

УДК 620.178

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Терлыч Станислав Владимирович¹, декан факультета судовождения и судовой энергетики, кандидат технических наук

e-mail: rn6ay@yandex.ru

Несин Даниил Юрьевич², заведующий сектором судовой архитектуры, кандидат технических наук, доцент

e-mail: danielnesin@mail.ru

¹ Херсонская государственная морская академия, Херсон, Россия

² АО «ЦКБ «Коралл», Севастополь, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние выбора модели кривой усталости на коэффициент относительной долговечности. Выполнен сравнительный анализ его систематической погрешности, обусловленной этим выбором для случаев описания ее наклонного участка уравнением Вейбулла, а также степенным и показательным уравнениями. Проведенные расчеты показали, что минимальная погрешность определения коэффициента относительной долговечности имеет место в случае использования показательного уравнения.

Ключевые слова: коэффициент относительной долговечности, предел выносливости, кривая усталости.

THE FATIGUE PARAMETERS OF MARINE MECHANICAL INSTALLATION MATERIALS RELATIONSHIP BETWEEN AND RELATIVE STRENGTH COEFFICIENTS

Stanislav V. Terlych¹, Dean of the Faculty of Navigation and Marine Engineering, Candidate of Technical Sciences

e-mail: rn6ay@yandex.ru

Daniil Y. Nesin², Head of the Ship Architecture Sector, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: danielnesin@mail.ru

¹ Kherson State Maritime Academy, Kherson, Russia

² Joint Stock Company Central Design Bureau «Corall», Sevastopol, Russia

Abstract. The influence of the choice of the fatigue curve model on the coefficient of relative durability is considered. A comparative analysis of its systematic error caused by this choice is made for the cases of describing its inclined section by the Weibull equation, as well as by the

power and exponential equations. The calculations performed showed that the minimum error in determining the coefficient of relative durability occurs when using the exponential equation.

Keywords: coefficient of relative durability, ultimate strength, and fatigue curve.

Введение

При проведении сравнительных испытаний на сопротивление усталости применяют, как правило, ускоренные методы, которые позволяют определить пределы выносливости сравниваемых объектов (образцов, моделей, натуральных деталей). В исследовании было предложено вместо пределов выносливости в качестве характеристик сопротивления усталости, которые сопоставляются, принимать коэффициент относительной долговечности, который является относительной безразмерной величиной. Он может быть определен из выражения:

$$k_Y = \frac{\lg N_2 - \lg N_1}{\lg N_1}, \quad (1)$$

где N_1 и N_2 – долговечности к разрушению, соответствующие двум испытываемым объектам при одинаковом уровне циклической нагрузки σ_{12} . При этом предусматривалось, что сравниваемые объекты внешне идентичны и принадлежат одной партии, а рассеивание величин N_1 и N_2 связано с разницей их прочности (в данном случае – пределом выносливости). Также было принято, что каждому объекту соответствует своя (индивидуальная) кривая усталости (Рисунок 1).

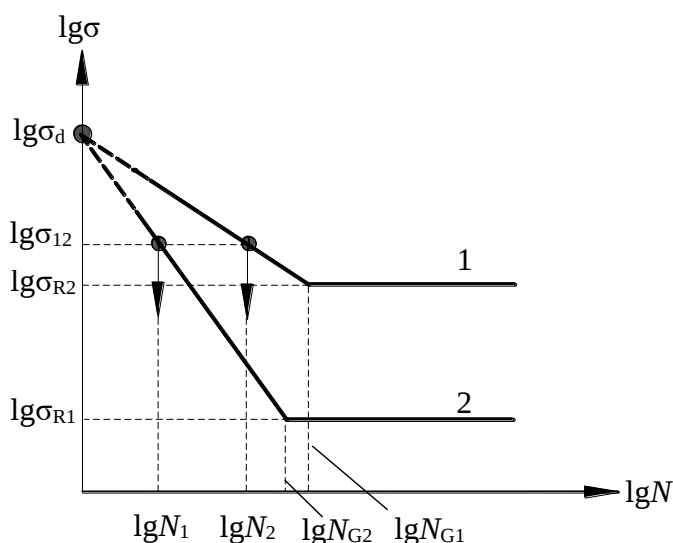


Рисунок 1 – Схема взаимного размещения индивидуальных кривых усталости деталей с разными пределами выносливости в координатах $\lg\sigma$ - $\lg N$

На Рисунке 1 приняты следующие обозначения: σ и N – поточные значения механического напряжения и долговечности к разрушению соответственно; N_{G1} и N_{G2} – долговечности, соответствующие пределам выносливости объектов σ_{R1} и σ_{R2} ; σ_d – напряжение, соответствующее одному циклу напряжения. Стрелки, направленные вниз, указывают на то, что объекты результате испытаний разрушились.

