

УДК 620:178.3
DOI 10.33082/2226-1893-2019-3-70-80

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ КОСВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ ИСПЫТАНИЙ С ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ**

А.В. Коноплев
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение»
П.И. Греченко
к.т.н., доцент кафедры «Машиноведение»
Н.И. Чередарчук
аспирант кафедры «Машиноведение»
В.В. Галевский
старший преподаватель кафедры «Машиноведение»
В.О. Сологуб
аспирант кафедры «Машиноведение»
Е.К. Рожко
ассистент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
О.Н. Кононова
старший преподаватель кафедры «Машиноведение»

Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина

***Аннотация.** Предложено проводить сравнительную оценку сопротивления усталости деталей машин косвенно, путём сопоставления величин разрушающих напряжений при их испытании с возрастающей нагрузкой. Расчётом показано, что эти напряжения имеют практически идентичный размах варьирования с пределом выносливости, а их дисперсии однородны.*

***Ключевые слова:** ускоренные методы испытаний, разрушающие напряжения, предел выносливости.*

УДК 620:178.3
DOI 10.33082/2226-1893-2019-3-70-80

**ПОРІВНЯЛЬНА НЕПРЯМА ОЦІНКА ГРАНИЦЬ ВИТРИВАЛОСТІ ДЕТАЛЕЙ
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЇХ ВИПРОБУВАНЬ ІЗ ЗРОСТАЮЧИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

А.В. Коноплев
д.т.н., професор, завідуючий кафедрою «Машинознавство»
П.І. Греченко
к.т.н., доцент кафедри «Машинознавство»
Н.І. Чередарчук
аспірант кафедри «Машинознавство»
В.В. Галевський
старший викладач кафедри «Машинознавство»
Сологуб В.О.
аспірант кафедри «Машинознавство»
О.К. Рожко
асистент кафедри «Теоретична і прикладна механіка»
О.М. Кононова
старший викладач кафедри «Машинознавство»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

© Коноплев А.В., Греченко П.И., Чередарчук Н.И., Галевский В.В., Сологуб В.О.,
Рожко Е.К., Кононова О.Н., 2019

***Анотація.** Запропоновано проводити порівняльну оцінку опору втомі деталей машин побічно, шляхом зіставлення величин руйнівної напруги при їх випробуванні із зростаючим навантаженням. Розрахунком показано, що ця напруга має практично ідентичний розмах варіювання з межею витривалості, а їх дисперсії однорідні.*

***Ключові слова:** прискорені методи випробувань, руйнівна напруга, межа витривалості.*

UDC 620:178.3

DOI 10.33082/2226-1893-2019-3-70-80

COMPARATIVE INDIRECT ESTIMATION OF LIMITS OF ENDURANCE
OF DETAILS ON RESULTS THEIR TESTS WITH THE INCREASING LOADING

A.V. Konoplev

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

P.I. Grechenko

Ph.D. Associate Professor
of the Department of «Machine Science»

N.I. Cheredarchuk, V.V. Halevskyi

Postgraduate students
of the department «Machine Science»

O.K. Rozhko

Assistant of the Department «Applied mechanics»

O.M. Kononova

Postgraduate student of the Department «Machine Science»

V.O. Sologub

Graduate student of the Department «Machine Science»

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

***Abstract.** It offers to conduct the comparative estimation of resistance of tiredness of details of machines by implication, by comparison of sizes of stress-at-breaks at their test with the increasing loading. It is shown a calculation, that these tensions have practically an identical scope of varying with the limit of endurance, and their dispersions are homogeneous.*

***Keywords:** speed-up methods of tests, stress-at-breaks, limit of endurance.*

Введение. Среди задач, связанных с сопротивлением усталости деталей машин и конструкций, немало таких, которые требуют постановки и проведения эксперимента. В частности, к ним относятся задачи по проведению сравнительного анализа усталостной прочности новых и восстановленных деталей, таких как гребные валы судов, коленчатые валы ДВС и др. В ходе эксперимента определяют их пределы выносливости, либо долговечности до разрушения при соответствующих напряжениях [1]. Эксперимент с целью оперативности решения задачи планируют чаще всего в виде ускоренных или сокращённых испытаний.

