

ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ФАКТОРИ ВЪРХУ МЕХАНИЗМА НА КОНТАКТНИТЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ СИСТЕМАТА “ЖЕЛЕЗОПЪТНО КОЛЕЛО – РЕЛСА”

Татяна Авджиева

avdjieva@vtu.bg

ВТУ “Т. Каблешков”, Гео Милев 158
София, България

Ключови думи: релса, железопътно колело, контактна умора, механизъм на контакт, термична обработка

Резюме: Обект на настоящето изследване е намирането на връзка между параметрите на уморен контакт и твърдостта на материала. Определянето на размерите на контактната площадка при различни състояния на материала (в частност, при различна твърдост, получавана в резултат на отвъръщане при различни температури след закаляване в масло или във вода) би дало яснота върху механизма на уморно контактно разрушаване на материала и би позволило прогнозирането на живота на релсата при наличие на зародени контактно уморни пукнатини.

ВЪВЕДЕНИЕ

Върху работата на системата колело – релса в различна степен влияят над 60 фактора [2 - 5]. Тези фактори могат да се обединят в 4 основни групи:

- Динамика на системата колело – релса;
- Механика на контактно взаимодействие;
- Материали, от които се изработват релсите и колелата, и техните свойства;
- Фактори, регулиращи износването.

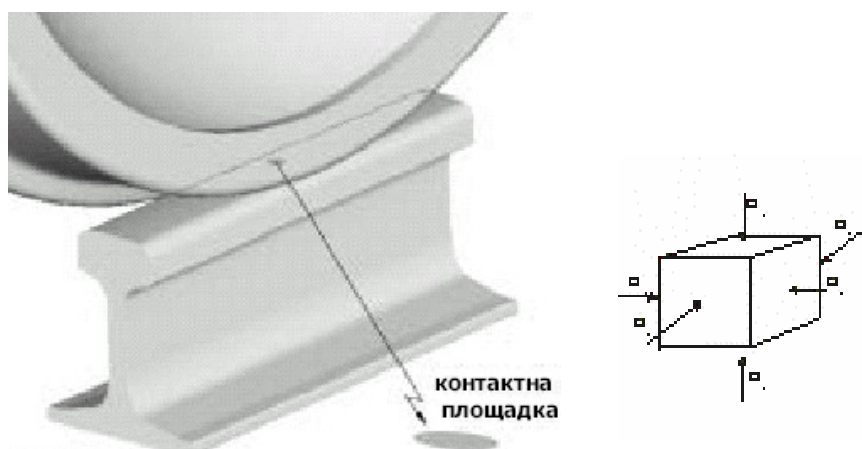
При контактно взаимодействие на колелото и релсата от основно значение е познаването на напреженията, възникващи в контактната площадка под действие на силите, пораждани при динамичното взаимодействие на подвижния състав и пътя. Контактните напрежения са в зависимост и от профила на колелото и релсата, свойствата на материала, характера на износването и неговата интензивност, които определят разпределението на напреженията и относителното приплъзване в контактната площадка. От гледна точка на механиката на контактно взаимодействие между колелото и релсата при

установени сили на действие върху главата на релсата, както и при установен профил на релсата, могат да се пресмятат както разпределението и вида на напреженията в контактната площадка, така също и силите на триене в материали с различни свойства.

От анализа на многобройни литературни източници, малка част от които са изброени в библиографията на тази статия [2, 5 до 9], се установява, че все още няма яснота за връзката между еластичните свойства на материала и възникващите напрежения в контактната площадка на двойката колело – релса. Настоящата разработка е един опит за установяване на връзка между твърдостта, модула на Юнг и нормалните и тангенциални напрежения, действащи в контактната площадка на системата колело-релса. Така също, от значение е възможността да се познаят размерите на контактната площадка, тъй като са от съществено значение: - за зараждането и развитието на контактно-уморни пукнатини; - за износване.

СЪЩНОСТ НА ПРОБЛЕМА

При взаимодействие на колело-релса (фиг.1) в релсата възникват нормални и тангенциални напрежения. Ако са известни радиусите на закръгление в точката на контакт, еластичните свойства на материала, от който са изработени колелото и релсата могат да бъдат пресмятани параметрите на уморен контакт. Еластичните свойства на материала се описват чрез коефициента на Поасон ν и модула на Юнг E .



