



26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA  
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLAJOVÝCH  
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“  
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.2.21>

## EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU NA SÍLY V KONTAKTU KOLO-KOLEJNICE: SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

### EXPERIMENTAL PROOF OF SPIN INFLUENCE ON RAIL-WHEEL CONTACT FORCES: STATE OF PRESENT KNOWLEDGE

Jan PULDA<sup>\*)</sup>, Bohumil CULEK, Petr VOLTR

#### 1 ÚVOD

Podmínky přenosu tečných sil mezi kolem a kolejnici popisuje teorie adheze. Její podstatou je vznik tečných sil mezi povrchy poddajných těles (kolo a kolejnice) při působení normálové síly, vzájemném relativním pohybu a existenci tření v kontaktní ploše. Vlivem relativního pohybu těles dochází k deformaci povrchu těles a tím vzniku tečného napětí, jehož následnou integrací je získán výsledný silový účinek. Pro popis relativního pohybu těles se používají poměrné kinematické veličiny – skluzu. Zavádí se tři skluzu: podélný skluz  $s_x$ , příčný skluz  $s_y$ , spinový skluz  $\phi$ . Spinový skluz neboli spin popisuje vrtný pohyb (rotaci kolem normály kontaktní plochy) částic povrchů v kontaktu.

Úhlová rychlost spinu je rovna průmětu výsledné vzájemné úhlové rychlosti rotace těles do normály kontaktní plochy. Například v kontaktu kolo-kolejnice je dominantní složkou tzv. geometrický spin, který je přítomen i bez vrtivého pohybu kola a který vyplývá z úhlové rychlosti rotace dvojkolí a efektivní kuželovitosti obrysu kola. Důsledkem spinu je vznik takového rozložení tečného napětí, jehož výsledné silové účinky jsou zejména příčné tečné (skluzové) síly. Vzniká ale rovněž tzv. spinový moment.

Současné poznání ohledně vlivu spinu na vznik, rozložení tečných napětí a velikosti výsledných skluzových sil je založeno na matematicko-fyzikálních modelech a experimentální činnosti. Právě popis a zhodnocení dosud provedených experimentů je náplní tohoto příspěvku.

#### 2 KLASIFIKACE MOŽNOSTÍ EXPERIMENTÁLNÍHO OVĚŘENÍ VLIVU SPINU

V úvodu nastíněný mechanismus vzniku tečných sil a momentů v kontaktu poddajných těles zároveň vypovídá o možnosti jejich měření. Přehled metod užitých při zkoumání vlivu spinu je uveden v následujícím výčtu:

<sup>\*)</sup> **Ing. Jan PULDA**, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Studentská 95, 532 10 PARDUBICE, Česká republika. E-mail: jan.pulda@student.upce.cz. 26 let, doktorand, zabývá se adhezí.

**prof. Ing. Bohumil CULEK, CSc.**, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice. E-mail: bohumil.culek@upce.cz, tel. +420 466 038 511.

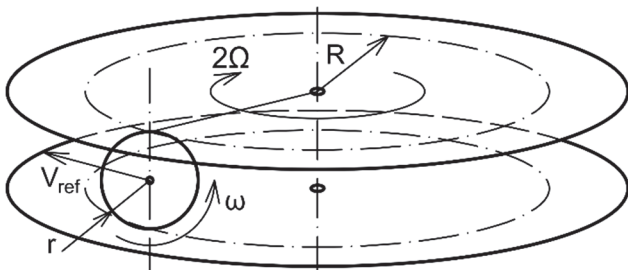
**doc. Ing. Petr VOLTR, Ph.D.**, Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice. E-mail: petr.voltr@upce.cz, tel. +420 466 038 505.

