

УДК 29.113.073

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ АВТОМОБИЛЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Михайлов Владимир Георгиевич, канд техн.наук,
РБ, Минск, sapr7@mail.ru,

Аннотация. Рассмотрены существующие методы определения долговечности узлов автомобиля. Предложена методика и реализация определения долговечности узлов автомобиля на стадии проектирования с использованием имитационного моделирования в Matlab/Simulink, выявления связей нагрузки и напряжения в 3-D модели в NASTRAN/ANSYS и обработки данных по методу дождя с помощью программ на C/C++ на примере долговечности картера моста.

Ключевые слова: автомобиль, проектирование, Matlab/Simulink, программы на C/C++.

DEFINITION OF DURABILITY OF NODES OF THE VEHICLE AT DESIGN STAGE

Mikhailov Vladimir G., Ph.D., associate professor,
Minsk, Republic Belarus, sapr7@mail.ru,

Abstract. The existing methods of Definition of durability of nodes of the vehicle are considered. The technique and implementation of Definition of durability of nodes of the vehicle at design stage with use of imitating modeling in Matlab/Simulink, ANSYS and data processing by means of programs on C/C++ on the example of durability of axle casing is offered.

Key words: vehicle, design, Matlab/Simulink, the program on C/C++.

Введение. Определение долговечности узлов автомобиля является важной задачей при проектировании. В большинстве случаев до сих пор ориентируются на экспериментальные методы регистрации и обработки нагруженности узлов в дорожных условиях, выявления наиболее нагруженных точек напряжений в стендовых условиях и последующим

воспроизведением систематизированной нагрузки на гидропульсаторах [1–3]. Далее на их основе производится расчет долговечности. Данный метод требует наличия самого автомобиля или исследуемого узла. По длительности этот процесс может занимать до полгода. Либо применяются эмпирические методы оценки на базе данных аналогов.

Сейчас современный уровень развития компьютерной техники, программного обеспечения и совершенствование моделей позволяют решать данную задачу для нового изделия уже на стадии проектирования, что невозможно было ранее. Но она довольно сложная: через колебания автомобиля выйти на нагрузки, далее через 3D модель выявить связь нагрузок и напряжений в узлах. И по усталостным характеристикам материалов и систематизации данных напряжений оценить долговечность.

Для ее решения требуется:

- иметь более совершенные модели движения и колебаний автомобиля;
- располагать данными по макро и микропрофилю дорог (заданными по точкам) и распределению движения по различным дорогам;
- располагать техническими средствами осуществления имитационного моделирования движения с учетом дорожной обстановки с переменной скоростью;
- создание 3D модели исследуемого узла и иметь усталостные характеристики материалов, располагать и уметь пользоваться «пакетами» оценки напряженно-деформированного состояния;
- уметь провести систематизацию полученных данных по нагрузкам узла и переводу их в напряжения и расчету долговечности.

К сожалению, опубликованных работ по этому направлению на основе моделирования в “реальных” дорожных условиях как единого целого в СНГ пока нет. Хотя и имеется много работ по решению отдельных задач на базе экспериментальных данных [1, 3, 4],

использованию MS.ADAMS, для оценки действующих максимальных нагрузок и прочностного напряженного состояния в MS.NASTRAN узлов автомобиля при переезде препятствий. Но это оценка прочности, а не долговечности. По косвенным признакам из информации в интернете по ведущим автомобилестроительным фирмам [2, 3] можно сделать вывод, что задача оценки долговечности у них решается. Но она является их ноу-хау и информация по ней недоступна, что требует собственных исследований.

Целью данной работы является рассмотрение решения данной задачи.

1. Необходимые компоненты

1.1. Используемые модели

В процессе решения данной задачи необходимо осуществить совместное моделирование движения и колебаний автомобиля, движущегося по реальной дороге с переменной скоростью и обеспечивающие приемлемую точность вычислений нагрузок (10–15%) с учетом спектра. Этим требованиям отвечают модели, описанные в работе [6]. Важным моментом для моделирования является использование пакета Matlab/Simulink, который позволяет осуществлять моделирование в “реальном” масштабе времени при “реальном” воздействии дороги и дорожной обстановки, а также организовать взаимодействие с другими техническими средствами.

