

УДК 620.179.16

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi65.128>

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В МЕТАЛЛАХ С ИХ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТЬЮ И ТВЕРДОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ПониЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

**А.А. Хлыбов**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Ю.Г. Кабалдин**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**М.С. Аносов**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Д.А. Рябов**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Ю.И. Матвеев**

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

*Аннотация. В работе представлены результаты исследования связи скорости распространения продольных волн в металле с величинами ударной вязкости и твердости в широком диапазоне пониженных температур. Установлено, что с понижением температуры наблюдается повышение твердости, снижение ударной вязкости и увеличение скорости распространения продольной волны в исследуемых металлах, а скорость распространения продольной волны имеет тесную корреляцию с рассматриваемыми характеристиками. Рост скорости звука при понижении температуры, на наш взгляд, объясняется ростом теплопроводности у металлов. Таким образом, по значениям скорости распространения звука в металлах, можно прогнозировать уровень ее ударной вязкости, а также твердость при низких температурах, а, следовательно, склонность к хрупкому разрушению конструкций.*

*Ключевые слова: Скорость продольной волны, ударная вязкость, твердость, металлы, пониженные температуры*

### **Введение**

При выборе материалов, работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера, возникает необходимость обеспечения оценки их физико-механических характеристик при различных температурах и их изменение в процессе эксплуатации. Однако оценка изменения механических характеристик металлов, особенно при низких температурах, является весьма трудоемкой, а в ряде случаев практически не реализуемой задачей. Это, в свою очередь, требует применения экспресс-методов оценки механических характеристик, в частности, неразрушающими методами контроля.

Одной из ключевых характеристик металла, работающего в условиях пониженных температур, является показатель ударной вязкости, характеризующий работу, затраченную на поглощение энергии удара и вероятность хрупкого разрушения [1-4]. Одним из перспективных методов оценки механических и эксплуатационных характеристик металлов является метод ультразвукового контроля. Метод ультразвукового контроля является одним из самых чувствительных методов анализа структуры ме-

талла и его характеристик в реальном масштабе времени в широком диапазоне температур [5-8]. В работах [4,5,8-10] показана связь скорости ультразвука и механических свойств металлов.

Однако возникает необходимость выявления корреляционных связей характеристик ультразвука, в частности, скорости его распространения, в металлах с физико-механическими характеристиками материала для широкого диапазона пониженных температур, в связи с отсутствием данных зависимостей в литературных источниках [4,5,8-10].

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выступали металлические материалы с различными типами кристаллического строения: ГЦК (12X18H10T и Д16) и ГПУ (BT8), которые, как показали исследования [1], обладают хорошей хладостойкостью и широко применяются при эксплуатации в условиях пониженных температур. Металлы с ОЦК решеткой не рассматриваются вследствие их низкой хладостойкости и ограниченности применения для условий низкотемпературной эксплуатации [1, 3].

Химический состав материалов, выбранных для исследования и режимы их термической обработки показаны ниже:

12X18H10T (%): C – 0,11; Si – 0,7; Mn – 0,16; Ni – 10,2; S – 0,012; P – 0,008; Cr – 18,16; Ti – 0,6 (Закалка 1080 °C).

Д16 (%): Si – 0,27; Mn – 0,59; Ni – 0,08; Cr – 0,02; Cu – 4,15; Fe – 0,03; Ti – 0,02; Al – 92,6; Mg – 1,4 (Закалка 500°C, естественное старение).

BT8 (%): C – 0,02; Si – 0,32; Fe – 0,01; Ti – 89,35; Al – 6,6; Mo – 3,41; Zr – 0,18 (Двойной отжиг 920°C 2ч + 570°C 1ч).

Для оценки ударной вязкости материалов были проведены испытания на ударный изгиб образцов типа Шарпи с V-образным концентратором и рабочим сечением 8x10 мм. Изготовление образцов и их испытание проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454.

Твердость металлов измеряли с использованием твердомера ТШ-2М. В качестве индентора использовался шарик диаметром 2,5 мм., после чего по диаметру отпечатка определялась твердость металла по шкале НВ.

Для акустических измерений применяли измерительно-вычислительный акустический комплекс (ИВК) «Астрон» [7]. Прибор позволяет измерять время распространения упругих импульсов с точностью  $10^{-9}$  с и способен работать с различными типами упругих волн. В работе был использован датчик продольных волн. Номинальная частота датчиков – 5 МГц. В качестве контактной жидкости применяли глицерин, уровень вязкости которого при пониженных температурах обеспечивает его работоспособность.

