

## ИЗСЛЕДВАНЕ ЯКОСТТА НА УМОРА НА ЕЛАСТИЧНИ КОЛЕЛА ОТ КОЛООСИ ЗА МЕТРОВАГОНИ

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

Висше транспортно училище „Т. Каблешков”,  
София, ул. Гео Милев 158  
БЪЛГАРИЯ

**Ключови думи:** метровагон, колоос, еластични колела, якост на умора.

**Резюме:** Еластичните колела от колоосите на метровагони тип 81-717.4 и 81-714.4 от метрополитена в гр.София са съставени от метални и еластични елементи. Установено е, че средният жизнен цикъл на метало-гумените пакети от еластичните колела в експлоатационните условия не надвишава 55% от гарантирания жизнен цикъл на производителите. Анализът на крайните елементи е използван за прогнозиране на разпределението на напреженията и за оценка на поведението при умора. Извършва се нелинеен квазистатичен анализ с отчитане на остатъчните напрежения за получаване ефективния диапазон на напрежения и предсказване появата на метални пукнатини.

### 1. УВОД

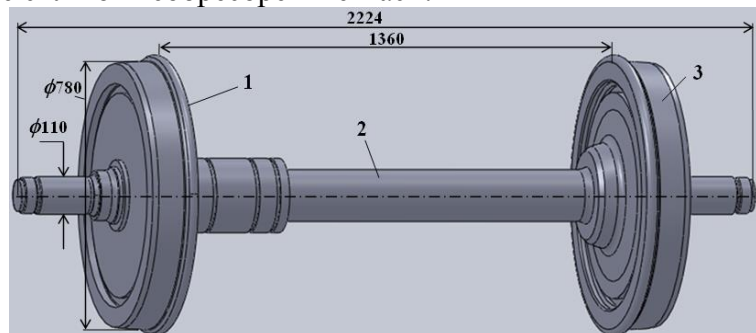
Подземната градска железница „Метрополитен” е един от видовете градски пътнически транспорт. Първите метросъстави, обслужващи Софийското метро са закупени от Софийска община (СО) за нуждите на Метрополитен София от завод „Метровагонмаш”, гр. Митици, Русия още през 1990 г. Общо 48 метровагона тип **81-717.4/81-714.4**, свързани в 4-вагонни композиции, започват да се движат по трасето между „Обеля“ и „Сердика“.

Метровагоните са оборудвани с колооси за железен път с ширина **1435 mm**, с “еластични” колела. Те са бандажни с металогумени елементи между главината и централния диск на колелото, които подобряват взаимодействието на колооса с пътя чрез намаляване на динамичните сили от необресорените маси.

Основните елементи, от които се състои колооса са: ос, съставно колело с еластичен елемент, буксов възел и редуктор.

На фиг.1 е показан общият вид на колоос с демонтиран редуктор.

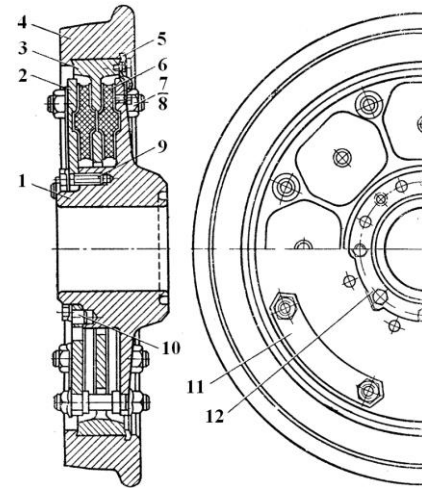
Фиг. 1. Общ вид на колоос



1 – еластично колело с удължена главина; 2 - ос; 3 – еластично колело с нормална главина.

Еластичното колело (фиг. 2) се състои от: 1 – колоосен център с нормална или удължена главина; 2 – притискателен диск; 3 – централен диск; 4 – бандаж; 5 – бандажен пръстен; 6 – шестнадесет метало-гумени елемента (пакети); 7 – шпилки (8 бр.); 8 – гайки (16 бр.); 9 – болт (8 бр.); 10 – щифт (8 бр.); 11 – законтрящи планки (9 бр.); 12 – шайби.

