

УДК 539.4; 620.169.2

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, проф.  
профессор кафедры теоретической и прикладной механики<sup>1</sup>  
E-mail: bogal@tut.by

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук, проф.  
начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» – заведующий лабораторией  
приводных систем и технологического оборудования<sup>2</sup>  
E-mail: vladbas@mail.ru

А.А. ГЛАЗУНОВА  
научный сотрудник лаборатории приводных систем и технологического оборудования НТЦ «Технологии  
машиностроения и технологическое оборудование»<sup>2</sup>  
E-mail: glazunova.ann@mail.ru

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31.10.2023.

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА МНОГОСТУПЕНЧАТОГО НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛА КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

*Рассматривается возможность применения метода многоступенчатого нагружения (Локати) для расчетно-экспериментальной оценки предела контактной выносливости. Анализируются результаты применения метода Локати для определения медианного предела контактной выносливости образцов из алюминиевого сплава Д16 и углеродистой стали 45. Испытания проводились по схеме «вал — ролик» в условиях качения без проскальзывания. Варьировались критерии достижения предельного состояния, параметры режима многоступенчатого нагружения. Показано, что метод Локати и его основа — гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений — позволяет удовлетворительно оценивать значение предела контактной выносливости исследованных материалов.*

**Ключевые слова:** контактная усталость, долговечность, испытания, предел выносливости, метод многоступенчатого нагружения

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-29-36>

**Введение.** Как известно, необходимость применения ускоренных испытаний взамен классических диктуется их высокой экономичностью и малой длительностью. При этом результаты (пусть и приближенные) ускоренных испытаний могут быть вполне достаточными для принятия оперативных решений по совершенствованию конструкции или узла, освоению их производством в сжатые сроки. Трудоемкость ускоренных испытаний составляет 5...10 % трудоемкости классических, а продолжительность на порядок, а то и на два меньше [1].

Ускоренные методы предназначены для определения предела выносливости либо параметров функции пределов выносливости либо для построения кривой усталости. Они основываются на всякого рода гипотезах накопления усталостных повреждений в материалах, учитывают разные физические процессы, протекающие в материалах при циклическом нагружении, используют раз-

личные расчетные схемы для нахождения предела выносливости, дают определенную экономию времени и средств и имеют широкую область применения. Ускоренные испытания нашли применение в ряде отраслей промышленности, в том числе в приборо-, авиа-, автотракторостроении [2–5].

Методы ускоренной расчетно-экспериментальной оценки предела выносливости принято разделять на четыре группы [6, 7], одна из которых, основанная на результатах испытания образцов при программном изменении нагрузки, получила наибольшее распространение. В эту группу входит и метод Локати [8], на основе которого в СССР был разработан ГОСТ 19533-74, а затем методические указания РД 50-686-89 [9].

В методе Локати, базирующемся на гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений Пальмгрена–Майнера [10, 11], предполагается, что левая ветвь кривой усталости определена в вероятностном аспекте для изделий-аналогов

(образцов) или одной из предшествующих партий исследуемого материала. В этом случае необходимо испытание как минимум одного изделия (образца). Его проводят при ступенчатом возрастании нагрузки до разрушения образца. В ходе испытаний образец нагружают начальным напряжением  $\sigma_0$  и испытывают в течение  $n_0$  циклов. Без промежуточных пауз напряжение увеличивают на  $\Delta\sigma = \text{const}$  до величины  $\sigma_1$ , и на этом уровне напряжения испытания продолжают в течение  $n_1 = n_0$  циклов и т. д. до наступления предельного состояния. Число циклов на последней ступени напряжения  $n_k$  определяют при разрушении образца. Оно может быть равно или меньше числа циклов нагружения на предыдущих ступенях, т. е.  $n_k \leq n_i = \text{const}$ , где  $i = 1, \dots, k - 1$  ( $k$  — номер ступени, на которой происходит разрушение).

Оптимальный интервал начального уровня напряжения  $\sigma_0$  задают неравенством

$$0,9\sigma_{-1}^* \leq \sigma_0 \leq 1,0\sigma_{-1}^*, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}^*$  — ожидаемый предел выносливости.

Продолжительность испытаний  $n_i$  на каждой ступени нагружения также принимают постоянной.

Кроме этого необходимо построить три условные кривые усталости исследуемого материала, приблизительно соответствующие вероятности наступления предельного состояния 10, 50 и 90 %. Для каждой кривой усталости вычисляют суммы относительных долговечностей (накопленных повреждений).

По значениям сумм относительных долговечностей  $\sum_{i=1}^k (n_i/N_i)$  и соответствующим им значениям пределов выносливости каждой кривой усталости строится график в координатах  $\sum_{i=1}^k (n_i/N_i) - \sigma_{-1}$ , по которому находят графически или аналитически интерполяцией или экстраполяцией полученной зависимости искомое значение предела выносливости, соответствующее  $\sum_{i=1}^k (n_i/N_i) = 1$ .

Механизмы усталости механической (объемной) и контактной (поверхностной) во многом схожи [12, 13, 25–28], поэтому логично предположить, что метод многоступенчатого нагружения (Локати) может быть применен и для оценки предела контактной выносливости. Отметим, что первоначально гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений была предложена именно для подшипников качения [10], где имеет место контактная усталость. Несмотря на то, что данная гипотеза часто подвергается критике, она весьма популярна для оценки выносливости подшипниковых материалов [14–16].

