

ИЗСЛЕДВАНЕ ЯКОСТНОТО СЪСТОЯНИЕ НА КОНСТРУКЦИИ ТЕГЛИЧНИ КУКИ ОТ ЖЕЛЕЗОПЪТНИ ВОЗИЛА

Ваньо Ванев Ралев, Добринка Борисова Атмаджова
rlev.vanio05@gmail.com, atmadzhova.db@abv.bg

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”,
София 1574, ул. „Гео Милев” № 158
БЪЛГАРИЯ

Резюме: Теглично - отбивачните съоръжения на железопътните возила са основни и отговорни части за свързване на возилата и предаване на опънови и натискови сили, които се получават при движение на влака или при маневрена дейност. Създават се условия за получаване на по-големи надлъжни трептения и динамични сили във влаковия състав. Основния елемент в тегличните съоръжения е тегличната кука. Статията представя изчислителен метод за определяне якостното състояние на унифицирани конструкции теглични куки от железопътни возила. Посочени са основните конструкции теглични куки за приложение във вагони и локомотиви за междурелсие 1435 mm. В настоящата публикация са посочени методите за изчисление на елементи от железопътни возила на уморна якост, като унифицираният метод на UIC/ORE по диаграмата на Гудман, препоръчана в бюлетина B12/RP17 на ERRI. Изследваните конструкции се моделират в програмен продукт Solid Works. Приети са натоварвания регламентирани в международните документи EN 15566 и UIC 520. Разгледани са видовете повреди в експлоатационни условия. Моделирани са различни конструкции теглителни куки и е реализиран FEM анализ. Определено е якостното състояние на конструкции теглителни куки регламентирани в международните документи EN 15566 и UIC 520 и новопроектирана конструкция. Установява се, че радиусът на прехода, където формата на теглителната кука от TC тип “B” се променя от правоъгълно напречно сечение към цилиндрично е със стойност 4 mm, предписан в стандарт EN 15566:2016 и UIC 520 и е вероятно място за образуване на пукнатини от умора.

Ключови думи: железопътни возила, теглично съоръжение, теглични куки, уморна якост

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При железопътните превози се наблюдава тенденция, към повишаване масата и дължината на влаковете и повишаване скоростите на движение. Това води до използване на мощни локомотиви, осигуряващи голяма теглителна сила, а повишената маса на вагонните конструкции в експлоатационни условия създава и големи натискови сили. Тези предпоставки налагат развитието на теглично-отбивачните съоръжения към повишаване якостно-деформационното състояние на тези съоръжения и прилагане на поглъщащи апарати с повишена енергопоглъщаемост.

Предаването на теглителната сила между локомотива и вагоните се осъществява, посредством теглични съоръжения [1, 2, 3]. Тегличните съоръжения на вагоните се изработват в съответствие с изискванията на международния железничарски съюз (UIC), отразени във фиш 520 [4] (унифицирани теглични съоръжения за товарни, пътнически и багажни вагони). Тегличните съоръжения трябва да предават надлъжните, опънови сили като гарантират плавното им изменение и намалят максималните им стойности възникващи при ударно взаимодействие.

Тегличните съоръжения са един от основните възли на вагона. Те са предназначени да свързват вагоните помежду им и с локомотива, да предават надлъжните опънови сили,

възникващи при движението на влака и да осигурят плавното им изменение. При установен режим на движение, действат относително постоянни сили със сравнително ниска стойност. При преходните режими на движение - потегляне, спиране резка промяна на режима на тяга поради буксуване или колебание на напрежението в контактната мрежа, се получава относително преместване между вагоните и се пораждат значителни надлъжни сили, които могат да придобият ударен характер.

Тегличните съоръжения (ТС) се делят на непрекъснати и прекъснати.

При непрекъснатите ТС вагоните са съединени помежду си, чрез винтовите спрягове и образуват непрекъснатата твърда верига. Влаковете изискват значително по-голяма теглителна сила при потегляне от място, защото всички вагони се задвижват едновременно и локомотивът трябва да преодолее изведнъж пълното начално съпротивление на състава. Връзката между локомотива и вагона е относително твърда, тъй като поглъщащите апарати на вагоните работят като система от паралелно включени пружини.

