

МОДЕЛИРАНЕ И СРАВНИТЕЛЕН ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА РАЗЛИЧНИ КОНСТРУКЦИИ ЛИСТОВИ РЕСОРИ ЗА ДВУОСНИ ТОВАРНИ ВАГОНИ

Добринка Атмаджова, Васко Николов
atmadzhova@abv.bg, va_r_nikolov@abv.bg

*ВТУ “Тодор Каблешков”, катедра „Транспортна техника“,
София, ул. „Гео Милев“ 158
БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** вагони, ресорно окачване, листови ресори, якостен анализ, безопасност на движението, метод на крайните елементи.*

***Резюме:** В доклада е извършено моделиране и сравнителен якостен анализ на натоварванията, действащи върху конструкции листови ресори, използвани при двуосните товарни вагони. Представени са и са разгледани различни конструкции листови ресори, използвани при двуосни вагони и стандартите, на които те трябва да отговарят. Описани са натоварванията и якостните характеристики на различни видове ресорни елементи във вагоностроенето. Посочени са програми, с които може да се извършва анализ на подобни конструкции. Представен е пример за извършване на якостен анализ на конструкции листови ресори за двуосни вагони с помощта на програмния продукт MITCALC. Изброени са възможностите на продукта и параметрите, които пресмята. Дадено е описание на метода на крайните елементи като инструмент за извършване на якостен анализ на подобни конструкции. Извършено е моделиране и анализ на конструкцията по метода на крайните елементи с помощта на програмния продукт ANSYS. Посочени са параметрите, които програмата пресмята, като са подкрепени с графично изображение на всеки от тях. Извършен е сравнителен анализ на конструкции листови ресори за двуосни вагони по двата метода. Посочени са предимствата и недостатъците при използването на двата метода. В заключение са дадени препоръки за използването на всеки един от методите в инженерната практика.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Проблемът за надеждността на транспортните средства (ТС) е един от главните, с които се сблъскват конструкторите, независимо от непрекъснатото подобряване характеристиките на отделните съставляващи ги елементи. Това се обяснява преди всичко с все по-широкото използване на все по-разнообразни технически решения в конструкциите и технологии за тяхното производство. Изпълняваните от съвременните ТС функции са твърде сложни, свързани са с качеството на извършваните операции и безопасността, а това естествено води до повишаване изискванията към тяхната надеждност.

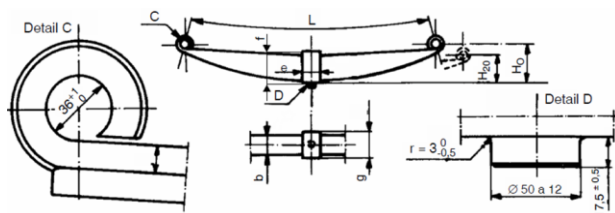
Листовите ресори са важен елемент от ресорното окачване в ходовата част на железопътната техника [1,2]. От тяхното състояние се определя не само възможността на съответното транспортно средство да изпълнява своите функции, но и в пряка степен зависи безопасността на движението на съответното возило и на транспортния процес като цяло [3].

2. КОНСТРУКЦИИ ЛИСТОВИ РЕСОРИ, ИЗПОЛЗВАНИ ПРИ ЖЕЛЕЗОПЪТНАТА ТЕХНИКА

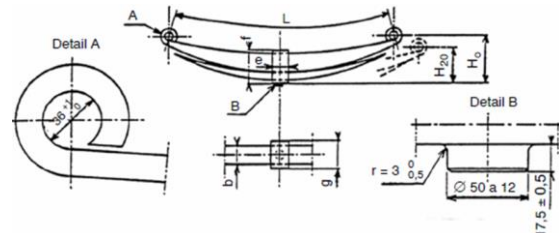
В железопътната техника се използват множество различни конструкции листови ресори, което е обусловено от многообразието на типовете возила по предназначение и технически характеристики.

В железопътната техника се използват стандартизирани конструкции листови ресори за талигови и неталигови возила съгласно БДС EN 14200:2004 [4] и UIC 517 [5]:

- Стандартни ресори с постоянна коравина тип А (фиг. 1);
- Стандартни ресори с постоянна коравина тип В (фиг. 1);
- Стандартни ресори с прогресивна коравина (фиг. 2).



