

**ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН И АППАРАТОВ  
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ СИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ**

**INFLUENCE OF THE STRESS STATE INHOMOGENEITY  
ON THE STRENGTH OF PARTS OF TEXTILE MACHINES AND APPARATUSES  
UNDER CYCLIC SYMMETRIC LOADING**

*Д.К. ДЖАКИЯЕВ, С.Ж. ЖАШЕН, Н.Д. АБИЛЬДАЕВА*

*D.K. JAKIYAYEV, S.ZH. ZHASHEN, N.D. ABILDAYEVA*

(Таразский государственный университет им. М.Х.Дулати, Республика Казахстан)

(Taraz State University named after M.Kh.Dulati, Republic of Kazakhstan)

E-mail: ddosumbek1957@mail.ru

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

*A statistical model of fatigue failure is proposed that allows us to analytically determine the durability of a part operating under a cyclic complex inhomogeneous stress state. 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.*

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

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

Многие элементы и детали текстильных машин и аппаратов за время своей службы многократно подвергаются действию повторно-переменных нагрузок. Практикой установлено, что при действии периодически изменяющихся во времени по величине и знаку нагрузок разрушение элементов и деталей машин происходит в результате постепенного развития трещины усталости.

Вопросы оценки многоцикловых усталостных повреждений элементов и деталей машин в условиях сложного напряженного состояния и нестационарного нагружения являются наиболее сложными. Ранее расчеты на усталость были основаны на срав-

нении напряжений в наиболее опасных точках детали с пределом выносливости материала, найденном путем испытаний лабораторных образцов. Для того, чтобы результаты расчета приближались к действительности, были созданы полуэмпирические приемы корректировки расчетных данных, связанные с введением эффективных коэффициентов концентрации напряжений и масштабных коэффициентов. Эти приемы могут быть использованы в частных случаях, а в самом общем случае расчета детали, работающей в произвольном напряженном состоянии, они не применимы. Осознание этого факта привело к появле-

нию статистических моделей усталостного разрушения.

Исследования влияния концентрации напряжений и абсолютных размеров деталей на сопротивление усталости конструкционных материалов, проведенные в разное время, показали, что степень снижения пределов выносливости связана с распределением напряжений в объеме материала вблизи концентратора напряжений. Известно, что некоторая область детали около концентратора напряжений всегда находится в условиях сложного неоднородного напряженного состояния. Однако статистические теории усталостного разрушения Афанасьева Н.Н., Фрейденталя А.М., Гумбеля Е.Ж., Когаева В.П., Болотина В.В., Вейбулла В. не учитывают влияния вида напряженного состояния на сопротивление усталости, за исключением статистической теории прочности, разработанной С.Д.Волковым.

В статистической теории подобия усталостного разрушения Когаева В.П. [1], которая гостирована, сложное напряженное состояние, возникающее в некоторой области у концентраторов напряжения, сводят к линейному, пренебрегая влиянием второго и третьего компонентов главных напряжений. В одной из работ Когаева В.П. приводится функция распределения пределов выносливости детали, записанная с учетом всех компонентов главных напряжений. Однако это соотношение не получило дальнейшего развития, так как критерии подобия, указывающие на равноопасность усталостного разрушения, полученные на основе данного соотношения, оказываются более сложными и поэтому неудобны для практического использования.

Статистическая теория прочности Волкова С.Д. [2] удовлетворительно описывает в рассмотренных частных случаях влияние вида напряженного состояния на сопротивление усталости. Однако условия усталостного разрушения существенно опираются на решение задачи о распределении микроскопических напряжений и деформаций, которое получено при довольно жестких ограничениях. Поэтому приемлемость таких соотношений для описания совокуп-

ного влияния различных факторов на сопротивление усталости подлежит проверке путем сопоставления с соответствующими экспериментальными данными. Значительную трудность представляет определение постоянных, входящих в условия усталостного разрушения.

Расчетный метод для оценки этих факторов, 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 механических 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 [3...8] предложена статистическая модель многоциклового усталости, позволяющая по данным испытаний лабораторных образцов находить распределение долговечности детали, работающей в произвольном сложном неоднородном напряженном состоянии. 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 усталостного повреждения, имеющее в общем случае следующий вид:

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

где  $\Pi(N)$  – поврежденность, накопившаяся к  $N$ -му циклу нагружения;  $\sigma_{\max}(N)$  – максимальное напряжение цикла на момент определения  $\Pi$ ;  $\bar{\sigma}_p$  – 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 и эллиптическим отверстиями 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, использованы для сопоставления теории с прямыми опытными данными. Пластинчатые образцы имели ширину 60 мм, отверстие имело диаметр 12 мм, оси эллипса составляли 12 и 8 мм. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в области упругого деформирования составляли 2,512 и 3,33 соответственно для крупного и эллиптического отверстия. Эти образцы испытывались на циклическое растяжение-сжатие при стационарном симметричном нагружении. При

этом фиксировалась долговечность, при которой трещина, возникавшая в устье концентратора, достигала длины 0,3...1,0 мм.