**Методика проведения эксперимента и результаты для алюминиевого сплава Д16.** В лабораторных исследованиях на испытательном центре SZ-01 использовали пару трения, состоящую из стандартного цилиндрического образца из алюминиевого сплава Д16 и контробразца-ролика из стали 18ХГТ. На рисунке 1 изображена

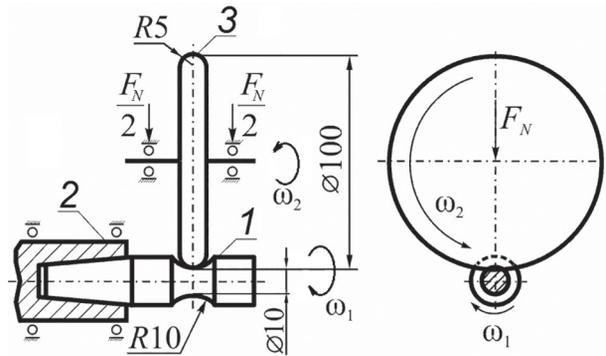


Рисунок 1 — Схема испытаний на контактную усталость:  
1 — образец; 2 — шпindelь; 3 — контробразец  
Figure 1 — Scheme of rolling-contact fatigue tests:  
1 — specimen; 2 — spindle; 3 — counterspecimen

схема испытания на контактную усталость пары трения и указаны основные размеры элементов этой пары. Цилиндрический образец 1 закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью  $\omega_1$ . К его рабочей зоне диаметром  $d = 10$  мм прижимается под действием контактной нагрузки  $F_N$  вращающийся ролик 3.

Для построения кривой контактной усталости испытания вели при частоте 50 Гц до достижения образцом предельного состояния. За предельное состояние принимали величину сближения осей пары трения  $\delta = 100$  мкм (за счет преимущественно пластической деформации поверхности образца). Базу испытаний приняли равной  $10^7$  циклов. Кривую контактной усталости (рисунок 2) строили по параметру  $F_N$ . Достоинство нагрузочного параметра  $F_N$  состоит в том, что это не расчетная, а физическая величина, задаваемая и измеряемая при испытаниях, и она остается таковой в любых условиях на контакте. В двойных логарифмических координатах получили прямую линию, уравнение которой вида  $y = ax + b$ , где  $x = \lg N$  и  $y = \lg F_N$ , приведено на графике (см. рисунок 2).

В связи с ограниченными количеством имеющихся образцов и длительностью проводимых испытаний находили предел ограниченной контактной выносливости на заданной базе. Он составил  $F_N^* = 36$  Н, а показатель наклона кривой усталости  $m = 4$ .

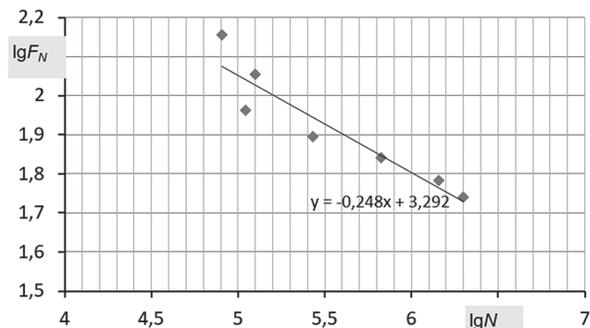


Рисунок 2 — Кривая контактной усталости образцов из сплава Д16  
Figure 2 — Rolling-contact fatigue curve of D16 alloy specimens

Далее для реализации метода многоступенчатого нагружения, как известно, требуется построить условные кривые усталости, одна из которых, соответствующая вероятности наступления предельного состояния 50 %, у нас уже имеется. Две другие обычно строят для вероятности наступления предельного состояния 10 и 90 % соответственно.

Принимаем, что  $m^{90} = m^{10} = m^{50} = m = 4$  (верхний индекс указывает на вероятность). Затем находим абсциссы точек перелома  $N_G^{90}$  и  $N_G^{10}$  кривых контактной усталости по формулам:

$$N_G^{90} = 2/3 N_G^{50}; \quad N_G^{10} = 1,5 N_G^{50}.$$

Имеем  $N_G^{90} = 6,67 \cdot 10^7$  циклов;  $N_G^{10} = 1,5 \cdot 10^7$  циклов.

Значения пределов ограниченной контактной выносливости на заданной базе для условных кривых контактной усталости с вероятностью 10 и 90 %  $F_N^{*90}$  и  $F_N^{*10}$  могут быть получены с использованием меры рассеяния  $T_{FN} = F_N^{*90} / F_N^{*10}$  по формулам:

$$F_N^{*90} = F_N^* \frac{2T_{FN}}{1+T_{FN}}; \tag{2}$$

$$F_N^{*10} = F_N^* \frac{2}{1+T_{FN}}, \tag{3}$$

т. е. принимая  $T_{FN} = 0,8$  получаем  $F_N^{*90} = 32$  Н,  $F_N^{*10} = 40$  Н.

