

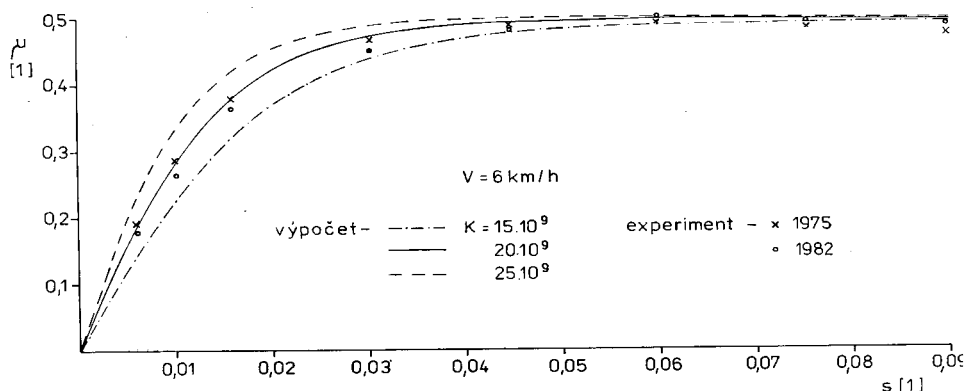
## ADHEZNÍ LIMITY PROCESU TRAKCE A BRZDĚNÍ

Jaroslav ČÁP

Katedra dopravních prostředků

Při přenosu tečných sil systému kolo/kolejnice je rozhodující adhezní mechanismus. Zásadně ovlivňuje trakční i brzdovou schopnost kolejových vozidel. Výzkum adheze v pravém slova smyslu započal ve 20. letech a to jak prvními cílenými pokusy brzdění (Jahn), tak i teoretickými studii procesu trakce (Carter). V [1] byl podán historický přehled teoretického i experimentálního řešení adheze kolejových vozidel, který obsahuje souhrnný přehled literatury o adhezi, i výsledky tehdejšího pracoviště výzkumu adheze na VŠDS Žilina, na které nyní navazujeme na půdě DFJP, teoretickými studii i stavbou experimentálního zařízení.

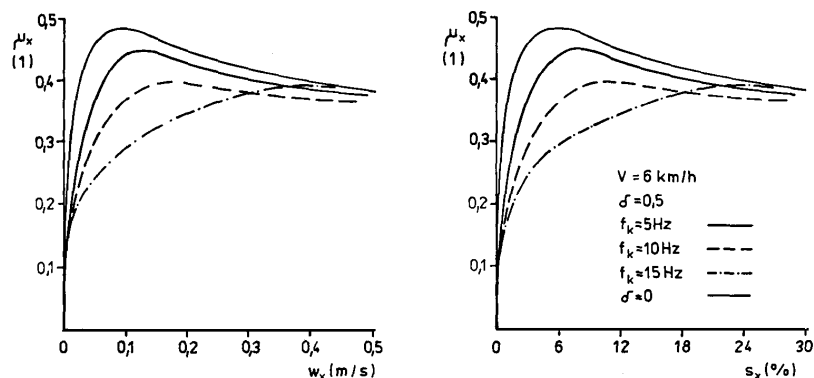
Příspěvek [1], mimo již uvedený přehled, se zabýval otázkami reálné strmosti adhezní charakteristiky se stanovením přímého vlivu poloměru kola. Zde je třeba připomenout, že teoretické stanovení adhezní charakteristiky, zejména její vzestupné části, tedy efektivní oblasti křivky, probíhalo určitým procesem. Dřívější



studie, ať už Carterova [2], ale i bádání dalších mnoha autorů vrcholící disertací Kalkera [3], byly vesměs postaveny na teoriích respektujících jen elastické vlastnosti materiálu kola i kolejnice. Výsledkem těchto teoretických řešení byla příliš strmá vzestupná větev charakteristiky. Praktické využití v regulaci, např. brzdového procesu, jak ukazuje článek odborníků fy Knorr [4], bylo nevhodné. Nastavení čidel, na limitní hodnoty strmé charakteristiky, uvádělo brzdu v činnost již při malých účincích. Nedovolovalo proto využít optimálně brzdovou schopnost vozidla. Ukázalo se, že znalost skutečných charakteristik je naprosto nezbytná, zejména promítnutí reálných vlastností materiálu do teoretických řešení. V té souvislosti lze připomenout významný teoretický podnět prof. Freibauera [5], kdy byly využity experimentální poznatky autora např. [6]. Porovnání experimentálního a teoretického řešení je na obr. 1.

Obr. 1

Poznatky z našich výzkumů o deformacích tzv. ideálních adhezních charakteristik vlivem proměnné nápravové síly, jako důsledku jízdy na vertikálně nerovné trati, poměrně dlouho nebyly využívány. Byly potvrzeny teprve při provozu výkonných elektrických lokomotiv, kdy adhezní mechanismus se stal limitujícím faktorem. Po řadě zkoušek zaměřených na zlepšování trakčních schopností německých lokomotiv BR 120 s asynchronními motory, konkrétně na vozidlech 120 002 a 120 144, firma AEG vyvinula regulátor využití adheze, reagující na změnu kvality tratě. Ten realizovala v zařízení „Geatrac“ na lokomotivě 127 001 (12 X) s výborným výsledkem [7]. Tato vysoce výkonná lokomotiva se stala v podstatě prototypem pro nové řady lokomotiv BR 101 a BR 145, které jsou ve vysokých počtech dodávány německým železnicím. Porovnání našich poznatků z modelového experimentálního zařízení o tendencích deformace adhezní charakteristiky proměnnou zátěžovou silou (obr. 2) a spektrem regulace pro dobrou a špatnou trať systémem „Geatrac“ je na obr. 3.



