

Применение прикладных методов математической обработки данных ускоренных испытаний опоры амортизатора

The use of applied mathematical methods for data processing accelerated testing suspension strut mount

Вячеславова О.Ф.

д-р техн. наук, профессор кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»,
Московский политехнический университет, г. Москва
e-mail: vyache-smis@mail.ru

Vyacheslavova O. F.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Standardization, Metrology and certification", Moscow Polytechnic University, Moscow
e-mail: vyache-smis@mail.ru

Парфеньева И.Е.

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»,
Московский политехнический университет, г. Москва
e-mail: iparfeneva@mail.ru

Parfenyeva I. E.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Standardization, Metrology and certification», Moscow Polytechnic University, Moscow
e-mail: iparfeneva@mail.ru

Батизи В.М.

магистр кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация», Московский
политехнический университет, г. Москва
e-mail: smis@mami.ru

Batizi V.M.

Master's Degree Student, Department "Standardization, Metrology and certification", Moscow Polytechnic University, Moscow
e-mail: smis@mami.ru

Бутусов И.Ю.

аспирант кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация», Московский
политехнический университет, г. Москва
e-mail: smis@mami.ru

Butusov I. Yu.

Postgraduate student of the Department "Standardization, Metrology and certification", Moscow Polytechnic University, Moscow
e-mail: smis@mami.ru

Аннотация

В статье представлен анализ и результаты испытаний сварного шва опоры амортизатора на усталостную прочность. Предложен способ ускоренного определения предела выносливости, основанный на экстраполяции полученного экспериментальным путем участка кривой усталости из области высоких нагрузок до области нагрузок, соответствующих пределу выносливости. Способ включает расчет напряженно-деформированного состояния при статическом нагружении, расчет чувствительности среднего напряжения, исследование факторов, влияющих на усталостную прочность материала, испытание при ступенчато-возрастающей нагрузке с целью определения предела выносливости. Данный способ является малозатратным и особенно эффективен для деталей со сложной конструкцией и геометрией.

Ключевые слова: прикладные методы математической обработки данных, усталостная прочность, испытания, опора амортизатора.

Abstract

The article presents the analysis and test results of the welded seam of the shock absorber support for fatigue strength. A method for the accelerated determination of the endurance limit based on the extrapolation of the experimentally obtained portion of the fatigue curve from the area of high loads to the area of loads corresponding to the endurance limit is proposed. The method includes the calculation of the stress-strain state under static loading, the calculation of the average stress sensitivity, the study of factors affecting the fatigue strength of the material, the test at a step-increasing load in order to determine the endurance limit. This method is low-cost and is especially effective for parts with complex design and geometry.

Keywords: applied methods of mathematical data processing, fatigue strength, testing, shock absorber support.

Амортизаторы автомобиля, предназначенные для поглощения силы ударов и толчков, играют важнейшую роль в обеспечении безопасности движения, в частности, неисправные амортизаторы ощутимо увеличивают тормозной путь автомобиля. Остановить машину с неполноценными амортизаторами становится еще труднее, если на нем, вдобавок, установлена антиблокировочная система (АБС).

Опоры амортизаторов, как и сами амортизаторы, подвержены ударным и вибрационным нагрузкам. Опора амортизатора в совокупности с амортизатором способствуют улучшению сцепления колес с дорогой, управляемости автомобиля, гашению вибраций, идущих с колес; защищают кузов от ударов и разрушений. В этой связи целью данной работы является определение усталостной прочности сварного шва в опоре амортизатора методом ускоренных испытаний с применением прикладных методов математической обработки данных.

Данные исследования проводились в лаборатории Оснабрюкского университета (Германия) в ходе стажировки в рамках программы обмена студентами.

Объектом исследований в данной работе является сварной шов опоры амортизатора (рис. 1), опора амортизатора является важнейшим элементом амортизатора, поскольку служит для передачи нагрузок между амортизатором и подвеской автомобиля. Изготавливается опора из высокопрочного алюминиевого сплава (AlSi7Mg0,3) методом литья под низким давлением. Между опорой амортизатора и самим амортизатором находится резиновая прокладка для гашения ударов и вибрации.