Далее строим все три кривые контактной усталости на одном графике (рисунок 3) и формируем программу ступенчатого нагружения. Продолжительность  $n_i$  испытаний на каждой ступени нагружения принимаем постоянной. Образец нагружаем начальным уровнем контактной нагрузки  $F_{N_0} = 30$  Н и испытываем в течение  $n_0 = 6 \cdot 10^4$  циклов. Без промежуточных пауз нагрузку увеличиваем на  $\Delta F_N = 10$  Н = const до уровня  $F_{N_1}$  и на этом уровне испытываем в течение  $n_1 = n_0 = 6 \cdot 10^4$  циклов и т. д. до наступления предельного состояния.

На рисунке 4 изображен график многоступенчатого нагружения образца из сплава Д16. Пре-

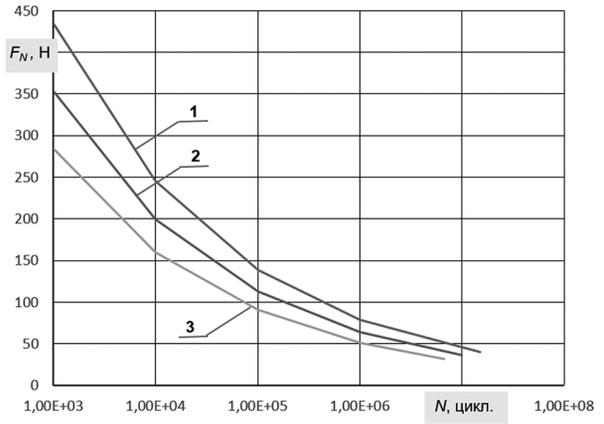


Рисунок 3 — Условные кривые контактной усталости образцов из сплава Д16, соответствующие вероятности наступления предельного состояния 10 (1), 50 (2) и 90 % (3)  
Figure 3 — Conditional rolling-contact fatigue curves of D16 alloy specimens corresponding to probability of limit state occurrence 10 (1), 50 (2) and 90 % (3)

дельное состояние (ПС) наступило на 9-й ступени нагружения.

Расчет долговечности  $N_i$  для каждой кривой контактной усталости ведем в табличной форме (таблица 1), там же подсчитываем значения  $\sum n_i / N_{Fi}$  сумм относительных долговечностей для каждой кривой.

На основании полученных данных строим график в координатах  $\lg(\sum n_i / N_i) - F_N^*$  (рисунок 5),

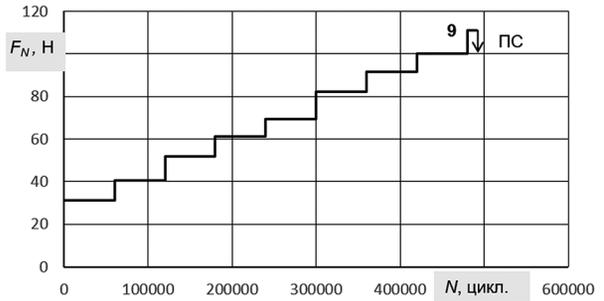


Рисунок 4 — График нагружения образца из сплава Д16  
Figure 4 — Graph of loading of D16 alloy specimen

Таблица 1 — Расчет сумм относительных долговечностей по условным кривым контактной усталости  
Table 1 — Calculation of relative life sums from conditional rolling-contact fatigue curves

$F_N$ , Н	Число циклов $n \cdot 10^3$	1-я кривая, $F_N^{*10} = 40$ Н		2-я кривая, $F_N^{*50} = 36$ Н		3-я кривая, $F_N^{*90} = 32$ Н	
		$N$ , циклов	$n / N$	$N$ , циклов	$n / N$	$N$ , циклов	$n / N$
30	60	$\infty$	0	$\infty$	0	$\infty$	0
40	60	$1,49 \cdot 10^7$	0,004	$6,46 \cdot 10^6$	0,009	$2,70 \cdot 10^6$	0,022
50	60	$6,06 \cdot 10^6$	0,0099	$2,63 \cdot 10^6$	0,022	$1,10 \cdot 10^6$	0,055
60	60	$2,90 \cdot 10^6$	0,021	$1,26 \cdot 10^6$	0,048	$5,26 \cdot 10^5$	0,114
70	60	$1,56 \cdot 10^6$	0,038	$6,76 \cdot 10^5$	0,089	$2,83 \cdot 10^5$	0,212
80	60	$9,1 \cdot 10^5$	0,066	$3,94 \cdot 10^5$	0,152	$1,65 \cdot 10^5$	0,364
90	60	$5,66 \cdot 10^5$	0,106	$2,46 \cdot 10^5$	0,244	$1,03 \cdot 10^5$	0,585
100	60	$3,7 \cdot 10^5$	0,162	$1,61 \cdot 10^5$	0,374	$6,71 \cdot 10^4$	0,894
110	11	$2,52 \cdot 10^5$	0,238	$1,09 \cdot 10^5$	0,549	$4,56 \cdot 10^4$	1,314
$\Sigma$	—	—	0,6449	—	1,487	—	3,560