Фиг. 1. Контакт между железопътно колело и релса [2]

Съгласно теорията на Херц [2], максималната стойност на контактното напрежение се пресмята чрез формула 1.

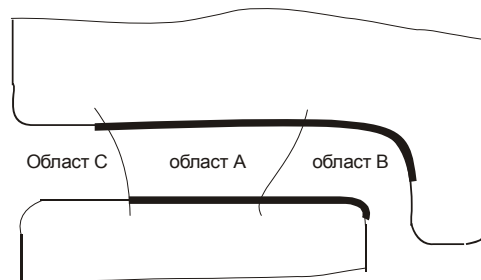
$$(1) \quad \sigma_0 = \sqrt[3]{\frac{3F \cdot E^2}{2\pi^3 \cdot r_e^2 (1-\nu^2)^2}}$$

където r_e е еквивалентният радиус на контакт, зависещ от радиусите на взаимодействие на релсата и колелото в мястото на контакта.

Стойността и разпределението на нормалните напрежения на повърхността на релсата зависят от 2 фактора: 1/ от товара, предаван от колелото

върху релсата в мястото на контакта (фиг. 1 и 2); 2/ от радиуса на закръгление на контактуващите повърхнини в областта на контакт. По литературни данни [2] могат да достигат стойности, равни на 3 000 МПа. Например, при контакт в област А, $\sigma_{\text{конт}} = 1300$ до 1700 МПа.

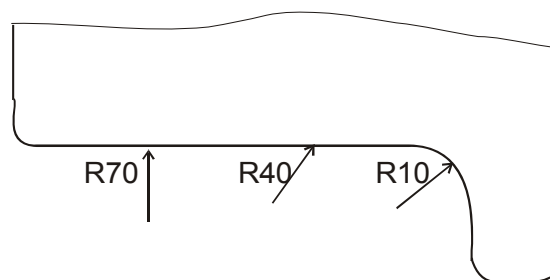
При движението на подвижния състав между колелото и релсата съществуват няколко потенциални области на контакт: област А, В или С, като контактните радиуси могат да бъдат различни (фиг. 2 и 3) в зависимост от областта, в която се осъществява контактът.



Фиг. 2. Потенциални области на контакт в двойката колело-релса

МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТА

В настоящия експеримент се изследва влиянието на твърдостта на релсовата стомана върху параметрите на уморен контакт. За целта, пробни тела от релсова стомана са подлагани на закаляване във вода и в масло, и в последствие, на отвърщане при различни температури, след което е измерена твърдостта на материала и са определени еластичните параметри чрез ултразвуков контрол [1]. При анализите твърдостта на колелото се счита за постоянна - (290НВ).



Фиг. 3. Контактни радиуси

В съответствие с теорията на Херц са намерени стойностите на максималните контактни напрежения, които възникват на дълбочина от повърхността $h_z = 0,78a$, където a е $\frac{1}{2}$ от ширината на контактната елипса (фиг.4).

Влиянието на напреженията се разглежда по отделни компоненти – нормални и тангенциални.