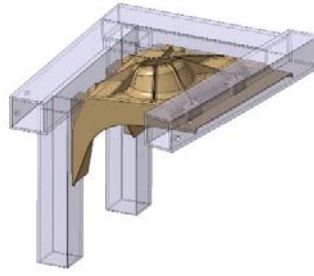


Рис. 1. Испытуемый объект – опора амортизатора

Качество сварного шва опоры амортизатора во многом характеризует надежность и долговечность функционирования данного узла. Кроме того, для быстрой отработки новых конструкций и обеспечения их заданной долговечности сокращение времени усталостных испытаний автомобильных деталей имеет большое значение для контроля качества серийной продукции.

При испытании деталей на долговечность в стендовых условиях ускорение может быть достигнуто более интенсивным развитием повреждения, чем в эксплуатации.

Применительно к ускоренным испытаниям на усталостную прочность можно выделить два подхода, реализуемых различными способами. Один из них основан на **линейной гипотезе накопления повреждений**. Режим испытаний при этом представляет собой упрощенную разновидность программных испытаний, когда накопление усталости происходит последовательно на различных уровнях. Число циклов до разрушения при таких испытаниях является мерой накопленного повреждения испытанной детали и позволяет, используя гипотезу суммирования, определить область соответствующего ей значения предела выносливости.

Другой подход – **ускоренное определение пределов выносливости** – основан на экстраполяции полученного экспериментального участка кривой усталости из области высоких нагрузок до нагрузок, соответствующих пределу выносливости. Параметры кривой усталости связаны с пределом выносливости. Испытания проводились в несколько этапов.

Первый этап включает расчет напряженно-деформированного состояния при статическом нагружении при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в программе *SAPR*. Результат расчета показан на рис. 2. Нагрузка при этом составляет 2,5 кН и равна амплитуде средних нагрузок при эксплуатации автомобиля. В результате расчетов определено максимальное напряжение в 95 МПа, являющееся локальным пиковым напряжением. Соответственно, конструктивный элемент под максимальным напряжением разрушается.

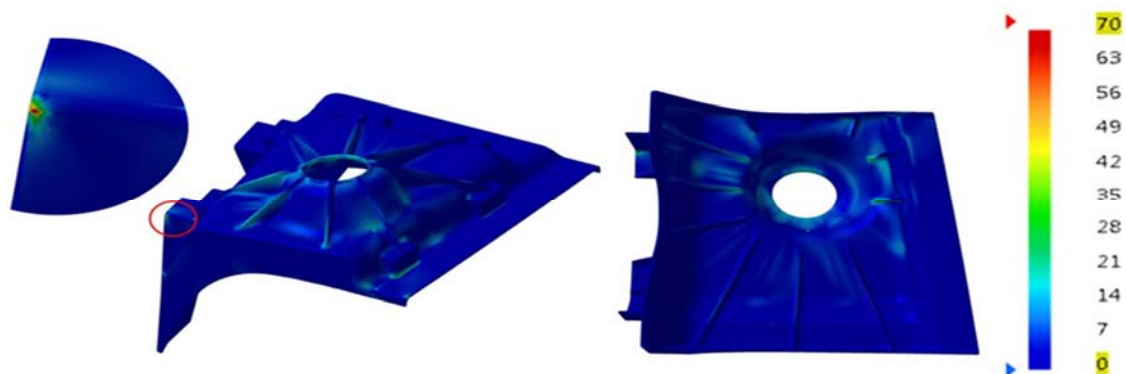


Рис. 2. Результаты расчета методом конечных элементов
Расчет двухосного напряжения ведется по формуле [1]:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2} + \tau_{xy}^2} \quad (1),$$

где σ – эквивалентное напряжение, Н/мм²; σ_x и σ_y – нормальные напряжения в площадке x - y , Н/мм²; τ_{xy} – касательные напряжения, Н/мм².

На **втором этапе** учитывается чувствительность среднего напряжения, которое можно рассчитать путем модификации амплитуды напряжения. Результат отражен на диаграмме Хейга (рис. 3), которая строится в координатах: среднее напряжение цикла (σ_m) – амплитуда напряжений цикла (σ_a). Диаграмма дает наглядное представление о работе материала при переменных напряжениях. Для ее построения необходимо провести усталостные испытания, как минимум, для трех режимов:

- симметричный цикл: $R = -1, \sigma_a = \sigma_{-1}, \sigma_m = 0$;
- отнулевой (пульсирующий) цикл: $R = 0, \sigma_a = \sigma_m = \sigma_0/2$;
- статическое растяжение: $R = 1, \sigma_a = 0, \sigma_m = \sigma_R$,

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}};$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2};$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2};$$

где R – коэффициент асимметрии цикла напряжения; $\sigma_{-1}, \sigma_0, \sigma_R$ – пределы выносливости, соответственно для симметричного, отнулевого и статического цикла, Н/мм²; $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$ – минимальное и максимальное значение напряжения в цикле, Н/мм².

