

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по транспорта Катедра Железопътна техника

маг. инж. Владислав Йорданов Мазнички

СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА УМОРАТА НА МАТЕРИАЛА ПРИ ТАЛИГИ ЗА ТОВАРНИ ВАГОНИ

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен "ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.5 Транспорт корабоплаване и авиация

Научна специалност: Подвижен железопътен състав и теглителна сила на влаковете

Научни ръководители: Проф. д-р инж. Валери Стоилов Доц. д-р инж. Светослав Славчев

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Железопътна техника" към Факултет по транспорта на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 02.02.2021 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 26.06.2021 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.5-03/24.02.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

- 1. проф. д-р инж. Валери Малинов Стоилов председател
- 2. проф. д-р инж. Михаил Дамянов Тодоров
- 3. проф. дн инж. Росен Петров Иванов
- 4. доц. дн инж. Добринка Борисова Атмаджова секретар
- 5. проф. д-р инж.-икон. Красимир Тодоров Кръстанов

Рецензенти:

- 1. проф. д-р инж. Михаил Тодоров
- 2. доц. дн инж. Добринка Атмаджова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по транспорта на ТУ-София, блок № 9, кабинет № 9310.

Дисертантът е задочен докторант към катедра "Железопътна техника" на факултет по транспорта. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Владислав Мазнички

Заглавие: Симулационно изследване на умората на материала при талиги за товарни вагони

Тираж: 30 броя Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД Актуалност на проблема

Железопътният транспорт е лидер в сферата на екологичните превози. Това е и причината търсенето на вагони за превоз на пътници и товари да е изключително високо. Вагоните експлоатирани по железния път е необходимо да притежават висока якост, надеждност и да осигуряват необходимия комфорт на пътниците или съхраняемост на товарите. Това налага в етапа на проектиране да се използват съвременни симулационни методи.

Един от най – натоварените конструктивни възли използвани в железопътната техника са талигите. Те са подложени на комплексни натоварвания, които могат да доведат до възникване на явлението умора на материала. Съвременните тенденции са насочени към повишаване на ефективността на железопътните превози, като една от възможностите е увеличаването на осевото натоварване, което влошава динамичните натоварвания. От това произтича необходимостта от въвеждане на строги мерки и изисквания за изследване на якостта на железопътни талиги, които да гарантират висока надеждност.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Направеният анализ на нормативните документи, публикациите и софтуера за изследване на рамите на талиги за товарни вагони позволява да бъде формулирана целта на настоящата дисертация: Да се предложи *единен подход за теоретично изследване на железопътни талиги за товарни вагони*, който съответства максимално на нормативните изисквания и на методите за реално тестване на изделията.

За постигане на поставената цел е необходимо да бъдат изпълнени следните основни задачи:

- 1. Уточняване на режимите на натоварване за талиги за товарни вагони.
- 2. Анализ на методите за изследване на явлението умората на материала при талиги за товарни вагони.
- 3. Разработване на Методика за оценка на напреженията при изследване на явлението умора на материала по статичен път.
- 4. Разработване на алгоритъм и програма за определяне на допустимите напрежения и оценка на резултатите при изследване на умората на материала при използване на съвременни програмни продукти за якостно-деформационен анализ.
- 5. Разработване на симулационни модели за изследване якостта на талиги за товарни вагони. Особености при моделирането.
- 6. Сравнителен анализ на резултатите получени с моделите при използване на различни видове крайни елементи и програмни продукти.
- 7. Верификация на моделите на базата на резултатите от числените и натурни експерименти.

Научна новост

Надградена е "Методика за оценка на напреженията при изследване на умората на материала", което позволява да бъде използвана за изследване на талиги за товарни вагони и разширява възможностите й за оценка на вероятността от възникване на умора на материала като се използват различни методи. Предложена е методика, която доближава теоретичното изследване на железопътните талиги за товарни вагони до процедурата за провеждане на реални изпитвания на конструкциите. Тя е подходяща за узаконяване на железопътни талиги от категория В-V (по EN 13749:2011).

Чрез разработените симулационни модели е направен якостно-деформационен анализ на рамата на талига Y25-Ls-k, като са определени напреженията, преместванията и деформациите в конструкцията. Изследвана е и умората на материала в заваръчните шевове. Талигата е подложена на натурни изпитвания и е допусната до редовно производство. Направена е верификация на симулационните модели, което позволи да бъдат сертифицирани (допуснати в експлоатация) без изпитвания още 2 талиги от фамилията Y25, прозводство на ТРАНСВАГОН АД гр. Бургас. Методът на изследване е приложен успешно при сертифицирането на гама талиги от фамилията Y25, производство на фирма КОЛОВАГ АД гр. Септември

Апробация

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани на международни конференциии и са публикувани в периодични издания:

- International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies BulTrans-2016
- MATEC Web Conf. Volume 133, 2017
- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 618,2019
- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 664,2019
- International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies BulTrans-2020

Публикации

Популяризиране на изследванията, предложените методики, получените резултати и формулираните изводи е извършено чрез пет доклада, изнесени в международни форуми, от които един брой е самостоятелен. Три броя от докладите са публикувани в индексирани списания в световно известнната база данни SCOPUS, а един брой в реферирано издание.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 152 страници, като включва увод, 3 глави за решаване на основните задачи, списък на приносите, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 145 източници, като 132 са на латиница и 13 на кирилица. Работата включва общо 60 фигури, 21 таблици и 1 приложение. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ПО ПРОБЛЕМА

При извършения анализ на достъпните литературни източници са констатирани сериозни различия при разработката на симулационни модели (СМ) и при режимите на натоварване, които се прилагат. При изграждането на СМ се използват различни подходи при създаването им, различни програмни продукти и разнообразни крайни елементи (КЕ). Това не дава яснота, кой подход, КЕ или софтуер са най-подходящи за извършване на анализа. Открити са сериозни различия между методиките за теоретично изследване на талиги и тези за провеждане на натурни изпитвания. Това възпрепятства верификацията на СМ и въвеждането в експлоатация на железопътните талиги само въз основа на теоретично изследване. Анализирани са възможните методи за оценка на вероятността от появата на явлението умора на материала и методи за изследването й, както в зоната на чисти сечения, така и в зоните в близост до заваръчен шев. Подчертани са недостатъците на достъпните методи за изследване на вероятността от възникване на умора на материала в зоната на заваръчните шевове, а именно необходимост от СМ изградени от голям брой КЕ. Въз основа на горното е формулирана целта на дисертационния труд: Да се предложи единен подход за теоретично изследване на железопътни талиги за товарни вагони, който съответства максимално на нормативните изисквания и на методите за реално тестване на изделията.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

2.1 Анализ на нормативната база

Извършеният анализ в глава първа подчертава проблемите, свързани с определянето на режимите на натоварване, които в по-голямата си част са свързани с неправилни тълкувания на нормативните документи. Това може да доведе до непълно или грешно изследване. За изясняване на проблема, в тази глава е направен подробен анализ на нормативната база, с цел да се определят еднозначно режимите на натоварване на талигите за товарни вагони.

2.1.1 Сили действащи на талигите и съставяне на режимите на натоварване

При оразмеряването на сложно напрегнати машиностроителни изделия е необходимо в детайли да се познава тяхното поведение по време на експлоатация. Документите, засягащи железопътните талиги са: EN 13749-2011, EN 15827-2011, UIC Leaflet 510-3, TCOC [3, 4, 6, 5]. В EN 13749-2011 [3] е направена коректна класификация на талигите, предназначени за подвижния жп състав и са формулирани минималните изисквания относно действащите сили.

2.1.1.1 Сили при извънредни ситуации

Това са сили, които се проявяват много рядко по време на работа. Основната причина са натрупаните неблагоприятни условия по време на движение. Те превишават нормалните експлоатационни натоварвания до 2 пъти, а конструкцията трябва да е оразмерена така, че да ги понесе без наличието на недопустими деформации с изключение на отделни специални случаи. Силите се класифицират както следва:

- а) Вертикални сили.
- b) Напречни сили.
- с) Надлъжни сили.
- d) Сили в следствие маневрена работа.
- е) Сили причинени от усукване на коловоза.

Режимите на натоварване на железопътни талиги от категория B-V (Статични режими) са представени в таблица 2.1.

Таблица 2.1 Аварийни режими на натоварване

Реж		Натовар	вания		Volume	Howard		Спи	рачни
ИМ		Вертикални		Напречни	усукване	падль	жни	cı	или
[kN]	Плъзгалка Fz2	Центеален лагер Fzc	Плъзгалка Fz1	Fy	g+	Fx2	Fx2	Fbx	Fbz
1		2Fz			-	-	-	-	-
2		1,5xFz(1-α)	1,5xFza		+10 o/oo	-	-	-	-
3		1,5xFz(1-α)	1,5xFza		-10 o/oo	-	-	-	-
4	1,5xFzα	1,5xFz(1-α)			+10 o/oo	-	-	-	-
5	1,5xFzα	1,5xFz(1-α)			-10 o/oo	-	-	-	-
6		1,5xFz(1-α)	1,5xFza	10+(Fz+m+g)/6		-	-	-	-
7	1,5xFzα	1,5xFz(1-α)		10+(Fz+m+g)/6		-	-	-	-
8		1,5Fz				0,1x(Fz+m+g)	-0,1x(Fz+m+g)	-	-
9		1,5Fz				-0,1x(Fz+m+g)	0,1x(Fz+m+g)	-	-
10		Fz			-	Fx=5.	m+g	-	-
11		Fz			-	Fx=-5.	.m+g	-	-
12		1,2Fz			+5 0/00	-	-	1,2Fbz	1,2Fbx
13		1,2Fz			-5 0/00	-	-	-1,2Fbz	-1,2Fbx

2.1.1.2 Сили при нормална експлоатация

Това са сили, които съпътстват возилото през целия му жизнен цикъл или пресъздават поведението на изделието по време на нормална експлоатация. Режимите в таблица 2.2 се използват за теоретично изследване на явлението умора на материала.