Прекъснатото теглично съоръжение на вагона се състои от два апарата, монтирани в конзолните части на рамата. Теглителната сила се предава през рамата на вагона и има стойност, равна на общото съпротивление на всички вагони от задната част на състава. Потеглянето на влака е много по-лесно, защото вагоните тръгват от място един след друг. Вагоните с ТС във влака представляват еластична верига в която поглъщащите апарати работят като последователно включени пружини. При по-дълги влакови състави, когато потегли последният вагон първият вече е изминал няколко метра и съпротивлението на движение в него рязко е намаляло. Създават се условия за получаване на по-големи надлъжни трептения и динамични сили във влаковия състав. Новите вагони се строят само с прекъснати съоръжения поради изтъкнатите предимства, както и възможността в бъдеще лесно да бъдат заменени с автоматични спрягове.

2. ВИДОВЕТЕ ПОВРЕДИ НА ТС В ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ

Късането на елементи в ТС на вагоните при движението на влаковете е много често явление. Причините за това са големите надлъжни сили, които се получават при дълги влакови състави при движение по железопътни участъци с променлив план и профил, неправилно прилагане на спирачните и теглителните режими от локомотивния машинист, наличие на двойна локомотивна тяга и др.

Причина за честото късане на влаковете са също качеството и якостните възможности на частите от тегличните съоръжения, състоянието и характеристиките на поглъщащите им апарати. Мигновени разрушения се получават при ударно действие на голяма надлъжна сила в най-слабите сечения или при наличие на дефекти в материала. По-голямата част от скъсванията са в места с появили се вече пукнатини от умора в материала. Такива места са зоните с концентрация на напреженията при преходи в сечението, изпълнени с малки радиуси на закръгление, дефекти в повърхностния слой на материала, груба механична обработка и др. Тегличните пръти най-често се късат в края на резбите и в сеченията непосредствено до удебелението за черупковите съединители. Същото се отнася и за задната част на тялото на куката в двата края на цилиндричната му част. Разрушение в самата кука се среща по-рядко. Разсейването в якостните характеристики на частите на тегличните съоръжения става недопустимо голямо при некачествено производство, изразяващо се в неспазване на технологията на изковаването и механичната обработка, чертежните размери и допуски, радиусите на закръгление, предписаната гладкост на повърхнините и др. Състоянието и характеристиките на поглъщащите апарати често имат решаващо значение за надеждността на тегличните съоръжения.

Въпреки че ТС е проектирано с по-слаби елементи, като например съединителните звена - подвески, чиито счупвания са анализирани в статии [5, 6], понякога се появяват повреди на теглителните куки. В разработки на Марија Роровиќ и колектив [7, 8] е представен анализ на повредите на влаковите ТС, довели до разпадане на влакове по Сръбските железници за период от 10 години. Разгледани са повреди на влакови ТС на товарни влакове с единични локомотиви. Анализът е извършен въз основа на данни за произшествията, комбинирани с оценка на риска по FMECA. В резултат на това е получено разпределението на повредите по дължината на

влака, режима на движение и скоростта, както и честотата на повредите по отношение на дължината и масата на влаковете, състоянието на натоварване и др.

3. МЕТОДИ ЗА ИЗЧИСЛЕНИЕ НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ ЖЕЛЕЗОПЪТНИ ВОЗИЛА НА УМОРНА ЯКОСТ

При конструирането на основните носещи елементи на железопътните возила най-голямо внимание се отделя на изчислението на уморна якост, защото тя има изключително голямо значение, за гарантиране на необходимата надеждност. Железопътните транспортни средства са застрашени именно от уморно разрушаване, поради същността на процеса “умора”, понеже настъпва години след произвеждането и пускането в експлоатация на големи партиди и серии, има масов характер и е свързано с огромни материални щети [9].

Изборът на една или друга теория при изчисляване на умора се определя от съображенията, прилагани при „класическите” якостни изчисления в С.М.

За изчисляване на уморна якост се използват два подхода: детерминистичен и вероятностен [9].

- При детерминистичния подход характеристиките на натоварването и съпротивляемостта на материалите (детайлите) срещу уморно разрушаване се разглеждат като напълно определени величини с пренебрегване на случайните им отклонения.

- При вероятностния подход, характеристиките на факторите от двете групи се разглеждат като случайни величини и функции или като закономерно изменящи се от нестатистичен тип.

Докладите ERRI В 12/RP 17 [10] и ERRI В 12/RP 60 [11] и EN 12663-2 [12] предоставят информация за оценките при умора на материала на елементи от железопътната техника.