На колелото са монтирани и две електрически връзки изпълнени чрез с две планки и четири болта.

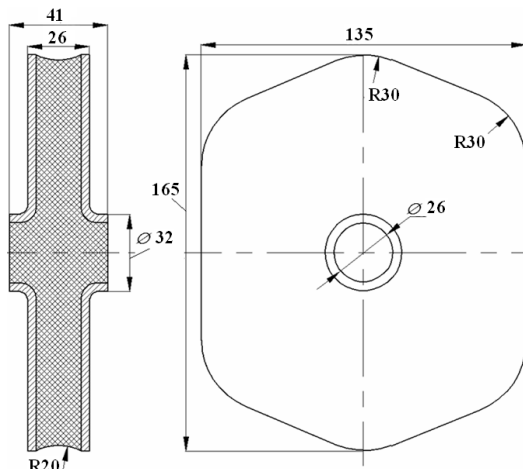


Фиг.2. Еластично колело за метровагони тип 81-717.4 и 81-714.4.

Метало-гумените пакети (МГП) (фиг. 3) представляват две шестоъгълни стоманени плочи с дебелина 3mm. Между тях, чрез формоване, има вулканизирана гума с подходящ състав, която е натоварена на срязване  $\sigma_8$  ( $30 \text{ kN/m}^2$ ). Якостта на опън между гумата и метала е 30 МПа [1].

За осигуряване на еднаква сила на триене и равномерно провисване при търкаляне всички МГП преди монтаж се проверяват на стенд и се групират в 2 категории с по 6 групи в зависимост от твърдостта им и остатъчната деформация.

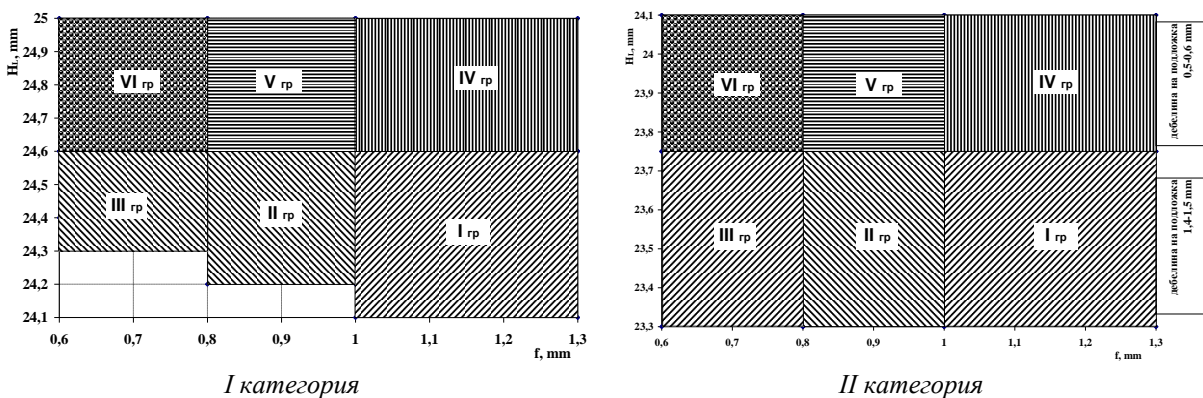
Категориите, на които се делят МГП се определят в зависимост от височината им в свободно състояние (I категория:  $H=25,2 \div 26,0 \text{ mm}$ ; II категория:  $H=24,4 \div 25,1 \text{ mm}$ ).



Фиг. 3 Метало-гумен елемент (пакет).

Разделянето на МГП на групи, вътре във всяка категория, се извършва в зависимост от големината на деформацията при натоварването им на стенд (преса) с усилие  $45\ 000 \pm 196 \text{ N}$  и стойността на височината им в това състояние.

На всяка отделна колоос МГП, монтирани в двете колела трябва да са от една и съща категория и от една и съща група съгласно фиг.4.



Фиг. 4 Категории и групи МГП.

Наличието на II-ра категория позволява използването на употребявани МГП, при които има остатъчна деформация. Височината (дебелината на пакета) се осигурява чрез поставяне на допълнителни стоманени планки с подходяща дебелина и форма.