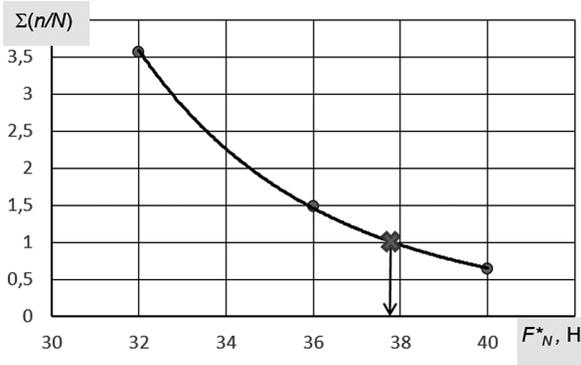


Рисунок 5 — График в координатах  $\lg(\Sigma n_i/N_i) - F_N^*$  для определения медианного значения предела контактной выносливости образцов из сплава Д16  
 Figure 5 — Graph in coordinates  $\lg(\Sigma n_i/N_i) - F_N^*$  for determining the median value of the contact endurance limit of D16 alloy specimens

по которому производим оценку медианы предела выносливости  $\bar{F}_N = 37,7$  Н, соответствующую условию

$$\sum_{i=1}^k (n_i / N_i) = 1. \quad (4)$$

**Методика проведения эксперимента и результаты для углеродистой стали 45.** Рассмотрим результаты испытаний по схеме, изображенной на рисунке 1, другой пары трения — цилиндрического образца из углеродистой стали 45 и ролика из стали 25ХГТ (после улучшения) [17]. Рабочие поверхности образцов и роликов полировали. Испытание на контактную усталость проводили на машине СИ при частоте 50 Гц в условиях нормальной температуры. При испытаниях в зону контакта капельным способом подавали смазочный материал (масло марки МГЕ-46) со скоростью 12–14 капель в минуту. База испытаний составляла  $2 \cdot 10^7$  циклов.

Максимальные контактные напряжения  $p_0$  в центре площадки контакта образца и ролика определяли в зависимости от заданной контактной нагрузки  $F_N$  по формуле [18]

$$p_0 = 0,365 n_\sigma \left[ F_N (\Sigma \rho / \eta)^2 \right]^{1/3}, \quad (5a)$$

где  $n_\sigma$  — коэффициент, определяемый по [18] в зависимости от величины  $\Omega$ , которую рассчитывают по формуле

$$\Omega = ((\rho_{11} - \rho_{12}) + (\rho_{21} - \rho_{22})) / \Sigma \rho, \quad (5b)$$

где  $F_N$  — контактная нагрузка, Н;  $\Sigma \rho = \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}$  — сумма главной кривизны поверхностей соприкасающихся тел в точке первоначального контакта;  $\rho = 1/R$  — главная кривизна поверхности: считается положительной, если поверхность выпуклая, и отрицательной, если вогнутая;  $\rho_{11} = 1/R_{11}$  и  $\rho_{12} = 1/R_{12}$  — главная кривизна контробразца (рисунок 6) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;  $\rho_{21} = 1/R_{21}$  и  $\rho_{22} = 1/R_{22}$  — главная кривизна образца (см. рисунок 6) в двух взаимно

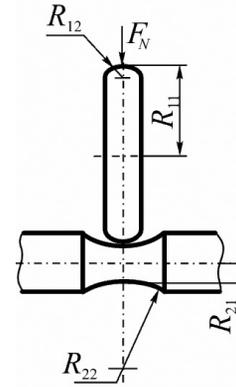


Рисунок 6 — К расчету напряжений в зоне контакта образца и контробразца  
 Figure 6 — To the calculation of stresses in the contact zone of specimen and counterspecimen

перпендикулярных плоскостях;  $\eta$  — коэффициент, учитывающий упругие характеристики материалов контактирующих тел:

$$\eta = (1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2, \quad (5c)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — коэффициенты Пуассона материалов образца и контробразца;  $E_1$  и  $E_2$  — модули нормальной упругости материалов образца и контробразца, МПа.

Если образец и контробразец изготовлены из стали ( $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ ;  $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$  МПа), то формула (5a) примет вид:

$$p_0 = 837,5 n_\sigma F_N^{1/3} (\Sigma \rho)^{2/3}. \quad (5d)$$

Для заданных размеров образца ( $R_{21} = 5$  мм;  $R_{22} = 10$  мм) и контробразца ( $R_{11} = 50$  мм;  $R_{12} = 5$  мм)

$$p_0 = 378,85 F_N^{1/3}. \quad (5e)$$

Критерием предельного состояния принята критическая плотность ямок выкрашивания на поверхности трения образца, такая что  $S_\Sigma/S_0 = 0,1$  (где  $S_\Sigma$  — средняя суммарная площадь ямок выкрашивания;  $S_0$  — средняя площадь дорожки катания).

Кривая контактной усталости образцов из стали 45 приведена на рисунке 7, там же даны

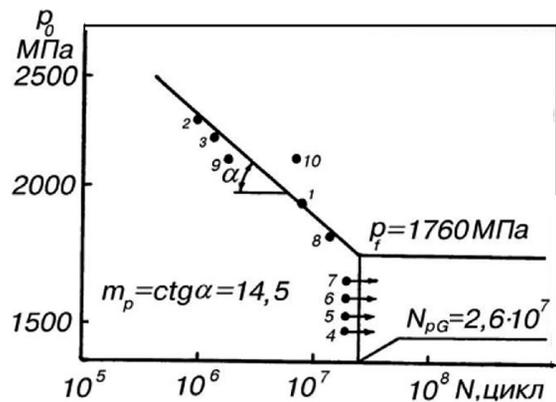


Рисунок 7 — Кривая контактной усталости образца из стали 45 [17]  
 Figure 7 — Rolling-contact fatigue curve of 0.45% carbon steel specimen [17]