Результаты исследования показали, что в случае использования в качестве модели кривой усталости степенного уравнения, во всём диапазоне многоциклового усталости коэффициент относительной долговечности можно принять как константу для партии

идентичных изделий, включая детали, подвергнутые восстановительным и ремонтным технологическим операциям. Доказательство этого утверждения базируется на допущении, согласно которым кривые 1 и 2, построенные в логарифмических координатах, пересекаются в одной точке – $\lg \sigma_d$, расположенный на оси координат (рис. 1). Кроме того, в качестве доказательной базы использовались корреляционные зависимости между параметрами наклонного участка кривой усталости и пределом выносливости, которые учитывают конструктивные и технологические особенности объектов исследования, а также характеристики их нагружения. Очевидно, что при использовании в качестве уравнения наклонного участка кривой усталости других моделей, коэффициент будет принимать другие значения (при тех же экспериментальных данных), то есть будет зависеть от выбора модели кривой усталости.

Обзор литературы по тематике статьи

В своей монографии [1] профессор Нижегородского университета В.В. Мыльников выявил ранее неизвестную связь между изменением микроструктуры и показателем сопротивления усталости. Получены новые экспериментальные зависимости, позволяющие прогнозировать прочность и долговечность деталей машин и конструкций.

Профессор Московского авиационного института Стрижиус В.Е. в своей статье [2] на основе уравнений нормализованных кривых усталости предложил уравнения для формирования «классических» $S-N$ кривых усталости рассматриваемых образцов при различной асимметрии циклического нагружения, с использованием которых и предлагается выполнять собственно расчетные оценки усталостной долговечности.

В статье [3] группой учёных Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова описаны результаты верификации методики оценки влияния нестационарных термоциклических нагрузок на процессы накопления повреждений в конструкционных материалах оборудования и систем реакторных установок.

В своей кандидатской диссертации [4] Романенко М.Д. выявил основные причины выхода из строя титановых деталей, а именно: усталостное разрушение и высокий износ. Исходя из анализа исследований, по его мнению, подобные проблемы решаются преимущественно методами высокоэнергетического воздействия: плазменной, лазерной, электроискровой, электромеханической и др. обработками. При этом иногда повышение одной характеристики может сопровождаться снижением других показателей, а также появлением пор, трещин, отслоения и т. д.

В тоже время в современной научной и методической литературе нет публикаций по вышеуказанным задачам обеспечения долговечности и усталостной прочности для элементов судовых механических установок.

Задачи исследования

Целью статьи является определение диапазона изменения коэффициента относительной долговечности k_γ в зависимости от уравнения нагружения при использовании в качестве уравнения наклонного участка кривой усталости трёх наиболее распространённых моделей: степенной, показательной и Вейбулла. Это в свою очередь позволит оценить систематические ошибки его определения, связанные с выбором той или иной модели кривой усталости.

Результаты (изложение основного материала)

При ускоренном определении характеристики сопротивления усталости чаще сокращают не длительность испытаний, а количество объектов, что экономично целесообразнее. Но в этих случаях экспериментальных данных не всегда достаточно для



построения кривой усталости, и тогда в качестве информации, которой не хватает, приходится использовать корреляционные зависимости между параметрами наклонных участков этих кривых и пределом выносливости.

Именно такой подход позволяет получить семейство кривых усталости, количество которых будет соответствовать количеству испытываемых объектов. При этом каждый из них можно рассматривать как индивидуальный, так и средневероятностный. Схема возможного взаимного расположения двух кривых усталости в координатах $\lg N$ - σ , одна из которых принята средневероятностная, а другая – индивидуальная, представлена на Рисунке 2.

