

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-63-69  
УДК 620.17:669.018.295

С.Д. Кноринг, В.В. Платонов , Н.Г. Попов, В.М. Шапошников   
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## СОПОСТАВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ 38ХНЗМФА И 40ХН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

**Объект и цель научной работы.** Объектом работы являются сталь марки 38ХНЗМФА, планируемая к использованию при изготовлении гребных валов ледокола-лидера проекта 10510, и менее прочная сталь марки 40ХН, используемая при изготовлении гребных валов ледоколов более низких ледовых категорий и меньшей мощности. Цель исследования состоит в сопоставительной оценке усталостной прочности указанных марок стали.



**Материалы и методы.** Исследования характеристик усталостной прочности сталей выполнялись путем проведения циклических испытаний плоских образцов с надрезом на воздухе и цилиндрических образцов в пресной воде.

**Основные результаты.** Показано, что наименьшие характеристики усталостной прочности соответствуют условиям циклического нагружения образцов с острым концентратором на воздухе. Но даже в этих условиях усталостная прочность стали 38ХНЗМФА лучше, чем у стали 40ХН. В условиях испытаний в пресной воде гладких образцов сталь 38ХНЗМФА также обладает явным преимуществом над сталью 40ХН.

**Заключение.** Выполненные исследования показали, что характеристики усталостной прочности стали 38ХНЗМФА на воздухе и в коррозионной среде превышают аналогичные характеристики стали 40ХН. Чувствительность стали 38ХНЗМФА к условиям среды и концентрации напряжений оказалась выше, чем у стали 40ХН.

**Ключевые слова:** высокопрочные стали, усталостные характеристики, циклические испытания, предел выносливости.  
*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-63-69  
UDC 620.17:669.018.295

S. Knoring, V. Platonov , N. Popov, V. Shaposhnikov   
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## COMPARISON OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF 38ХНЗМФА AND 40ХН HIGH-TENSILE-STRENGTH STEELS BASED ON TEST RESULTS

**Object and purpose of research.** The object of work is steel “38ХНЗМФА”, planned for use in the propeller shafts manufacture of the lead-ship (project 10510), and less strong steel “40ХН”, used in the propeller shafts manufacture for icebreakers of lower ice categories and lower power. The purpose of the study is to compare the fatigue strength of these steel grades.

**Materials and methods.** Investigations of the fatigue strength characteristics of steels were carried out by cyclic tests of flat notched specimens in air and cylindrical specimens in fresh water.

**Main results.** It is shown that lowest fatigue strength results correspond to external cyclic loading of specimens with stress concentrator (notch). But even in these conditions, fatigue strength of 38ХНЗМФА steel is better than that of 40ХН steel. As for the tests of smooth samples in fresh water, 38ХНЗМФА steel also has a clear advantage over 40ХН steel.

**Conclusion.** The studies have shown that fatigue strength characteristics of 38ХНЗМФА steel in the air and in corrosive environment exceed those of 40ХН steel. Environmental sensitivity and stress concentration of 38ХНЗМФА steel turned out to be higher than for 40ХН steel.

**Key words:** high-strength steels, fatigue characteristics, cyclic tests, fatigue endurance.  
*The authors declare no conflicts of interest.*

---

*Для цитирования:* Кноринг С.Д., Платонов В.В., Попов Н.Г., Шапошников В.М. Сопоставление усталостных характеристик высокопрочных сталей 38ХНЗМФА и 40ХН по результатам испытаний. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 4(394): 63–69.

*For citations:* Knoring S., Platonov V., Popov N., Shaposhnikov V. Comparison of fatigue characteristics of 38ХНЗМФА and 40ХН high-tensile-strength steels based on test results. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 4(394): 63–69 (in Russian).