Локальные напряжения в пластинчатых образцах с круглым и эллиптическим отверстиями, испытанных при симметричном цикле, не превышали предела текучести материала. Величины этих напряжений в образцах с круглым отверстием находили из решения Р. Гауланда о растяжении полосы конечной ширины, ослабленной круглым отверстием. Локальные напряжения в образцах с эллиптическим отверстием определяли МКЭ.

Рассмотрим расчетные и экспериментальные данные по сопротивлению усталости пластичных образцов с отверстиями. На рис. 1 показаны расчетные и экспериментальные кривые усталости этих образцов. Расчетные кривые 1, 2, 3, 4 отвечают разбивке рабочей силы образцов на ячейки 1x1 мм (кривые 1), 0,7x0,7мм (кривая 2), 0,5x0,5мм (кривая 3) и 0,3x0,3мм (кривая 4). Кривая 5 получена путем экстраполяции размера ячейки в ноль, кривая 8 отвечает расчету по наиболее напряженной точке. Экспериментальная кривая 6, отвечающая появлению макроскопической трещины в устье концентратора длиной 0,3...1 мм, располагается несколько круче, чем расчетные кривые. При долговечности порядка  $10^6$  циклов опытные и расчетные данные совпадали, если расчет проводился с разбивкой рабочей части образцов с круглым отверстием на ячейки 0,5x0,5 мм, а для образцов с эллиптическим отверстием на ячейки 0,3x0,3мм.

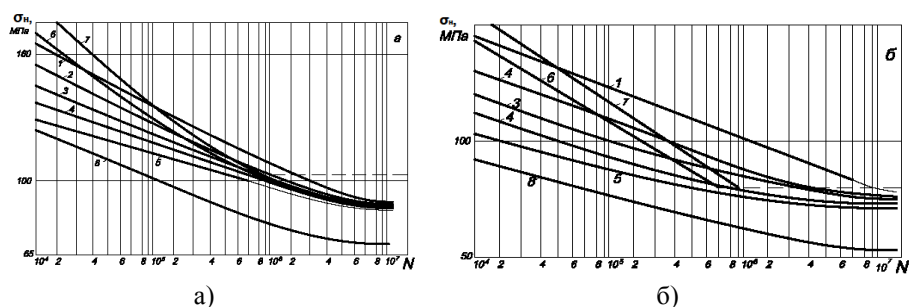


Рис. 1

Уменьшение размеров ячейки до нуля приводит к нижним значениям пределов

выносливости, которые, однако, все еще выше расчетной кривой усталости для

наиболее напряженной точки конструкции. При анализе этих результатов следует, прежде всего, отметить, что влияние размеров расчетных ячеек на расчет долговечности при заданных вероятностях разрушения в теории подобия, принятой ГОСТом 25.504–82, не рассматривается. Рекомендуемый там расчет, с нашей точки зрения, предполагает экстраполяцию размера ячейки в ноль. С другой стороны, может быть поставлен вопрос: почему в рамках теории Вейбулла наилучшее совпадение с опытом получается при некотором конечном размере ячейки, зависящем к тому же от градиента напряжений. Можно полагать, что тот факт связан с допущением теории о том, что разрушения отдельных элементов материала являются независимыми событиями. Едва ли такое допущение применимо к очень малым объемам. Скорее всего, это можно сказать лишь о каких-то конечных объемах, содержащих достаточное количество кристаллических зерен. С другой стороны, объем должен быть настолько мал, чтобы напряженное состояние в его пределах приближенно можно было бы считать однородным.

