцов показана на рисунке 4.

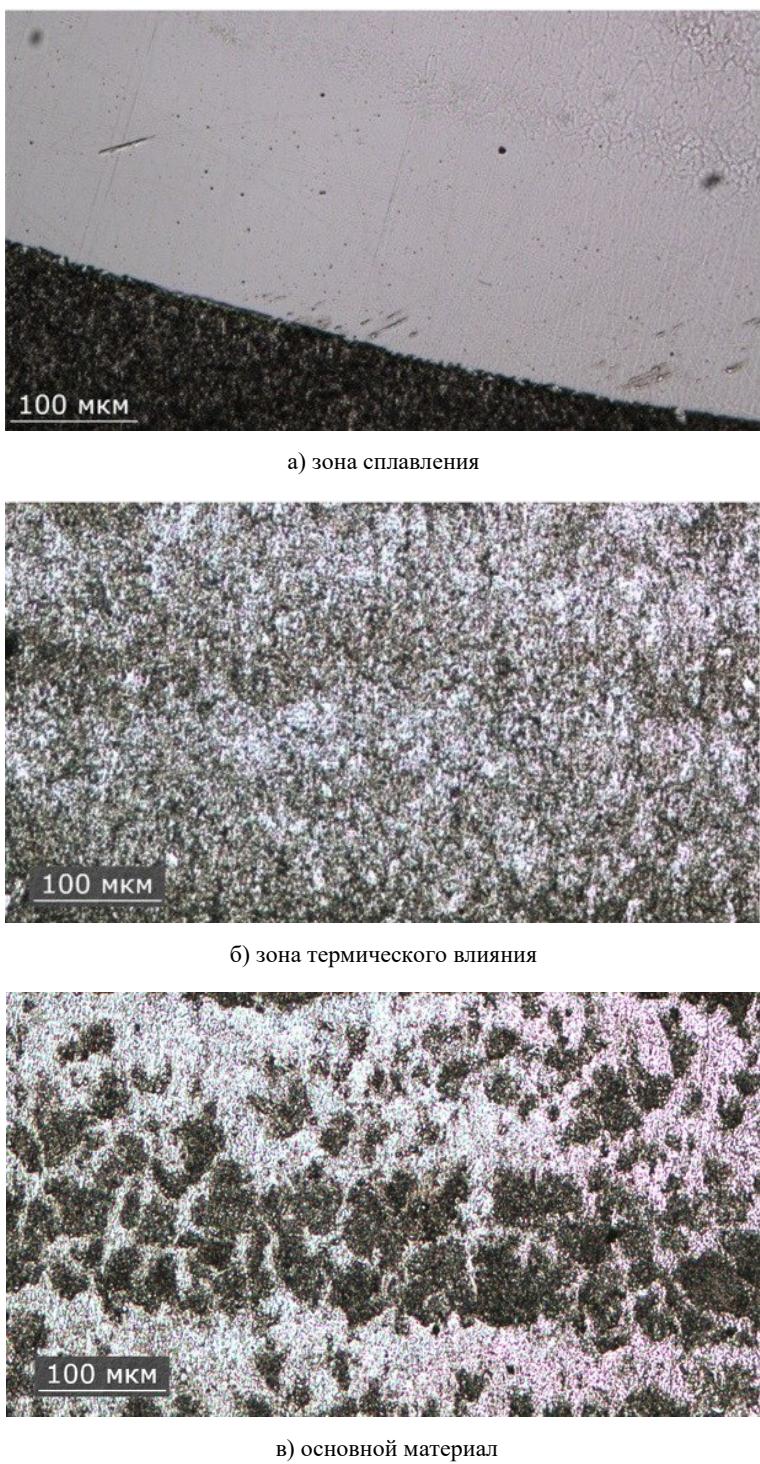


Рис. 4. Микроструктура образцов, увеличение ×200

Зона сплавления демонстрирует ровную границу между материалами, не обнаружено значительных дефектов или их скоплений. Материал под наплавкой имеет структуру перлита и феррита, соответствующую химическому составу исходной стали.

