A XIII-a Conferinţă Naţională multidisciplinară – cu participare internaţională,
*"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti"*,
SEBEŞ, 2013

# DERAIEREA ÎN ALINIAMENT A VEHICULELOR MOTOARE DE CALE FERATĂ CAUZATĂ DE ESCALADAREA ROŢII ATACANTE PE FLANCUL ŞINEI

Marius – Ovidiu ENE

# THE STRAIGHT LINE DERAILMENT OF RAILWAYS MOTOR VEHICLES DUE TO CLIMB UP OF THE DRIVING WHEEL OVER THE RAIL

The derailments due to climb up of the driving wheel onto the top of the railhead are between the most common causes of railway accidents. Wheel flange climb derailments occur in situations where the wheel experience a high lateral force Y, or when vertical force Q is reduced on the flanging wheel and Nadal's Y/Q ratio limit is exceeded for a certain time duration limit.

Cuvinte cheie: deraiere, raport de deraiere, pseudoalunecare, sarcina pe roată, forţa laterală
Keywords: derailment, relative to derailment, slips the false, task force on the wheel side, lateral force

## 1. Introducere

Fenomenul deraierii vehiculelor feroviare este consecinţa apariţiei unor anomalii funcţionale în timpul rulării acestora pe şină ce determină, pierderea stabilităţii contactului roată-şină.

Excluzând deraierile produse din cauza erorilor umane, există totuşi multe situaţii când deraierea se datorează funcţionării defectuoase a unei componente a sistemului feroviar.

Din punct de vedere al infrastructurii căii, o pierdere a capacităţii de ghidare poate fi cauzată de: şine rupte sau îndoite, rezultat al temperaturilor ambientale extreme; deteriorări ale elementelor de fixare ale şinelor (buloane rupte, eclise de prindere fisurate etc.), structură necorespunzătoare a patului de balast (piatra spartă nu este la dimensiunile şi caracteristicile normate) etc.

Defecţiunile căii de rulare se pot manifesta ca: lărgiri sau îngustări de ecartament; încovoieri mari ale şinelor; anomalii succesive ale şinelor, precum adâncituri sau ridicături pe ciuperca şinei; variaţii armonice în secţiune transversală ale şinei şi deviaţii de la profilul căii, ca rezultat al unor joante slabe.

De asemenea trecerea unui vehicul motor cu suspensii rigide peste o zonă în care şinele sunt încovoiate sau răsucite, poate conduce la o descărcare a roţii atacante cu apariţia riscului de deraiere. În plus, aparatele de cale sunt considerate zone critice, în care pot apare multe probleme.

Nu trebuiesc uitate porţiunile de linie la care se efectuează intervenţii la calea de rulare, care sunt considerate zone cu un grad sporit de risc în ceea ce priveşte apariţia deraierilor.

Referitor la vehiculul de cale ferată, o osie ruptă sau blocată datorită gripării rulmentului cutiei de osiei, defecte ale roţilor, sau orice defecte majore ale suspensiei primare sau secundare precum blocări ale amortizoarelor, ruperi ale arcurilor de suspensie etc., pot conduce direct la deraiere, datorită limitării capacităţii de rotaţie a boghiului sau a aparatului de rulare la schimbarea direcţiei de mers.

O importanţă deosebită o reprezintă caracteristicile roţilor materialului rulant de cale ferată. O buză subţire a bandajului roţilor cauzată de apariţia în timp a uzurii la contactul dintre flancul exterior al buzei roţii şi flancul interior al şinei, precum şi datorită unei înălţimi a buzei bandajului peste limitele impuse, rezultat al unei uzuri excesive a suprafeţei de rulare, pot genera probleme atunci când are loc intrarea pe aparatele de cale [1].

În mod cert, deraierile nu se produc doar când apar defecţiuni majore la vehicul sau la calea de rulare. Acestea pot rezulta şi ca o combinaţie a celor două situaţii.

Există defecţiuni potenţiale care nu pot fi depistate cu ocazia operaţiilor de mentenanţă programate, care se efectuează fie la calea de rulare fie la vehicul, şi care generează în timpul rulării mişcări de înclinare, săltare, rotire, şi alte abateri de la mers, ce conduc la instabilitatea vehiculului, în special când aceste mişcări se repetă.

