

УДК 539.385

<https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.168>

**Д. К. ДЖАКИЯЕВ, С. ЖУНИСБЕКОВ\*, С. Ж. ЖАШЕН,  
Б. Д. ДЖАКИЯЕВ**

*Таразский региональный университет им. М.Х.Дулати, г. Тараз, Казахстан*

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ**

*Предложена статистическая модель усталостного разрушения, позволяющая аналитически определять долговечность детали, работающей при циклическом сложном неоднородном напряженном состоянии и нестационарном режиме нагружения. Проведен сравнительный анализ результатов испытаний образцов и деталей стали 45 с целью оценки эффективности статистической модели.*

**Ключевые слова:** *циклическое нагружение, долговечность, сложное неоднородное напряженное состояние, статистическая модель усталостного разрушения детали.*

При эксплуатации многие элементы оборудования и детали машин неоднократно испытывают действие периодически изменяющихся во времени по величине и знаку сил. Установлено, что разрушение элементов оборудования и деталей машин при их нагружении повторно-переменными силами происходит вследствие развития трещин усталости.

Вопросы прогнозирования долговечности элементов и деталей машин в условиях сложного неоднородного напряженного состояния и нестационарного нагружения являются наиболее сложными.

Расчетный метод для оценки влияния градиента напряжений и абсолютных размеров детали, основанный на модели слабого звена по Вейбуллу, включен в ГОСТ 25.504-82, который составлен на основе работ В.П. Когаева и некоторых других исследователей.

Лежащая в основе этого метода статистическая теория подобия и известные вероятностные методы расчета на усталость связаны с рядом допущений, таких как учет при вычислении критерия подобия в условиях сложного напряженного состояния только первого главного напряжения, независимость формы критерия подобия от механиче-

---

\* E-mail корреспондирующего автора: tar-ti@mail.ru

ских свойств материала детали и образцов, возможность отдельного определения критериев подобия по нормальным и касательным напряжениям в случае одновременного изгиба и кручения вала, возможность отдельного определения эквивалентных режимов нагружения по нормальным и касательным напряжениям в указанном случае вала, если нагружение является нестационарным. Эти допущения вносят в расчет определенные погрешности, которые проявляются в различной степени в зависимости от вида циклического напряженного состояния и характера нагружения.

В работах [1-6] предложена статистическая модель многоциклового усталости, позволяющая по данным испытаний лабораторных образцов находить распределение долговечности детали, работающей в произвольном сложном неоднородном напряженном состоянии и нестационарном нагружении. Данная статистическая модель строится на основе детерминированной энергетической модели усталостного разрушения элемента материала и гипотезы слабого звена по Вейбуллу.

В указанных работах построено энергетическое уравнение многоциклового усталостных повреждений, имеющее в общем случае нестационарного нагружения следующий вид

$$P(N) = \frac{\sigma_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^N \varphi(H_k, R_k), \quad (1)$$

где  $P(N)$  – поврежденность, накопившаяся к  $N$ -му циклу нагружения;  $\sigma_{\max}(N)$  – максимальное напряжение цикла на момент определения  $P$ ;  $\bar{\sigma}_p$  – истинное сопротивление разрыву;  $R_k$  – коэффициент асимметрии  $k$ -го цикла;  $H_k$  – безразмерный параметр, зависящий от необратимой работы деформирования, совершаемой в каждом цикле нагружения.

С целью экспериментальной проверки статистической модели были поставлены испытания на усталость пластинчатых образцов стали 45 с круглым отверстием и испытания на усталость лабораторных образцов той же стали на циклическое растяжение-сжатие. Результаты последних испытаний приняты за базовые при определении сопротивления усталости материала, а результаты испытаний пластин как конструктивных элементов, работающих в сложном неоднородном напряженном состоянии и нестационарном нагружении, использованы для сопоставления теории с прямыми опытными данными. Пластинчатые образцы имели ширину 60 мм, отверстие имело диаметр 12 мм. Эти образцы испытывались на циклическое растяжение-сжатие при стационарном симметричном  $R = -1$  и асимметричном  $R = -0,3$  нагружении. При этом фиксировалась долговечность, при которой трещина, возникавшая в устье концентратора, достигала длины 0,3–1,0 мм.

Результаты обработки экспериментальных и расчетных данных по сопротивлению усталости пластинчатых образцов с отверстиями для симметричного нагружения приведены в работе [5], для асимметричного нагружения при коэффициенте асимметрии цикла  $R = -0,3$  представлены в работе [6]. При долговечности порядка  $10^6$  циклов опытные и расчетные данные совпадали, если расчет проводился с разбивкой рабочей части образцов с круглым отверстием на ячейки  $0,5 \times 0,5$  мм для симметричного нагружения, при асимметричном нагружении с  $R = -0,3$  совпадение опытных и

расчетных данных наблюдалось при разбивке рабочей части образцов с круглым отверстием на ячейки 0,7x0,7 мм.

