



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.2.09

УДК 621.01

## О ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А.В. Кулагин, Е.В. Русских

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 01 декабря 2021 г.  
Одобрена: 30 мая 2022 г.  
Принята к публикации:  
10 июля 2022 г.

#### Ключевые слова:

напряжения, усталость материалов, математическая статистика, параметры распределения прочностных характеристик, статистический анализ напряжений, флуктуационная кинетическая теория прочности, погрешности измерений и вычислений.

### АННОТАЦИЯ

Предлагается обобщенный подход статистической обработки результатов усталостных параметров статической прочности с использованием методов математической статистики и обычной статистики при помощи среднего квадратичного отклонения, начального момента, центрального момента дисперсии и коэффициента вариации ряда распределения физико-механических характеристик материала детали, анализ исследования усталостной прочности на начальном этапе согласно статистической обработке информации, графического оформления ряда распределения напряжений, статистического анализа напряжений, применяется графический подход в виде гистограммы ряда распределения, полигона частот, полигона накопленных частот, сопоставляется подбор теоретических законов распределения напряжений с эмпирическим их подтверждением с более строгой оценкой соответствия законов распределения, которая производится при помощи специальных критериев согласия, например критерия Пирсона, предлагается параллельная проверка правильности выбранного подхода с использованием классических зависимостей сопротивления материалов. Произведена оценка суммарной ошибки в виде методической и непосредственного расхождения теоретических и экспериментальных значений напряжений и температуры физико-механического процесса по экспериментальным и теоретическим нормальным и касательным напряжениям, возникающим в ходе эксплуатации детали, используется температурно-временная суперпозиция в виде функции долговечности флуктуационной кинетической теории прочности, в которой температура как линейная функция может заменяться на удельную энергию, относительную деформацию, нормальные или касательные напряжения и любой другой энергетический и силовой фактор

© ПНИПУ

© Кулагин Андрей Владимирович – к.т.н., доц., e-mail: [podlesnaja7@yandex.ru](mailto:podlesnaja7@yandex.ru), [ID](https://orcid.org/0000-0002-1276-998X): 0000-0002-1276-998X.  
Русских Евгений Валерьевич – ст. преп., e-mail: [rev3@list.ru](mailto:rev3@list.ru), [ID](https://orcid.org/0000-0002-9642-593X): 0000-0002-9642-593X.

Andrej V. Kulagin – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [rekfuby2@rambler.ru](mailto:rekfuby2@rambler.ru), [ID](https://orcid.org/0000-0002-1276-998X): 0000-0002-1276-998X.

Evgeny V. Russkih – Senior Lecturer, e-mail: [rev3@list.ru](mailto:rev3@list.ru), [ID](https://orcid.org/0000-0002-9642-593X): 0000-0002-9642-593X.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## ABOUT PRELIMINARY STATISTICAL PROCESSING OF INFORMATION ON THE STUDY OF FATIGUE STRENGTH OF MACHINE PARTS

A.V. Kulagin, E.V. Russkih

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

### ARTICLE INFO

Received: 01 December 2021  
Approved: 30 May 2022  
Accepted for publication: 10 July 2022

#### Keywords:

stresses, fatigue of materials, mathematical statistics, parameters of the distribution of strength characteristics, statistical stress analysis, fluctuation kinetic theory of strength, measurement and calculation errors.