Бандажът е изработен чрез коване от плътни блокове и последващо валцоване по предварително зададен профил. В канала на бандажа се монтира осигурителен пръстен със специален профил. За повърхнината на търкаляне е утвърден профил съгласно фиш 510-2 на UIC [2].

## **2. ВИДОВЕ ПОВРЕДИ ПО ЕЛАСТИЧНИТЕ КОЛЕЛА НА МЕТРОВАГОНИ ТИП 81-717.4 И 81-714.4**

Повредите по еластичните колела се класифицират според мястото на възникването им. Така например повредите по повърхността на търкаляне са: износване; образуване на канали (бразди); окопаване; напластяване; лющене на повърхността на триене; нащърбване, отчупване; повърхностни пукнатини и неравномерно износване по диаметъра. Повредите по бандажа са: превъртане; разхлабване; локални уширения и пукнатини от умора. Повредите по реборда са остър реборд (тънък или вертикално подрязан); образуване на ръб; висок реборд; отчупвания или пукнат реборд.

По колоосните центрове се наблюдават износвания в областите на триене; пукнатини от концентратори на напрежения от най-различни фабрични дефекти и пукнатини по главината от неправилен режим на запресоване.

По централния и притискателния диск се наблюдават износвания и пукнатини от различен характер.

Повредите по МГП са пукнатини от умора на материала в металната част, разслоявания, срязвания и промяна на механичните свойства на еластичния елемент – гумата (промяна на еластичните свойства) и остатъчна деформация.

Резултатите от тестване на МГП за локомотиви, управлявани от сръбските железници (серия 461) са дадени в [3, 4].

Някои изследвания [5, 6, 7, 8] потвърждават, че жизненият цикъл на МГП в ресорното окачване на железопътни возила достига до около  $0,8 \cdot 10^6$  цикъла при  $1,5 \cdot 10^6$  цикъла определени на етапа на проектирането и строителството, като това вероятно е свързано с умора на материала и наличието на остатъчни напрежения.

Други изследвания [9, 10] представят опит, направен въз основа на ефективен триизмерен анализ на напрегнатото и деформирано състояние на метални пластини и гумени пластове, за да се предскаже времето на поява на пукнатини от умора и разкъсване на гумените слоеве.

От наблюдения в експлоатацията на еластичните колела за метровагони тип 81-717.4 и 81-714.4 е установено че, средният жизнен цикъл на МГП не надвишава **55%** от гарантирания жизнен цикъл на производителите.

Целите на настоящата разработка са:

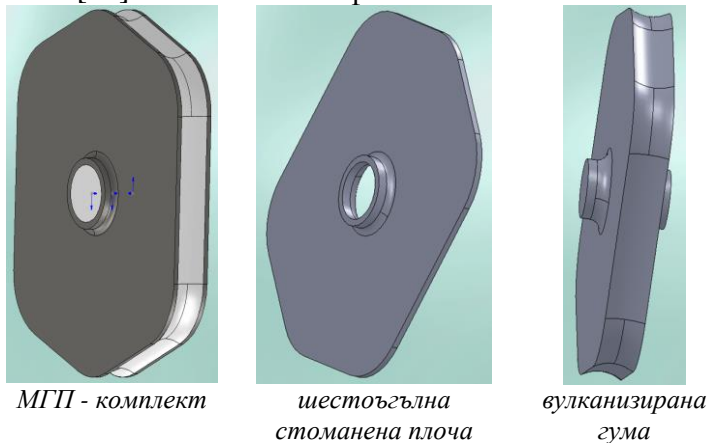
- чрез метод на крайните елементи да се извърши якостно-деформационен анализ на метало-гумен пакет от еластично колело от метровагони тип 81-717.4 и 81-714.4;

- да се определят якостта на умора и прогнозиране жизнения цикъл на МГП от еластично колело от метровагони тип 81-717.4 и 81-714.4.