- rozložení tečného napětí – tyto metody nejsou v následujícím textu hlouběji rozebrány, jelikož není plánováno jejich využití v budoucí experimentální činnosti;
  - měření rozdělení kontaktní plochy na oblast lpění a oblast klouzání [1];
  - přímé měření průběhu tečného napětí pomocí fotoelasticimetrie [2, 3];
- měření výsledných silových účinků – závislosti skluzových sil na velikosti spinu (tzv. adhezní charakteristiky);
  - zjišťované adhezní charakteristiky udávají závislost mezi spinem a příčnou silou či spinovým momentem, pro příčnou sílu může být zahrnut též vliv příčného skluzu;
  - možnost využití kuličkového zkušebního stavu – měření pohybu nebo sil působících na kuličku sevřenou mezi dvěma rotujícími deskami, resp. využití tribometru (tato metoda je rozebrána v kapitole 2.1);
  - možnost využití kladkového zkušebního stavu, který typicky simuluje kontakt kolo-kolejnice (tato metoda je rozebrána v kapitole 2.2).

Metody pro přímé měření rozložení napětí pomocí fotoelasticimetrie jsou poměrně náročné a vyžadují použití speciálních polymerních materiálů. Tedy z hlediska kontaktu kolo-kolejnice je jejich použití vyloučeno. Naproti tomu metody založené na měření výsledných silových účinků lze považovat za dostatečně popisující zkoumaný vliv spinového skluzu.

### 2.1 Experimenty na kuličkových zkušebních stavech

Vyvození spinu u kuličkového stavu spočívá v umístění kuličky mezi dvě desky vzájemně rotující kolem svislé osy (dle **obr. 1**). Pokud lze na kuličku rovněž působit radiální silou, lze na základě změny trajektorie kuličky naměřit kompletní skluzové charakteristiky pro kombinaci příčného skluzu a spinu. Nutno podotknout, že mezi radiální síly se rovněž



**Obr. 1** K odvození vztahu pro spin na kuličkovém zkušební stavu

**Fig. 1** Derivation of an equation of a spin creepage on a ball test rig

řadí síly setrvačné – odstředivé (z tohoto důvodu byly experimenty prováděny za velmi nízkých rychlostí). Odvození rovnice popisující velikost spinového skluzu je uveden rovnicemi (1) a (2). Rovnice (1) popisuje kinematiku valení kuličky za podmínky nulového podélného skluzu (tímto předpokladem se zjednodušuje rovnice (2) na popis spinu pouze geometrickými parametry soustavy).

$$2 v_{ref} = 2 R \Omega \Rightarrow v_{ref} = r \omega = R \Omega \quad (1)$$

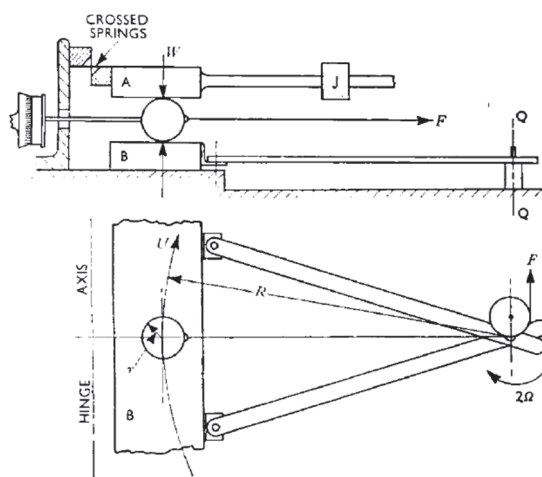
$$\Phi = 2 \Omega / v_{ref} = 2 / R \quad (2)$$

kde:	$2 \Omega$	$[\text{rad s}^{-1}]$	úhlová rychlost rotace horní desky vůči dolní
	$\omega$	$[\text{rad s}^{-1}]$	úhlová rychlost rotace kuličky
	$R$	$[m]$	poloměr trajektorie valení kuličky na desce
	$r$	$[m]$	poloměr kuličky
	$v_{ref}$	$[m s^{-1}]$	referenční rychlost
	$\Phi$	$[m^{-1}]$	spinový skluz