1.2. Реализация воздействия дороги и дорожной обстановки

Для решения этой комплексной задачи требуется осуществление имитационного моделирования [8]. Для обеспечения хорошей сходимости с экспериментом необходимо использование реального макро и микропрофиля дороги. Их получение и использование подробно описаны в работе [6]. Использование спектральной плотности характеристик дорог, статистических методов и линеаризации, предлагаемые в пакете MS.ADAMS, нежелательно, так как приведет к большой погрешности

расчета колебаний. Кроме того, в этом пакете невозможно осуществить моделирование с использованием больших массивов данных дороги, т.к. отсутствуют инструменты взаимодействия с другими средствами.

1.3. Технические средства осуществления имитационного моделирования

Чтобы получить данные о «реальной» нагруженности автомобиля, целесообразно применение имитационного моделирования в реальном масштабе времени [6]. И через колебания выйти на нагрузки моста автомобиля. Для этого необходимо использование быстродействующих компьютеров (CPU ~ 3,6–4 ГГц с соответствующей памяти (ОП > 16 ГБ, твердотельных накопителей .M2), мини-компьютеров с разнесением задач на них и организации их взаимодействия по сети CAN BUS. Наиболее идеальным вариантом является реализация схемного решения с вибрационным стендом с проекторами (рис. 1), подробно рассмотренная в работе [6], создающая иллюзию движения по реальной дороге.

Как показали исследования, без вибрационного воздействия все же нет полного ощущения реальной дороги даже на макетном настольном образце, который является важной частью и этапом создания полноценной системы. Поэтому принято решение проводить исследования с помощью совместного моделирования движения и колебаний автомобиля на тех же моделях [6].

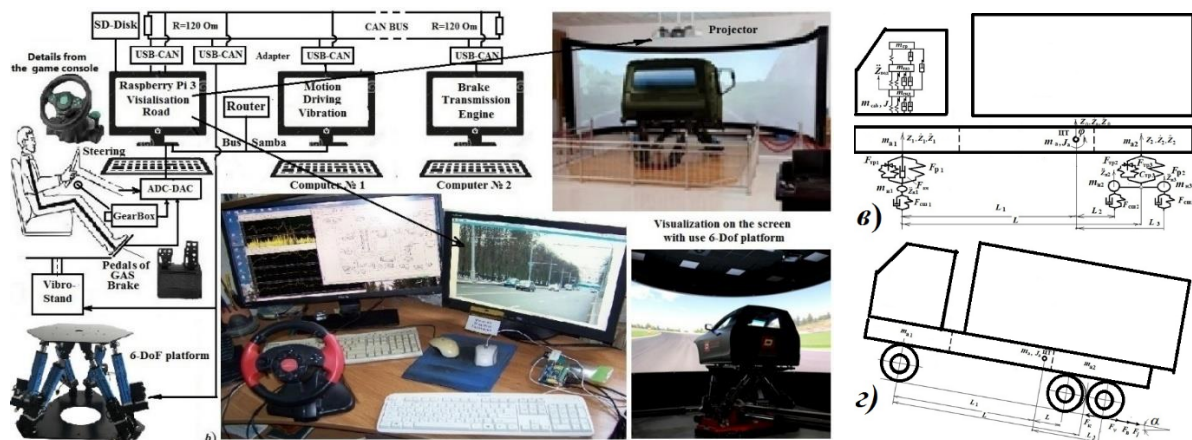


Рис. 1. Схема имитационного моделирования, макетный настольный образец и использованные модели

1.4. 3D модель исследуемого узла и усталостные характеристики материала

Использование 3D модели исследуемого узла (рис.2а) необходимо для выявления в статике наиболее опасных зон нагружения, по которым определяется НДС и определяется переводной коэффициент от нагрузки на узел к напряжениям, на основе которых далее рассчитывается долговечность.