## **3. ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОНЕН АНАЛИЗ НА МЕТАЛО-ГУМЕН ПАКЕТ (МГП) ОТ ЕЛАСТИЧНО КОЛЕЛО НА МЕТРОВАГОНИ ТИП 81-717.4 И 81-714.4**

Както бе описано в т.1, метало-гумените пакети (МГП) (фиг. 3) представляват две шестоъгълни стоманени плочи, между които е вулканизирана гума с подходящ

състав [1]. Моделите на МГП и неговите елементи в програмния продукт Solid Works 2008 [11] са показани на фиг.5.



Фиг.5 Модели на МГП и неговите елементи в програмния продукт Solid Works 2008

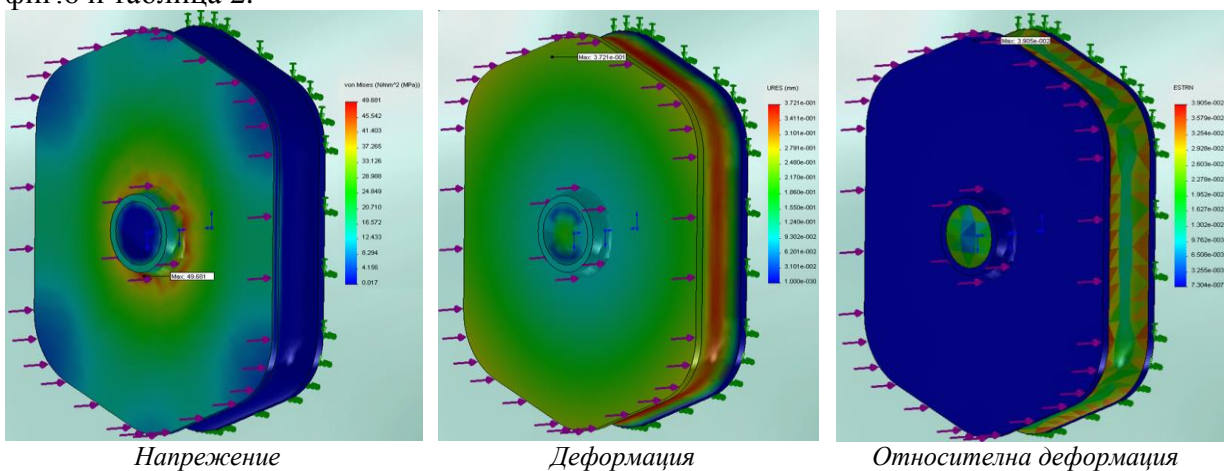
За осигуряване на еднаква сила на триене във всички МГП и равномерно провисване при търкаляне, преди монтаж, всички МГП се проверяват на стенд и се групират в две категории. Разделянето на МГП на групи, вътре във всяка категория, се извършва в зависимост от големината на деформацията при натоварването им на стенд (преса) със сила  $45000 \pm 196 \text{ N}$  и стойността на височината им в това състояние.

Натоварваме МГП с вертикална сила  $45 \text{ kN}$ , равномерно разпределена по повърхността на една от шестоъгълните стоманени плочи, а запъването е в другата такава. Материалите, които приемаме при моделирането са: за стоманените плочи - [SW]AISI 1020 (S355J2 – стандарт BS7608 [12]), а за вулканизираната гума - [SW]Rubber, с параметри показани в таблица 1.

Таблица 1. Материали и техните параметри, приети при моделирането на МГП.

Параметри	Стойност	
	за стоманени плочи	за вулканизирана гума
Elastic modulus	$2e+011 \text{ N/m}^2$	$6.1e+006 \text{ N/m}^2$
Poisson's ratio	0.29	0.49
Shear modulus	$7.7e+010 \text{ N/m}^2$	$2.9e+006 \text{ N/m}^2$
Mass density	$7900 \text{ kg/m}^3$	$1000 \text{ kg/m}^3$
Tensile strength	$4.2051e+008 \text{ N/m}^2$	$1.3787e+007 \text{ N/m}^2$
Yield strength	$3.5157e+008 \text{ N/m}^2$	$9.2374e+006 \text{ N/m}^2$
Thermal expansion coefficient	$1.5e-005/\text{Kelvin}$	$0.00067/\text{Kelvin}$
Thermal conductivity	$47 \text{ W/(m.K)}$	$0.14 \text{ W/(m.K)}$

Натоварването и резултатите от якостно-деформационния анализ са показани на фиг.6 и таблица 2.