Dam		Uaropar	DOILI				I	Crus	
Реж		Патовар	вания	**	усукване			Спир	ачни
ИМ		Вертикални		Напречни	5 5	Надлъ	жни	си	ЛИ
	Плъзгалка	Центеален лагер	Плъзгалка	F				-	
[KIN]	Fz2	Fzc	Fz1	Ру	g+	Fx		FDX	FDZ
1	-	Fz	-	-	-	-	-	-	-
2	-	$(1+\beta)Fz$	-	-	-	-	-	-	-
3	-	(1-β)Fz	-	-	-	-	-	-	-
4	-	$(1-\alpha)(1+\beta)Fz$	$\alpha(1+\beta)Fz$	0,1(Fz+m+g)	-	-	-	-	-
5	$\alpha(1+\beta)Fz$	$(1-\alpha)(1+\beta)Fz$	-	-0,1(Fz+m+g)	-	-	-	-	-
6	-	$(1-\alpha)(1+\beta)Fz$	$\alpha(1+\beta)Fz$	0,1(Fz+m+g)	+5 o/oo	-	-	-	-
7	-	$(1-\alpha)(1+\beta)Fz$	$\alpha(1+\beta)Fz$	0,1(Fz+m+g)	-5 o/oo	-	-	-	-
8	$\alpha(1+\beta)Fz$	$(1-\alpha)(1+\beta)Fz$	-	-0,1(Fz+m+g)	+5 o/oo	-	-	-	-
9	$\alpha(1+\beta)Fz$	$(1-\alpha)(1+\beta)Fz$	-	-0,1(Fz+m+g)	-5 o/oo	-	-	-	-
10	-	(1-α)(1-β)Fz	$\alpha(1-\beta)Fz$	0,1(Fz+m+g)	-	-	-	-	-
11	$\alpha(1-\beta)Fz$	(1-α)(1-β)Fz	-	-0,1(Fz+m+g)	-	-	-	-	-
12	-	(1-α)(1-β)Fz	$\alpha(1-\beta)Fz$	0,1(Fz+m+g)	+5 o/oo	-	-	-	-
13	-	(1-α)(1-β)Fz	$\alpha(1-\beta)Fz$	0,1(Fz+m+g)	-5 o/oo	-	-	-	-
14	$\alpha(1-\beta)Fz$	(1-α)(1-β)Fz	-	-0,1(Fz+m+g)	+5 o/oo	-	-	-	-
15	$\alpha(1-\beta)Fz$	$(1-\alpha)(1-\beta)Fz$	-	-0,1(Fz+m+g)	-5 o/oo	-	-	-	-
16	-	Fz	-	-	-	0,05x(Fz+m+g)	-0,05x(Fz+m+g)	-	-
17	-	Fz	-	-	-	-0,05x(Fz+m+g)	0,05x(Fz+m+g)	-	-
18	-	1,2Fz	-	-	-	-	-	Fbz	Fbx
19	-	1,2Fz	-	-	-	-	-	-Fbz	-Fbx

Таблица 2.2 Експлоатационни режими на натоварване

2.1.2 Методи за оценка вероятността за възникване на умора в заваръчните шевове

В литературния обзор е установено, че е налице голямо разнообразие от методи за изследване на явлението умора на материала, но не става ясно кои от тях е допустимо да се използват според нормативните документи. По-долу са представени методите, които могат да се използват според нормативните документи. Предложена е методика за оценка на умората на материала по теоретичен път, която съответства напълно на актуалната нормативна база. Чрез нея се прецизират някои неясно формулирани текстове и позволява да се избягнат ненужни и недопустими тълкувания от страна както на изследователите, така и от нотифициращите органи.

Задължителни етапи при въвеждане на жп талиги в експлоатация са:

- Разработване на конструктивна и технологична документация;
- Провеждане на якостно-деформационен анализ;
- Изпитване на опитен образец.

Нормативните документи на Европейския съюз и на UIC позволяват въвеждането в експлоатация да стане и само въз основа на якостно-деформационен анализ. Необходимите условия за това са:

- Производителят да е получил сертификат за производство на талига със сходни конструктивни, технологични и експлоатационни характеристики;
- Да е извършен пълният обем от теоретични изследвания с верифицирани изчислителни и симулационни модели.

Нормативните документи свързани с изпитването и теоретичното изследване на товарни талиги (в т.ч. и изследване на умора на материала в заваръчните шевове в металната конструкция) са EN 15827:2011, EN 13749:2011, UIC 510-3, UIC 615-4, TSI, ERRI B 12/RP 17/ RP 60, EN 12663-1:2010, EN 12663-2:2010, DVS 1612:2014 и Eurocode 3 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 47, 112, 125] [110]. Схема на прилагане на външните товари е представена на фигура 2.3.



Фигура 2.3 Сили, действащи върху рамата на талигата [6].

Данните от таблица 2.1, таблица 2.2 и фигура 2.3 позволяват прецизно да се определят граничните условия при теоретичните и експериментални изследвания на якостта на рамата на талигата при статичните режими на натоварване.

Анализът на нормативните документи относно изследването на умората на материала в зоната на заваръчните шевове по теоретичен и по експериментален път показва някои различия. Причината е, че теоретичната оценка се извършва по количествени показатели (допустими напрежения), а при експерименталната – по качествени (наличие или не на пукнатини).

По-конкретно оценката за умора на материала според EN 13749:2011, EN 15827:2011 и UIC 510-3 [3, 4, 6] по теоретичен път се прави на базата на действащи европейски или национални стандарти. За нуждите на настоящото изследване е използван немският национален стандарт по заваряване DVS 1612:2014 [47]. Той е базиран на кривите на Moore-Kommers-Jasper (MKJ) diagram диаграми [10, 47, 112, 113]. В зависимост от вида на заварената конструкция, типа на заваръчния шев, технологията за контрол и вида на действащото натоварване се избира диаграма за определяне на допустимите напрежения. В общия случай за изследване на сложни машиностроителни изделия при комплексно натоварване, оценката се извършва по четири последователни критерия, три по компоненти [47] и един комплексен [47, 126]. Критериите са представени чрез равенства (2.17 – 2.20):

$$\frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\parallel lim}} \le 1 \qquad (2.17) \qquad \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp lim}} \le 1 \qquad (2.18) \qquad \frac{\tau}{\tau_{lim}} \le 1 \qquad (2.19)$$

$$\left(\frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\parallel lim}}\right)^{2} + \left(\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp lim}}\right)^{2} - \frac{\sigma_{\parallel}\sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel lim\sigma_{\perp lim}}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{lim}}\right)^{2} \le 1,1$$
(2.20)

където

τ

 σ_{\parallel} са нормалните напрежения надлъжно на заваръчния шев;

 σ_{\perp} - нормални напрежения напречни на заваръчния шев;

тангенциални напрежения надлъжно на заваръчния шев;

*σ*_{llim} - нормални допустими напрежения надлъжно на заваръчния шев (по DVS 1612);

 $\sigma_{\perp lim}$ - нормални допустими напрежения напречно на заваръчния шев (по DVS 1612);

τ_{lim} - Тангенциални допустими напрежения надлъжно на заваръчния шев (по DVS 1612).

Допустимите напрежения $\sigma_{lim}(R_{\sigma})$ са функция на коефициента на асиметрия R_{σ} при цикличното натоварване формула (1.2), който се изчисляват съгласно (2.21).

$$\sigma_{lim}(R_{\sigma}) = 150(1,04^{-x}) \left[\frac{2(1-0,3R_{\sigma})}{1,3(1-R_{\sigma})} \right]$$
(2.21)

х е експонента, зависеща от избраната крива, отговаряща на съответния заваръчен шев и където натоварване.

Методът за експериментално изпитване е представен подробно в EN 13749:2011 и UIC 510-3 [3, 4, 5, 6]. Според него номиналната стойност на приложните сили съответства напълно на данните от таблица 2.1. Тестът протича на 3 етапа, като общият брой на циклите e 10x10⁶ [3, 4, 5, 6, 128, 48, 11, 129, 130, 131] [132, 19].



Фигура 2.4 Процедура за изпитване на талиги [3, 5, 6].

Първият етап обхваща 6x10⁶ цикъла, при което режимите на натоварване са с номинални стойности. Етапът завършва с междинна качествена и количествена оценка. Качествената оценка е задължителна и изисква пълен контрол на заваръчните шевове. Критерият е отсъствие на пукнатини. Количествената оценка най-често се извършва с диаграмите на Гудман-Смит [128, 48, 11, 129, 130, 131] [132, 19]. При нея се допуска превишаване на напреженията над нормираните в "ограничен брой контролирани точки". Състоянието на тези зони се следи с повишено внимание при следващите два етапа.

Вторият етап включва 2x10⁶ цикъла. За разлика от първия вертикалните сили се увеличават с 20%. Етапът завършва с междинна качествена оценка, при която се извършва контрол на заваръчните шевове. Не се допуска възникването на пукнатини.

Третият етап обхваща 2x10⁶ цикъла, при вертикални сили включващи 40% претоварване спрямо номиналните. Критерият за оценяване е качествен, при което появата на пукнатини е допустима, при условие че не нарушават целостта на конструкцията.

Задълбоченият анализ на нормативните документи показва следните различия между теоретичните и експерименталните изследвания относно умората на материала:

1) При *реално изпитване* относно умора на материала:

Надлъжните натоварвания на рамата не се прилагат. Това води до изключване на режими с номера 16 и 17 от таблица 2.2 Annex G на EN 13749:2011 [3].

- Според Annex G на EN 13749:2011 [3] се допуска спирачните сили да не се прилагат върху конструкцията в случай, че тяхното влияние при статичните изпитвания е незначително. Този текст позволява на изпитателите субективно (без количествен показател) да вземат решение за включване или изключване на режими с номера 18 и 19 от таблица 2.2.
- Според Annex G на EN 13749:2011 [3], действащите натоварвания се прилагат в комбинация с една и съща фаза и честота и така, че да симулират движение на талигата в лява или дясна крива, сменяйки приложната точка и посоката на всеки 10 до 20 цикъла. При така формулираното действие на силите следва, че когато се разглежда разтоварване на централния лагер напречната силата F_{y} от фигура 2.4 става равна на нула.

2) При *теоретичните изследвания* относно умора на материала е целесъобразно изследването да се проведе с номинални стойности на силите, без да се симулира претоварване с 20 или 40% по подобие на втори и трети етап от изследването при изпитване.

Причината е чисто теоретична. Методът за теоретично изследване е създаден при предпоставката, че ако са изпълнени условията от равенства (2.17)-(2.20) то се осигурява неразрушаемост на материала при 10⁷ цикъла. В случай, че се заложат претоварвания с 20 или 40%, то от това би следвало, че рамата на талигата ще бъде значително преоразмерена, тъй като в нея не би настъпил процесът умора на материала при тези по-високи стойности.

Посочените по-горе различия дават основание да се предложи уточнена методика за теоретично изследване на умората на материала.

2.2 Методика за оценка на напреженията при режимите за изследване на умора по статичен път при железопътни талиги за товарни вагони

В дисертационен труд на С. Славчев [53] е представена методика за якостната оценка на коша на товарни вагони по статичен път. Тя е базирана на немския стандарт DVS 1612 [47]. В настоящата част на дисертацията е предложена модификация на посочената методика за якостна оценка от [53], с която е възможно прилагането на различни методи за оценка на вероятността от възникване умора на материала и е приложима за изследване на железопътни талиги за товарни вагони.