При статическом растяжении предел выносливости σ_R является пределом прочности для хрупких материалов и пределом текучести для пластичных материалов, в зависимости от рассматриваемого вида разрушения.

При испытаниях задаются определенными соотношениями между средним и амплитудным напряжениями цикла (чувствительностью M среднего напряжения).

Соединяя экспериментальные точки, соответствующие трем режимам, плавной линией, получим график, характеризующий зависимость между значениями предельных амплитуд и значениями предельных средних напряжений в цикле. Здесь также можно провести луч, характеризующий циклы с одинаковой асимметрией [2]:

$$tg\beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \frac{1-R}{1+R} \quad (2),$$

где β – угол наклона луча, характеризующего циклы с одинаковой асимметрией.

Тогда для определения предела выносливости при заданной асимметрии цикла R нужно по формуле (2) вычислить величину угла β и провести луч под этим углом до пересечения с линией, ордината точки пересечения даст нам величину предельной амплитуды σ_a и значение предельного среднего напряжения σ_m в цикле. Предел выносливости σ_R определяется в виде [3]

$$\sigma_R = \sigma_m + \sigma_a \quad (3).$$

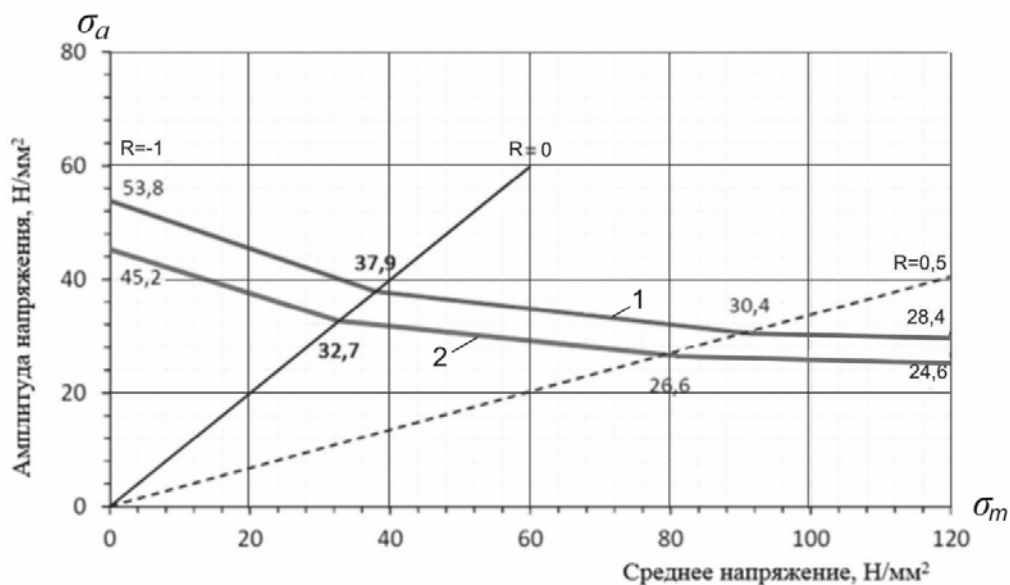


Рис. 3. Определение предела выносливости: линия предела выносливости для $\sigma_m=220$ Н/мм² ($M=0,42$) (линия 1); для $\sigma_m=185$ Н/мм² ($M=0,39$) (линия 2),
 M – чувствительность напряжения

Третий этап – исследование факторов, влияющих на усталостную прочность материала. Выбор гипотезы усталостной прочности зависит от поведения материала. В дополнение к определению механико-технологических параметров, таких как предел прочности или предел упругости, были проведены испытания по исследованию поля деформаций в сварных образцах (рис. 4) с помощью специальной аппаратуры фирмы *GOM* (*ARAMIS 3D 5M*).