В работе использовали импульсное возбуждение и прием упругих импульсов. В качестве опорного импульса использовали первый отраженный импульс, относительно которого проводили измерение скорости путем сравнения его характеристик с характеристиками последующих импульсов. Это позволяет учитывать только эффекты, связанные с пройденным путем упругого импульса в контролируемой среде.

В результате анализа определялась скорость распространения ультразвуковой волны в металле на образцах, изготовленных для испытаний на ударный изгиб.

Образцы для испытаний охлаждались в специально разработанном устройстве на медной подложке, температура которой регулировалась за счет смеси жидкого азота и спирта, а при необходимости дополнительного нагрева с использованием резистора.

Для регистрации температуры на образце устанавливались датчики температуры контактного типа – Pt100. Данные датчики позволяют измерять температуру в диапазоне от -196°C до +100°C с погрешностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

**Экспериментальные исследования. Анализ экспериментальных исследований.**

На рис. 1 и 2 представлены зависимости твердости и скорости звука в широком диапазоне пониженных температур.

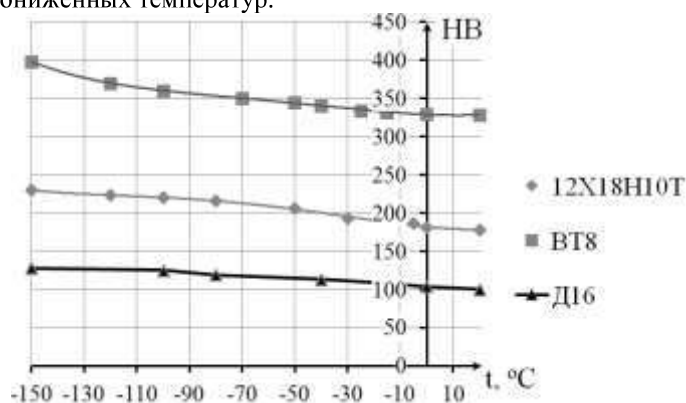
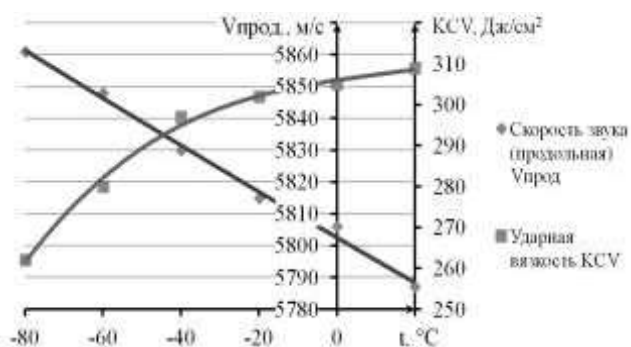
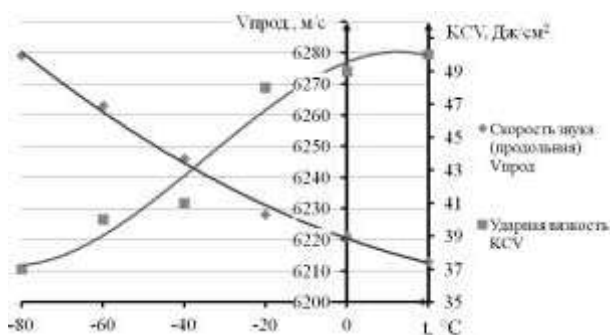


Рис.1. Зависимости твердости металлов от температуры

Как видно из рис. 1, с понижением температуры твердость металлов возрастает, но с разной интенсивностью. Наиболее интенсивное снижение твердости наблюдается для титанового сплава BT8, а наименьшее - для алюминиевого сплава Д16.



а)



б)