2.2.1 Същност на метода за оценка на якостта по критерия допустими напрежения [53]

Оценката на якостта на вагонните конструкции се прави по критерия допустими напрежения, свеждащ се до сравняване на стойностите на напреженията σ_c получени при теоретично изследване или при изпитване с допустимите напрежения σ_{lim} , получени като отношение между граничните напрежения за даден материал и съответния коефициент на сигурност. Изследваното изделие има достатъчна експлоатационна якост при условие, че е изпълнено неравенството (2.22).

$$\sigma_c \le \sigma_{lim} \tag{2.22}$$

2.2.2 Методика за оценка на напреженията при изследване на умората на материала [53]

- 1) Определят се режимите на натоварване.
- 2) Анализира се конструктивната документация на вагона с цел да се определят носещите елементи.
- 3) Конструкционните елементи се класифицират в "n" групи според вида на материала, от който са изработени.
- 4) Определят се материалните характеристики Rp и Rm за всички видове използвани материали, според европейските или национални стандарти.
- 5) Определят се "m" на брой групи в зависимост от конструктивните особености на разглеждания възел (вид на заваръчния шев и степента на концентрация на напрежение).
- 6) Разработва се симулационен модел за якостно-деформационен анализ. При моделирането задължително се обособяват зоните на заваръчните шевове и концентраторите на напрежения. Това позволява да се извърши пълна и обективна оценка на якостта в цялата конструкция по критерия допустими стойности.
- 7) Извършват се проверочните изчисления.
- 8) Получените резултати за напреженията се извеждат в табличен вид. Те се селектират в общия случай в *m*х*n* на брой бази от данни, получени в зависимост от:
 - конструктивни особености получават се *m* на брой бази от данни;
 - видовете използвани материали получават се *n* на брой бази от данни.
- 9) Избира се стандарт и метод, по който да се извърши оценка.

- 10) За всяка от базите данни се определя коефициентът на асиметрия на цикъла по формула (1.2) или средните напрежения по формула (1.4) в зависимост от избрания подход.
- За всяка от базите от данни се задава допустимото напрежение (1.1) в зависимост от коефициента на асиметрия (1.2) или средните напрежения по формула (2.23) в зависимост от избрания подход;

$$\sigma_{lim} = \sigma_m \tag{2.23}$$

12) Пресмята се коефициентът на сигурност S в съответствие с равенство (2.24) за всички получени напрежения:

$$S = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_c} \tag{2.24}$$

13) Критерият за оценка се дава с условието (2.25)

$$S = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_c} \ge 1,0 \tag{2.25}$$

В случай, че коефициентът на сигурност е по-малък от единица, то изследваната зона е с недостатъчна якост.

Като недостатък на методиката може да се посочи, че оценката на вероятността от възникване на умора в заваръчните шевове се прави за максимален брой цикли за всеки режим. В процес на експлоатация циклите са разнообразни като се различават по честота, амплитуда, зависеща от стойността на силите и др. Това може да доведе до преоразмеряване на железопътната талига. За отстраняването на този недостатък в т.2.3 е разработена методика, която доближава теоретичното изследване до експерименталното и може да бъде използвана в случай, че коефициентът на сигурност от условие (2.25) не отговаря на изискванията.

2.2.3 Избор на методика

Изложената методика в т.2.2.2 може да бъде използвана за прилагането на различни методи за изследването на явлението умора на материала. За тази цел е необходимо да бъде допълнена или изменена така, че информацията от симулационните модели да бъде обработена по подходящ за прилагането на съответния метод начин.

2.2.3.1 Методика за оценка на напреженията при изследване на умората на материала за немския стандарт DVS 1612 за сложни машиностроителни изделия

За избягване на повторенията първите 7 точки от методиката, представена в т.2.2.2, остават непроменени, като методиката се допълва или изменя с представените по-долу точки.

8) За всеки възел се определя по теоретичен път тензора на напрежение σ_{ij}

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$
(2.26)

9) Сортиране в бази данни по тип на заваръчен шев.

- 10) Сортиране в бази данни по материални характеристики.
- 11) Определяне на най-малкото сечение на заваръчния шев и изчисление на ъгъла на равнината.
- 12) Проектиране на тензора на напрежение **о***ij* в равнината на застрашеното сечение, фигура 2.6.



Фигура 2.6 Компоненти на напреженията в застрашеното сечение [110, 134, 135].

Фигура 2.7 Ориентиране на тензора на напрежение спрямо три съседни възела.

- 13) Завъртане на тензора на напрежение *оіј* следвайки кривата на заваръчния шев, фигура 2.7.
- 14) За всяка от базите данни се определя коефициентът на асиметрия на цикъла по формула (1.2):

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{1.2}$$

15) Пресмятане на критериите, три по компоненти и един комплексен, формули (2.17) - (2.20):

2.2.3.2 Оценка по DVS с диаграмите на MKJ

- 8) За всеки възел се определят по теоретичен път главните напрежение $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)_{ij}$.
- 9) Сортиране в бази данни по тип (основен материал и заваръчен шев).
- 10) Сортиране в бази данни по материални характеристики.
- 11) За всеки възел от изследваните шевове се избира най-голямото главно напрежение (*σ_{max}*). Всички нормални напрежения от тензорите на напрежения (*σ_x*, *σ_y*, *σ_z* от (2.26)) се проектират по посока на полученото най-голямо главно напрежение. Най-малката стойност от проекциите на нормалните напрежения се приема за минимална стойност за цикъла (*σ_{min}*) [136, 137].
- 12) Определят се допустимите напрежения *оlim*, които зависят от:
 - а. характеристиките на конкретните използвани материали и по-конкретно: R_p *граница на провлачване;* R_m *якост на опън;*
 - b. зоната, в която се намира изчисленото или измерено напрежение;
 - с. метода за оценка:
 - с помощта на МКЈ-диаграми (1.1)
 - $\sigma_{lim} = f(R_{\sigma})$

с помощта на Гудман-Смит-диаграми

$$\sigma_{lim} = f(\sigma_m) \tag{2.27}$$

(1.1)

13) Пресмятат се коефициентите на сигурност S в съответствие с равенство (2.24) за всички получени напрежения:Критерият за оценка се дава с условието (2.25).

2.2.3.3 Оценка с правилото на Майнър (метод за натрупване на умората)

- 8) За всеки възел се определя по теоретичен път главните напрежение $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)_{ij}$
- 9) Сортиране в бази данни по тип (основен материал и заваръчен шев)
- 10) Сортиране в бази данни по материални характеристики
- 11) За всеки от изследваните шевове се избира най-голямото главно напрежение (σ_{max}). всички нормални напрежения от тензорите на напрежения (σ_x, σ_y, σ_z от (2.26)) се проектират по посока на полученото най-голямото главно напрежение. Най-малката стойност от проекцията на нормалните напрежения се приема за минимална стойност за цикъла (σ_{min}).
- 12) Определят се равномерно разпределен брой цикли на различните режими на натоварване от таблица 2.2. Максималният брой цикли трябва да съответства с процедурата за натурно изследване на конструкцията.

- 13) Определят се максималният брой цикли за съответния случай от кривите на умора съгласно Eurocode 3 part 1-9 [110].
- 14) Изчислява се показателят D (натрупана умора) и се оценява по формула (1.10)

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \le 1$$
(1.10)

2.3 Методика за оценка на напреженията при режимите за изследване на умора по статичен път при железопътни талиги

Теоретичната оценката на заваръчните шевове на конструкцията се извършва в следната последователност:

• Разработва се симулационен модел за якостно-деформационен анализ. В случай, че процедурата, определена от нотифициращия орган, предвижда въвеждане в експлоатация без извършване на изпитания, моделът следва да се доближава максимално до верифицирана версия за изследване на сходен обект по критериите: тип на крайните елементи, минимални и максимални размери на крайните елементи, брой на елементите, метод за въвеждане на граничните условия и други.

• Извършват се симулации при използване на всички 19 регламентирани режими на натоварване в съответствие с таблица 2.2

• Избира се метод за изследване на умората на материала – МКЈ диаграми, диаграми на Гудман-Смит, метод на ERRI или друг, допустим според европейските или национални стандарти.

• Извършва се оценка относно умората на материала в съответствие с методиката на избрания метод.

• В случай, че всички възли/елементи изпълняват критериите за липса на умора на материала, изчисленията се преустановяват и изследователят дава предложение за насочване на рамата на талигата за изпитване или за въвеждане в експлоатация без извършване на изпитания.

• В случай, че малък брой възли/елементи не изпълняват критериите за липса на умора на материала, симулацията се повтаря при използване на първите 15 регламентирани режими на натоварване в съответствие с таблица 2.2. Основание за това дава Annex G на EN 13749:2011 [3].

• Извършва се повторна оценка относно умората на материала в съответствие с методиката на избрания метод.

• В случай, че всички възли/елементи изпълняват критериите за липса на умора на материала, изчисленията се преустановяват и изследователят дава предложение за насочване на рамата на талигата за изпитване или за въвеждане в експлоатация без извършване на изпитания.

• В случай, че малък брой възли/елементи не изпълняват критериите за липса на умора на материала, симулацията се повтаря при използване на първите 15 регламентирани режими на натоварване в съответствие с таблица 2.2, при хипотезата, че напречната сила се изменя от Fy=0-Fyd. Основание за това дава направеният по-горе анализ на нормативните документи.

• Извършва се трета поред оценка относно умората на материала в съответствие с методиката на избрания метод.

• В случай, че всички възли/елементи изпълняват критериите за липса на умора на материала, изчисленията се преустановяват и изследователят дава предложение за насочване на талигата за изпитване или за въвеждане в експлоатация без извършване на изпитания.

• В случай, че все още съществува малък брой възли/елементи, които не изпълняват критериите за липса на умора на материала, изследователят дава заключение за предприемане на конструктивни изменения или предложение за насочване на рамата на талигата за изпитване. Предложената методика е илюстрирана на фигура 2.8.



Фигура 2.8 Методика за оценка на напреженията при режимите за изследване на умора по статичен път при железопътни талиги

2.4 Разработване на софтуер за изследване на умора в заваръчните шевове

Изчислителните модели разработени с МКЕ са обемисти от гледна точка на данни, с които се описва деформационното състояние на изследвания обект. Изследваните обекти в сферата на железопътния транспорт се характеризират с големи геометрични размери. Вследствие на това, изчислителните модели се описват с голямо количество КЕ (от 400 000 до 1 400 000). Обработката на тази информация с конвенционални средства би отнела много време и е предпоставка за допускане на субективни грешки без разработването на софтуер.



За целта е разработен софтуер за обработка на база данни и за оценка за възникване на явлението умора на материала. Програмата разполага с различни методи, като може да извършва оценка според изискванията на DVS 1612 и ERRI R12 b12/60 [47, 10, 112]. В допълнение е добавен и количествен метод за оценка на заваръчния шев, който използва правилото на Майнър. Интерфейсът е представен на фигура 2.9. Крайният резултат от

програмата е цифрова информация на съответния критерий в "*.CSV" файлов формат, позволяващ оценка според допустимите му стойности. Проверките се извършват за всеки изследван контур на заваръчен шев, въведен в програмата, фигура 2.10.