Tohoto principu k měření vlivu spinu poprvé využil Johnson a postavil na něm sérii experimentů popsaných v [4, 5]. V první sérii experimentů [4] umístil Johnson mezi dvě

rotující desky 3 kuličky (v podstatě se jednalo o model axiálního ložiska) a sledoval změnu poloměru zakřivení jejich dráhy. Jelikož nebyla zavedena žádná radiální síla, musela být výsledná skluzová příčná síla v kontaktních plochách rovněž nulová. Zjednodušeně lze skluzové podmínky popsat tak, že příčná síla resultující ze spinu je kompenzována skluzovou silou vyvozenou příčným skluzem. Právě tento vznikuvší příčný skluz je zodpovědný za změnu zakřivení dráhy kuličky – kulička se pohybuje po spirále směrem vně od osy rotace desek. Experimenty s podobnou metodikou zopakoval později Gupta [6].

Významným doplněním z pohledu měření komplexních skluzových charakteristik je Johnsonův druhý příspěvek [5]. V něm zopakoval principiálně stejný experiment jako v [4], nicméně již zaváděl na kuličku radiální sílu (**obr. 2**). Tímto způsobem naměřil kompletní příčně-spinové adhezní charakteristiky v oblastech malého spinu. Pro oblasti velkých hodnot spinu byl navržen obdobný experiment, nicméně kuličky se pohybovaly ve žlábků s kruhovým průřezem. Tím, jak se kulička postupně pohybovala směrem ven ve žlábků, docházelo ke změně sklonu dotykové roviny a vzniku tečné reakce z rozkladu svislé zátěže. Tímto způsobem je efektivně zavedena radiální síla bez jakéhokoli vnějšího zásahu. Měření trajektorie kuličky šlo stanovit adhezní křivky při spinu a příčném skluzu. Zároveň při ustálení kuličky na trajektorii s konstantní křivostí šlo měřit vliv spinu bez příčného skluzu.



**Obr. 2** Schéma uspořádání Johnsonova zkušebního stavu pro malý spin [5]

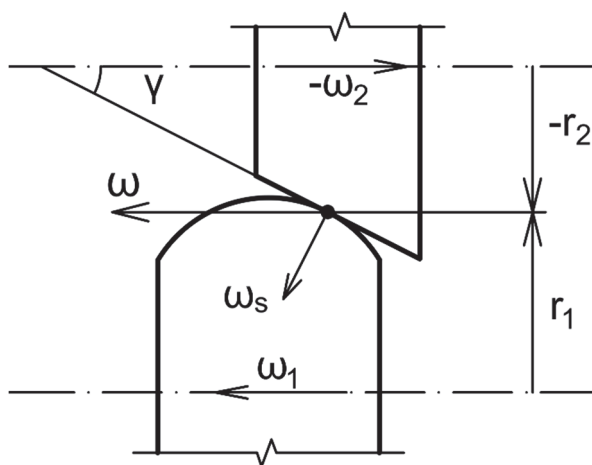
**Fig. 2** Schematics of Johnson's test rig for small spin [5]

Obecně lze posuzovat Johnsonova měření jako velmi přínosná pro pochopení vlivu spinu, a to již z titulu, že se jednalo o první experimentální studii. Zároveň byla provedena první srovnání s tehdejšími teoretickými poznáními (reprezentovanými zejména Johnsonovými matematickými modely), z něž vyplynula omezení tehdejších modelů. Nicméně při posuzování těchto experimentů v kontextu kontaktu kolo-kolejnice lze spatřovat jistá omezení jejich výsledků:

- kontaktní podmínky jsou striktně omezeny na hertzovskou geometrii, a to navíc pouze pro kruhovou kontaktní plochu (koule na rovině);
- velmi malé rozměry těles (poloměry kuliček) a z nich plynoucí malé rozměry kontaktní plochy v porovnání s podmínkami kontaktu kolo-kolejnice;
- velmi nízká svislá zatížení;
- velmi nízké rychlosti valení (z důvodu odstředivé síly a gyroskopického momentu);
- bez kombinace s podélnými skluzu.