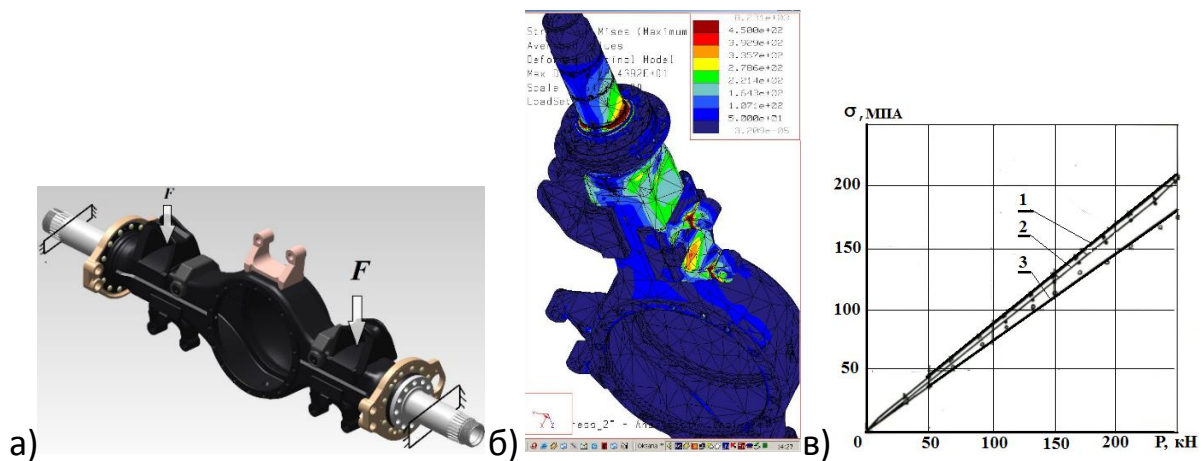


Рис.2. 3D модель моста (а), его напряженно-деформированное состояние (НДС) в NASTRAN (б), зависимость напряжений от нагрузки для различных вариантов комплектности заднего моста (в);

1 - в сборе с колесами; 2 - в сборе с тормозами и ступицами;
3 - картер в сборе без узлов трансмиссии

По данным работы [1] напряженное состояние картера без узлов трансмиссии незначительно отличается от моста в сборе (рис.2б), что позволяет упростить модель. Для проведения расчетов необходимо также располагать усталостными характеристиками примененного материала в конструкции.

При отсутствии 3D модели требуется проведение тензометрирования картера моста в стендовых условиях либо на машине путем его поддомкрачивания. Для этого может использоваться простейшая аппаратура на базе миникомпьютера Raspberry [6], либо использовать

данные ранее проведенных исследований [1], что было применено в работе.

1.5. Систематизация полученных данных по нагруженности узла и пересчет ее в его долговечность

В результате совместного моделирования движения и колебаний автомобиля получаем данные по нагрузкам. Это массивы усилий, моментов, действующие на мост. Для расчета долговечности требуется перевести их в напряжения. Далее, чтобы определить долговечность узла необходимо систематизировать их и на основе кривой усталости определить долговечность узла. Это довольно сложная задача, которая будет рассмотрена подробно ниже.

2. Оценка долговечности узла

2.1. Оценку долговечности узла рассмотрим на примере картера заднего моста (рис.3).

Для систематизации данных более предпочтительным представляется использование метода “падающего дождя”, значительно сокращающего число циклов и режимов нагружений [5] при оценке долговечности. Данный метод дает расчетные оценки долговечности более сопоставимые с экспериментальными данными (см. рисунок 3в, взятый из работы [6]).

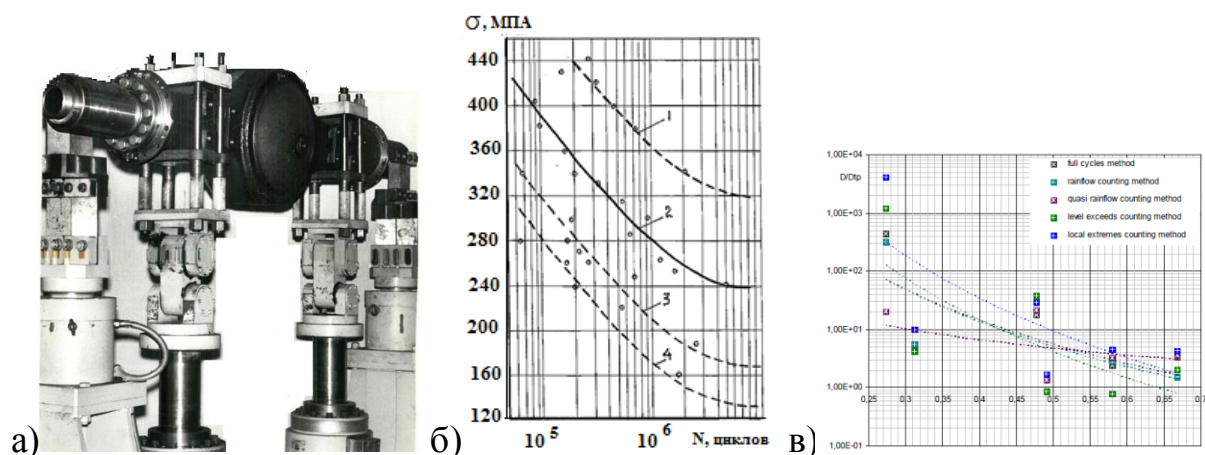


Рис. 3. Общий вид стендовых испытаний заднего моста (а), характеристики усталости материала (б) и сравнение методов оценки систематизации данных (в)