Obr. 2



Obr. 3

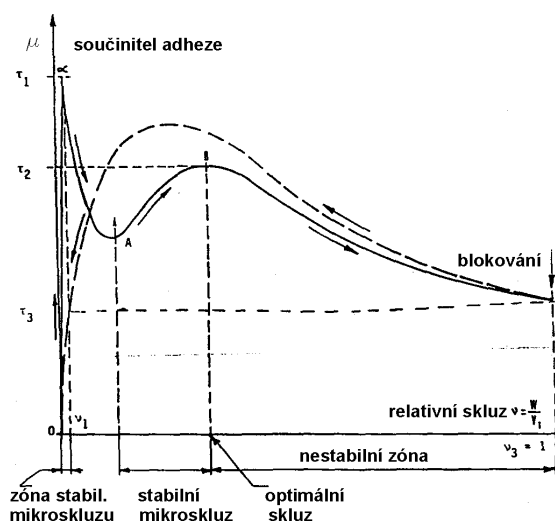
Dá se tedy říci, že znalosti o trakčním mechanismu jsou dnes již poměrně podrobné. Bohužel totéž není možné konstatovat o procesu brzdění a jeho působení a vlivu v adhezní ploše.

Obecně o adhezi v oblasti brzdění soudíme, že se jedná o souměrný proces jen se změnou měřítka relativního skluzu. Jestliže definujeme obvodovou rychlost kola o poloměru  $r$  jako  $\omega r = u$  a jeho postupnou rychlost  $v$ , pak u trakce definujeme relativní skluz  $s_t = u - v/v$ , zatímco pro brzdění je brzdňný skluz  $s$  obvykle definován jako  $s_b = v - u/v$ .

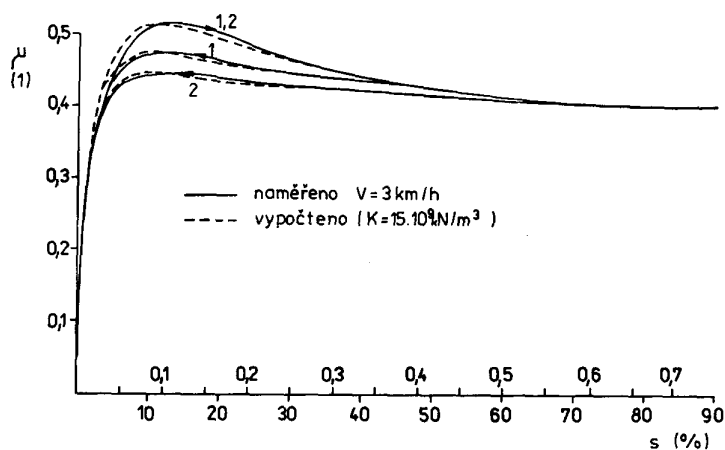
Zatímco průběhy adhezních trakčních charakteristik byly ozřejmeny v [1], o brzdících adhezních charakteristikách je podstatně méně podkladů. Za nejvýznamnější lze považovat zprávu [8] k „Otázce B 164“ vydaná ORE (dnes ERRI) 1985. Tato zpráva Výzkumného a zkušebního ústavu mezinárodní železniční unie v Utrechtu byla zpracována za součinnosti 12 železnic Evropy. Předložená zpráva představuje syntézu jak literárních odkazů tak i aktuálních znalostí o součiniteli adheze, zejména při brzdění.

V podstatě však zjištěné adhezní charakteristiky při brzdění vykazují odlišný průběh oproti trakci. Významný (viz obr. 4) je vzestup v první fázi do bodu  $\alpha$  a to při velmi malém relativním skluzu (cca 1,5%), poté následuje pokles (bod A) a opět vzestup (do bodu B) při skluzu cca 5÷25%. Po dalším zvýšení relativního skluzu křivka přirozeně klesá. Vracíme-li se zpět, křivka má již obvyklý průběh. Rozsáhlé zkoušky řady železničních správ potvrdily enormní nárůst charakteristiky v oblasti mikroskluzu s následujícím prudkým poklesem.

Zásadní rozdíl je v tom, že při trakci křivka ve vzestupné větvi plynule stoupá do maxima a od toho plynule klesá, vratná křivka při cestě zpět leží potom níže tím víc, čím vyšší skluz dosáhneme – viz obr. 5. Právě tato zatím zjištěná odlišnost, či potvrzení této odlišnosti, by mělo být jedním z primárních úkolů experimentálního zkoumání adhezního procesu při brzdění.



Obr. 4



Obr. 5

Významný rozdíl je tedy v základní adhezní charakteristice brzdění, v jejím enormním nárůstu součinitele adheze v oblasti mikroskluzu s následným poklesem a později opět vzestupem, kdy problematická je oblast mikroskluzu do 1,5%. Provedme proto jednoduchý výpočet na základě teorie elastického materiálu a určíme maximálně možnou hodnotu relativního skluzu odpovídajícího vrcholu adhezní charakteristiky.

Výpočet souvisí s užívanými definicemi relativního skluzu. Pro trakční relativní skluz se používají způsoby

$$s_t = \frac{u - v}{v}, \quad (1)$$

$$\text{resp. } s_t = \frac{u-v}{u}. \quad (2)$$

Zatímco pro brzdný skluz to jsou definice

$$s_b = \frac{v-u}{v} \quad (3)$$

$$\text{resp. } s_b = \frac{v-u}{u}, \quad (4)$$

kde

$v$  ..... postupná rychlost [m/s]  
 $u$  ..... obvodová rychlost [m/s]  
 $s$  ..... relativní skluz [1].