Результаты испытаний пластинчатых образцов с круглыми отверстиями при нестационарном блочном нагружении приведены в таблице 1. В опыте №1 изменялся уровень максимальных напряжений вне зоны отверстия при постоянном значении коэффициента асимметрии цикла  $R = -1,0$ . В опытах №2 и №3 изменяется не только уровень максимальных напряжений вне зоны отверстия, но и коэффициент асимметрии цикла. В этих опытах производилось двухступенчатое циклическое нагружение. В опыте №4 осуществлялось трехступенчатое циклическое нагружение, при котором изменялся уровень максимальных напряжений вне зоны отверстия и коэффициент асимметрии цикла нагружения. В каждом опыте проводилось испытание шести пластинчатых образцов с круглыми отверстиями. Образцы доводились до разрушения на последней ступени нагружения и в таблицу вносились значения долговечностей, отвечающих появлению в устье концентратора трещины длиной 0,3–1,0 мм.

**Таблица 1** – Результаты испытаний пластинчатых образцов с круглым отверстием при нестационарном блочном нагружении

№ Опыта	№ Блока	$\sigma_{н\ max}^?$ Мпа	R	№ Об-разца	Число циклов в блоке $N_k \cdot 10^{-6}$	Количество блоков	Разрушающее число циклов $N_{экс} \cdot 10^{-6}$	Среднее значение разрушающего числа $\frac{циклов}{N_{экс}} \cdot 10^{-6}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	110,0	-1,0		0,100	1		0,209
				2	121,2	-1,0	1	
	2	0,159	1				0,259	
	3	0,137	1				0,237	
	4	0,082	1				0,182	
	5	0,111	1				0,211	
	6	0,096	1				0,196	
2	1	110,0	-1,0		0,200	1		0,506
				2	150,0	-0,3	1	
	2	0,324	1				0,524	
	3	0,226	1				0,426	
	4	0,461	1				0,661	
	5	0,268	1				0,468	
	6	0,369	1				0,569	
3	1	150,0	-0,3		0,100	1		0,218
				2	121,2	-1,0	1	
	2	0,064	1				0,164	
	3	0,176	1				0,276	
	4	0,122	1				0,222	
	5	0,086	1				0,186	
	6	0,151	1				0,251	

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	1	150,0	-0,3		0,050	1		0,302
	2	110,0	-1,0		0,150	1		
	3	121,2	-1,0	1	0,069	1	0,269	
				2	0,163	1	0,363	
				3	0,046	1	0,246	
				4	0,109	1	0,309	
				5	0,139	1	0,339	
				6	0,088	1	0,288	

Рассмотрим теоретический прогноз долговечности при режимах нестационарного блочного нагружения. Опишем методику этого расчёта и в качестве примера рассмотрим расчёт долговечности по опыту №1. В этом опыте осуществлялось двухступенчатое нагружение пластинчатых образцов с круглым отверстием при постоянном значении коэффициента асимметрии цикла  $R = -1,0$ . Уровень максимальных напряжений вне зоны отверстия на первой ступени составлял МПа, на второй ступени  $\sigma_{н2} = 121,2$  МПа. На первой ступени образец выдерживал до  $N_1 = 0,1 \cdot 10^6$  циклов и доводился до разрушения на второй ступени.

При двухступенчатом нагружении кинетическое уравнение повреждений записывается в следующем виде

$$\Pi = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} + \varphi_1(H_1, R_1)N_1 + \varphi_2(H_2, R_2)N_2, \quad (2)$$

откуда и определяется значение числа циклов до разрушения  $N_2$  на второй ступени при  $\Pi = I$ . Тогда

$$N_2 = \left[ 1 - \sigma_{\max} / \bar{\sigma}_p - \varphi_1(H_1, R_1) \cdot N_1 \right] / \varphi_2(H_2, R_2) \quad (3)$$

и разрушающее число циклов в данном двухступенчатом режиме нагружения составляет

$$N_p = N_1 + N_2 \quad (4)$$

Расчёт долговечности при нестационарном нагружении проводится в следующем порядке.

1. После проведения разбивки на ячейки производится расчёт величины  $N$  на каждой ступени нагружения для точки, расположенной в центре каждой ячейки.

2. Далее строится кривая распределения долговечности для каждой ячейки. С этой целью при двух заданных вероятностях разрушения определяются значения  $\varphi(H, R)$  на каждой ступени нагружения, по формулам (3) и (4) находят долговечности на второй ступени и суммарные долговечности, отвечающие указанным вероятностям, далее по ним на вероятностной бумаге проводится прямая, которая отвечает требуемой кривой распределения.