## 2. Factori care pot iniţia escaladarea roţii pe şină

Acest tip de deraieri, datorate căţărării buzei rotii atacante pe flancul interior al şinei, se produc când unghiul de atac $\alpha$ (unghiul dintre roată şi şină) este pozitiv (osia, faţă de poziţia normală, se roteşte în sens trigonometric) sau/şi când forţa laterală ce acţionează în punctul de contact roată-şină are o valoare suficient de mare pentru a determina escaladarea buzei roţii pe ciuperca şinei.

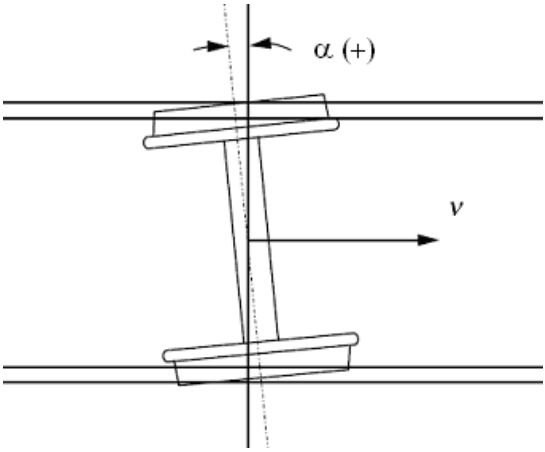


Fig. 1 Unghiul de atac

În timpul rulării trenului pe şine, ghidarea roţii în calea de rulare se realizează prin suprafaţa de rulare a roţii, care poate avea profil conic sau de uzură. Astfel, profilul suprafeţei de rulare joacă rolul mecanismului diferenţial de la vehiculele auto, iar înscrierea în curbe a vehiculelor feroviare se poate realiza prin intermediul jocului dintre buza roţii şi şină, joc ce poartă numele de lărgimea canalului de ghidare şi reprezintă diferenţa dintre ecartamentul căii şi cel al osiei [2].

În general, deraierile cauzate de escaladarea roţii atacante pe flancul interior al şinei apar în curbe, depinzând de mai mulţi factori, precum: raza curbei, profilele roţilor şi ale şinelor, caracteristicile suspensiei primare sau viteza de circulaţie a vehiculului.

De asemenea, sunt situaţii în care acest tip de deraiere se produce şi la circulaţia vehiculului în aliniament, atunci când apar mişcări laterale bruşte ale vehiculului.

Aceste mişcări pot genera o forţă laterală mare la nivelul contactului roată-şină care va genera o anumită valoare a raportului dintre forţa verticală (sarcina pe roată) şi forţa laterală (Y/Q) în punctul de contact dintre roată şi şină care va depăşi valoarea limită a lui Nadal pe o anumită perioadă de timp, având ca rezultat producerea deraierii vehiculului motor de cale ferată [3].

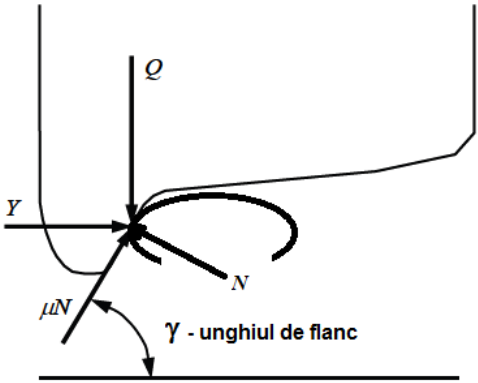


Fig. 2 Forţe ce acţionează la contactul roată-şină

Referindu-ne la figura 2, în care vom considera roata atacantă, în contact de flanc cu flancul interior al şinei, se observă două seturi de forţe care acţionează în punctul de contact roată-şină.

Primul set este format din forţa verticală (sarcina pe roata atacantă) Q şi forţa laterală (forţa de ghidare pe roata atacantă) Y, ambele acţionând asupra şinei în punctul de contact, iar cel de-al doilea set este format din forţa normală N şi forţa de frecare datorată alunecării (forța tangenţială) $\mu N$, ce acţionează în planul de contact.

Unghiul $\gamma$ reprezintă unghiul de flanc, adică unghiul format de flancul exterior al buzei roţii atacante cu axul transversal al căii [4].

Din raportul forţelor prin descompunerea acestora pe direcţie orizontală şi pe direcţie verticală, se obţine raportul de deraiere Y/Q, care este folosit ca o măsură a rulării in condiţii de siguranţă a vehiculului motor.