ИЗЧИСЛИТЕЛНА МЕТОДИКА

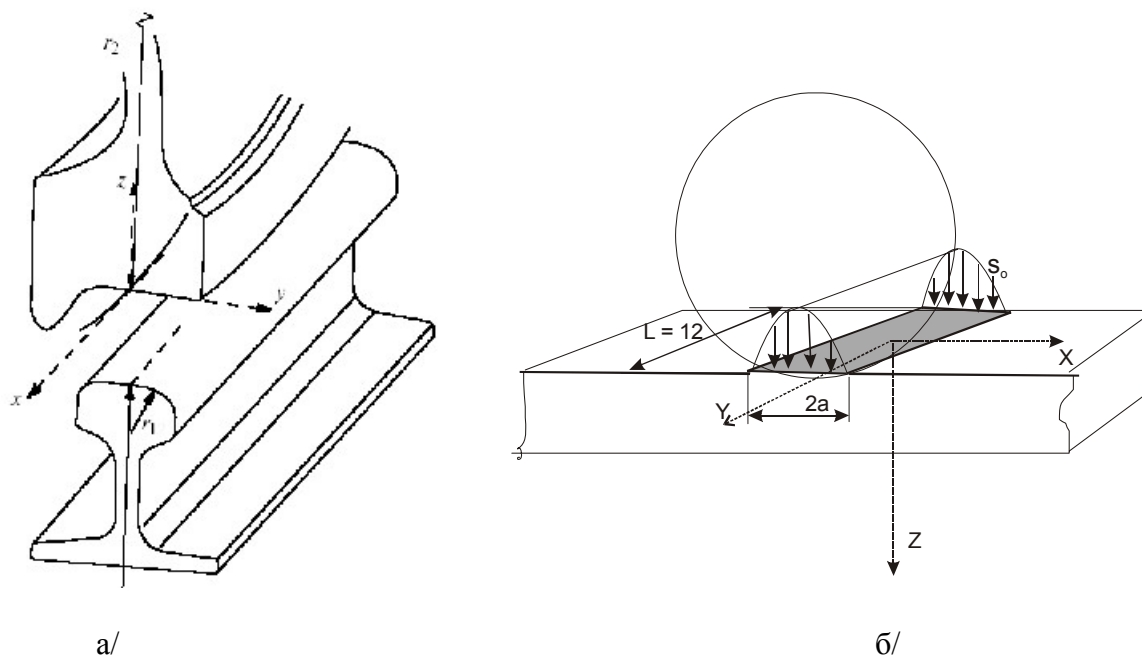
Известно е, че при контакт между силно износена релса с ново колело или с колело с износена повърхност се променя значително разпределението на напреженията [2]. Интересно е разпределението на напреженията при контакт на релси с различна твърдост с колело с постоянна, не променяща се твърдост (290НВ).

Съгласно теорията на Херц се приема, че: - нормалното напрежение σ_0 действа по нормалата към площадката на контакта; - контактната площадка е помалка в сравнение с размерите на самите контактуващи тела; - под контактната площадка се създава локална зона на пластична деформация; - на повърхността няма сили на триене. В този случай се осъществява контакт на цилиндрична повърхнина (колелото) по безкрайно дълга плоска повърхност (релсата) като напрежението (σ_0) се разпределя по площадка с дължина $L = 12$ mm и ширина $2a$ mm.

От съществено значение за механиката на контактното разрушаване имат тангенциалните напрежения (τ) и тяхното разпределение в дълбочина по ос z . При стойност на коефициента на Поасон $\nu = 0,31$ чрез който се характеризира пластичността на стоманата, и различни модули на Юнг [1], стойността на тангенциални напрежения τ се намира като функция на параметъра a - $\tau = f(a)$. Максималната стойност (τ_{\max}) и дълбочината на разположение на тези стойности (z_τ) по ос z се намират по формули (2 и 3) [2].

$$(2) \quad \tau_{\max} = 0,31 \cdot \sigma_0,$$

$$(3) \quad z_\tau = 0,78 \cdot a$$



Фиг.4. Разпределение на напреженията при контакт: а/ координатна система при контакт между релса и колело; б/ схема на уморен контакт

При пресмятане на напрегнатото състояние предварително се изчислява редуцираният радиус на контактната двойка \bar{R} и редуцираният модул на еластичност \bar{E} (формули 4 и 5). Стойностите на ширината на контактната площадка a и на напрежението σ_0 се изчисляват по формули (1 и 5).

$$(4) \quad \left. \begin{aligned} \frac{1}{\bar{R}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ \frac{1}{\bar{E}} &= \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \end{aligned} \right\}$$