2.2. Выбор метода систематизации данных

2.2.1. Выделение экстремальных значений случайного процесса нагружения

При проведении схематизации по любому из методов [5] вначале производится выделение экстремальных значений из процесса нагружения. Процесс выделения экстремумов подробно описан в работах [4, 8].

Метод “падающего дождя” позволяет проводить схематизацию в режиме реального времени, при этом запоминается лишь траектория потоков дождя. Обработка данных сложная [4, 5, 8] и требует использование специальных программ. Для реализации метода “падающего дождя” в интернете предлагается ряд программ на языке С/С++. Одна из них [9], использовалась в данной работе.

3. Расчет долговечности

3.1. При расчетах долговечности могут использоваться методы, основанные на линейной, скорректированной линейной и нелинейной гипотезах суммирования повреждений, а также на учете снижения предела выносливости по мере наработки детали, рассмотренные подробно в работе [1].

Одним из наиболее простых и распространенных условий суммирования усталостных повреждений является линейная гипотеза Велера [1].

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

где N_i – число циклов по кривой усталости при амплитуде (σ_{ai}), соответствующей вероятности разрушения 50 %; n_i – число циклов повторения амплитуды σ_{ai} на этом режиме за срок службы.

Наибольшее распространение получила следующая формула, корректирующая линейную гипотезу усталостных повреждений:

$$\sigma_{-1\text{пов}} = \sigma_{-1\text{пов},i-1} \left[1 - \frac{n_i}{N_i} K \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1\text{пов},i=1}} - 1 \right) \right]$$

$$\sum_{\sigma_{ai} > \sigma_{-1D}} \frac{n_i}{N_i} = a_p$$

$$a_p = \frac{\varepsilon \sigma_{ai} - 0,5 \sigma_{-1D}}{\sigma_{amax} - 0,5 \sigma_{-1D}}$$

$$\varepsilon = \sum_{\sigma_{ai} > 0,5 \sigma_{-1D}} \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{max}} \frac{n_{i6}}{n_6} = a_p \quad (2)$$

где σ_{ai} – амплитуда i – го уровня в блоке нагружения, состоящем из n ступеней ($i = 1, 2, \dots, n$); $\sigma_{amax} = \sigma_a$ – наибольшая амплитуда в блоке; σ_{-1D} предел выносливости детали; n_{i6} – число циклов в блоке, соответствующее амплитуде a_p ; n_6 – общее число циклов в блоке после исключения из него амплитуд $\sigma_{ai} < 0,5 \sigma_{-1D}$.

По данным работы [1] использование предложенных зависимостей для расчетов долговечности образцов приводит в некоторых случаях к существенным ошибкам в сторону занижения долговечности.

В работе [1] рассмотрен метод суммирования усталостных повреждений при нерегулярном нагружении, основанный на учете постепенного снижения предела выносливости вследствие предварительного динамического нагружения. В основу метода положено уравнение

$$\sigma_{-1\text{пов}} = \sigma_{-1\text{пов},i-1} \left[1 - \frac{n_i}{N_i} K \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1\text{пов},i=1}} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

где $\sigma_{-1\text{пов},i-1}$ – величина предела выносливости поврежденного металла после приложения $(i-1)$ -й ступени повреждения; N_i – число циклов по кривой усталости поврежденного металла после приложения $(i-1)$ -й ступени при амплитуде σ_{ai} ; n_i – число реальных циклов σ_{ai} в диапазоне квантования; K – параметр уравнения, характеризующий интенсивность снижения предела выносливости от предварительного нагружения.

Анализ работы [1] показывает, что относительные долговечности $\frac{n_i}{N_i}$, найденные по скорректированной линейной гипотезе (2) и по методу (1), весьма близки между собой, поэтому можно воспользоваться более простой формулой 1.

