

УДК 629.7.015

ПРОБЛЕМЫ МНОГООЧАГОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.П. ПАВЕЛКО, Ю.М. ТИМОЩЕНКО

Авиационный институт Рижского технического университета, Латвия

1. Введение

Многоочаговые усталостные повреждения являются одним из наиболее опасных прочностных дефектов конструкции современных пассажирских самолетов. Такие повреждения возникают в зонах с множественными концентраторами напряжений с равными или близкими по величине максимальными напряжениями. Типичным элементом конструкции такого типа является тонкостенная пластинка или оболочка с периодической или двоякопериодической системой одинаковых отверстий (например, круговых). Если геометрические, механические и технологические характеристики всех элементарных ячеек такой структуры и условия их нагружения идентичны, то можно постулировать существование единой локальной кривой усталости для всех возможных вариантов конструкции, отличающихся количеством отверстий, расстоянием между ними, соотношением параметров внешней нагрузки (в известных пределах). Экспериментально получив локальную кривую на одном из вариантов, можно затем ее использовать в расчетах характеристик усталости всех других конструкций данного класса. При этом предметом исследований в равной степени являются наработка до зарождения трещины, скорость ее распространения, остаточная прочность и статистические закономерности развития процесса усталости. Для анализа многоочаговых усталостных повреждений проблема определения закона распределения усталостной долговечности и оценки его статистических характеристик имеет особо важное значение.

Цель работы состоит в исследовании статистических закономерностей усталостной долговечности в конструкции со многими концентраторами напряжений. Первая часть связана с планированием и проведением эксперимента, разработкой методики обработки экспериментальной информации, а также с использованием результатов для определения закона распределения усталостной долговечности до зарождения трещины. Во второй части рассмотрен вопрос о расчетах усталостной долговечности конструкции со многими концентраторами напряжений, в том числе и в вероятностном аспекте.

2. Образцы и описание эксперимента

Анализ некоторых закономерностей распределения усталостной долговечности до зарождения трещины выполнен по результатам испытаний листовых образцов шириной 100 мм и толщиной 2 мм из алюминиевого сплава Д16Т с системой круговых отверстий. Испытаны образцы двух типов. В первой группе образцы имели два ряда равноотстоящих отверстий (по 4 в каждом ряду), а во второй группе – один ряд отверстий (рис. 1). Диаметр отверстий для разных групп образцов принимался равным 3, 5, 8, 10 и 20 мм. Система отверстий образовывала периодическую или двоякопериодическую структуру. Испытания проводились на гидравлической испытательной машине с частотой около 12 Герц при циклическом растяжении. Выбрано

два режима регулярной циклической нагрузки: 1) $\sigma_{max} = 120$ МПа, $\sigma_{min} = 0$ МПа; 2) $\sigma_{max} = 120$ МПа, $\sigma_{min} = 60$ МПа.

В процессе испытаний фиксировалась наработка до зарождения усталостной трещины длиной 0,5 мм возле каждого из концентраторов напряжений. Чтобы предупредить дальнейшее распространение трещины и свести к минимуму ее влияние на напряженно-деформированное состояние у соседних концентраторов применялись меры по их торможению путем создания возле вершины трещины локальной зоны сжимающих остаточных напряжений. Эта цель достигалась локальным пластическим деформированием материала [6, 7].

Обработка экспериментальных результатов производилась в предположении, что логарифм усталостной долговечности распределен нормально. Применялись два способа получения точечных оценок параметров распределения. Первый – классический способ получения оценок математического ожидания и среднего квадратичного отклонения при наличии полной информации достаточного объема. Второй способ предполагает получение оценок параметров из условия наилучшего совпадения эмпирической функции распределения с теоретическим законом (в смысле минимума суммы квадратов отклонений). Этот вариант обработки использован в связи с тем, что при организации испытаний на образцах с множественными концентраторами напряжений зачастую информация оказывается неполной. В этом случае стандартный классический подход (первый вариант обработки) не может быть использован. Второй же вариант обработки, предполагающий аппроксимацию экспериментальных данных теоретической функцией, может быть применен в случае неполной информации. В деталях этот способ описан в [7]. В настоящей работе одной из целей было сопоставление оценок параметров, полученных этими двумя способами.