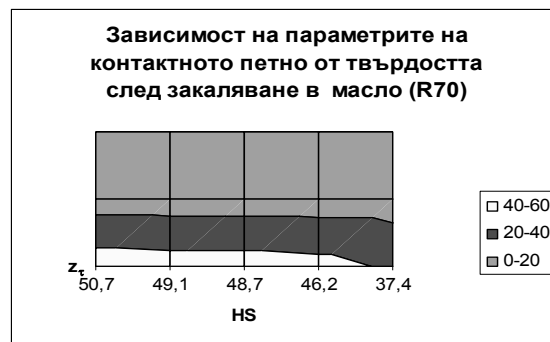
$$(5) \quad a = \left(\frac{3P\bar{R}}{4\bar{E}} \right)^{1/3},$$

ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

При контакт в област C на колелото (фиг. 2) контактният радиус е R70. Данните за параметрите на контактната площадка, както и за стойностите на максималните нормални и тангенциални напрежения при този радиус са показани в таблица 1 и на фиг. 4. Установява се, че при максимална твърдост на релсата (след закаляване независимо от охладителя) големината на контактното петно е максимална. С намаляване на твърдостта при високо температурно отвърщане размерите на контактната площадка са най-малки.

Таблица 1. Параметри на контакт при радиус на контакт R70

Температура на термична обработка, °C	Твърдост по Шор, HS	E.10 ⁻¹¹ , N/mm ²	σ ₀ , N/mm ²	τ _{max} , N/mm ²	y _{cr} , mm	a, mm
	Вода					
840	82,3	2,01	1870	271,6481	4,7157	13,42509
180	79,3	2	1860	271,3585	4,9813	13,45914
350	68,8	2,054	1914	174,9032	4,5776	13,27918
450	51,5	2,072	1931	163,4077	4,1259	13,22127
550	37,4	2,094	1951	132,0173	3,5845	13,15186
	Масло					
840	50,7	2,073	1930	263,4355	4,1011	13,21809
180	49,1	2,063	1929	263,156	4,3508	13,2501
350	48,7	2,0852	1940	164,774	3,7997	13,17945
450	46,2	2,0853	1950	153,777	3,7972	13,17913
550	37,4	2,1042	1960	123,297	3,3373	13,12016

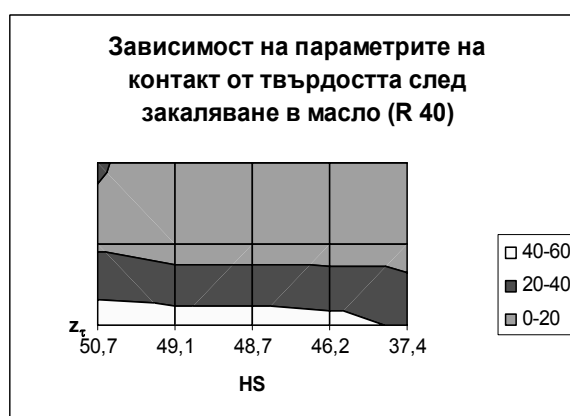
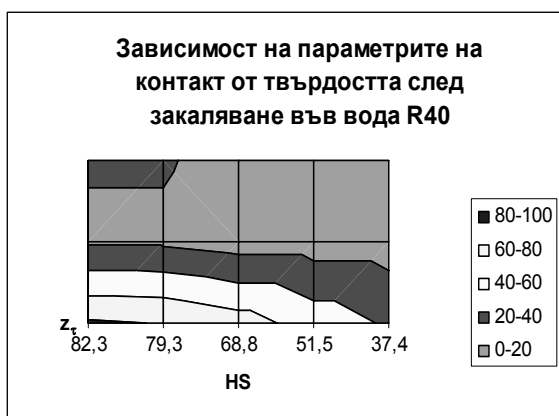


Фиг. 4. Параметри на контакт при радиус на контакт R70

В таблица 2 и на фиг. 5 са посочени данните за параметрите на контакт при контактуване в област А на колелото при радиус на контакт R40. Наблюдава се същата зависимост – с намаляване на твърдостта параметрите на контактната площадка намаляват. Осъществяването на контакт по повърхност с по-малък радиус води до увеличаване на размерите на контактното петно без да настъпва съществено изменение на стойностите на нормалното и тангенциалното напрежения.

