

УДК 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2021-3-22-30

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ
ОДНОГО МЕТОДА УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ**

А.В. Коноплев

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение»

А.Н. Шумило, О.Н. Кононова

к.т.н., доценты кафедры «Машиноведение»

Н.И. Чередарчук

к.т.н., доцент кафедры «Математика, физика и астрономия»

В.В. Галевский

старший преподаватель кафедры «Машиноведение»

Е.К. Рожко

ассистент кафедры «Прикладная механика»

В.А. Арпентьева

аспирант кафедры «Машиноведение»

Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина

***Аннотация.** В статье рассмотрена задача, связанная с расчётным определением точности метода ускоренного косвенного определения предела выносливости.*

На основе схемы испытаний, метода генерирования случайных чисел, а также связей между параметрами наклонного участка кривой усталости и пределом выносливости предложен подход для определения систематической, случайной и общей погрешностей рассматриваемого метода.

***Ключевые слова:** ускоренные испытания, систематическая, случайная и общая погрешности оценки предела выносливости.*

УДК 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2021-3-22-30

**ОЦІНКА ТОЧНОСТІ
ОДНОГО МЕТОДУ ПРИСКОРЕНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ**

А.В. Коноплев

д.т.н., професор, завідувач кафедри «Машинознавство»

О.М. Шумило, О.М. Кононова

к.т.н., доценти кафедри «Машинознавство»

Н.І. Чередарчук

к.т.н., доцент кафедри «Фізика, математика та астрономія»

В.В. Галевский

старший викладач кафедри «Машинознавство»

О.К. Рожко

асистент кафедри «Прикладна механіка»

В.О. Арпентьева

аспірант кафедри «Машинознавство»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

© Коноплев А.В., Шумило А.Н., Кононова О.Н., Чередарчук Н.И., Галевский В.В., Рожко Е.К., Арпентьева В.А., 2021

Анотація. У статті розглянуто завдання, пов'язане з розрахунковим визначенням точності методу прискореного непрямого визначення межі витривалості.

На основі схеми випробувань, методу генерування випадкових чисел, а також зв'язків між параметрами похилої ділянки кривої втоми та межею витривалості запропоновано підхід для визначення систематичної, випадкової та загальної похибок методу, що розглядається.

Ключові слова: прискорені випробування, систематична, випадкова та загальна похибка оцінки межі витривалості.

UDC 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2021-3-22-30

EVALUATION OF ONE METHOD OF ACCELERATED DETERMINATION OF THE ENDURANCE LIMIT

A.V. Konoplev

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Machine Science»

A.N. Shumilo, O.N. Kononova

PhD Associate Professors of the Department of «Machine Science»

N.I. Cheredarchuk

Ph.D. Associate Professor of the Department «Mathematics, physics and astronomy»

V.V. Halevskiy

Senior Lecturer of the Department «Machine Science»

E.K. Rozhko

Assistant of the Department «Applied mechanics»

V.O. Arpentieva

Postgraduate student of the department «Machine Science»

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

Abstract. The article considers the problem associated with the calculation of the accuracy of the method of accelerated indirect determination of the endurance limit.

Based on the test scheme, the method of generating random numbers, as well as the relationship between the parameters of the inclined section of the fatigue curve and the endurance limit, an approach is proposed for determining the systematic, random, and total errors of the method under consideration.

Keywords: accelerated tests, systematic, random and total errors of endurance limit estimation.

Введение. Повышение качества и надёжности машин и конструкций в значительной мере зависит от совершенствования экспериментальных методов исследований их несущей способности, и в первую очередь усталостной прочности. Это обусловлено тем, что подавляющее число отказов связано с усталостными разрушениями.

Как известно, проведение испытаний на сопротивление усталости традиционными методами требует большого количества объектов испытаний и продолжительного времени, т.е. связано со значительными материальными затратами. Особенно трудоёмки испытания, целью которых является определения предела выносливости на больших базах. В связи с этим интерес к ускоренным испытаниям на сопротивление усталости, которые позволили бы с необходимой точностью, но при существенно меньших временных и материальных затратах получить необходимые характеристики сопротивления усталости исключительно велик.

