

## УМОРНА ЯКОСТ И РЕСУРС НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ ПОДВИЖЕН ЖЕЛЕЗОПЪТЕН СЪСТАВ

Добринка Атнаджова, Милен Михалев

[atmadzhova@abv.bg](mailto:atmadzhova@abv.bg)

Висше транспортно училище "Тодор Каблешков",  
катедра "Транспортна техника", ул. "Гео Милев" 158, София 1574  
БЪЛГАРИЯ

**Резюме:** Разгледани са подходите към оценка съпротивлението на умора на носещи конструкции от подвижен железопътен състав (ПЖПС) в съответствие с действащи нормативни документи. Въз основа на теоретични и експериментални изследвания е показана необходимостта от допълнителна оценка на съпротивлението на умора чрез изчисления на дълготрайност (ресурс). Определени са редица параметри, като коефициент на сигурност, броя на повреждащите цикли за една година експлоатация и остатъчният ресурс на елементи от подвижен железопътен състав: рама на дълъг платформен вагон, рами на дизелови локомотиви серии 06 и 07, от парка на БДЖ.

**Ключови думи:** якост, съпротивление на умора, дълготрайност, ресурс, коефициент на сигурност.

### 1. Въведение

Надеждната и безопасна експлоатация на ПЖПС в значителна степен трябва да се обезпечава от прилаганите нормативни изисквания. Реализираните теоретични и експериментални изследвания на редица конструкции [1,2,3,4,5,6], показват, че нормите за тяхното проектиране в частта оценка на съпротивлението на умора трябва да бъдат уточнени и допълнени.

Съгласно действащите нормативни документи съпротивлението на умора се оценява от коефициента на сигурност  $n$ . Якостта се счита за достатъчна, ако получената стойност на коефициента е:

$$(1) \quad n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma}\sigma_{\text{aekv}}} \geq 1,4 - 1,8 \text{ - за вагонни конструкции и}$$

$$(2) \quad n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma}\sigma_{\text{aekv}} + \psi\sigma_m} \geq 2 \text{ - за локомотиви,}$$

където  $\sigma_{-1}$  – границата на якост на стандартен образец при симетричен цикъл на натоварване;  $K_{\sigma}$  – ефективен коефициент на концентрация на напреженията;  $\sigma_{\text{aekv}}$  – еквивалентна стойност на амплитудата на напреженията;  $\sigma_m$  – средно напрежение на цикъла;  $\psi$  – коефициент на чувствителност към асиметрия на цикъла.

Коефициентът на сигурност не отчита пълното многообразие и характер на експлоатационните натоварвания, под действието на които възникват еластични, а в отделни зони на конструкцията – еластично-пластични деформации. Многократното им въздействие предизвиква явления, свързани с умора на материала, което води към пораждање и натрупване

на повреди, поява на пукнатини. Анализа на резултатите от експерименти и експлоатационни наблюдения позволява определяне влиянието на отделните фактори на умора на материала, установяването на закономерностите на разрушаване на детайлите. Към числото на най-значимите фактори, влияещи на съпротивлението на променливо натоварване на заварени конструкции се отнасят: концентрацията на напреженията; случайния характер на натоварванията в условията на експлоатация; честотата на натоварванията; остатъчните, в това число заваръчните напрежения.

С отчитане на зависимостите, установени от резултатите на изследване, и факторите, намаляващи границата на носимост на заварени детайли при натоварване в областта много- и малоциклова умора, ефективният коефициент на концентрация може да се представи като произведение на компонентите  $n_f = 1,05 - 1,10$ ;  $n_t = 1,20 - 1,30$ ;  $n_e = 1,15$ ;  $n_c = 1,25 - 1,35$ , характеризиращи влиянието съответно на многоцикловото натоварване в еластичната област на деформация при напрежения не надвишаващи границата на носимост на детайлите; технологическите фактори, отчитащи състоянието на повърхността, концентрацията на напреженията, също вътрешните остатъчни напрежения и дефекти на заваръчните шевове; променливите натоварвания при напрежения на границата на носимостта на детайлите до границата на технологическия фактор, отчита се състоянието на повърхността, концентрацията на напреженията, също вътрешните остатъчни напрежения и дефекти на заваръчните шевове; променливите натоварвания при напрежения в диапазона от границата на якост на детайла до границата на провлачване на материала; малоциклово натоварване (с цикли до  $10^5$ ) в областта на еластично-пластичните деформации с напрежения  $0,8 - 1,0$  от границата на еластичност на материала.