Таблица 2. Параметри на контакт при радиус на контакт R40

Температура на термична обработка, °C	Твърдост по Шор, HS	$E \cdot 10^{-11}$, N/mm ²	σ_0 , N/mm ²	τ_{max} , N/mm ²	y_{τ} , mm	a, mm
	вода					
840	82,3	2,01	727	225,2246	6,8049	21,5447
180	79,3	2	1860	271,3585	6,84753	21,5993
350	68,8	2,054	1910	173,9032	4,5776	13,2791
450	51,5	2,072	1930	173,4077	4,1259	13,2212
550	37,4	2,094	1950	173,0173	3,5845	13,1518
	масло					
840	50,7	2,073	727	226,5286	6,54578	21,2125
180	49,1	2,063	1860	173,1561	4,3508	13,2501
350	48,7	2,0852	1910	173,7744	3,7997	13,1794
450	46,2	2,0853	1930	153,7771	3,7972	13,1791
550	37,4	2,1042	1950	133,2974	3,3373	13,1201

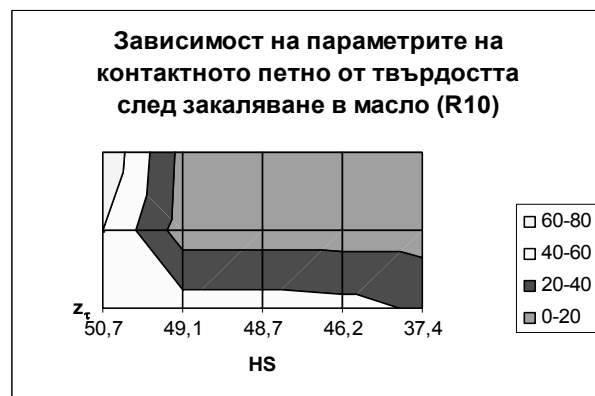
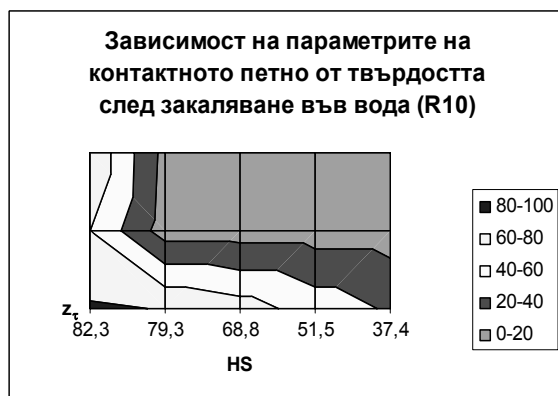


Фиг. 5. Параметри на контакт при радиус на контакт R40

Резултатите от изчисленията при радиус на контакт R10 – контактуване в област *B* на колелото (фиг. 2) показват еднозначна тенденция в изменението на параметрите на контакт (таблица 3).

Таблица 3. Параметри на контакт при радиус на контакт R10

Температура на термична обработка, °C	Твърдост по Шор, HS	$E \cdot 10^{-11}$, N/mm ²	σ_0 , N/mm ²	τ_{max} , N/mm ²	y_c , mm	a, mm
	вода					
840	82,3	2,01	549	252,9385	4,1955	29,3823
180	79,3	2	1869	175,3585	4,3508	13,459
350	68,8	2,054	1910	173,9032	3,7997	13,2791
450	51,5	2,072	1930	173,4077	3,7972	13,2212
550	37,4	2,094	1950	98,0173	3,3373	13,1518
	масло					
840	50,7	2,073	727	253,4897	4,1195	27,1737
180	49,1	2,063	1860	177,1561	3,3508	13,2501
350	48,7	2,0852	1912	173,7744	2,7997	13,1794
450	46,2	2,0853	1939	153,7771	2,7972	13,1791
550	37,4	2,1042	1950	88,2974	2,3373	13,120



