

УДК 629.3.02

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

канд. техн. наук, доц. А.А. РАКИЦКИЙ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Рассмотрена методика разработки локальных моделей зон разрушения сложных конструкций. Предложены оригинальные способы ускорения стендовых испытаний при нерегулярном нагружении за счет исключения неповреждающих напряжений с учетом снижения предела выносливости деталей. Изложены результаты ускоренных испытаний моделей штампованного картера ведущего моста грузового автомобиля и прогнозирования его усталостной долговечности в типовых условиях эксплуатации, охватывающих различные категории дорог.*

**Ключевые слова:** сопротивление усталости, ускоренные испытания, прогнозирование ресурса, неповреждающие напряжения, модель зон разрушения.

Современные машины проектируются на длительный срок эксплуатации, в течение которого они подвергаются значительному числу циклов нагружения различного уровня. Конструкторы и технологи пользуются расчетами, компьютерным моделированием, данными об аналогах и прототипах, однако актуальной всегда является задача экспериментальной проверки тех или иных решений. При этом предъявляются часто противоречивые требования, среди них главные – максимальная точность и достоверность результатов при минимальных временных и материальных затратах.

Многолетний опыт исследований автора в области усталостной долговечности несущих конструкций наземных мобильных машин позволяет рекомендовать два основных методических подхода к решению проблемы прогнозирования ресурса: во-первых, проводить испытания физических (локальных) моделей зон разрушения элементов сборочных единиц и, во-вторых, формировать программы стендового нагружения, моделирующие реальные условия эксплуатации с исключением неповреждающих циклов.

Предложенные подходы в данном исследовании рассмотрим на примере штампованных картеров ведущих мостов большегрузных автомобилей с точки зрения их долговечности.

**Методология исследований.** Стендовые испытания натуральных конструкций показали, что наиболее слабым с точки зрения усталости звеном является место пересечения сварных швов соединения «банджо» 1 (корпуса центральной конической передачи моста) с клиновыми вставками 2 рукавов картера, в которых размещаются оси колес (рис. 1).

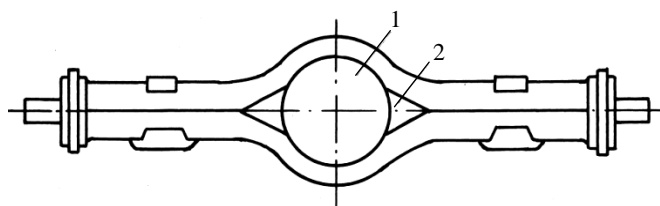


Рисунок 1 – Штампованной картер ведущего моста автомобиля МАЗ

Тщательное изучение усталостного излома, анализ схемы нагружения и напряженно-деформированного состояния деталей позволили разработать локальную модель, имитирующую «опасную зону» (рис. 2).

Модель представляет собой плоский образец, изготовленный из листов стали 17 ГС толщиной 12 мм, соединенных автоматической сваркой в среде углекислого газа. Стыковой шов, выполненный под углом  $20 \pm 1^\circ$  к оси образца, воспроизводит шов приварки клиновой вставки. Сварка колец жесткости «банджо» моделируется приваркой поперечной накладки, длина которой меньше ширины образца. Таким образом достигается зарождение усталостных трещин именно на пересечении сварных швов. Исходные характеристики материала испытываемых моделей приведены в таблице 1.

Испытания на усталость проводились на стандартной сервогидравлической установке с осевым усилием до 250 кН. Для формирования программ нерегулярного стендового нагружения, эквивалентных реальным условиям эксплуатации конструкций, необходима регистрация действующих нагрузочных факторов и, соответственно, напряженно-деформированного состояния деталей.

Для автопоездов МАЗ в качестве типовых выбраны пять категорий дорог: асфальтобетонная, профилированный булыжник, булыжник ровного замощения, горные участки, городские улицы. Измерения

проводились на дорогах общего пользования, а также автополигона в городе Дмитрове Московской области. Общая протяженность записей в данном эксперименте составила порядка 500 км.