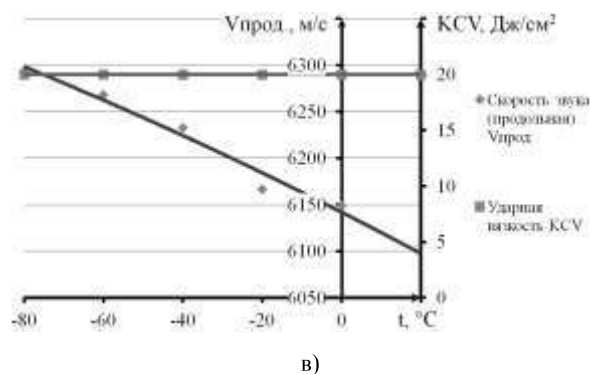
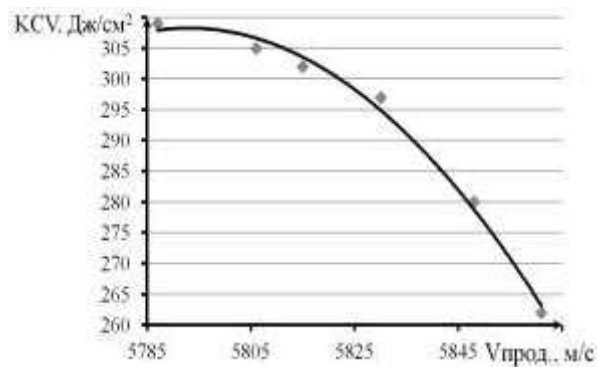


Рис.2. Зависимости скорости звука и величин ударной вязкости при различных температурах для материалов: а) сталь 12Х18Н10Т; б) сплав ВТ8; в) сплав Д16

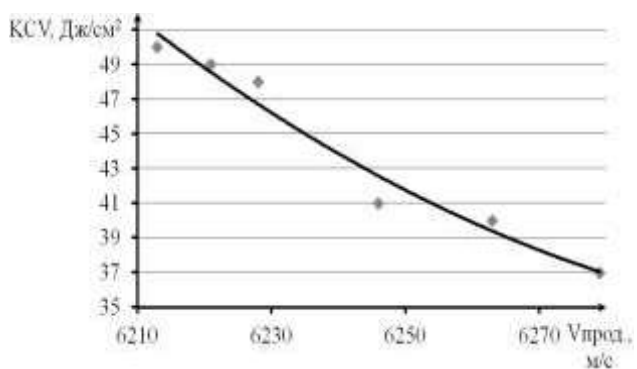
Анализ рис. 1 и 2 показывает, что увеличение твердости металлов с понижением температуры следует связать с ростом их механических свойств и снижением пластичности. Рост скорости звука при понижении температуры, на наш взгляд, объясняется ростом теплопроводности у металлов. Дело в том, что поглощение ультразвука при распространении упругой волны сопровождается необратимым переходом ее энергии в тепло [11]. Поэтому чем выше теплопроводность металла, тем выше скорость звука. В работе [12] показано, что теплопроводность и скорость ее роста при снижении температуры у титанового сплава выше, чем у нержавеющей стали. Алюминиевые сплавы (Д16, АМг3 и АМг6) имеют наибольшую теплопроводность и скорость ее роста с понижением температуры.

Металлы с ОЦК решеткой имеют наименьшую сопротивляемость хрупкому разрушению [1-3]. Но они имеют и наименьшую теплопроводность [12]. Поэтому теплопроводность должна оказывать влияние как на сопротивляемость хрупкому разрушению, так и  $T_{\text{вх}}$ .

По соответствующим зависимостям (рис. 2) построена зависимость скорости звука от ударной вязкости для стали 12Х18Н10Т и сплава ВТ8. Для сплава Д16 данная зависимость не представлена, т.к. ударная вязкость данного материала не изменяется с понижением температуры. Данная зависимость, как видно из рис. 3, хорошо аппроксимируется полиномом второй степени.



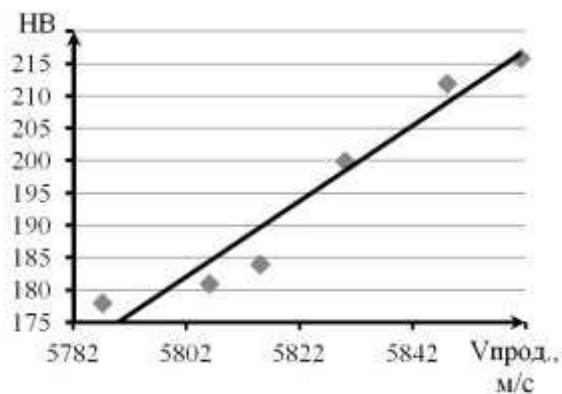
а)