Za konstantních kinematických podmínek odvalování a při přenosu tečné síly mezi povrchy pružných těles, dochází k diferenciálnímu posunu elementů povrchu a současně ke změně jejich rychlosti způsobenou deformací. Změnu rychlosti kola  $\Delta u = du/dt$  lze vyjádřit jako

$$\Delta u = \frac{du}{dx} \cdot u \quad (5)$$

a tedy

$$\Delta u = \varepsilon_1 u.$$

Obdobně pro kolej platí

$$\Delta v = s_2 v.$$

Předpokládejme, že k přenosu tečné síly dochází na deformovaných, ale vzájemně neprokluzujících površích. Tato úprava platí pro oblast lpění dotykové plošky. Pro tento případ je vzájemná skluzová rychlost  $w$  nulová a tedy rovnice

$$(1-\varepsilon_1)u - (1+\varepsilon_2)v = w \quad (6)$$

přechází do tvaru pro trakci

$$(1-\varepsilon_1)u - (1+\varepsilon_2)v = 0 \quad (7)$$

a pro brzdění

$$(1-\varepsilon_2)v - (1+\varepsilon_1)u = 0. \quad (8)$$

Použijeme-li definici skluzu (1) pak platí:

$$s v = u - v$$

a po úpravě

$$u = v(1+s),$$

což dosazeno do (3) je

$$(1-\varepsilon_1) \cdot v \cdot (s+1) - (1+\varepsilon_2) \cdot v = 0$$

$$s - s\varepsilon_1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0,$$

kdy velikost deformačního skluzu pro trakci je

$$s_t = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_1}. \quad (9a)$$

Za předpokladu  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$  platí

$$s_t = 2 \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)}. \quad (9b)$$

Analogicky při využití (1) a dosazení do (4) dostaneme výsledek platný pro brzdění

$$s_b = \frac{-\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_2)}, \quad (10a)$$

$$\text{resp. } s_b = -2 \frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)}. \quad (10b)$$

Obdobně pak použitím definice skluzu (2) platí pro trakci

$$s_t = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_2)}, \quad (11a)$$

$$\text{resp. } s_t = 2 \frac{\varepsilon}{(1 + \varepsilon)} \quad (11b)$$

a pro brzdění (3)

$$s_b = \frac{-\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2}, \quad (12a)$$

$$\text{resp. } s_b = -2 \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)}. \quad (12b)$$

Vztahy (9) až (12) současně informují o shodnosti či odlišnosti zjištěných adhezních charakteristik. Z definic plynou určité rozdíly při stanovení hodnoty relativního skluzu  $s$ , které zvláště při vyšších hodnotách  $s$  mohou být významně odlišné.

Srovnatelné výsledky pro trakci a brzdění pro osově souměrné zobrazení trakce a brzdění jsou s absolutně vyšší hodnotou

$$s_t = \frac{u - v}{v} \Leftrightarrow s_b = \frac{v - u}{v}. \quad (13a)$$

S nižší hodnotou skluzu

$$s_t = \frac{u - v}{u} \Leftrightarrow s_b = \frac{v - u}{u}. \quad (13b)$$

Pokud hledáme zobrazení jen v jednom kvadrantu, použijeme

$$s_t = \frac{u - v}{v} \Leftrightarrow s_b = \frac{v - u}{u}, \quad (14a)$$

$$\text{resp. } s_t = \frac{u - v}{u} \Leftrightarrow s_b = \frac{v - u}{v}. \quad (14b)$$

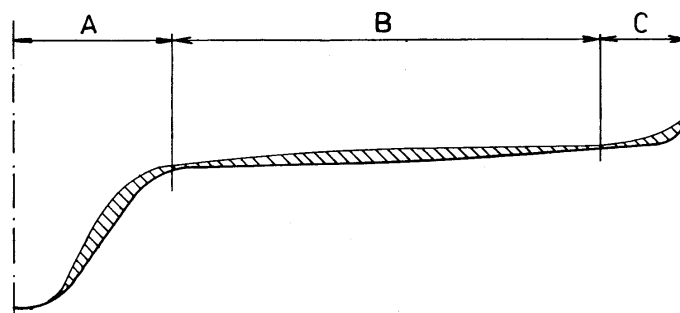
Konstatování je třeba respektovat zejména při porovnávání adhezních charakteristik uváděných různými autory. S pomocí uvedených vztahů (9)÷(12) můžeme odhadnout hodnotu maximálního skluzu. Pro elastický materiál platí však  $\varepsilon = \sigma/E$ . Pokud uvážíme možnou hodnotu napětí  $\sigma$  jako součin normálového tlaku  $p$  a součinitele tření  $\varphi$ , pak platí  $\varepsilon = \varphi p/E$ . Předpokládáme-li přibližně  $\varphi = 0,5$ ;  $p \doteq 1 \cdot 10^{-3}$  MPa;  $E \doteq 2 \cdot 10^5$  MPa, je deformace  $\varepsilon = 2,5 \cdot 10^{-3}$ . Po dosazení do vztahů  $2\varepsilon/(1+\varepsilon)$  resp.  $2\varepsilon/(1-\varepsilon)$  je deformační relativní skluz

$$s_t = 0,00498 \approx 0,5\%,$$

$$\text{resp. } s_b = 0,00501 \approx 0,5\%.$$

Jsou to hodnoty velmi malé a odpovídají starším představám o adhezní charakteristice. Porovnáme-li tento výsledek s naměřenými hodnotami uváděnými v [1] i [8] speciálně pro brzdění z obr. 4, kde dosahovaná hodnota se uvádí trojnásobná, tedy 1,5%, pak musíme konstatovat, že čistě elastické řešení není pro praktickou potřebu vyhovující, což bylo již uvedeno v [4].