Действащите норми за проектиране на товарни вагони дава удовлетворяваща оценка на якост за традиционните конструкции. Обаче приетите методи за оценка съпротивлението на умора недостатъчно пълно отчитат особеностите на динамичното поведение на отделни типове товарни вагони, например дълги вагон-платформи. Така при увеличена база на платформените вагони, т.е. когато разстоянието между централните опори (централните лагери) на талигите представлява около **18 m**, честотите на вертикалните огъващи трептения на рамите и подскачанията на платформите на ресорното окачване се оказват близки по стойност. При възбуждащото въздействие от неравностите на пътя възниква биене на оказаните трептения, съпроводено от периодично нарастване на амплитудите на динамичните напрежения с интензивно натрупване на уморни повреди, което се явява основна причина за масови пукнатини по такива конструкции. Фактическото значение на коефициента на сигурност при това съставлява стойността между **1,0 - 1,3**. Уморните пукнатини в рамите се зараждат и достигат критични размери вече при **1,0 - 1,5** години интензивна експлоатационна работа.

Дългогодишния опит на експлоатация на локомотивите потвърждава правилността на заложените в нормите на тяхното проектиране основни изисквания към изчислителните натоварвания и показателите на съпротивление на умора. Нормативния коефициент на сигурност на носещата конструкция  $n = 2,0$  обезпечава работа на локомотивите от цялия парк в продължение на предвидения срок на служба (не по-малко от **30** години) при вероятност за отказ (степен на риск) от порядъка на  $10^{-4}$ , т.е. не по-малко от **0,9997**. Локомотивните норми също се нуждаят от допълнително развитие и усъвършенстване.

Сравнителните характеристики на натоварване, якост и дълготрайност (ресурс) на носещите конструкции на локомотивите и дългите платформи, получени въз основа на изчисления и изпитания (табл.1), показват необходимостта от установяване на по-ясни изисквания към дълготрайност (ресурс) на базовите части. За тази нормативна оценка по коефициент на сигурност се изисква допълване оценката на дълготрайност, която трябва да се осъществява с отчитане експлоатационния опит на подвижния състав, в това число при повишени осеви натоварвания и скорости на движение, а също натрупване към настоящето време на резултати от теоретични и експериментални изследвания на циклична и уморна дълготрайност във водещи отрасли на машиностроенето. Нормативната оценка на дълготрайността (ресурса) трябва да бъде насочена към решаване на следните задачи:

- обезпечаване на дълъг изходен ресурс със срок от **30** и повече години при проектиране на традиционни обекти подвижен състав – локомотиви, вагони и т.н.;

- обезпечаване на ограничен ресурс от **10 - 20** години с отчитане на конкретни, като правило, по-интензивни условия на експлоатация при разработване на отделни видове подвижен състав, например дълги вагон-платформи;
- установяване на остатъчен ресурс за решаване на въпроса за възможност от удължаване срока на работа на отговорни детайли (базови части) от носещата конструкция на подвижния състав и след **20** и повече години експлоатация с отчитане фактическото състояние на метала.

**Таблица 1. Показатели натоварване, якост и ресурс на носещи конструкции**

Носеща конструкция	Средно напрежение $\sigma_m$ , МПа	Амплитуда на напреженията $\sigma_a$ , МПа	Границата на умора на детайла $\sigma_{-1d}$ , МПа	Коефициент на сигурност $n$	Ресурс в години
Главна рама, рама на талига на локомотив	<b>40 - 60</b>	<b>20 - 25</b>	<b>40</b> (стомана Ст 3)	$\geq 2$	не по-малко от <b>30</b>
Рама на дълга платформа	<b>80 - 100</b>	<b>40 - 45</b>	<b>45</b> (стомана 09Г2)	$\approx 1 - 1,3$	<b>1,0 - 1,5</b>

Методите за пресмятане на машинните детайли на дълготрайност се основават на хипотезите на линейно сумиране на повредите с отчитане допустимата вероятност на повреда [7]. Известни подходи, в които сумирането на повредите се изпълнява по кривите на умора в напреженията освен в деформациите [8, 9].