## 2.2 Experimenty na kladkových zkušebních stavech

Hlavní nevýhodou kuličkových zkušebních stavů je fakt, že na nich jsme schopni měřit pouze za podmínek kruhové kontaktní plochy. Oproti tomu kladkové zkušební stavy toto omezení v zásadě nemají. Zároveň jsou principiálně nejbližší podmínkám v kontaktu kolo-kolejnice a vhodnou volbou profilů kladek lze simulovat věrně podmínky mezi kolem a kolejnicí. Kladkový stav obecně sestává ze dvou kladek, přičemž jedna, či obě jsou hnané. Z pohledu spinového skluzu se využívá zejména vyvození geometrického spinu pomocí kombinace profilů s nenulovým sklonem kontaktní roviny. Princip jeho vzniku je uveden na **obr. 3**.



Obr. 3 K odvození vztahu pro spin na kladkovém zkušební stavu

Fig. 3 Derivation of an equation of a spin creepage on a roller test rig

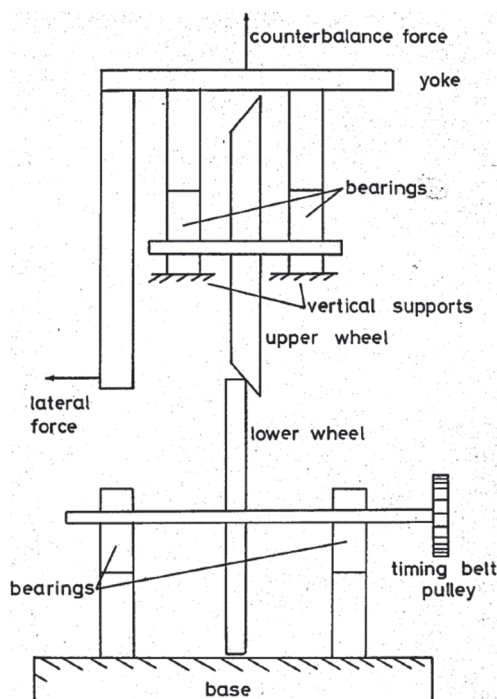
Na základě tohoto schématu lze odvodit rovnice popisující spin. Nejprve je nutné zjistit velikost vzájemné úhlové rychlosti v kontaktu mezi kladkami, to je popsáno rovnicí (3). Vlivem nenulové kuželovitosti kladek dochází ke vzniku normálové úhlové rychlosti – rychlosti spinu. Zároveň za předpokladu nulového podélného skluzu, popsaného rovnicí (4), vyplývá z výše uvedeného rovnice (5) popisující velikost geometrického spinu (závisí pouze na geometrických parametrech kladek).

$$\omega = \omega_1 - (-\omega_2) = \omega_1 + \omega_2 \quad (3)$$

$$w_x = r_1 \omega_1 - (-r_2) (-\omega_2) = r_1 \omega_1 - r_2 \omega_2 = 0 \Rightarrow r_1 \omega_1 = r_2 \omega_2 = v_{ref} \quad (4)$$

$$\Phi = \omega_s / v_{ref} = (\omega_1 + \omega_2) \sin \gamma / v_{ref} = (1/r_1 + 1/r_2) \sin \gamma \quad (5)$$

kde:	$\omega_1$	[rad s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost kladky 1
	$\omega_2$	[rad s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost kladky 2
	$\omega$	[rad s <sup>-1</sup> ]	relativní úhlová rychlost v kontaktním bodě
	$\omega_s$	[rad s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost spinu
	$r_1$	[m]	poloměr kontaktního bodu na kladce 1
	$r_2$	[m]	poloměr kontaktního bodu na kladce 2
	$v_{ref}$	[m s <sup>-1</sup> ]	referenční rychlost
	$w_x$	[m s <sup>-1</sup> ]	podélná skluzová rychlost
	$\gamma$	[rad]	úhel sklonu dotykové roviny
	$\Phi$	[m <sup>-1</sup> ]	spinový skluz



**Obr. 4** Schéma Bricklova zkušebního stavu [7]  
**Fig. 4** Schematics of Brickle's test rig [7]

Pravd epodobn e nejozsa hlej i experiment lni studii na kladkov m stavu provedl Brickle v rámci své disertační práce [7]. P redm etom zkoumání byly podmínky v kontaktu kolo-kolejnica při působícím spinu.