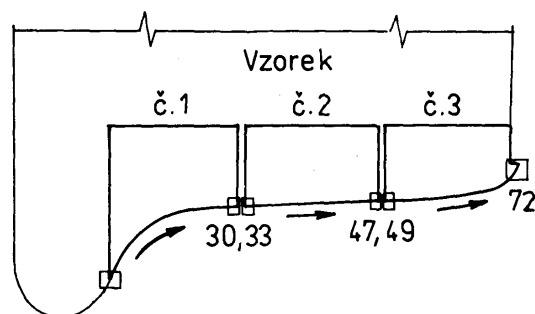
Výsledky vztahů (11) a (12) můžeme částečně pozměnit tím, že uvážíme změny struktury materiálů stýkajících se povrchových vrstev. Situace byla poměrně podrobně zdokumentovaná u jízdnic obrysů vozidel ČD řady 181.



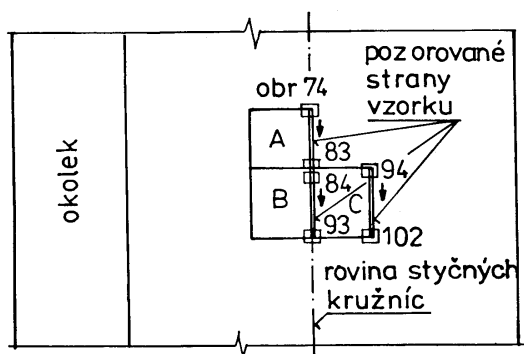
Obr. 6

Na obr. 6 jsou schematicky naznačeny zplastizované oblasti. Pojem plastizace, který obvykle pro strukturální změny používáme, vyjadřuje poruchy struktur i jejich pohyb. Na rozdíl od elastické deformace je plastická deformace proces diskrétní a nehomogenní. V této oblasti neplatí zákon superpozice, protože velikost deformace závisí na předchozích stavech. Zatěžování mohou být způsobena nejen vnějšími účinky ale i účinky vnitřními, např. zbytkovými napětími, způsobenými technologií výroby. Nestačí analýza v daném okamžiku, ale je rozhodující celkový průběh zatěžování. Strukturální změny zasahují do materiálu těles. Zvláště tam, kde jde o kombinaci tepelné únavy a silového působení.

Pro ověření strukturálních změn probíhajících během provozu jízdního profilu kola byly odebrány vzorky segmentu ojeté obruče elektrické lokomotivy ČD a vzorky pro světelnou i elektronovou mikroskopii. Schéma odběru pro světelnou mikroskopii je na obr. 7a v příčném a na obr. 7b v podélném směru. Obdobně byl určen vzorek pro elektronovou mikroskopii. Získaná dokumentace ze světelné mikroskopie je k dispozici na pracovišti.



Obr. 7a



Obr. 7b

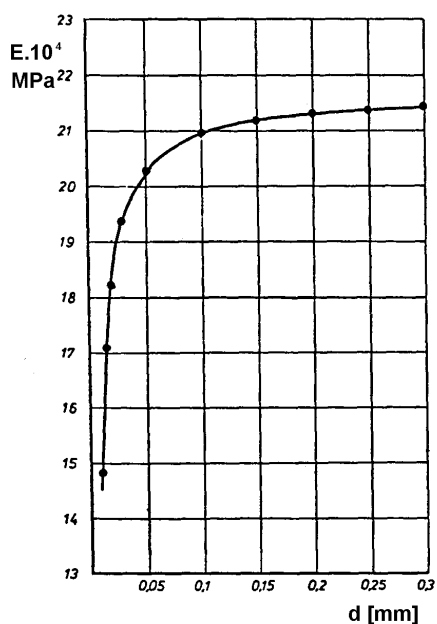
Z metalografického rozboru vyplynulo následující zjištění. Na výbrusech je pozorovatelné poměrně výrazné zpevnění povrchové vrstvy, jako důsledek silového působení kontaktních i tečných složek. Tepelné vlivy se pak projevují ve zjemnění povrchové struktury. Stav povrchové vrstvy jízdní plochy se jeví poškozený v důsledku trhlin – převážně orientovaných kolmo na směr valení. Trhliny sestupují téměř kolmo k povrchu do hloubky materiálu. Podle charakteru trhlin je méně pravděpodobný jejich vznik jako důsledek silového působení (silové únavové zatěžování). Pravděpodobnější příčinou vzniku trhlin se jeví tepelná únava, plynoucí ze zřejmého zdržového

brzdění. Naznačená struktura povrchových trhlin i jejich směrová orientace současně ovlivňuje vlastnosti materiálu v rozhodujících směrech. To se nutně projeví i v částečně odlišných adhezních vlastnostech orientovaných vazeb.

Exaktní matematické řešení je za této situace poměrně obtížné a snadnější postup nabízí experiment. Znamená to tedy sledovat reálný stav povrchové vrstvy materiálu i její postupnou změnu během provozního zatěžování. Jen tak je možno poměrně přesně určit odezvu v adhezních vlastnostech.

Pro praxi není tedy asi podstatné další zpřesňování výpočtu adhezních charakteristik, které vychází z idealizovaných vlastností materiálu kola i kolejnice. Postačující je jednodušší matematický aparát, kde však je možné upravit parametry skutečného stavu povrchových vrstev ve styku.

Alespoň částečný náhled na změnu vlastností materiálu dává zjištění prof. Krauseho (RWTH Aachen) o poklesu modulu pružnosti  $E$ , směrem k povrchu materiálu (obr. 8), kdy byl zkušební vzorek podroben intenzivnímu odvalování.