В зоне термического влияния обнаруживаются закалочные мартенситные структуры, образующиеся из-за высоких тепловложений при наплавке. Хотя их присутствие приводит к умеренному повышению микротвердости, плавные переходы между структурами значительно снижают угрозу отслоения наплавленного слоя при эксплуатации.

В таблице 2 представлены результаты прецизионного измерения времени распространения продольных волн в зоне основного металла ($t_{\text{осн}}$) и в зоне наплавки ($t_{\text{нап}}$).

Таблица 2

Время распространения продольных волн

	Образец 1	Образец 2	Образец 3
$t_{\text{осн}}, \text{ нс}$	$3380,7 \pm 11,2$	$3370,1 \pm 1,9$	$3323,3 \pm 14,3$
$t_{\text{нап}}, \text{ нс}$	$3391,9 \pm 11,2$	$3372,0 \pm 1,9$	$3337,6 \pm 14,3$

Различия в толщине образцов, допущенные при пробоподготовке, приведут к вариации времени распространения. В таблице 3 представлены результаты измерения толщины образца в зонах основного металла ($h_{\text{осн}}$) и в зоне наплавки ($h_{\text{нап}}$). Использован микрометр МК 25 ГОСТ 6507-90 с ценой деления 0,01 мм. Все измерения проводились при температуре 23,8°C и влажности 50%.

Таблица 3

Толщина образца в зоне основного металла и в зоне наплавки

	Образец 1	Образец 2	Образец 3
$h_{\text{осн}}, \text{ мм}$	$20,11 \pm 0,03$	$20,02 \pm 0,02$	$20,28 \pm 0,06$
$h_{\text{нап}}, \text{ мм}$	$20,14 \pm 0,03$	$20,04 \pm 0,02$	$20,34 \pm 0,06$

Вариации толщины $\Delta_{\text{толщ}}$ составили 0,06-0,09 мм, что соответствует разбросу времени распространения упругой волны в образцах 1, 2 и 3. Причина разброса значений времени заключается только в различиях толщин образцов.

Таким образом, при высокой точности измерения времени распространения упругой волны в металле не обнаружено различий, вызванных структурными изменениями.

На реальном изделии применить приведенный выше способ затруднительно, так как он сопряжен с необходимостью иметь прецизионную аппаратуру. Наличие дефектоскопа УСД-50 [8] решает эту проблему, так как в сервисных функциях можно задать фиксированную толщину образца. Тогда в автоматическом режиме УСД-50 позволяет вычислять скорость упругой волны. На рисунке 3 показана процедура контроля скорости волн в образце. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Скорость распространения продольных волн

	Образец 1	Образец 2	Образец 3
$v_{\text{осн}}, \text{ м/с}$	5956 ± 12	5984 ± 4	6056 ± 14
$v_{\text{нап}}, \text{ м/с}$	5944 ± 12	5980 ± 4	6042 ± 14

Результаты демонстрируют, что в зоне основного металла и в зоне наплавки изменения скорости соответствуют изменениям толщины в зоне контроля. Следовательно, как и в случае прецизионных измерений, так и в случае измерения при помощи промышленного дефектоскопа с погрешностью измерения времени в 1 мкс, различий в скорости распространения упругих волн, обусловленных структурными изменениями в образцах, не обнаружено. Более того, по данным многих исследователей [10-12], показателем того, что в металле произошли структурные изменения, влияющие на его прочность, является изменение скорости упругих волн на 1%, что в данном случае не наблюдается.

Таким образом, реализована методика контроля качества восстановления вала многократной наплавкой в условиях судоремонта.

На реальном объекте, в отличие от лабораторных условий, применить объемные волны проблематично, так как основной вклад в погрешность вносят данные о толщине (о пути распространения волны в основном металле). Использование упругих головных волн [9] позволяет контролировать скорость волны в металле при неизвестной толщине изделия за счет фиксированной базы между излучателем и приемником. Следовательно, существует перспектива контроля состояния основного металла под наплавкой без нарушения целостности восстанавливаемой детали.

