

## **МОДЕЛИРАНЕ И ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА ОСИТЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЛОКОМОТИВИ СЕРИЯ 46**

**Васко Р. НИКОЛОВ, Валери М. СТОИЛОВ**

[va\\_r\\_nikolov@abv.bg](mailto:va_r_nikolov@abv.bg), [vms123@tu-sofia.bg](mailto:vms123@tu-sofia.bg)

*Васко Р. Николов – инж., докторант, Валери М. Стоилов – доц. д-р, инж., Технически университет  
София, бул. „Св. Кл. Охридски” 8,*

**БЪЛГАРИЯ**

**Резюме:** Докладът съдържа резултати от статичния якостен анализ на осите на локомотиви серия 46, експлоатирани у нас. Теоретичните изследвания са направени с помощта на метода на крайните елементи (МКЕ). Разработени са сложни пространствени модели на конструкцията, описващи много точно геометрията на изследвания обект. В процеса на създаването им е изследвана тяхната сходимост. Приложенията натоварвания са максимално близки до действителните, което позволява да бъдат получени достатъчно точни резултати за разпределението на получените напрежения и деформации.

**Ключови думи:** локомотиви, оси, якостен анализ, метод на крайните елементи.

### **ВЪВЕДЕНИЕ**

Изследването е извършено с помощта на метода на крайните елементи (МКЕ) чрез компютърната програма ANSYS Workbench 10.0. Всички натоварвания са съобразени с UIC Code 515-3. Rolling stock. Bogies – Running gear Axle design calculation method, както и с особеностите на реалната конструкция. Изследвана е сходимостта на конструкцията, което позволява проверка на получените резултати.

### **АНАЛИЗ НА КОНСТРУКТИВНАТА ДОКУМЕНТАЦИЯ.**

Анализът на конструктивната документация е първият етап от процеса на разработване на изчислителния модел. Той е изключително важен, защото при неправилна оценка на особеностите на обекта (степени на свобода, ограничения на преместванията, начин на възприемане на натоварванията, взаимодействие със съседни елементи и т.н.) е възможно да се разработи много сложен, но практически неадекватен модел, различаващ се съществено от реалната конструкция.

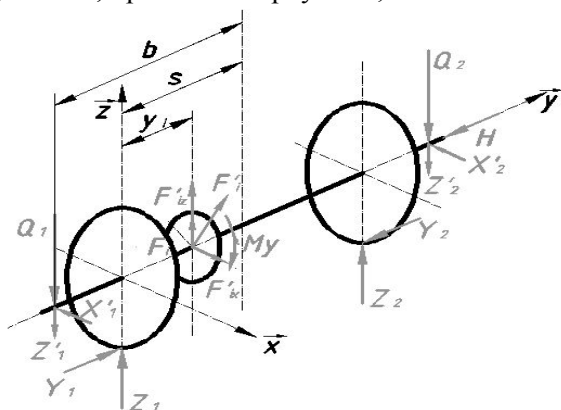
Въз основа на горното, е направен подробен анализ на конструктивната документация. Констатирани са следните по-важни факти:

- Конструкцията представлява греда, натоварена с вертикални и хоризонтални статични и динамични сили и моменти;
- Напречното сечение на осите е кръгло, като за повечето варианти то е плътно, а за един от тях (трети вариант на оста на локомотиви 46) – с проходен отвор;
- Конструкцията е наситена с преходи между сеченията с различен диаметър, които представляват ярко изразени концентратори на напрежение;
- Конструкцията е асиметрична спрямо средната напречна ос поради наличието на подглавинната част за носача на голямото зъбно колело;
- Натоварването в различните равнини се поема от различни части на осите: съответно подглавинните части на двете колела за вертикалното натоварване и шийките за хоризонталното от теглителните усилия.