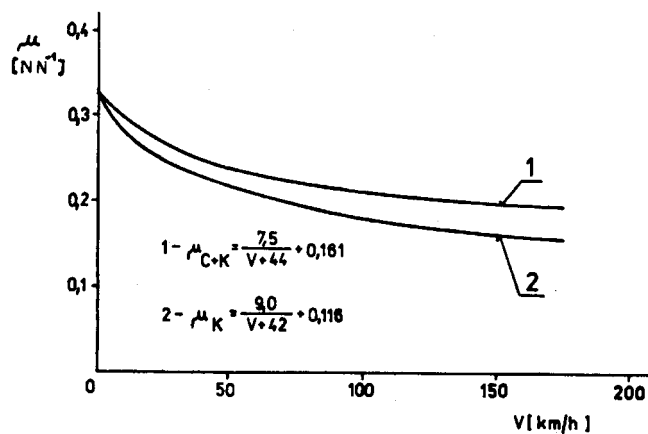


Obr. 8

Pokud bychom ve vztazích (9) až (12) použili  $E = 1,5 \cdot 10^5$  MPa, došlo by ke zvýšení deformačního skluzu zhruba o jednu třetinu. Také toto je hodnota velmi nízká a vysvětluje samozřejmě jen stav, kdy dochází k deformaci, ale ne prokluzu. Ten se začíná rozšiřovat v zadní části plošky s rostoucí tečnou silou. Výsledný měřitelný skluz je pak integrace deformačního skluzu v oblasti lpění a skutečného skluzu v prokluzující oblasti plošky.

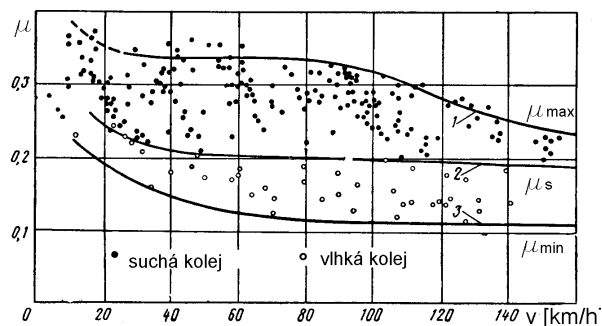
Teoretický rozbor se tím zase komplikuje, protože by bylo potřebné přesně stanovit velikost součinitele tření v oblasti lpění i prokluzu. Je logická představa, že součinitel tření v oblasti prokluzu je nižší, což vede k poklesu maximálně dosažitelného součinitele adheze a nižšímu průběhu křivky v neefektivní části. Tím však není vysvětlen nárůst a opětovný pokles adhezní charakteristiky při brzdění jak je zřejmé z obr. 4. Další obecné rozvíjení jen teoretických představ je asi neúčelné. Výzkum je nutně zaměřit na reálný experiment, tak jak předpokládáme v našem institucionálním výzkumu, stavbou zkušebního stavu. Pomocí něho budeme moci stanovit poměrně přesné průběhy charakteristik.

Částečně zjednodušený, ale v praxi velmi používaný, obraz dávají adhezní charakteristiky typu  $\mu = f(v)$ , tedy závislost součinitele adheze  $\mu$  na rychlosti jízdy  $v$ . Pro trakční potřeby jsou nejpoužívanější závislosti Curtius-Knifflera a Kothera na obr. 9. Jsou to v podstatě střední hodnoty adheze platné pro suchou kolej. Jsou výsledkem shrnutí tehdejších poznatků, Kotherem publikovaných v r. 1940 v časopise Elektrische Bahnen (EB). Rozsáhlé pokusy Curtiuse a Knifflera probíhaly ve válečných letech v Německu na elektrické bezpodvozkové lokomotivě řady E 19, v uspořádání 1'Do1'. Výsledky byly částečně publikovány v r. 1944 v Elektrische Bahnen (EB) a po obnovení časopisu EB v r. 1950.



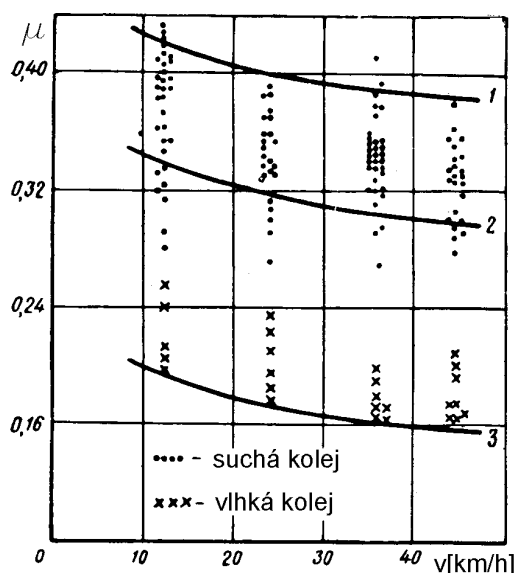
Obr. 9

Na obr. 9 je podána již průměrná „očištěná“ verze respektující v podstatě střední hodnotu součinitele adheze platné pro suchou kolej. Rozptyl naměřených výsledků i dosažené maximální hodnoty pro suchou kolej a naopak minimální hodnoty součinitele adheze pro kolej vlhkou, jsou na obr. 10.



Obr. 10

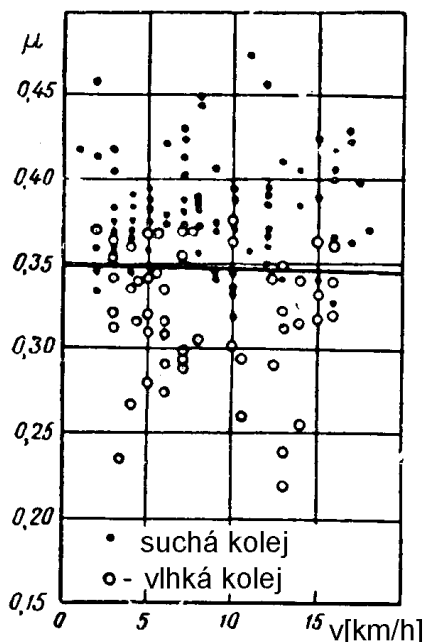
Samozřejmě experimentů bylo provedeno daleko více [9]. Výsledky zkoušek britských železnic (BR) opět v rozmezí suché a vlhké koleje jsou na obr. 11.