Schematicky je zkušební stav naznačen na **obr. 4**. Kuželová kladka reprezentovala kolo, válcová kladka se zaoblenými hranami reprezentovala kolejnica. Kombinacemi parametrů kladek bylo dosaženo rozli n ch velikostí spinu a rozměrů kontaktní plochy. Základní parametry zkušebního za izen i jsou uvedeny v **TAB. 1**. Kromě vyvození spinu umožňoval zkušební stav nastavovat úhel náběhu, tzn. vyvozovat rovněž skruz p r i n y. M rena byla svislá síla  $W$  a p r i n a síla  $F$  (obdoba kolových sil  $Y$  a  $Q$ ). Hnaná byla pouze kladka kolejnice, tedy podélný skruz byl nulový. Obě kladky byly ocelové.

Každý experiment lni případ byl proveden pro jednu kombinaci kladek (jedna hodnota velikosti spinu), u nichž byl postupn e m nen úhel náběhu (změna velikosti příčného skluzu). Takto sice nebyly získány přímo závislosti p r i n e síly na spinu, nýbrž p r i n e adhezní charakteristiky s p r s evkem spinu, z nichž vliv tohoto skluzu vyplývá. Toto bylo provedeno pro dvě až tři svislá zatížení. Ta dosahovala velikosti mezi  $W = 130$  N a 400 N.

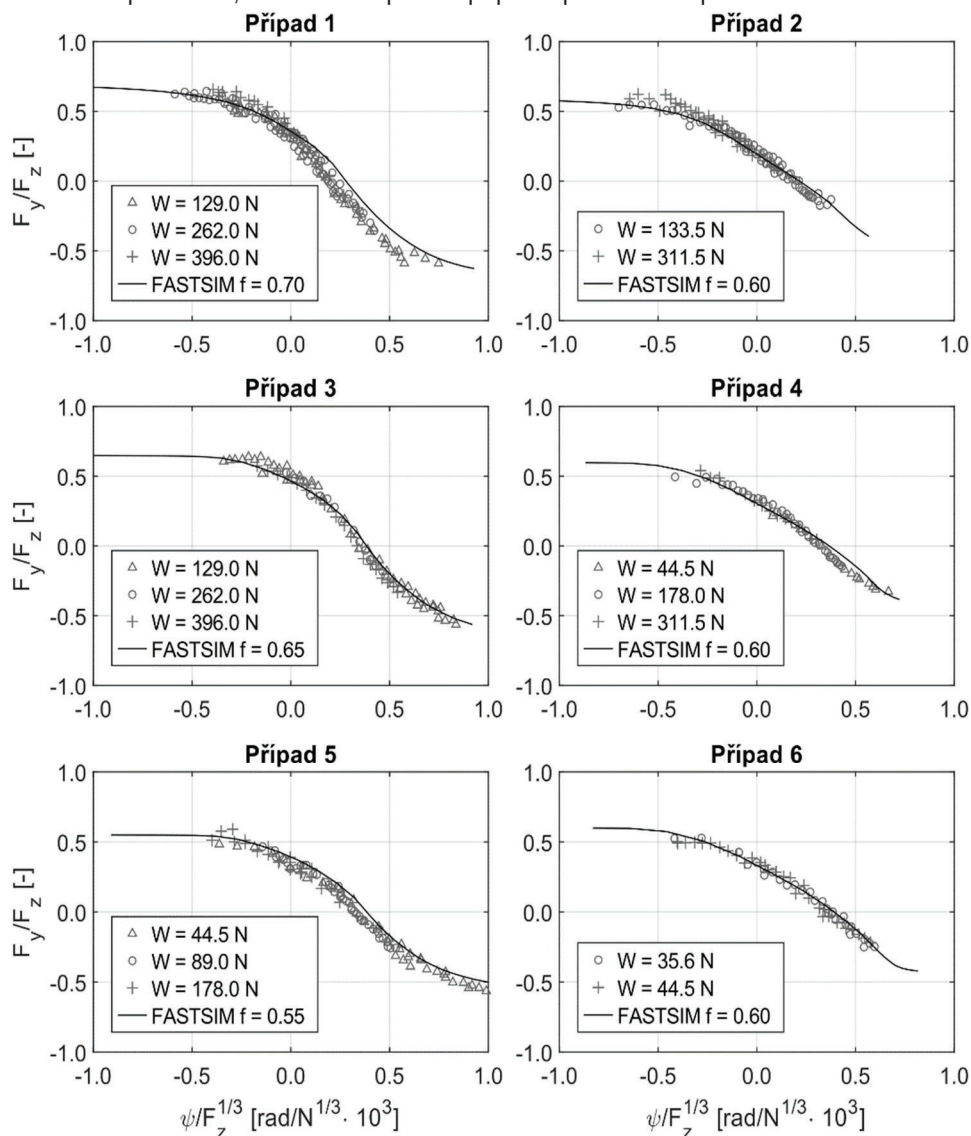
**TAB. 2** Přehled parametrů zkušebního stavu, parametrů kontaktní plochy a spinu [7]

