

УДК 620:178.3
DOI 10.33082/2226-1893-2019-3-59-69

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ РОСТА
АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ**

А.В. Коноплёв
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение»
Н.И. Чередарчук
аспирант кафедры «Машиноведение»
В.В. Галевский, О.Н. Кононова
старшие преподаватели кафедры «Машиноведение»
Е.К. Рожко
ассистент кафедры «Прикладная механика»
В.О. Сологуб
аспирант кафедры «Машиноведение»

Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина

Аннотация. На основе линейной гипотезы накопления усталостных повреждений определены предельные скорости увеличения амплитуды напряжений при ускоренных испытаниях деталей машин на сопротивление усталости. Задача решена для двух режимов нагружения, в частности, когда начальное напряжение меньше и больше предела выносливости.

Показано, что в зависимости от выбора уравнения кривой усталости значения максимально допустимых скоростей могут существенно различаться. На основании сравнительного анализа полученных результатов рекомендованы значения предельных скоростей, которые гарантированно приведут к разрушению испытуемых объектов в многоцикло-вой области.

Ключевые слова: ускоренные испытания, предельная скорость увеличения нагрузки, предел выносливости.

УДК 620:178.3
DOI 10.33082/2226-1893-2019-3-59-69

**ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ ШВИДКОСТЕЙ РОСТУ
АМПЛІТУДИ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ПРИСКОРЕНИХ ВІПРОБУВАННЯХ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОПІР ВТОМІ**

А.В. Конопльов
д.т.н., професор, завідувач кафедри «Машинознавство»
Н.І. Чередарчук
аспірант кафедри «Машинознавство»
В.В. Галевський, О.М. Кононова
старші викладачі кафедри «Машинознавство»
О.К. Рожко
асистент кафедри «Прикладна механіка»
В.О. Сологуб
аспірант кафедри «Машинознавство»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

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

***Анотація.** На основі лінійної гіпотези накопичення втомних пошкоджень визначені граничні швидкості збільшення амплітуди напружень при прискорених випробуваннях на опір втомі. Завдання вирішене для двох режимів навантаження, зокрема, коли початкове напруження менше і більше границі витривалості.*

Показано, що залежно від вибору рівняння кривої втоми, значення максимально допустимих швидкостей можуть істотно відрізнятись. На підставі порівняльного аналізу отриманих результатів рекомендовані значення граничних швидкостей, які гарантовано приведуть до руйнування випробовуваних об'єктів в багатоцикловій області.

***Ключові слова:** прискорені випробування, гранична швидкість збільшення навантаження, границя витривалості.*

UDC 620:178.3

DOI 10.33082/2226-1893-2019-3-59-69

**DETERMINATION OF MAXIMUM SPEEDS OF HEIGHT
OF AMPLITUDE OF TENSIONS AT THE SPEED-UP TESTS
OF DETAILS OF MACHINES ON RESISTANCE OF TIREDNESS**

A.V. Konoplev

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

N.I. Cheredarchuk

Postgraduate student of the department «Machine Science»

V.V. Halevskyi, O.M. Kononova

Postgraduate students of the Department «Machine Science»

O.K. Rozhko

Assistant of the Department «Applied mechanics»

V.O. Sologub

Graduate student of the Department «Machine Science»

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

***Abstract.** Based on the linear hypothesis of the accumulation of fatigue injuries, the limiting rates of increase in the amplitude of stresses were determined during accelerated fatigue resistance tests. The problem is solved for two loading modes, in particular, when the initial stress is less and more than the endurance limit.*

It is shown that, depending on the choice of the equation of the fatigue curve, the values of the maximum allowable speeds can diverge significantly. Based on a comparative analysis of the results obtained, the values of limiting velocities are recommended, which are guaranteed to lead to the destruction of the test objects in the multi-cycle region.

***Keywords:** accelerated tests, ultimate rate of load increase, endurance limit.*

Введение. Многие задачи, связанные с усталостной прочностью узлов и деталей машин (отработка технологий упрочнения, совершенствование конструктивных форм, ремонт и пр.) решаются экспериментально. Для этого проводятся испытания непосредственно самих деталей, или их моделей. Традиционные (длительные) испытания на сопротивление усталости требуют больших затрат времени и значительных материальных ресурсов, необходимых на изготовление моделей, поэтому их часто заменяют ускоренным (сокращённым) экспериментом. При этом его продолжительность снижают за счёт выбора высокого уровня стационарной нагрузки, либо за счёт увеличения частоты или амплитуды нагружения. Каждое из этих направлений заслуживает отдельного внимания, поэтому в данной статье речь пойдёт только об ускоренных методах оценки характеристик сопротивления усталости, в основе которых лежит эксперимент. В частности речь будет идти о выборе предельных скоростей увеличения амплитуды напряжений при проведении испытаний.