## Введение

### Introduction

Действующие требования Правил РМРС [1] к определению минимальных диаметров валов предусматривают возможность снижения расчетного диаметра, изготовленного из стали с временным сопротивлением более 400 МПа, путем введения редуцированного коэффициента

$$d = d_{\text{расч}} \sqrt[3]{\frac{560}{R_{\text{мв}} + 160}}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{расч}}$  – расчетный диаметр вала;  $R_{\text{мв}}$  – временное сопротивление материала вала. Однако для гребных валов в независимости от категории прочности стали и ее усталостных характеристик временное сопротивление  $R_{\text{мв}}$  в формуле (1) не может приниматься более 600 МПа. Поэтому целью проведения испытаний являлась сопоставительная оценка усталостной прочности стали марки 38ХНЗМФА с временным сопротивлением 950–1000 МПа, планируемой к использованию при изготовлении гребных валов ледокола-лидера, и менее прочной стали марки 40ХН с временным сопротивлением 600–700 МПа.

Для проведения исследования была выбрана заготовка высоколегированной стали марки 38ХНЗМФА, полученная из прибыльной части отливки и поковки вала диаметром  $\varnothing 925$  мм и длиной около 17 000 мм после термообработки и механической обработки. В качестве предварительной термообработки принят изотермический отжиг слитков, в качестве основной термообработки – двойная закалка через воду в масло с высоким отпуском. Предполагается, что после окончательной термической обработки свойства стали должны соответствовать категории прочности КТ80 по ГОСТ [2].

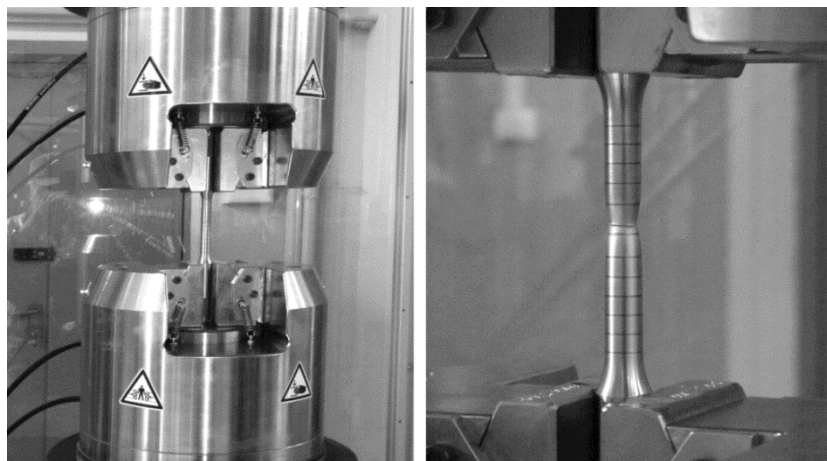
В качестве варианта для сопоставления выбрана близкая по содержанию углерода хромоникелевая сталь 40ХН. Для проведения испытаний заготовка была вырезана вдоль оси поковки вала диаметром 290 мм. Глубина вырезки карточки в соответствии с требованиями Правил РМРС [3] составила 72 мм (1/4 диаметра). Так же, как и для стали 38ХНЗМФА, механические свойства стали 40ХН должны удовлетворять категории прочности КТ40 по ГОСТ [2].

Согласно ГОСТ [2], при выборе сталей для конструкции вала необходимо подтвердить ее механические и достаточные усталостные свойства. Поэтому перед исследованием усталостных свойств сталей 38ХНЗМФА и 40ХН была выполнена проверка их механических свойств на цилиндрических образцах. Комплексная проверка характеристик усталостной прочности рассмотренных сталей с целью определения достаточности их свойств для длительной эксплуатации в условиях переменных нагрузок валопровода ледокола производилась в два этапа: на первом были проведены циклические испытания плоских образцов с надрезом на воздухе, а на втором – циклические испытания цилиндрических образцов в пресной воде.

## Проверка механических свойств

### Mechanical properties check

Проверка механических свойств сталей на соответствие категориям прочности по ГОСТ [2] производилась на цилиндрических образцах с номинальным диаметром рабочей части 8 мм. Размеры и испытания образцов соответствовали требованиям ГОСТ [4]. На рис. 1 показаны образцы в захватах машины при испытаниях механических свойств.