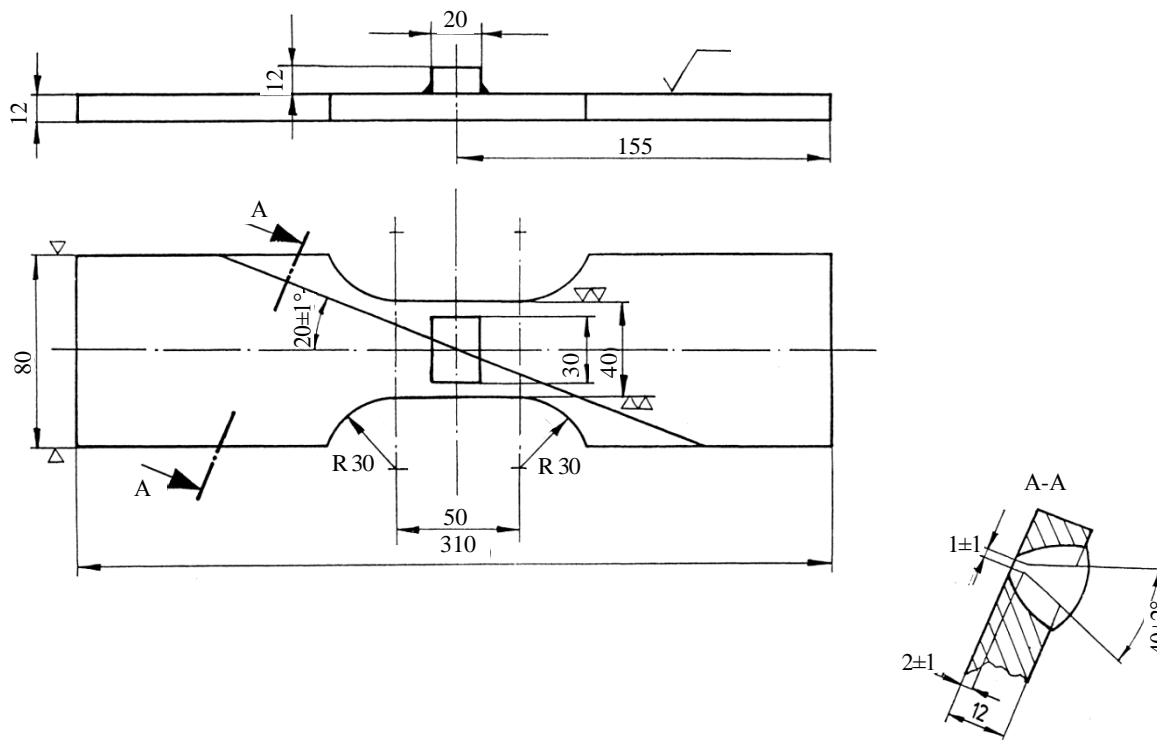


Рисунок 2 – Модель штампованного картера

Таблица 1 – Характеристики материала испытываемых моделей

Химический состав, %						Пределы, МПа		
C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	прочности	текучести	выносливости
0,17	0,69	1,95	0,1	0,06	0,11	520	350	60

Для воспроизведения в стендовых условиях случайные процессы эксплуатационного нагружения требуют анализа и упорядочения, а именно выделения полных циклов, учета асимметрии и т.п. Наиболее эффективный и широко используемый – метод «падающего дождя» [1]. В результате обработки дорожных данных получена исходная матрица, представляющая собой распределение числа экстремумов, попадающих в один из 64 диапазонов напряжений, на которые разделена вся область зафиксированных напряжений.

Эксплуатационный спектр содержит значительный объем малых амплитуд типа наложенных на полные циклы вибраций. Их исключение, или фильтрация, обеспечивает существенное сокращение времени стендовых испытаний. Наиболее простая или очевидная методика фильтрации – это задание некоторого уровня исключаемых амплитуд, своеобразных «ворот при спуске горнолыжника по слаломной трассе», который сглаживает дорожные записи. Можно использовать более сложные аналитические способы ускорения стендовых испытаний, обеспечивающие повышение точности прогнозных оценок ресурса [2; 3].

**Результаты исследований.** В таблице 2 приведена программа стендового нагружения, эквивалентная пробегу автопоезда 260 км, в которой исключены напряжения менее 10% от максимальной амплитуды циклов, зарегистрированных при дорожных испытаниях.

Таблица 2 – Программа стендового нагружения с фильтрацией 10% максимальных амплитуд напряжений

Категория дорог	Количество мерных участков	Число зарегистрированных экстремумов	Число экстремумов после фильтрации	Процент сокращения экстремумов	Экстремальные значения напряжений, МПа		Параметры циклов стендового нагружения
					max	min	
Асфальт	15	10754	6796	37	+148	-70	47/26
Ровный бульжник	2	14935	11036	26	+288	-239	61/9
Профилированный бульжник	1	21980	16344	26	+287	-178	61/15
Горные дороги	1	26987	12328	54	+320	-204	64/12
Городские дороги	1	37447	18654	50	+320	-192	64/14

Конвертация полученных записей в параметры циклов стендового нагружения производится с помощью стандартного программного обеспечения испытательной машины. Испытания проводились с частотой нагружения до 20 Гц.