К настоящему времени разработано большое количество ускоренных методов, в основе которых лежат различные исходные предпосылки [1]. Широкому внедрению этих методов в производственную практику препятствует нерешённость ряда задач, связанных с их точностью. Таким образом, рассматриваемая тематика представляет научный и практический интерес и важна для развития машиностроения.

Целью статьи является разработка и обоснование подхода к оценке точности метода ускоренного определения предела выносливости, основанного на испытаниях с возрастающей амплитудой напряжений.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи рассмотрим ускоренный метод, основанный на испытаниях с возрастающей нагрузкой, в котором оценка предела выносливости осуществляется косвенно по величине разрушающего напряжения [2].

Суть этого метода заключается в том, что объекты испытаний доводят до критического состояния (разрушения либо появления трещин определённой величины). При этом суммарная долговечность n_C , фиксируемая во время эксперимента, позволяет определить разрушающие напряжения σ_P .

$$\sigma_P = \sigma_1 + \alpha n_C, \quad (1)$$

где σ_1 – начальное напряжение;

α – скорость увеличения амплитуды напряжений.

Формула (1) получена на основе схемы нагружения объектов с линейно возрастающей нагрузкой (рис. 1).

Рассматриваемый метод по своему назначению является сравнительным, т.е. он может быть использован только для проведения сравнительного анализа усталостной прочности деталей, например, новых и восстановленных коленчатых валов, судовых валопроводов и т. д. Схема проведения сравнительных испытаний на сопротивление усталости условных деталей № 1 и № 2 представлена на рис. 2. Она построена для случая испытаний двух объектов при одинаковой скорости увеличения нагрузки α от различных начальных напряжений σ_{11} и σ_{12} , которые приняты заведомо ниже пределов выносливости σ_{R1} и σ_{R2} (рис. 3) [3].

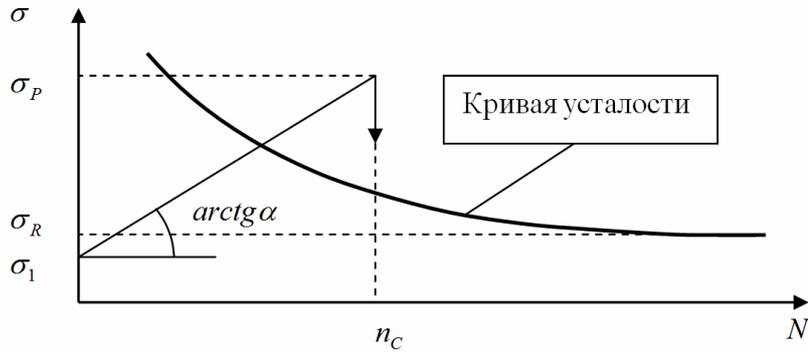


Рис. 1. Схема проведения испытаний при линейно возрастающей амплитуде напряжений

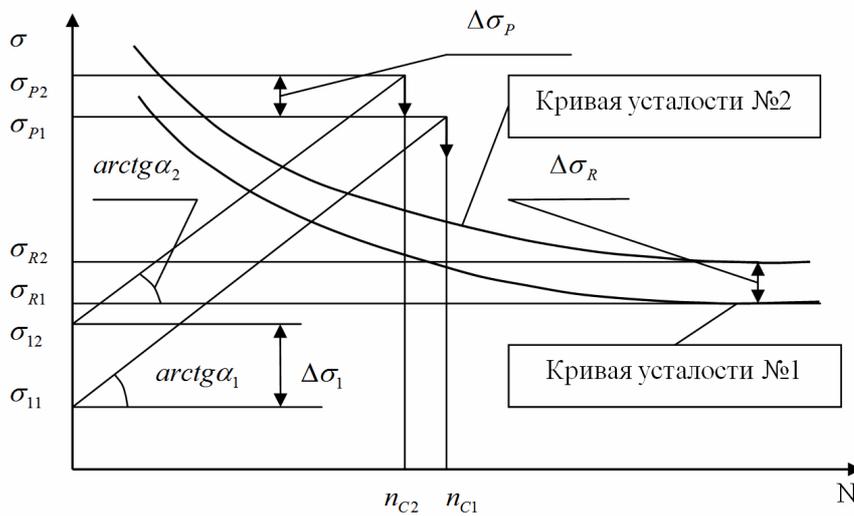


Рис. 2. Схема проведения сравнительных испытаний на сопротивление усталости двух объектов при одинаковой скорости увеличения амплитуды напряжений от различных начальных уровней нагрузки