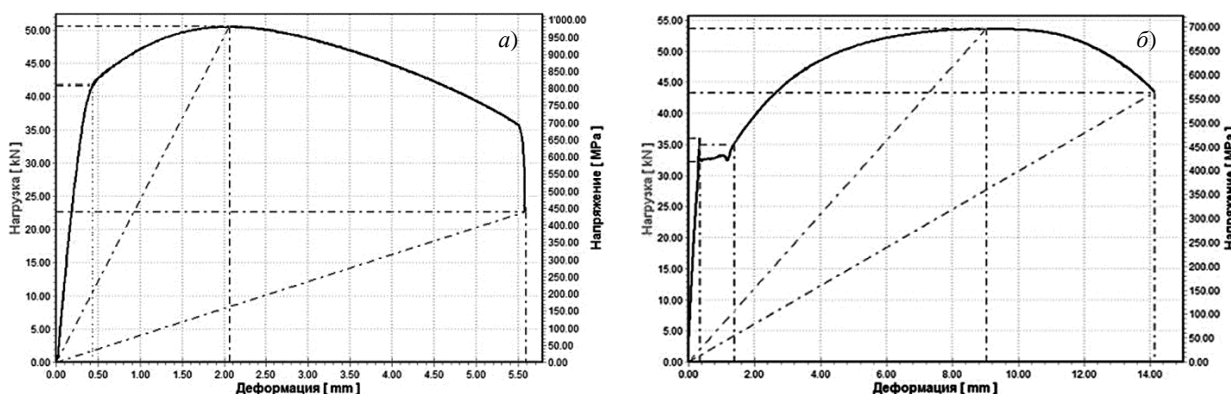
**Рис. 1.** Испытание механических свойств материалов валов на соответствие требованиям категорий прочности по ГОСТ

**Fig. 1.** Shaft materials mechanical tests for compliance with the requirements of strength categories according to GOST

**Таблица 1.** Механические характеристики сталей для изготовления судовых валов

**Table 1.** Mechanical characteristics of steels for the ship shafts manufacture

Марка стали	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Категория прочности по ГОСТ [2]
38ХНЗМФА	809	981	16,1	КТ80
40ХН	416	701	17,2	КТ40



**Рис. 2.** Диаграммы деформирования: а) сталь 38ХНЗМФА; б) сталь 40ХН

**Fig. 2.** Deformation diagrams: a) 38ХНЗМФА steel; b) 40ХН steel

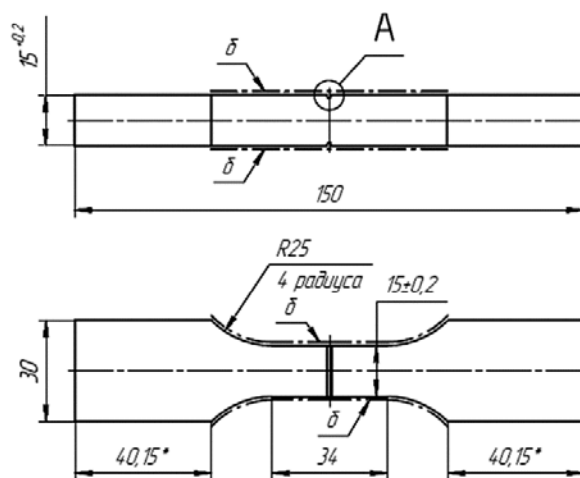
Полученные при испытании образцов механические характеристики материалов для судовых валов представлены в табл. 1, а диаграммы деформирования сталей – на рис. 2. Результаты испытаний подтвердили высокие механические свойства материалов и их соответствие требованиям ГОСТ [2] к категориям прочности для судовых валов.

### Усталостные испытания плоских образцов с надрезом

Fatigue tests of flat notched specimens

На первом этапе выполнялось исследование усталостной прочности сталей 38ХНЗМФА и 40ХН на плоских образцах с надрезом на воздухе. Этот вид испытаний считается наиболее жестким для сталей, используемых для изготовления валов [5]. Образцы соответствуют образцу типа VI по ГОСТ [6]. Учитывая сопоставительный характер испытаний и малую величину реально возможного поверхностного дефекта судового вала, глубина надреза была задана не более  $1 \pm 0,5$  мм. Форма поперечного сечения рабочей части – прямоугольная с двумя симметричными боковыми V-образными надрезами с радиусом скругления при вершине надреза 0,5 мм (нетто-сечение по толщине рабочей части – 12,8 мм) (рис. 3).