При приложението на методиките са налице проблеми, свързани с обработката на информация, която касае: необходимост за обработка на голямо количество бази от данни, проектиране на тензора на напрежение по направление на заваръчния шев, определяне на допустимите напрежения, изчисляване на коефициента на сигурност.

Софтуерът се състои от главна програма и няколко подпрограми, в които са заложени различните методики. При избора на метод се зарежда някоя от подпрограмите, представени по-долу.

Подпрограма 1 – Методика за оценка на напреженията при изследване на умората на материала за немския стандарт DVS 1612 касаещ сложни машиностроителни изделия Подпрограма 2 – Оценка по DVS с диаграмите на MKJ и диаграмата на Гудман-Смит Подпрограма 3 – Оценка с правилото на Майнър метод за натрупване на умората Алгоритъм на разработената програма е представен на фигура 2.11.

2.5 Методика за изследване на железопътни талиги за товарни вагони

За да е ясна и точна последователността на изследване на железопътни талиги за товарни вагони, базирайки се на извършените анализи и направените предложения, могат да бъдат обобщени в следната методиката:

- 1) Прави се анализ на конструкцията. Целта е да се определят специфичните особености спрямо други конструкции.
- 2) Извършва се анализ на нормативната база и се определят режимите на натоварване. Те се съгласуват с възложителя и трябва да отговарят на Техническите изисквания и нормативната уредба.
- 3) Рзаработва се симулационен модел за якостно-деформационен анализ.
- 4) Ако е възможно, се извършва верификация на изчислителния модел с друг такъв или, ако е налична информация от проведени реални тестове на сходна конструкция.
- 5) Избира се метод, по който конструкцията да бъде оценена срещу вероятността от възникване на явлението умора на материала. Може да се използва една от методиките, предложени в 2.2.3.
- 6) При наличие на зони с недостатъчна динамична якост от предходната точка се прилага методиката от т. 2.3
- 7) При невъзможност на изпълнение на точка 5) верификацията се извършва след завършване на изпитанията на прототипа.

ГЛАВА 3. РАЗРАРАБОТВАНЕ НА ИЗЧИСЛИТЕЛНИ МОДЕЛИ

3.1 Основни елементи от разработката на изчислителните модели

Разработването на симулационни модели изисква особено внимание, защото от прецизността му зависи адекватността на резултатите, които се анализират. СМ се разработва в следната последователност [139]:

а. Анализ на принципите и условията на работа на конструкцията и изграждане на геометрията на обекта;

b. Определяне на граничните условия:

- Ограничения на преместванията;
- Обемни и повърхнинни товари.

с. Изследване на сходимостта на решението и избор на целесъобразна мрежа от крайни елементи;

d. Въвеждане на материални характеристики.

С цел опростяване на CM са премахнати елементи от като: заземителните планки, конзолите за осигурителните елементи и колоосите, които нямат отношение към якостта на рамата. При геометричното моделиране на обекта се извършват и опростявания, които няма

да доведат до изменение на крайния резултат. Най-съществените от тях са в зоните на странчните опори и челюстите на талигата, фигура 3.1 - фигура 3.4.



Останалите елементи от конструкцията са моделирани с голяма точност в съответствие с работната документация.

Ограниченията на преместванията са моделирани съгласно фигура 2.3. Те не са константни за цялото изследване.

Граничните условия кореспондират напълно с фигура 2.3. Усукването на рамата се моделира чрез преместване на буксата във вертикална посока. Параметрите на еластичните елементи съответстват на техническата документация. Външните и вътрешните товари са определени съгласно представеното в т. 2.1.1 и обобщено в таблица 2.1 и таблица 2.2. Външните натоварвания, се разделят на хоризонтални, вертикални. Като вертикални сили могат да се посочат силите, действащи в централния лагер (лилав цвят), страничната опора (червен цвят) и тези в конзолите на калодкодържателите (син цвят), представени на фигура 3.6.

Напречните сили се появяват при режимите, които пресъздават вписване в крив участък от пътя. Кошът на вагона натоварва централния лагер в напречна посока вследствие на възникналите инерционни сили. Те са представени на фигура 3.7.



Фигура 3.6 Сили, действащи по направление Z



Фигура 3.7 Сили, действащи по направление Ү

По време на изследването ограниченията на преместванията трябва да се съобразят с посоката на кривата и да бъдат променяни строго индивидуално за различните режими, представени в таблица 2.1 и таблица 2.2.

Силите, действащи в надлъжно направление са въведени в две зони на изчислителния модел: централния лагер (лилав цвят) и в челюстта на талигата (жълт цвят) фигура 3.8.





Фигура 3.8 Сили, действащи по направление Х

Фигура 3.9 Верифициран симулационен модел

Така представеният симулационен модел, дава много добри резултати при якостнодеформационния анализ на талигата. Доказателство за това е съпоставката с други изследвания, при които разпределението на напреженията е идентично. За да се докаже адекватността на модела е направена верификация с реални изпитвания на същото съоръжение. При итерационния процес на изграждане на изчислителния модел и неговата верификация са констатирани множество неточности при създаването на модела в някои от режимите на натоварване. Неточностите се наблюдават при режимите с напречна сила. Основна причина за разликата е изключването на колооста от изследването. При наличието й в системата тя предизвиква допълнително вкоравяване на талигата и огъване в надлъжните греди. Други несъответствия са отчетени в измервателните точки, намиращи се в непосредствена близост до заваръчните шевове на челюстите на талигата. Причината за това е премахването на чашите от ресорното окачване. Тези разлики дават предпоставка за модифицирането на изчислителния модел, с цел - получаване на по-точни резултати. Общ вид на модифицирания модел е представен на фигура 3.9.

След въведените изменения е направено пълно изследване на якостнодеформационното състояние на обекта. Направен е сравнителен анализ на резултатите за напреженията, получени по теоретичен и опитен (лабораторен) път (вж. т.4.1).

3.2 Особености при изграждане на изчислителни модели с обемни елементи

3.2.2 Разработване на изчислителни модели с елементи тип тетраедър Solidworks

При дискретизацията на СМ е изследвана сходимостта на решението [115, 140]. Оптималните параметри на мрежата в изчислителния модел са: максимален размер на елемента 15 mm, минимален размер на елемента 5 mm, брой възли 1624300, брой елементи 999900. Използвани са крайни елементи тип тетраедър с междинен възел на всеки ръб, с цел получаване на по-точно решение. Така броят на възлите в един елемент са 10, а степените на свобода са 27. Общ вид на дискретизирания модел изграден в средата на Solidwork е представен на фигура 3.12.



Фигура 3.12 CM разработен на Solidworks и елементи тетраедър

3.2.3 Разработване на изчислителни модели с елементи тип тетраедър Ansys

При съпоставянето на различни видове СМ е целесъобразно резултатите да бъдат получени при възможно най-малки разлики в тях. СМ не могат да бъдат напълно идентични, тъй като всеки софтуер разполага с специфичен набор от крайни елементи и връзки. За да

се сведат различията до минимум са използвани следните подходи: една и съща геометрия (разработена със софтуер на 3DS company (Solidworks)), еднаква размерност на елементите, едни и същи методи за генериране на мрежа и са въведени материали с еднакви характеристики. Изчислителният модел е изграден от 1394750 възела и 830217 крайни елемента, а основните параметри на елемента кореспондира с верифицирания симулационен модел. Граничните условия са близки до тези в модела описан в точка 3.1. Въведените изменения в геометрията засягат спомагателните детайли, които съответстват на реалното поведение на конструкцията. С помощта на тези изменения е възможно моделирането на концентрични връзки, които да ограничават транслационното преместване на еластичния елемент от ресорното окачване в надлъжно и напречно направление. Концентричната връзка между буксовото тяло и челюстта е представена на фигура 3.13 в жълт цвят.



Фигура 3.13 Моделиране на тангенциална коравина в Фигура 3.14 СМ разработен на ANSYS и елементи еластичния елемент тетраедър

На фигура 3.14 е представена дискретизацията на рамата с помощта на Ansys и обемни крайни елементи с форма тетраедър.

При моделирането на буксите са използвани връзки body-body. Особеност на изчислителния модел е, че в зоната на ресорното окачване са заложени еластични елементи. Характеристиките на пружините съответстват на тези от работната документация. Останалите ограничения са въведени съгласно представеното в т 3.1.

3.2.4 Разработване на изчислителни модели с елементи тип хексаедър Ansys

В разработения симулационен модел при използване на хексаедри са въведени гранични условия напълно аналогични на тези, използвани при модела съставен от тетраедри. За да е възможно генерирането на мрежа от крайни елементи, е необходимо геометрията да се опрости. Параметрите на изчислителния модел са: минимална големина на елемента 5 mm, максимална големина на елемента 15 mm, брой елементи 209258 и 209762 броя възли. Общ изглед на изчислителния модел е представен на фигура 3.15.



Фигура 3.15 CM разработен на ANSYS и елементи хексаедри

Поведението на новосъздадения СМ се проверява чрез сравнителния анализ, представен в табличен вид в т. 4.2.1. Анализът на данните показва наличието на локални отклонения на новосъздадените модели. В Solidworks при моделирането на еластичен

елемент се задава аксиална и тангенциална коравина, което съответства коректно на реалната конструкция. При Ansys при генерирането на еластичен елемент се задава единствено аксиална коравина, което е отклонение от конструктивната документация. За целта е използвана връзка с 1 степен на свобода, позволяваща транслация по ос Z на еластичния елемент. Използваната връзка променя воденето на буксата като от челюстно то се моделира като шпинтонно водене. При режими S6 и S7 е констатирана най-съществена разлика, която е вследствие на моделираната връзка. На фигура 3.16 е представено разпределението на напреженията при режим S6 на верифицирания симулационен модел, а на фигура 3.17 – тези при модела изграден от хексаедри.



Фигура 3.16 режим S6 Solidworks



В оградената в червено зона на фигура 3.17 се констатира локалното вкоравяване, породено от неточното моделирането на еластичната връзка. Разпределението на напреженията в останалите зони има сходен характер. Доказателство за това са резултатите обобщени в таблица 4.10.

За да се подобри поведението на изчислителния модел с цел по-голямо приближение до верифицирания новопредложеният модел е усложнен, с добавяне на допълнителни еластични елемент. На фигура 3.18 и фигура 3.19 е представена хлабината между буксата и челюстта в надлъжна и напречна посока.



фигура 3.18 Буксова степен



фигура 3.19 Буксова степен

Направеният анализ на техническата документация дава предпоставка да се добавят еластични елементи във всяка букса от изчислителния модел. Елементите, работещи на натиск са 6 броя, представени с червен цвят на фигура 3.20.



Фигура 3.20 Еластични елементи в буксовия възел.



Фигура 3.21 Характеристика на елемент СОМВІΝЕ 39

Използвани са линейни елементи за връзката от типа COMBINE39 [141]. Всеки елемент работи само на натиск, като са въведени специфични характеристиики на елементите, фигура 3.21.