De asemenea, trebuie să menţionăm faptul că fişa UIC 518 limitează valoarea raportului Y/Q la 0,8 [5].

## 3. Fenomenul apariţiei pseudoalunecărilor la contactul roată-şină în timpul rulării

Conform teoriei elastice a lui Hertz contactul dintre roată şi şină se realizează pe o suprafaţă eliptică, a cărei formă şi mărime depinde de forţa normală de contact, de proprietăţile mecanice ale materialelor şinei şi ale roţii, precum şi de geometria contactului roată-şină [6].

La nivelul suprafeţei de contact acţionează forţa normală de contact şi forţa tangenţială, ultima prezentând în principal două componente: componenta longitudinală (de-a lungul căii de rulare) şi componenta transversală (perpendicular pe axa căii de rulare). Însă datorită formei conice a suprafeţei de rulare, forţa tangenţială mai prezintă o componentă cauzată de rotaţia suprafeţei de rulare a roţii, în jurul normalei la suprafaţa de contact roată-şină, numită forţă tangenţială de spin, a cărei valoare este relativ mică, de multe ori fiind neglijată în calcule.

Referindu-ne la forţele tangenţiale de contact, acestea sunt generate de pseudoalunecările longitudinale, laterale şi de spin care apar în timpul mişcării de rulare a vehiculului feroviar pe şine, în ipoteza Kalker a contactului de rulare dintre două corpuri solide [7]. Trebuie menţionat că datorită profilului conic al roţii, aşa numita ‘rulare pură’, adică rularea roţii pe şină fără apariţia alunecării între roată şi şină, nu poate fi realizată decât rareori şi pe durate scurte de timp, toate celelalte cazuri de rulare a vehiculului pe şine şi anume: accelerări, frânări, înscrieri în curbe etc., determinând apariţia pseudoalunecărilor la nivelul suprafeţei de contact.

Facem menţiunea că pseudoalunecarea longitudinală/laterală este definită ca raportul dintre viteza relativă a roţii pe direcţie longitudinală/laterală şi viteza de înaintare a roţii. Similar, mişcarea de spin duce la apariţia pseudoalunecării de spin.

În ipoteza mişcării de rulare a roţii pe şină fără alunecare, cazul ‘rulării pure’, nu se transmite nicio forţă tangenţială între roată şi şină, neexistând frecare între roată şi şină. În acest caz, distanţa parcursă de roată într-o rotaţie completă, este egală cu circumferinţa sa.

Dacă se aplică roţii un moment de rotaţie în acelaşi sens cu direcţia de deplasare, adică dacă roţii i se imprimă o mişcare de accelerare sau frânare, distanţa parcursă de roată într-o rotaţie completă va fi mai mică decât circumferinţa sa datorită apariţiei pseudoalunecărilor longitudinale la nivelul suprafeţei de contact roată şină, conform teoriei lui Carter [8].

În ceea ce priveşte pseudoalunecările laterale, acestea apar în general datorită deplasării laterale a osiei.

### 4. Mecanismul de producere a deraierii prin escaladarea roţii atacante pe flancul interior al şinei

După cum am menţionat anterior, majoritatea deraierilor vehiculelor motoare de cale ferată sunt cauzate de urcarea buzei roţii atacante pe vârful ciupercii şinei şi căderea roţii pe partea exterioară a şinei.

Acest lucru se întâmplă în situaţii în care forţa laterală (forţa de ghidare Y) este foarte mare, concomitent cu deplasarea în totalitate a punctului de aplicaţie al forţei verticale (sarcina Q) de pe calea de rulare pe buza de ghidare a roţii atacante. O forţă laterală mare poate fi indusă atât de un unghi de atac crescut, cât şi de mişcări dinamice laterale severe ale vehiculului în timpul rulării. În acelaşi timp, forţa verticală pe buza de ghidare poate scădea foarte mult în cazul boghiurilor cu o echilibrare necorespunzătoare a sarcinii pe osie cauzată de o suspensie primară defectuoasă. Este clar că un boghiu la care nu există a aliniere corespunzătoare a osiilor, va determina apariţia unui unghi mare de atac.

În acelaşi timp, o negociere bruscă a unei curbe, răsuciri mari ale şinei sau apariţia rezonanţei în timpul rulării vehiculului de cale ferată, pot cauza escaladarea buzei roţii pe şină.