На рисунке 3 в качестве примера показана программа стендового нагружения до фильтрации, содержащая 3,76 млн полуциклов напряжений.

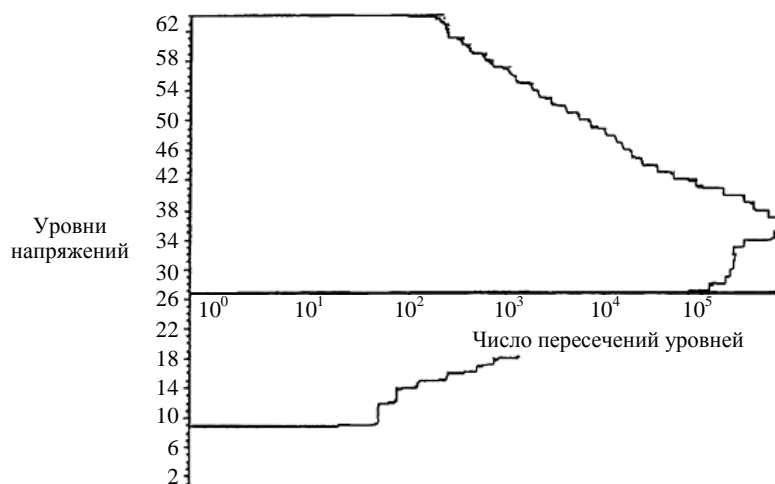


Рисунок 3 – Исходная программа стендового нагружения модели

Расчет эксплуатационного пробега производится по формуле:

$$L = Nkl,$$

где  $N$  – число блоков до разрушения модели;  $k = 21,11$  – коэффициент конвертации измеренных в эксплуатации напряжений для воспроизведения при стендовых испытаниях;  $l = 260$  км – эквивалент блока стендового нагружения.

Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные ускоренных испытаний моделей и расчета пробега

характеристика	Нагрузочный блок		Число полуциклов до разрушения	Число блоков до разрушения	Расчетный пробег, км
	отфильтрованные напряжения	количество полуциклов			
Исходный схематизированный	–	157 300	25 977 190	165,1	906 168
			28 487 000	181,1	993 985
Сокращенный	Две диагонали асфальта исходного блока	100 798	15 351 648	152,0	834 267
			10 084 800	161,3	885 311
	Одна диагональ исходного блока	62 528	13 205 201	211,2	1 159 192
			4 832 625	184,1	1 010 451
	Три диагонали схематизированного блока	26 250	5 855 357	223,1	1 224 507
			1 089 674	120,4	поломка 23 мм от накладки
Пять диагоналей схематизированного блока	9 050	2 463 000	272,2	1 493 997	

Как видно из таблицы 3, при нагружении двух моделей без фильтрации напряжений число полуциклов до разрушения составило 25 977 190 и 28 487 000; число повторения блоков 165,1 и 189,1 соответственно; ресурс картера автомобиля в пределах 906...994 тыс. км, что соответствует проектным заводским данным.

При исключении двух диагоналей зарегистрированных полуциклов, соответствующих движению автомобиля по асфальтированному шоссе, уменьшение числа полуциклов в каждом блоке составляет 57 тыс., а в конечном итоге до разрушения модели сокращение достигает более 10 млн. полуциклов. Прогнозируемый ресурс конструкции при этом снижается до 834 тыс. км (примерно на 10%). Если из исходных блоков нагружения исключаются три или пять диагоналей напряжений, то, естественно, это приводит к росту циклической долговечности моделей.

На фотоснимках (рис. 4) показано типичное разрушение испытуемой модели. На изломе хорошо видны очаги зарождения трещин (ступеньки) в зоне пересечения сварных швов, а также полуэллиптические линии фронта распространяющихся усталостных трещин перед окончательным доломом.

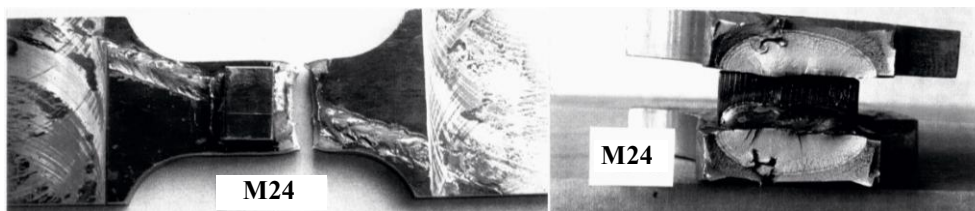


Рисунок 4 – Типичное разрушение в пересечении сварных швов модели

Графическое сопоставление результатов испытаний с расчетной кривой усталостной долговечности по модифицированной теории Майнера проиллюстрировано рисунком 5.