### ABSTRACT

A generalized approach to statistical processing of the results is proposed fatigue parameters of static strength using methods of mathematical statistics and conventional statistics using the following probabilistic parameters: the mean square deviation, the initial moment, the central moment of dispersion and the coefficient of variation of the distribution series of physical and mechanical characteristics of the part material. Further, the analysis of fatigue strength research at the initial stage is carried out according to statistical information processing, graphical design of a number of stress distributions, statistical stress analysis, a graphical approach is applied in the form of a histogram of a number of distributions, a polygon of frequencies, a polygon of accumulated frequencies, the selection of theoretical stress distribution laws with their empirical confirmation is compared with a more rigorous assessment of the conformity of the distribution laws, which is performed using special consent criteria, for example, the Pearson criterion, a parallel verification of the correctness of the chosen approach using classical dependences of the resistance of materials is proposed. the total error is estimated in the form of a methodological error and a direct discrepancy between the theoretical and experimental values of stresses and temperatures of the physico-mechanical process according to experimental and theoretical normal and tangential stresses arising during the operation of the part as a result of the application of external force factors, a temperature-time superposition is used, in the form of a function of the predicted durability of the fluctuating kinetic theory of strength, in which the temperature, as a linear function, it can be replaced by any energy or force criterion, in particular: specific energy, relative deformation, normal or tangential stresses. The proposed approach requires substantial experimental study on a basic batch of the same type of samples and coordination according to schematized diagrams of the limiting amplitudes of Goodman, Sorensen - Kinasosvili, Kogaev, subject to the conditions of safe operation of parts in the field of low-cycle fatigue. The proposed probabilistic model of statistical processing of fatigue strength can be recommended for solving applied problems of the theories of mechanics of materials, elasticity, plasticity and creep, resistance of materials, structural mechanics

© PNRPU

В сложившихся условиях дефицита инженерных кадров в области оборонной, металлургической, машиностроительной и ряда других отраслей промышленности возникает необходимость оперативно решать исследовательские и конструкторско-технологические вопросы, в частности обеспечение условий усталостной прочности работы деталей машин и механизмов в регламентные сроки, что требует значительных финансовых затрат, в связи большим объемом испытаний и отсутствием единой теоретической базы.

В статье предлагается решение проблемы построения математических моделей на основании рассмотрения вероятностно-статистического подхода для выработки рекомендаций к дальнейшей эксплуатации элемента конструкции в ходе оценки его напряженно-деформированного состояния. Несмотря на наличие множества различных подходов для решения этой проблемы, необходимость в создании новых подходов в решении прикладных задач усталостной прочности деталей машин достаточно актуально.

### 1. Статистическая обработка информации

Статистическая обработка информации, полученной в виде рядов распределения параметров цикла нагружки усталостной прочности, заключается в определении их выборочных характеристик среднего квадра-

тичного отклонения (СКВО), коэффициента вариации, интервальной оценке характеристик генеральной совокупности, графическом оформлении рядов распределения и подборе теоретических законов распределения. Все указанные выше задачи решаются на основе методов математической статистики, куда входят [1–13] условные обозначения и формулы для определения выборочных характеристик:

$x_j$  – наблюдаемое значение случайной величины или величина, принятая для обозначения  $j$ -го разряда, в который попало наблюдаемое значение;

$n_j$  – частота (разрядная частота), число появлений случайной величины  $x_j$ ; в данной серии испытаний;

$n$  – объем ряда:

$x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k$  дискретный ряд распределения случайной величины – величины, принятые для

$n_1, n_2, \dots, n_j, \dots, n_k$  обозначения разрядов, и частоты наблюдаемых значений, попавших в эти разряды.

$$n = \sum_{j=1}^k n_j ;$$

$$p_j = \frac{n_j}{n} ;$$

$$N_j = n_1 + n_2 + \dots + n_j ;$$

$$P_j = p_1 + p_2 + \dots + p_j = \frac{N_j}{n},$$

где  $p_j$  – частота (статистическая вероятность попадания случайной величины напряжений в  $j$ -й разряд);

$N_j$  – накопленная частота;

$P_j$  – накопленная частота.

$$m_h = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k x_j^h n_j = \sum_{j=1}^k x_j^h p_j;$$

$$\mu_h = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (x_j - x)^h n_j = \sum_{j=1}^k (x_j - x)^h p_j,$$

где  $m_h$  – начальный момент ряда распределения;

$\mu_h$  – центральный момент ряда распределения;

$\langle x \rangle$  – выборочное среднее значение (среднее арифметическое);

$\langle x \rangle = m_1$ ;