Фиг.6. Натоварване и резултати от якостно-деформационен анализ при категоризиране на МГП.

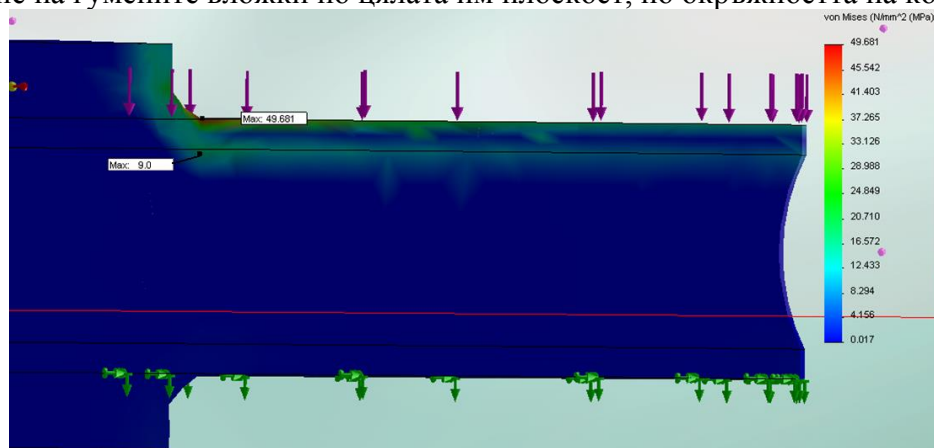
**Таблица 2.** Резултати от анализа на МГП при категоризиране и в монтирано състояние в колело.

Наименование	Тип (критерий)	При категоризиране на МГП		МГП в монтирано състояние в колело	
		Max	Location	Max	Location
Напрежение	VON: von Mises Stress	49.681 MPa Node: 32	(3.096 mm, 18.24 mm, 5.320 mm)	82.739MPa Node: 8453	(1.104 mm, 0.00081 mm, -16.21 mm)
Деформация	URES: Resultant Displacement	0.372 mm Node: 15529	(15.969 mm, -69.713 mm, 32.18 mm)	0.1024 mm Node: 7886	(2.897 mm, -82.68 mm, -0.00012 mm)
Относителна деформация	ESTRN: Equivalent Strain	0.03904 Element: 7299	(7.4135 mm, -78.387 mm, 11.603 mm)	0.00129 Element: 14805	(8.2677 mm, -80.528 mm, -1.717 mm)

Максималното напрежение в стоманените плочи е **49.681 MPa**, а във вулканизираната гума е **9MPa**, показани на фиг.7. Остатъчните напрежения, експериментално получени за стоманените плочи са **49,681 MPa**, а за вулканизираната гума – **3,5 ÷ 4 MPa**.

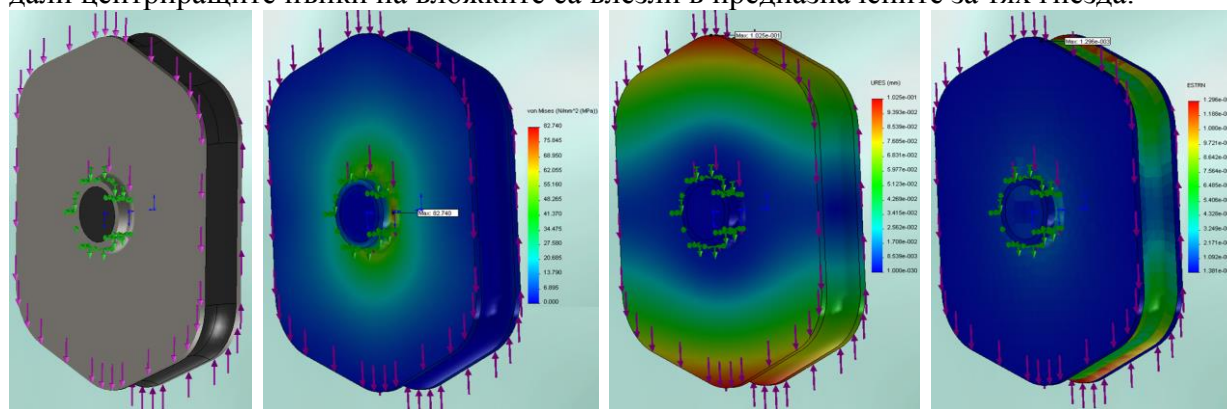
Монтажът на МГП в еластичните колела се извършва на специален стенд.