3.2. Определение долговечности картера моста автомобиля

Для получения оценки долговечности картера моста автомобиля вначале необходимо определить коэффициент перевода нагрузки в напряжения. Для чего воспользуемся 3D моделью картера моста, загруженной в NASTRAN или ANSYS, где проведем защемление и нагружение моста (рис. 2) либо экспериментальными данными. Это необходимо для выявления наиболее нагруженной точки и определение коэффициента связи нагрузки и напряжений, составившего для исследованной конструкции 0,8 МПа/кН.

Далее для оценки нагруженности проводилось моделирование движения с переменной скоростью и колебаний автомобиля 6х6 на 3-х (10-ти километровых) участках дороги: асфальт очень хорошего качества, среднего и на разбитом грунтовом шоссе, описанные соответственно, как 1, 2, 5 в работе [6] с распределением пробега 40, 50 и 10 %.

Оценивая нагрузку на мост через ускорения неподрессоренных масс и статическую нагрузку на мост как $F = m_m \cdot \ddot{z}_m + F_{ст}$ в результате моделирования через программу на C/C++ в модуле S-Function Builder Simulink получим через переводной коэффициент массив напряжений на основе усилий (в формате txt, **dm.txt**), действующих в мосте (~ 40000 записей на 10 км пути) для каждой дороги. Далее суммируем файлы массивов командой Windows **copy**

2dm.txt+2dm.txt+2dm.txt+2dm.txt+2dm.txt+ 3dm.txt+3dm.txt+3dm.txt+ 3dm.txt+1dm.txt /b dmsum.txt соответственно по 4, 5, 1 блока массивов,

полученных для этих дорог, соответствующие суммарному пробегу 100 км (~ 400000 записей).

Для систематизации данных по методу дождя использовалась программа RainFlow.exe [8], в которую вводился файл указанного массива (**dmsum.txt**). Указывался выходной файл и значение напряжений ниже предела усталости. Результаты их пересчета с помощью разработанной программы на C/C++ приведены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1

Результаты обработки НДС моста при движении по грунтовой, асфальтированным дорогам с распределением пробега 10, 40, 50 % (при средней скорости на грунтовой $v=26,5$ км/ч) программой RainFlow.exe

Ср Ампл МПа	Max Ампл	Ср Знач МПа	Min Val МПа	Max Peak	R	Кол циклов	$\sigma_{\text{ЭКВИВ}}$ МПа	n_i/N_i
224.20	233.60	40.64	-193.70	273.40	-0.829	3.00	215.39	0.0000183
197.30	200.60	58.87	-151.40	274.20	-0.755	4.50	178.14	0.0000121
172.40	181.40	51.07	-142.70	246.30	-0.787	9.00	163.73	0.0000167
148.10	160.60	48.46	-126.50	219.20	-0.788	28.50	145.03	0.0000313
125.80	138.70	54.73	-98.68	211.20	-0.711	78.00	120.43	0.0000383
Ресурс						1275065	км	0.0000784

Таблица 2

Результаты обработки НДС моста при движении по грунтовой дороге (при средней скорости на грунтовой $v=26,5$ км/ч) программой RainFlow.exe

Ср Ампл МПа	Max АмплМПа	Ср Знач МПа	Min Val МПа	Max Peak	R	Кол циклов	$\sigma_{\text{ЭКВИВ}}$ МПа	n_i/N_i
224.70	235.00	38.10	-195.70	274.20	-0.833	4.00	217.06	0.0000038
197.30	200.60	58.87	-151.40	274.20	-0.755	4.50	178.14	0.0000042
173.90	181.40	53.73	-140.40	246.30	-0.774	8.00	162.68	0.0000075
149.60	163.70	56.43	-114.30	219.20	-0.698	18.50	141.15	0.0000175
Ресурс						302857	км	0.0000330

Таблица 3

Результаты обработки НДС моста при движении по грунтовой дороге (при средней скорости на грунтовой $v=38,5$ км/ч) программой RainFlow.exe

Ср Амп МПа	Мах Ампл	Ср Знач МПа	Мин Val МПа	Мах Peak	R	Кол циклов	$\sigma_{\text{ЭКВИВ}}$ МПа	n_i/N_i
352.50	361.20	3.60	-348.90	373.50	-0.966	1.00	355.59	0.0000009
297.70	305.80	33.11	-285.30	373.50	-0.933	2.00	296.44	0.0000019
273.60	281.00	2.87	-272.90	289.10	-0.971	1.50	277.30	0.0000014
232.60	252.60	32.35	-216.30	289.10	-0.856	9.50	236.03	0.0000090
194.80	209.40	31.29	-194.70	249.70	-0.930	18.50	202.69	0.0000175
160.40	180.10	35.59	-172.30	241.80	-0.957	50.00	176.54	0.0000472
					Ресурс	53266	км	0.0001877

Примечание. 1. Желтым цветом выделены данные, получаемые в RainFlow.exe, остальные в Resource_M.exe.