Фиг. 1



Фиг. 2

3. ПРОГРАМНИ ПРОДУКТИ, ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОНЕН АНАЛИЗ НА ЛИСТОВИ РЕСОРИ

Математическите методи за якостно пресмятане на конструкции ресорно окачване с листови ресори са познати на всеки инженер [6,7,8]. Тези методи се прилагат в математически програмни продукти и такива използващи електронни таблици, като например MTCALC и различни калкулатори [9]. В реалните проектни условия се налага да бъдат проведени якостни изчисления на множество детайли от една машина или сложна сглобена единица или цяла инсталация на базата на тримерно представени модели със сложна форма, за които често не важат общите формулировки от механиката и съпротивлението на материалите. Методът на Крайните елементи е основан на приближения, което го прави незаменим при пресмятането на детайли с форма, която не отговаря на типизираните задачи от техническата механика и съпромата. Неговата приложимост за решаване на разнообразни якостни и динамични задачи все още представлява фундамента на много софтуерни решения за провеждане на компютърно подпомогнати симулации и якостни изчисления [10,11,12].

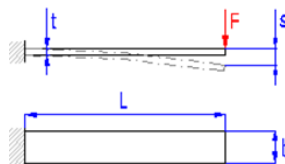
За изчисление по МКЕ съществуват различни пакети като: ANSYS [13,14,15], NASTRAN [16,17], Unigraphics NX [18], CATIA [19], Solid Works– Cosmos [20], ELCUT [21] и др. Всеки един от тях има свой интерфейс за попълване на изходните данни, пресмятане и визуализация на резултатите. В някои пакети има възможност на реализация на свои програми за пресмятане, в това число и решаване на задачи за оптимизация, но възможностите на MATLAB [22,23,24,25] са предопределили използването именно на този пакет за решаването на дадената задача. От една страна в нея има среда за решаване по МКЕ 2-мерни [26] и 3-мерни [27] задачи. От друга страна, наличието на пакета [28] позволява решаването на различни задачи за оптимизация.

3.1. ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОНЕН АНАЛИЗ НА КОНСТРУКЦИИ ЛИСТОВИ РЕСОРИ С ПОМОЩТА НА ПРОГРАМНИЯ ПРОДУКТ MITCALC

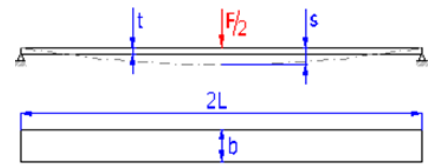
Програмният продукт MITCALC [29] е предназначен за конструктивно пресмятане на различни машинни елементи, което дава възможност за бързо и качествено първоначално изчисление на действащите в конструкцията напрежения при зададени параметри или на отделни конструктивни параметри по зададени стойности на напреженията и деформациите.

Изчисляването на листови ресори чрез програмния продукт MITCALC се основава на принципа на изчисляване на дълги греди с правоъгълно сечение, подложени на огъване.

Те се използват като конзолни греди (фиг. 3), или като греди на две опори (фиг.4). Листовите на листовия ресор могат да се използват самостоятелно или в комплекти.

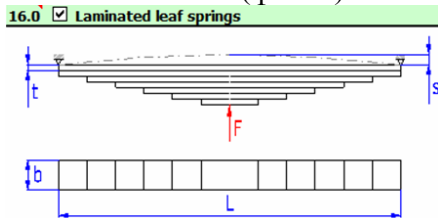


Фиг. 3

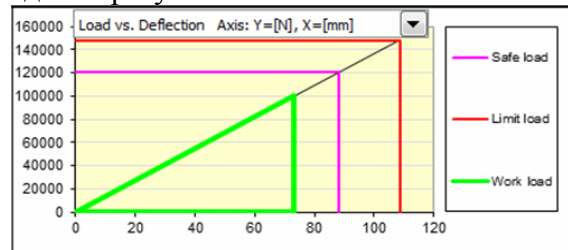


Фиг. 4

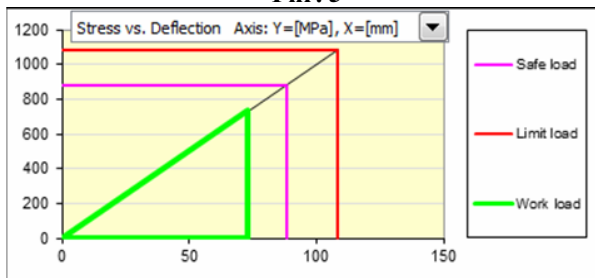
При пресмятането на ламиниран листов ресор за двусосни вагони с помощта на програмата MITCALC (фиг. 5) се получават следните резултати:



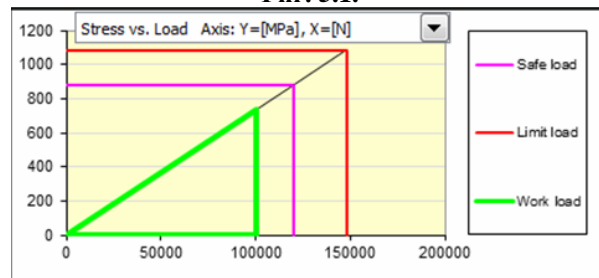
Фиг. 5



Фиг. 5.1.



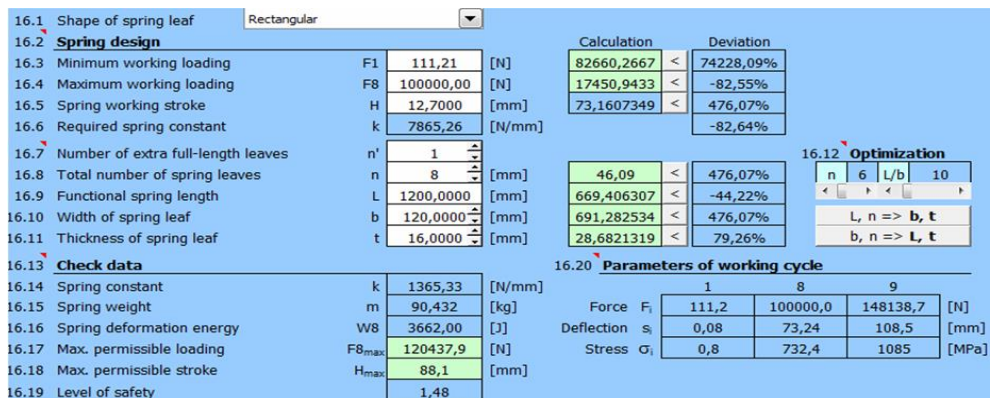
Фиг. 5.2.



Фиг. 5.3.

Програмата дава възможност да се представят зависимостите между отделни параметри на якостния анализ за различни състояния:

- Натоварване и деформация (Load vs. Deflection) (фиг. 5.1);
- Напрежение и деформация (Stress vs. Deflection) (фиг. 5.2);
- Напрежение и натоварване (Stress vs. Load) (фиг. 5.3) и
- Параметрите на работния цикъл (Parameters of working cycle) (фиг. 6).



Фиг. 6. Резултатите от направените изчисления са дадени в таблица 1.

Таблица 1. Резултатите от изчисления на листови ресори по програмата MTCALC

Характеристики		Тип ресор за железопътна техника по UIC 517		
		Нови тип А	Нови тип В	Стари вагони
Геометрични параметри	Дължина на ресора L	1400±4mm	1200±3mm	1400±4mm
	За лист:			
	Ширина b	120±0,5mm	120±0,5mm	120±0,5mm
	Дебелина h	16±0,2mm	16±0,2mm	16±0,2mm
	Брой n	9	8	8
Статично натоварване	Натоварване на ресор P	100 kN	100 kN	90 kN
	Максимални напрежения	759,5 MPa	732,4 MPa	769 MPa
	Коефициент на сигурност	1,43	1,48	1,41
Натоварване на умора	Натоварване на ресор P	50 kN	50 kN	50 kN
	Максимални напрежения	379,8 MPa	366,2 MPa	384,5 MPa
	Коефициент на сигурност	2,86	2,96	2,82