Анализът на данните от фигура 3.21 показва, че елементът притежава билинейна х-ка. Първата част от нея съответства на реалната напречна коравина на пружината от работната документация. След изчерпване на хлабината от 13 mm, коравината се увеличава значително, клоняща към безкрайност. По този начин поведението на този възел се моделира изключително коректно.

3.3 Особености при изчислителни модели с елементи тип черупки

3.3.1 Разработване на изчислителни модели от повърхнини и елементи с триъгълна форма Solidworks

Основен проблем при разработване на този симулационен модел е моделирането на обемни детайли със сложна форма. Същото е констатирано и в [53], където е описан проблем с моделирането на буферите. Прави впечатление, че авторът се е придържал само към използването на повърхнини елементи и не се е възползвал от линейните елементи (гредови), които са много удобни при наличието на стандартизирани профили. Трябва да се отбележи, че констатираните проблеми при използването на черупки са изключително актуални и с пълна сила важат при изграждането на СМ с повърхнини елементи. Като допълнение могат да се посочат проблемите, касаещи моделирането на отливки с повърхнини елементи. На фигура 3.22 е представен буксовият възел, моделиран с повърхнини.

Подходите при моделирането на този възел с повърхнини са два. Първият е моделиране на буксата като едно тяло, заедно със страничната греда, като за целта маркираната черупка в тъмно син цвят сумира дебелините на долния лист на страничната греда и основата на челюстта. Вторият подход е да бъде моделирана отделно. При него основният проблем е връзката между елементите, симулираща съвместната им работа. Независимо от усилията на автора да пресъздаде геометрията на обекта с повърхнини, в буксовия възел се получават нереално високи стойности на напреженията, които не съответстват на многогодишната експлоатационна практика. Аналогично е и поведението на централния лагер, който е представен на фигура 3.23.

Изложеното по-горе е основната причина да се потърси друг вариант за изграждането на ИМ, а именно разработване на хибриден модел. В него са използвани повърхнини само за моделирането на рамата на талигата. За всички останали компоненти от СМ са използвани солиди.

Граничните условия в изчислителния модел са съставени на база итерационния процес извършен в т.3.2. Окончателният вид на модела е представен на фигура 3.24, а дискретизацията – на фигура 3.25.







Фигура 3.23 Централен лагер изграден с повърхнини

На фигурата е илюстрирано и обозначението на ориентацията на крайните елементи тип черупката. В Solidworks долната повърхност на повърхнините елементи е оцветена в оранжев цвят.



Фигура 3.24 Хибриден симулационен модел.

Фигура 3.25 Хибриден симулационен модел, paзpaбoтен на Solidworks.

Така представеата мрежа притежава следните параметри: максимален размер на елемента 15 mm, минимален размер на елемента 5 mm, брой на елементите 714464, брой възли 1147533. За по-голяма точност тук е използван 6 възлов елемент с междинен възел между върховете на триъгълната черупка. Впечатление прави, че броят на елементите е висок. Това се дължи на обемните елементи, моделиращи масивните детайли. За дискретизацията на обемните елементи са използвани тетраедри.

3.3.2 Разработване на изчислителни модели от черупкови елементи с триъгълна форма Ansys

С цел да се решат редица проблеми, възникнали при създаването на СМ в работното пространство на ANSYS, е използван симулационният модел, разработен в средата на програмната систма Solidworks. По този начин се гарантира, че пълно геометрично съответствие между модела представен в т. 3.3.1 и този, използван в средата на ANSYS с черупкови елементи. Въведени са незначителни изменения, отнасящи се до обединяването на някои черупки, специфични за софтуера Solidworks. За целта е използван допълнителен модул на ANSYS, а именно SpaceClaim. Ограниченията на преместванията не се различават от представените в т. 3.1 - т. 3.3.1. Като разлика се явява само използваните елементи за дискретизацията на геометрията. Моделът и тук е хибриден, като са използвани обемни крайни елементи от вида "тетраедър" при моделирането на буксите, челюстите, централния лагер и плъзгалките. Останалата част от модела е представена с двумерни триъгълни шествъзлови крайни елементи. За да се получи връзка между различните типове елементи, е използвана функцията node connecting. Основните параметри на изчислителния модел са следните: максимален размер на елемента 15 mm, минимален размер на елемента 5 mm, брой на елементите 714464, брой възли 1147533.

3.3.3 Разработване на изчислителни модели от черупкови елементи с четириъгълна форма Ansys

Геометрията на СМ изграден с четириъгълни елементи е абсолютно същата като представената в т.3.3.2. Разлика има в начина, по който са обединени възлите на елементите. Използван е методът Share topology.

Основните параметри на изчислителния модел са следните: максимален размер на елемента 15 mm, минимален размер на елемента 5 mm, брой на елементите 714464, брой възли 1147533.

ГЛАВА 4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА РАЗРАБОТЕНИТЕ ИЗЧИСЛИТЕЛНИ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ

4.1 Верификация на изчислителните модели

Изчислителните модели са верифицирани с помощта на предоставени данни от натурно изпитване от производителя на талигата ТРАНСВАГОН АД. Реалният тест е проведен в чешката лаборатория VUZ Plc. Изследването е направено през 2018 г., а резултатът е положителен - талигата преминава успешно изпитването без появата на пукнатини [129]. Следва да се подчертае, че авторът на настоящата работа не предявява претенции към проведените реални тестове. От предоставения доклад са използвани измерените данни по време на изпитването и са съпоставени с тези от изчислителния модел.

Верификацията е извършена със статичните режими на натоварване, които кореспондират с тези от таблица 2.1, спазвайки следната методика:

• Прави се анализ на резултатите за напреженията от изпитването. Целта е да се изключат данните, в които има ниски стойности, получени при опитните изследвания. Важно е да се анализира поведението на възприемателите при всички режими, тъй като някои тензометрични схеми може да се деформират само при определен режим.

• Определят се местоположенията на тензометричните възприематели в изчислителния модел.

• Определя се направлението на измерваното нормално напрежение в зависимост от разположението на тензометричните възприематели.

• Използвайки теоретично получените резултати се създава база данни за всички изследвани режими, съдържаща информация за главните напрежения от елементите

• Извършва се съпоставка на резултатите.

4.1.1 Верификация на симулационен модел изграден от тетраедри в средата на Solidworks

При верификацията са изключени точките за контрол, поставени в стандартизираните елементи (челюстите), тъй като те не са обект на изследване. Проверена е симетрията на тензометричните възприематели с цел да се намери възможен компрометиран сензор.

Резултатите от сравнителния анализ са представени в таблица 4.3, където са използвани следните означения:

- *DMS/Element* - номер на тензометричния възприемател/номерът на съответстващия му елемент в изчислителния модел в MPa;

- σ_x , σ_y , и σ_z са компонентите на тезора на напреженията, формула (2.26);
- von Mises еквивалентни напрежения определени по формула (4.1);

$$\sigma_{\nu M} = \sqrt{\frac{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_x\right)^2 + 6\left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right)}{2}}$$
(4.1)

- S1-S13 – пореден номер на режима на натоварване.

								T	аблица	4.3 Be	рифика	ция на м	иодела
DMS/Element	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
T111/995862	-85	-47	-51	-70	-75	-63	-64	-65	-58	-39	-36	-52	-57
σ_{x}	-100.4	-59.2	-64.3	-83.5	-88.2	-83.9	-57.4	-76.2	-64.7	-58.4	-58.7	-48	-51.3
T112/996492	-119	-68	-65	-126	-119	-51	-138	-88	-96	-56	-56	-70	-69
σ_x	-124.9	-63.4	-57.9	-121.5	-114.7	-36.6	-152.4	-89.5	-97.5	-53.4	-52.5	-64.7	-67.4
T213/997792	-76	-39	-24	-70	-58	-159	20	-159	31	-36	-29	-47	-60
σ_{x}	-76.7	-58.7	-37.6	-78.2	-57.1	-140.2	17.1	-100.5	-11.6	-26.4	-40.9	-32.6	-53.7
T214/981463	-85	-76	-56	-91	-76	107	-209	55	-180	-49	-51	-41	-53
σ_x	-53.6	-33.7	-9	-64.5	-39.3	37.1	-153.1	-35.6	-88.6	-48.8	-8.6	-30.1	-33.3

Анализът на данните от таблица 4.3 показва, че е налице много добро съвпадение на резултатите. Разликите в стойностите за напреженията могат да се обяснят с опростяванията, приети при моделирането; начина на залепване и разполагане на датчиците; грешките при въвеждане на натоварванията; грешките на измерителната апаратура; технологичните неточности при изработване на носещата конструкция; технологичните отклонения на материала; наличието на сериозни концентратори на напреженията и други.



Фигура 4.2 Резултати за напреженията в зоните на тензометрични възприематели Т111, Т112, Т213, Т214, T232, T237

В точки 4.1.2 - 4.1.5 е представена извадка от верификацията на разработените изчислителни модели обобщена в извадки (таблици 4.6 – 4.9), подктепени с доказателствен материал показан на фигури 4.5 – 4.8. Пълна информация е представена в приложението, неразделна част от дисертационният труд.

4.1.2	Верификация на симулационен модел изграден с помощта на ANSYS и обемни
елеме	ити тетраедри

Гаоли	ца 4.0 С	равнен	ние на ре	езултати	ге от изч	ислителі	ния моде	л, предс	гавен в т	. 3.2.3 И	натурно	ото изсл	едване.
DMS/Element	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
T111/993481	-85	-47	-51	-70	-75	-63	-64	-65	-58	-39	-36	-52	-57
σ _x	-95.5	-52.3	-54.6	-91.3	-89.0	-185.8	42.5	-77.7	-65.1	-47.1	-47.5	-57.0	-56.5
T112/994385	-119	-68	-65	-126	-119	-51	-138	-88	-96	-56	-56	-70	-69
σ _x	-123.4	-66.1	-70.3	-117.3	-113.1	45.4	-229.0	-108.6	-75.4	-60.3	-62.0	-74.0	-72.8
T213/1006761	-76	-39	-24	-70	-58	-159	20	-159	31	-36	-29	-47	-60
$\sigma_{\rm x}$	-84.9	-25.4	-49.3	-75.0	-51.1	-87.9	-12.4	-66.1	-34.3	1.5	-66.2	-57.0	-20.6
T214/997651	-85	-76	-56	-91	-76	107	-209	55	-180	-49	-51	-41	-53
$\sigma_{\rm x}$	-72.8	-26.8	-41.8	-65.3	-50.3	12.3	-104.4	-86.0	-6.0	5.1	-64.3	-53.8	-17.3
T232/1385094	-84	-77	-56	-37	-48	58	-147	85	-194	-59	-17	-41	-50
σ _x	-68.4	-86.2	-145.6	-225.7	-166.3	-109.4	-202.7	-137.2	-174.8	-249.6	38.0	-61.7	-192
T237/1385060	76	44	37	77	68	28	78	41	67	55	15	37	45
$\sigma_{\rm x}$	92.8	52.2	86.5	134.8	100.4	60.3	126.7	80.2	106.5	155.4	-28.6	34.0	118.2