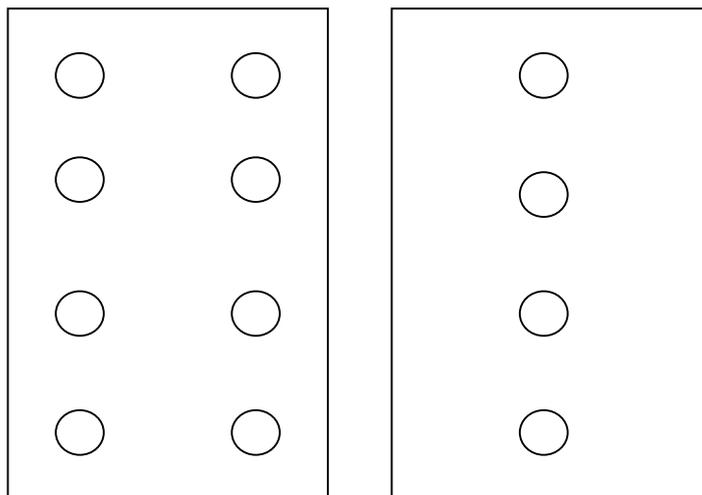


Рис. 1. Схемы образцов

рической функции распределения с теоретическим законом (в смысле минимума суммы квадратов отклонений). Этот вариант обработки использован в связи с тем, что при организации испытаний на образцах с множественными концентраторами напряжений зачастую информация оказывается неполной. В этом случае стандартный классический подход (первый вариант обработки) не может быть использован. Второй же вариант обработки, предполагающий аппроксимацию экспериментальных данных теоретической функцией, может быть применен в случае неполной информации. В деталях этот способ описан в [7]. В настоящей работе одной из целей было сопоставление оценок параметров, полученных этими двумя способами.

3. Основные результаты эксперимента и оценки параметров функции распределения

Полученные по результатам испытаний на усталость данные, как отмечалось, обрабатывались двумя способами. В первом случае оценка математического ожидания логарифма усталостной долговечности на каждом уровне действующей нагрузки получалась вычислением среднего арифметического из логарифмов усталостной долговечности, полученных по всей совокупности наблюдений. Среднее квадратичное отклонение оценивалось на основании известной формулы несмещенной оценки.

Во втором варианте обработки методика предусматривает построение вариационного ряда из результатов наблюдений и вычисление эмпирической вероятности $P(N)$ того, что разрушение произойдет при числе циклов меньше N

$$P(N) = \frac{k_i}{m + 0,5}, \quad (1)$$

где k_i – число наблюдений разрушения при числе циклов меньше N_i ; m – общее число наблюдений разрушения на данном уровне нагрузки.

После этого вычисляется вспомогательная функция, представляющая собой сумму квадратов отклонений эмпирической вероятности от теоретического нормального закона распределения логарифма усталостной долговечности $F(N, a, s)$.

$$\Phi(a, s) = \sum_{i=1}^m \left[\hat{P}(N_i) - F(N_i, a, s) \right]^2, \quad (2)$$

где a, s – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение логарифма усталостной долговечности.

Из условия экстремума функции $\Phi(a, s)$ определяются оценки параметров закона распределения.

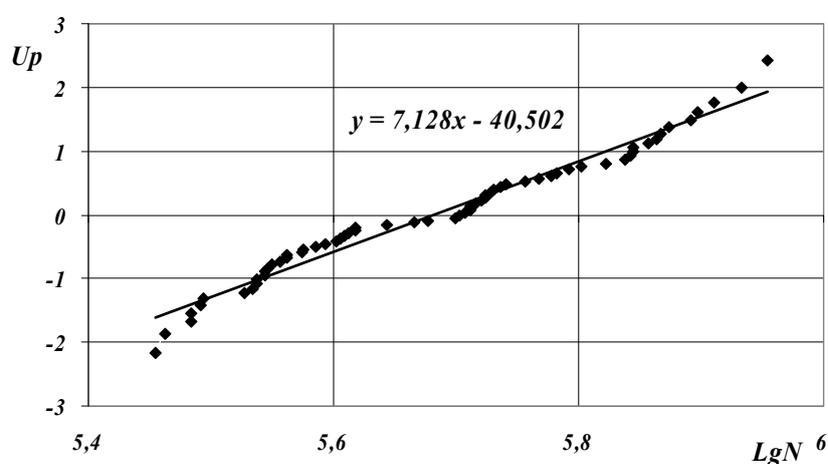


Рис. 2. Эмпирическая и теоретическая функции распределения ($d = 20$ mm, $\sigma_{min} = 0$, $\sigma_{max} = 120$ МПа)