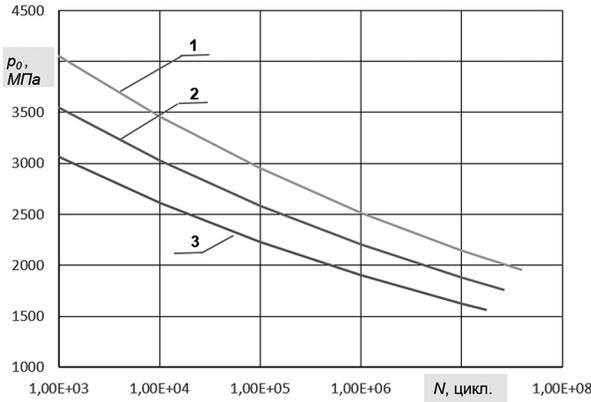


Рисунок 8 — Условные кривые контактной усталости образцов из стали 45, соответствующие вероятности наступления предельного состояния 10 (1), 50 (2) и 90 % (3)  
 Figure 8 — Conditional rolling-contact fatigue curves of 0.45% carbon steel specimens corresponding to probability of limit state occurrence 10 (1), 50 (2) and 90 % (3)

значения ее параметров — предела контактной выносливости  $p_f$ , абсциссы точки перелома  $N_{pG}$  и показателя наклона левой ветви  $m_p$ .

Условные кривые контактной усталости образцов из стали 45 (рисунок 8) строили по методике, изложенной выше. Принимаем, что  $m_p^{90} = m_p^{50} = m_p^{10} = m_p = 14,5$ . Абсциссы точек перелома  $N_{pG}^{90}$  и  $N_{pG}^{10}$  кривых контактной усталости  $N_{pG}^{90} = 1,73 \cdot 10^7$  циклов;  $N_{pG}^{10} = 3,9 \cdot 10^7$  циклов. Значения пределов контактной выносливости на заданной базе для условных кривых контактной усталости с вероятностью 10 и 90 %:  $p_f^{90} = 1564$  МПа;  $p_f^{10} = 1956$  МПа.

При формировании программы ступенчатого нагружения (рисунок 9) были приняты следующие значения исходных параметров: начальный уровень контактных напряжений  $p_n = 1400$  МПа, интервал приращения контактных напряжений  $\Delta p_i = 200$  МПа, продолжительность  $n_i$  испытаний на каждой ступени нагружения  $n_i = 10^5$  циклов [13–28]. Предельное состояние, в качестве которого выбрали величину сближения осей пары трения  $\delta = 75$  мкм [19], наступило в конце 6-й ступени нагружения.

Расчет долговечности  $N_i$  и сумм относительных долговечностей  $\Sigma n_i / N_{fi}$  для каждой кривой

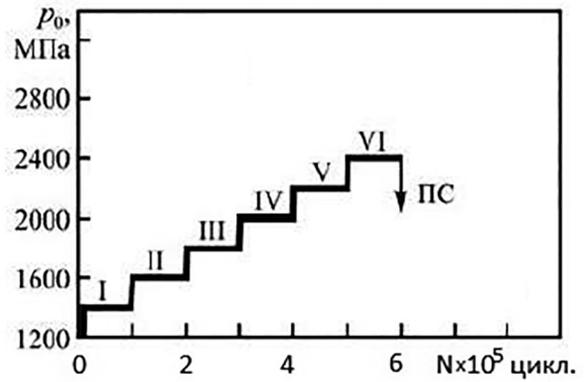


Рисунок 9 — График нагружения образца из стали 45  
 Figure 9 — Graph of loading of 0.45% carbon steel specimen

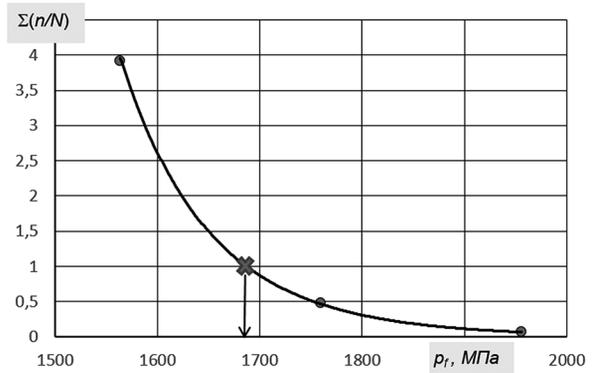


Рисунок 10 — График в координатах  $\lg(\Sigma n_i / N_i) - p_f$  для определения медианного значения предела контактной выносливости образцов из стали 45  
 Figure 10 — Graph in coordinates  $\lg(\Sigma n_i / N_i) - p_f$  for determining the median value of the contact endurance limit of 0.45% carbon steel specimens

контактной усталости ведем в табличной форме (таблица 2). Далее строим график в координатах  $\lg(\Sigma n_i / N_i) - p_f$  (рисунок 10), по которому производим оценку медианы предела выносливости  $p_f \approx 1675$  МПа, соответствующую условию (4).