Целью статьи является определение максимально допустимых скоростей увеличения амплитуды напряжений при реализации ускоренных методов определения характеристик сопротивления усталости.

Изложение основного материала. Ускоренные испытания с увеличивающейся нагрузкой лежат в основе, как ранних методов, так и новых, разработанных в последние годы [1]. В них скорость возрастания нагрузки, как правило, принимают постоянной. При этом сам режим нагружения может быть ступенчатым или плавным. Схема этих видов нагружения представлена на рис. 1.

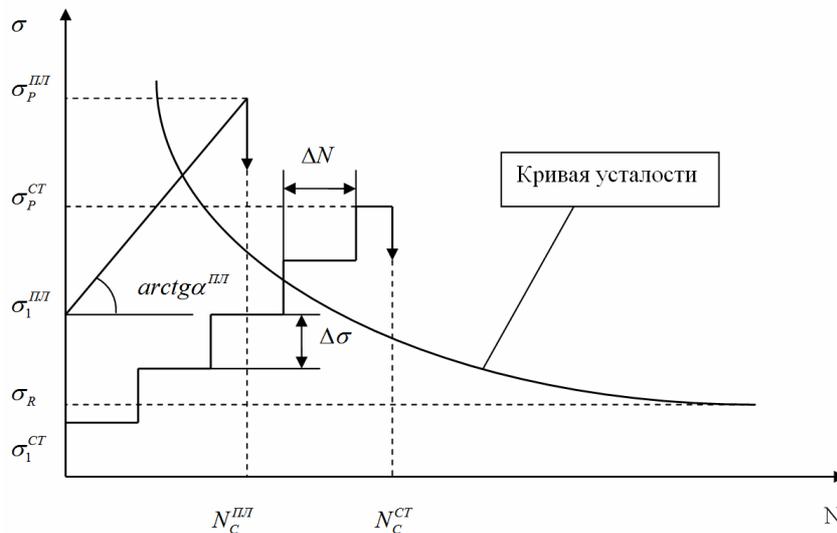


Рис. 1. Схема плавного и ступенчатого режимов нагружения при испытаниях на сопротивление усталости

На схеме приняты следующие обозначения:

σ_R – предел выносливости;

σ_1^{CT} и σ_1^{III} – начальные напряжения;

$\Delta\sigma$ и ΔN – приращения напряжения и числа циклов на каждой ступени нагружения соответственно;

σ_P^{CT} и σ_P^{III} – напряжения, при которых произошли разрушения;

N_{CYM}^{CT} и N_{CYM}^{III} – суммарные числа циклов до разрушения. Индексы «СТ» и «III» относятся соответственно к плавному и ступенчатому режимам нагружения.

Из приведенной схемы следует, что скорость нагружения при плавном увеличении нагрузки будет равна $\alpha^{III} = d\sigma/dN$, а при ступенчатом $\alpha_{CT} = \Delta\sigma/\Delta N$ (кроме последней ступени, где произошло разрушение). Ступенчатый режим нагружения с практической точки зрения более прост, поскольку не требует специального нагружающего приспособления, однако при расчётах удобнее пользоваться величиной α^{III} . Это обстоятельство привело к разработке методов пересчёта параметров ступенчатого режима нагружения в плавный [2].

Предельные скорости нагружения можно определить, основываясь на линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений и уравнении кривой усталости. Так для степенного уравнения и Вейбулла эти зависимости имеют вид [3]

$$\alpha_{\max}^C = \left[(10^{C_c} / N_{н.э})^{(m_c+1)/m_c} - \sigma_1^{m_c+1} \right] / \left[(m_c + 1) 10^{C_c} \right]; \quad (1)$$

$$\alpha_{\max}^W = \left[(10^{C_w} / N_{н.э})^{(m_w+1)/m_w} - (\sigma_1 - \sigma_R)^{m_w+1} \right] / \left[(m_w + 1) 10^{C_w} \right], \quad (2)$$

где α_{\max}^C и α_{\max}^W – максимальные значения скоростей увеличения амплитуды напряжений для степенного уравнения кривой усталости и Вейбулла соответственно;

m_C , C_C , m_W и C_W – параметры наклонных участков кривой усталости (индексы «С» и «W» относятся соответственно к степенному уравнению и Вейбулла);

$N_{н.э}$ – долговечность, определяющая границу перехода из области многоциклового в область малоциклового усталости ($N_{н.э} = 10^5 - 2 \cdot 10^5$ цикл.) [4];

σ_1 – начальное напряжение.