Всего было испытано 8 образцов – по четыре из каждого типа стали. Нагружение выполнялось с частотой 95 Гц до разрушения, но не более  $2 \cdot 10^7$  циклов. Коэффициент асимметрии циклической нагрузки (отношение максимального напряжения цикла к минимальному) равнялся  $R = 0,1$ . Останов-



**Рис. 3.** Образцы для усталостных испытаний на воздухе по ГОСТ

**Fig. 3.** Samples for outside fatigue tests in accordance with GOST

**Таблица 2.** Результаты усталостных испытаний на воздухе плоских образцов с боковыми V-образными надрезами

**Table 2.** Results of outside fatigue tests for flat specimens with side V-notches

Номер образца	Размеры поперечного сечения, мм	Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup>	Максимальное усилие цикла, кН	Максимальное напряжение цикла, МПа	Количество циклов до разрушения
<b>Сталь 38ХНЗМФА</b>					
1	15,2×12,8	1,95	75,0	385	1,83·10 <sup>5</sup>
2	15,1×12,8	1,93	45,0	233	2,00·10 <sup>7</sup> без разрушения
	дополнительное нагружение		75,0	389	1,59·10 <sup>5</sup>
3	15,2×12,8	1,95	57,0	292	1,00·10 <sup>7</sup>
4	15,2×12,8	1,95	66,0	338	1,06·10 <sup>6</sup>
<b>Сталь 40ХН</b>					
1	15,2×12,8	1,95	75,0	385	5,80·10 <sup>4</sup>
2	15,2×12,8	1,95	45,0	231	2,00·10 <sup>7</sup> без разрушения
	дополнительное нагружение		75,0	385	5,83·10 <sup>4</sup>
3	15,2×12,8	1,95	57,0	292	4,08·10 <sup>5</sup>
4	15,2×12,8	1,95	47,0	241	1,21·10 <sup>6</sup>

ка машины происходила автоматически либо по достижении требуемого количества циклов нагружения, либо при заранее заданном в системе управления машиной падении жесткости образца (вызванном образованием усталостной трещины). Если на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов нагружения разрушение не достигалось, то образец подвергался дополнитель-

ному усталостному нагружению до разрушения при нагрузке, увеличенной вдвое.

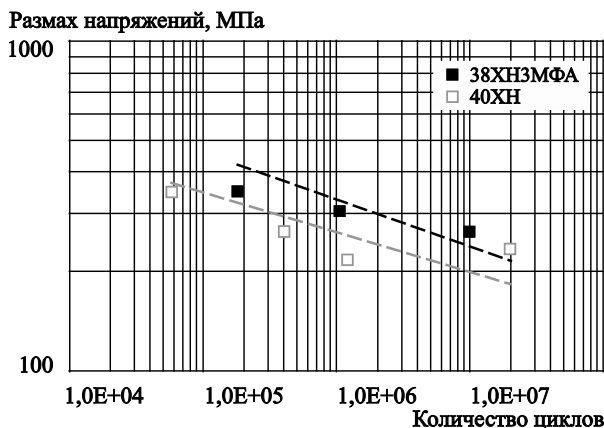
Результаты усталостных испытаний сталей приведены в табл. 2. На рис. 4 показаны усталостные кривые в двойных логарифмических координатах, построенные по результатам испытаний.

### Усталостные испытания гладких цилиндрических образцов в пресной воде

Fatigue tests of smooth cylindrical specimens in fresh water

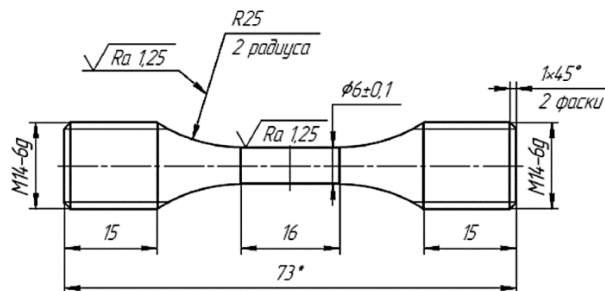
На втором этапе исследований усталостной прочности сталей 38ХНЗМФА и 40ХН, используемых при изготовлении валов, решалась задача получения усталостных характеристик материалов в пресной воде, где предполагается дальнейшая длительная работа вала. Испытания проводились на гладких цилиндрических образцах: рабочая часть образцов имеет длину 16 мм и диаметр 6 мм; концевые захватные части – длиной 15 мм с резьбой М14. Номинальная площадь сечения рабочей части – 28,3 мм<sup>2</sup>. Чертеж образца показан на рис. 5.