Как можно заметить, полученное медианное значение предела контактной выносливости несколько отличается от определенного путем стандартных испытаний на контактную усталость (на ~4,8 %), что можно признать вполне удовлетворительным расхождением. При этом надо подчеркнуть, что критерии предельного состоя-

Таблица 2 — Расчет сумм относительных долговечностей по условным кривым контактной усталости образцов стали 45  
 Table 2 — Calculation of relative life sums from conditional rolling-contact fatigue curves of 0.45% carbon steel specimens

$p_0$ , МПа	Число циклов $n \cdot 10^5$	1-я кривая, $p_f^{10} = 1956$ МПа		2-я кривая, $p_f^{50} = 1760$ МПа		3-я кривая, $p_f^{90} = 1564$ МПа	
		$N$ , циклов	$n / N$	$N$ , циклов	$n / N$	$N$ , циклов	$n / N$
1400	1	$\infty$	0	$\infty$	0	$\infty$	0
1600	1	$7,183 \cdot 10^8$	0,0001	$1,04 \cdot 10^8$	0,001	$1,24 \cdot 10^7$	0,008
1800	1	$1,302 \cdot 10^8$	0,0008	$1,88 \cdot 10^7$	0,005	$2,25 \cdot 10^6$	0,044
2000	1	$2,826 \cdot 10^7$	0,0035	$4,07 \cdot 10^6$	0,025	$4,89 \cdot 10^5$	0,204
2200	1	$7,09 \cdot 10^6$	0,014	$1,02 \cdot 10^6$	0,098	$1,23 \cdot 10^5$	0,813
2400	1	$2,01 \cdot 10^6$	0,050	$2,89 \cdot 10^5$	0,346	$3,48 \cdot 10^4$	2,875
$\Sigma$	—	—	0,0684	—	0,475	—	3,914

ния при стандартных испытаниях на контактную усталость и при реализации метода многоступенчатого нагружения отличались, хотя уровень вибрации и шума, соответствующий предельному состоянию, был в обоих случаях приблизительно одинаковым.

**Заключение.** Проведенные эксперименты показали, что метод многоступенчатого нагружения может эффективно применяться для ускоренной расчетно-экспериментальной оценки пределов контактной выносливости металлических материалов. Представляется целесообразным провести дополнительные исследования по экспериментальному обоснованию таких параметров, как начальный уровень нагрузки (напряжения), его приращение, длительность ступени нагружения, применимости того или иного критерия предельного состояния для данного метода. Также было бы полезно оценить применимость рассматриваемого метода для иных классов материалов, например полимерных, керамических, композиционных, различных покрытий, что особенно актуально для современных скоростных механических передач.

### Список литературы

1. Олейник, Н.В. Ускоренные испытания на усталость / Н.В. Олейник, С.П. Склар. — Киев: Наук. думка, 1985. — 304 с.
2. Бегагоен, И.А. Исследование и методика ускоренных испытаний на выносливость ступенчато-увеличивающейся нагрузкой / И.А. Бегагоен, Г.А. Руденко, О.И. Антонюк // Изв. вузов. Машиностроение. — 1970. — № 2. — С. 19–24.
3. Благодарный, В.М. Ускоренные ресурсные испытания приборных зубчатых приводов / В.М. Благодарный. — М.: Машиностроение, 1980. — 113 с.
4. Дмитриченко, С.С. Современные методы ускоренных испытаний машин на сопротивление усталости / С.С. Дмитриченко // Вестн. машиностроения. — 1967. — № 2. — С. 7–12.
5. Почтенный, Е.К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложения / Е.К. Почтенный. — Минск: Наука и техника, 1973. — 214 с.
6. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ. пособие: в 2 т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 1. — 510 с.
7. Трошенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Трошенко. — Киев: Наук. думка, 1981. — 343 с.
8. Locati, L. Le prove di fatica come ausilio alla prodotta sone ed elle predusioni / L. Locati // La Metallurgia Italiana. — 1955. — No. 9. — Pp. 78–83.
9. Надежность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций: методич. указания РД 50-686-89. — Введ. 01.01.1990. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1990. — 27 с.
10. Palmgren, A. Die Lebensdauer von Kugellagern / A. Palmgren // Z. Ver. Dtsch. Ing. — 1924. — Bd. 2, Nr. 14. — S. 339–341.
11. Miner, M.A. Cumulative damage in fatigue / M.A. Miner // J. Appl. Mech. — 1945. — Vol. 12, iss. 3. — Pp. 159–164. — DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4009458>.
12. Сосновский, Л.А. Основы трибофатика: учеб. пособие для студ. технич. вузов: в 2 т. / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с. — Т. 2. — 235 с.
13. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
14. Londhe, N.D. Reevaluation of rolling element bearing load-life equation based on fatigue endurance data / N.D. Londhe, N.K. Arakere, R.T. Haftka // Tribology Transactions. — 2015. — Vol. 58, iss. 5. — Pp. 815–828. — DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1021943>.
15. Romanowicz, P.J. Fatigue life assessment of rolling bearings made from AISI 52100 bearing steel / P.J. Romanowicz, B. Szybiński // Materials. — 2019. — Vol. 12, iss. 3. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12030371>.
16. Hwang, J.-I. A new approach for the prediction of fatigue life in rolling bearings based on damage accumulation theory considering residual stresses [Electronic resource] / J.-I. Hwang, G. Poll // Front. Manuf. Technol. — 2022. — Vol. 2. — DOI: <https://doi.org/10.3389/fmtec.2022.1010759>.
17. Богданович, А.В. Закономерности накопления повреждений стали 45 при контактно-механической усталости / А.В. Богданович, С.А. Тюрин, Е.Л. Сенькова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — Т. 62, № 2. — С. 42–45.
18. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость: Р 50-54-30-87. — Введ. 08.12.1987, взамен ГОСТ 25.501-78. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам; ВНИИМАШ, 1988. — 64 с.
19. Сосновский, Л.А. Экспериментальное исследование контактно-механической усталости стали 45 методом многоступенчатого нагружения / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, С.А. Тюрин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — Т. 62, № 3. — С. 30–34.
20. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость: СТБ 1233–2000. — Введ. 01.10.00. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2007. — 8 с.
21. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость: ГОСТ 30754-2001. — Введ. 01.07.02. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. — 32 с.
22. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования: ГОСТ 30755-2001. — Введ. 01.07.02. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. — 8 с.
23. Исследование влияния химико-термической обработки на сопротивление многоциклового усталости стали 20Х3МВФ в условиях асимметричного цикла нагружения / М.Р. Орлов [и др.] // Деформация и разрушение материалов. — 2015. — № 12. — С. 18–24.
24. Беляев, М.С. Многоцикловая усталость монокристаллического жаропрочного никелевого сплава / М.С. Беляев, М.Р. Орлов // Металлург. — 2018. — № 1. — С. 74–81.
25. Еловой, О.М. Комплексная оценка служебных свойств композиционных материалов / О.М. Еловой, М.П. Лобкова, А.А. Глазунова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2022. — Минск, Вып. 11. — С. 99–102.
26. Еловой, О.М. Влияние модифицирования деталей с керамическими (МДО-покрытиями) на свойства при качении и скольжении / О.М. Еловой, А.В. Богданович, А.А. Глазунова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2022. — Минск, Вып. 11. — С. 317–321.
27. Басинюк, В.Л. Универсальный роботизированный комплекс для механических и триботехнических испытаний / В.Л. Басинюк, М.П. Лобкова, И.Д. Тычинская // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2023. — Минск, Вып. 12. — С. 92–94.
28. Волкотруб, Р.Е. Экспресс анализ механических свойств наноструктурированных материалов / Р.Е. Волкотруб, А.А. Глазунова, М.П. Лобкова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2023. — Минск, Вып. 12. — С. 349–351.