3. Выбираются две заданные долговечности, находятся соответствующие вероятности разрушения для различных ячеек, по которым определяются вероятности раз-

рушения образца при заданных долговечностях и на вероятностной бумаге строится кривая распределения долговечности образца.

Все перечисленные операции проводятся при каждой разбивке на ячейки. В итоге расчёта строятся графики зависимости расчётной долговечности образцов от размера выбираемой ячейки. Эти кривые для опытов №1-4 для пластинчатых образцов с круглым отверстием представлены на рисунке 1, где нанесены и экспериментальные точки.

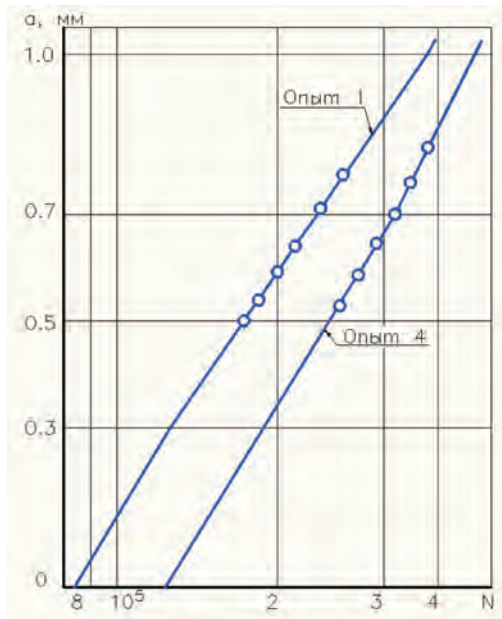


Рисунок 1 – График выбора оптимальных размеров ячеек по испытаниям пластинчатых образцов с круглым отверстием (опыт №1, №4)

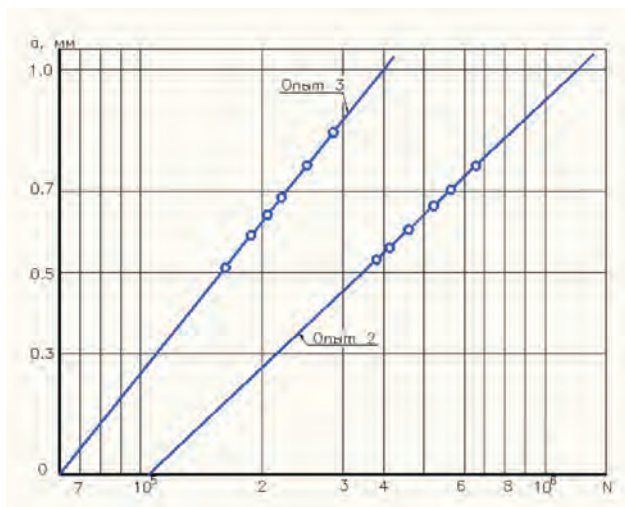


Рисунок 2 – График выбора оптимальных размеров ячеек по испытаниям пластинчатых образцов с круглым отверстием (опыт №2, №3)

Из графиков видно, что наилучшее соответствие экспериментального среднего значения разрушающего числа циклов и расчётных данных получается при размерах ячейке порядка 0,65x0,65 мм. Напомним, что при одноступенчатом стационарном нагружении оптимальные размеры ячейки составляют 0,5 мм для симметричного нагружения  $R=-1,0$  и 0,7 мм для асимметричного нагружения при коэффициенте асимметрии цикла нагружения  $R=-0,3$ .

Таким образом, условие подобия распределения долговечности детали оказывается зависимым от механических свойств материала. Распределение долговечности детали может быть построено согласно предложенной модели и в общем случае многокомпонентного циклического нагружения. Для этого общего случая в известной литературе никаких рекомендаций не содержится.

### ЛИТЕРАТУРА

1 Павлов П.А., Джакияев Д.К. Прогнозирование многоцикловых усталостных повреждений стали при сложном неоднородном напряженном состоянии // X Всесоюз. научно-техническая конф. по конструкционной прочности двигателей: Тез. док.– Куйбышев, 1985.

2 Джакияев Д.К., Касымов У.Т. Экспериментально-теоретическая оценка сопротивления усталости стальных конструктивных элементов при сложном неоднородном напряженном состоянии.// Актуальные проблемы механики и машиностроения: Труды междунар. научной конф. – Алматы, 2005 г.

3 Джакияев Д.К. Об оценке долговечности стальных конструктивных элементов в условиях циклического нагружения// Механика и моделирование процессов технологии – 2011, №2.

4 Джакияев Д.К., Жунибеков С., Джакияев Б.Д. Прогнозирование долговечности стальных конструктивных элементов при сложном неоднородном напряженном состоянии. Международный журнал «Теоретическая и прикладная наука», №04(48), 2017, США.