Эти два понятия различаются условно тем, что при ускоренных испытаниях сокращается время эксперимента, а при сокращённых – как время, так и количество испытуемых объектов (деталей, моделей, образцов и пр.). В большинстве случаев разграничение этих понятий не делают, а считают испытания ускоренными, не акцентируя внимания на том, за счёт чего достигается ускорение.

В большинстве случаев при проведении ускоренных испытаний определяют средневероятный предел выносливости. Иногда дополнительно находят его рассеяние и долговечности, соответствующие ограниченному пределу выносливости для различных вероятностей разрушения, т.е. строят наклонные участки кривой усталости. При этом выбирают ту или иную модель кривой усталости.

Целью статьи является поиск такой характеристики сопротивления усталости, которая давала бы возможность решать задачи сравнительного анализа характеристик сопротивления усталости без определения предела выносливости и параметров кривой усталости.

Изложение основного материала. В основе ускоренных методов определения характеристик сопротивления усталости могут быть различные схемы проведения эксперимента. В частности, в некоторых из них используют принцип увеличения частоты нагружения, в других – испытания проводят при стационарной нагрузке на высоком уровне напряжений, в-третьих, эти испытания проводят с увеличивающейся амплитудой нагружения. При этом объекты испытаний доводят до окончательного разрушения, либо испытывают их при заданном базовом числе циклов. В данной статье речь будет идти о методах, основанных на испытаниях с линейно возрастающей нагрузкой с доведением объектов до окончательного разрушения. Суммарная долговечность до разрушения, фиксируемая во время эксперимента, служит для определения величины разрушающих напряжений σ_p .

$$\sigma_p = \sigma_1 + \alpha n_c, \quad (1)$$

где σ_1 – начальное напряжение;

α – скорость увеличения нагрузки;

n_c – суммарное число циклов.

Схема линейного нагружения объектов представлена на рис. 1.

Рассмотрим возможность использования разрушающих напряжений σ_p в ускоренных методах, задачей которых является сравнение усталостных характеристик некоторых объектов (деталей, моделей, образцов). Схема испытаний, где для сравнения усталостной прочности могут использоваться величины разрушающих напряжений, представлена на рис. 2.