$S^2$  – дисперсия (выборочная дисперсия)

$$S^2 = \mu_2,$$

где  $S$  – СКВО или основное отклонение (стандарт);

$v$  – коэффициент вариации (мера изменчивости)

$$v = \frac{S}{\langle x \rangle};$$

$C$  – цена разряда;

$\sigma_j$  – амплитуда  $j$ -го разряда в единицах напряжения:

$$\sigma_j = Cx_j.$$

## 2. Графическое оформление ряда распределения напряжений

Гистограмма ряда распределения строится по оси абсцисс: в определенном масштабе откладывают разряды, и на каждом из них, как на основании, строят прямоугольник, площадь которого равна частоте данного разряда (высота прямоугольника есть отношение частоты разряда к его длине). Полная площадь гистограммы равна единице (рис. 1).

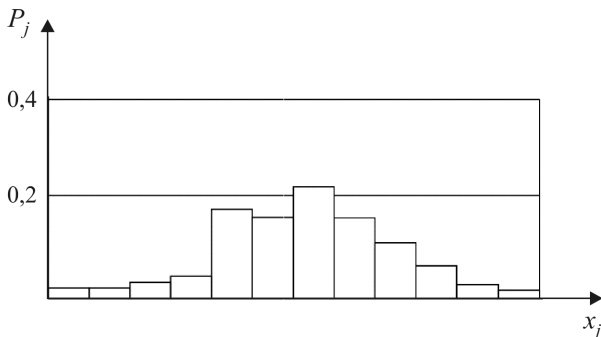


Рис. 1. Гистограмма ряда распределения

Fig. 1. Histogram of the distribution series

Полигон частостей выстраивают в виде середины разрядов на гистограмме, которые соединяются отрезками прямых (рис. 2).

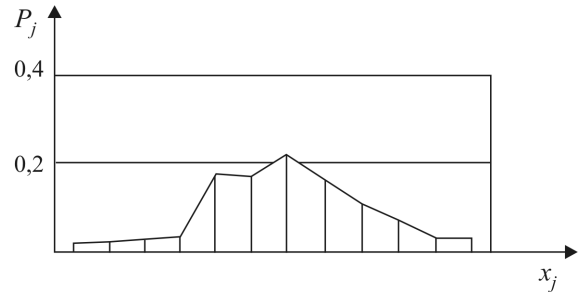


Рис. 2. Полигон частостей

Fig. 2. The polygon of particles

Полигон накопленных частостей характеризуется абсциссой точек, которая считается границей интервала  $x_j + 1/2$ , а ординатой – накопленная частота и последовательность указанных точек соединяется отрезками прямых (рис. 3).

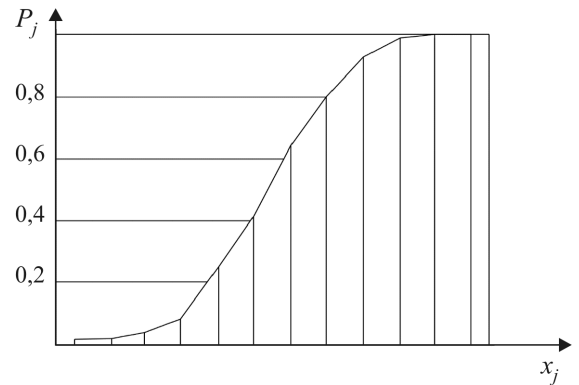


Рис. 3. Полигон накопленных частостей

Fig. 3. Polygon of accumulated particles

3. Подбор теоретических законов распределения напряжений производят путем графического сопоставления эмпирического распределения с некоторыми наиболее близкими по характеру теоретическими законами. Очень важен при этом правильный выбор системы координат, в которой осуществляется сопоставление законов распределения (желательно, чтобы один из них изображался на графике прямой линией).

Например, нормальное распределение изображается прямой линией, если ось абсцисс имеет равномерную шкалу, а ось ординат – вероятностно-нормальную. Эмпирическое распределение того же процесса в этой системе координат изобразится в виде ломаной линии со случайными отклонениями от прямой. По степени совпадения ломаной линии с прямой можно дать приближенную оценку соответствия теоретического закона эмпирическому распределению.