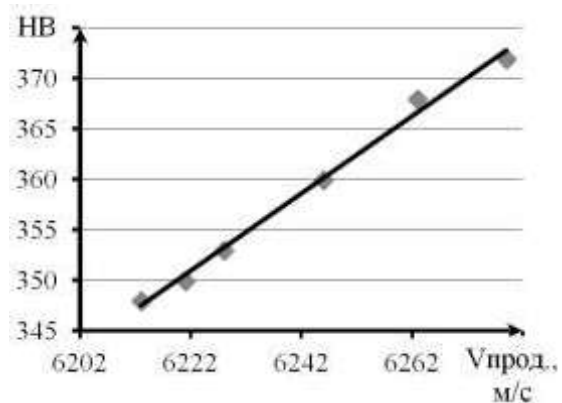
б)

Рис.3. Зависимости скорости звука от ударной вязкости для стали 12Х18Н10Т (а) и сплава ВТ8 (б)

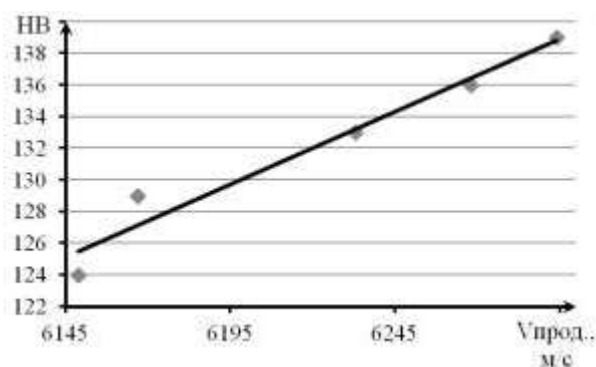
По полученным значениям твердости (рис. 1) при разных температурах испытания и соответствующих значений скорости звука построены зависимости скорости звука от твердости для исследуемых материалов (рис. 4).



а)



б)



в)

Рис.4. Зависимости скорости звука от твердости для металлов:

а) сталь 12X18Н10Т; б) сплав ВТ8; в) сплав Д16

Полученные зависимости (рис. 3, 4) подтверждают связь ударной вязкости металлов и их твердости со скоростью распространения звука в металле, и коррелируют с результатами, полученными ранее в ходе исследований [5,6,8-10].

Таким образом, по значениям скорости распространения звука в металлах можно прогнозировать уровень ее ударной вязкости, а также твердость при низких температурах, а, следовательно, склонность к хрупкому разрушению конструкций и механизмов.

#### Благодарности

Исследование выполнено по гранту РФФИ № 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».

#### Список литературы:

- Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения / Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С. и др. // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. - 2019. - Том 22. - №3. - С. 48-55. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55
- Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение, 1975.- 206 с.
- О природе низкотемпературной хрупкости сталей с ОЦК – структурой / Панин В.Е., Дерягина Л.С., Лемешев Н.М., Корзников А.В., Панин А.В., Казаченок М.С. // Физическая мезомеханика. - 2013. - №6. - С. 5-15.
- L. Tong, Low temperature impact toughness of high strength structural steel / L. Tong, L. Niu, S.Jing, L. Ai, X. Zhao // Thin-Walled Structures. – 2018. – Is. 132. – Pp. 410-420 DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.009.
- Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996, - 184 с.
- Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / Полетика И.М., Егорова Н.М., Куликова О.А. Зуев Л.Б. // Журнал технической физики. - 2001. - Т.71. - №3. - С.37-40.
- Акустический метод оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях / Углов А.Л., Хлыбов А.А., Пичков С.Н., Шишулин Д.Н.// Дефектоскопия. - 2016. - № 2. - С. 3-10.
- P. Nanekar, Characterization of material properties by ultrasonic / P. Nanekar, B. K. Shah// BARC Newsletter. – 2003. –Is.249. – Pp. 25-38.
- H. Carreón, Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints / H. Carreón, G. Barrera, C. Natividad, M. Salazar, A. Contreras // Nondestructive Testing And Evaluation. – 2015. – Vol. 31. – Is. 2. – Pp. 1-12. DOI: 10.1080/10589759.2015.1074231.

10. F. Uzun, A. N. Bilge "Application of ultrasonic waves in measurement of hardness of welded carbon steels" Defence Technology, 2015. – Vol. 11. – Is. 3. – Pp. 255-261. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.05.002>

11. Ларионов В.П., Кузьмин В.Р., Слепцов О.И. и др. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы.- Новосибирск: Наука, 2005.- 290 с.

12. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.-352 с.