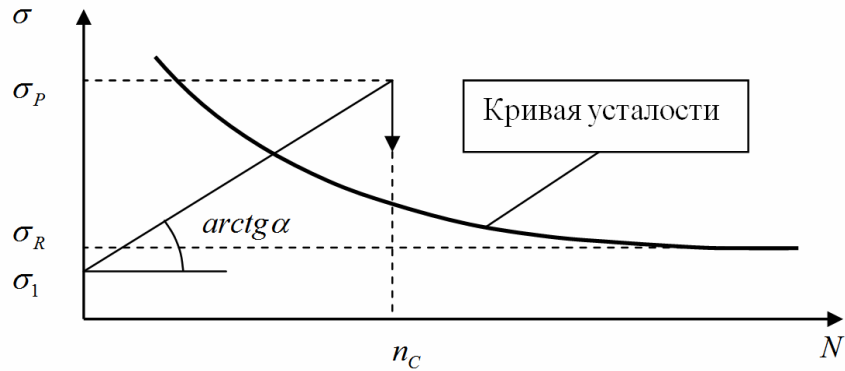


Рис.1. Схема нагружения объектов
линейно увеличивающейся нагрузкой

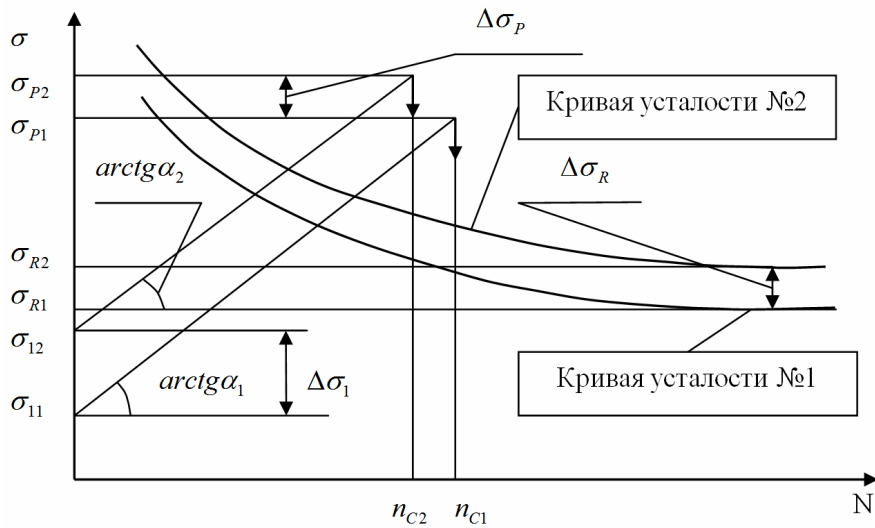


Рис. 2. Схема проведения сравнительных испытаний двух объектов
при одинаковой скорости увеличения амплитуды напряжений
от различных начальных уровней напряжений

Она построена на испытании двух объектов при одинаковой скорости увеличения нагрузки α от различных начальных напряжений σ_{11} и σ_{12} , хотя их можно принимать и одинаковыми. Обязательным в данной схеме является условие, при котором величины σ_{R1} и σ_{R2} принимаются заведомо ниже пределов выносливости этих объектов.

Определим соотношение между пределами выносливости σ_{R1} и σ_{R2} и разрушающими напряжениями σ_{P1} и σ_{P2} , пользуясь корреляционными зависимостями между средневероятным значением предела выносливости и параметрами наклонной ветви кривой усталости, выраженной степенным уравнением и Вейбулла. При этом рассмотрим случай, когда параметры наклонного участка кривой усталости являются фиксированными ($m_W = 1$ и $C_W = 7,0$), а также, когда они связаны с пределом выносливости следующими корреляционными зависимостями [1; 2].

$$m_C = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C; \quad (2)$$

$$C_C = F_C(\sigma_R) = \alpha_C (m+1) \lg \sigma_R + \beta_C, \quad (3)$$

где $a_C, b_C, \alpha_C, \beta_C$ – коэффициенты.

Для объектов из углеродистых и легированных сталей принимают: $a_C = 0,027$; $b_C = 1,4$; $\alpha_C = 0,997$; $\beta_C = 4,0 + 0,5(2,5 - \lg \sigma_R)^2$, при $\lg \sigma_R \geq 2,5$ $\beta_C = 4,0$ (в среднем $\beta_C = 4,25$).

$$m_W = f_W(\sigma_R) = \frac{1}{a_{W1} \sigma_R^{0,01} - b_{W1}} = \frac{1}{5,254 \sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1; \quad (4)$$

$$C_W = F_W(\sigma_R) = \lg \frac{(\alpha_{W1} \sigma_R + \beta_{W1})^{m_W + 1}}{m_W + 1} = \lg \frac{(7,029 \sigma_R + 3599)^{m_W + 1}}{m_W + 1}, \quad (5)$$

где $a_{W1}, b_{W1}, \alpha_{W1}, \beta_{W1}$ – постоянные коэффициенты.

Разрушающие напряжения σ_{P1} и σ_{P2} определим с помощью линейной гипотезы суммирования повреждений, математическое выражение которой для рассматриваемого случая запишем в виде

$$a = \int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = \frac{1}{\alpha} \int_{\sigma_1}^{\sigma_p} \frac{d\sigma}{N}, \quad (6)$$

где a – сумма накопленных повреждений.