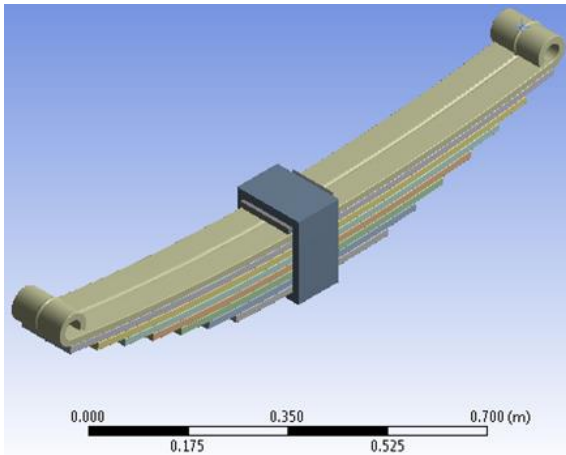
От направените изчисления на различни конструкции листови ресори за окачване на транспортна техника могат да се направят следните препоръки за проектиране на конструкции листови ресори за железопътна техника най-голям коефициент на сигурност при статично и натоварване на умора имат листовите ресори по UIC тип В, но от резултатите не е видно местата с най-голями напрежения, затова е необходимо моделиране и изчисляване по МКЕ.

3.2. ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОНЕН АНАЛИЗ НА КОНСТРУКЦИИ ЛИСТОВИ РЕСОРИ ПО МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ

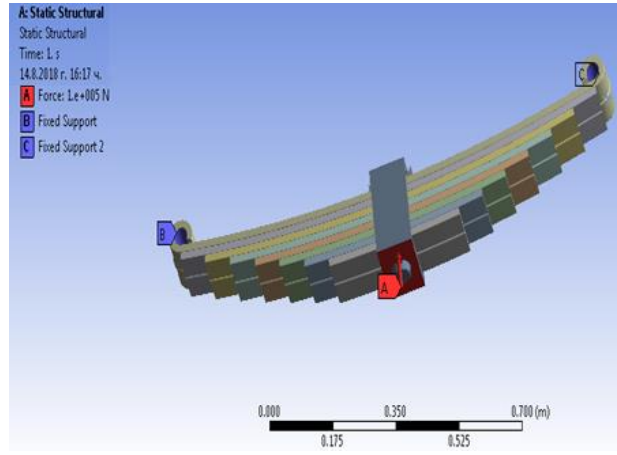
По своята същност МКЕ е числен метод за решаване на широк кръг от задачи в областта на механиката. Той се явява развитие на метода на преместванията. Както в метода на преместванията, така и в МКЕ по известни съотношения между силите и преместванията за отделните елементи на конструкцията се стига до изследване (анализ) на поведението на цялата конструкция.

Във всички изследвания целта е определянето на основните характеристики на полето, каквито са разпределението на напреженията или преместванията, стойностите на напреженията и преместванията в отделни точки на полето, екстремните стойности на тези величини или техния градиент и т.н.

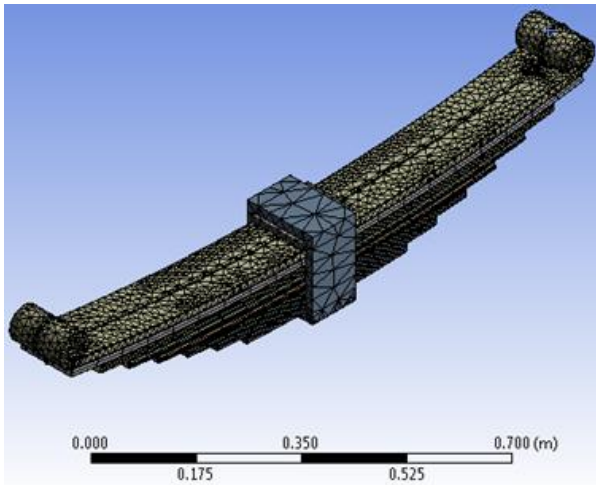
При изследването на листов ресор за двуосен вагон по МКЕ (фиг.7) с използване на програмния продукт ANSYS листовият ресор бе натоварен със сила 100 kN, приложена в основата на ресорната скоба и запъване в двете уши като фиксирани опори (фиг.8), след което се генерира мрежа от краен брой елементи в конструкцията (фиг.9).