Заключение

1. Проведенный металлографический анализ образцов с различным числом слоев многократной наплавки не выявил отличий в структуре и свойствах металла под наплавкой.

2. Прецизионные измерения скорости продольных волн в изготовленных образцах с многократными наплавками не выявили появления структурных изменений в основном металле. Установлено, что отклонения в значениях скорости звука связаны с разницей в толщине образцов.

3. Сочетание металлографических и ультразвуковых исследований демонстрирует, что многократная наплавка не приводит к структурным изменениям основного металла.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2024-2026 гг.

(FFUF -2024-0031, № НИОКТР 1023032800130-3-2.3.2).

The work was carried out within the state assignment to IAP RAS for fundamental scientific research for 2024-2026 (topic FFUF -2024-0031, No 1023032800130-3-2.3.2).

Список литературы

1. Бернштейн, М.Л.; Займовский, В.А. Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия. 1970. 472 с.
2. Березин Е.К., Корнев А.Б., Родюшкин В.М. Исследования покрытий, наносимых газопламенным напылением, методом ультразвуковой диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. том.89. №1. С.28-34 DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-1-28-34>
3. Каразанов К.О., Давыдов Е.А., Родюшкин В.М. Способ восстановления гребного вала многослойной наплавкой с пооперационным контролем//Транспорт. Горизонты развития. 2024: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2024. – URL: http://vf-reka-more.pdf/2024/4_11.pdf
4. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. Москва, Наука, 1977. 399 с.
5. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с
6. Воробьев Р.А., Литовченко В.Н. Применение метода ультразвукового контроля для оценки трещиностойкости низкоуглеродистой мартенситной стали 07Х3ГНМОА. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. №87(1). С.45-51. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-1-45-51>
7. Мишакин В. В., Гончар А. В., Клюшников В. А. и др. Контроль состояния циклически деформируемых нержавеющих сталей акустическим и вихревоковым методами// Измерительная техника. 2021. № 2. С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-62-67>
8. Березин Е.К., Корнев А.Б., Родюшкин В.М. Технология контроля антифрикционных вставок поршня газомоторкомпрессора 10ГКН // Двойные технологии. 2023. №1(102). С.34-37

9. Разыграев Н.П. 50 лет – головные волны в ультразвуковой дефектоскопии// Территория NDT. №1. (январь–март) 2023.с.62-72
10. Матвеев Ю.И., Хлыбов А.А., Глебов В.В. Исследования и разработка методики технической диагностики гребных валов//Вестник АГТУ. серия: морская техника и технология. 2021. №4. с.52-61
11. Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. О результате измерения времени распространения упругой волны в деформируемом образце стали марки 10ХСНД // Приволжский научный журнал, 2023, № 3(67), с. 22–29.
12. Зуев Л.Б., Муравьев В.В., Данилова Ю.С. О признаке усталостного разрушения сталей // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, вып. 9, с. 31–34.