Aceeaşi situaţie o regăsim și la rularea în linie dreaptă, când neregularităţile căii și mişcările dinamice laterale ale vehiculului sunt bruşte, precum în timpul mişcării de şerpuire a vehiculului sau în cazul unei frânări agresive. În plus, orice neregularitate şi discontinuitate dinamică a căii, determină o creştere a raportului Y/Q.

Când acest raport depăşeşte limita de deraiere, sunt şanse foarte mari ca deraierea vehiculului motor să se producă.

### 5. Procesul de escaladare a roţii

În situaţia în care o osie atacantă cu roţi fixe pe axul roţii este în mişcare de rulare în aliniament şi suferă un decalaj lateral faţă de axa căii datorită unor forţe exterioare, razele cercului de rulare ale celor două roţi vor avea valori diferite. Neglijând pseudoalunecările laterale ce apar datorită deplasării laterale a osiei, vitezele celor două roţi ale osiei vor fi diferite, generându-se astfel pseudoalunecări longitudinale. Acestea la rândul lor vor duce la apariţia unui cuplu de forţe produs de

cele două forţe tangenţiale longitudinale de pe cele două roţi, proporţional cu diferenţa razelor de rulare ale celor două roţi, mai exact cu conicitatea, având ca rezultat readucerea osiei către axa căii.

În acelaşi timp, dacă rulajul osiei în cale se face sub un unghi de atac, şi dacă ţinem cont şi de decalajul transversal al osiei, pseudoalunecările transversale şi de spin vor duce la apariţia forţelor tangenţiale transversale [9].

În ipoteza rulării vehiculului feroviar fără deviaţie unghiulară faţă de axa căii, adică fără existenţă vreunui unghi de atac, contactul dintre roată şi şină se va face într-un singur punct (monocontact). În acest caz, sub influenţa unei forţe laterale aleatoare bruşte ce acţionează de-a lungul axului osiei, perpendicular pe axa căii, procesul de escaladare a buzei roţii pe flancul interior al şinei, poate fi descris în trei faze [10].

***Faza 1*** – sub influenţa forţei laterale, roata se va deplasa lateral pe direcţia forţei, cu o anumită viteză laterală, în vederea realizării contactului de flanc cu flancul interior al şinei. Acest lucru va determina apariţia forţei tangenţiale laterale şi implicit a pseudoalunecărilor laterale care vor acţiona la nivelul contactului roată-şină şi se vor opune deplasării roţii către contactul de flanc.

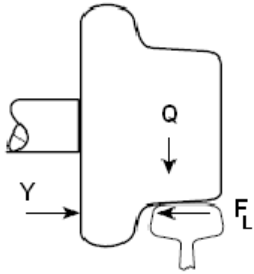


Fig. 3 Deplasarea roţii către contactul de flanc

***Faza 2*** – pe măsură ce se accentuează deplasarea roţii către şină, într-un final se va realiza contactul de flanc, iar ca rezultat, unghiul de contact (flanc) dintre roată şi şină, ce reprezintă unghiul de înclinare format de forţa normală N în punctul de contact roată-şină cu diametrul cercului de rulare, va creşte.

Drept urmare viteza laterală a osiei şi implicit a roţii scade. În consecinţă, pseudoalunecarea laterală şi forţa tangenţială laterală îşi vor schimba direcţia şi vor ajuta roata în procesul de escaladare pe flancul interior al şinei.

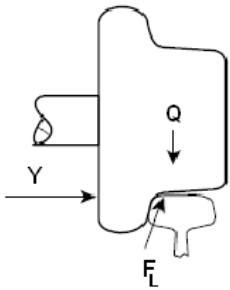


Fig. 4 Buza roţii în contact de flanc cu flancul interior al şinei

***Faza 3*** – după ce unghiul de flanc ajunge la valoarea maximă, viteza laterală a osiei scade, încetând şi deplasarea laterală a osiei. În această situaţie întâlnim două posibilităţi.

***a. Alunecarea buzei roţii pe flancul interior al şinei***

Ca rezultat al scăderii vitezei laterale a osiei, pseudoalunecarea laterală şi forţa de alunecare îşi schimbă încă o dată sensul şi se vor opune escaladării roţii pe flancul şinei. Ca urmare, buza roţii va aluneca înapoi pe flancul interior al şinei, iar roata îşi va continua rularea pe şină în monocontact.