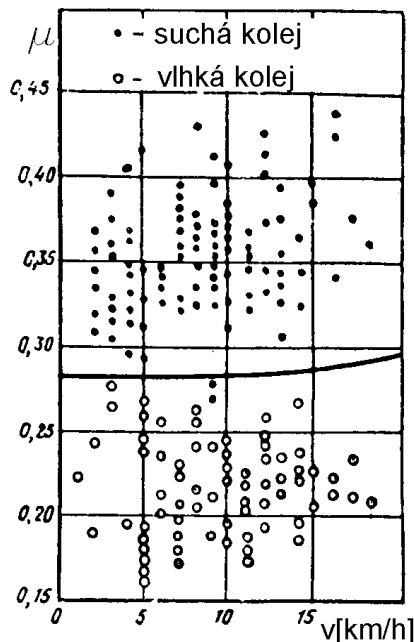
Obr. 11

Na následujícím obr. 12a, b, jsou hledány střední hodnoty pro kolej suchou i vlhkou, provedených belgickými železnicemi (SNCB), pro vozidla se skupinovým (12a) a individuálním pohonem nápravy (12b). Poměrně rozsáhlý experiment francouzských železnic (SNCF) představuje obr. 13 na vozidle se skupinovým



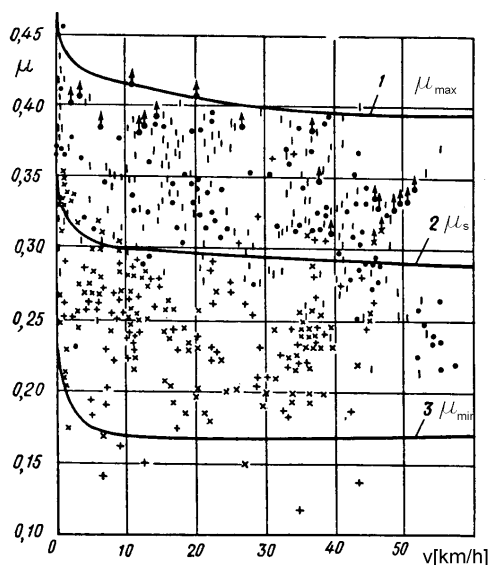


Obr. 12a



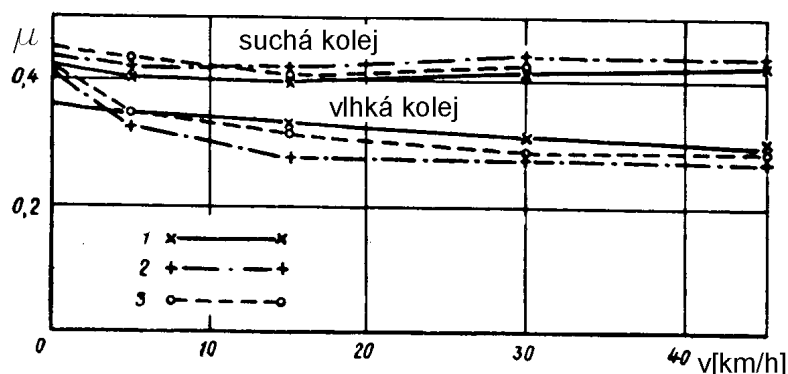
Obr. 12b

pohonem. V období padesátých let se skupinový pohon pokládal za vhodnou alternativu. Totiž u vozidel s individuálním pohonem a tehdejším stavem elektrotechniky resp. elektroniky, byly obtíže s vhodnými protiskluzovými ochranami, které by dovolily optimálně využít vzestupnou větev adhezni charakteristiky.



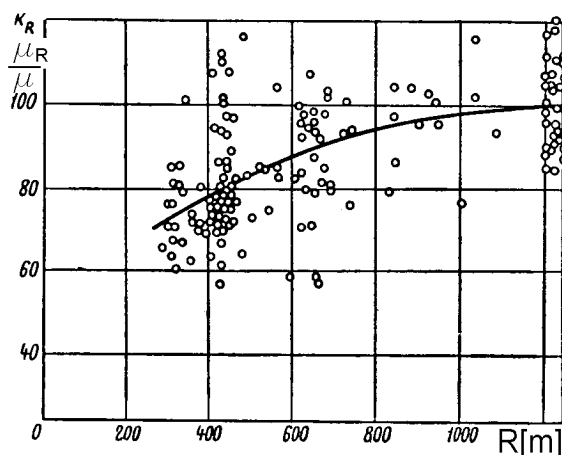
Obr. 13

Další způsob zlepšení adheze spočívá v kompenzaci změn zatížení náprav způsobené klopením podvozku a hledáním formy mechanického optima a sledování vlivu působení, jednak střídavého proudu 16 2/3 Hz (křivky 1), dále s připojením tlumivky (křivky 2) a konečně s jeho vyhlazením (křivky 3). Na obr. 14 jsou to výsledky experimentu švýcarských železnic (SBB) opět pro suchou a vlhkou kolej. Dnes je třeba konstatovat, že úpravy mechanické části pojezdu byly relativně účinné, ovšem současnou elegantnější formu představují elektronické řídicí systémy, které jsou schopny okamžitě přelévát výkon z méně na více zatíženou nápravu.



Obr. 14

Již dříve jsme se zmínili i o vlivu oblouku na hodnoty součinitele adheze. Že tento vliv je obtížně uchopitelný, ukazuje obr. 15, s poměrně velkým rozptylem výsledků. Experiment byl proveden na sovětské lokomotivě VL 22M. Stručně můžeme konstatovat, že zmenšení poloměru oblouku z 1200 m na 350 m přináší pokles součinitele adheze  $\mu$  ze 100% na 75%.