BOGDANOVICH Alexander V., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: bogal@tut.by

BASINIUK Vladimir L., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment” – Head of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment<sup>2</sup>

E-mail: vladbas@mail.ru

GLAZUNOVA Anna A.

Researcher of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”<sup>2</sup>

E-mail: glazunova.ann@mail.ru

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 31 October 2023.

## ON THE USE OF THE METHOD OF MULTISTAGE LOADING FOR COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE CONTACT ENDURANCE LIMIT

*The possibility of applying the method of multistage loading (Lokati) is considered for the calculation and experimental evaluation of the contact endurance limit. The results of applying the Lokati method to determine the median contact endurance limit of specimens made of aluminum alloy Д16 (D16) and 0.45% carbon steel are analyzed. The tests were carried out according to the scheme “shaft — roller” in rolling conditions without slipping. The criteria for reaching the limit state, the parameters of the multistage loading mode were varied. It is shown that the Lokati method and its basis, the hypothesis of linear accumulation of fatigue damage, make it possible to satisfactorily assess the value of the contact endurance limit of the studied materials.*

**Keywords:** rolling-contact fatigue, durability, tests, endurance limit, multistage loading method

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-29-36>

### References

- Oleynik N.V., Sklyar S.P. *Uskorennyye ispytaniya na ustalost* [Accelerated fatigue tests]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1985. 304 p. (in Russ.).
- Begagoen I.A., Rudenko G.A., Antonyuk O.I. Issledovanie i metodika uskorennykh ispytaniy na vyнослиvost stupenchatou-uvlechivayushcheyso nagruzkoj [Research and methodology of accelerated endurance tests with a stepwise increasing load]. *BMSTU journal of mechanical engineering*, 1970, no. 2, pp. 19–24 (in Russ.).
- Blagodarnyy V.M. *Uskorennyye resursnye ispytaniya pribornykh zubchatykh privodov* [Accelerated service life tests of instrument gear drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 113 p. (in Russ.).
- Dmitrichenko S.S. *Sovremennyye metody uskorennykh ispytaniy mashin na soprotivlenie ustalosti* [Modern methods of accelerated testing of machines for fatigue resistance]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1967, no. 2, pp. 7–12 (in Russ.).
- Pochtennyy E.K. *Kineticheskaya teoriya mekhanicheskoy ustalosti i ee prilozheniya* [Kinetic theory of mechanical fatigue and its applications]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973. 214 p. (in Russ.).
- Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov. Tom 1* [Fatigue resistance of metals and alloys. Volume 1]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1987. 510 p. (in Russ.).
- Troshchenko V.T. *Deformirovaniye i razrusheniye metallov pri mnogotsiklovom nagruzhении* [Deformation and destruction of metals under multicycle loading]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1981. 343 p. (in Russ.).
- Locati L. Le prove di cafica come ausilio alla prodetta sone ed elle predusioni. *La metallurgia italiana*, 1955, no. 9, pp. 78–83.
- Methodological guidelines RD 50-686-89. *Nadezhnost v tekhnike. Metody uskorennykh ispytaniy na ustalost dlya otsenki predelov vyнослиvosti materialov, elementov mashin i konstruktstiy* [Reliability in machinery. Accelerated fatigue testing methods for assessing the endurance limits of materials, machine elements and structures]. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1990. 27 p. (in Russ.).
- Palmgren A. Die Lebensdauer von Kugellagern. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1924, vol. 2, no. 14, pp. 339–341.
- Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of applied mechanics*, 1945, vol. 12, iss. 3, pp. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4009458>.
- Sosnovskiy L.A. *Osnovy tribofatiki* [Fundamentals of tribo-fatigue]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2003. Vol. 1, 246 p. Vol. 2, 235 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Mekhanika iznosoustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear-resistant damage]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2007. 434 p. (in Russ.).
- Londhe N.D., Arakere N.K., Haftka R.T. Reevaluation of rolling element bearing load-life equation based on fatigue endurance data. *Tribology transactions*, 2015, vol. 58, iss. 5, pp. 815–828. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1021943>.