Расчётные значения разрушающих напряжений σ_{p1} и σ_{p2} определяют на основе линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, которую при испытаниях с плавно возрастающей амплитудой напряжения представляют в виде

$$a = \int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = \frac{1}{\alpha} \int_{\sigma_1}^{\sigma_p} \frac{d\sigma}{N}, \quad (2)$$

где a – сумма накопленных усталостных повреждений.

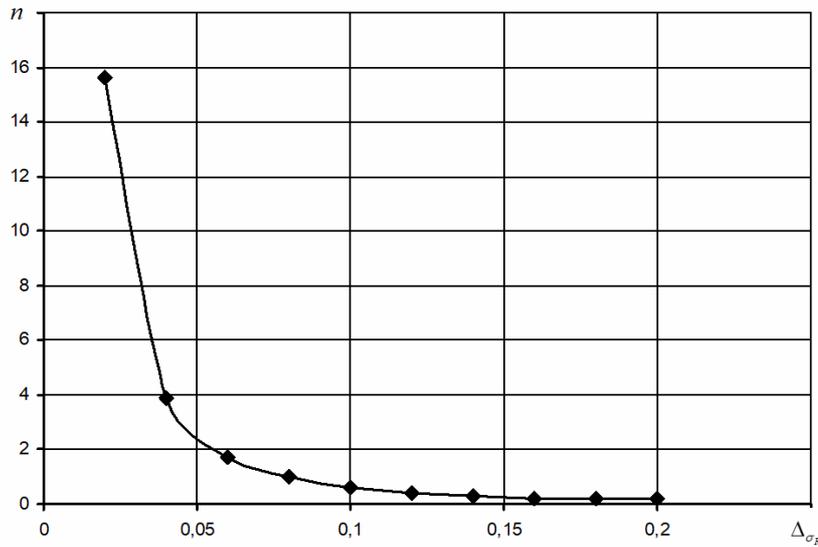


Рис. 3. Зависимости количества объектов n , обеспечивающих требуемую точность оценки предела выносливости, выраженного в относительных единицах от предела выносливости $\Delta\sigma_R$

На основе данной гипотезы и степенного уравнения кривой усталости можно записать выражение для определения величины разрушающих напряжений

$$\sigma_p^C = \left[a\alpha(m_C + 1)10^{C_C} + \sigma_R^{m_C+1} \right]^{\frac{1}{m_C+1}}. \quad (3)$$

где σ_p^C – разрушающее напряжение (индекс «C» указывает на то, что оно определено на основе степенного уравнения).

Проведенные в работе [4] исследования и расчёты показали, что различие величин $\Delta\sigma_R$ и $\Delta\sigma_p$ (см. рис. 2) практически не зависят от скорости увеличения нагрузки, уровня прочности объектов и выбранной модели кривой усталости.

Оценку точности данного метода осуществим на конкретном примере для значения предела выносливости $\sigma_R = 200$ МПа и скорости увеличения амплитуды напряжений $\alpha = 300$ Па/цикл. Рассчитаем величины разрушающих напряжений σ_p^C и их среднеквадратические отклонения S_{σ_p} по формуле (3), принимая в ней $a = 1$.

