

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ НЕСУЩИХ СИСТЕМ

**А.А. Петров**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация

E-mail: PetrovAA64@yandex.ru

Произведен анализ методов оценки ресурса элементов конструкции несущих систем машин. Выявлены недостатки этих методов. Предложен метод оценки ресурса элементов конструкции, основанный на постоянстве суммарной работы внешних сил на разрушение образца, с помощью которого были произведены расчеты для определения ресурса элемента подрамника троллейбуса ЗиУ-9. При этом необходимая суммарная работа рассчитывается по величине предела выносливости реального элемента конструкции с учетом геометрических характеристик его поперечного сечения. Был произведен анализ влияния режимов нагружения на величину работы внешних сил, которая суммируется в образцах. Построены графики зависимости работы внешних сил от действующей нагрузки и скорости, от скорости и нагрузки, от отношения хорошего асфальта к плохому. В ходе исследования для определения приближенной величины ресурса выявлен эквивалентный режим нагружения для конструкции.

*Ключевые слова:* амплитудные напряжения; оценка ресурса; работа внешних сил на разрушение образца; кривая усталости; случайное нагружение.

При проектировании несущей системы транспортного средства одним из важных условий является обеспечение долговечности, то есть ресурса при эксплуатации транспортного средства в целом. В современных условиях дорожного покрытия, скоростного режима и весовой нагрузки транспортное средство может быстро выйти из строя как из-за плохого покрытия дороги, так и из-за некачественных материалов конструкции. Задача конструктора при проектировании – выбрать оптимальное соотношение размеров и материала деталей.

Методы оценки ресурса элементов конструкции несущих систем машин можно разделить на два основных типа. Первый тип основан на прямом применении гипотезы суммирования усталостных повреждений и её скорректированных модификаций [1–3]. Второй – на анализе энергетической структуры случайного процесса [4–8].

Анализ указанных работ показал, что у данных методов есть свои достоинства и недостатки. Одним из недостатков является то, что при подсчете циклов никто не учитывает работу внешних сил за данный цикл. Существующие методы не дают необходимой точности при прогнозировании ресурса элементов транспортного средства. Результаты расчета значительно отличаются от реального эксплуатационного ресурса машин.

На данный момент существует методика определения тепловой энергии [5], которая показывает, что работа внешних сил на разрушение постоянна (рис. 1).

Также стоит отметить, что ни один из существующих методов не принимает в расчет работу внешних сил на разрушение образца. В связи с этим была предпринята попытка оценить ресурс детали с учетом этой работы. Был предложен

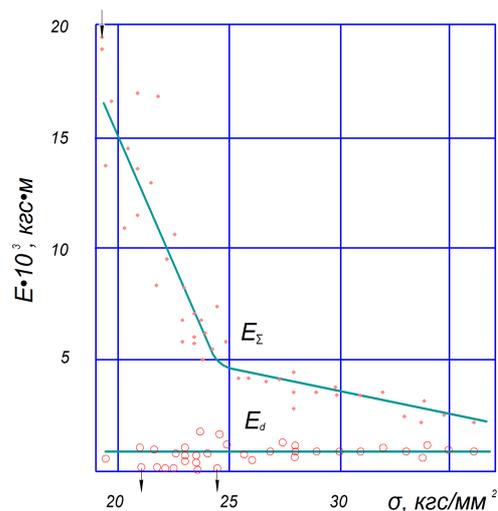


Рис. 1. Зависимость подведенной  $E_{\Sigma}$  и повреждающей  $E_d$  энергий от уровня напряжений для стали 3 в состоянии поставки

метод оценки ресурса элементов конструкции, основанный на условии постоянства суммарной работы внешних сил, затраченной на разрушение образца [9]. При этом необходимая суммарная работа рассчитывается по величине предела выносливости реального элемента конструкции с учетом геометрических характеристик его поперечного сечения ( $A$  – площади,  $I$  – осевого момента инерции сечения,  $W$  – момента сопротивления сечения). Определение работы внешних сил по пределу выносливости обусловлено тем обстоятельством, что работа, рассчитанная по амплитудным напряжениям, превышающим предел выносливости, больше, так как включает в себя также работу, затраченную на образование тепла, а «повреждающая энергия практически не зависит от уровня приложенного циклического напряжения» [5].