4. ИЗИСКВАНИЯ И ИЗПИТВАНЕ НА ТС

Съгласно изискванията на Международния железопътен съюз – UIC520 [4] и EN 15566:2016 [13] минималното натоварване на разрушаване при опън на ТС и теглителната кука, е 1,0; 1,2 и 1,5 MN, в зависимост от типа на ТС.

Процедурата за изпитване е базирана на ERRI В 51 / RP 27 [14].

Диапазонът на натоварване и броят цикли за вероятност за оцеляване от 97,5% са базирани на коефициент на безопасност 1,7 (ERRI 51 RP27 [14]).

След изпитването за умора, изпитваните части се проверяват за пукнатини чрез магнитно-прахово изпитване (MT) или РТ (проникващо изпитване).

5. МЕТОДИКА ЗА ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА ТЕГЛИЧНА КУКА ОТ ТС

Методика за якостен анализ на носещи конструкции от железопътни возила, по изискванията на ERRI В 12/RP 17 и приложение на МКЕ включва определяне на:

- режимите и стойностите на натоварване.
- зоните на натоварване и опорите на елементите.
- материалните характеристики за всички видове използвани материали, според европейските или национални стандарти.
- връзките между елементите на конструкцията.

Обекта на изследване се моделира с обособяване зоните на заваръчните шевове и концентраторите на напрежения, натоварва се, маркират се опорите и се омрежава. Определят се максималното σ_{max} , минималното σ_{min} , средно σ_m и амплитудно σ_a напрежение [9].

Изчертава се диаграмата на Гудман-Смит (или на Гудман, както е прието в UIC) по бюлетина В12/RP17(80) [15] за съответния материал и нанасяне на получените резултати.

Анализира се получените резултати .

6. ЯКОСТЕН АНАЛИЗ НА КОНСТРУКЦИИ ТЕГЛИЧНИ КУКИ ОТ ТС

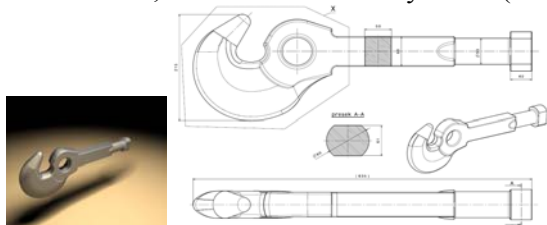
6.1. Унифицирани конструкции теглични куки

Стандартизираните куки са по UIC 520 и 826 [16] тип А (фиг.1) с маса 21.3 kg и материал Č.4732 и тип В (фиг.2) с маса 28.1 kg и материал Č.4732 (<https://mingbgd.com/en/products/draw-gear/> [17]). Моделират се теглителните куки в програмния продукт Solid Works [18].

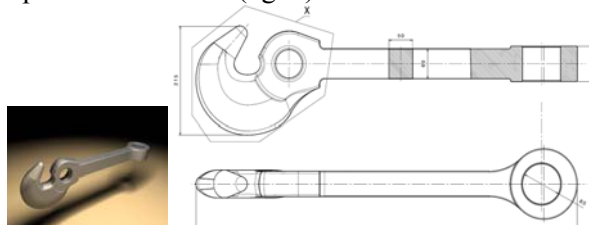
6.2. Резултати от якостният анализ на елемента „унифицирана кука от ТС тип А” по програмата Solid Works

Елементът „унифицирана кука от ТС тип А” се натоварва с надлъжна сила 1,5 MN и запъва в края на нейното стебло, показани на фиг.3.

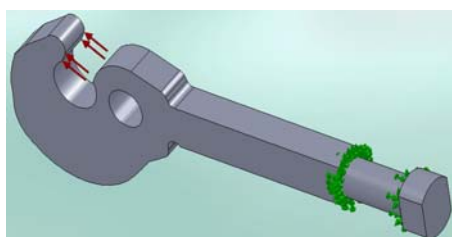
Избрания материал при моделирането е AISI 1020 с параметри: Elastic modulus $2e+011$ N/m²; Poisson's ratio 0.29; Shear modulus $7.7e+010$ N/m²; Mass density 7900 kg/m³; Tensile strength $4.2051e+008$ N/m²; Yield strength $3.5157e+008$ N/m²; Thermal expansion coefficient $1.5e-005$ /Kelvin; Thermal conductivity 47 W/(m.K); Specific heat 420 J/(kg.K).