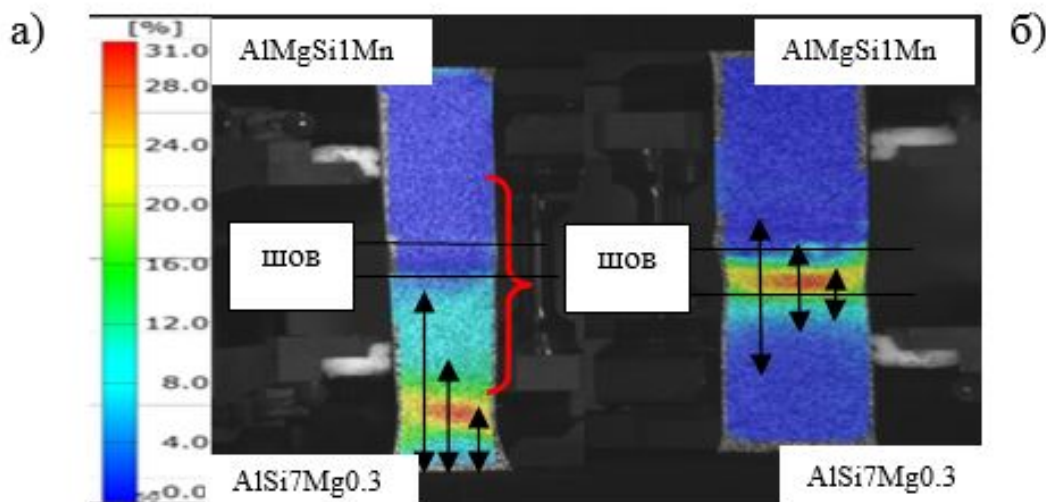


Рис. 4. Визуализация выбранных параметров сварных образцов на растяжение с последующей термообработкой (а) и без последующей термообработки (б)

Установлено, что деформации разрыва зависят от того, была ли после сварки выполнена термическая обработка деталей или нет (табл. 1).

Таблица 1

Механико-технологические параметры сварных образцов

Диапазон измерения	Образец (а)	Образец (б)
	Удлинение, %	
Датчик растяжения $L_0 = 30$ мм	5	5
Линии растяжения 1 = 25 мм	13	6
Линии растяжения 2 = 10 мм	16	15
Линии растяжения 3 = 5 мм	9	23
Прочность, МПа		
R_m (предел прочности)	185	165
$R_{p0,2}$ (предел упругости)	110	85
Предельное удлинение, %		
A	5	5

Четвертый этап – испытание при ступенчато-возрастающей нагрузке с целью определения предела выносливости.

Поскольку вычислительные процессы и моделирование позволяют дать лишь приблизительное представление о реальных условиях и результатах, результаты вычислительного анализа усталостной прочности должны быть проверены сравнением с экспериментальными данными.

Испытания при ступенчато-возрастающей нагрузке заключаются в том, что деталь испытывают при ступенчатом увеличении нагрузки, начиная с некоторого начального напряжения σ_0 , которое повторяется в течение n_0 циклов. Без промежутков напряжение увеличивают на величину $\Delta\sigma$ до уровня σ_1 , и на этом уровне испытания продолжают в течение $n_1 = n_0$ циклов и так далее – до разрушения детали. Число циклов на последней ступени напряжения n_m определяется разрушением образца и может быть равно или меньше $n_0 = n_1 = \dots = n_{m-1}$. Испытания проводятся с соблюдением постоянства средней скорости увеличения напряжений $\alpha = \frac{\Delta\sigma}{n_i}$.

Режимы испытаний наносят на диаграмму, на которой в осях координат «напряжение – число циклов» изображают фактическую или предполагаемую кривую усталости и ее крайние возможные положения для данной детали. Далее суммируют отношение n_i/N_i (N_i – суммарное количество циклов на всех «ступенях») на различных ступенях нагрузки для каждой из трех кривых усталости. По полученным результатам суммирования, путем графического интерполирования, определяют уровень напряжений, для которого сумма повреждений соответствует единице. Это напряжение считается пределом выносливости испытываемой детали.

В начале испытаний объект устанавливается на стенде (рис. 5), при испытаниях учитываются циклы нагружения во времени. Испытательный стенд позволяет моделировать динамическую нагрузку. Вертикальная опора приваривается под углом $2,8^\circ$ на фундаментной плите и регулирует уклон автомобильной рамы и опоры амортизатора.



Рис. 5. Испытательный стенд: 1 – автомобильная рама (имитация); 2 – контрольно-измерительное приспособление; 3 – фундаментная плита; α – угол кручения; β – угол наклона

Нагрузка, воспроизводимая при испытаниях (эксперименте), должна быть максимально приближена к реальной, поэтому опора амортизатора расположена под углом $\alpha = 12^\circ$ и вращается в направлении гидравлического цилиндра. Экспериментальная нагрузка прикладывается под углом $\beta = 7,8^\circ$ по отношению к фундаментной плите.