Таким образом, с учётом вышеприведенных зависимостей, величины разрушающих напряжений для степенного уравнения и Вейбулла могут быть определены по формулам [3]

$$\sigma_P^{WY} = \sqrt{2 \cdot 10^7 \alpha} + \sigma_R; \quad (7)$$

$$\sigma_P^W = [\alpha(m_W + 1)10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W + 1}} + \sigma_R; \quad (8)$$

$$\sigma_P^C = [\alpha(m_C + 1)10^C + \sigma_R^{m_C + 1}]^{\frac{1}{m_C + 1}}. \quad (9)$$

где σ_P^{WY} , σ_P^W и σ_P^C – разрушающие напряжения, найденные на основе универсального уравнения Вейбулла (с постоянными параметрами m_W и C_W), уравнения Вейбулла с переменными параметрами m_W и C_W , а также степенного уравнения с переменными параметрами m_C и C_C соответственно.

Для проведения расчёта примем нормальный закон распределения предела выносливости и методом генерирования случайных чисел распределим по 10 значений σ_R относительно их средних величин. Расчёты проведём по формулам (7)-(9) для пределов выносливости $\bar{\sigma}_R = 100, 200, 300, 400, 500$ МПа и одинаковой скорости увеличения нагрузок $\alpha = 300$ Па/цикл. Эта скорость, близка к максимальной, и в тоже время, она гарантированно обеспечивает разрушение объектов в многоцикловой области.

Кроме того, дополнительно определим величину σ_P^{CW} как среднее значение между величинами σ_P^C и σ_P^W (табл. 1).

Сравнительную оценку разрушающих напряжений осуществим по трём показателям: по средним значениям разрушающих напряжений, по размаху варьирования и по их дисперсиям. Размах варьирования разрушающих напряжений будем определять как разность соответствующих максимальных и минимальных значений для каждого из вариационных рядов (табл. 2).

Таблиця 1

Результаты расчёта разрушающих напряжений
по зависимостям (7)-(9)

$\bar{\sigma}_R = 100$ МПа				
σ_{Ri} , МПа	σ_P^C , МПа	σ_P^W , МПа	σ_P^{WV} , МПа	σ_P^{CW} , МПа
1	2	3	4	5
83,7	159,6	189,2	161,1	174,4
87,1	164,0	191,3	164,6	177,7
88,9	166,2	192,5	166,4	179,4
94,5	173,1	196,2	171,9	184,7
96,4	175,5	197,6	173,9	186,6
96,8	176,0	197,8	174,2	186,9
99,3	179,1	199,6	176,6	189,4
101,8	182,2	201,4	179,2	191,8
108,8	190,7	206,5	186,2	198,6
114,2	197,3	210,7	191,7	204,0
Средние значения	176,4	198,3	174,6	187,4
$\bar{\sigma}_R = 200$ МПа				
172,0	266,0	259,8	249,5	262,9
187,1	283,5	237,5	264,6	260,5
191,3	288,3	277,3	268,7	282,8
193,6	291,0	279,5	271,1	285,3
197,0	294,9	282,6	274,4	288,8
197,0	294,9	282,6	274,5	288,8
200,2	298,6	285,5	277,6	292,1
202,5	301,2	287,7	280,0	294,5
207,2	306,6	292,1	284,6	299,4
211,0	310,9	295,6	288,4	303,3
Средние значения	293,6	278,0	273,3	285,8
$\bar{\sigma}_R = 300$ МПа				
294,8	405,3	376,0	372,3	390,7
297,7	408,6	378,9	375,2	393,8
298,8	409,8	379,9	376,3	394,9
300,6	411,7	381,7	378,0	396,7
301,7	413,0	382,7	379,1	397,9
303,7	415,2	384,8	381,2	400,0
307,3	419,2	388,2	384,7	403,7
308,3	420,3	389,3	385,8	404,8
314,1	426,7	394,9	391,5	410,8
323,2	436,7	403,8	400,6	420,3
Средние значения	416,6	386,0	482,5	401,4