5 Джакияев Д.К., Жашен С.Ж., Абильдаева Н.Д. Влияние неоднородности напряженного состояния на прочность деталей текстильных машин и аппаратов при циклическом симметричном нагружении. Журнал «Технология текстильной промышленности», № 3 (387), г. Иваново, Россия, 2020.

6 Джакияев Д.К., Жунибеков С., Жашен С.Ж. Прогнозирование долговечности деталей машин при циклическом несимметричном нагружении и сложном неоднородном напряженном состоянии. Международный научно-технический журнал. Вестник НИА РК №2(76), Алматы, 2020.

### REFERENCES

1 Pavlov P.A., Dzhakiyayev D.K. Prognozirovaniye mnogotsiklovykh ustalostnykh povrezhdeniy stali pri slozhnom neodnorodnom napryazhennom sostoyanii // X Vsesoyuzn. nauchno-tekhnicheskaya konf. po konstruksionnoy prochnosti dvigateley: Tez. dok.– Kuybyshev. 1985.

2 Dzhakiyayev D.K. Kasymov U.T. Eksperimentalno-teoreticheskaya otsenka soprotivleniya ustalo–sti stalnykh konstruksionnykh elementov pri slozhnom neodnorodnom napryazhennom sostoyanii.// Aktualnyye problemy mekhaniki i mashinostroyeniya: Trudy mezhdunar. nauchnoy konf. – Almaty. 2005 g.

3 Dzhakiyayev D.K. Ob otsenke dolgovechnosti stalnykh konstruksionnykh elementov v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya// Mekhanika i modelirovaniye protsessov tekhnologii – 2011. №2.

4 Dzhakiyayev D.K., Zhunisbekov S., Dzhakiyayev B.D. Prognozirovaniye dolgovechnosti stal-

nykh konstruksionnykh elementov pri slozhnom neodnorodnym napryazhenom sostoyanii. Mezh-dunarodnyy zhurnal «Teoreticheskaya i prikladnaya nauka». №04(48). 2017. SShA.

5 Dzhakiyayev D.K., Zhashen S.Zh., Abildayeva N.D. Vliyaniye neodnorodnosti napryazhen-nogo sostoyaniya na prochnost detaley tekstilnykh mashin i apparatov pri tsiklicheskom simmet-richnom nagruzhении. Zhurnal «Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti». № 3 (387). g. Ivanovo. Rossiya. 2020.

6 Dzhakiyayev D.K., Zhunisbekov S., Zhashen S.Zh. Prognozirovaniye dolgovechnosti detaley mashin pri tsiklicheskom nesimmetrichnom nagruzhении i slozhnom neodnorodnom napryazhenom sostoyanii. Mezh-dunarodnyy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal. Vestnik NIA RK №2(76). Almaty. 2020.

**Д. К. ЖАҚИЯЕВ, С. ЖҮНІСБЕКОВ, С. Ж. ЖӘШЕН,  
Б. Д. ЖӘКИЕВ**

*М.Х.Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Тараз, Қазақстан*

### **МАШИНА ЭЛЕМЕНТТЕРІ МЕН БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ЦИКЛДЫҚ ТҮРАҚСЫЗ ЖҮКТЕМЕЛЕУ АСТЫНДАҒЫ ТӨЗІМДІЛІГІН ЭКСПЕРИМЕНТТЫҚ-ТЕОРИЯЛЫҚ БАҒА БЕРУ**

*Циклды күрделі кернеулі күйдегі және біртекті емес жүктеме әсерінен машина бөлшектерінің төзімділігін аналитикалық анықтауға мүмкіндік беретін қажу қирауының статистикалық моделі ұсынылған. Модельдің тиімділігін бағалау мақсатында Ст.45 болатынан жасалған үлгілер мен бөлшектерге жүргізілген сынақтар нәтижелеріне салыстырмалы талдаулар жасалған.*

**Түйін сөздер:** *циклды жүктеме, төзімділік, күрделі біртекті емес кернеулі күй, бөлшектің қажу қирауының статистикалық моделі.*

**D. K. DZHAKIYAEV, S. ZHUNISBEKOV, S. ZH. ZHASHEN,  
B. D. DZHAKIYEV**

*Taraz Regional University named after M.Kh.Dulati, Taraz, Kazakhstan*

### **EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ASSESSMENT OF THE DURABILITY OF MACHINE ELEMENTS AND PARTS UNDER CYCLIC UNSTATIONARY LOADING**

*A statistical model of fatigue failure is proposed, which allows analytically determining the durability of a part operating under a cyclic complex inhomogeneous stress state and non-stationary loading mode. A comparative analysis of the test results of samples and parts of steel 45 was carried out in order to assess the effectiveness of the statistical model.*

**Keywords:** *cyclic loading, durability, complex inhomogeneous stress state, statistical model of fatigue failure of a part.*