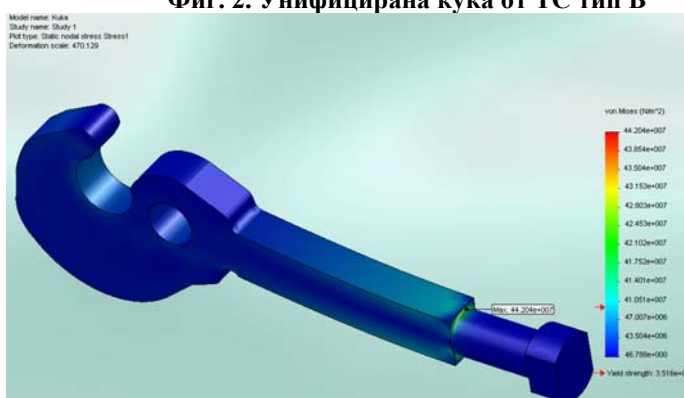
Фиг. 1. Унифицирана кука от ТС тип А



Фиг. 2. Унифицирана кука от ТС тип В



Фиг. 3. Натоварване и запъване.



Фиг. 4. Разпределение на напреженията.

Информация за мрежата: Jacobian Check: 4 Points; Element Size: 14.504 mm; Tolerance: 0.72518 mm; Number of elements: 8748; Number of nodes: 14232.

Резултатите от моделирането са дадени в таблица 1.

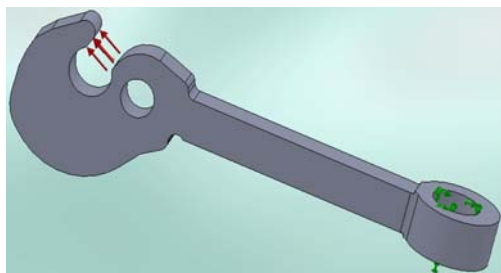
Таблица 1. Резултати от якостният анализ на елемента „унифицирана кука от ТС тип А” по програмата Solid Works

Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises Stress	6.7878 N/m ² Node: 6836	(1050.6 mm, 30.7mm, 25.5 mm)	44.204e+007 N/m ² Node: 13915	(913.5 mm, 25.76 mm, -6.76 mm)

На фиг. 4 е показано разпределението на напреженията по моделираната кука тип А, като максималното напрежение е 442,04 MPa получено по критерия “Max von Mises Stress”, и е по голямо от допустимото за избраният материал 351,6 MPa.

6.3. Резултати от якостният анализ на елемента „унифицирана кука от ТС тип В” по програмата Solid Works

Елементът „унифицирана кука от ТС тип В” се натоварва с надлъжна сила 1,5 MN и запъва в отвора на нейното стебло, показани на фиг.5.



Фиг. 5. Натоварване и запъване.



Фиг. 6. Разпределение на напреженията

Избрания материал при моделирането е AISI 1020.

Информация за мрежата: Jacobian Check: 4 Points; Element Size: 15.434 mm; Tolerance: 0.77172 mm; Number of elements: 7717; Number of nodes: 13043

Резултатите от моделирането са дадени в таблица 2.

Таблица 2 Резултати от якостният анализ на елемента „унифицирана кука от ТС тип В” по програмата Solid Works

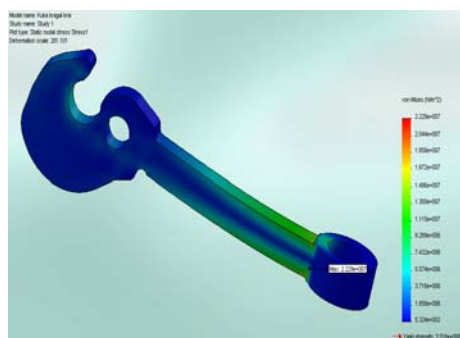
Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises Stress	5324.17 N/m ² Node: 12443	(1157.31 mm,-35 mm, -0.505 mm)	42.2294e+007 N/m ² Node: 1096	(1013.01 mm, -30.7 mm,-23.4 mm)

Максималното напрежение е 422,294 МПа получено по критерия “Max von Mises Stress” (фиг.6), и е по голямо от допустимото за избрания материал 351,6 МПа.