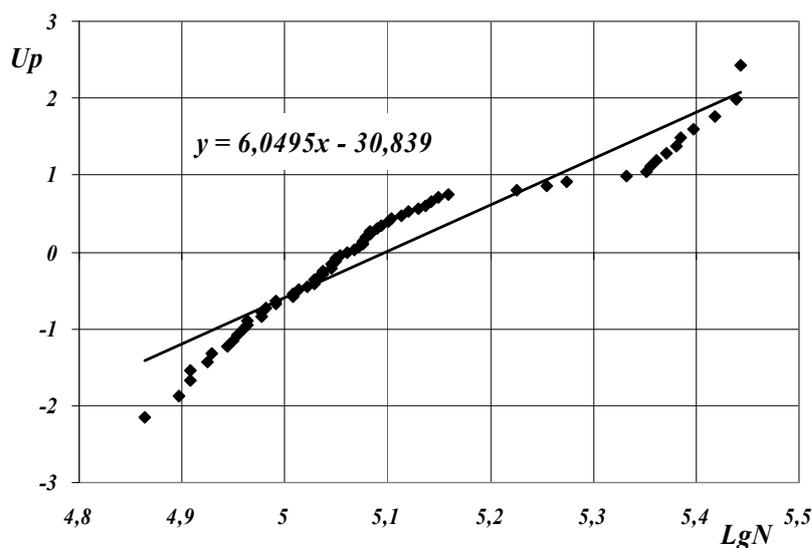


Рис. 3. Эмпирическая и теоретическая функции распределения ($d = 5$ mm, $\sigma_{min} = 60$ МПа, $\sigma_{max} = 120$ МПа)

На рис. 2 и 3 в графическом виде представлены результаты для двух разных уровней нагрузки. По оси ординат отложены значения U_p квантилей вероятности P . На каждом графике выведено уравнение аппроксимирующей прямой в виде $y = \alpha x + b$, позволяющее получить искомые оценки параметров.

$$\hat{a} = -\frac{b}{\alpha}, \quad \hat{\sigma} = \frac{1-b}{\alpha} - a. \quad (3)$$

На рис. 2 представлены результаты, характерные для большинства экспериментальных данных: теоретическая прямая хорошо согласуется с эмпирической функцией. На рис. 3 представлены результаты, соответствующие случаю наиболее значительных расхождений между теоретическим и эмпирическим законами распределения.

В таблице 1 приведены итоговые результаты оценки параметров функции распределения логарифма числа циклов, полученные указанными двумя методами. Видно, что наибольшая разница между оценками математического ожидания получается для образцов с отверстиями радиусом 5 мм. Она составляет 0,7 %. Больше различия в оценках стандартного отклонения. Для того же типа образца оно является наибольшим и составляет 7,4 %. Для других типов образцов различия в оценках стандартного отклонения составляют от 2,4 до 5,7 %. Таким образом, статистические оценки параметров распределения, полученные вторым способом, можно считать приемлемыми для практического использования при обработке информации рассматриваемого типа.

Таблица 1

D, mm		3 mm	5 mm	8 mm	10 mm	3 mm	20 mm
k		80	64	64	80	64	32
1	lgN	5,247	5,098	4,8522	4,6684	5,6821	5,2891
	S	0,1363	0,1653	0,1114	0,0834	0,1403	0,1602
	v=S/lgN	0,02598	0,0324	0,02296	0,01787	0,02469	0,0303
2	lgN	5,241	5,064	4,848	4,674	5,705	5,308553
	S	0,133	0,153	0,108	0,0814	0,135	0,151
	v=S/lgN	0,0254	0,0302	0,0223	0,0174	0,0237	0,0284
		$\sigma_{min} = 0$ $\sigma_{max} = 120 \text{ MPa}$				$\sigma_{min} = 60 \text{ MPa}$ $\sigma_{max} = 120 \text{ MPa}$	

Исследована зависимость статистических оценок параметров распределения от полноты использования статистической информации.