Более строгая оценка соответствия законов распределения производится при помощи специальных критериев согласия. Критерий Пирсона  $\chi^2$  (наиболее мощный)

$$\chi_p^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - \hat{n}_j)^2}{\hat{n}_j},$$

где  $n_j$  – эмпирическая частота  $j$ -го разряда;

$\hat{n}_j$  – теоретическая (выравнивающая) частота  $j$ -го разряда.

Вычисленная таким образом величина  $\chi_p^2$  сравнивается с табличным значением критерия  $\chi^2$  для выбранного уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы  $\nu = n - k - 1$ , где  $k$  – число параметров теоретического закона распределения.

Если  $\chi_p^2 > \chi^2$  – гипотеза о соответствии законов распределения (нулевая гипотеза) отвергается, а если  $\chi_p^2 < \chi^2$  – нет основания отвергать нулевую гипотезу.

Возможно применение других критериев (Колмогорова, Романовского, Смирнова), но в любом случае следует помнить о том, что все статистические критерии, начиная с некоторого объема ряда, чувствительны к сколько угодно малым колебаниям выборочного распределения около ожидаемой функции. А ведь такие отклонения неизбежны, ибо порождаются самой природой временного колебания эксперимента. В результате гипотеза о соответствии эмпирического распределения теоретическому закону может быть отвергнута при ее полной практической пригодности. Поэтому всегда необходима предварительная визуальная оценка соответствия распределения [3–5].

### 3. Статистический анализ напряжений

Ряды распределений амплитудных напряжений и статистические параметры распределений являются исходными данными для анализа условий нагружения деталей машин. Ускорить проведение анализа помогают графики распределений (см. рис. 1–3). Анализ напряженного состояния производится в два этапа:

1. Предварительный анализ с приближенными оценками исследуемых факторов. Параметры рядов распределения напряжений сопоставляются с характеристиками усталостной прочности, определяется число амплитуд, превышающих предел выносливости детали. Для оценки влияния различных факторов на распределение напряжений в детали сопоставляются параметры распределений, полученных при воздействии на процесс каждого фактора (только одного) [14–17].

2. Расчетный анализ. В основе расчетных формул лежит линейная гипотеза суммирования относительных долговечностей [18–23].

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a,$$

где  $n_i$  – частота напряжения  $\sigma_{ai}$  (за весь срок службы детали);

$N_j$  – число циклов до разрушения при амплитуде  $\sigma_{ai}$  по исходной кривой усталости детали, полученной при испытании с постоянными амплитудами напряжений;

$a = 1$  согласно линейной гипотезе или

$a = a_p$  при корректировке линейной гипотезы.

Необходимость в корректировке линейной гипотезы возникает в том случае, когда разность между наибольшим и наименьшим уровнями напряжений велика, а относительное время действия амплитуд высоких уровней мало. Расчетная сумма относительных долговечностей определяется по формуле

$$a_p = \frac{\langle \sigma_{amax} \rangle \zeta - \omega \bar{\sigma}_{-1g}}{\langle \sigma_{amax} \rangle - \omega \bar{\sigma}_{-1g}},$$

где  $\langle \sigma_{amax} \rangle$  – среднее значение максимальной амплитуды цикла;

$\bar{\sigma}_{-1g}$  – медианное значение предела выносливости детали на совокупности всех плавок металла данной марки и отклонений фактических размеров от номинальных значений;

$\omega$  – коэффициент, характеризующий влияние на условие суммирования относительных долговечностей напряжений ниже исходного предела выносливости (обычно принимают  $\omega = 0,5$ );

$$\zeta = \sum_{i=1}^k \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} t_i,$$

где  $\sigma_{amax}$  – максимальная амплитуда напряжений;

$\sigma_{ai}$  – амплитуда напряжений  $i$ -го уровня;

$k$  – число полей напряжений в блоке нагрузки;

$t_i$  – относительное число циклов в блоке нагрузки, соответствующее амплитуде напряжений  $i$ -го уровня.