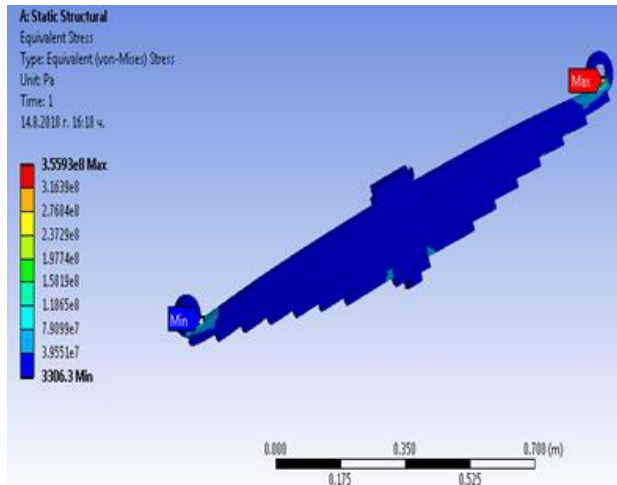
Фиг. 7



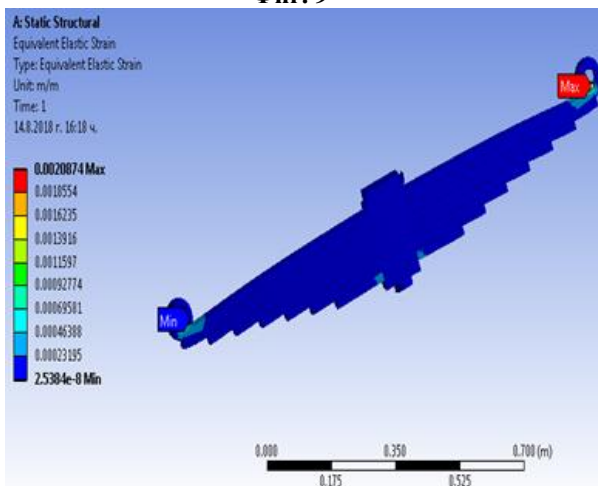
Фиг. 8



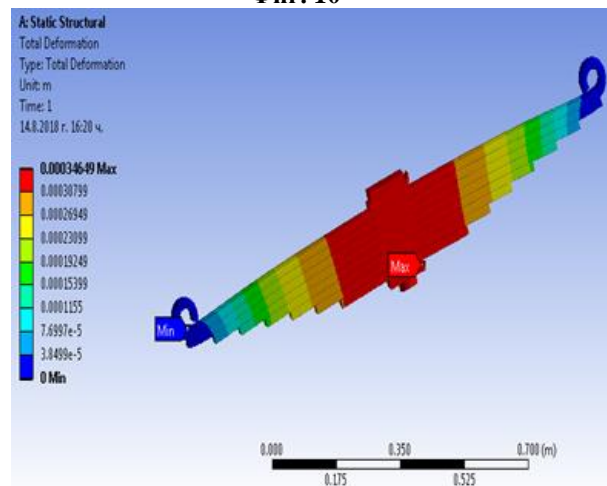
Фиг. 9



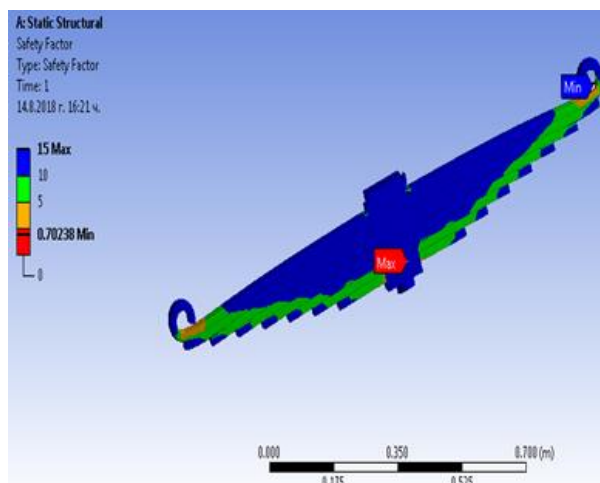
Фиг. 10



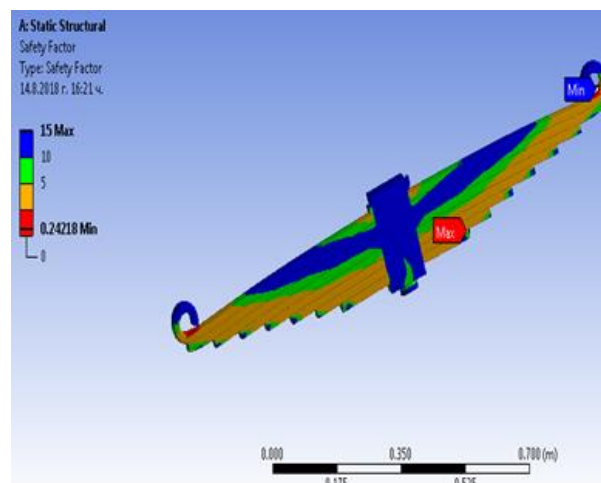
Фиг. 11



Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14

След извършване на пресмятанията бяха получени следните резултати:

- Напрежение: максимална стойност 355 МПа, получена в основата на ухото на главния лист (фиг.10);
- Относително удължение: максимална стойност 2 mm/m, отново разположено в основата на ухото на главния лист (фиг.11);
- Максималната деформация се получава в средата на ресора със стойност от 0,3 mm (фиг.12);
- Коефициент на сигурност от статично натоварване с минимум в основата на ушите на главния лист 0,7 (фиг.13);
- Коефициент на сигурност от натоварване на умора с минимум отново в основата на ушите 0,24 (фиг.14);

Освен изброените параметри може да бъде изследвано изменението и на други между които експлоатационен ресурс (Life) на изделието, вероятност от поява на повреди (Damage) и др.

4. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ПРЕСМЯТАНИЯТА НА МНОГОЛИСТОВ РЕСОР ПО ДВАТА МЕТОДА

Съществено преимущество на МКЕ пред аналитичните методи е, че с него могат да се решават задачи без ограничения във формата на тялото, произволни статични гранични условия (натоварване) и произволни геометрични гранични условия (опори). При дискретизация на дадена област в различните подобласти може да се използват различни по форма и големина крайни елементи, като се спазва условието те да изпълват непрекъснато цялата област на разделяне и възловите точки на съседните крайни елементи да съвпадат. В зависимост от геометрията и използваните хипотези за изграждане на модела областта на разделяне може да бъде линия, равнина или тримерно пространство. Съответните крайни елементи могат да бъдат едномерни (линейни), двумерни (равнинни) или тримерни (обемни) [10].