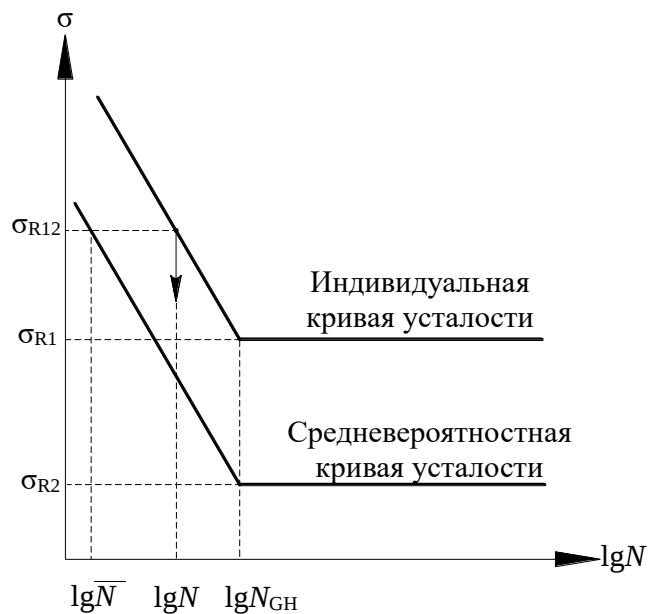


Рисунок 2 – Схема взаиморасположения двух кривых усталости в координатах $\lg N$ - σ

На схеме (Рисунок 2) приняты следующие обозначения: σ_{R1} и σ_{R2} – границы выносливости, N_{GH} – общая абсцисса точки слома этих кривых усталости.

Обе кривые усталости будут описываться показательным уравнением вида:

$$10^{\frac{\sigma}{K}} N = 10^{C_P}, \quad (2)$$

где K и C_P – параметры.

$$k_Y = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N}}, \quad (3)$$

где N и $\bar{N}$ – долговечности к разрушению, относительно напряжению σ_1 .

Уравнение (3), по сути, аналогично (1), что предусматривает пересечение средневероятностной и индивидуальной кривых усталости в одной точке, которая принадлежит оси ординат.

В случае использования в качестве модели кривой усталости уравнения Вейбулла, зависимость между долговечностью к разрушению и напряжением, как функции σ будет иметь вид

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_W} N = 10^{C_W}, \quad (4)$$

где m_W и C_W – параметры.

Экспериментальные исследования показывают, что независимо от предела выносливости параметр m_W изменяется в узком диапазоне и его значения можно принять постоянным, равным 1,0 [5-7]. При этом условии средневероятностная и индивидуальная усталостные кривые будут параллельными (рис. 3), что включает их пересечение и в этом случае формулы (1) и (3) будут несправедливы.

Данное обстоятельство указывает на необходимость привязки соотношения (1) к конкретной модели кривой усталости.

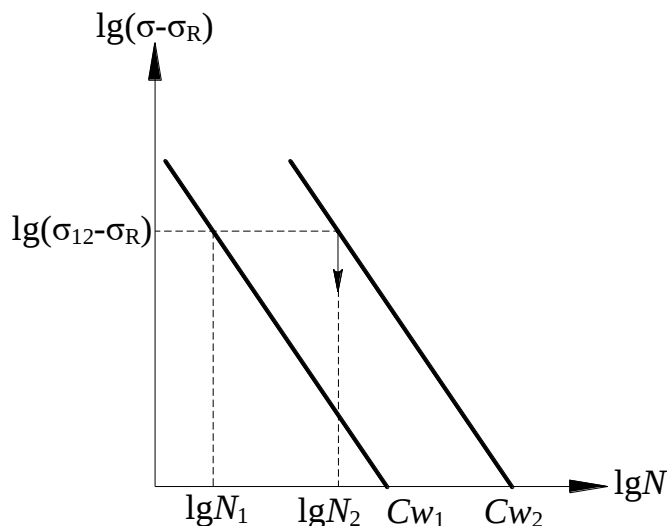


Рисунок 3 – Схема взаиморасположения кривых усталости, выраженных уравнением Вейбулла

Для решения данного уравнения рассмотрены связи между параметрами кривых усталости и пределом выносливости степенного уравнения кривой усталости [3]

$$m_W = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C, \quad (5)$$

$$C_W = F_C(\sigma_R) = \alpha_C (m_C + 1) \lg \sigma_R + \beta_C \quad (6)$$

где $a_C = 0,027$; $b_C = 1,40$; $\alpha_C = 0,997$; $\beta_C = 4,0 + 0,5(2,5 - \lg \sigma_R)^2$, при $\lg \sigma_R \geq 2,5$ (в среднем $\beta_C = 4,25$).