Для параллельной проверки правильности выбранного подхода используем классические зависимости сопротивления материалов, например, для случая поперечного изгиба

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{изг}}{W_{изг}};$$

$$\tau_{поп} = \tau_{прод} = \frac{Q_y S_{изг}^{отс}}{I_{изг} b(y)},$$

где  $M_{изг}$ ,  $Q_y$  – изгибающий момент и поперечная сила из эпюр соответствующих усилий;

$W_{изг}$ ,  $S_{изг}^{отс}$ ,  $I_{изг}$ ,  $b(y)$  – осевой момент инерции, статический момент отсеченной части, момент инерции сечения детали и ее ширина;

$\tau_{поп}$  – поперечные касательные напряжения, равные продольным по закону о парности касательных напряжений, которые вычисляются по формуле Журавского [6, 7, 9–11].

Далее оцениваем суммарную ошибку по экспериментальным и теоретическим нормальным и касательным напряжениям, как показывает практика использования стальных образцов, методическая ошибка составляет [23]:

$$\delta_m = \frac{\delta\sigma}{\sigma} = \frac{\delta\tau}{\tau} = 0,02.$$

Для некруглой геометрии профиля, вследствие большего разброса механических характеристик, эта погрешность несколько возрастет.

Ошибка непосредственного расхождения теоретических и экспериментальных значений напряжений и температуры физико-механического процесса составляет  $\delta_{\tau_3} = 0,05$ .

Тогда суммарная ошибка

$$\delta = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_{\tau_3}^2} = \sqrt{0,02^2 + 0,05^2} = 0,054.$$

С учетом сказанного выше более точным представляется использовать температурно-временную суперпозицию в виде функции долговечности Журкова флуктуационной кинетической теории прочности при разрушении композитного материала, так как тепломассоперенос играет важную роль при оценке усталостной прочности [7]

$$t_b = t_b^0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma_3}{kT},$$

где  $t_b^0$  – константа среды, не зависящая от температуры;

$U = U_0 - \gamma \sigma_3$  – линейная энергия активации процесса разрушения;

$\sigma_3$  – эквивалентное (разрушающее) напряжение;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – заданная фиксированная температура;

$\gamma$  – показатель локальных объемных повреждений и определяется при испытаниях на усталостную прочность.

В формуле температуры можно заменять на  $\tau$ ,  $\sigma$  и другие параметры, обеспечивающие усталостную прочность.

Статистический анализ напряжений позволяет решать следующие задачи:

1) оценка уровня напряжений;

## Библиографический список

1. ГОСТ 23207-78. Соппротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. Издание официальное. Переиздание январь 1981 года. Государственный комитет СССР по стандартам. – М., 1978. – 48 с.

2. ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия с введением изменений от 24 декабря 2019 года № 1438-ст. – М.: Стандартинформ, 2015. – 47 с.

3. Берикашвили В.Ш., Оськин С.П. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство «Юрайт», 2019. – 164 с. (Серия: Бакалавр и магистр. Академический курс).

4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. – 12-е изд. – М.: Юрайт, 2020. – 479 с.

5. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.

6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Вильямс, 2016. – 912 с.

7. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Соппротивление материалов: учебник для вузов / под ред. А.В. Александрова. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003. – 560 с.

2) прогноз средней долговечности;

3) определение вероятности разрушения до заданного срока службы;

4) сравнение различных вариантов конструкции и выбор оптимального варианта по критериям долговечности;

5) определение коэффициентов запаса усталостной прочности;

6) необходимость и степень переработки конструкции с целью обеспечения заданного ресурса, в частности, при повышении мощности и скорости движения машин;

7) обоснование режимов ускоренных испытаний машин и их элементов.