## РАЗРАБОТВАНЕ НА ИЗЧИСЛИТЕЛНИТЕ МОДЕЛИ

Локомотивните оси са подложени на сериозни статични и динамични натоварвания. Те са стандартизирани в [4], като според него са определени следните сили и моменти, действащи по време на експлоатация (фиг. 1):

- $Q_1$  – вертикална сила от статичното натоварване от страната на най-натоварената шийка, приложена в шийката;
- $Q_2$  – вертикална сила от статичното натоварване от страната на най-малко натоварената шийка, приложена в шийката;
- $Y_1$  – хоризонтална напречна сила от страната на най-натоварената шийка, предизвикана от контакта на колелото с релсата;
- $Y_2$  – хоризонтална напречна сила от страната на най-малко натоварената шийка, предизвикана от контакта на колелото с релсата;
- $F_i$  – вертикална сила, появяваща се в мястото на запресоване на носача на голямото зъбно колело, която е свързана с необресорените части, свързани директно с оста;
- $F'_{ix}$  – хоризонтална компонента на силата  $F'_i$ , породена от въртящия момент на тяговия двигател и приложена в подглавинната част на носача на голямото зъбно колело;
- $F'_{iy}$  – вертикална компонента на силата  $F'_i$ , породена от въртящия момент на тяговия двигател и приложена в подглавинната част на носача на голямото зъбно колело;
- $M'_y$  – усукващ момент по геометричната ос, предизвикан от въртящия момент на тяговия двигател, приложен върху оста;



Фиг. 1

Освен изброените натоварвания, в подглавинните части действа налягането, предизвикано от запресованите детайли върху

тях: двете ходови колела и носачът на голямото зъбно колело:

- Налягане от запресоването на колелата върху подглавинните части на оста;
- Налягане от запресоването на носача на голямото зъбно колело върху съответната му подглавинна част.

Опорите на осите са подбрани така, че да отговарят на приложеното натоварване, без излишно да усложняват модела, а именно:

- Опорите в подглавинните части са подбрани да поемат вертикалното натоварване, без да участват в поемането на хоризонталното, предизвикано от теглителните усилия на локомотива;
- Опорите в шийките са подбрани да поемат хоризонталното натоварване, предизвикано от теглителните усилия на локомотива, като най-натоварената шийка (от страната на голямото зъбно колело) е фиксирана по двете хоризонтални оси (надлъжна и напречна), а най-малко натоварената (тази от страната на свободното колело) поема само радиални натоварвания без да участва в поемането на аксиални натоварвания (по оста на колооста). Тези опори не участват в поемане на вертикалните усилия, действащи върху оста.

Така разработеният модел максимално се доближава до действителната конструкция на оста както по отношение на геометрията, така и по отношение на действащите натоварвания и опорните реакции (ограничения на преместванията).

При моделиране на всички варианти са използвани крайни елементи тип „solid”, които най-добре описват конструкцията.

## ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА ОСИТЕ НА ЛОКОМОТИВИ 46, ПЪРВИ ВАРИАНТ

Това са оси, които са произведени от румънски производител и които бяха монтирани на локомотивите още с тяхната доставка. Материалът е стомана 34MoCrNi15X с въглеродно съдържание около 0,38 %, която се числи към високоякоствите легирани стомани.

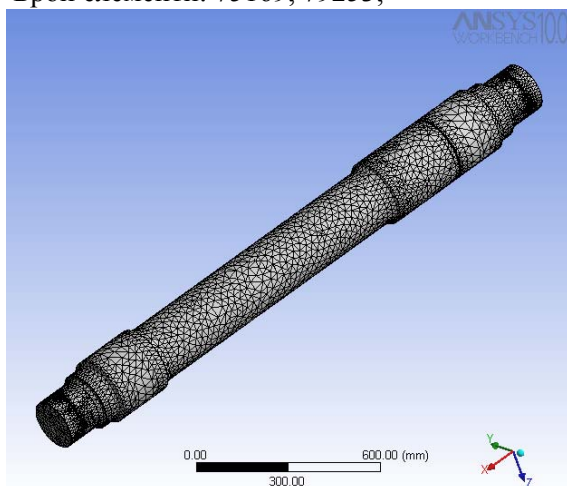
Базов модел:

- Брой възли: 34978; Брой елементи: 22917.