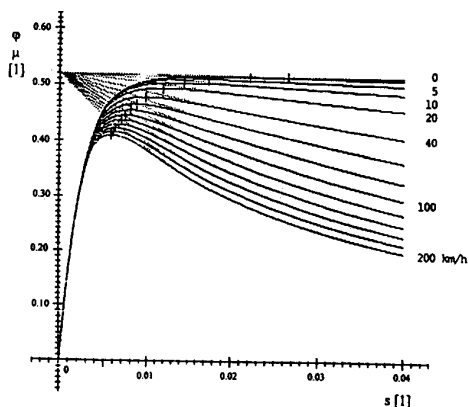


Obr. 15

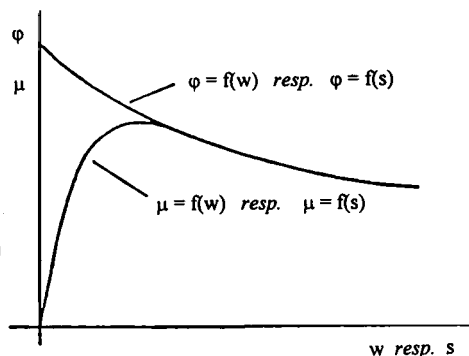
Tolik tedy vysvětlující komentář k vyhlazeným křivkám dle Curtius-Knifflera a Kothera, které i dnes běžně používají výrobci trakčních vozidel i uživatelé, t.j. železniční správy, jako adhezní omezení trakčních charakteristik.

Z hlediska novějších poznatků, našich výzkumů i provedených experimentů, jsou užívaná adhezní omezení pro současný stav kolejové techniky nepřiměřená. Je nutné vzít v úvahu, že trakční vozidla se zásadně změnila ve stavbě pojezdů, zejména využitím asynchronních motorů a moderních pohonů. Změnila se i stavba jízdní cesty. To vše vede nutně ke zvýšení nároků na adhezní schopnosti vozidel.

Již na přelomu 80. a 90. let jsme provedli porovnání experimentálních výsledků na modelovém zařízení s teoretickými výpočty průběhů charakteristik, respektujících vzrůstání adhezní a třecí křivky – obr. 16a, b .

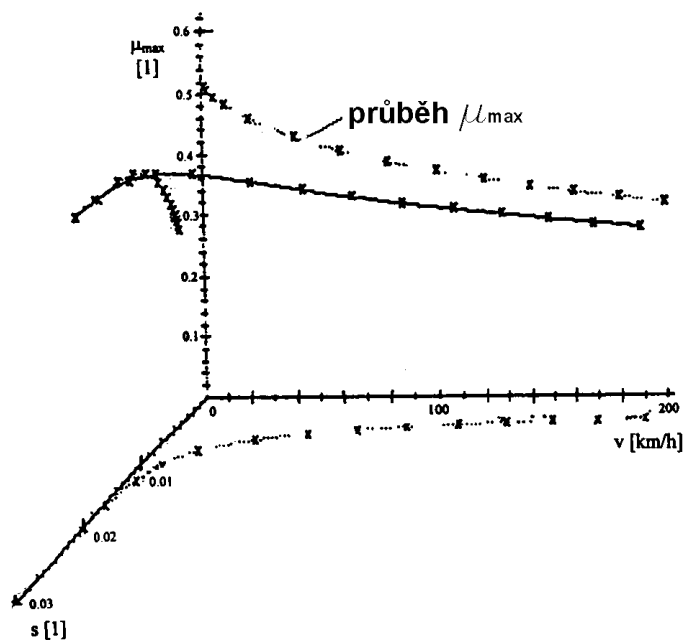


Obr. 16a



Obr. 16b

Z toho byla odvozena obalová charakteristika  $\mu_{\max} = f(v)$  zobrazená na obr. 17.

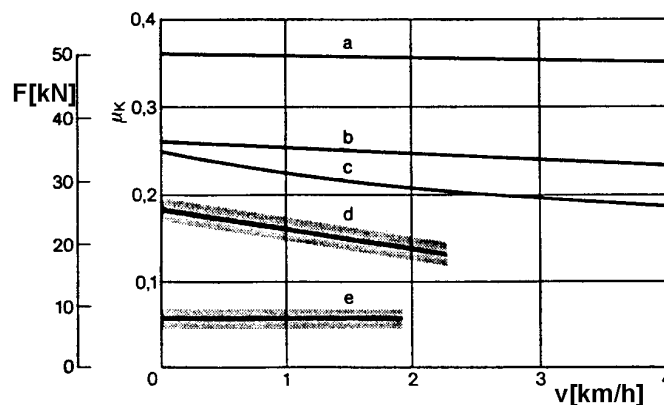


Obr. 17

Při samozřejmě uvažované určité bezpečnosti a jistotě byla, jako rozumný kompromis, navržena opravená formule Curtius-Kniflera uvedená v obr. 9 na tvar

$$\mu = \frac{7,5}{V + 44} + 0,23. \quad (15)$$

Výchozí bod křivky  $\mu = f(v)$  se pro  $v \rightarrow 0$ , posouvá na vyšší hodnotu a charakteristika je o tuto úroveň vyšší po celém průběhu. Že tento návrh je pro průměrné hodnoty adheze na suché koleji oprávněný, dokazuje obr. 18. Na něm jsou znázorněny hodnoty součinitele adheze ze zhoršených podmínek, zejména dle novějších měření Zeevenhovena na holandských železnicích (NS). Křivka a je průběh součinitele adheze na vlhké koleji a pískované; křivka b označuje vlhkou kolej; křivka c představuje starší měření na vlhké koleji dle Müllera; d resp. e jsou průběhy těsně po proklouznutí kola na koleji resp. při vlastním prokluzu kola. Z grafu je patrné, že i na vlhké koleji při rozjezdu a pískování součinitel adheze se pohybuje kolem hodnoty  $\mu = 0,35$  a na vlhké koleji bez pískování neklesá pod  $\mu = 0,25$ .