При сглобяване на еластичното колело трябва да бъде осигурено равномерно притискане на гумените вложки по цялата им плоскост, по окръжността на колелото.



**Фиг.7** Разпределение на напреженията в стоманените плочи и вулканизираната гума при категоризация на МГП.

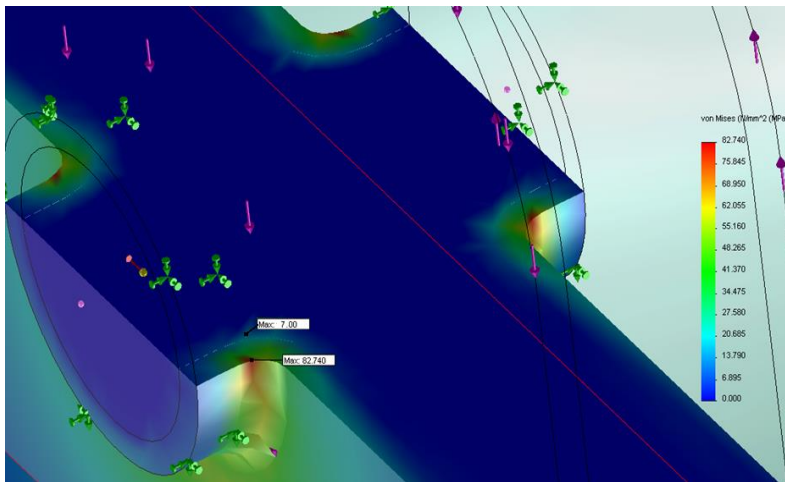
Преди затягане на болтовете и гайките на шпилките при еластичните колела се прави визуален преглед през отворите в централния диск и притискателната шайба, дали центриращите пъпки на вложките са влезли в предназначените за тях гнезда.



**Фиг.8**  
Натоварване на МГП.

**Фиг.9.** Натоварване и резултатите от якостно-деформационен анализ на МГП, монтиран в колело.

Моделираният МГП (в монтирано състояние в еластичното колело) натоварваме с кососиметрични сили - **60 kN**, равномерно разпределени по повърхността на стоманените плочи, показани на фиг.8.



Фиг.10. Разпределение на напрежения от якостно-деформационен анализ на МГП, монтирани в колело.

Запъването е в областта на външната повърхност на центраращите пъпки.

Резултатите от анализа на МГП в еластичните колела при монтирано положение са показани на фиг.9 и таблица 2, а разпределение на напреженията - във фиг.10.

Максималните напрежения за стоманената плоча са **82,74MPa**, а за вулканизираната гума – **7MPa**.

## 5. ОПРЕДЕЛЯНЕ ЖИЗНЕНИЯ ЦИКЪЛ НА ПРИ УМОРА НА МАТЕРИАЛА

**Умора на материалите** е процес на постепенно натрупване на структурни повреди в резултат на повтарящи се променливи натоварвания, при което якостта на материала прогресивно намалява. В механиката различни изследователи разглеждат механични системи като твърдо тяло, подпряно на еластични елементи [13, 14] или система от много тела свързани с еластични елементи от произволен вид: прътови еластични елементи, цилиндрични пружини, гумени изолатори и други. Именно при такива механични системи се наблюдават повреди в резултат на повтарящи се променливи натоварвания.

Определянето на жизнения цикъл при умора на материала за МГП от еластичните колела на метровагони е извършено въз основа на изискванията на техническите норми [12, 15] и [16]. Жизненият цикъл, определен в тези стандарти зависи не само от изменението на напреженията и броя цикли на натоварване, но също така и от стохастичните параметри на безопасна работа.