Съгласно линейната и корегиранията линейна хипотеза разрушението настъпва, когато сумата  $a_p$  на всички части ( $n_i/N_i$ ) на уморните повреждания достига определена стойност, т.е.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a_p = 0,1 - 1,0$$

За кривата на умора, представена в двойни логаритмични координати във вид на прави и хоризонтални клонове, при амплитуда на напреженията  $\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1d}$  (до точките на пречупване на кривата) действа съотношението  $\sigma_{ai}^m N_i = \sigma_{-1d}^m N_G = \text{const}$ , т.е. за този участък е в сила зависимостта:

$$\frac{n_i}{N_i} = \frac{n_i}{N_G} \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{-1d}} \right)^m,$$

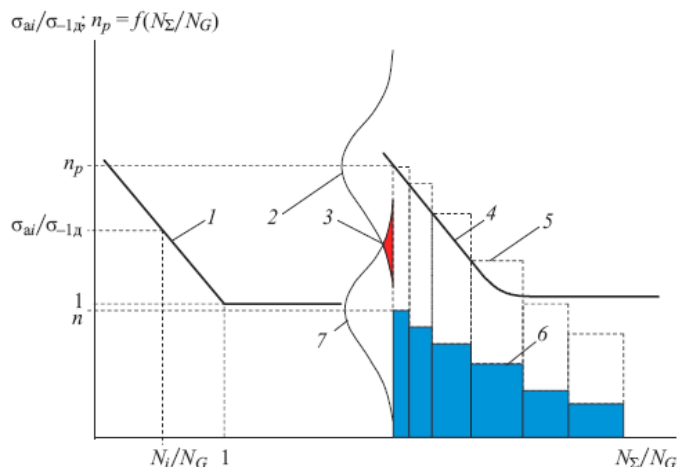
където  $n_i$  и  $N_i$  – броя цикли на натоварване с амплитуда  $\sigma_{ai}$  и съответстващата на тази амплитуда циклическа дълготрайност;  $N_G$  и  $m$  – абсиса на точката на пречупване и степенния показател на наклонения клон на кривата на умора;  $\sigma_{-1d}$  – граница на умора на детайла при симетричен цикъл на натоварване.

Особеността на детайлите от екипажната част на подвижния железопътен състав (рама на талига, главна рама, колооси и др.) се явява в това, че големината на максималното напрежение в блока на експлоатационно натоварване винаги е съществено от границата на умора на детайла (**1,5 - 2** пъти и повече). Затова натрупването на повредите може да се изчислява само в този случай, ако се отчитат съществуващите разсейвания на натоварването (напреженията) и границата на умора (кривата на умора), т.е. когато някаква част от разсейването на амплитудите на максималните напрежения от блока се пресичат с разсейването на границата на умора. На фиг.1 схематично е представено образуването на такава зона на пресичане на законите на разпределение, която причинява повреда на детайлите.

Съответната така наречена вторична крива може да се представи чрез уравнението [1] в относителни координати:

$n_p = f(N_\Sigma / N_G)$ , където  $n_p = \sigma_{amax}^{limit} / \sigma_{-1d}$ ;  $\sigma_{amax}^{limit}$  – максимална амплитуда на напреженията в граничния блок на натоварване, който е подобен на действащия и предизвиква разрушение на детайлите при определено число на циклите ( $N_\Sigma$ ), включващо напреженията на всички степени на блока.

Фиг.1. Схема на образуването на зони на пресичане на разпределенията:  
 1 – първична крива на умора; 2 – зона на разсейване на границата на умора на детайла; 3 – зона на пресичане на законите на разпределение, предизвикваща повреждане на детайлите; 4 – вторична крива на умора, съответстваща на действащия блок на товарване; 5 – граничен блок на товарване, пропорционален на действащия и съответстващ на зададеното число цикли; 6 – действащ блок на товарване; 7 – закон на разсейване на действащия блок на товарване.