Всего было испытано 14 образцов – по семь из каждого типа стали. Испытательная нагрузка образцов – циклическое растяжение с частотой 67 Гц



**Рис. 4.** Усталостные кривые сталей 38ХНЗМФА и 40ХН, построенные по результатам испытаний на воздухе плоских образцов с надрезом

**Fig. 4.** Fatigue curves of 38ХНЗМФА and 40ХН steels as per the results of flat notched specimens tests in the air



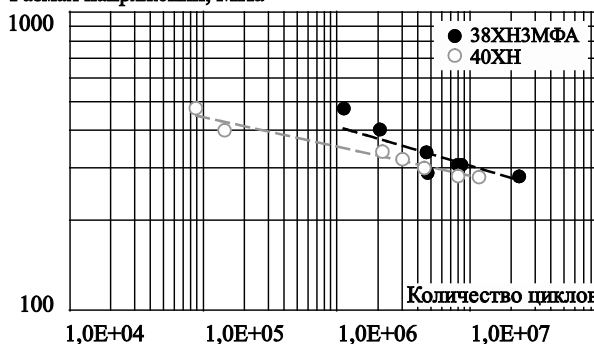
**Рис. 5.** Чертеж гладких цилиндрических образцов для усталостных испытаний сталей 38ХНЗМФА и 40ХН в пресной воде

**Fig. 5.** Drawing of smooth cylindrical specimens for fatigue tests of 38ХНЗМФА and 40ХН steels in fresh water

и коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0,1$ . Среда испытаний – пресная вода.

В табл. 3 приведены результаты испытаний усталостной прочности сталей, а на рис. 6 – усталостные кривые в двойных логарифмических координатах, построенные по результатам испытаний гладких цилиндрических образцов в пресной воде.

**Размах напряжений, МПа**



**Рис. 6.** Усталостные кривые сталей 38ХНЗМФА и 40ХН, построенные по результатам испытаний гладких цилиндрических образцов в пресной воде

**Fig. 6.** Fatigue curves of 38ХНЗМФА and 40ХН steels as per the test results for smooth cylindrical specimens in fresh water

## Основные выводы по результатам испытаний

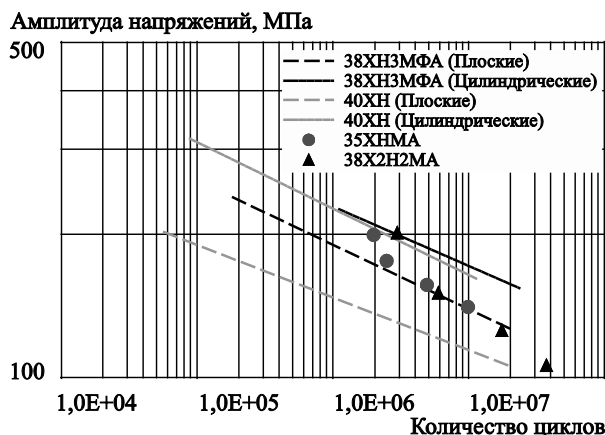
Key findings from test results

Выполненные исследования показали, что характеристики усталостной прочности стали 38ХНЗМФА как на воздухе, так и в коррозионной среде превы-