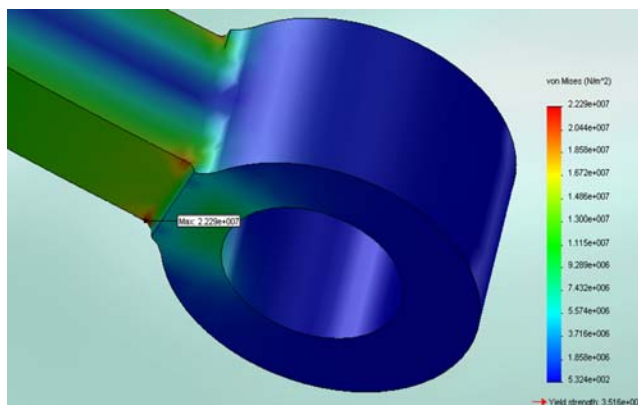
6.4. Резултати от якостен анализ на елемента „унифицирана кука от ТС тип В”, производство на ТРАНСВАГОН - Бургас по програмата Solid Works

Елементът „унифицирана кука от ТС тип В”, производство на ТРАНСВАГОН - Бургас [19] е с реализирано закръгление във връзката „пирамидално стебло - цилиндрична опашка” с радиус R = 10 mm.

Моделът на куката се натоварва с надлъжна сила 1,5 MN и запъва в отвора на цилиндричната опашка от нейното стебло, показани на фиг.5.



Фиг. 7. Разпределение на напреженията



Фиг. 8. Напрежения с максимална стойност

Избрания материал при моделирането е AISI 1020.

Информация за мрежата: Jacobian Check: 4 Points; Element Size: 15.434 mm; Tolerance: 0.77172 mm; Number of elements: 7717; Number of nodes: 13043

Резултатите от моделирането са дадени в таблица 3.

Таблица 3 Резултати от якостният анализ на елемента „унифицирана кука от ТС тип В”, производство на ТРАНСВАГОН - Бургас по програмата Solid Works

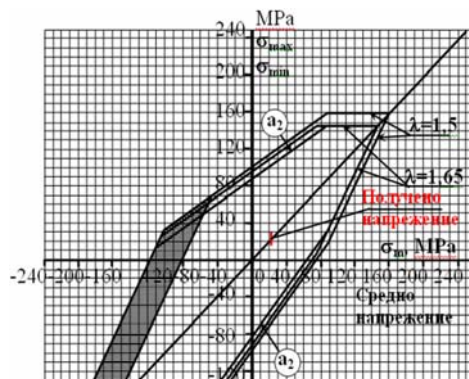
Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises Stress	5324.17 N/m ² Node: 12443	(1157.31 mm, -35 mm, -0.505 mm)	2.2294e+007N/m ² Node: 1096	(1013.01 mm, -30.7 mm, -23.4 mm)

Максималното напрежение 22,294 МПа получено по критерия “Max von Mises Stress” (фиг.7 и 8), е по малко от допустимото за избраният материал.

Изчертавайки диаграма на Гудман [9] определяме положението на застрашените напрежения за кука от ТС тип В, показани на фиг. 9, ($\sigma_m = 22,294$ МПа и $\sigma_{max} = 29,428$ МПа).

Стойностите на напреженията са в очертанията a_2 (зона “ a_2 ” – за места с преходи в сечения), което дава основание за наличие на необходимата якост на конструкцията.

За окончателното утвърждаване на конструкцията е необходимо провеждане на статични и динамични изпитвания, и експлоатационни наблюдения.



Фиг. 9. Диаграма на Гудман за $\sigma \geq 370$ МПа (съгл.UIC/ORE B12/RP17) с нанесени стойности на напреженията.

7. Заключение

В настоящата публикация са представени конструкциите теглителни куки от ТС, регламентирани в международни стандарти. Посочени са видовете повреди в експлоатационни условия. Предложена е методика за якостен анализ на теглична кука от ТС. Анализират се конструкции теглителни куки от тип А и В по UIC 520.

Установява се че уморните разрушения на теглителната кука са причинени основно от избрания материал, технологията на производство и експлоатационните условия.

Радиусът на прехода, където формата се променя от правоъгълно напречно сечение към цилиндрично е с малка стойност, предписан в стандарт EN 15566:2016 и UIC 520. Това води до концентрация на напрежение в преходната зона, която служи като вероятно място за образуване на пукнатини от умора.

Моделират се конструкции теглителни куки от тип А и В по UIC 520, като с FEM анализ се установява по-добро якостно състояние на теглителни куки от тип В.