## Заключение

При предложенном аналитическом подходе исследования механических характеристик усталостной прочности с использованием классической вероятностно-статистической структуры, флуктуационной кинетической теории прочности и результатов эксперимента следует проводить исследование усталостной прочности с дальнейшим уточнением физико-механических характеристик функционирования материала детали (прочности, жесткости, твердости, износостойкости, ударного и динамического нагружения, коррозионной стойкости) с обеспечением требований надежности в режиме малоциклового усталости при использовании моделей ползучести и релаксации напряжений, диаграмм Гудмена, Серенсена – Кинашошвили, основных классических зависимостей сопротивления материалов, что составляет довольно сложную самостоятельную задачу.

8. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 420 с. (Прикладная механика сплошных сред; Т. 2).

9. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 446 с.

10. Атапин В.Г. Соппротивление материалов: учебник и практикум для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2020. – 342 с.

11. Серенсен С.В. Соппротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. – М.: Атомиздат, 1975 – 192 с.

12. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

13. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Соппротивление материалов: учебное пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.

14. Прочность, устойчивость, колебания: справочник: в 3 т. / под общ. ред. д-ра техн. наук проф. И.А. Биргера и чл.-кор. АН Латвийской ССР Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 1. – 831 с.

15. Порошин В.Б. Конструкционная прочность: учебник. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – 335 с.

16. Водопьянов В.И., Савкин А.Н., Кондратьев О.В. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами: учебное пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2012. – 136 с.

17. Зайцев Ю.В., Окольников Г.Э., Доркин В.В. Механика разрушения для строителей [Электронный ресурс]: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 216 с.

18. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю. Специальные материалы в машиностроении: учебник для вузов [Электронный ресурс] / под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2017. – 639 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/67355.html> (дата обращения: 27.05.2022).

19. Келлер И.Э., Петухов Д.С. Критерии прочности и пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политехн. ун-та, 2020. – 157 с.

20. Хальд А. Математическая статистика с техническим приложением. – М.: Иностран. лит., 1956. – 664 с.

21. Кулагин А.В. О некоторых особенностях планирования и статистической обработки результатов усталостных испытаний образцов // Инженерный вестник Дона, 2019. – № 4.

22. Кулагин А.В., Дородов П.В. О запасе прочности и оценке надежности узлов металлоконструкций // Инженерный вестник Дона, 2012. – № 2.

23. Кулагин А.В., Дородов П.В. Исследование напряжений плоского горизонтального выреза // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 2.

24. Кулагин А.В., Пряхин В.В., Гильманов Р.Т. О вероятностном анализе механических характеристик материалов и предварительной оценке надежности изделий [Электронный ресурс] // Сборник научных трудов SWorld по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития ' 2011»,

04–15 октября 2011 г. / Науч.-исслед. проектно-конструкт. ин-т морского флота Украины, Одесский нац. морской ун-т, Украинская гос. акад. железнодорож. транспорта, Ин-т морехозяйства и предпринимательства. – Одесса: [Черноморье], 2011. – Т. 2. Технические науки. – С. 17–19. – С. 19. – URL: <http://elibrary.udsu.ru/xmlui/handle/123456789/11548> (дата обращения: 27.05.2022).

25. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics // International Materials Reviews. – 1992. – Vol. 37, no. 2. – P. 45–76.

26. Mughrabi H., Christ H.-J. Cyclic deformation and fatigue of selected ferritic and austenitic steels; specific aspects // ISI International. – 1997. – Vol. 37, no. 12. – P. 1154–1169.

27. Niemi E., Fricke W., Maddox S.J. Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach (IIW-1430-00). – Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006. – 49 p.

28. Fricke W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures // International Institute of Welding. – IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. – Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July 2010. – 144 p.

29. Experience with the Notch Stress Approach for Fatigue Assessment of Welded Joints / M.M. Pedersen, O.O. Mouritsen, M.R. Hansen, J.G. Andersen // Proceedings of the Swedish Conference on Lightweight Optimized Welded Structures. – Borlänge, Sweden, 2010. – P. 1–11.