2. Данные по дорогам 2, 3 ввиду малости значений не приводятся.

3. Для сокращения места удалены строки с $\sigma_{\text{ЭКВИВ}} < 140$ МПа.

Полученные данные в RainFlow.exe необходимо привести к симметричным напряжениям эквивалентным по повреждению для чего воспользуемся, приведенными в работах [1, 4] формулами

$$\sigma = b \cdot \sigma_{\max} - (a \cdot b - 1) \sigma_{-1} \quad (4)$$

где

$$a = \frac{2}{2 - (1 - \varphi)(1 + R)}; \quad b = \frac{\nu_2}{\nu_R} = \frac{1}{\frac{\nu_1}{\nu} + (\frac{\nu_1}{\nu_2} - 1)R}$$

σ_{-1} – предел выносливости при симметричном цикле

ν_2 – угол наклона кривой усталости при симметричном цикле нагружения; ν_1 – угол наклона кривой усталости при отнулевом цикле нагружения.

Заданным значениям пределов выносливости σ_R соответствуют

значения характеристик угла наклона кривых усталости v , определяющихся из уравнения,

$$v = v_0 \frac{\sigma_R}{\sigma_R + v_0} \quad (5)$$

где v_0 – параметр уравнения кривой усталости при симметричном цикле измеряется в МПа. v – показатель угла наклона кривой усталости при симметричном цикле.

В работе [5] на основе преобразований предлагается использование более упрощенного варианта

$$\sigma_{\text{экв } i} = \frac{\sigma_{\text{max } i}}{a}$$

где $a = \frac{2}{2 - (1 - \varphi)(1 + R)}$; – параметр, характеризующий изменение величины предела выносливости при переходе от симметричного цикла напряжений к циклу с коэффициентом асимметрии R ; φ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла, определяемый на основе кривой усталости. Для стали 10ХСНД φ равен 0,087, $\sigma_0 = 140$ МПа [1].

$R = \frac{\sigma_{\text{min } i}}{\sigma_{\text{max } i}}$ – коэффициент асимметрии напряжений цикла в блоке.

На основе этих формул и полученных данных производился расчет эквивалентных напряжений, данные которых дополнительно внесены в таблицы 1, 2, 3 к данным RainFlow. Далее на основе эквивалентных напряжений и кривой усталости определялись соответствующие им количества циклов N_i , которое может выдержать узел на этом режиме.

Если разделить 1 на отношение $\frac{n_{\text{действ}}}{N_{i\text{устал}}}$ получим коэффициент во сколько раз больше узел выдержит при заданном напряжении и пробеге по сравнению с кривой усталости. А при его умножении на длину участка получаем пробег автомобиля.

Расчет количества циклов на основе кривой выносливости (рис.4) определялось по следующей формуле $N = N_\sigma \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma_a} \right)^m$

$$\text{где } tg = m = \frac{\lg N_{\sigma} - \lg N_{\sigma_0}}{\lg \sigma_a - \lg \sigma_{-1}}.$$

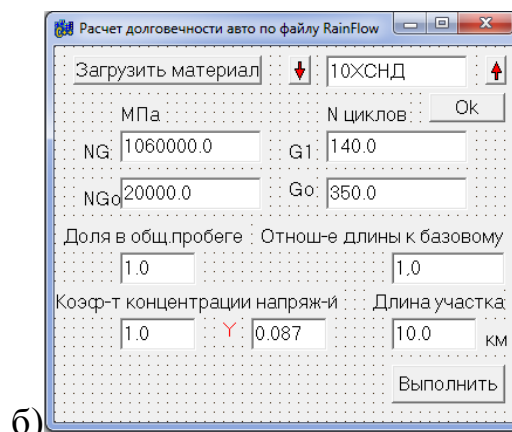
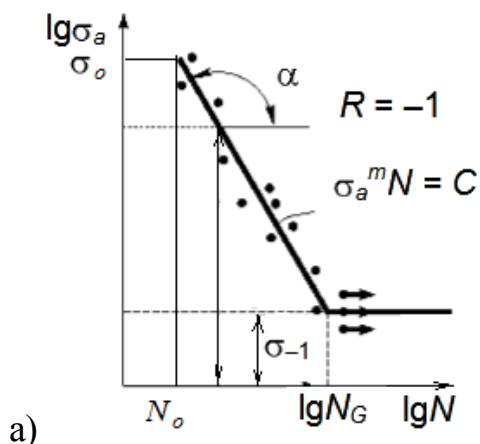