На рис. 4 и 6 показаны зависимости этого типа для оценок математического ожидания, а на рис. 5 и 7 – для оценок стандартного отклонения. По оси абсцисс отложен относительный объем использованной части статистической выборки n/N . Анализ этих графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. В тех случаях, когда экспериментальные данные хорошо описываются теоретическим законом распределения, статистические оценки параметров распределения сравнительно мало зависят от относительного объема использованной части статистической выборки n/N . При этом, оценки математического ожидания сохраняют устойчивость при $n/N > 0,1$, а оценки стандартного отклонения при $n/N > 0,2$.

2. Оценки параметров, получаемые по результатам аппроксимации начального участка эмпирической функции распределения, могут оказаться более предпочтительными при проведении расчетов многоочаговых усталостных повреждений.

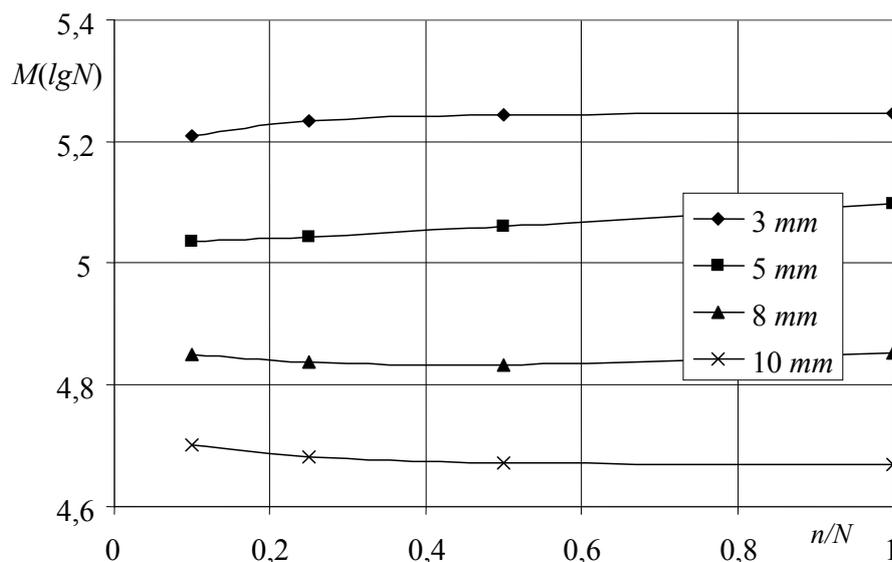


Рис. 4. Зависимость между оценкой медианы и относительным размером статистической выборки n/N ($\sigma_{min} = 60$ МПа, $\sigma_{max} = 120$ МПа)

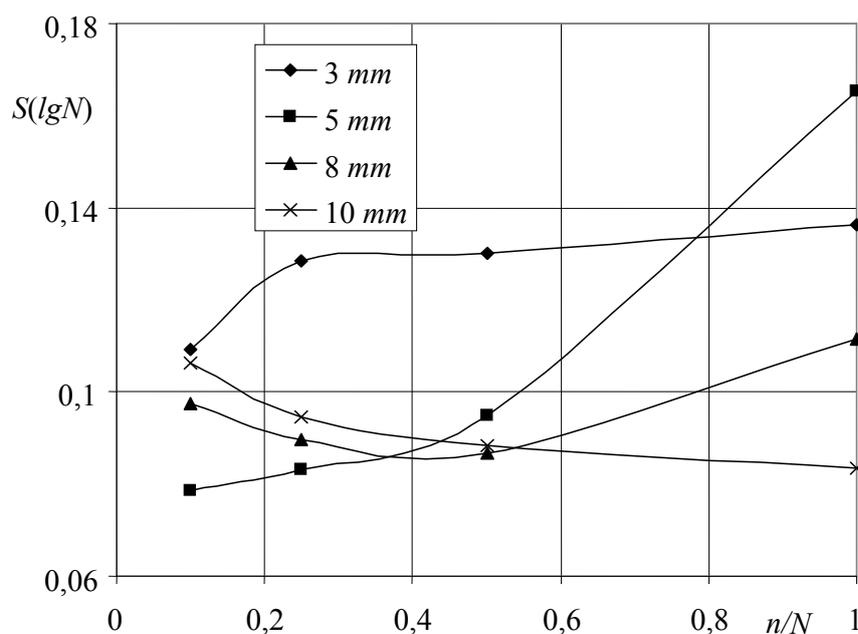


Рис. 5. Зависимость между оценкой стандартного отклонения и относительным размером статистической выборки n/N ($\sigma_{min} = 60$ МПа, $\sigma_{max} = 120$ МПа)

4. Влияние размера отверстий в листовых образцах на характеристики усталостной долговечности

Известно [8], что характеристики усталостной долговечности зависят от характерных геометрических размеров деталей или образцов (масштабный эффект). Поэтому при проведении расчетов усталостной долговечности или сопротивления усталости с использованием базовых характеристик, полученных на геометрически подобных образцах отличающегося размера, требуется надлежащая корректировка. Это может быть выполнено либо на основе дополнительных экспериментальных данных, либо на основе соответствующей теории, объясняющей влияние масштабного эффекта.