Ако се приеме, че границата на умора на детайла ( $\sigma_{-1d}$ ) и амплитуда на напреженията ( $\sigma_{ai}$ ) са в границите на всяка степен на блока разпределен по нормален закон, то задавайки вероятност за разрушение на детайла, може чрез посоченото уравнение да се определи съответната дълготрайност (ресурс)  $N_{\Sigma}$ .

Във връзка със стареенето на ПС актуални става изследванията по оценка на остатъчния ресурс на носещите конструкции (главни рами и рами на талиги) [10]. Такива изследвания могат да се осъществяват на основата на посочения по-горе подход. Той е използван, например за оценка на изходния и остатъчния ресурс на рами на талиги на дизелови локомотиви серии 06 и 07 от парка на БДЖ, работещи в експлоатация **20 – 25** години.

Необходимите за изчисляване спектри на товарване (табл.2) на рамите на талигите на тези локомотиви се формират по резултати от ходови изпитвания. При това се отчита, че дизеловите локомотиви серия 06 се експлоатират при скорост на движение до **100 km/h**, а серия 07 – до **120 km/h**.

Таблица 2. Спектър от товарване на талигова рама на дизелови локомотиви серия 06 и 07

Амплитуда на напреженията $\sigma_{ai}$ , МПа	ДЛ 06		ДЛ 07	
	$\sigma_{ai}/\sigma_{amax}$	$t_i = n_i/N_{\Sigma}$	$\sigma_{ai}/\sigma_{amax}$	$t_i = n_i/N_{\Sigma}$
2	0,0833	0,41313	0,0833	0,1940
4	0,1997	0,25090	0,1667	0,3008
6	0,2500	0,14960	0,2500	0,1997
8	0,3333	0,08590	0,3333	0,1286
10	0,4167	0,04690	0,4167	0,08107
12	0,5000	0,02500	0,5000	0,04161
14	0,5833	0,01340	0,5833	0,02000
16	0,6667	0,00730	0,6667	0,00900
18	0,7500	0,00410	0,7500	0,00871
20	0,8333	0,00230	0,8333	0,00856
22	0,9167	0,00130	0,9167	0,00492
24	1,0000	0,00010	1,0000	0,00310

Стойностите на границите на умора на детайлите се приемат по резултати от стендови изпитвания на реалните талигови рами, както нови, така и стари в експлоатация. Чрез изпитания е установено, че границата на умора на талиговата рама на ДЛ06 при ново изработена талига е **30 МПа**, а след експлоатация от **20 – 22** години – **27,5 МПа**, а на ДЛ07 – **40 и 37,5 МПа** съответно.

Изходните данни за оценка на остатъчния ресурс са представени в табл.3. Стойностите са с отчитане **20** годишен срок на експлоатация: коефициентите на вариация в този случай се избират в границите  $\vartheta_{\epsilon} = 0,05 \div 0,15$ ,  $\vartheta_{\xi} = 0,0001 \div 0,0003$  (т.е. **0,01 – 0,03%**).

Таблица 3. Данни за определяне остатъчната дълготрайност на рамата на талигата

Параметър	ДЛЮ6	ДЛЮ7
Граница на умора $\sigma_{-1d}$ , МПа (с отчитане снижаване след 20 годишна експлоатация)	27,5	37,5
Вероятност от повреда <b>P</b>	<b>0,0003 (0,03%)</b>	<b>0,0003 (0,03%)</b>
Коефициент на вариация:		
- граница на умора $\vartheta_e$ (с отчитане снижаване след 20 годишна експлоатация)	0,15	0,15
- максимално напрежение в блока на натоварване $\vartheta_e$ (с отчитане снижаване след 20 годишна експлоатация)	0,12	0,12
Степенен показател на уравнението на наклонената част от кривата на умора <b>m</b>	5	5
Гранична сума на относителните повреди <b>a<sub>p</sub></b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>