Рассматриваемый метод предполагает, что положение одного и того же объекта в распределении разрушающего напряжения и в распределении предела выносливости взаимобусловлено, что позволяет записать следующее выражение:

$$\frac{\sigma_R - \bar{\sigma}_R}{S_{\sigma_R}} = \frac{\sigma_P - \bar{\sigma}_P}{S_{\sigma_P}}, \quad (4)$$

откуда выражаем предел выносливости

$$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + \frac{S_{\sigma_R}}{S_{\sigma_P}} (\sigma_P - \bar{\sigma}_P). \quad (5)$$

Данную формулу используем для определения значений пределов выносливости σ_R^C , соответствующих среднему квадратическому отклонению S_{σ_P} . Кроме того, в этой же таблице приведём значения погрешностей предела выносливости δ_{σ_R} . Результаты расчёта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчётные значения величин m_C , C_C , σ_P , S_{σ_R} , S_{σ_P} , σ_R^C и δ_{σ_R}

Номер п/п	σ_R , МПа	m_C	C_C	σ_P , МПа	S_{σ_R} , МПа	S_{σ_P} , МПа	σ_R^C , МПа	δ_{σ_R} , %
1	172,0	6,04	19,70	263,9	11,9	12,9	170,4	-0,9
2	187,1	6,45	20,88	281,7			186,9	-0,1
3	191,3	6,57	21,21	285,4			190,3	-0,5
4	193,6	6,63	21,39	288,5			193,1	-0,2
5	197,0	6,72	21,66	293,1			197,4	0,2
6	197,0	6,72	21,66	293,1			197,4	0,2
7	200,2	6,81	21,91	296,0			200,1	-0,1
8	202,5	6,87	22,09	299,0			202,8	0,2
9	207,2	6,99	22,46	305,9			209,2	1,0
10	211,0	7,10	22,76	308,8			211,9	0,4

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что максимальная систематическая погрешность метода при принятых исходных данных не превысила 1 %. Если исходить из того, что суммарная погрешность метода не должна превышать 12 %, то на случайную составляющую погрешности остается 11 %. Определим количество объектов n , которое необходимо испытать для не превышения этой погрешности. Для этого воспользуемся формулой [5].

$$n = \frac{\gamma^2}{\Delta_{\sigma_R}^2} z_{1-\alpha/2}^2, \quad (6)$$

где $z_{1-\alpha/2}$ – квантиль уровня значимости α_1 ;

Δ_{σ_R} – максимальная относительная ошибка, принимаемая в качестве допуска оценки среднего значения предела выносливости.

Величина Δ_{σ_R} зависит от требований к точности оценки предела выносливости. Результаты расчёта представлены в табл. 2.

Таблица 2

*Расчётные значения объектов испытаний n ,
при заданных значениях максимальной относительной ошибки
определения предела выносливости Δ_{σ_R}*

Δ_{σ_R}	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
n	15,6	3,9	1,7	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2

Для наглядности табличные данные представлены в виде графика (рис. 3).

Исходя из графика, видно, что для обеспечения точности 11 % необходимо испытать 1 объект. Количество объектов также можно рассчитать по формуле (6) т.е.

$$n = \frac{\gamma^2}{\Delta_{\sigma_R}^2} z_{1-\alpha/2}^2 = \frac{0,066^2}{0,11^2} 1,645^2 = 0,97 \approx 1.$$

Таким образом, при проведении сравнительных испытаний согласно рассмотренному ускоренному методу при принятых исходных данных необходимо испытать по 1 объекту каждого сравниваемого вида для обеспечения точности оценки предела выносливости на уровне 12 %. В случае, когда необходимо обеспечить систематическую погрешность метода не превышающую, например, 5 %, получаем

$$n = \frac{\gamma^2}{\Delta_{\sigma_R}^2} z_{1-\alpha/2}^2 = \frac{0,066^2}{0,05^2} 1,645^2 = 4,7 \approx 5.$$

Очевидно, что с учётом этой систематической погрешности метода его общая погрешность составит 6 %.