Данный метод был использован для определения ресурса консоли подрамника ЗиУ-9 (рис. 3). Работа внешних сил для консольного нагружения равна

$$A_i = \frac{1}{2} Ff,$$

где  $F$  – внешняя сила, приложенная к консоли;  $f$  – максимальное перемещение под силой.

В этом случае перемещение рассчитывается по зависимости

$$f = \frac{Fl^3}{3EI},$$

где  $l$  – расстояние от рассматриваемого сечения (заделка консоли) до центра приложения внешней силы;  $E$  – модуль упругости материала;  $I$  – момент инерции рассчитываемого сечения. Тогда

$$A_i = \frac{1}{2} F \frac{Fl^3}{3EI}.$$

Учитывая, что

$$\sigma_v = \frac{Fl}{W},$$

где  $\sigma_v$  – амплитудные напряжения процесса;  $W$  – момент сопротивления рассчитываемого сечения, и выразив силу  $F$  через  $\sigma_v$  в выражении работы, получим

$$A_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_v W}{l} \cdot \frac{l^3}{3EI} \cdot \frac{\sigma_v W}{l} = \frac{\sigma_v^2 W^2 l}{6EI}.$$

Программный блок по подсчету суммарной работы внешних сил на разрушение образца на исследуемом участке работает следующим образом: работа считается только для случая роста деформации; уменьшение деформации происходит за счет внутренних сил объекта. Так, на участке осциллограммы 1–2 (рис. 2) работа равна

$$A_{1-2} = (\sigma_{v2}^2 - \sigma_{v1}^2) \frac{1}{6} \frac{W^2 l}{EI}.$$

На участке 3–4 работа равна

$$A_{3-4} = (\sigma_{v4}^2 - \sigma_{v3}^2) \frac{1}{6} \frac{W^2 l}{EI}.$$

Таким образом, работа подсчитывается на каждом очередном цикле изменения деформации  $A_1, A_2, \dots, A_i$  для выбранного мерного участка пути или отрезка времени. Затем единичные работы суммируются и определяется работа на длине мерного участка

$$\sum A_i = A_1 + A_2 + \dots + A_i.$$

В дальнейшем с учетом весовых коэффициентов по заданным режимам рассчитывалась сумма работ  $A_i$  на пробеге, равном 1 км

$$\sum A'_i = a_1 b_1 c_1 A_1 + a_2 b_2 c_2 A_2 + \dots + a_i b_i c_i A_i,$$

где  $a_i$  – весовой коэффициент нагрузки;  $b_i$  – весовой коэффициент скорости;  $c_i$  – весовой коэффициент дорожного покрытия [10].

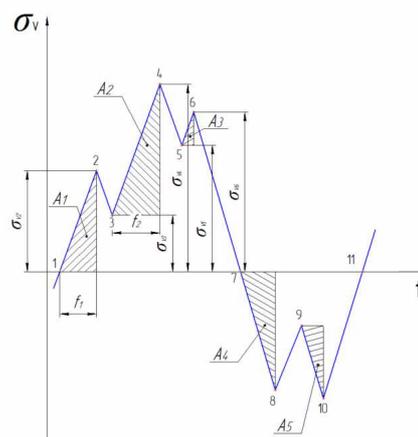


Рис. 2. Схема оценки работы внешних сил в случае переменных напряжений

Полная работа внешних сил, затраченная на разрушение образца, рассчитывалась по зависимости:

$$A_{\Sigma} = \sigma_{-1д}^2 N_{НО} \frac{W^2 I}{6EI},$$

где  $\sigma_{-1д}$  – предел выносливости элемента конструкции;  $N_{НО}$  – базовое число циклов нагружения элементов конструкции;  $W, I, l$  – геометрические характеристики сечения;  $E$  – модуль упругости материала.

Ресурс до разрушения рассчитывался по формуле

$$L = \frac{A_{\Sigma}}{\sum A_i'} \text{ (км)}.$$

В каждом из режимов нагружения работа рассчитывалась по записям переменных напряжений в 24 процессах при скоростях  $V = 20; 30; 40$  км/ч, нагрузках  $P = 15\ 000; 30\ 000; 45\ 000; 60\ 000$  Н при плохом и хорошем асфальте.