Продолжение табл. 1

$\bar{\sigma}_R = 400$ МПа				
σ_{Ri} , МПа	σ_P^C , МПа	σ_P^W , МПа	σ_P^{WV} , МПа	σ_P^{CW} , МПа
1	2	3	4	5
387,3	507,0	467,3	464,7	487,5
387,9	507,7	467,9	465,4	487,8
393,7	514,0	473,7	471,1	493,9
393,8	514,1	473,8	471,3	494,0
396,4	516,9	476,4	473,9	496,7
397,5	518,2	477,5	475,0	497,9
398,5	519,2	478,5	476,0	498,9
405,7	527,1	485,7	483,2	506,4
407,3	528,8	487,3	484,8	508,1
413,3	535,2	493,2	490,7	514,2
Средние значения	518,8	478,1	475,6	498,5
$\bar{\sigma}_R = 500$ МПа				
483,5	611,0	563,7	561,0	587,4
492,1	620,1	572,2	569,5	596,2
494,0	622,2	574,2	571,4	598,2
498,7	627,3	579,0	576,2	603,2
504,2	633,2	584,5	581,7	608,9
504,7	633,6	584,9	582,1	609,1
505,5	634,5	585,8	583,0	610,2
506,6	635,5	586,7	583,8	611,1
507,8	637,0	588,1	585,3	612,6
510,1	639,5	590,4	587,6	615,0
Средние значения	629,4	581,0	578,2	605,2

Таблица 2

Расчётные значения размахов варьирования разрушающих напряжений

$\bar{\sigma}_R$, МПа	$(\sigma_{R10} - \sigma_{R1})$, МПа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^C$, МПа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^W$, МПа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{WV}$, МПа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{CW}$, МПа
100	30,5	37,7	21,6	30,5	29,6
200	39,0	44,9	58,1	38,9	40,4
300	28,4	29,6	27,8	28,4	29,6
400	26,0	27,1	25,9	26,0	26,7
500	26,6	28,5	26,8	26,6	27,6

Значения дисперсий предела выносливости и разрушающих напряжений определим по следующим формулам [4].

$$S_{\sigma_R}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{R_i} - \bar{\sigma}_R)^2 ; \quad (10)$$

$$S_{\sigma_P}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{P_i} - \bar{\sigma}_P)^2 , \quad (11)$$

где n – количество испытанных объектов.

Таблица 3

Расчётные значения дисперсий пределов выносливости и разрушающих напряжений

$\bar{\sigma}_R$, МПа	$S_{\sigma_R}^2$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 C$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 W$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 WY$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 CW$, МПа ²
100	90,0	137,1	45,0	90	91,1
200	121,5	161,6	102,8	121,5	132,2
300	73,0	89,5	70,1	72,9	79,8
400	70,7	83,5	70,3	70,7	76,9
500	71,3	81,8	72,2	71,3	77,0

Как видно из таблицы 3 отличие максимального и минимального значений размаха варьирования разрушающих напряжений невелико. Оно составляет 7,1 %.

Однородность рядов дисперсий для принятых значений предела выносливости определим по критерию Хартлея [4]

$$F_{\max} = S_{\max}^2 / S_{\min}^2 , \quad (12)$$

где S_{\max}^2 и S_{\min}^2 – максимальное и минимальное значения дисперсий рассматриваемых величин. Расчётные значения F_{\max} , найденные по формуле (12) для рассматриваемых пределов выносливостей соответственно составили 1,5; 1,6; 1,3; 1,2 и 1,1. Они заметно меньше табличных значений F_{\max} для уровней значимости $\alpha = 0,05$ и $0,01$. Таким образом, однородность рядов дисперсий пределов выносливости и разрушающих напряжений, приведенных в табл. 3, подтверждается.

Средние значения разрушающих напряжений максимально отличаются друг от друга на 13,6; 7,4; 7,9; 8,5 и 8,9 процентов соответственно для пределов выносливости 100, 200, 300, 400 и 500 МПа (рис. 3).