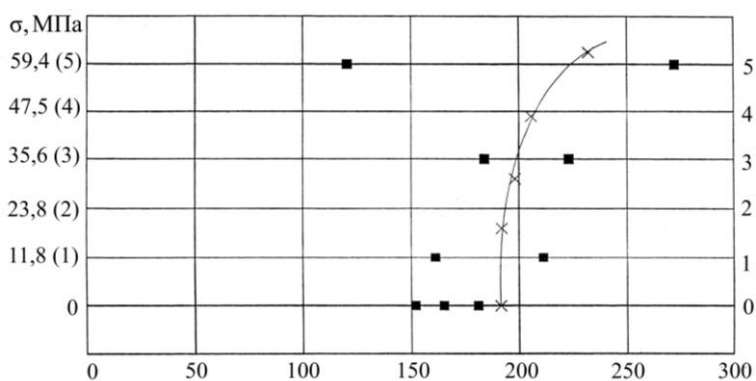


Рисунок 5 – Экспериментальные данные и расчетная кривая повреждения для моделей из стали 17 ГС (на оси ординат в скобках указаны номера диагоналей схематизированного спектра)

В расчет не принимается образец, разрушение которого, в отличие от всех других, наступило не в зоне пересечения сварных швов. Как видно из рисунка 5, исключение из записанных в дорожных условиях спектров даже трех диагоналей малых амплитуд (до 35,6 МПа) не приводит к существенному изменению долговечности и отклонению от данных об эксплуатационном ресурсе конструкции. Это позволяет рекомендовать на стадии формирования программ стендовых испытаний исключать амплитуды порядка 10% от зарегистрированных максимальных значений. При этом время испытаний сокращается на 80%, что соответствует коэффициенту ускорения 5.

Экспериментально проверен запатентованный способ ускоренного испытания материала на усталость [4]. В предлагаемом методе случайный (измеренный в эксплуатации) спектр заменяется на эквивалентную блок-программу циклов с постоянным коэффициентом асимметрии нагружения  $R_\sigma = 0,1$ . Максимальное напряжение – 380 МПа, частота нагружения – до 20 Гц. Все ступени до 0,7 предела выносливости исключаются в начале испытания. Далее они подключаются к нагружению по мере снижения предела выносливости. Фрагмент рандомизированной программы стендового нагружения дан на рисунке 6.

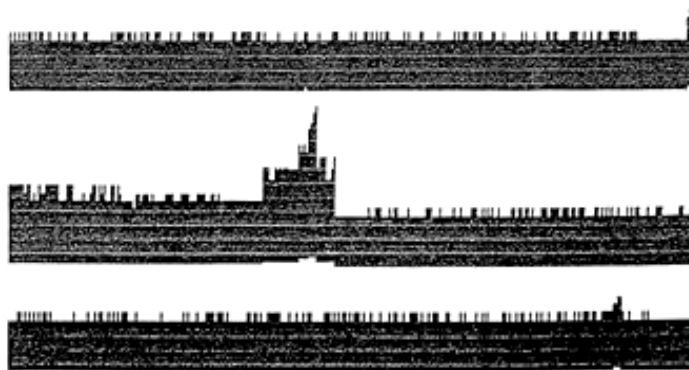


Рисунок 6 – Рандомизированная программа стендового нагружения

В таблице 4 приведены результаты стендовых испытаний моделей штамповарного картера по программе нагружения блоками, эквивалентными 260 км пробега, без фильтрации напряжений.

**Таблица 4 – Результаты стендовых испытаний моделей при нагружении блоками, эквивалентными 260 километрам пробега**

Программа блочного нагружения		Количество полуциклов до разрушения	Количество блоков до разрушения	Прогнозный пробег, км
число ступеней/блоков	число полуциклов			
17/40	181 600	5 234 147	393,8	2 161 410
18/34	230 792			
19/25	261 350			
20/1	15 470			
20/294,8				
17/40 -//- 20/240,9	181 600	4 390 010	339,9	1 865 575
17/40 -//- 20/236,7	181 600	4 335 532	335,7	1 842 523
17/40 -//- 20/263,6	181 600	4 750 863	362,6	1 990 166
16/63 17/51 18/37 19/26 20/1 20/221,6	191 268 231 540 251 156 271 804 15 470	4 373 281	398,6	2 187 756

Исходная программа блочного нагружения по методу [4], эквивалентная эксплуатационному пробегу 485 км, содержала 10 ступеней (табл. 5).