Важным моментом при планировании ускоренных испытаний с возрастающей нагрузкой является выбор начального напряжения σ_1 , поскольку накопление усталостных повреждений, согласно линейной гипотезе, начинается только тогда, когда эта величина превысит предел выносливости σ_R . Следовательно, если $\sigma_1 \leq \sigma_R$ принимают $\sigma_1 = \sigma_R$ и формулы (1) и (2) представляют в таком виде:

$$\alpha_{\max}^C = \left[(10^{C_C} / N_{n,z})^{(m_C+1)/m_C} - \sigma_R^{m_C+1} \right] / \left[(m_C + 1) 10^{C_C} \right]; \quad (3)$$

$$\alpha_{\max}^W = \left[(10^{C_W} / N_{n,z})^{(m_W+1)/m_W} \right] / \left[(m_W + 1) 10^{C_W} \right], \quad (4)$$

Таким образом, задача по определению максимальных скоростей увеличения нагрузки делится на две части, которые рассмотрим отдельно. Сначала рассмотрим случай, когда $\sigma_1 \leq \sigma_R$.

Неизвестные параметры степенного уравнения кривой усталости m_C и C_C определим с помощью корреляционных зависимостей их от предела выносливости [5]

$$m_C = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C; \quad (5)$$

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

где a_C , b_C , α_C , β_C – эмпирические 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 $\beta_C = 4,25$).

Параметры уравнения Вейбулла также найдём по эмпирическим зависимостям [6]

$$m_W = \frac{1}{5,254 \sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1, \quad (7)$$

$$C_W = \lg \frac{(7,029 \sigma_R + 3599)^{m_W+1}}{m_W + 1}. \quad (8)$$

Для проведения расчётов предельных скоростей примем диапазон изменения предела выносливости 100-500 МПа и определим значения α_{\max} по формулам (3) и (4). При этом параметры m_C , C_C , m_W и C_W найдём из выражений (5)-(8). Результаты расчёта представлены в табл. 1.

Таблиця 1

Расчётные значения α_{\max}^C , α_{\max}^W и их относительные отклонения δ_α

σ_R , МПа	m_C	C_C	α_{\max}^C	m_W	C_W	α_{\max}^W	δ_α , %
100	4,10	14,29	336,89	1,16	7,50	676,55	95,10
200	6,80	21,91	379,92	0,99	7,07	613,61	61,5
300	9,50	29,93	389,69	0,91	6,88	625,096	60,4
400	12,20	38,25	393,03	0,85	6,78	664,38	69,0
500	14,90	46,81	393,97	0,81	6,71	719,54	82,6

На основании таблицы 1 построены зависимости величин α_{\max}^C и α_{\max}^W , а также относительной погрешности δ_α от предела выносливости (рис. 2 и 3).