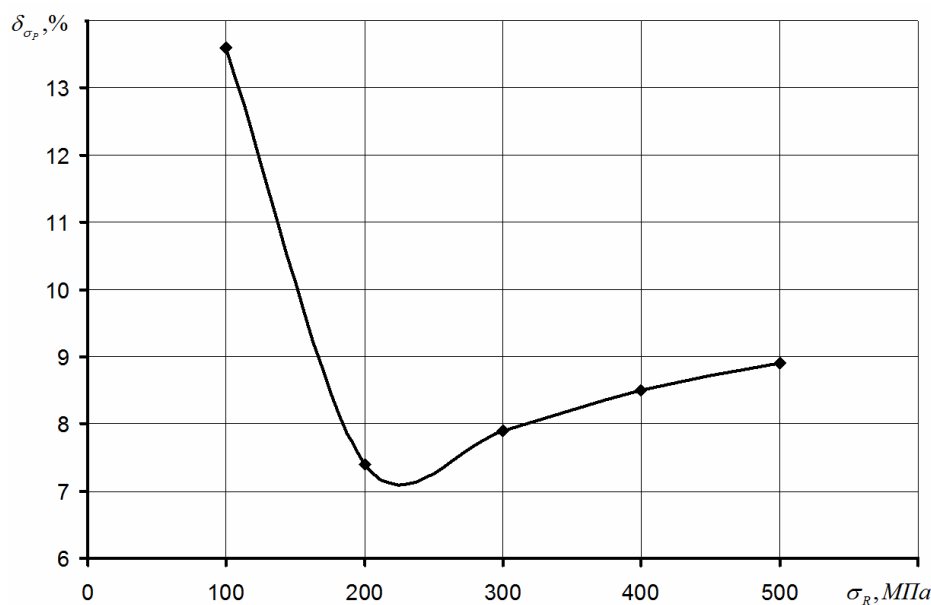


Рис. 3. Залежність відхилень середніх руйнівних напружень (максимальних і мінімальних) від меж вимогливості

Приведенный выше график имеет минимум, который находится в диапазоне значений пределов выносливости 200-300 МПа. Такое поведение объясняется тем, что корреляционные зависимости (2)-(5) имеют наибольшее соответствие друг другу при значениях пределов выносливости, входящих в этот диапазон.

Выводы. Проверка средних значений разрушающих напряжений и размаха варьирования этих величин показала, что отклонения их максимальных и минимальных значений находятся в допустимых пределах. (соответственно 13,6 % и 7,1 %). Кроме того, подтверждена однородность рядов дисперсий пределов выносливости и разрушающих напряжений. Таким образом, сравнительную оценку пределов выносливости объектов можно проводить косвенно путём сопоставления разрушающих напряжений при испытаниях объектов с одинаковой линейно увеличивающейся нагрузкой от начальных напряжений, не превышающих предел выносливости.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стальниченко О.И., Иоргачёв Д.В., Иоргачёв В.Д. Технологии восстановления деталей судов технического флота. Одесса: Изд-во ОНМУ, 2019. 241 с.

2. Олейник В.Н. Определение предела выносливости деталей машин методом Локати // Изв. вузов. Машиностроение. 1981. № 11. С. 41-45.
3. Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Скляр С.П. Оценка сопротивления усталости деталей машин на основе метода Про. Львов, 1985. 48 с. (Препринт / АН УССР. Физ. мех. ин-т; № 103).
4. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

REFERENCES

1. Stalnichenko O.I., Iorgachev D.V., Iorgachev V.D. *Technologii vosstanovleniya detalei sudov technicheskogo flota [Technologies for the restoration of ship components of a technical fleet]*. Odessa: Publisher of Odessa National Maritime University, 2019. 241 p. [in Russian].
2. Oleinik N.V. *Opređenje predela vinoslivosti detalei mashin metodom Lokati [Determination of the endurance limit of machine parts using the Locati method]*. *Izvestiya visshih uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie. (Proceedings of the higher educational institutions. Mechanical engineering.)* 1981. № 11. 41-45 p. [in Russian].
3. Oleinik N.V., Konoplev A.V., Sklyar S.P. *Ocenka soprotivleniya ustalosti detalei mashin na osnove metoda Pro [Estimation of fatigue resistance of machine parts based on the Pro method]*. Lviv, 1985. 48 p. Preprint / Akademiya Nauk USSR. Fiz. meh. institut; (Preprint / Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Physicomechanical Institute). №. 103. [in Russian].
4. Stepnov M.N. *Statisticheskie metodi obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispitani. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]*. *Spravochik. M.: Mashinostroenie.* 1985. 232 p. [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 20.11.2019 р.