Фиг. 6. Параметри на контакт при радиус на контакт R40

И при трите радиуса на контакт се установява, че с намаляване на твърдостта, размерът на контактната площадка се намалява и мястото ѝ се придвижва към външната повърхност на релсата. Едновременно с това се установява увеличаване на стойностите на нормалните контактни напрежения, които в някои случаи достигат стойности по-големи от границата на провлачане R_e (за разглежданата релсова стомана R_e е различна в зависимост от твърдостта). Този факт е възможна причина за поява на пластична деформация в повърхностните слоеве на материала, която в последствие би довела до възникване на контактено-уморни пукнатини на повърхността и последващо евентуално уморно разрушаване на материала. Тъй като под повърхността материалът се намира в триосно напрегнато състояние (фиг.1), три компонента на тензора на преженията трябва да са в равновесие, за да има високо ниво на якост. Установява се, че в дълбочина тези напрежения не са равни и тангенциалната компонента τ нараства, а нормалната намалява. В такъв случай,

ако на повърхността има приложени допълнителни тангенциални напрежения, разстоянието, на което възникват максималните тангенциални напрежения τ_{\max} би се намалило и доближило към повърхността, което е предпоставка в тези области да възникнат пластични деформации. В резултат на действащите напрежения се деформират два обема материал - тънък обем материал на повърхността на контактната площадка под действие на нормалните напрежения и един друг под повърхностен обем, намиращ се в областта на τ_{\max} . Когато двата обема се приближават при нарастване на тяговото усилие, което е тангенциално, те могат да образуват една област на потенциално разрушаване на материала.

При всички отвърнати стомани, независимо от температурата на отвърщане, максималната стойност на тангенциалните напрежения е на дълбочина приблизително равна на 3-5 мм. Единствено, при стомана с висока твърдост, получена в резултат само на закаляване, z_{τ} е много по-голяма – приблизително 6 мм. Вероятно това е предпоставка за по-голямата контактна износоустойчивост на материала, но е интересно, каква би била контактната умора (обект на следващи изследвания).

Изводи:

1. Намерените стойности на модула на Юнг могат да отразяват влиянието на твърдостта върху параметрите на уморен контакт.
2. Стойностите на контактните напрежения (нормални и тангенциални) зависят от твърдостта.
3. Контактният радиус не оказва съществено влияние върху стойностите на контактните напрежения.
4. С понижаване на твърдостта размерът на контактната площадка се намалява и мястото ѝ се придвижва към контактната повърхност на релсата.
5. При висока твърдост размерите на контактната площадка се увеличават, като едновременно с това стойностите на контактните напрежения намаляват.
6. Различните температури на отвърщане влияят несъществено върху параметрите на контакт.
7. Получените данни изискват експериментално потвърждение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Tatyana Avdjieva, Yonka Ivanova, Application of ultrasonic methods for characterization of heat-treated rail steels, Journal of materials science and technology, №1, 2006
- [2.] Захаров С. И колектив,Обобщение предевого опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельсы, Москва, 2002, ИННА
- [3.] Иванова М. Г. „Влияние на неконвенционален подвижен състав върху горното строене на железния път”, XV научна конференция ВТУ, 2005 г.
- [4.] Георгиев, Мл., Пукнатиноустойчивост на железопътните релси, София, Издателско ателие, 1999

- [5.] Морозов, Е., М. Зернин, Контактные задачи механики разрушения, Москва, Машиностроение, 1999
- [6.] Alfredson, Bo, A study on contact Fatigue Mechanisms, Doctoral Thesis N 44, 2000, Dep. Of solid mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm
- [7.] Горский, Б.Е. Динамическое совершенствование механических систем, Техника, Киев, 1987
- [8.] Домюхов А., Коррозия и надежность железнодорожной технике, 1/97, Железнодорожной транспорт

**THE INFLUENCE OF THE TECHNICAL PARAMETERS UPON THE
MECHANISM OF THE FATIGUE CONTACT IN SYSTEM
"RAIL WHEEL - RAIL"**

Tatyana Avdjieva
avdjieva@vtu.bg

***Todor Kableshkov Higher School of Transport
158, Geo Milev Str., Sofia 1574, Bulgaria***

Key words: rail, rail wheel, fatigue contact, heat treatment

Abstract: The object of this paper is the investigation of the parameters of the fatigue contact mechanism and the hardness of the rail material after different heat treatments. The specimens from rail were quenched in water and in oil and than were tempered at different temperatures. Than the contact parameters between wheel and rail are calculated and analysed.