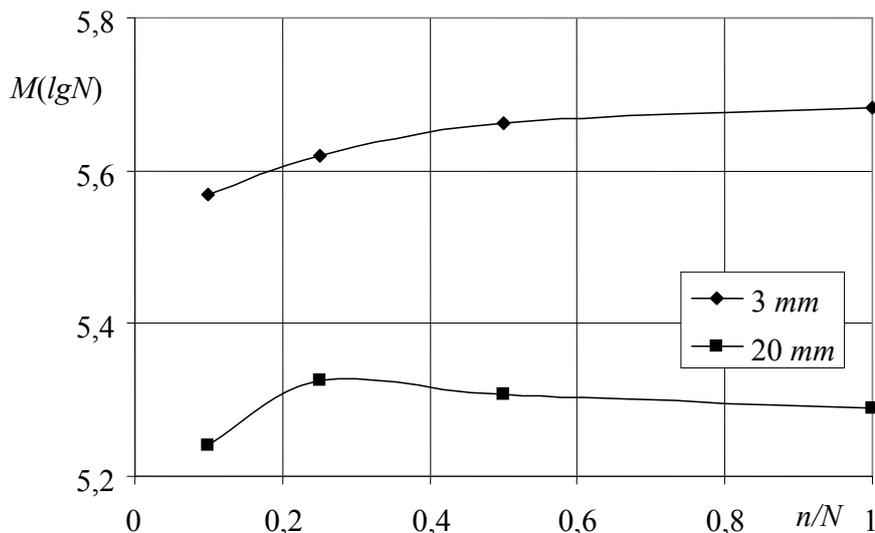


Рис. 6. Зависимость между оценкой медианы и относительным размером статистической выборки n/N ($\sigma_{min} = 0$ МПа, $\sigma_{max} = 120$ МПа)

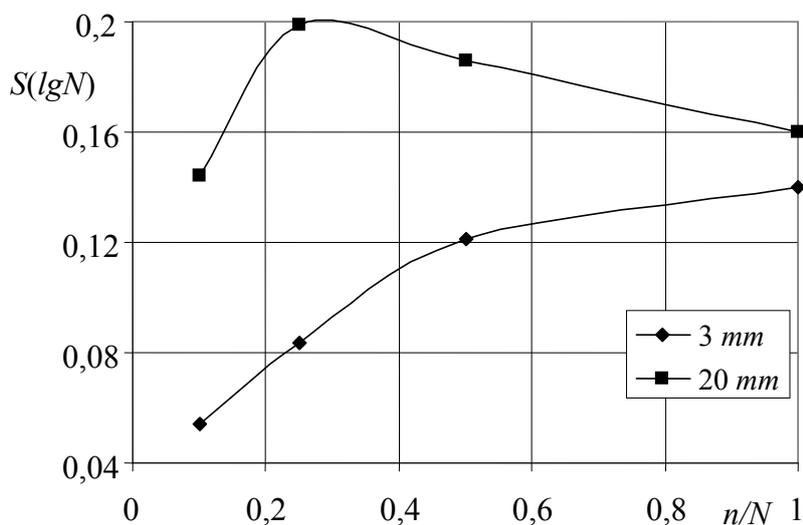


Рис. 7. Зависимость между оценкой стандартного отклонения и относительным размером статистической выборки n/N ($\sigma_{min} = 0$ МПа, $\sigma_{max} = 120$ МПа)

В работе [9] предпринята попытка объяснения влияния размера и формы отверстия в листовом материале на ограниченный предел усталости в области многоциклового усталости. Показано, что для листовых образцов из алюминиевого сплава с отверстиями различной формы статистическая теория усталостного разрушения [8] удовлетворительно объясняет масштабный эффект при долговечностях $5 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^5$ циклов. Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты позволяют продолжить исследование данной проблемы. На рис. 8 приведено обобщение результатов испытаний. График демонстрирует степень влияния размера отверстия на усталостную долговечность на двух режимах испытания.