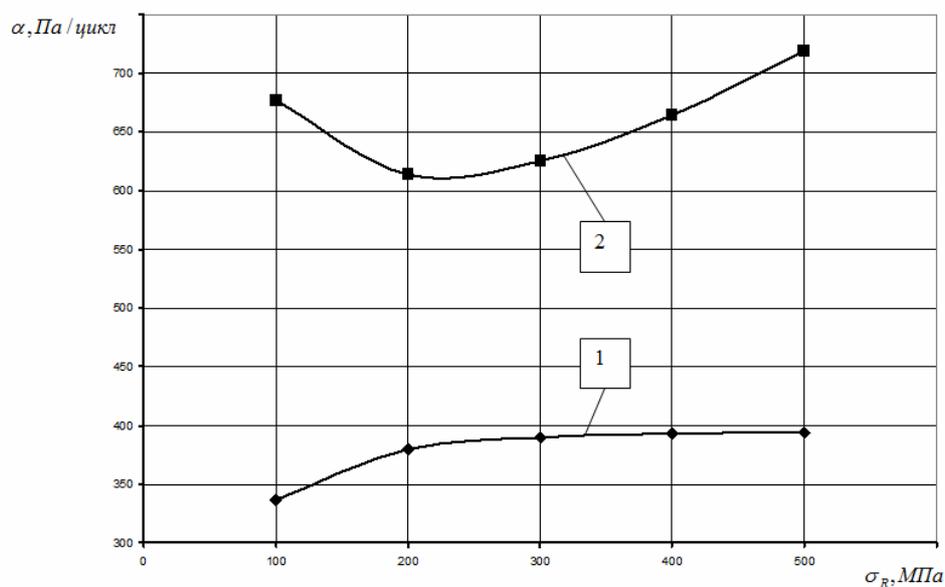


Рис. 2. Изменение величин α_{\max}^C и α_{\max}^W в зависимости от предела выносливости (по данным табл. 1):
1 – согласно зависимости 3; 2 – согласно зависимости 4

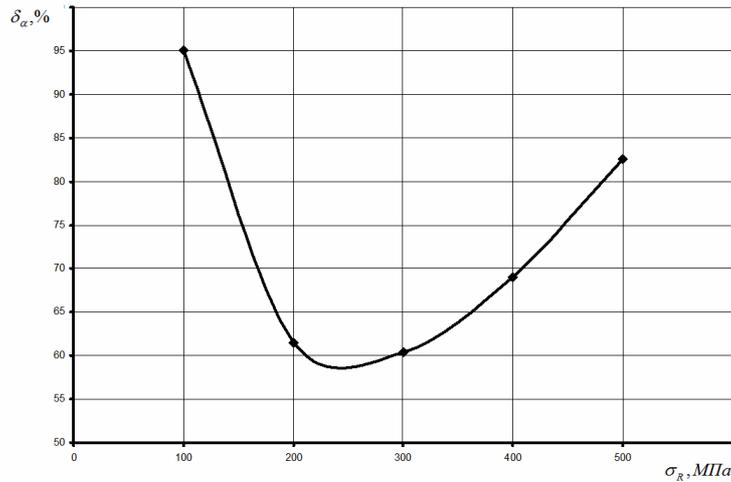


Рис. 3. Изменение относительного отклонения δ_α в зависимости от предела выносливости (по данным табл. 1)

Как видно из графика (рис. 3), минимальное значение отклонения соответствует пределу выносливости, значение которого близко к 240 МПа. Это объясняется тем, что корреляционные зависимости (5)-(8) получены для массивов экспериментальных данных, большинство из которых находились в диапазоне значений пределов выносливости 200-300 МПа.

Большое расхождение величин α_{\max}^C и α_{\max}^W (до 95%) объясняется тем, что уравнение Вейбулла при принятой одинаковой границе мало и многоциклового усталости приводит к завышенным значениям граничных напряжений σ_{zp}^C и σ_{zp}^W как это показано на рис. 4.

Поскольку начальное напряжение σ_1 при ускоренных испытаниях назначают не только ниже предела выносливости, но также и выше его, в статье исследовано влияние этого параметра на величину максимальной скорости увеличения нагрузки.

В рамках этой задачи были определены максимальные значения скоростей α_{\max}^C и α_{\max}^W в зависимости от величины начальной нагрузки σ_1 . При этом были использованы те же корреляционные зависимости (5)-(8). Диапазон изменения предела выносливости σ_R принимался равным 100 – 500 МПа, т.е., как и в предыдущем случае. Очевидно, что предельные значения α_{\max}^C и α_{\max}^W будут равны нулю при выполнении условий $\sigma_1 = \sigma_{zp}^C$ и $\sigma_1 = \sigma_{zp}^W$. Расчёт проведен по зависимостям (1) и (2). Его результаты представлены в табл. 2.