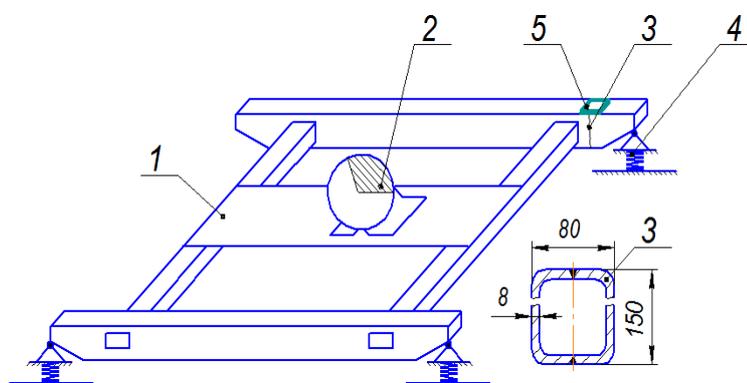


Рис. 3. Испытание подрамника на усталость:

1 – вспомогательная балка; 2 – вибратор; 3 – испытываемое сечение поперечной балки подрамника; 4 – подпрессорное основание стенда; 5 – контролирующее режим тензодатчики

В дальнейшем на основании вышеизложенного попробуем проанализировать влияние режимов нагружения на величину работы внешних сил, которая суммируется в образцах.

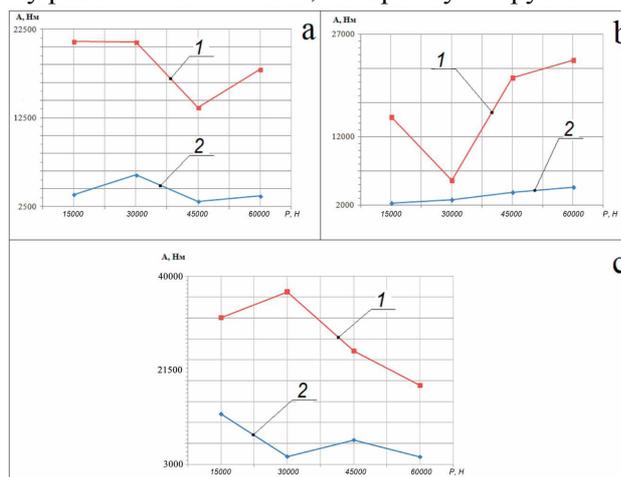


Рис. 4. Зависимость работы внешних сил от действующей нагрузки и скорости:  
а – скорость 20 км/ч; б – скорость 30 км/ч; с – скорость 40 км/ч;  
1 – асфальт плохой; 2 – асфальт хороший

Максимальная работа внешних сил на пробеге 1 км, приложенная к подрамнику, равна 39 300 Н·м при скорости  $V = 40$  км/ч и при действующей нагрузке в 30 000 Н. Минимальная работа внешних сил, приложенная к образцу, равна 2300 Н·м при скорости  $V = 30$  км/ч и при действующей нагрузке в 15 000 Н (рис. 4).

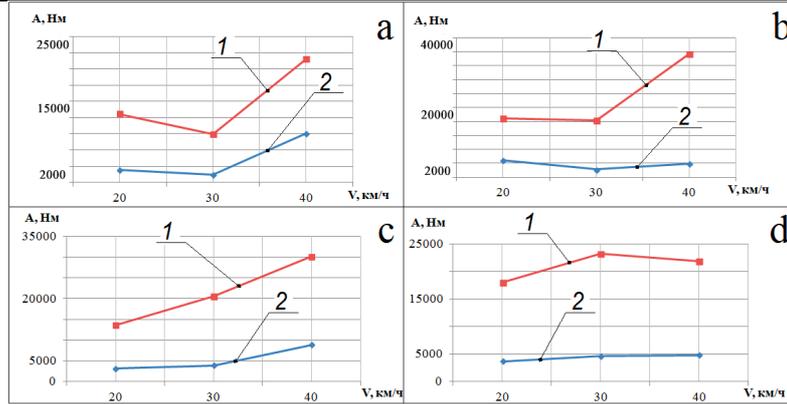


Рис. 5. Зависимость работы внешних сил от действующей скорости и нагрузки: а – нагрузка 15 000 Н; б – нагрузка 30 000 Н; с – нагрузка 45 000 Н; d – нагрузка 60 000 Н; 1 – асфальт плохой; 2 – асфальт хороший

Анализируя характер изменения работы внешних сил в зависимости от действующей скорости и нагрузки (рис. 5), мы можем сделать вывод, что с увеличением скорости увеличивается работа внешних сил. Также можно предположить, что до определенного момента при малых нагрузках в работе подвески большую долю занимает работа рессор. На хорошем асфальте влияние нагрузки незначительно сказывается на величине работы внешних сил на разрушение образца.