References

1. Bernstein, M.L.; Zaimovsky, V.A. Structure and mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgiya.1970. 472 p.
2. Berezin E. K., Kornev A. B., Rodyushkin V. M. Investigations of coatings applied by gas-flame spraying using ultrasound diagnostics // Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2023. volume.89. No. 1. pp.28-34 DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-1-28-34>
3. Karazanov K.O., Davydov E.A., Rodyushkin V.M. A method of restoring a propeller shaft by multilayer surfacing with postoperative control. Transport. Horizons of development. 2024: Proceedings of the International Scientific and Practical Forum. VGUVT Federal State Budgetary Educational Institution. - 2024. – URL: http://vph-reka-mope.rf/2024/4_11.pdf
4. Shermergor T.D. Theory of elasticity of microuniform media. Moscow, Nauka Publ., 1977. 399 p
5. Muravyov V. V., Zuev L. B., Komarov K. L. The speed of sound and the structure of steels and alloys. Novosibirsk: Nauka Publ., 1996. 184 p.
6. Vorobyov R.A., Litovchenko V.N. Application of the ultrasonic inspection method to assess the crack resistance of low-carbon martensitic steel 07H3GNMYA. // Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2021. No. 87(1). pp. 45-51. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-1-45-51>
7. Mishakin V. V., Gonchar A.V., Klyushnikov V. A. and others. Control of the state of cyclically deformable stainless steels by acoustic and eddy current methods // Measuring technology. 2021. No. 2. pp. 62-67. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-62-67>
8. Berezin E.K., Kornev A.B., Rodyushkin V.M. Technology of control of antifriction inserts of the piston of the 10GKN gas compressor // Dual technologies. 2023. No. 1(102). pp.34-37
9. Razgraev N.P. 50 years old – head waves in ultrasonic flaw detection // NDT territory. No. 1. (January–March) 2023. pp.62-72
10. Matveev Yu.I., Khlybov A.A., Glebov V.V. Research and development of a technique for technical diagnostics of propeller shafts // Bulletin of AGTU. series: marine engineering and technology. 2021. No. 4. pp.52-61
11. Rodyushkin V.M., Ilyakhinsky A.V. On the result of measuring the propagation time of an elastic wave in a deformable steel sample of the 10XSD grade // Volga Scientific Journal, 2023, No. 3(67), pp. 22-29.
12. Zuev L.B., Muravyev V.V., Danilova Yu.S. On the sign of fatigue failure of steels // Letters in ZhTF. 1999. Vol. 25, issue 9, pp. 31-34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Родюшкин Владимир Митрофанович,
д.т.н, заведующий лабораторией волновой
динамики, экспериментальной механики и
виброзащиты Института проблем
машиностроения РАН, 603024, г. Нижний
Новгород, ул. Белинского, 85, e-mail:
vlkn2005@yandex.ru

Vladimir M. Rodyushkin, Dr Sci (Eng), Head
of Laboratory Wave dynamics and
experimental mechanics, Institute of Problems
of Machine Science RAS (603024, Nizhny
Novgorod, Belinsky str., 85)

Корнев Андрей Борисович, к.т.н.,
начальник Научно-Технического
Тренажерного Центра «Механик», доцент,
профессор кафедры подъемно-транспортных
машин и машиноремонта, Волжский
государственный университет водного
транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950,
г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: kornev.ab@vsuwt.ru

Давыдов Евгений Александрович,
заместитель начальника Научно-
Технического Тренажерного Центра
«Механик», Волжский государственный
университет водного транспорта (ФГБОУ
ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний
Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:
davydov.ea@vsuwt.ru

Каразанов Кирилл Олегович, инженер
Научно-Технического Тренажерного Центра
«Механик», аспирант кафедры подъемно-
транспортных машин и машиноремонта,
Волжский государственный университет
водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова,
5, e-mail: karazanov.kirill@mail.ru

Andrey B. Kornev, Ph. D (Eng), Head of
Scientific and Technical Training Center
«Mechanic», Associate Professor of the Lifting
and Transport Machines and Mechanisms
Department, Volga State University of Water
Transport, 603950, Nizhny Novgorod,
Nesterova, 5, e-mail: kornev.ab@vsuwt.ru

Evgeny A. Davydov, Deputy Head of
Scientific and Technical Training Center
«Mechanic», Volga State University of Water
Transport, 603950, Nizhny Novgorod,
Nesterova, 5, e-mail: davydov.ea@vsuwt.ru

Kirill O. Karazanov, engineer of Scientific
and Technical Training Center «Mechanic»,
graduate student of the Lifting and Transport
Machines and Mechanisms Department, Volga
State University of Water Transport, 603950,
Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, e-mail:
karazanov.kirill@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; принята к публикации 10.10.2025;
опубликована онлайн 20.12.2025. Received 18.06.2025; published online 20.12.2025.