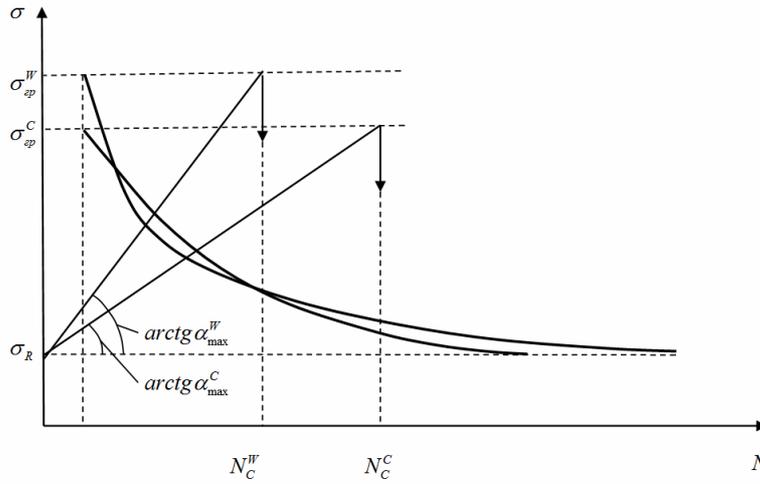


Рис. 4. Схема, пояснюющая расхождения скоростей α_{\max}^C и α_{\max}^W

Таблица 2

Расчётные значения максимальных скоростей α_{\max}^C и α_{\max}^W

$\bar{\sigma}_R = 100 \text{ МПа}$										
σ_1 , МПа	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
α_{\max}^C , Па/цикл	336,89	322,58	302,40	274,78	237,78	189,14	126,32	46,37	-	-
α_{\max}^W , Па/цикл	674,47	667,25	654,24	635,07	609,42	577,08	537,84	491,54	438,02	377,16
$\bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа}$										
σ_1 , МПа	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
α_{\max}^C , Па/цикл	373,50	364,62	352,54	336,30	314,74	286,45	249,72	202,47	142,23	66,09
α_{\max}^W , Па/цикл	609,43	596,97	576,28	547,38	510,30	465,05	411,63	350,06	280,35	202,50
$\bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа}$										
σ_1 , МПа	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
α_{\max}^C , Па/цикл	385,01	378,65	370,09	358,68	343,60	323,82	298,06	264,77	222,03	167,50
α_{\max}^W , Па/цикл	619,56	604,32	580,08	547,19	505,86	456,29	398,50	332,92	259,34	177,94

Продолжение табл. 2

$\bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа}$										
$\sigma_1, \text{ МПа}$	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
$\alpha_{\max}^C, \text{ Па/цикл}$	389,37	384,45	377,86	369,12	357,59	342,47	322,76	297,21	264,27	222,02
$\alpha_{\max}^W, \text{ Па/цикл}$	657,98	641,31	615,53	581,19	538,66	488,21	430,06	364,38	281,32	211,02
$\bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$										
$\sigma_1, \text{ МПа}$	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
$\alpha_{\max}^C, \text{ Па/цикл}$	390,98	386,98	381,64	374,58	365,30	353,06	337,14	316,46	289,73	255,32
$\alpha_{\max}^W, \text{ Па/цикл}$	712,60	695,23	668,92	634,36	592,01	542,19	485,17	421,14	350,29	272,77

Зависимости максимальных скоростей α_{\max}^C и α_{\max}^W от уровня начальной нагрузки σ_1 , превышающей предел выносливости, представлены на рис. 5.

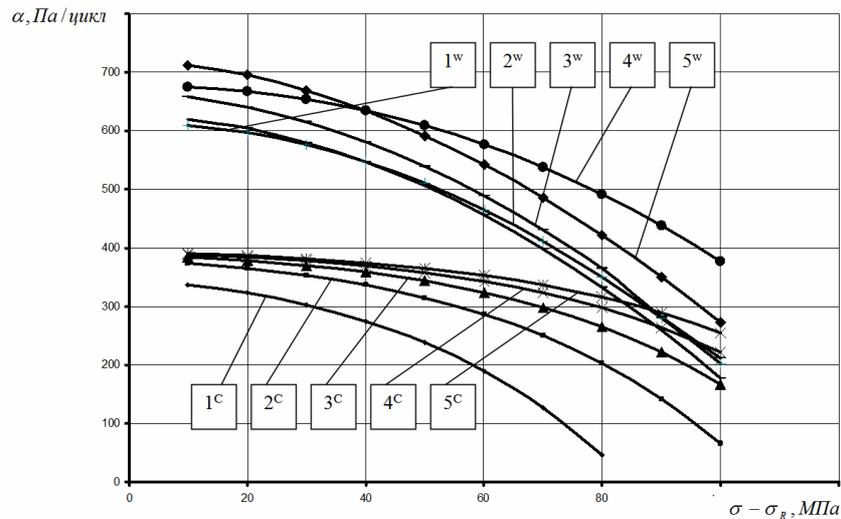


Рис. 5. Зависимости максимальных скоростей α_{\max}^C и α_{\max}^W от уровня начальной нагрузки $(\sigma_1 - \sigma_R)$:
кривые $1^C - 5^C$ и $1^W - 5^W$ построены соответственно для пределов выносливости 100, 200, 300, 400 и 500 МПа