МКЕ е числен метод с неизбежните в този случай грешки от неадекватно моделиране, а така също грешки, произтичащи от изчислителните операции. Решението, получено с МКЕ, обикновено е приблизително спрямо точното и един от важните моменти откъм приложната страна е оценката на получените резултати. Точността на решението е мярката за близостта на численото решение до точното. МКЕ включва числени процедури, при които решението може да клони към точното, но може да даде резултати, коренно различни от истинските. Нарастването на грешката при извършването на отделните изчислителни операции определя устойчивостта на решението. Неустойчиво е това решение, при което вследствие на натрупването на

грешки от последователните изчисления, истинското решение се загубва в грешките. В този смисъл сходимост на решението е последователното приближаване на численото решение към истинското. В сходящата процедура при уточняване на някои параметри, разликите между резултатите от последователните изчисления непрекъснато намаляват и в граничния случай клонят към нула.

Точността на решението в голяма степен зависи от умелото разработване на изчислителния модел. Причината е, че при съставянето му не е възможно (а в редица случаи не е и целесъобразно) да се използва модел, отразяващ и най-малките подробности на реалния обект. Това налага конструкцията да се анализира, да се установят основните носещи елементи (при задачи за якостен анализ) и да се вземе решение за целесъобразното им представяне чрез подходящи крайни елементи. Този процес е субективен и зависи от опита и уменията на специалистите, провеждащи изчисленията.