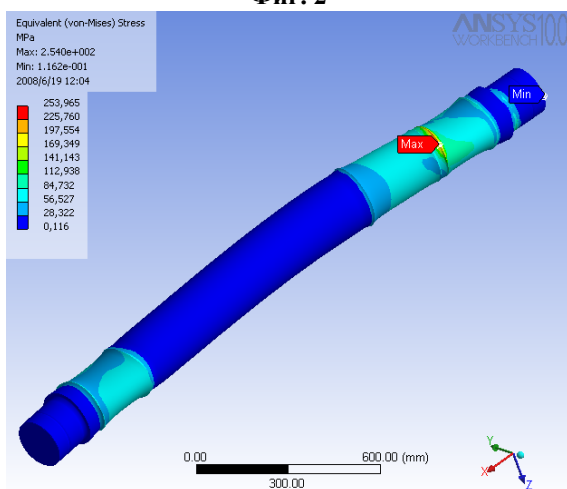
За проверка сходимостта на решението, бе създаден усложнен модел на конструкцията, като броят на възлите и елементите бе увеличен повече от три пъти. При опити с условни номера 11 и 12 създадените модели са с най-близки параметри (фиг.2):

- Брой възли: 110085, 116829;

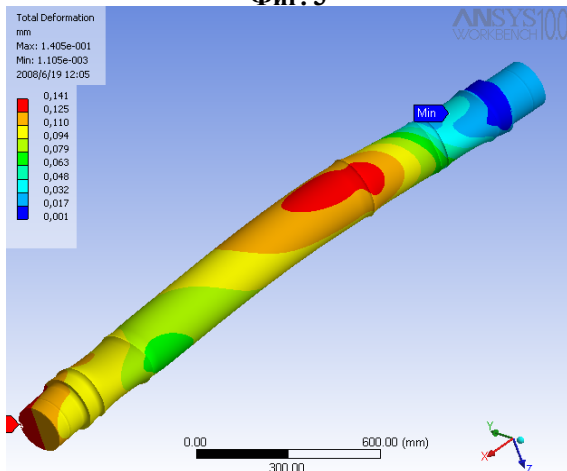
➤Брой елементи: 75169, 79253;



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Получените напрежения се различават едно от друго с 0,31% (фиг.3), а деформацията – с 0,14% (фиг.4), което дава основание да се смята, че решението е сходимо и моделите са подходящи за якостен

анализ. Стойностите на получените напрежения и съответстващите им деформации за всички варианти са дадени в **таблица 1**.

### ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА ОСИТЕ НА ЛОКОМОТИВИ 46, ВТОРИ ВАРИАНТ

Тази конструкция е предложена от специалисти с цел намаляване на отказите, показани от оригиналната румънска ос [1,2]. Материалът за оста е същият. Промяната е главно във формата на подглавинните части на колелата, която тук вече е цилиндрична, за разлика от оригиналната румънска ос, където подглавинните части имат малка конусност (1:700). Оста е натоварена със същите сили и моменти, както оригиналната ос, и е поставена на същите опори, тъй като е предназначена за същите локомотиви и същите работни условия. Тази ос не е изработена и съществува само като проект.

При моделиране на оста бяха получени следните резултати:

Базов модел:

➤Брой възли: 37566; Брой елементи: 24710.

За проверка сходимостта на решението, бе създаден усложнен модел на конструкцията, като броят на възлите и елементите бе увеличен повече от три пъти. При опити с условни номера 11 и 12 създадените модели са с най-близки параметри:

➤Брой възли: 113979, 127691;

➤Брой елементи: 78119, 87781;

Получените напрежения в двата поредни опита не се различават, а деформацията – с 0,01%, което дава основание да се смята, че решението е сходимо и моделите са подходящи за якостен анализ.

### ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА ОСИТЕ НА ЛОКОМОТИВИ 46, ТРЕТИ ВАРИАНТ

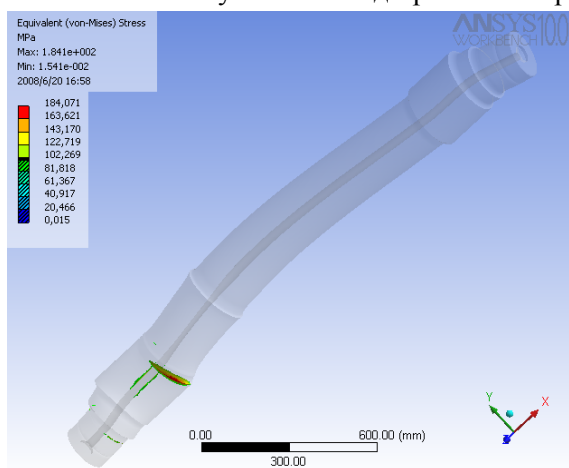
Тези оси са производство на френската фирма „VALDUNES” и са поръчани от ръководството на БДЖ като един вариант за подобряване състоянието на осите на локомотивите от серия 46 и на локомотивния парк като цяло. Произведени са от стомана 35NCD6 – NF с въглеродно съдържание 0,3 – 0,37 % и също спадат към високоякостните среднолегирани стомани. Променен е радиусът на закръгление на холкера, което има за цел да намали концентрацията на напрежение в това опасно сечение. Подглавинните части са с цилиндрична форма, допуските в тях, а следователно и

налягането в пресовите сглобки са с намалени стойности, с което чувствително се намалява допълнителното натоварване в тези области. Оста е натоварена със същите сили и моменти като оригиналната ос, и е поставена на същите опори, тъй като е предназначена за същите локомотиви и същите работни условия.

Базов модел:

Брой възли: 35593; Брой елементи: 23497.

Сходимостта на решението е проверена чрез създаване на усложнен модел, като броят на елементите е увеличен над три пъти. При



Фиг. 5

опит с условен номер 7 създаденият модел е с най-близки параметри:

- Брой възли: 124025;
- Брой елементи: 85302;

Полученото напрежение се различава от базовото с (1,76%), а деформацията – с (0,52%), което дава основание да се смята, че решението е сходимо и моделът е подходящ за якостен анализ.

### ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА ОСИТЕ НА ЛОКОМОТИВИ 46, ТРЕТИ ВАРИАНТ С ПРОХОДЕН ОТВОР.

Тази конструкция е с проходен отвор  $\varnothing 30$  mm (фиг.5). Като външни геометрични размери тя напълно съвпада с третия вариант на оста, разгледан по-горе. Всички натоварвания, включително наляганята в пресовите съединения, както и опорите, са същите както в предния вариант на оста.

Базов модел:

- Брой възли: 71451; Брой елементи: 48905.

Сходимостта на решението е проверена чрез създаване на усложнен модел, като броят на елементите е увеличен над три пъти. При

опити с условни номера 6 и 7 създаденият модел е с най-близки параметри:

- Брой възли: 232084, 288234;
- Брой елементи: 162892, 203230;

Получените напрежения в двата поредни опита се различават едно от друго с (1,8%), а деформацията – с (0,04%), което дава основание да се смята, че решението е сходимо и моделът е подходящ за якостен анализ.

Таблица 1

	първи вариант	втори вариант	трети вариант плътна ос	трети вариант куха ос
Напрежение [MPa]	253,97	217,32	158,65	184,07
Деформация [mm]	0,1405	0,1086	0,1201	0,1021

### АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ЗА НАПРЕЖЕНИЯТА ПРИ РАЗЛИЧНИТЕ КОНСТРУКТИВНИ ВАРИАНТИ НА ОСИТЕ НА ЛОКОМОТИВИ 46

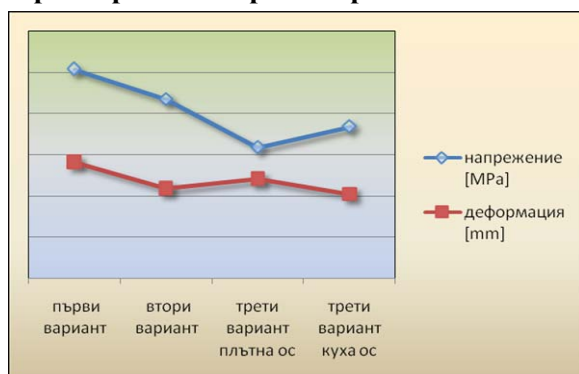
На базата на разработените изчислителни модели е направен сравнителен анализ на теоретично получените резултати за напреженията при различните варианти на конструктивни предложения за изработване на оси. Целта е да се избере предложението, при което ще се реализират минимални напрежения и, следователно, ще бъде постигната максимална дълготрайност на оста.