15. Romanowicz P.J., Szybiński B. Fatigue life assessment of rolling bearings made from AISI 52100 bearing steel. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12030371>.
16. Hwang J.-I., Poll G. A new approach for the prediction of fatigue life in rolling bearings based on damage accumulation theory considering residual stresses. *Frontiers in manufacturing technology*, 2022, vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmtec.2022.1010759>.
17. Bogdanovich A.V., Tyurin S.A., Senkova E.L. Zakonomernosti nakopleniya povrezhdeniy stali 45 pri kontaktno-mekhanicheskoy ustalosti [Patterns of accumulation of damage to 0.45% carbon steel during mechano-rolling fatigue]. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 1996, vol. 62, no. 2, pp. 42–45 (in Russ.).
18. R 50-54-30-87. *Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody ispytaniy na kontaktnuyu ustalost* [Calculations and strength tests. Methods of testing for mechano-rolling fatigue]. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., VNIIN-MASH Publ., 1988. 64 p. (in Russ.).
19. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Tyurin S.A. Eksperimentalnoe issledovanie kontaktno-mekhanicheskoy ustalosti stali 45 metodom mnogostupenchatogo nagruzheniya [Experimental investigation of the 0.45% carbon steel during mechano-rolling fatigue by the method of multistage loading]. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 1996, vol. 62, no. 3, pp. 30–34 (in Russ.).
20. Standard of Belarus STB 1233–2000. *Tribofatika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. Uskorennye ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost* [Tribo-fatigue. Methods of wear-fatigue testing. Accelerated tests for mechano-rolling fatigue]. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2007. 8 p. (in Russ.).
21. State Standard 30754-2001. *Tribofatika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. Ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost* [Tribo-fatigue. Wear-fatigue test methods. Mechano-rolling fatigue tests]. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2002. 32 p. (in Russ.).
22. State Standard 30755-2001. *Tribofatika. Mashiny dlya iznosoustalostnykh ispytaniy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Tribo-fatigue. Machines for wear-fatigue testing. General technical requirements]. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2002. 8 p. (in Russ.).
23. Orlov M.R., Morozova L.V., Terekhin A.M., Naprienko S.A., Avtaev V.V. Issledovanie vliyaniya khimiko-termicheskoy obrabotki na soprotivlenie mnogotsiklovoy ustalosti stali 20Kh3MVF v usloviyakh asimmetrichnogo tsikla nagruzheniya [Influence study of thermochemical treatment on high-cycle fatigue strength of 20Kh3MVF steel under non-symmetric fatigue cycle conditions]. *Deformation and fracture of materials*, 2015, no. 12, pp. 18–24 (in Russ.).
24. Belyaev M.S., Orlov M.R. Mnogotsiklovaya ustalost monokristallicheskogo zharoprochnogo nikelovogo splava [High cycle fatigue of single crystal nickel superalloy]. *Metallurg*, 2018, no. 1, pp. 74–81 (in Russ.).
25. Yelovoy O.M., Lobkova M.P., Hlazunova H.A. Kompleksnaya otsenka sluzhebnykh svoystv kompozitsionnykh materialov [Comprehensive assessment of the service properties of composite materials]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2022, iss. 11, pp. 99–102 (in Russ.).
26. Yelovoy O.M., Bogdanovich A.V., Hlazunova H.A. Vliyanie modifitsirovaniya detaley s keramicheskimi MDO-pokrytiyami na svoystva pri kachenii i skolzhenii [Influence of modifications of parts with ceramic microarc oxidation coatings on service properties in rolling and sliding]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2022, iss. 11, pp. 317–321 (in Russ.).
27. Basiniuk V.L., Lobkova M.P., Tychinskaya I.D. Universalnyy robotizirovanny kompleks dlya mekhanicheskikh i tribotekhnicheskikh ispytaniy [Universal robotic complex for mechanical and tribotechnical tests]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2023, iss. 12, pp. 92–94 (in Russ.).
28. Volkotrub R.E., Glazunova A.A., Lobkova M.P. Ekspres analiz mekhanicheskikh svoystv nanostrukturirovannykh materialov [Express analysis of the mechanical properties of nanostructured materials]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2023, iss. 12, pp. 349–351 (in Russ.).