30. Кулагин А.В., Брызгалов Ю.Б. Определение исходных данных для расчета ствола на прочность и оценка точности расчета напряженно-деформированного состояния стволов // Вооружение, автоматизация, управление: сборник научных трудов. – Ковров: КГТА, 2006. – С. 34–41.

## References

1. GOST 23207-78. Soprotivlenie ustalosti. Osnovnye terminy, opredeleniya i oznacheniya. Izdanie oficial'noe. Pereizdanie yanvar' 1981 goda. Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam [fatigue resistance. Basic terms, definitions and designations. Official edition. Reissue January 1981. USSR State Committee for Standard]. Moscow, 48 p.

2. GOST 19281-2014. Prokat povyshennoj prochnosti. Obshchie tekhnicheskie usloviya s vvedeniem izmenenij ot 24 dekabrya 2019 goda N 1438-st [Rolled high strength. General technical conditions with the introduction of amendments dated December 24, 2019 N 1438-st]. Moscow, Standartinform, 2015, 47 p.

3. Berikashvili, V. SH. Statisticheskaya obrabotka dannyh, planirovanie eksperimenta i sluchajnye processy. Uchebnoe posobie dlya bakalavriata i magistratury [Statistical data processing, planning experiments and random processes. Textbook for undergraduate and graduate students] / V.SH. Berikashvili, S.P. Os'kin. – 2-e izd., ispr. i dop. Moscow, Izdatel'stvo YUrajt Seriya: Bakalavr i magistr. Akademicheskij kurs, 2019, 164 p.

4. Gmurman V. E. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: uchebnik dlya vuzov [Probability theory and mathematical statistics: a textbook for universitie]. Moscow, Izdatel'stvo YUrajt, 2020, 479 p.

5. Stepnov M.N., SHavrin A.V. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskix ispytaniy. Spravochnik [Statistical methods for processing the results of mechanical tests. Directory]. Moscow, Mashinostroenie, 2005, 399 p.

6. Drejper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz [Applied regression analysis], Moscow, Vil'yams, 2016, 912 p.

7. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Soprotivlenie materialov. Uchebnik dlya vuzov [Derzhavin B.P. Strength of materials. Textbook for universities]. Moscow, Vysshaya shkola, 2003, 560 p.

8. Selivanov V.V. Mekhanika razrusheniya deformiruемого tela. Uchebnik dlya vtuzov [Fracture mechanics of a deformable body. Textbook for high schools]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Prikladnaya mekhanika sploshnyh sred; T. 2, 1999, 420 p.

9. Bolotin V. V. Resurs mashin i konstrukcij [Resource machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1990, 446 p.

10. Atapin V. G. Soprotivlenie materialov. Uchebnik i praktikum dlya vuzov [Resistance of materials. Textbook and workshop for universities]. Moscow, Izdatel'stvo YUrajt, 2020, 342 p.

11. Serensen S.V. Soprotivlenie materialov ustalostnomu i hrupkomu razrusheniyu [Resistance of materials to fatigue and brittle fracture]. Moscow, Atomizdat, 1975, 192 p.

12. Birger I.A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz, 1963, 232 p.

13. Birger I. A., Mavlyutov R. R. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials. Tutorial]. Moscow, Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986, 560 p.

14. Birger I.A., Latvijskoj A.N. Prochnost', ustojchivost', kolebaniya Spravochnik v trekh tomah [Strength, stability, fluctuations Handbook in three volumes]. Moscow, "Mashinostroenie", 1988, 831 p.