FEM анализът сравнява два случая на теглителна кука от тип В, първият с радиус на преход $R = 4$ mm, а вторият с $R = 10$ mm. Резултатите показват значително по-високи напрежения в първия случай ($R = 4$ mm) – 422,294 МПа) в сравнение със случая $R = 10$ mm – 22,294 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] КАРАДЖОВ, Т., ДИМИТРОВ Ж., Вагони, София, 1988
- [2] PETROVIC D., RAKANOVIC R., Zeleznicka vozila Praktikum., Kraljevo, 2006
- [3] PETROVIC D., ALEKSANDROV V., Zeleznicka vozila. Osnove, MF Kraljevo, 2013, ISBN 978-86-82631-66-8 p.223
- [4] UIC 520 Wagons, coaches and vans - Draw gear - Standardisation, 2003.
- [5] M. POPOVIĆ, J. TANASKOVIĆ, D. GLIŠIĆ, N. RADOVIĆ, F.J. FRANKLIN, Experimental and numerical research on the failure of railway vehicles coupling links, Engineering Failure Analysis, Volume 127, 2021, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021>.
- [6] M. POPOVIĆ, D. MOMČILOVIĆ, J. TANASKOVIĆ, A. SEDMAK, Testing of the condition and performance of coupling links from screw couplings of train, Engineering Failure Analysis, Volume 161, 2024, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024>
- [7] M. POPOVIĆ, J. TANASKOVIĆ, Z. STARČEVIĆ, N. MEĐEDOVIĆ, Analysis of coupling system failures on freight trains, ACTA TECHNICA JAURINENSIS Vol. 16, №1, pp. 11-17, 2023

- [8] M. POPOVIĆ, J. TANASKOVIĆ, J. STOJANOVIĆ, V. LUČANIN, Research of the draw hook failures on rail vehicles in Serbia, XXI International Scientific-expert Conference on Railways Serbia - RAILCON'24, Niš, October 10-11, 2024
- [9] ПЕНЧЕВ Ц., АТМАДЖОВА Д., "Якост и дълготрайност на автомобилна и железопътна техника", ВТУ "Т. Каблешков", 2007
- [10] ERRI B 12/RP 17 QUESTION B12 Wagons, April 1997
- [11] ERRI B 12/RP 60, REGULATIONS FOR PROOF TESTS AND MAXIMUM PERMISSIBLE STRES, 2013
- [12] EN 12663-2022 Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies.
- [13] EN 15566:2016 Railway applications - Railway rolling stock - Draw gear and screw coupling
- [14] ERRI B 51/RP 27:1995-07-01, Buffering and Draw gear — Design and testing of new draw gear for wagons.
- [15] ERRI B12/RP17 (80) version B using Goodman diagrams. Results are available as DoU, 2001
- [16] UIC 826, Technical specification for the supply of screw couplings for tractive and trailing stock
- [17] DRAW GEAR, MING do - production, engineering, forging and machining for railway, agricultural, mining and hydraulic industry, <https://mingbgd.com/en/products/draw-gear/>
- [18] SOLID WORKS 2010
- [19] КАТАЛОГ на вагонен завод ТРАНСВАГОН – Бургас, 2025

RESEARCH ON THE STRENGTH STATE OF STRUCTURES OF TOW HOOKS OF RAILWAY VEHICLES

Vanio Ralev, Dobrinka Atmadzhova
ralev.vanio05@gmail.com, atmadzhova.db@abv.bg

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

Abstract: Towing and shunting equipment of railway vehicles are the main and responsible parts for connecting the vehicles and transmitting tensile and compressive forces that occur during train movement or during shunting activities. Conditions are created for obtaining larger longitudinal vibrations and dynamic forces in the train set. The main element in the towing equipment is the tow hook. The article presents a calculation method for determining the strength state of unified designs of tow hooks of railway vehicles. The main designs of tow hooks for application in wagons and locomotives for 1435 mm gauge are indicated. This publication indicates the methods for calculating the fatigue strength of elements of railway vehicles, such as the unified method of UIC/ORE according to the Goodman diagram, recommended in the bulletin B12/RP17 of ERRI. The studied structures are modeled in the Solid Works software product. Loads regulated in the international documents EN 15566 and UIC 520 are adopted. The types of damage in operational conditions are considered. Different designs of tow hooks are modeled and FEM analysis is performed. The strength state of tow hook designs regulated in the international documents EN 15566 and UIC 520 and a newly designed structure are determined. It is found that the radius of the transition where the shape of the drawbar hook of the type "B" TC changes from a rectangular cross-section to a cylindrical one is 4 mm, as prescribed in the EN 15566:2016 and UIC 520 standards, and is a likely location for fatigue cracking.

Key words: railway vehicles, drawbar equipment, drawbar hooks, fatigue strength