Используя эти зависимости, рассчитано вначале долговечности к разрушению, а затем коэффициенты относительной долговечности для трёх, указанных выше, моделей кривой усталости. Это позволит установить тенденцию изменения данного коэффициента в зависимости от выбора той либо иной модели кривой усталости. Расчёт проведён для одного значения предела выносливости, считая, что установленная тенденция будет стойкой во всём диапазоне значений σ_R .

В расчёте принято $\sigma_R = 200$ МПа (приблизительно среднестатистическое значение диапазона изменения предела выносливости реальных деталей и конструкций судовых механических установок) и определены параметры m_W и C_W степенного уровня кривой усталости по зависимостям (5) и (6). Задавшись рядом значений напряжений, которые превышают предел выносливости, определены соответствующие им долговечности (Таблица 1). В этой же таблице приведены результаты аналогичного расчёта параметров кривой усталости и долговечности к разрушению при $\sigma_R = 220$ МПа (отклонение 10%), а также значения коэффициента относительной долговечности и его погрешности относительно среднего значения.

Для тех же самых исходных данных по аналогии проведены расчёты для показательного уравнения и уравнения Вейбулла. Их параметры определены методом наименьших квадратов по приведённым в Таблице 1 значениям σ и $\lg N$. Результаты представлены в Таблице 2 и Таблице 3.

Расположение кривых усталости, построенных по данным Таблицы 2 и Таблицы 3. изображены соответственно на Рисунке 4 и Рисунке 5.

Расчётные значения отклонений определения коэффициента относительной долговечности в зависимости от уровня нагружения для трёх рассмотренных уравнений кривой усталости представлены на Рисунке 6.

Таблица 1. Результаты расчёта значений $\lg N$, k_γ , и δ_{k_γ} для степенного уравнения кривой усталости

$\sigma_R = 200$ МПа, $m_W = 6,80$; $C_W = 22,15$		$\sigma_R = 220$ МПа, $m_W = 7,34$; $C_W = 22,15$		k_γ	$\delta_{k_\gamma}, \%$
1	2	3	4	5	6
σ , МПа	$\lg N$	σ , МПа	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,048$	
210	6,36	-	-	-	-
220	6,22	-	-	-	-
230	6,09	230	6,39	0,0493	2,63
240	5,96	240	6,26	0,0503	4,87
250	5,84	250	6,13	0,0497	3,45
260	5,73	260	6,00	0,0471	-1,83
270	5,62	270	5,88	0,0462	-3,62
280	5,51	280	5,77	0,0472	-1,69
290	5,41	290	5,66	0,0462	-3,73
300	5,31	300	5,55	0,0452	-5,84

Таблица 2. Результаты расчёта значений $\lg N$, k_γ , и δ_{k_γ} для показательного уравнения кривой усталости

$\sigma_R = 200$ МПа, $m_W = 6,80$; $C_W = 22,15$		$\sigma_R = 220$ МПа, $m_W = 7,34$; $C_W = 22,15$		k_γ	$\delta_{k_\gamma}, \%$
1	2	3	4	5	6
σ , МПа	$\lg N$	σ , МПа	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,048$	
210	6,33	-	-	-	-
220	6,22	-	-	-	-
230	6,10	230	6,38	0,0456	-0,96
240	5,98	240	6,26	0,0458	-0,48
250	5,87	250	6,14	0,0460	-0,02
260	5,75	260	6,01	0,0462	0,54
270	5,63	270	5,89	0,0465	1,08
280	5,51	280	5,77	0,0468	1,65
290	5,40	290	5,65	0,0470	2,24
300	5,28	300	5,53	0,0473	2,85

Таблица 3. Результаты расчёта значений $\lg N$, k_γ , и δ_{k_γ} для кривой усталости уравнения Вейбулла