Пресмятането се извършва по следния начин. Задава се вероятност за разрушение **P = 0,0003 (0,03%)** и съответстващите на тази вероятност квантили при нормално разпределение  $U_p = -3,44$ . Използва се следното условие за разрушение

$$(3) \frac{N_{\Sigma}}{N_G} = \frac{a_p}{n_p^m \sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \geq \frac{1}{n_p}} \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \right)^m t_i} \text{ и допълнителното съотношение } U_p = \frac{1 - \tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2 \vartheta_e^2 + \vartheta_e^2}}$$

където  $\tilde{n} = n_p / n$  - относителен коефициент на сигурност;  $n = \sigma_{amax d} / \sigma_{-1d}$  - действителен коефициент на натоварване на детайла;  $\sigma_{amax d}$  - максимална амплитуда на напреженията в действащия блок на натоварване. Първоначално се изчислява сумата, стояща в знаменателя на израз (3). С отчитане на изходните данни (от таблица 3) за рама на талига на ДЛЮ6 сумата е:

$$\sum_{\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \geq \frac{1}{n_p}} \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \right)^m t_i = 0,5833^5 \cdot 0,0134 + 0,6667^5 \cdot 0,0073 + 0,75^5 \cdot 0,0041 + 0,08333^5 \cdot 0,0023 + 0,9167^5 \cdot 0,0013 + 1^5 \cdot 0,0001 = 0,004706$$

При стойности  $a_p = 0,60$  и  $n_p = 1,93$  от (3) следва:  $N_{\Sigma} / N_G = (0,60 / 1,93^5) \cdot 0,004706 = 4,76$

Откъдето при вероятност за разрушение **P = 0,0003 (0,03%)** циклическа дълготрайност е  $N_{\Sigma} = N_G \cdot 4,76 = 6 \cdot 10^6 \cdot 4,79 = 28,6 \cdot 10^6$  цикли

При определяне броя на повреждащите цикли за една година експлоатация ( $N_{\Sigma 1}$ ) се отчитат само скоростите на движение на дизеловия локомотив, превишаващи **75 km/h**, така както при малки скорости амплитудите на напреженията не се явяват повреждащи. Вероятността за безотказна работа на ДЛЮ6 при скорости **75 – 100 km/h** по резултати от експлоатационни изпитания съставлява  $P_{75-100} = 0,12$ . Тогава при годишен пробег  $S = 150\,000 \text{ km}$  със средна скорост  $V_{cp} = 45 \text{ km/h}$  и основно честота на вертикалните трептения на талиговете рами  $\nu = 2 \text{ Hz}$ , броят на повреждащите цикли за 1 година експлоатация е:  $N_{\Sigma 1} = (S / V_{cp}) \nu P_{75-100} \cdot 3600 = 2,88 \cdot 10^6$  цикли.

Следователно, остатъчния ресурс на рамата на талига на ДЛЮ6 след **20-25** години експлоатация ще съставлява:  $T_{0,03\%} = 28,6 \cdot 10^6 / 2,88 \cdot 10^6 \approx 10$  години

По резултати от аналогични изчисления за ДЛЮ7, работещ 20 – 25 години и имащ граница на умора  $\sigma_{-1d} = 37,5 \text{ МПа}$ , за приетите изходни данни (табл.2 и 3) талиговете рами имат остатъчен ресурс от около **40** години.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съгласно действащите нормативни документи съпротивлението на умора се оценява от коефициента на сигурност **n**. Якостта се счита за достатъчна, ако получената стойност на коефициента са в допустимите стойности на нормативните документи **1,4 ÷ 1,9** за вагонни конструкции и над **2** за локомотиви. Коефициентът на сигурност не отчита пълното

многообразие и характер на експлоатационните натоварвания, под действието на които възникват еластични, а в отделни зони на конструкцията – еластично-пластични деформации. Сравнителните характеристики на натоварване, якост и дълготрайност (ресурс) на носещите конструкции на локомотивите и дългите платформи, получени въз основа на изчисления и изпитания, показват необходимостта от установяване на по-ясни изисквания към дълготрайност (ресурс) на базовите части.