Предимства на метода на крайните елементи:

- Може да се работи с модел с всякаква форма;
- Избират се точно местата на натоварванията, техният вид и стойност;
- Избират се точно местата и видът на запъването;
- Могат да се избират наблюдаваните параметри;
- Може да се наблюдава деформираната конструкция;
- Може да се наблюдават точно местата с екстремни стойности;

Наред с това МКЕ има и някои недостатъци:

- Ограничена библиотека за материали;
- Трудно се променят конструктивните параметри – за всяка отделна е необходим отделен модел;
- Всяка промяна във входящите данни се нуждае от нова симулация, за да се види резултатът, което отнема време;
- Не е подходящ за конструктивно пресмятане на елементи и възли и за тяхното оразмеряване. Обикновено се използва за проверочни пресмятания.
- Пресмятанията изискват по-големи ресурси – повече изчислителна мощност на компютъра, по-голяма памет, повече време за пресмятане.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В инженерната практика се използват множество методи и похвати за пресмятане на механични конструкции. Всеки един от тях е подходящ за извършване на различни действия по пресмятане на отделни елементи и цели възли от тях. Програмните продукти MPTCALC и ANSYS са едни от многото, използвани в изследванията на машини и съоръжения, както и на части и елементи от тях.

Програмата MPTCALC е продукт, изключително подходящ за първоначално пресмятане и оразмеряване на широк спектър от механични елементи и конструкции. Самата програма е базирана на широко разпространената програма Microsoft Excel и много добре използва изчислителната мощ на последната. В нея е разположена библиотека, даваща възможност да се пресмятат различни по вид машинни елементи, натоварени по различен начин и с различни размери. Възможно е също така да бъдат избирани различни измерителни системи, като при пресмятането се получават важни за съответната конструкция параметри, получени на базата на входящите данни, като максимално напрежение, деформация и др.

Програма ANSYS е широко разпространен продукт, предназначен за изследване на конструкции по метода на крайните елементи (МКЕ). Този тип програми не са подходящи за първоначално пресмятане и оразмеряване на машинните елементи и възлите, в които те са включени, но за сметка на това изключително добре се справят с проверочните пресмятания на същите тези конструкции. Те също дават възможност да

бъдат изследвани множество параметри като еквивалентно напрежение, относително удължение, деформация, коефициенти на сигурност при статично натоварване и при натоварване на умора, остатъчен ресурс на изделието и много други. Важно предимство на тези програми е също и това, че те нагледно показват разпределението на изследвания параметър по протежение на цялата конструкция.