Эксперимент выполняется с испытательной частотой 7 Гц. При 10^6 циклов нагружения испытание длится 39,68 часов (1,65 суток). Заданный срок службы составляет 150 000 км. Статическая нагрузка равна 1836 Н.

Если в процессе испытаний отказ не фиксируется, то нагрузка продолжает расти (рис. 6). Утверждено шесть последовательных «ступеней» нагрузки для объекта испытания (табл. 2). Каждая «ступень» составляет примерно 10^6 циклов нагрузки, в общей сложности – $6,28 \cdot 10^6$. Увеличение нагрузки между последующей и предыдущей «ступенями» находится в пределах 19% и, начиная со второй «ступени», увеличивается до 300%. По отношению к первой «ступени» увеличение нагрузки составляет 377%.

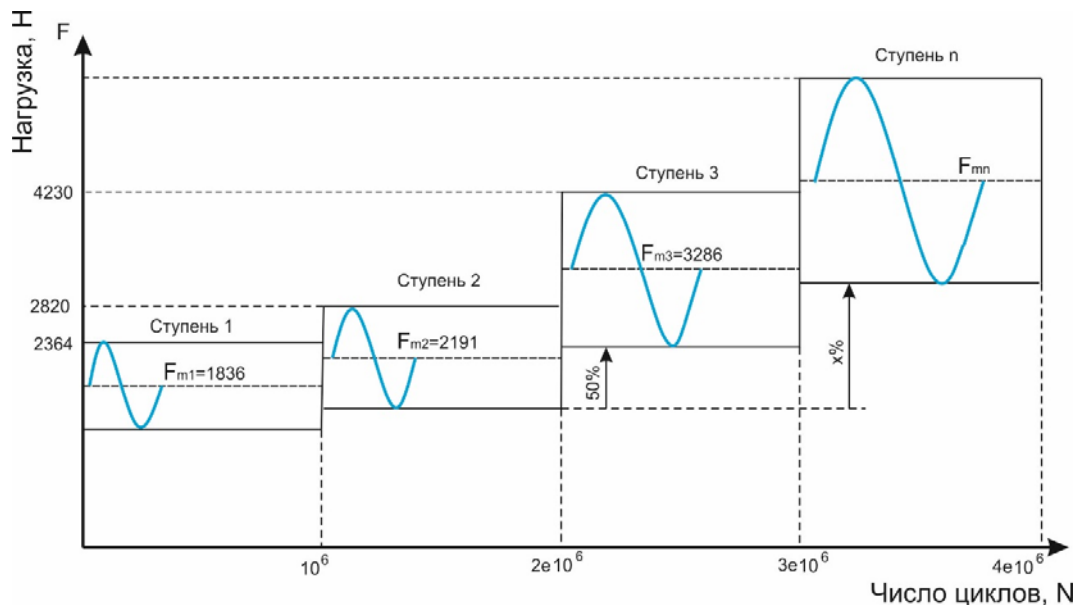


Рис. 6. Режимы испытания при ступенчато-возрастающей нагрузке

Последовательные «ступени» нагрузки

Степень нагрузки	F_a , [Н]	F_m , [Н]	N [число циклов]	Увеличение нагрузки, %
1	528	1836	10^6	-
2	629	2191	10^6	19
3	944	3286	10^6	50
4	1258	4382	10^6	100
5	1573	5477	$1,52 \cdot 10^6$	150
6	2516	8763	$0,76 \cdot 10^6$	300
Сумма			$6,28 \cdot 10^6$	377

Область отказа (рис. 7, а) совпадает с предполагаемым расположением, определенным в процессе моделирования методом конечных элементов (рис. 7, б). В модели МКЭ обозначены две области А (50 Н/мм^2) и Б ($73,9 \text{ Н/мм}^2$).