Таблина Л 6 Сравнение 2 2 2



Фигура 4.5 Резултати от тензометрични възприематели Т111, Т112, Т213, Т214, Т232, Т237

4.1.3 Верификация на симулационен модел изграден с помощта на ANSYS и обемни елементи хексаедри

Таблица 4.7 Сравнение на резултатите от изчислителния модел, представен в т. 3.2.4 и натурното изследване.													
DMS/Element	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
T111/106829	-85	-47	-51	-70	-75	-63	-64	-65	-58	-39	-36	-52	-57
σ_x	-89.7	-51.8	-55.0	-80.4	-83.6	-77.4	-58.0	-67.2	-66.9	-44.6	-44.7	-53.5	-53.7
T112/106782	-119	-68	-65	-126	-119	-51	-138	-88	-96	-56	-56	-70	-69
σ_x	-118.3	-63.8	-63.5	-112.8	-112.6	-35.0	-141.4	-89.9	-87.2	-58.6	-59.3	-70.7	-71.1
T213/106385	-76	-39	-24	-70	-58	-159	20	-159	31	-36	-29	-47	-60
$\sigma_{\rm x}$	-63.6	-34.7	-32.0	-66.5	-63.8	-147.2	49.1	4.7	-101.8	-25.7	-38.9	-43.8	-40.1
T214/106230	-85	-76	-56	-91	-76	107	-209	55	-180	-49	-51	-41	-53
$\sigma_{\rm x}$	-68.4	-49.4	-36.9	-68.2	-55.7	79.0	-184.5	-114.2	8.8	-37.9	-31.9	-42.1	-38.7
T232/231349	-84	-77	-56	-37	-48	58	-147	85	-194	-59	-17	-41	-50
σ_x	-97.3	-94.4	-74.1	-151.2	-131.0	-60.5	-164.9	-116.5	-109.4	-111.5	-39.5	-76.1	-70.0
T237/231338	76	44	37	77	68	28	78	41	67	55	15	37	45
σ_{x}	80.9	50.5	40.8	83.6	73.9	42.4	81.9	59.5	64.7	57.6	25.5	43.6	40.4



Фигура 4.6 Резултати от тензометрични възприематели Т111, Т112, Т213, Т214, Т232, Т237

4.1.4 Верификация на симулационен модел изграден с помощта на ANSYS и черупкови двумерни триъгълни елементи.

Таблица 4.8 Сравнение на резултатите от изчислителния модел, представен в т. 3.3.2 и натурното изследване.													
DMS/Element	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
T111/62119 top	-85	-47	-51	-70	-75	-63	-64	-65	-58	-39	-36	-52	-57
σ _x	-85	-53.5	-53.0	-88.7	-88.2	-77.6	-64.0	-69.6	-70.7	-46.7	-45.9	-55.5	-55.2
T112/61909 top	-119	-68	-65	-126	-119	-51	-138	-88	-96	-56	-56	-70	-69
σ _x	-119.8	-70.0	-68.5	-117.8	-116.3	-40.0	-146.4	-96.1	-91.2	-61.8	-61.9	-74.4	-74.1
T213/61918 top	-76	-39	-24	-70	-58	-159	20	-159	31	-36	-29	-47	-60
σ _x	-68.9	-46.8	-47.0	-78.8	-79.1	-164.5	39.0	-13.0	-112.2	-33.6	-46.6	-53.5	-49.1
T214/62098 top	-70.1	-76	-56	-91	-76	107	-209	55	-180	-49	-51	-41	-53
σ _x	-65.4	-54.6	-37.3	-82.4	-65.1	81.7	-201.8	-121.5	1.1	-40.0	-37.1	-47.2	-44.0
T232/68514 bottom	-84	-77	-56	-37	-48	58	-147	85	-194	-59	-17	-41	-50
$\sigma_{\rm x}$	-112.0	-12.6	-7.8	-20.1	-15.4	14.0	-42.0	-26.5	-1.3	-13.5	-4.9	-9.5	-8.3
T237/68520 top	76	44	37	77	68	28	78	41	67	55	15	37	45
σχ	80.2	14.6	9.9	24.2	19.5	-16.9	51.1	33.3	0.8	16.0	6.8	11.7	11.2



Фигура 4.7 Резултати от тензометрични възприематели Т111, Т112, Т213, Т214, Т232, Т237

4.1.5 Верификация на симулационен модел изграден с помощта на ANSYS и повърхнини квадратни елементи.

Таблиц	Таблица 4.9 Сравнение на резултатите от изчислителния модел, представен в т. 3.3.3 и натурното изследване.												
DMS/Element	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
T111/29685 top	-85	-47	-51	-70	-75	-63	-64	-65	-58	-39	-36	-52	-57
σ _x	-86.5	-54.9	-55.7	-88.0	-88.8	-80.2	-63.4	-70.6	-71.8	-47.2	-46.8	-56.4	-56.5
T112/29797 top	-119	-68	-65	-126	-119	-51	-138	-88	-96	-56	-56	-70	-69
$\sigma_{\rm x}$	-119.2	-68.8	-67.1	-118.4	-116.7	-38.4	-147.1	-95.0	-91.3	-61.5	-61.5	-73.9	-73.8
T213/30019 top	-76	-39	-24	-70	-58	-159	20	-159	31	-36	-29	-47	-60
σ _x	-65.5	-45.9	-43.3	-81.8	-79.3	-154.5	29.7	-15.1	-109.2	-33.9	-45.8	-51.8	-43.8

Продължение на таблица 4.9

										родын		100 100001	шца>
T214/30173 top	-85	-76	-56	-91	-76	107	-209	55	-180	-49	-51	-41	-53
σ _x	-67.9	-55.2	-40.9	-79.0	-64.7	70.6	-190.8	-117.8	-2.9	-39.5	-37.8	-46.7	-46.0
T232/33812 bottom	-84	-77	-56	-37	-48	58	-147	85	-194	-59	-17	-41	-50
σ _x	-99.0	-18.8	-17.1	-29.7	-28.0	-28.1	-18.7	-15.6	-31.4	-22.9	-8.8	-15.9	-22.3
T237/33814 top	76	44	37	77	68	28	78	41	67	55	15	37	45
σ _x	71.0	5.8	3.5	9.2	6.9	-24.4	37.2	21.4	-8.7	5.4	2.9	4.4	5.6



Фигура 4.8 Резултати от тензометрични възприематели Т111, Т112, Т213, Т214, Т232, Т237

4.1.6 Заключение към т.4.1

Потвърдено е, че черупковите елементи отразяват по-добре поведението на конструкции, изработени от листов материал. Доказателство за това са данните от т.4.1.4 и т.4.1.5, където моделите изградени от черупкови елементи дават по-близки стойности до тези от натурното изпитване. В зоната на връзката между горния и долния пояс на централно-болтовата греда се наблюдава противоположна зависимост в полза на обемните крайни елементи. Причината може да се обясни с това, че трудно може да се определи горна и долна повърхност на черупката в тази зона.

4.2 Сравнителен анализ на модели изградени с различни програмни продукти

4.2.1 Сравнителен анализ на симулационните модели изградени със Solidwork и ANSYS при използване на обемни елемрнти

Настоящото изследване обхваща всички статични режими на натоварване. Резултатите са обобщени в таблица 4.10, където са представени данните от верифицирания модел и тези получени от изчислителните модели разработени в средата на ANSYS.

В съответствие с [143, 142] като критерий за оценка на резултатите са използвани допустимите напрежения, които трябва да отговарят на условието (2.25). В таблицата са използвани следните означения: Solidworks tet mesh – CM разработен с програмен продукт solidworks и елементи тетраедри; ANSYS tet mesh – CM разработен с програмен продукт ANSYS и елементи тетраедри; ANSYS hex mesh – CM разработен с програмен продукт ANSYS и елементи хексаедри; Si – пореден номер на режима на натоварване от таблица 2.1; S – коефициент на сигурност; σ_c – изчислени напрежения; σ_{lim} – допустими напрежения;

			1 40.	пица 4.10 101	archinalin	и напреж	спил в изчис	лителнит	с модели.
	Sol	idworks tet mesh	[MPa]	ANSYS	tet mesh []	MPa]	ANSYS	hex mesh [MPa]
	σ_c	σlim	S	σ_c	σ_{lim}	S	σ_c	σlim	S
S1	294.9	355	1.20	267.5	355	1.33	253.1	355	1.40
S2	261.5	323	1.24	316.9	323	1.02	312.3	323	1.03
S3	288.2	323	1.12	253.7	323	1.27	261.4	323	1.24
S4	295.4	323	1.09	274.4	323	1.18	257.7	323	1.25
S5	318.5	355	1.11	322.2	323	1.00	335.2	323	0.96
S6	316.6	355	1.12	293	323	1.10	329.4	323	0.98
S7	316	355	1.12	308.1	323	1.05	334.7	323	0.97
S8	314.4	355	1.13	241	323	1.34	237.3	323	1.36
S9	317.4	355	1.12	227.7	355	1.56	253.8	323	1.27
S10	214.3	323	1.51	270.9	355	1.31	188.8	323	1.71
S11	186.3	355	1.91	280.9	355	1.26	175.7	355	2.02
S12	225.6	355	1.57	214.8	355	1.65	185.8	355	1.91
S13	214.1	355	1.66	211.9	355	1.68	191.2	355	1.86

Таблица 4.10 Максимални напрежения в изчислителните модели.

Анализът на резултатите показва, че коефициентите на сигурност изпълняват условие (2.25). Изключение правят режими S5, S6, S7 при изчислителния модел, изграден от хексаедри. Максималните напрежения са в зона, намираща се в близост до заваръчен шев,

където допустимите напрежения са 323MPa. Това може да се обясни с неправилна пропорция в геометрията на на част от крайните елементи в посочената зона.

В част от режимите е налице изместване на зоните с максимални напрежения във конструкцията при използване на различни изчислителни модели. Такъв е например режим S1. Зоните с максимални напрежения при него са представени на фигура 4.10.



Фигура 4.10 Зони с максимални напрежения при режим S1.

Зоните представени на фигура 4.10 показват съществено несъответствие. За да бъде адекватно сравнението между различните изчислителни модели е целесъобразно, да се анализират местоположенията с максимални напрежения при верифицирания модел и се направи съпоставка с тези, изградени в средата на ANSYS. Резултатите от сравнението са представени в таблица 4.11.