В заключение може да се каже, че всеки от разглежданите продукти има своето място при изследване на механични конструкции и машинните елементи, като се има предвид видът на анализа, който трябва да бъде извършен: конструктивно пресмятане, оразмеряване или проверочно пресмятане на съществуваща или проектирана конструкция.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Стоилов, В. Славчев С., Вагони, Техника, София, ТУ София, 2014
- [2] Ружеков Т., Пенчев Цв., Димитров Е. Теория и конструиране на железопътна техника. ВТУ, С. 2007
- [3] Petrovic, D., Bizic, M.: Improvement of suspension system of Fbd wagons for coal transportation, Engineering Failure Analysis, 25, pp. 89–96, 2012. iSSN: 1350-6307
- [4] БДС EN 14200:2004 Железопътна техника. Елементи на окачването. Листови пружини от стомана. 2004, <http://www.bds-bg.org/bg/bg/standard>
- [5] UIC 517 2006-04, Wagons-Suspension gear–Standardisation. <https://www.beuth.de/en/technical-rule>, 2006
- [6] Коларов И. Основи на конструирането. Учебник в електронен формат., ВТУ "Т. Каблешков", 2016г.
- [7] Коларов И. и Щъркалев И., Ръководство за курсово проектиране по машинни елементи, ВТУ "Тодор Каблешков", 2014г.
- [8] Василев Д., Трептения в нелинейни механични системи с приложение в транспортната техника., Годишник на ВТУ „Т. Каблешков”, София, 2015, ISSN 1314-362X, 118 стр., 2015г.
- [9] http://www.tribology-abc.com/calculators/t14_9.htm
- [10] Стойчев Г, Метод на крайните елементи. Якостен и деформационен анализ. ТУ, С, 2000.
- [11] Недев В., Якостно – деформационен анализ (Избрани въпроси). Годишник на ВТУ “Т. Каблешков”, № 5, София, 2014, ВТУ “Т. Каблешков”, 2014г.
- [12] Колев П. Динамичен анализ и моделиране на сложни механични системи. , Учебник записки в електронен формат. ВТУ „Т. Каблешков”, 2015г.
- [13] Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах.— М.: Компьютер Пресс, 2002
- [14] ШАЛУМОВ А.С., ВАЧЕНКО А.С., ФАДЕЕВ О.А., БАГАЕВ Д.В. Введение в ANSYS: прочностной и тепловой анализ: Учебное пособие. – Ковров: КГТА, 2002
- [15] ANSYS Online Manuals. Release 5.5. User Programmable Features. 1999.
- [16] MSC.Nastran 2004 Design Sensitivity and Optimization User’s Guide, MSC.Software GmbH Munich, Germany, 2004
- [17] MSC/NASTRAN for Windows (<http://sual.narod.ru/NASTRAN/>).
- [18] Асенов Е., К. Изов Компютърно интегрирано производство с Unigraphics NX, ТУ София, 2001
- [19] Sham Tickoo CATIA V5R19 for Designers CAD/CIM Technologies, USA, 2009
- [20] Хаджийски В. М., Ст. В., Стефанов, Компютърен инженерен анализ на машинни елементи с COSMOSWorks УХТ-Пловдив, 2008
- [21] Дубицкий С. Д. ELCUT 5.1— платформа разработки приложений анализа полей. // Дьяконов В. SIMULINK 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002

- [22] Дащенко А. Ф., В. Х. Кириллов, Л. В. Коломиец, В. Ф. Оробей MATLAB В ИНЖЕНЕРНЫХ И НАУЧНЫХ РАСЧЕТАХ Одесса «Астропринт» 2003
- [23] Йорданов Й. Т. Приложение на MatLab в инженерните изследвания – Част I и II. Русе. „Русенски Университет“. 2004.
- [24] Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x. В 2-х томах.— М.: Диалог-МИФИ, 1999
- [25] Konstantinov M. and P. Petkov. Robust systems control: analysis and synthesis with MATLAB+CD ROM. ABC Technics–Sofia, 2002
- [26] Partial Differential Equation Toolbox User’s Guide.— The MathWorks, Inc., 1997.
- [27] FEMLAB (<http://www.matlab.ru/femlab/default.asp>).
- [28] Optimization Toolbox User’s Guide.— The MathWorks, Inc., 1997.
- [29] MITCALC Mechanical, Industrial and Technical Calculations, <http://www.mitcalc.com/>

MODELING AND COMPARATIVE STRUCTURE ANALYSIS OF DIFFERENT STRUCTURES OF LEAF SPRINGS FOR TWO AXLE FREIGHT WAGONS

Dobrinka Atmadzhova, Vasko Nikolov
atmadzhova@abv.bg, va_r_nikolov@abv.bg

Todor Kableshkov University of Transport, department of Transport equipment
158 Geo Milev str., Sofia
BULGARIA

Key words: wagons, spring suspension, leaf springs, strength analysis, traffic safety, finite element method (FEM).

Abstract: The report has performed modeling and comparative strength analysis of the loads acting on leaf spring constructions used in the two-axle freight wagons. Various leaf spring designs used in two-axle wagons and the standards to which they have to meet are presented and discussed. The loads and strengths of different types of spring components in the wagon production are described. Programs which can be used to analyze similar constructs are described. An example to perform a strength analysis of leaf springs constructions for two-axle wagons using the MITCALC program product is given. The capabilities of the product and the parameters it calculates are listed. A description of the finite element method as a tool for performing a strength analysis of similar constructs is given. Modeling and analysis of the finite element construction using ANSYS software is performed. The parameters that the program calculates are supported by a graphical representation of each of them. A comparative analysis of the leaf spring constructions for two-axle wagons has been performed on both methods. The advantages and disadvantages of using both methods are outlined. In conclusion, recommendations are given for the use of each of the methods in engineering practice.