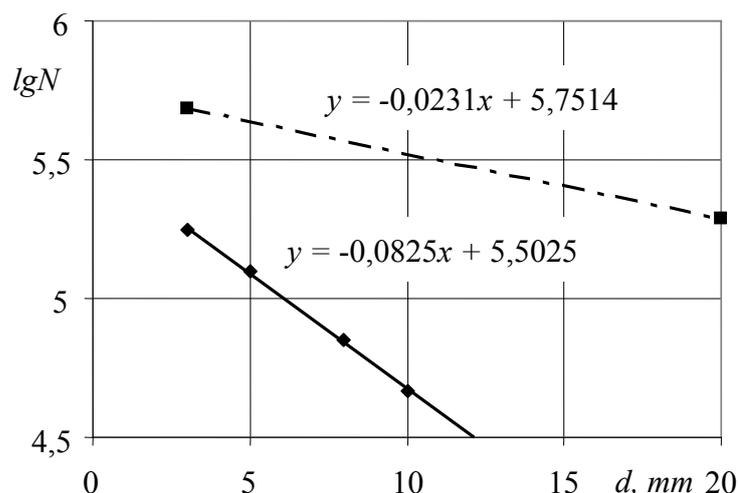


Рис. 8. Влияние размера отверстия на усталостную долговечность при двух режимах нагрузки

Среднеквадратическая аппроксимация позволяет получить уравнение зависимости между усталостной долговечностью, соответствующей среднему значению ее логарифма, и размером отверстия в виде

$$N = N_0 \cdot e^{\alpha \bar{d}}, \tag{4}$$

где N_0 и α – экспериментальные константы, а $\bar{d} = d / d_0$ – относительный диаметр отверстия. В качестве базового диаметра условно принято $d_0 = 3$ мм. На первом режиме переменной нагрузки $N_0 = 3,18 \cdot 10^5$, $\alpha = -0,57$, а на втором $N_0 = 5,64 \cdot 10^5$, $\alpha = -0,16$.

Литература

1. Павелко В.П., Тимощенко Ю. К оценке жесткости тонкостенных стержней с перфорированными стенками: В сб. науч. тр. Ученые записки механического факультета РАУ. – Рига: РАУ, 1997. – Вып. 3. – С. 40-43.
2. V. Pavelko, J. Timoshtchenko. Evaluation of rigidity of thin-walled rods with by the punched walls at stretching and bending: Transaction of Riga Aviation University Mechanical Department, 4, Riga, 1998, pp. 64...67.
3. V. Pavelko, J. Timoshtchenko. Evaluation of Rigidity of Thin-Walled Rods With the Punched Walls at Stretching and Bending.- Abstracts The Internacional Conference: Aviation Reliability, 20 – 21 April 1999, Riga, Latvia. – Riga Aviation University, 1999, p. 97.
4. V. Pavelko, J. Timoshtchenko. Influence of sizes for statistical regularities of the fatigue durability of plate by periodic or doubly periodic system of holes.-The International Conference RelStat'01, Riga, 15 October 2001// Abstracts. –Riga: Transport and Telecommunication Institute, 2001, p.60.
5. Клейнхофф М.А., Павелко В.П., Павелко И.В., Тимощенко Ю.М. Индикатор усталостных трещин в авиаконструкциях с множественными концентраторами напряжений: Труды III международной научно-технической конференции «Avia-2001», г. Киев, 24-26 апреля 2001 г.– Киев: Национальный авиационный университет. – Т. 1. – С. 49-52.
6. А.с.СССР., № 456003. Павелко В.П., Савинаев И.А. Способ задержки роста усталостных трещин в листовом материале. – 1974.

7. Павелко В.П. О повышении эффективности усталостных испытаний листовых образцов с концентраторами напряжений. – Заводская лаборатория, 1981. – Т. 47. – № 10. – С. 69-71.
8. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
9. Бужинский В.В., Павелко В.П. О расчете кривой усталости с использованием критериев подобия усталостного разрушения: В сб.: Проблемы эксплуатационной прочности авиаконструкций. – Рига: РАУ, 1992. – С. 8-11.

Получено 11.10.2002 г.