## RESEARCH OF THE RELATIONSHIP OF THE RATE OF ULTRASOUND IN METALS WITH THEIR IMPACT VISCOSITY AND HARDNESS UNDER THE CONDITIONS OF REDUCED TEMPERATURES

**Alexander A. Khlybov**

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

**Yuri G. Kabaldin**

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

**Maksim S. Anosov**

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

**Dmitry A. Ryabov**

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

**Yuri I. Matveev**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The paper presents the results of the study of the relationship between the velocity of propagation of longitudinal waves in a metal with the values of impact toughness and hardness in a wide range of low temperatures. It's been found that with a decrease of temperature, an increase of hardness, a decrease of impact toughness and an increase of the velocity of propagation of a longitudinal wave in the studied metals are observed, and the velocity of propagation of a longitudinal wave has a close correlation with the characteristics under consideration. An increase of the speed of sound with decreasing temperature, in our opinion, is explained by an increase of the thermal conductivity of metals. Thus, by the values of the speed of sound propagation in metals, it is possible to predict the level of its impact toughness, as well as hardness at low temperatures, and, consequently, the tendency to brittle fracture of structures.*

*Keywords: P-wave velocity, impact strength, hardness, metals, low temperatures*

### References:

1. Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Anosov M.S. et al. "Analiz khladostoykosti metallov s razlichnym tipom kristallicheskogo stroyeniya" (Analysis of cold resistance of metals with different types of crystalline structure) Vestnik IZHGTU imeni M.T. Kalashnikova 22.3 (2019): 48-55. DOI: 10.22213 / 2413-1172-2019-3-48-55
2. Novitsky L.A., Kozhevnikov I.G. Teplofizicheskiye svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh. Spravochnik. M.: Mashinostroyeniye, 1975. 206 p.
3. Panin V.E., Derevyagina L.S., Lemeshev N.M., Korznikov A.V., Panin A.V., Kazachenok M.S. O prirode nizkotemperaturnoy khrupkosti staley s OTSK – strukturoy (About the nature of low-temperature brittleness of steels with bcc – structure) Physical mesomechanics 6 (2013): 5-15.
4. L. Tong, L. Niu, S.Jing, L. Ai, X. Zhao "Low temperature impact toughness of high strength structural steel" Thin-Walled Structures, 132 (2018): 410-420 DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.009.
5. Muravyov V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. Skorost' zvuka i struktura staley i splavov. Novosibirsk: Nauka, 1996. 184 p.
6. Poletika I.M., Egorova N.M., Kulikova O.A., Zuev L.B. Ob ul'trazvukovom kontrole neodnorodnosti mekhanicheskikh svoystv goryachekatanoy stali (On ultrasonic testing of the inhomogeneity of the mechanical properties of hot-rolled steel) Zhurnal tekhnicheskoy fiziki 71.3 (2001): 37-40.

7. Uglov A.L., Khlybov A.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N. Akusticheskiy metod otsenki povrezhdennosti austenitnoy stali pri termopul'satsiyakh (Acoustic method for assessing the damage of austenitic steel during thermal pulsations) Defectoscopy 2 (2016): 3-10.
8. P. Nanekar , B. K. Shah "Characterization of material properties by ultrasonic" BARC Newsletter, 249 (2003): 25-38.
9. H. Carreón, G. Barrera, C. Natividad, M. Salazar, A. Contreras "Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints" Nondestructive Testing And Evaluation, 31(2) (2015): 1-12 DOI: 10.1080/10589759.2015.1074231.
10. F. Uzun, A. N. Bilge "Application of ultrasonic waves in measurement of hardness of welded carbon steels" Defence Technology, 11 (3) (2015): 255-261. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.05.002>
11. Larionov V.P., Kuzmin V.R., Slepsov O.I. and others. Khladostoykost' materialov i elementov konstruksiy: rezul'taty i perspektivy.- Novosibirsk: Nauka, 2005. 290 p.
12. Carslow G., Jaeger D. Teploprovodnost' tverdykh tel. M.: Nauka, 1964. 352 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Хлыбов Александр Анатольевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение, технология материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: hlybov\_52@mail.ru

**Кабалдин Юрий Георгиевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: uru.40@mail.ru

**Аносов Максим Сергеевич**, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: anosov-maksim@list.ru

**Рябов Дмитрий Александрович**, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: ryabovdm1996@gmail.com

**Матвеев Юрий Иванович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатации судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveeveseu@mail.ru

**Alexander 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 named after R.E. Alekseev, 603950

**Yuri G. Kabaldin**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

**Maksim S. Anosov**, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

**Dmitry A. Ryabov**, Assistant of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, 603950

**Yuri I. Matveev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plants, Volga State University of Water Transport, 603951

Статья поступила в редакцию 01.11.2020 г.