### *Умора за металната част на МГП.*

Металната част (стоманената пластина) е изработена от стомана с максимално допустимо напрежения от **355 MPa**. Британският стандарт за проектиране, изчисляване на умора и оценка на стоманени конструкции - BS7608 дава съотношения между напреженията и броя цикли на натоварване (**S/N**), установено чрез статистически анализ на експериментални данни [12].

В сила е зависимостта (с постоянни амплитуди):

$$(1) \quad \log N = \log C_0 - d/\sigma - m \cdot \log S_r$$

където: **N** - брой цикли, **S<sub>r</sub>** - напрежения, **C<sub>0</sub>** е константа определена от средната стойност в диаграмата **S<sub>r</sub>-N**; **d** - стандартно средноквадратично отклонение от средната стойност; **σ** е стандартно средноквадратично отклонение на **log N**; **m** е обратният наклон **log S<sub>r</sub>** срещу крива **log N**.

За да се определи константата с реално натоварване се използва уравнението:

$$(2) \quad \log C_d = \log C_0 - d\sigma$$

След заместване и трансформация се получава:

$$(3) \quad S_r^m N = C_d$$

За клас В вероятността от повреда с **2,3%** се използва за валидиране на анализ на умора. Стоманата за металните пластини има гранично напрежение от **355 МПа**.

След студено формуване на металните листове от МГП, с гранично напрежение **355 МПа**, остатъчните напрежения възникват върху външната повърхност на комплекта. Следователно напрежението трябва да бъде намалено на **222,58 МПа** ( $355 - (49,681+82,799) = 355-132,42$ ). Въз основа на кривата на умора [12, 16] жизненият цикъл е около  **$0,5 \cdot 10^6$**  цикъла вместо  **$1,5 \cdot 10^6$** .

#### **Умора за вулканизираната гума от МГП.**

Еластичните модели, предложени в [17] са приложими за гума и други еластомерни материали (въз основа на потенциална енергия и деформация или на плътност и енергия на напрежения).

За изотропно несвиваем материал зависимостта между модула на Юнг (**E**) и модула на срязване (**G**) е  **$E = 3G$** .

Зависимостта  **$E = 2G(1 + \nu)$**  е добре позната от класическата механика, където  $\nu$  - коефициент на Поасон. За малки нива на напреженията коефициентът е със стойност от **0,5**, т.е.:  **$E = 2G(1 + 0,5)$** .

Методът, използван за оценка на умора на МГП и продължителност на жизнения цикъл се основава на предварително определени данни за материала и ефективно напрежение ( $\sigma_f$ ). Сензорът на напрежение може лесно да бъде интегриран с крайни елементи (например с помощта на SolidWorks 2008 [11]).

Появата на визуални пукнатини на гумените слоеве е признак на повреда на МГП и е резултат от натрупаните вътрешни напрежения в еластичния материал.

Ефективните стойности на напреженията  $\sigma_f$  са **3,5 - 4 МПа**. От кривата на умора за гумен компонент на  **$75-90 \cdot 10^3$**  цикъла отговаря напрежение от **3,5 - 4 МПа**. Пукнатини, дължащи се на умора се появят след около  **$170 \cdot 10^3$**  цикъла.

## **6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализирана е конструкцията на еластичните колела от колоосите на метровагони тип 81-717.4 и 81-714.4. Чрез якостно-деформационен анализ по метода на крайните елементи направен с програмен продукт Solid Works 2008 са определени максималните напрежения и деформации в МГП. Направена е оценка на умора на компонентите на МГП (стоманени плочи и вулканизирана гума). Нелинейното квазистатично променливо напрежение се наслаждава с остатъчните напрежения и се прогнозира жизнения цикъл на металните пластини. С помощта на триизмерния ефективен метод за оценка на напреженията може да се прогнозира началото на пукнатини от умора. Това изследване на МГП може да се използва в процесите на проектиране, моделиране и анализ на МГП и оптимизация на параметрите им по отношение на материалите (гума и метал).