15. Poroshin, V.B. Konstrukcionnaya prochnost'. Uchebnik [Structural strength. Textbook]. *CHelyabinsk: Izdatel'skij centr YUUrGU*, 2019, 335 p.
16. Vodop'yanov, V.I., Savkin A.N., Kondrat'ev O.V. Kurs soprotivleniya materialov s primerami i zadachami. Uchebnoe posobie [The course of resistance of materials with examples and tasks. Textbook]. *Volgograd, VolgGTU*, 2012, 136 p.
17. Zajcev, YU.V., Okol'nikova G.E., Dorkin V.V. Mekhanika razrusheniya dlya stroitelej [Elektronnyj resurs]: Uchebnoe posobie [Fracture mechanics for builders], Moscow, INFRA-M, 2018, 216 p.
18. Solncev, YU.P., Pryahin E.I., Pirajnen V.YU. Special'nye materialy v mashinostroenii [Elektronnyj resurs]. Uchebnik dlya vuzov [Special materials in mechanical engineering [Electronic resource]. Textbook for universities]. *Saint Petersburg, HIMIZDAT*, 2017 639 p.
19. Keller, I.E., Petuhov D.S. Kriterii prochnosti i plastichnosti. Uchebnoe posobie [Strength and plasticity criteria. Textbook]. *Perm': Izd-vo Perm. nac. issled. politekh. un-ta*, 2020, 157 p.
20. Hal'd A. Matematicheskaya statistika s tekhnicheskim prilozheniem [Mathematical statistics with a technical application]. Moscow, Izd. Inostr. lit., 1956, 664 p.
21. Kulagin A.V. O nekotoryh osobennostyah planirovaniya i statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ustalostnyh ispytaniy obrazcov [On some features of planning and statistical processing of the results of fatigue tests of specimens]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2019, no. 4
22. Kulagin A.V., Dorodov P.V. O zapase prochnosti i ocnke nadezhnosti uzlov metallokonstrukcij [On the margin of safety and assessment of the reliability of metal structures nodes]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2012, no. 2
23. Kulagin A.V., Dorodov P.V. Issledovanie napryazhenij ploskogo gorizontalnogo vyreza [Investigation of the stresses of a flat horizontal cut]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2012, no. 2.
24. Kulagin, A.V., Pryahin V.V., Gil'manov R.T. O veroyatnostnom analize mekhanicheskikh harakteristik materialov i predvaritel'noj ocnke nadezhnosti izdelij [Elektronnyj resurs] [On probabilistic analysis of the mechanical characteristics of materials and preliminary assessment of the reliability of product. *Sbornik nauchnyh trudov SWorld po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Nauchnye issledovaniya i ih prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya ' 2011", 04-15 oktyabrya 2011 g. / Nauch.-issled. proektno-konstrukt. in-t morskogo flota Ukrainy, Odesskij nac. morskoy un-t, Ukrainskaya gos. akad. zheleznodorozh. transporta, In-t morekhoz'yajstva i predprinimatel'stva. - Odessa: [CHernomor'e], 2011. - T. 2. Tekhnicheskie nauki*, 2011, pp. 17-19.
25. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics. *International Materials Reviews*, 1992, vol. 37. no. 2, pp. 45-76.
26. Mughrabi H., Christ H.-J. Cyclic deformation and fatigue of selected ferritic and austenitic steels; specific aspects. *ISIJ International*, 1997, vol. 37. no. 12. pp. 1154-1169.
27. Niemi E., Fricke W., Maddox S.J. Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach (IIW-1430-00). *Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited*, 2006, 49 p.
28. Fricke W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. *International Institute of Welding. - IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. - Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July*, 2010, 144 p.
29. Pedersen M. M. Experience with the Notch Stress Approach for Fatigue Assessment of Welded Joints /M. M. Pedersen, O. O. Mouritsen, M. R. Hansen, J. G. Andersen. *Proceedings of the Swedish Conference on Lightweight Optimized Welded Structures. -Borlänge, Sweden*, 2010, pp. 1-11.
30. Kulagin A.V., Bryzgalov YU.B. Opredelenie iskhodnyh dannyh dlya rascheta stvola na prochnost' i ocnka tochnosti rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stvolov. Vooruzhenie, avtomatizaciya, upravlenie. *Sbornik nauchnyh trudov [Determination of the initial data for calculating the shaft for strength and assessing the accuracy of calculating the stress-strain state of the shafts. Armament, automation, control. Collection of scientific papers]. Kovrov, KGTA*, 2006, pp. 34-41.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Financing.** The study was not sponsored.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.