Рис. 4. Кривая усталости (а) и разработанная программа пересчета данных (б)

Для автоматизации расчетов по вышеперечисленным зависимостям разработана программа Resource_M.exe в виду трудоемкости ручного пересчета и из-за того, что получаемый текстовый файл результатов в программе RainFlow.exe содержит коды табуляции и переменное число пробелов между данными, затрудняющие считывание по позиционированию. Resource_M.exe учитывает все это при считывании данных из этого файла и выполняет необходимый расчет готовый (в формате txt) для вставки в таблицу MS.Word. Программа также годится и для обработки экспериментальных данных.

Для определения долговечности на разных дорогах с разной длиной участков ($L_{баз}$, L_i) и различными долями распределения ($d_{баз}$, d_i) может применяться и другой подход:

- выполняется расчет напряжений отдельно для этих дорог в программе RainFlow.
- берется за базис дорога с наибольшей нагруженностью (например, грунтовая), а в в строках файлах других участков корректируются значения циклов ($N_{Cycle Counts}$) в пропорции их длин участков и долями (d_i) распределения пробегов по сравнению с базовым ($d_{баз}$),

$$N_{\text{Cycle Counts_new}} = \left(\frac{L_i}{L_{\text{баз}}} \right) \cdot \left(\frac{d_i}{d_{\text{баз}}} \right) \cdot N_{i(\text{Cycle Counts_old})}$$

– во всех их текстовых файлах выделяются строки с напряжениями выше предела выносливости, которые копируются в новый файл (itog.txt) редактором FAR.EXE (невносящим управляющих символов).

– далее производится расчет по этому файлу в программе Resource_M.exe с указанием базовой длины участка первой дороги.

4. Анализ полученных данных

Результаты моделирования свидетельствуют о существенном влиянии скорости движения на нагруженность картера моста. Так, ресурс на грунтовой дороге при средней скорости движения $v = 26,5$ км/ч составляет 302857 км, а при $v = 38$ км/ч снижается до 53266 км. Выявлено, что при движении грузового автомобиля по асфальтированным дорогам напряжения на штампованном картере ведущего моста могут быть исключены из рассмотрения как неповреждающие, что позволяет сократить время укоренных испытаний на стенде. В общем пробеге определяющим является движение по грунтовой дороге: при ее доле 10% в пробеге общий ресурс (при $v = 26,5$ км/ч) получается равным 1275065 км, т.е. картер моста практически не повреждается при эксплуатации автомобиля.

Сложным моментом в совместном моделировании является задание скоростного режима на различных участках дороги и распределение по дорогам. Здесь могло бы помочь использование имитационного моделирования с применением стенда (рис. 1), позволяющие учесть влияние водителя на выбор скорости и воздействия на него вибраций, визуальной обстановки на дороге. Это дало бы возможность получить данные о реальном режиме движения, а на основе их рассчитать нагруженность и долговечность узлов автомобиля на стадии проектирования.

Заключение

1. Предложена методика и практический подход определения долговечности узлов автомобиля на стадии проектирования с использованием имитационного моделирования в Matlab/Simulink, NASTRAN/ANSYS и обработки данных с помощью программ на C/C++ на примере долговечности картера моста. Предложено через колебания автомобиля выйти на нагрузки, далее через 3D модели выявить связь нагрузок и напряжений в узлах. И по усталостным характеристикам материалов и систематизации данных напряжений через программы на C/C++ оценить долговечность.

2. Определены требования к моделям, методам, этапам моделирования автомобиля, путям реализации такого расчета, техническому обеспечению процесса.

3. Разработана программа автоматизации пересчета полученных данных моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния и ресурса узлов автомобиля на базе кривой усталости, сокращающая время расчета этого этапа для картера моста с 2 часов до 50 сек с занесением данных в MS.Word.