Выводы. Проведенное исследование показало, что величины максимально допустимых скоростей α_{\max}^C и α_{\max}^W при $\sigma_1 \leq \sigma_R$ для степенного уравнения не превышают 400 Па/цикл, а Вейбулла – 750 Па/цикл. Учитывая, что степенное уравнение, как правило, имеет более высокий коэффициент корреляции, чем уравнение Вейбулла, ориентироваться следует именно на него и назначать эти скорости в пределах 300-400 Па/цикл.

Выбор скоростей увеличения напряжений в случае, когда начальная нагрузка превышает предел выносливости, может быть основан на данных, приведенных в табл. 2 и на рис. 5.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олейник Н.В., Скляр С.П. Ускоренные испытания на усталость. К.: Наук. думка, 1985. 304 с.
2. Олейник Н.В., Греченко П.И. Эквивалентный переход от ступенчатого нагружения к непрерывному при определении пределов выносливости деталей машин методом возрастающей нагрузки // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1987. Вып. 44. С. 60-65.
3. Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Курочкин Л.Я. Использование принципа плавно возрастающей нагрузки с различными скоростями роста и от различных начальных уровней при ускоренном определении рассеяния предела выносливости деталей машин // Одес. ин-т инж. мор. флота. Одесса, 1988. 20 с. Деп. в В/О «Мортехинформреклама», № 817-мф.
4. Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. К.: Наукова думка, 1981. 344 с.
5. Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Курочкин Л.Я. Использование принципа плавно возрастающей нагрузки с различными скоростями роста и от различных начальных уровней при ускоренном определении рассеяния предела выносливости деталей машин // Одес. ин-т инж. мор. флота. Одесса, 1988. 20 с. Деп. в В/О «Мортехинформреклама», № 817-мф.
6. Коноплёв А.В., Селюкова Е.В. Определение предела выносливости деталей машин методом Про с учётом взаимосвязи между его параметрами // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. 1988. Вып. 40. С. 102-104.

REFERENCES

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

2. Oleinik N.V., Grechenko P.I. *Ekvivalentni perehod ot stupenchatogo nagrugheniya k neprerivnomu pri opredelenii predelov vinoslivosti detalei mashin metodom vozrastayushei nagruzki* [The equivalent transition from step loading to continuous loading when determining the endurance limits of machine parts by the method of increasing load]. *Detali mashin: Respondenciya meghvedomstvennogo nauchno-tehnicheskogo sbornika (Machine details: Response to an interdepartmental scientific and technical digest)*. 1987. – Rel. 44. – 60-65 p. [in Russian].
3. Oleinik N.V., Konoplev A.V., Kurochkin L.Y. *Ispol'zovanie principa plavno vozrastayushei nagruzki s razlichnimi skorostyami i ot razlichnih nachalnih urovnei pri uskorennom opredelenii rasseyaniya predela vinoslivosti detalei mashin* [Using the principle of smoothly increasing load with different growth rates and from different initial levels with accelerated determination of the dispersion of the endurance limit of machine parts]. *Odes. inst. ingh. mor. flota (Odessa Institute of Marine Engineers)*. Odessa, 1988. 20 p. Dep. v V/O «Mortehinformreklama» (Deposited in the departmental organization «Marine Technical Information Adverti-sing»), № 817. – mf. [in Russian].
4. Troshenko V.T. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogociklovom nagrughenii* [Deformation and fracture of metals under multi-cycle loading]. Kiev: *Naukova dumka (Scientific thought)*, 1981. 344 p. [in Russian].
5. Konoplev A.V., Selukova E.V. *Opredelenie predela vinoslivosti detalei mashin metodom Pro s uchetom vzaimosvyazi magdu ego parametrami* [Determination of the endurance limit of machine parts using the Pro method, taking into account the relationship between its parameters]. *Detali mashin: Respondenciya meghvedomstvennogo nauchno-tehnicheskogo sbornika (Machine details: Response to an interdepartmental scientific and technical digest)*. 1987. Rel. 40. 102-104 p. [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 20.11.2019 р.