Анализът е направен на базата на максималните напрежения, получени в локомотивните оси. Причината за това е, че и при четирите варианта (фиг. 3 и фиг. 5) те са резултат на ясно изразен концентратор на напрежения в зоната на холкера. Всички останали стойности са значително по-малки и не създават предпоставки за разрушения вследствие умора на материала.

Стойностите на максималните напрежения при четирите изследвани варианти са представени на фиг. 6 и в таблица 1. Сравнителният анализ показва, че напреженията при вариант три са по-малки съответно с 95 MPa, 58 MPa и 25 MPa от тези при варианти 1, 2 и 4.

Имайки предвид, че изследването е направено с помощта на близки по параметри изчислителни модели (еднакви натоварвания, еднакви опорни реакции и близки по размери крайни елементи), то следва да се препоръча

локомотивите от серия 46 да се оборудват с оси, изработени в съответствие с параметрите на вариант три.



Фиг. 6. Изменение на напрежението и деформацията при различните варианти на оста.

### ИЗВОДИ

На базата на цялостната работа по настоящото изследване, могат да бъдат направени следните изводи:

➤Разработени са изчислителни модели за якостен анализ на осите на локомотиви серия 46 с помощта на компютърния продукт ANSYS Workbench 10.0. Моделите са съставени изцяло от елементи тип „solid”.

➤Изследвана е сходимостта на решенията, като е установено, че всеки един от моделите е подходящ за анализ на конструкции от такъв тип.

➤Работата с ANSYS Workbench 10.0 предоставя широки възможности за изменение на входящите данни с цел получаване максимално добри резултати при моделирането. Замрежването на конструкцията е изключително качествено и прецизно, с възможност за автоматично

сгъстяване в местата с концентратори на напрежение и приложено външно натоварване. Програмата дава възможност за изследване на множество параметри, оказващи влияние върху носимоспособността и дълготрайността на конструкцията.

➤Констатирано е много добро съвпадане на резултатите, получени при моделирането на конструкциите с помощта на програмата ANSYS Workbench 10.0 с тези, получени с други методики. Резултатите потвърждават и практическите наблюдения, извършвани над различните видове оси през годините.

➤Потвърждава се изводът, че стойностите на напрежението в опасните сечения се влияят благоприятно от нарастването на радиуса на закръгление в прехода между две сечения с различни диаметри.

### ЛИТЕРАТУРА:

[1] Димитров, Ж. и др. Анализ на причините за недостатъчната надеждност на колоосите на локомотиви серия 46 и предлагането на мерки за повишаването й. С., НИС при ТУ, дог. №2444-4/99, 2000.

[2] Димитров, Ж. Оценка на експлоатационната надеждност на осите на локомотиви серия 46 и насоки за повишаването й. С. сп. „Железопътен транспорт”, бр.1/2001.

[3] Стойчев Г, Метод на крайните елементи. Якостен и деформационен анализ. ТУ, С, 2000.

[4] UIC Code 515-3. Rolling stock. Bogies – Running gear. Axle design calculation method. 1994.

## MODELLING AND STRENGTH ANALYSIS OF THE AXLES OF ELECTRIC LOKOMOTIVE SERIES OF 46

Vasko R. NIKOLOV, Valeri M. STOILOV

Vasko R. Nikolov – eng, PhD student, Valeri M. Stoilov – assos. Prof. PhD, Technical University – Sofia 8 St. Kliment Ohridski Blvd

**BULGARIA**

**Abstract:** The report contains results of the static strength analysis of the axles of electric locomotives series 46 used in Bulgarian Railways. Theoretical researches are performed by the Finite Elements Method (FEM). Complicated 3D models, describing very accurately the geometry of the researched object are developed. Their suitability during the creating process is researched. The applied loadings are close to the real ones, which enable to obtain adequate accurate results for the distribution of the stresses and deformations.

**Key words:** locomotives, axles, strength analysis, finite elements method (FEM).