4. Предложен подход для определения долговечности на разных дорогах с разной длиной участков ($L_{баз}, L_i$) и различными долями распределения ($d_{баз}, d_i$) пробегов с коррекцией количества циклов нагружений пропорционально их длин участков и долями (d_i) распределения по сравнению с базовым ($d_{баз}$), получаемыми в программе RainFlow и последующей их обработкой в программе Resource_M.exe.

5. Выявлено, что напряжения на штампованном картере ведущего моста при движении грузового автомобиля по асфальтированным дорогам могут быть исключены из рассмотрения как неповреждающие, что позволяет сократить время испытаний на стенде. В общем пробеге определяющим является движение по грунтовой дороге: при ее доле 10%

(при $v = 26,5$ км/ч) общий ресурс получается равным 1275065 км, т.е. достаточно высоким.

Список литературы

1. Горбачевич, М.И. Обработка конструкции и прогнозирование усталостной долговечности несущих деталей ходовой части транспортных средств: Дис. ... канд. техн. наук / Горбачевич М.И.; Ин-т проблем надежности АН БССР, - Минск, 1984, - 176 с.
2. Mercedes-Benz Innovation Vehicle Developing, - URL: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/advanced-engineering>.
3. Brown C. Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals // Jason C. Brown, A. John Robertson Cranfield University, UK Stan T. Serpento General Motors Corporation, USA. - URL: <http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/Automotive%20engineering%20books/Motor%20Vehicle%20Structures.pdf>
4. Почтенный, Е. К. Экспериментально-аналитический метод ускоренных усталостных стендовых испытаний конструкций при регулярном многоцикловом нагружении / Е.К. Почтенный, П.П. Капуста // Вестник БНТУ. – 2006. - № 2. - С.31–42.
5. Ракицкий, А.А. Расчетное определение уровня неповреждающих напряжений при ускоренных испытаниях машин / А.А. Ракицкий, А.В. Шмелев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2007.
6. Михайлов, В.Г. Компьютерное и имитационное моделирование автомобиля: монография / В.Г. Михайлов. – Минск: Белнауча, 2020. - 316 с.
7. Wojciech Owczarek, Mirosław Rodzewicz, Investigations Into Glider Chassis Load Spectrum/Warsaw University of Technology Warsaw, Poland /January 2009. - URL: https://www.researchgate.net/publication/271050396_Investigations_Into_Glider_Chassis_Load_Spectrum.
8. ГОСТ 25.101. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. - М.: Изд-во стандартов, 1983. - 50с
9. Rainflow Fatigue Cycle Counting / October 31, 2012. - URL: https://drive.google.com/file/d/0Bw1VIHh5X_tLTJ6d25SVkJwWEk/view/

Reference

1. Gorbacevich M.I. *Obrabotka konstrukcii i prognozirovanie ustalostnoj dolgovechnosti nesushchih detalej hodovoj chasti transportnyh sredstv* (Processing the structure and predicting the fatigue life of the bearing parts of the chassis of vehicles), dissertation of the candidate of sciences, Minsk, In-t problem nadezhnosti AN BSSR, 1984, 176 s.

2. URL: - <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/advanced-engineering>.
3. URL:
<http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/Automotive%20engineering%20books/Motor%20Vehicle%20Structures.pdf>
4. 4. Pochtennyj E.K., Kapusta P.P. *Vestnik BNTU*, no 2, 2006, pp31–42.
5. Rakicij A.A., SHmelev A.V. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V*, 2007, pp.102 –107.
6. . Mikhaïlov V.G. *Komp'yuternoe i imitacionnoe modelirovanie avtomobilya* (Computer and simulation car modeling), Minsk, Belnauka, 2020, 316 p.
7. URL:
https://www.researchgate.net/publication/271050396_Investigations_Into_Glider_Chassis_Load_Spectrum.
8. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruktsiy i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov. GOST 25.101* (Calculations and strength tests. Methods for schematization of random processes of loading machine elements and structures and statistical presentation of results. State Standard 25.101), Moscow, Izd-vo standartov, 1983, 50 p.
9. URL: https://drive.google.com/file/d/0Bw1VIHh5X_tLTJ6d25SVkJwWEk/view/.

Рецензент: А.П. Болдин, д-р техн. наук, проф., МАДИ