### **Литература**

- [1] Инструкция за преглед, освидетелстване, ремонт и монтаж на колоосите за метровагони 81-17.4 и 81-714.4 „МЕТРОПОЛИТЕН” ЕАД – гр. София
- [2] UIC 510-2 Trailing stock: wheels and wheelsets. Conditions concerning the use of wheels of various diameters, 4th edition, May 2004
- [3] Stamenković, D. S. Radenković, M. Milić, S. Mladenović: "Gumeno-metalni elementi kod elektrolokomotiva", "ŽELEZNICE" br.2-1995.
- [4] Stamenković, D. M. Milošević, I. Petrov, M. Banić DEVELOPMENT AND VALIDATION OF ELECRO LOCOMOTIVES PRIMARY SUSPENSION RUBBERMETAL ELEMENTS, XIV Naučno-stručna konferencija o železnici "ŽELKON '10", Niš, 2010

- [5] Luo RK, Wu WX. Fatigue failure analysis of chevron rubber spring. Eng Fail Anal 2006;13(1):110–6.
- [6] Luo RK, Wu WX, Cook PW, Mortel WJ. An approach to evaluate the service life of rubber springs used in rail vehicle suspensions. J Rail Rapid Transit 2004;218:173–7
- [7] Luo R.K., Mortel W.J., X.P. Wu Fatigue failure investigation on anti-vibration springs Engineering Failure Analysis, Volume 16, Issue 5, July 2009, Pages 1366-1378
- [8] Atmadzhova D., Nenov N., Study on fatigue of Rubber metal springs of primary spring suspension of electric locomotives XV Scientific – Expert Conference on Railways Railcon '12, October 4 – 5 2012, Nis, Serbia, pp. 41-44., University of Nis, Serbia 2012
- [9] Wu WX, Cook PW, Luo RK, Mortel WJ. Fatigue life investigation in the design process of metacone rubber springs. In: Coveney V, editor. Elastomers and components: service life prediction – progress and challenges; 2004. p. 189–201
- [10] Атнаджова Д. Метод за оценка експлоатационния живот на гумени елементи в подвижен железопътен състав. София, Електронно списание “Механика Транспорт Комуникации“ бр.2, 2008 г. статия № 0225 BG-2.9 BG-2.14.
- [11] Solid Works 2008; 2008
- [12] BS7608. Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures. UK; 1993.
- [13] Иванов А. И., Сеизмични сили за твърдо тяло подпряно на еластични елементи, XVII МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ВСУ’2017, том 2, стр. 20-25
- [14] Ivanov A. I., Three dimensional vibrations of connected with elastic elements, TEHNOMUS JOURNAL, NEW TECHNOLOGIES AND PRODUCTS IN MACHINE MANUFACTURING TECHNOLOGIES 2017, pp.37-42
- [15] Gough J, Gregory IH, Muhr AH. Determination of constitutive equations for vulcanized rubber. In: Boast D, Coveney VA, editors. Finite element analysis of elastomers. Professional Engineering Publishing; 1999. p. 5–26.
- [16] EN 1993-1-9 Eurokod 3: Cast 1-9:Fatigue., 2006
- [17] LINDLEY P. B., Engineering Design with Natural Rubber, The Malaysian Rubber Producers’ Research Association, Technical Bulletin No. 8, 1984

## **A RESEARCH OF FATIGUE IN RESILIENT WHEELS OF WHEELSETS FOR METRO WAGONS**

**Dobrinka Borisova Atmadzhova**

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

*Todor Kableshkov University of Transport,  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
BULGARIA*

**Key words:** *Metro wagon, wheelset, resilient wheels, fatigue.*

**Abstract:** *The elastic wheels of metro wagon type 81-717.4 and 81-714.4 in Sofia have metal and elastic elements. It has been established that the average lifecycle of the elastic-type metal-rubber bundles in operating conditions does not exceed 55% of the producers' guaranteed life cycle. Finite element analysis has been used to predict stress distributions and evaluate the fatigue behavior. Nonlinear quasi-static analysis is performed taking into account the residual stresses to obtain the effective range of stresses and predicting the occurrence of metal cracks.*