**Таблица 5 – Результаты стендовых испытаний моделей при нагружении блоками, эквивалентными 485 километрам пробега**

Программа блочного нагружения		Количество полуциклов до разрушения	Количество блоков до разрушения	Прогнозный пробег, км
число ступеней/блоков	число полуциклов			
10/11 11/15 12/13 13/6 14/1 14/108,1	133 012 339 900 498 238 434 772 137 356	16 260 823	153,1	1 078 903
10/11 -//- 14/90,4	-//-	13 825 691	135,4	954 170
10/11 -//- 14/98,8	133 012 -//-	14 977 082	143,8	1 013 365
10/42 11/16 12/13 -//- 14/75,6	507 864 362 560 -//-	12 180 949	152,6	1 075 380

По мере выработки ресурса и снижения предела выносливости до 134 МПа к повреждающему действию подключались более низкие ступени (до 14-й включительно). Разброс числа блоков до разрушения четырех образцов оказался в пределах допустимой погрешности эксперимента, прогнозируемый ресурс конструкции – порядка 1 млн км, что реально соответствует данным эксплуатации автомобилей. Тем не менее количество циклов стендового нагружения по программе 485 км примерно в 3 раза больше по сравнению с программой 260 км.

Проведенные эксперименты показали, что сложные и длительные дорожные записи могут быть значительно упрощены. Примерно 40% циклов до разрушения сокращается, что дает коэффициент ускорения испытаний, равный 1,7.

**Заключение.** Анализ результатов исследований позволил сделать следующие *выводы*:

- записи напряжений на штампосварном картере ведущего моста при движении грузового автомобиля по скоростному асфальтированному шоссе могут быть исключены из рассмотрения как неповреждающие, при этом число циклов нагружения сокращается вдвое;
- исключение трех средних диагоналей матрицы «падающего дождя» репрезентативного блока нагружения обеспечивает коэффициент «уплотнения» порядка 5; при этом отмеченный рост пробега на 20% свидетельствует о некотором влиянии исключаемых малых амплитуд; априори устанавливаемая граница повреждающих напряжений  $0,1 \sigma_{\max}$  имеет право на применение;
- использование «жесткого» блока нагружения 260 км приводит к ускорению испытаний в 5 раз, однако прогнозируемый ресурс превышает в 2 раза эксплуатационные данные;
- более точные результаты дают испытания по программе 485 км, которая формируется на базе экстраполяции максимальных значений напряжений в область малой вероятности их появления  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  и с учетом влияния асимметрии нагружения; в этом случае коэффициент ускорения составляет 1,7 раза и достигается хорошее совпадение с ресурсом конструкции в реальной эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шмелев, А.В. Критерии выбора методов схематизации нагруженности при прогнозировании ресурса несущих конструкций транспортных средств / А.В. Шмелев, А.А. Ракицкий // Вестн. Гомельского ГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – № 4. – С. 23–28.
2. Способ испытания конструкции на усталостную долговечность: а. с. 1627902 СССР / А.А. Ракицкий, В.И. Шоломицкий, М.И. Горбацевич, А.К. Бернацкий // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 6.
3. Способ испытания конструкции на усталостную долговечность: а. с. 1696954 СССР / А.А. Ракицкий, В.И. Шоломицкий, А.К. Бернацкий, А.М. Григорчук // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 45.
4. Способ ускоренного испытания материала на усталость: пат. 2028602 РФ / Е.К. Почтенный, А.А. Ракицкий, В.И. Шоломицкий // Изобретения. – 1995. – № 4.

Поступила 15.01.2016

#### SERVICE LIFE PREDICTION FOR MOBILE MACHINE STRUCTURES BY RESULTS OF RANDOM ACCELERATED TESTS

A. RAKITSKY

*A technique of a local model development for fracture zones of complex structures is examined. The original accelerated test methods under irregular loading by omitting of non-damaging stresses with regard for a fatigue limit lowering of components are proposed. The results of accelerated tests for models of a truck driving axle stamp-welded case and data of a prediction its fatigue endurance under typical service conditions which covers different categories of roads are stated.*

**Keywords:** *fatigue endurance, accelerated tests, service life prediction, non-damaging stresses, model of fracture zones.*