**TABLE 2** Overview of test rig parameters, contact patch and spin creepage [7]

	Kladka dolní			Kladka horní		
	a	b	c	d	e	
Označení kladky						
Zaoblení profilu [mm]	101,50	6,35	3,18	---	---	
�hel kuželu	---	---	---	49�	67�	
Vn�j�i průměr [mm]	304,8	304,8	304,8	304,8	188,0	
Zkušební případ	1	2	3	4	5	6
Kladka dolní	a	a	b	b	c	c
Kladka horní	d	e	d	e	d	e
Poměr poloos elipsy a/b	1,04	1,11	6,45	6,75	10,00	10,30
Spin [1/m]	10,68	19,92	10,64	19,75	10,28	18,95

Výsledky m ren i Brickle porovnával s tehde j mi výpočetními modely. Pro čely tohoto p r s evku byla provedena nová porovnaní s dne n mi modely adheze. Výpočty byly provedeny pomocí knihovny CONTACT v23.1.2 [8], a to pomocí zjednodu en e teorie algoritmem FASTSIM. Srovnání s Bricklov mi výsledky je uvedeno na **obr. 5**. Vykresleny

jsou závislosti úhlu náběhu  $\psi$  (normalizovaného pomocí normálové síly v kontaktu  $F_z$ ) a součinitele adheze v příčném směru (poměrem tečné příčné síly  $F_y$  a normálové síly  $F_z$  v kontaktu). Ze srovnání vyplývá, že použití zjednodušené teorie je v případě hertzovského kontaktu plně dostačující a popisuje fyzikální realitu v případě přítomnosti spinu. V rámci jednotlivých případů se kromě geometrie a zatížení dále mění pouze součinitel tření  $f$ . Nebylo potřeba zahrnout vliv vrstvy nečistot (redukce tečné tuhosti či pokročilé modelování kontaktních podmínek, což svědčí o pečlivé přípravě podmínek experimentu.