$\sigma_R = 200$ МПа, $m_W = 6,80$; $C_W = 22,15$		$\sigma_R = 220$ МПа, $m_W = 7,34$; $C_W = 22,15$		k_γ	$\delta_{k_\gamma}, \%$
1	2	3	4	5	6
σ , МПа	$\lg N$	σ , МПа	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,048$	
210	5,86	-	-	-	-
220	5,60	-	-	-	-

230	5,44	230	6,55	0,204	34,21
240	5,34	240	6,25	0,170	11,84
250	5,25	250	6,07	0,156	2,63
260	5,18	260	5,94	0,147	-3,29
270	5,12	270	5,84	0,141	-7,24
280	5,07	280	5,76	0,136	-10,53
290	5,03	290	5,70	0,133	-12,50
300	4,99	300	5,64	0,130	-14,47

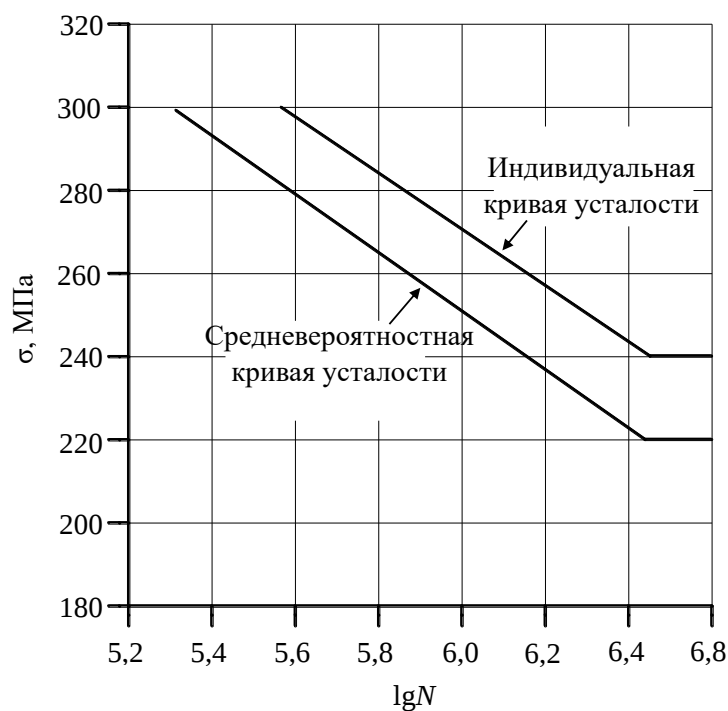


Рисунок 4 – Расположение средневероятностной и индивидуальной кривых усталости в координатах $\lg N$ - σ

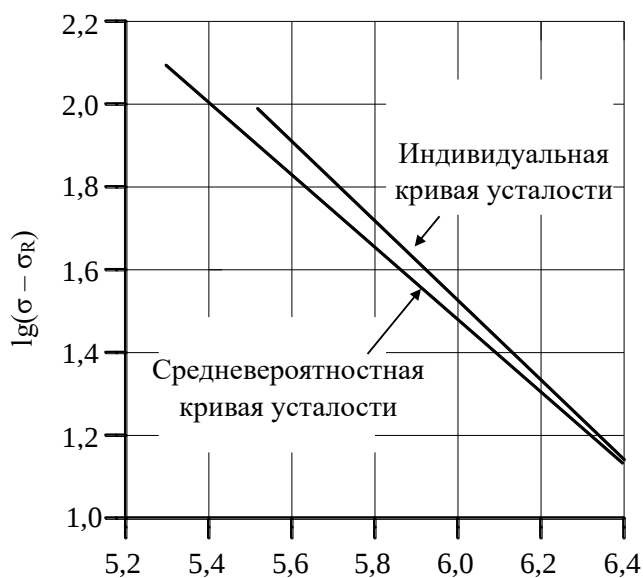


Рисунок 5 – Расположение средневероятностной и индивидуальной кривых усталости в координатах $\lg N$ - $\lg(\sigma - \sigma_R)$