	Solid	works tet me	esh		ANSYS tet	mesh			ANSYS he	(mesh	
	[MPa]	[MPa]	S	[MPa]	[MPa]	S	%	[MPa]	[MPa]	S	%
S1	294.9	355	1.20	218.89	355	1.62	25.77	185.47	355	1.91	37.11
S2	295.4	323	1.09	274.39	323	1.27	7.11	254.4	323	1.27	13.88
S3	318.5	323	1.01	322.23	323	1.00	1.16	335.14	323	0.96	4.97
S4	261.5	323	1.24	255.26	323	1.27	2.39	281.6	323	1.15	7.14
S5	288.2	355	1.23	253.7	355	1.40	11.97	261.4	355	1.36	9.30
S6	316	355	1.12	222	355	1.60	29.75	319.25	355	1.11	1.02
S7	316.6	355	1.12	238.3	355	1.49	24.73	313.5	355	1.13	0.98
S8	231.5	355	1.53	180.02	355	1.97	22.24	242.68	355	1.46	4.61
S9	238.6	355	1.49	240.98	355	1.47	0.99	169.39	355	2.10	29.01
S10	214.3	323	1.51	195.92	323	1.65	8.58	188.77	323	1.71	11.91
S11	186.3	355	1.91	249.34	355	1.42	25.28	175.67	355	2.02	5.71
S12	214.1	355	1.66	211.88	355	1.68	1.04	191.14	355	1.86	10.72
S13	225.6	355	1.57	214.76	355	1.65	4.80	185.8	355	1.91	17.64

Таблица 4.11 Сравнение на максималните напрежения по зони.

Анализът на данните от таблица 4.11 показва, че е налице голямо съвпадение на резултатите за напреженията получени чрез използваните изчислителни модели. Разликата не превишава 15%, като се има предвид, че при изчислителните модели изградени с ANSYS не е изследвана сходимостта на решението.

Задълбоченият анализ на получените резултати показва много добро съвпадение на разпределението на напреженията между различните изчислителни модели. При някои от режимите е налице сходство между зоните, в които се наблюдава концентрация на напрежение. Разпределението на напреженията в цялата рама е представено на фигура 4.11 и фигура 4.12.



Фигура 4.11 режим S9 Solidworks



Фигура 4.12 режим S9 ANSYS тетраедри

4.2.2 Сравнителен анализ на изчислителните модели изградени от черупкови елементи с програмни продукти ANSYS и Solidworks

Резултатите от изследванията с изчислителните модели от т.3.3.1 - 3.3.3 са представени в таблица 4.12. Сравняваните режими на натоварване са статичните. Стойностите на напреженията са дадени за горна и долна повърхност на черупковия елемент, а напреженията са по критерия von Mises. Изчислението на коефициента на сигурност S и определянето на допустимите напрежения е извършено с по-голямото от двете напрежения (горно/долно).

Анализът на резултатите показва добро съвпадение. При изчислителните модели, разработени с ANSYS е налице почти идентично поведение, независимо от разликата в използваните елементи за описване на геометрията. Наблюдават се отклонения за някои режими, но разликата е пренебрежимо малка. При сравнението на изчислителния модел, разработен с програмния продукт Solidworks и тези разработени на ANSYS се наблюдават по-ниски стоийности на напреженията в полза на Solidwork. Зоните с максимални напрежения съвпадат, с изключение на режимите S10-S13.

Таблица 4.12 Сравните.	лен анализ на изчислителн	ните модели изградени (от повърхнинни елементи
------------------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------

	S	Solidworks	triangle mesh			ANSYS tr	iangle mesh	ANSYS quad mesh					
	Горна	Долна	Допустими		Горна	Долна	Допустими	опустими		Долна	Допустими		
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	S	[MPa]	[MPa]	[MPa]	S	[MPa]	[MPa]	[MPa]	S	
S1	215.40	231.00	355	1.54	272.28	227.8	323	1.19	300.31	254.18	323	1.08	
S2	181.50	185.00	355	1.92	179.62	182	355	1.95	203.59	206.33	355	1.72	
S3	234.50	214.70	355	1.51	178.59	182.65	355	1.94	204.96	208.47	355	1.70	
S4	209.30	254.80	355	1.39	178.52	182.63	355	1.94	219.68	223.05	355	1.59	
S5	177.30	204.70	355	1.73	178.3	183.87	355	1.93	204.85	204.85	355	1.73	
S6	214.90	249.20	355	1.42	255.45	282.27	323	1.14	256.43	272.24	323	1.19	
S7	202.40	238.30	355	1.49	254.5	279.61	323	1.16	256.37	295.38	323	1.09	
S8	263.80	297.20	355	1.19	299.07	338.78	323	0.95	325.38	348.55	323	0.93	
S9	263.40	292.40	355	1.21	313.14	321.48	323	1.00	322.4	349.88	323	0.92	
S10	142.30	149.40	355	2.38	211.64	197.09	323	1.53	217.07	200.35	323	1.49	
S11	143.20	154.40	355	2.30	183.95	177.78	323	1.76	186.47	182.53	323	1.73	
S12	198.90	238.70	323	1.62	174.6	160.07	323	1.85	187.38	175.15	323	1.72	
S13	203.10	242.90	323	1.33	161.07	150.93	323	2.01	173.84	158.59	323	1.86	

4.2.3 Заключение към точка 4.2

При обстоен анализ на поведението на различните видове крайни елементи, използвани за изграждането на изчислителните модели от т. 3 и извършените верификации в т. 4.1 може да се направят следните изводи: при различните типове крайни елементи се наблюдават различни зони с концентрация на напрежение; при двумерните елементи са налице по-ниски стойности на напреженията при всички режими на натоварване; черупкови елементи показват по-добро съвпадение на изчислените стойности в сравнение с тези, измерени при реалния тест; в определени зони, където е налице студено огъване на материала, тримерните елементи отразяват по-добре поведението на конструкцията спрямо двумерните; обработката на данните от изчислителните модели, изградени с черупки е значително по-трудна, вследствие на разглеждането на две повърхнини; генерирането на мрежа от крайни елементи е значително полесно при използването на черупки; при присъединяване на листови материали с различна дебелина по-точни резултати се получават с помощта на обемни елементи.

4.3 Приложение на методика за оценка на напреженията за изследване на умора на материала

Методиката от т. 2.3 е приложена за теоретичните изследвания на талига Y25 Ls-K. За целта изчислителният модел е верифициран, като са използвани данните от проведените статични изпитания на талигата. Извършеният сравнителен анализ дава много добро съвпадение на стойностите на напреженията получени по теоретичен и експериментален път. Силите използвани в изчислителните модели за теоретичното изследване са съобразени с таблица 2.2.

4.3.1 Оценка относно умора на материала в рамата на талигата по DVS 1612:2014

В таблица 4.14 са представени част от резултатите от оценката на рамата, при изследване на всички 19 режима от таблица 2.2. Поради ограничения обем в нея са

включени данни само за първите пет възела с недостатъчна динамична якост. По-пълна информация за вътрешния шев на страничната греда е дадена на фигура 4.13.

						1 a	олица	1 4.14	rusy	JIIal O	гоце	пка і		ички	r y pc	мима	па па	пова	рванс.
№. Възел	σ⊥min	σ⊥max	R	م⊥zul	Случай min	Случай тах	σ min	σ∥ max	R	σ zul	Случай min	Случай тах	tmin	Tmax	R	tzul	Случай min	Случай тах	Критерий по (2.20)
1012487	88.7	-128.4	-0.7	111.3	16	17	-58.8	64.6	-0.9	103.9	17	16	3.1	49.8	0.1	117.3	3	17	2.615
1012486	88.5	-119.6	-0.7	109.5	16	17	-56.1	67.1	-0.8	106.2	17	16	1.6	43.7	0.0	114.6	3	17	2.427
1012622	71.4	-120.7	-0.6	115.3	17	16	-52.0	54.8	-0.9	102.8	16	17	1.1	44.8	0.0	113.3	3	16	2.095
1012488	74.1	-119.0	-0.6	114.0	16	17	-54.2	56.2	-1.0	102.3	17	16	4.8	44.1	0.1	122.3	3	17	2.094
1012150	64.1	-113.1	-0.6	116.4	17	16	-51.7	52.2	-1.0	101.6	16	17	3.0	44.6	0.1	117.8	3	16	1.850

Таблица 4.14 Резултат от оценка на всички 19 режима на натоварване.

Анализът на получените резултати показва, че от всички възли, намиращи се в зоните на заваръчни шевове, само 43 не отговарят на критерия от (2.20). Това дава основание талигата да бъде насочена за изпитване или да продължи изпълнението на методиката от т. 2.3.



Фигура 4.13 графика от оценка на всички 19 режима на натоварване

4.3.2 Оценка на умората на материала на талигата по DVS 1612:2014 без отчитане на режимите включващи силите от спиране.

В таблица 4.15 са представени резултатите от извършената повторна оценка относно умората на материала в съответствие с методиката без режимите от спиране. Основание за това дава направеният сравнителен анализ на резултатите от проведените статични изпитвания. По-пълна информация за вътрешния шев на страничната греда е дадена на фигура 4.14

								I aum	ица ч	.1310	зулта	11 01	оцен	ка на	15 p	сжима	на на	aloba	арванс
№. Възел	σ⊥min	σ⊥max	R	σ⊥zul	Случай min	Случай тах	σ min	σ max	R	σ zul	Случай тіп	Случай тах	tmin	τmax	R	τzul	Случай min	Случай тах	ритерий по (2.20
1341113	70.6	-115.3	-0.6	114.5	15	13	-15.0	46.0	-0.3	129.0	13	8	3.3	44.8	0.1	118.4	8	4	1.643
1341112	66.7	-114.5	-0.6	115.7	15	13	-13.8	45.3	-0.3	130.4	13	8	2.8	46.1	0.1	117.1	9	4	1.598
1341133	51.8	-102.0	-0.5	119.1	15	4	-6.6	42.3	-0.2	141.1	13	8	4.6	42.8	0.1	122.3	9	7	1.202
1341117	49.7	-102.4	-0.5	120.2	15	4	-4.6	41.3	-0.1	145.1	13	8	5.1	44.8	0.1	123.1	14	6	1.181
1341111	40.4	-105.0	-0.4	125.6	15	7	-2.5	40.2	-0.1	149.6	13	5	6.3	48.8	0.1	124.9	15	7	1.148

Таблица 4.15 Резултат от оценка на 15 режима на натоварване



Фигура 4.14 Графика от оценка на 15 режима на натоварване.

Анализът на получените резултати показва, че от всички възли, намиращи се в зоните на заваръчни шевове, само 13 не отговарят на критерия от формула (2.20). Това дава

основание талигата да бъде насочена за изпитване или да продължи изпълнението на методиката от т. 2.3.

4.3.3 Оценка на умора на материала на талигата при редуциране на напречната сила F_y.

В таблица 4.16 са представени резултатите от изследване на умората на материала с първите 15 режима на натоварване при редукция на напречната сила Fy. По-пълна информация за външния шев на страничната греда е дадена на фигура 4.15



Таблица 4.16 Резултат от оценка на 15 режима на натоварване и намалена сила Fy.

Фигура 4.15 Графика от оценка на 15 режима на натоварване и намалена сила Fy.