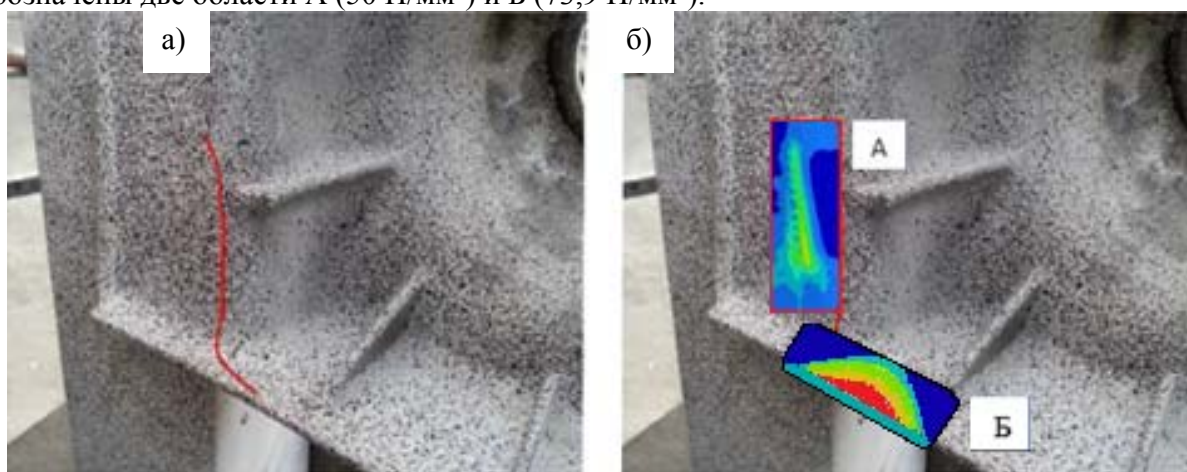


Рис. 7. Локализация отказа (а); модель МКЭ (б)

На основе результатов тензометрии (измерение деформации) было зафиксировано относительное удлинение в области зоны отказа (ступень нагрузки 6, табл. 2). Оно составило примерно 0,3%. Это говорит о том, что трещина возникла в области А и стала распространяться в область Б.

Анализ результатов и выводы

1. Ускоренные испытания на основе ступенчато-возрастающей нагрузки – это малозатратный процесс и особенно эффективен для деталей со сложной конструкцией и геометрией.

2. Результаты испытания служат оценкой усталостной прочности сварных швов и соответствуют норме немецкого промышленного стандарта EN 571–1.

3. Преимущества ускоренного метода:

– метод испытания при ступенчато-возрастающей нагрузке является универсальным и применим для контроля качества различных деталей автомобиля;

– данный метод применим для различных видов деформаций и разной асимметрии цикла изменения нагрузки;

– для деталей любого типа может быть установлен оптимальный режим изменения ступенчатого нагружения, обеспечивающий наиболее короткое время испытаний без уменьшения точности определения предела выносливости;

– разброс результатов при ступенчатом нагружении незначительный. Изменение зоны разброса по пределу выносливости исходных характеристик существенно не влияет на точность ускоренного метода.

Заключение

При применении метода ступенчато-изменяющейся нагрузки для получения более объективных значений пределов выносливости, за исходные характеристики целесообразно принимать корреляционное уравнение и его доверительные границы, полученные на основе статистической обработки результатов усталостных испытаний. Для сокращения времени испытаний при построении кривой усталости может быть использована зависимость между пределом выносливости и долговечностью реальных деталей, работающих при перегрузках.

Наличие такой зависимости дает возможность значительно сократить время, необходимое для проведения испытаний, так как, используя ее, испытания (эксперимент) можно ограничить определением верхнего участка характеристик. При этом предел выносливости можно найти аналитически, экстраполируя результаты испытаний.

Литература

1. *CooCHaibach, E.*: Betriebsfestigkeit. Verfahren und daten zur bauteilberechnung, Berlin, Springer, 2006.
2. *Rudolf, D.*: Simulationsgestützter Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen moderner Konstruktionswerkstoffe am Beispiel eines Aluminiumfahrzeugsrahmens, Masterarbeit. Osnabrück, 2013.
3. *Wolfgang, F.*: Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures, Hamburg University of Technology, 2010.
4. DIN EN 571-1: Неразрушающий контроль. Капиллярный контроль. Немецкая версия EN 571-1:1997.
5. Автомобили. Испытания: учеб. пособие для вузов// В.М. Беляев, М.С. Высоцкий, Л.Х. Гилелес и др.: под ред. А.И. Гришкевича. Минск: Изд-во «Вышэйшая школа», 1991. – 354 с.
6. *Кушвид Р.П.* Испытания автомобиля: учеб. для ВУЗов. М.: Московский гос. индустриальный ун-т, 2011. – 380 с.
7. *Набоких В.А.* Эксплуатация и ремонт электрооборудования автомобилей и тракторов: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 240 с.
8. *Ткалич В.Л., Лабковская Р.Я.* Обработка результатов технических измерений: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 72 с.
9. *Степнов М.Н., Шаврин А.В.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник: 2-е изд., исправ. и доп.. М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.