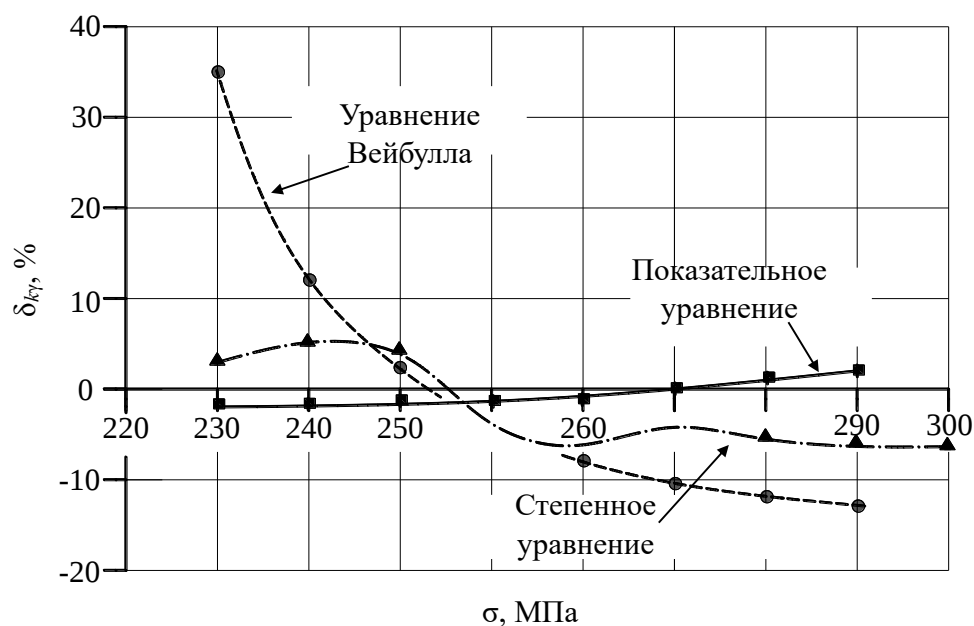


Рисунок 6 – Погрешности определения коэффициента относительной долговечности, обусловленные выбором модели кривой усталости

Расчётные значения отклонений определения коэффициента относительной долговечности в зависимости от уровня нагружения для трёх рассмотренных уравнений кривой усталости представлены на Рисунке 6.

Заключение

1. Проведён расчёт коэффициента относительной долговечности для трёх уравнений кривой усталости. Показано, что систематическая погрешность его определения зависит от уровня нагруженности и выбора модели кривой усталости.
2. Минимальная ошибка его оценки имеет место в случае использования в качестве модели кривой усталости показательного уравнения.

Список литературы:

1. Мыльников В. В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов [Текст]: монография / В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, Д. И. Шетулов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. –177 с. ISBN 978-5-528-00289-7.
2. Стрижиус В. Е. Оценка усталостной долговечности слоистых композитов с использованием нормализованных кривых усталости // Глобальная энергия. 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ustalostnoy-dolgovechnosti-sloistyh-kompozitov-s-ispolzovaniem-normalizovannyh-krivyyh-ustalosti> (дата обращения: 11.12.2025).
3. Бесчеров Д.В., Большухин М.А., Козин А.В., и др. Верификация методики расчета усталостной прочности оборудования реакторных установок при нестационарных термоциклических нагрузках // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2019. №1 (124). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-metodiki-rascheta-ustalostnoy-prochnosti-oborudovaniya-reaktornyh-ustanovok-pri-nestatsionarnyh-termotsiklicheskih> (дата обращения: 01.12.2025).
4. Романенко М.Д. Технологическое обеспечение износостойкости и усталостной прочности титановых сплавов при поверхностном упрочнении высокоэнергетическими

комбинированными воздействиями // Диссертация на соискание степени кандидата технических наук (специальность 2.5.6. Технология машиностроения). – Волгоград: ВГТУ. 2023. – 166 с.

5. Зенин Б.С., Слосман А.И. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий / Учебное пособие. — 2-е изд. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. — 120 с.

6. Effect of laser surface remelting and low temperature aging treatments on microstructures and surface properties of Ti-55511 alloy / Bei He / Surface and Coatings Technology. – 2016. – 316. – P. 104-112. – 10.1016/j.surfcoat.2016.11.097.

7. Chekalova, E. Improving the durability of titanium alloy products through a combined hardening technology / E. Chekalova, A. Zhuravlev // Materials Today: Proceedings. – 2020. – 38 (4). – P. 1804-1809. – 10.1016/j.matpr.2020.08.413.