Выводы

1. Для расчётной оценки точности рассмотренного косвенного однообразового ускоренного метода определения предела выносливости можно использовать виртуальное моделирование, основанное на применении метода генерирования случайных чисел и корреляционных зависимостей между пределом выносливости и параметрами наклонного участка кривой усталости.
2. Общую погрешность ускоренного метода целесообразно представлять в виде двух составляющих: систематической и случайной.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олейник Н.В., Скляр С.П. Ускоренные испытания на усталость. – К.: Наук. думка, 1985. – 304 с.
2. Коноплев А.В., Кононова О.Н., Галевский В.В., Рожко Е.К., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. Косвенная оценка пределов выносливости деталей судовых механизмов по результатам сравнительных испытаний // Материали II міжнародної науково-практичної конференції кафедри СЕУіТЕ навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, квітень. – 2020. – С. 30-35.
3. Коноплев А.В., Греченко П.И., Чередарчук Н.И., Галевский В.В., Сологуб В.О., Рожко Е.К., Кононова О.Н. Сравнительная косвенная оценка пределов выносливости деталей по результатам их испытаний с возрастающей нагрузкой // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 3(60). – Одеса: ОНМУ, 2019. – С. 70-80.
4. Коноплев А.В., Чередарчук Н.И., Галевский В.В., Кононова О.Н., Рожко Е.К., Сологуб В.О. Определение предельных скоростей роста амплитуды напряжений при ускоренных испытаниях деталей машин на сопротивление усталости // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. Вип. 3(60). – Одеса: ОНМУ, 2019. – С. 59-69.
5. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

REFERENCES

1. Oleinik, N.V., Sklyar, S.P. Uskorennie ispitaniya na ustalost' [Accelerated Fatigue Tests]. Kiev: Naukova dumka (Scientific thought), 1985. – 304 l.

2. Konoplev, A.V., Kononova, O.N., Halevskiy, V.V., Rozhko, E.K., Cheredarchuk, N.I., Sologub, V.O. Kosvennaya ocenka predelov vynoslivosti detalej sudovyh mehanizmov po rezul'tatam sravnitel'nyh ispytaniy [Indirect evaluation of the endurance limits of parts of ship mechanisms based on the results of comparative tests] // *Materiali II mezhdunarodnoyi nauchovo-praktichnoyi konferenciyi kafedri SEUiTE navchalno-naukovogo institutu morskogo flotu Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu (Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference of the Department of SEUiTE of the Training and Research Institute of the Navy of Odessa National Maritime University) Odessa, April. 2020. l. 30-35.*
3. Konoplev, A.V., Grechenko, P.I., Cheredarchuk, N.I., Halevskiy, V.V., Sologub, V.O., Rozhko, E.K., Kononova, O.N. Sravnitel'naya kosvennaya ocenka predelov vynoslivosti detalej po rezul'tatam ih ispytaniy s vozrastayushej nagruzkoj [Comparative indirect assessment of the endurance limits of parts based on the results of their tests with increasing load] // *Visnik ONMU: Zbirnik naukovih prac. Vipusk 3(60) (Bulletin of ONMU: Collection of scientific works. Issue 3 (60). – Odessa, ONMU, 2019. – l. 70-80.*
4. Konoplev, A.V., Cheredarchuk, N.I., Halevskiy, V.V., Kononova, O.N., Rozhko, E.K., Sologub, V.O. Opredelenie predel'nyh skorostej rosta amplitudy napryazhenij pri uskorenykh ispytaniyakh detalej mashin na soprotivlenie ustalosti [Determination of the limiting rates of growth of the stress amplitude during accelerated testing of machine parts for fatigue resistance] // *Visnik ONMU: Zbirnik naukovih prac. Vipusk 3(60) (Bulletin of ONMU: Collection of scientific works. Issue 3 (60). – Odessa, ONMU, 2019. – l. 59-69.*
5. Stepnov, M.N. Statisticheskie metodi obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispitani. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]. *Spravochik. – M.: Mashinostroenie (Directory. – M.: Mechanical Engineering), 1985. – 232 l.*

Стаття надійшла до редакції 08.02.2021

Посилання на статтю: Коноплев А.В., Шумило А.Н., Кононова О.Н., Чередарчук Н.Н., Галевский В.В., Рожко Е.К., Арпентьева В.А. Оценка точности одного метода ускоренного определения предела выносливости // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2021. № 3(66). С. 22-30. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-3-22-30.*

Article received 08.02.2021

Reference a JournalArtic: Konoplev A., Shumilo A., Kononova O., Cheredarchuk N., Halevskiy V., Rozhko E., Arpentieva V. Evaluation of one method of accelerated determination of the endurance limit // *Herald of the Odessa national maritime university. 2021. № 3(66). 22-30. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-3-22-30.*