Для определения приближенной величины ресурса необходимо найти эквивалентный режим нагружения для конструкции. Для этого рассчитываем сумму работ на 24 режимах нагружения  $\sum A'_i$  с учетом весовых коэффициентов. Для испытываемого сечения подрамника троллейбуса ЗиУ-9 она равна  $7,54 \cdot 10^3$  Н·м. Сумма работ характеризует нагруженность конструкции при пробеге 1 км на всех режимах нагружения. Это делается для того, чтобы не испытывать троллейбус во всех режимах в дальнейшем: достаточно будет провести эксперимент только в одном. Это позволит снизить затраты на проведение эксперимента.

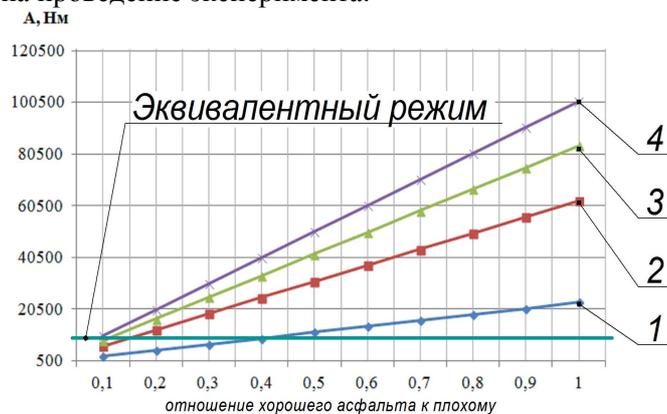


Рис. 6. Зависимость работы внешних сил от отношения хорошего асфальта к плохому: 1 – нагрузка 15 000 Н, скорость 40 км/ч; 2 – нагрузка 30 000 Н, скорость 40 км/ч; 3 – нагрузка 45 000 Н, скорость 40 км/ч; 4 – нагрузка 60 000 Н, скорость 40 км/ч

## Выводы

- с увеличением нагрузки и скорости движения транспортного средства величина работы внешних сил увеличивается, но не во всех случаях;
- наибольшее влияние на величину ресурса оказывает состояние дорожного покрытия, скорость транспортного средства влияет в меньшей степени;
- для того, чтобы долговечность конструкции была максимальной, требуется качественный вид дорожного покрытия – это значительно экономит средства на ремонт элементов транспортных машин;
- эквивалентным режимом для ресурсных испытаний при рессорно-пневматической подвеске на первом этапе можно считать скорость 40 км/ч при нагрузке в 30 000 Н на плохом асфальте. Это обуславливается тем, что большую часть своего времени троллейбус ходит без нагрузки, то есть без пассажиров в салоне машины.

### Литература

1. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
2. Дмитриченко, С.С. К расчету долговечности деталей машин / С.С. Дмитриченко, В.Н. Никулин // Проблемы прочности. – 1976. – № 10. – С. 45–48.
3. Усталостная долговечность стали с учетом различных механизмов поврежденности / В.П. Багмутов, А.Н.Савкин, В.И. Водопьянов, О.В. Кондратьев // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – № 12. – С. 6–14.
4. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
5. Гуревич, С.Е. Методика экспериментального определения разрушающей энергии при циклическом нагружении / С.Е. Гуревич, А.П. Гаевой // Заводская лаборатория. – 1983. – № 9. – С. 1110–1114.
6. Котиев, Г.О. Прогнозирование долговечности деталей транспортных машин: вопросы теории / О.Г. Котиев, Д.В. Зорин // Мир транспорта: Теория, история, конструирование будущего. – 2008. – № 1. – С. 4–9.
7. Абызов, А.А. Расчет ресурса деталей при случайном независимом многопараметрическом нагружении / А.А. Абызов, И.Я. Березин, О.С. Садаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2006. – Вып. 8. – № 11(66). – С. 30–36.
8. Березин, И.Я. Обеспечение прочностной надежности дорожно-строительной техники на основе моделирования процессов эксплуатации / И.Я. Березин, В.И. Костюченко, В.К. Халтурин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2008. – Вып. 12. – № 23(123). – С. 32–39.
9. Боровских, В.Е. Оценка ресурса элементов несущих систем машин по записям амплитудных напряжений в условиях эксплуатации / В.Е. Боровских, У.В. Боровских, А.А. Петров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 4(115). – С. 88–96.
10. Дмитриченко, С.С. Расчет средней долговечности деталей машин по результатам тензометрирования / С.С. Дмитриченко, В.Е. Боровских // Вестник машиностроения. – 1975. – № 9. – С. 34–36.