Анализът на получените по теоретичен път данни показва, че няма възли с недостатъчна динамична якост. Това напълно кореспондира с резултатите от експерименталните изследвания на талигата.

4.4 Приложение на методиката с използването на метода Гудман-Смит и диаграмите на МКЈ

С цел да се направи обективна оценка на разработената методика е целесъобразно да се проверят резултатите при използването на различни методи за оценка на вероятността от възникване на умора в зоната на заваръчен шев. Методи за оценка според [112, 10, 47, 9] са модифицираната диаграма на Гудман-Смит, МКЈ диаграмите, правилото на Майнер или друг метод заложен в национален стандарт.

Анализът на получените резултати показва, че при всички методи за оценка се получават едни и същи зони с недостатъчна динамична якост фигура 4.18.



Фигура 4.16 Резултати от диаграмите на МКЈ [47].



При оценка с MKJ-диаграмите DVS 1612-2014 [47], поради вида на заваръчните шевове, са използвани две криви (line C- and line D) и се получават 21 възела с коефициент на сигурност по-малък от единица фигура 4.16, фигура 4.18, таблица 4.17.

При оценка с Goodman-Smith diagram се получават 37 възела с коефициент на сигурност по-малък от единица фигура 4.17, таблица 4.17, при вероятност за безотказна работа 90%. При вероятност за безотказна работа 50%, се получават 2 възела (No 1012625, 1012153) с коефициент на сигурност по-малък от единица таблица 4.17.

Възел	Режим тах	max	min	Режим min	R	zul (MKJ)	S (MKJ)	σа	σm	zul (G-S)	S (G-S)
1012625	17	62.1	-143.2	16	-0.43	122.9	0.86	102.7	-40.5	48.1	0.77
1012153	17	72.5	-135.5	16	-0.54	117.9	0.87	104.0	-31.5	56.3	0.78
1013670	18	163.1	-71.1	19	-0.44	113.5	0.70	117.1	46.0	126.9	0.78
1012491	17	124.0	-97.9	16	-0.79	107.7	0.87	110.9	13.0	96.9	0.78
1013412	18	160.6	-69.0	19	-0.43	113.8	0.71	114.8	45.8	126.7	0.79
1012627	16	123.8	-80.0	17	-0.65	113.1	0.91	101.9	21.9	105.0	0.85
1012492	17	106.5	-93.9	16	-0.88	104.8	0.98	100.2	6.3	90.7	0.85
966824	17	112.0	-88.7	16	-0.79	107.7	0.96	100.4	11.7	95.6	0.85
966940	17	61.5	-131.8	16	-0.47	121.2	0.92	96.7	-35.1	53.0	0.86
966823	17	107.7	-89.5	16	-0.83	106.4	0.99	98.6	9.1	93.3	0.87

Таблица 4.17 Резултати от оценките по метода на Гудман-Смит и диаграмите на МКЈ



Фигура 4.18 Разпределение на напреженията

4.4.1 Изводи към точка 4.4

• Анализът на получените резултати показва, че при всички методи за оценка се получават едни и същи зони с недостатъчна динамична якост.

• С използваните методи, не може да се даде категорична оценка на динамичната якост. Във фишовете на UIC се казва, че е допустима появата на малък брой точки с недостатъчна динамична якост, но не се пояснява колко точно са тези точки. Това води до определена несигурност на изследователя.

• При теоретичното изследване са налице зони с недостатъчна динамична якост. При подобен случай се препоръчва да се изпълни методиката, предложена в т.2.3.

• Според резултатите от проведените тестове талигата не показва признаци за недостатъчна динамична якост, въпреки теоретичната оценка за вероятността за възникване на умора в заваръчните шевове. Една от възможните причини може да се дължи на разликата в броя цикли, при които се оценява конструкцията. При теоретичното изследване всеки режим се изчислява за $2x10^6$ цикъла, докато при изпълнението на теста броят на циклите е много по-малък, а процедурата позволява и изключване на режими при определени условия.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Обобщавайки резултатите от дисертационния труд следва, че е предложен комплексен подход за якостно-деформационно анализ на железопътни талиги при използване на числени методи. При него се осигурява оценка на изследваните величини (напрежения, деформации, премествания, умора на материала в заваръчните шевове и пр.) на всички възли и елементи по препоръчаните в нормативните документи критерии за въвеждане в експлоатация. Извършената работа позволява да бъдат формулирани следните основни приноси:

I. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ

- 1. Направен е критичен анализ на нормативните документи и научните публикации относно изследване на явлението умора на материала в зоните на заваръчните шевове на рамата на железопътни талиги. Констатирани са сериозни различия между условията за оценяване по теоретичен и експериментален път, които възпрепятстват верификацията на симулационните модели и въвеждането на талигите в експлоатация само по изчислителен път.
- 2. Разработена е уточнена методика за оценка на умората на материала в зоната на заваръчните шевове при теоретично изследване на талиги за товарни вагони. Тя е подходяща за прилагане при използване на съвременни числени методи за якостнодеформационен анализ. Чрез нея:
 - а. се гарантира всеобхватност на резултатите изследват се всички възли на заваръчните шевове;
 - b. максимална обективност на оценката;
 - с. условията при симулационните изследвания се доближават максимално до натурните изпитвания.
- 3. Разработени са алгоритъм и програма за оценка на резултатите при изследване на умората на материала в зоната на заваръчните шевове.
- 4. Разработени са сложни симулационни модели на рамата на талига от фамилията Y25, при което са използвани различни видове крайни елементи и програмни продукти. Направеният сравнителен анализ на получените теоретични резултати за напреженията и тези, регистрирани по експериментален път доказва, че точността на теоретичните резултати не зависи от:
 - а. вида на крайните елементи;
 - b. използвания софтуер;
 - с. избрания метод за оценка на умората,

а от умението на изследователя за разработване на адекватни симулационни модели.

II. ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- 1. Чрез разработените симулационни модели е направен якостно-деформационен анализ на рамата на талига Y25 Ls-k, като са определени напреженията, преместванията и деформациите в конструкцията. Изследвана е и умората на материала в заваръчните шевове.
- 2. Установени са малък брой зони с напрежения по-големи от допустимите.
- 3. Предложени са целесъобразни конструктивни решения за намаляване на напреженията в критичните зони.
- 4. Талигата е подложена на натурни изпитвания и е допусната до редовно производство. Направена е верификация на симулационните модели, което позволи да бъдат сертифицирани (допуснати в експлоатация) без изпитвания още 2 талиги от фамилията Y25 на ТРАНСВАГОН АД гр. Бургас.
- 5. Методът на изследване е приложен успешно при сертифицирането на гама талиги от фамилията Y25, производство на фирма КОЛОВАГ АД гр. Септември.

 Методиките, алгоритмите, програмите и моделите са приложени и в учебния процес за нуждите на дисциплината Моделиране и изпитване на транспортната техника от магистърската програма на специалност Транспортна техника и технологии на ΦТ при ТУ-София.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Св. Славчев, В. Стоилов, С. Пургич, **В. Мазнички**, Изчислителни модели и якостен анализ на талига Y-27. Созопол, БулТранс-2016, 2016

2. S. Slavchev, **V. Maznichki**, V. Stoilov, S. Purgic. Comparative analysis of the result of the static strength calculations and strength tests of a bogie frame Y25Ls-K. BulTrans-2017, September 11-13, Sozopol, Bulgaria, Journal MATEC Web of Conferences

3. Svetoslav SLAVCHEV, Vladislav MAZNICHKI, Valeri STOILOV, Stanislav ENEV, Sanel PURGIC. COMPARATIVE ANALYSIS OF FATIGUE STRENGTH OF AN Y25LS-K BOGIE FRAME BY METHODS OF UIC AND DVS 1612. XVIII Scientific-Expert Conference on Railways RAILCON`18, Nis, 10.2018

4. Svetoslav SLAVCHEV, Vladislav MAZNICHKI, Valeri STOILOV, Stanislav ENEV, Sanel PURGIC. METHODOLOGY FOR THE EVALUATION OF MATERIAL FATIGUE IN THE AREA OF WELDED SEAMS OF RAILWAY BOGIES ON THEORY WAY. May 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, VOL. 618 ISSN: 1757-899X, doi:10.1088/1757-899X/618/1/012046;

5. Владислав МАЗНИЧКИ СРАВНИТЕЛЕН ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОНЕН АНАЛИЗ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНА ТАЛИГА Y25Ls-K, Созопол, БулТранс-2020, 2020

ANNOTATION

Dissertation Title: Simulation study of material fatigue in the railway bogie for freight wagons

Author: Eng. Vladislav Maznichki, MSc

The dissertation proposes improvement of "methodology for assessment of the wagon stresses under static load" and for assessment of stresses in the application of "static method of UIC". The improvement allows different methods for fatigue assessment according to European legislation EN-13749:2011 and ERRI B12 R17/60 and the German national standard DVS 1612to the bogie frame structure to be applied. The thesis proposes a Methodology for fatigue assessment in the welds. The methodology can be used by researchers performing a stress-strain analysis of the frame as well as by notifying authorities responsible for the admission of the product to service. A methodology for fully strength and fatigue assessment of a bogie frame structure for freight wagon is specified.

The first chapter of the thesis contains an overview of the studies and the different methods which are used for strength calculation of bogie frame structure and evaluation of fatigue behaviors in the welded area of the structure. The overview of bibliography allows main problems of Simulation study of material fatigue in the railway bogie for freight wagons to be specified.

In second chapter a comprehensive analysis of normative legislation is done in order to determine the load cases for the bogie frame structure correspond with category V. Three modifications of "methodology for assessment of the wagon stresses under static load and for assessment of stresses in the application of static method of UIC" are proposed. Several approaches are used to perform the assessment theoretically to ensure that the conditions of application of the regulated loads are as close as possible to the test. Software for fatigue assessment is created in order to evaluate the results of simulation model prepared by software work with FEA. A methodology for fully strength and fatigue assessment of a bogie frame structure for freight wagon is specified.

In the third chapter simulation model prepared with different software (ANSYS and SOLIDWORKS) by using different type of elements (tetrahedral elements, hexahedral elements, triangle and quadratic shell elements) is presented. The problems in their development are also presented.

The last forth chapter the comparative analysis is based on the results from the static strength analysis of the frame of a bogie Y25Ls-K and from the tests of all simulation models that have been carried out. The comparative analysis of the results of all simulation models depending on the software and on the type of finite element used, have been done. The assessment is made by different methods: Moore-Kommers-Jasper (MKJ), Goodman-Smith diagram and the method proposed in DVS 1612 for complex loaded structure.

Summarizing of the performed comparative analysis gives very good match of the values of the theoretical and experimental stresses. The comparison of the results for the different simulation models shows that the stress results are very similar. The analysis of the results of fatigue evaluation shows that small count of nodes show insufficient dynamic strength. The methodology described in second chapter was applied. After the third iteration of the methodology deployment, the analysis of the theoretical data shows that there are no nodes with insufficient dynamic strength.