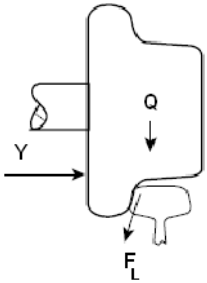


Fig. 5 Alunecarea buzei roţii pe flancul interior al şinei

***b. Escaladarea buzei roţii peste flancul interior al şinei***

În situaţia unei valori maxime a unghiului de flanc, creşterea accidentală a valorii forţei laterale, descărcarea verticală a roţii, sau creşterea coeficientului de frecare roată-şină pe un anumit interval parcurs, pot determina depăşirea valorii limită a lui Nadal a raportului

de deraiere, având ca rezultat producerea deraierii. Experimentele au dovedit că deraierile cauzate de escaladarea roţii peste şină apar doar dacă raportul limită de deraiere a fost depăşit pe o anumită durată limită de timp, sau luând în calcul doar distanţă parcursă, pe o anumită distanţă de rulare limită.

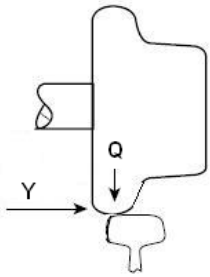


Fig. 6 Escaladarea buzei roţii peste ciuperca şinei

## 6. Concluzii

Din cele analizate mai sus, se pot trage câteva concluzii pentru evitarea deraierilor produse prin escaladarea buzei roţii atacante peste şină şi asigurarea circulaţiei în siguranţă a vehiculului feroviar.

■ În primul rând, contactul de flanc să se realizeze sub unghi de contact cât mai mare. Acest lucru se poate obţine prin profilarea buzei roţii atacante a vehiculului feroviar sub un unghi de flanc cât mai mare.

■ În al doilea rând trebuie redusă forţa laterală Y printr-un design corespunzător al boghiului.

■ Altă posibilitate de creştere a siguranţei rulării osiei atacante, o reprezintă limitarea pe cât posibil a abaterilor de la planeitate ale şinelor (deformări, răsuciri, încovoieri), limitându-se în acelaşi timp reducerea sarcinii pe roată Q atunci când apare contactul de flanc.

■ O metodă destul de des întâlnită de creştere a raportului de deraiere o reprezintă reducerea coeficientului de fricţiune la nivelul contactului roată-şină, prin lubrifierea suprafeţei de contact.

Acest lucru se poate realiza fie prin ungătoarele de pe vehiculul motor de cale ferată, care împroşcă lubrifiantul pe buza roţii, fie prin ungătoarele de cale care sunt montate în zonele critice de-a lungul căii.

## BIBLIOGRAFIE

[1] Ensco, Inc. Press Release, *Keeping Your Trains on the Track – Strategies for Preventing Derailments*, US Infrastructures, Springfield VA, 2009.
[2] Sebeşan, I, *Dinamica vehiculelor feroviare,* Editura Matrix Rom, ISBN 978-973-755-725-4, Bucureşti 2011.
[3] Nadal, M.J., *Locomotives a vapeur,* Collection Encyclopedie Scientifique, Biblioteque de Mecanique Appliquee et Genie, Vol. 186, 1908.
[4] * * * TCRP 71, Vol.5, Appendix 4, *Effect of wheel/rail profiles and wheel/rail interaction on system performance and maintenance in tranzit operations,* Transportation Research Board of the National Academies, 2005.
[5] * * * Fişa UIC 518 *Essais et homologation de vehicules ferroviaires du point de vue du comportement dynamique – Securite - Fatigue de la voie - Qualite de marche*, 2005.
[6] Hertz, H., *Uber die Berührung fester elastischer Körper,* Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik, 1882.
[7] Kalker, J.J., *On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction,* Ph Thesis, Delft, The Netherlands1967.
[8] Carter, F.W., *On the action of a locomotive driving wheel*, Proc. R. Soc. London, 112, 1926, pag. 151-157.
[9] Wickens, A.H., *Fundamentals of rail vehicle dynamics – Guidance and stability*, Sweets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, 2003.
[10] Iwnicki, S., *Handbook of railway vehicle dynamics*, CRC press, ISBN 0-8493-3321-0, Boca Raton, S.U.A., 2006.

Drd. Ing. Marius – Ovidiu ENE, expert
Autoritatea Feroviară Română – AFER Bucureşti
Calea Griviţei nr. 393, sector 1,
010719, Bucureşti
mariusene@yahoo.com