**Obr. 5** Porovnání Bricklových výsledků s výpočty pomocí FASTSIM (parametry viz TAB. 1)  
**Fig. 5** Comparison of Brickle's results with FASTSIM calculations (parameters see TAB. 1)

Ačkoliv byly Bricklovy experimenty metodicky blízké kontaktu kolo-kolejnice, je nutné upozornit na některá jejich omezení. Jedná se zejména o následující:

- zkušební stav byl zmenšeninou oproti skutočným rozměrům kola a kolejnice;
- vlivem malých rozměrů byla zaváděna n zk  zatıžen  tak, aby bylo dosahováno kontaktních tlaků odpovídajících podmínkám kolo-kolejnice;
- pouze čist  hertzovsk  geometrie (eliptick  a rovinn  kontaktní plocha);
- poměrne nízký počet dosažitelných hodnot spinu;
- nebyl c len  zaváděn  adn y podélný skluz, zároveň nebyl podélný skluz m ren, přičemž Brickle v diskusi připouští, že mohl nabývat nenulových hodnot.

### 3 ZÁVĚR

Dosud proveden  experimenty ukazují, že současn  teoretick  pochopení vlivu spinu je na vysok  úrovni v p r pad  triviálních podmínek – hertzovsk  geometrie, nep ıtomnost podélného skluzu, n zk  zatıžen  a mal  rozměry zkušebních t el v porovnání s kontaktem kolo-kolejnice. Pro ov ren  fyzikálních a matematických modelů adheze v realistických podmínkách kontaktu kolo-kolejnice je nutn  provést další sadu experimentů. Na základě proveden  rešerše vyplývají požadavky na jejich proveden :

- bude pou it kladkov  stav, u nějž jedna kladka reprezentuje kolo, druh  kolejnici;
- možnost š irok ho rozsahu podmínek kontaktní geometrie – hertzovsk , nehertzovsk  geometrie, kter  p bli n  odpov d  kontaktu kolo-kolejnice, ide ln  možnost zkouman  konformního kontaktu na zakřiven  ploše;
- radi ln  a p r chn  zatıžen  r dov  v desítkách kN;
- možnost zavádět pod ln  skluz při současn m m ren  podélných skluzových sil;
- možnost zavádět p r chn  skluz při současn m m ren  p r chn ch silových  c nk ;
- možnost měnit spinov  skluz v takov m rozsahu, aby byly pokryty typick  podmínky pro kolejov  vozidla (to lze splnit pou it m vhodných profilů kladek);
- určit s dostatečnou přesností polohu kontaktního bodu mezi kladkami;
- možnost dosáhnout dostatečných rychlostí rotace odpovídajících jízdě vozidla.

Do určit  míry t mto požadavkům vyhovuje Testovací zařízení železničních kol (TZ K) um st n  na VVCD DFJP, Univerzita Pardubice. Záměr na proveden  m ren  vlivu spinu na síly v kontaktu kolo-kolejnice existuje na DFJP jı  delší dobu – vizte nap říklad [9]. Proto bude n sledn  v zkumn  činnost prov d n  v oblasti vlivu spinu na síly v kontaktu kolo-kolejnice probíhat na tomto zkušebním stavu.

Tato p rce byla podpořena Univerzitou Pardubice v rámci rešení projektu SGS\_2023\_014 „Aktu ln  v zkumn  témata z oblastí dopravn ch prostředk  a infrastruktury rešen  na DFJP“.

### Literatura

[1] Ollerton, E.; Pigott, R.: Experimental determination of adhesion and slip areas in rolling contact. *Journal of Strain Analysis*, vol. 5, no. 3, pp. 193–199, 1970. DOI: 10.1243/03093247V053193. [2] Poon, S. Y.: An experimental study of the shear traction distribution in rolling with spin. *Wear*, vol. 10, no. 1, pp. 61–69, 1967. DOI: 10.1016/0043-1648(67)90107-X. [3] Lee, J. C.; Ollerton, E.: A photoelastic investigation of contact stresses in equal spheres rolling together with spin. *Journal of Strain Analysis*, vol. 4, no. 3, pp. 219–227, 1967. DOI: 10.1243/03093247V043219. [4] Johnson, K. L.: The Effect of Spin Upon the Rolling Motion of an Elastic Sphere on a Plane. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 25, no. 3, pp. 332–338, 1958. DOI: 10.1115/1.4011822. [5] Johnson, K. L.: The Influence of Elastic Deformation upon the Motion of a Ball Rolling between Two Surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 173, no. 1, pp. 795–810, 1959. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1959\_173\_064\_02. [6] Sen Gupta, S. K.: Analytical