Нормативната оценка на дълготрайността (ресурса) трябва да бъде насочена към решаване на следните задачи:

- обезпечаване на дълъг изходен ресурс със срок от **30** и повече години;
- обезпечаване на ограничен ресурс от **10 - 20** години с отчитане на конкретни, по-интензивни условия на експлоатация при разработване на отделни видове подвижен състав;
- установяване на остатъчен ресурс за решаване на въпроса за възможност от удължаване срока на работа на отговорни детайли от носещата конструкция на подвижния състав и след **20** и повече години експлоатация с отчитане фактическото състояние на метала.

Във връзка със стареенето на ПС актуални стават изследванията по оценка на остатъчния ресурс на носещите конструкции (главни рами и рами на талиги).

Вероятността за безотказна работа на ДЛ06 при скорости **75 – 100 km/h** по резултати от експлоатационни изпитания съставлява  $P_{75-100} = 0,12$ . Остатъчния ресурс на талиговата рама на ДЛ06 след 20-25 години експлоатация ще съставлява  $T_{0,03\%} \approx 10$  години, а на ДЛ07 около **40** години.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ćirić-Kostić S., Statistic processing of fatigue testing results and reliability estimation, Faculty for mechanical engineering, Kraljevo, FP7 project SeRviCe, 2009  
<http://www.mfkv.kg.ac.rs/service/media/documents/WorkshopI>
- [2] Ognjanović M., Fatigue testing methods of machine parts and assemblies. Faculty for mechanical engineering, Kraljevo, FP7 project SeRviCe, 2009  
<http://www.mfkv.kg.ac.rs/service/media/documents/WorkshopI>
- [3] Antonijević D., With innovative construction to avoid fatigue crack; case of shaft and gear of tube profiling machine., Faculty for mechanical engineering, Kraljevo, FP7 project SeRviCe, 2009  
<http://www.mfkv.kg.ac.rs/service/media/documents/WorkshopI>
- [4] Atmadzhova D., Theories and hypothesis of material fatigue. Faculty for mechanical engineering, Kraljevo, FP7 project SeRviCe, 2009  
<http://www.mfkv.kg.ac.rs/service/media/documents/WorkshopI>
- [5] Penčev Sh., Deterministic calculation of material fatigue limits., Faculty for mechanical engineering, Kraljevo, FP7 project SeRviCe, 2009  
<http://www.mfkv.kg.ac.rs/service/media/documents/WorkshopI>
- [6] Živković M., Numerical Analysis of the fatigue: the case of welding joints Faculty for mechanical engineering, Kraljevo, FP7 project SeRviCe, 2009  
<http://www.mfkv.kg.ac.rs/service/media/documents/WorkshopI>
- [7] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985
- [8] Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981
- [9] Махутов Н. А., Коссов В. С., Оганьян Э. С. и др. К вопросу оценки ресурса и безопасности эксплуатации конструкций подвижного состава. Диагностика материалов. – Т.73. № 11, 2007
- [10] Бунин Б.Б., Оганьян Э.С., Пономарева Т.М. и др. Оценка долговечности и остаточного ресурса рам тележек локомотивов: Сб. Статей по материалам Первой международной конференции „Деформация и разрушение материалов” РАН, 2006

# FATIGUE STRENGTH AND RESOURCES OF ELEMENTS FROM ROLLING STOCK

**Dobrinka Atmadzhova, Milen Mihalev**

*Todor Kableshkov Higher School of Transport, Department of Transport Equipment  
Geo Milev str.158, Sofia 1574,  
BULGARIA*

**Key words:** *strength, fatigue resistance, durability, resource, safety factor.*

**Резюме:** *Discusses approaches to assessing fatigue resistance of structures of rolling stock in accordance with existing regulations. Based on theoretical and experimental research has shown the need to further evaluate the resistance of fatigue life calculations using (resource). Some are a number of parameters, such as safety factor, the number of damage cycles for one year operation and remaining resource elements of the rolling stock: frame of a long platform car, chassis diesel locomotive series 06 and 07, the railways park in Bulgaria.*