*Поступила в редакцию 20 сентября 2017 г.*

---

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"  
2018, vol. 10, no. 2, pp. 68–73*

---

DOI: 10.14529/mmph180207

## INFLUENCE OF VEHICLE LOADING REGIMES ON THE DURABILITY OF ELEMENTS OF BEARING SYSTEMS

**A.A. Petrov**

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation*

*E-mail: PetrovAA64@yandex.ru*

An analysis was made of the methods for estimating the life of structural elements of the bearing systems of machines. The disadvantages of these methods were revealed. A method for estimating the lifetime of structural elements based on the constancy of the total work of external forces destructing a sample, with the help of which calculations were made to determine the resource of the subframe element of a ZiU-9 trolley bus. In this case, the necessary total work is calculated from the limit of endurance of a real structural element taking into account the geometric characteristics of its cross section. An analysis was made of the influence of loading regimes on the magnitude of the work of external forces, which is summarized in the samples. The graphs were plotted on the dependence of the external forces work on the current load and speed, on speed and load, on the ratio of good asphalt to poor one. In the

course of the study, to determine the approximate value of the resource, an equivalent loading regime for the structure was identified.

*Keywords: amplitude stresses; resource evaluation; work of external forces on sample destruction; S-N curve; random loading.*

### References

1. Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh peremennykh vo vremeni* (Calculations on the strength at voltages of the variables in time). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 232 p. (in Russ.).
2. Dmitrichenko S.S., Nikulin V.N. K raschetu dolgovechnosti detaley mashin (To the calculation of the durability of machine parts). *Problemy prochnosti*, 1976, no. 10, pp. 45–48. (in Russ.).
3. Bagmutov V.P., Savkin A.N., Vodop'yanov V.I., Kondrat'ev O.V. Ustalostnaya dolgovechnost' stali s uchetom razlichnykh mekhanizmov povrezhdennosti (Fatigue life of steel with different mechanisms of damage). *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2007, no. 12, pp. 6–14. (in Russ.).
4. Ivanova V.S., Terent'ev V.F. *Priroda ustalosti metallov* (Nature of metal fatigue). Moscow, Metallurgiya, 1975, 455 p. (in Russ.).
5. Gurevich S.E., Gaevoy A.P. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya razrushayushchey energii pri tsiklicheskom nagruzhenii (Technique of experimental determination of destructive energy under cyclic loading). *Zavodskaya laboratoriya*, 1983, no. 9, pp. 1110–1114. (in Russ.).
6. Kotiev G.O., Zorin D.V. Forecasting of Durability of the Transport machines parts. Mir transporta: *Teoriya, istoriya, konstruirovaniye budushchego* (World of Transport and Transportation), 2008, no. 1, pp. 4–9. (in Russ.).
7. Abyzov A.A., Berezin I.Ya., Sadakov O.S. Raschet resursa detaley pri sluchaynom nezavisimom mnogoparametricheskom nagruzhenii (Calculation of the life of parts with random independent multi-parameter loading). *Bulletin of the SUSU, Series "Mechanical engineering industry"*, 2006, Issue 8, no. 11(66), pp. 30–36. (in Russ.).
8. Berezin I.S., Kostuchenko V.I., Halturin V.K. Maintenance of Strength Reliability of the Road-Building Machines on the Basis of Operation Process Modeling. *Bulletin of the SUSU, Series "Mechanical engineering industry"*, 2008, Issue 12, no. 23(123), pp. 32–39. (in Russ.).
9. Borovskikh V.E., Borovskikh U.V., Petrov A.A. Resource Evaluation of Machine Carrier System Elements According to Crest Value Record under Operation Conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2017, no. 4(115), pp. 88–96. (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-88-96
10. Dmitrichenko S.S., Borovskikh V.E. Raschet sredney dolgovechnosti detaley mashin po rezul'tatam tenzometrirovaniya (Calculation of the average longevity of machine parts according to the results of strain gauging). *Vestnik mashinostroeniya*, 1975, no. 9, pp. 34–36. (in Russ.).

*Received September 20, 2017*