and experimental studies of conical thrust ball bearings. *Wear*, vol. 3, no. 3, pp. 277–297, 1981. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90319-7. [7] **Brickle, B. V.**: The steady state forces and moments on a railway wheelset including flange contact conditions. Doktorská práce. Loughborough University, Loughborough, 1973. [8] **Vollebregt, E. A. H.**: User guide for CONTACT, Rolling and sliding contact with friction. Technical Report, version 'v23.1'. Vtech CMCC, Rotterdam, 2023. [9] **Culek, B., Čáp, J., Malinský, J.**: Experimentální výzkum na Testovacím zařízení železničních kol. XXIV. mezinárodní konference Súčasný problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2019. Žilina, 2019. ISBN 978-80-89276-58-5.



### Resumé

*Tento příspěvek se zabývá měřením vlivu spinu na síly v kontaktu kolo-kolejnice. Spin je jedním z relativních skluzů popisujících kinematiku relativního pohybu – vrtný pohyb – dvou těles v kontaktu s existencí tření. V jeho důsledku vznikají deformace kontaktních povrchů, a tedy tečná napětí. Jejich výsledkem je příčná tečná skluzová síla a tzv. spinový moment. Z hlediska kontaktu kolo-kolejnice jsou nejdůležitější experimentální metody zaměřené zejména na měření příčné skluzové síly.*

*Tento typ experimentu lze uskutečnit dvěma metodami: na kuličkových a kladkových zkušebních stavech. Úplně první experimenty s vlivem spinu prováděl Johnson na kuličkovém zkušebním stavu [4, 5]. Výsledkem jeho experimentů byly kombinované skluzové charakteristiky pro příčný skluz a spin. Brickle již modeloval kontakt kolo-kolejnice na kladkovém zkušebním stavu [7]. Výsledkem jeho experimentů byly opět kombinované skluzové charakteristiky, ovšem v širších kontaktních podmínkách než u Johnsona. Jeho výsledky jsou ve dobrém souladu se zjednodušenou teorií adheze řešené algoritmem FASTSIM.*

*Experimentální podmínky Johnsona i Brickla byly oproti skutečnému kontaktu kolo-kolejnice zjednodušeny (hertzovská geometrie, menší rozměry těles a velikosti zatížení, neexistence podélného skluzu). Tedy z této rešerše zároveň vyplývají požadavky na nové, komplexnější měření, které bude provedeno na DFJP UPCE.*

### Summary

*This paper deals with measurements of a spin influence on rail-wheel contact forces. The spin is one of the creepages used to describe kinematics of a relative motion – rotation about contact normal axis – of two contacting bodies with friction. Deformations of the contacting surfaces are caused due to the spin and thus a tangential traction arises. Its results are lateral creep force and spin moment. With focus on rail-wheel contact, the most important experimental methods are mainly based on measurements of the lateral force.*

*Two methodologies can be used for these experiments: ball test rigs and roller test rigs. The very first experiments with the spin influence were conducted by Johnson on a ball test rig [4, 5]. His experimental results were in the form of combined creep characteristics for lateral and spin creepages. Brickle modelled rail-wheel contact on a roller test rig [7]. His experimental results were again in the form of combined creep-force characteristics, but he performed experiments under wider contact conditions than Johnson. His results are in a good agreement with the simplified theory of adhesion solved by FASTSIM algorithm.*

*Within Johnson's and Brickle's experiments the conditions were simplified in comparison to real rail-wheel contact (hertzian geometry, smaller test bodies and force loads, without longitudinal creepage). Thus, from this literature research arise requirements for more complex experiments which are going to be performed on DFJP UPCE.*