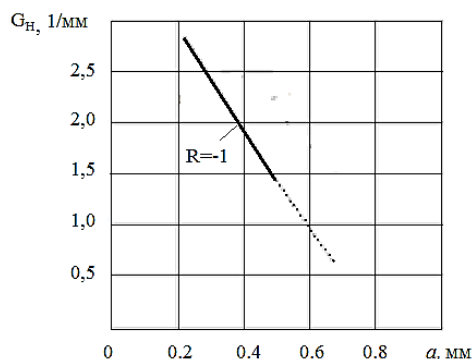


Рис. 2

Так как влияние напряженного состояния на процесс накопления повреждений оценивается в предлагаемой теории параметром  $N$ , то и градиенты всех компонентов напряжений следует оценивать в расчете на усталость градиентом обобщенного параметра  $N$ . На основании проведенных опытов установлена зависимость оптимальных (по сопоставлению с экспериментальными данными) размеров расчетной

ячейки от градиента напряжений, оцениваемого градиентом параметра  $N$  (рис. 2 – график изменения оптимального размера ячеек в зависимости от градиента  $N$ ). Зависимость расчетных долговечностей от размеров ячеек при малых градиентах  $N$  оказывается достаточно слабой. С уменьшением градиента  $N$  влияние задаваемых размеров ячеек стирается.

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.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана статистическая модель усталостного разрушения, позволяющая определять долговечность деталей текстильных машин и аппаратов при циклическом сложном неоднородном напряженном состоянии.

2. Приведены результаты испытаний образцов и деталей стали 45 для оценки эффективности статистической модели.

3. Получена зависимость размера расчетной ячейки от градиента величины  $N$ , описывающего влияние вида напряженного состояния на процесс накопления усталостных повреждений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Когаев В.П.* Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977.
2. *Волков С.Д.* Статистическая теория прочности. – М.: Машгиз, 1960.
3. *Pavlov P.A.* Ein Energiemodell der hochzyklischen Ermüdung und seine praktische Anwendung // *Technische Mechanik.* – 4, 1983, Heft 1.
4. *Павлов П.А., Джакияев Д.К.* Прогнозирование многоцикловых усталостных повреждений стали при сложном неоднородном напряженном состоянии // Тез. докл. X Всесоюзн. научно-техн. конф. по конструкционной прочности двигателей. – Куйбышев, 1985.

5. Джакияев Д.К., Касымов У.Т. Экспериментально-теоретическая оценка сопротивления усталости стальных конструктивных элементов при сложном неоднородном напряженном состоянии // Актуальные проблемы механики и машиностроения: Тр. Междунар. науч. конф. – Алматы, 2005.

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

7. Джакияев Д.К., Нусипали Р.К. Оценка циклической прочности по энергетической модели разрушения материала // Теоретическая и прикладная наука. – №05(25), 2015, Лион, Франция.

8. Жунисбеков С., Джакияев Д.К., Жашен С.Ж. Пути улучшения эффективности деталей и узлов сельскохозяйственных машин на стадии проектирования // Вестник НИА РК. – 2019, №3(73).

#### REFERENCES

1. Kogaev V.P. Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni. – М.: Mashinostroenie, 1977.

2. Volkov S.D. Statisticheskaya teoriya prochnosti. – М.: Mashgiz, 1960.

3. Pavlov P.A. Ein Energiemodell der hochzyklischen Ermudung und seine praktische Anwendung // Technische Mechanik. – 4, 1983, Heft 1.

4. Pavlov P.A., Dzhakiyaev D.K. Prognozirovaniye mnogotsiklovnykh ustalostnykh povrezhdeniy stali pri slozhnom neodnorodnom napryazhennom sostoyanii // Tez. dokl. X Vsesoyuzn. nauchno-tekhn. konf. po konstruksionnoy prochnosti dvigateley. – Kuybyshev, 1985.

5. Dzhakiyaev D.K., Kasymov U.T. Eksperimental'no-teoreticheskaya otsenka soprotivleniya ustalosti stal'nykh konstruksionnykh elementov pri slozhnom neodnorodnom napryazhennom sostoyanii // Aktual'nye problemy mekhaniki i mashinostroeniya: Tr. Mezhdunar. nauch. konf. –Almaty, 2005.

6. Dzhakiyaev D.K. Ob otsenke dolgovechnosti stal'nykh konstruksionnykh elementov v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya // Mekhanika i modelirovaniye protsessov tekhnologii – 2011, №2.

7. Dzhakiyaev D.K., Nusipali R.K. Otsenka tsiklicheskoy prochnosti po energeticheskoy modeli razrusheniya materiala // Teoreticheskaya i prikladnaya nauka. – №05(25), 2015, Lion, Frantsiya.

8. Zhunisbekov S., Dzhakiyaev D.K., Zhashen S.Zh. Puti uluchsheniya effektivnosti detaley i uzlov sel'skokhozyaystvennykh mashin na stadii proektirovaniya // Vestnik NIA RK. – 2019, №3(73).

Рекомендована кафедрой механики и машиностроения. Поступила 20.01.20.