**Таблица 3.** Результаты усталостных испытаний гладких цилиндрических образцов в пресной воде

**Table 3.** Results of fatigue tests of smooth cylindrical specimens in fresh water

Номер образца	Размеры поперечного сечения, мм	Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup>	Максимальное усилие цикла, кН	Максимальное напряжение цикла, МПа	Количество циклов до разрушения
<b>Сталь 38ХНЗМФА</b>					
1	6,0	0,283	12,5	444	$2,09 \cdot 10^6$
2	6,0	0,283	8,8	312	$2,36 \cdot 10^7$ без разрушения
3	6,0	0,283	15,0	531	$1,12 \cdot 10^6$
4	6,0	0,283	10,8	378	$4,71 \cdot 10^6$
5	6,0	0,283	9,5	338	$8,40 \cdot 10^6$
6	6,0	0,283	9,5	338	$8,80 \cdot 10^6$
7	6,0	0,283	9,1	322	$4,80 \cdot 10^6$
<b>Сталь 40ХН</b>					
1	6,0	0,283	12,6	448	$1,43 \cdot 10^5$
2	6,0	0,283	8,8	311	$1,16 \cdot 10^7$ без разрушения
3	6,0	0,283	15,0	531	$8,83 \cdot 10^4$
4	6,0	0,283	10,7	378	$2,23 \cdot 10^6$
5	6,0	0,283	9,5	336	$4,57 \cdot 10^6$
6	6,0	0,283	11,5	406	$8,20 \cdot 10^6$
7	6,0	0,283	9,1	322	$3,14 \cdot 10^6$

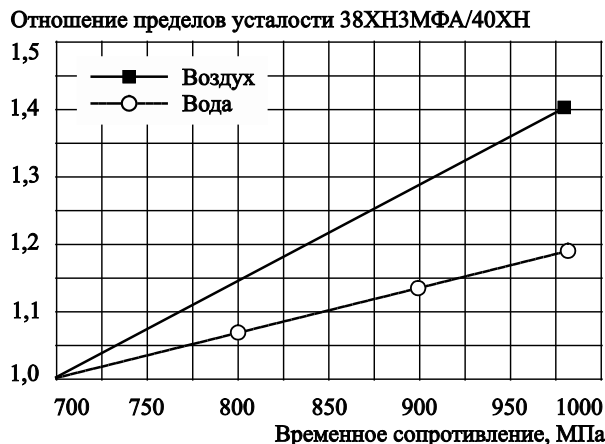


**Рис. 7.** Усталостные кривые сталей 38ХНЗМФА и 40ХН, построенные по результатам испытаний

**Fig. 7.** Fatigue curves of 38ХНЗМФА and 40ХН steels: test data

шают аналогичные характеристики стали 40ХН. Чувствительность стали 38ХНЗМФА к условиям среды и концентрации напряжений также оказалась выше, чем у стали 40ХН.

На рис. 7 показаны все результаты усталостных испытаний, приведенные к симметричному циклу  $R = -1$  с использованием коррекции средних напряжений по Гудману [7]. Отдельными точками пред-



**Рис. 8.** Соотношения пределов усталости при  $R = -1$  в зависимости от пределов прочности сталей 38ХНЗМФА и 40ХН, построенные по результатам испытаний гладких цилиндрических образцов в пресной воде

**Fig. 8.** Fatigue limits at  $R = -1$  versus ultimate strength: comparison of 38ХНЗМФА and 40ХН steels, (data for smooth cylindrical specimens tested in fresh water)

ставлены результаты циклических испытаний близких по углероду и химическому составу сталей того же класса 38Х2Н2МА и 35ХНМА в морской воде, полученных ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» [5].

В результатах испытаний также обращает на себя внимание экспериментально обнаруженный факт зависимости предела усталости при симметричном растяжении-сжатии цилиндрических гладких образцов сталей 38ХНЗМФА и 40ХН в воде от временного сопротивления материала. Правила РМРС [3] регламентируют прямую пропорциональность пределов усталости при симметричном цикле нагружения на воздухе (кривая «воздух», рис. 8):

$$\frac{\sigma_{-1}(38\text{ХНЗМФА})}{\sigma_{-1}(40\text{ХН})} \approx \frac{\sigma_b(38\text{ХНЗМФА})}{\sigma_b(40\text{ХН})} \approx 1,4.$$

Однако результаты испытаний показали, что наличие пресной воды как коррозионной среды, которая характерна для работы гребного вала, существенно корректирует эту взаимосвязь, и тогда зависимость имеет уже иной вид (кривая «вода», рис. 8):

$$\frac{\sigma_{-1}(38\text{ХНЗМФА})}{\sigma_{-1}(40\text{ХН})} \approx \sqrt{\frac{\sigma_b(38\text{ХНЗМФА})}{\sigma_b(40\text{ХН})}} \approx 1,18.$$

Последняя формула более характерна для оценок усталостной прочности и работоспособности материалов корпусных судовых конструкций [8].

Таким образом, выполненные исследования показали, что усталостные характеристики стали 38ХНЗМФА, планируемой к использованию при изготовлении гребных валов ледокола-лидера, и на воздухе с концентратором, и в коррозионной среде превышают аналогичные характеристики стали 40ХН. Поэтому использование фактического временного сопротивления в редуцированном коэффициенте формулы (1) позволяет учесть усталостные характеристики стали 38ХНЗМФА и обоснованно уменьшить диаметр и, соответственно, массогабаритные характеристики гребных валов.

## Список использованной литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов (НД № 2-020101-124). Ч. VII: Механические установки. Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2020. 106 с.
2. ГОСТ 8536-79. Заготовки судовых валов и баллеров рулей. Технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 2004. 29 с.

3. Правила классификации и постройки морских судов (НД № 2-020101-124). Ч. XIII: Материалы. Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2020. 272 с.
4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Москва: Стандартинформ, 2008. 22 с.
5. Материалы для судостроения и морской техники: [в 2-х т.]. Т. 1. Санкт-Петербург: Професионал, 2009. 775 с.
6. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Москва: Стандартинформ, 2005. 25 с.
7. DNVGL-CG-0041. Ice strengthening of propulsion machinery and hull appendages: Class guideline. Hamburg: DNV GL, 2020. 95 p.
8. *Бойцов Г.В., Кноринг С.Д.* Прочность и работоспособность корпусных конструкций. Ленинград: Судостроение, 1972. 264 с.
8. *G. Boytsov, S. Knoring.* Strength and performance of hull structures. Leningrad: Shipbuilding, 1972. 264 p. (in Russian).

## References

1. Rules for Classification & Construction of Sea-Going Ships (ND No. 2-020101-124). Part VII: Machinery Installations. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2020. 106 p. (in Russian).
2. GOST 8536-79. Ingots for marine shafts and rudder stocks. Technical conditions. Moscow: Publishing house of standards, 2004. 29 p. (in Russian).
3. Rules for Classification & Construction of Sea-Going Ships (ND No. 2-020101-124). Part XIII: Materials. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2020. 272 p. (in Russian).
4. GOST 1497-84. Metals. Tensile test methods. Moscow: Standartinform, 2008. 22 p. (in Russian).
5. Materials for shipbuilding and marine technology: [in 2 volumes]. Vol. 1. St. Petersburg: Professional, 2009. 775 p. (in Russian).
6. GOST 25.502-79. Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods for mechanical testing of metals. Fatigue test methods. Moscow: Standartinform, 2005. 25 p. (in Russian).
7. DNVGL-CG-0041. Ice strengthening of propulsion machinery and hull appendages: Class guideline. Hamburg: DNV GL, 2020. 95 p.

## Сведения об авторах

*Кноринг Семен Давыдович*, к.т.н., старший научный ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-74.

*Платонов Виктор Викторович*, к.ф.-м.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 723-66-07. E-mail: vv\_platonov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9639-0917>.

*Попов Николай Геннадьевич*, старший научный ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-50. E-mail: pong58@mail.ru.

*Шапошников Валерий Михайлович*, к.т.н., начальник отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-10. E-mail: sh.v.m@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1159-8621>.

## About the authors

*Semyon D. Knoring*, Dr. Sci. (Eng.), Senior Research Assistant, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-74.

*Victor V. Platonov*, Cand. Sci. (Phys. & Math.), Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (812) 415-45-73. E-mail: vv\_platonov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9639-0917>.

*Nikolay G. Popov*, Senior Research Assistant, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-50. E-mail: pong58@mail.ru.

*Valery M. Shaposhnikov*, Dr. Sci. (Eng.), Head of Structural Strength and Reliability Division. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-10. E-mail: sh.v.m@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1159-8621>.

Поступила / Received: 18.09.20  
Принята в печать / Accepted: 23.11.20  
© Коллектив авторов, 2020