Obr. 18

Moderní vozidla na suché koleji musí tedy při rozjezdu vykazovat součinitel adheze vyšší než  $\mu_{v \rightarrow 0} = 0,33$ , jak plyne z formulí Curtius-Knifflera a Kothera. Navržená formule (15) se zdá naprosto oprávněná, kdy při rozjezdu dosahuje  $\mu_{v \rightarrow 0} = 0,4$ . To potvrzují i měření na těžkých šestinápravových lokomotivách vyvinutých pro americkou společnost Burlington Northern firmou Siemens. Lokomotivy SD 70 MAC, SD 80 MAC a SD 90 MAC o hmotnosti cca 190 t a výkonech  $P = 3000; 3700; 4475$  kW vykazují rozjezdové tažné síly odpovídající součiniteli  $\mu = 0,414; 0,430; 0,467$  a trvalé tažné síly které odpovídají součiniteli adheze  $\mu = 0,324; 0,343; 0,385$  při rychlosti jízdy  $V = 50 \div 60$  km/h. Lokomotivy jsou určeny pro tažení těžkých nákladních vlaků na 1500 km dlouhé „uhelné trase“ v Texasu. Např. 3 lokomotivy SD 70 MAC přepravují uhlí s nízkým obsahem síry ve 108 vagónech při celkové hmotnosti vlaku 13600 t. Z naznačeného je zřejmé, že pro trakční proces součinitel adheze poskytuje poměrně dostatečnou rezervu pro využití instalovaného výkonu. Navíc i neúspěšný rozjezd nebo změnu tažné síly je možné opakovat.

To ovšem nelze riskovat při procesu brzdění. Je s podivem, že poznatky o limitním součiniteli adheze při brzdění – kdy zajištění bezpečného zastavení, či zpomalení je rozhodující – nejsou v širší míře k dispozici. Souvislost procesu trakce a brzdění je nutné nejprve promítnout do fyzikálně správného souřadnicového zobrazování. Zvláště při přechodu z jednoho režimu do druhého. Zcela obecně můžeme definovat vztah mezi procesem trakce a brzdění ve smyslu původního Carterova řešení [2] i ke vztahu (5), kdy deformace ve směru osy  $x$  pohybu kola je  $\varepsilon_x = du/dx$  a pro trakční sílu platí

$$T = -f 2\varepsilon_x, \quad (16)$$

tedy tažná síla je přes konstantu  $f$  úměrná deformaci. Ve své další práci z r. 1928 Carter vztah (16) pozměňuje na

$$T = -f \gamma, \quad (17)$$

kde  $\gamma$  hodnotí již jako skluz, což je poměr mezi skluzovým a deformačním posuvem.

Veličinu  $f$  blíže definuje jako

$$f = k \cdot [v \cdot l \cdot Q]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T}{T_{max}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (18)$$

Protože předmětem úvah může být délka plošky  $l$  a poměr  $T/T_{max}$ , vztah se zjednodušuje na,

$$f = k_1 (rQ)^{\frac{1}{2}},$$

kde

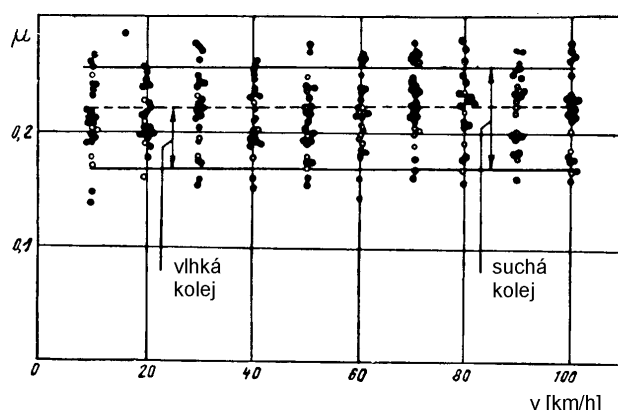
- $r$  ..... poloměr kola
- $Q$  ..... normálová síla.

Musíme ocenit tuto 70 let starou úvahu, kdy Carter první jasně definoval skutečnost, že tečná síla je přímo úměrná skluzu a souvisí s normálovým zatížením a velikostí kola. Autor ve 20. letech samozřejmě vycházel jen z elastické teorie a hodnotu skluzu  $s$  pro  $T_{max}$  odhadl na 0,3%, tedy na hodnotu řádově menší oproti dnešním

znalostem. Ve smyslu původního Carterova vztahu (16) resp. (17), bychom měli pro trakci používat znaménko [-] a pro brzdění znaménko [+]. Skutečná praxe je však právě opačná a je vhodné ji podržet.

Znaménková rozdílnost trakce a brzdění je důležitá pro vyjádření spojitého průběhu funkce adhezni charakteristiky. To znamená, že středově souměrná charakteristika trakce probíhá v I. kvadrantu a brzdění ve III. kvadrantu. Zatímco osově souměrná, jakoby nespojitá, se zobrazuje v I. a II. kvadrantu. Nesmíme ovšem opomenout vztahy (9) až (12) a zejména (13) a (14), aby zobrazení mělo jednotné měřítko.

Vraťme se však k experimentálním podkladům o průběhu závislosti  $\mu = f(v)$  při brzdění. Na prvním místě je nutné uvést výsledky měření Metzkwona z třicátých let, uveřejněné v Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1934, č. 13, s. 247-254 a znázorněné na obr. 19 pro suchou a vlhkou kolej.

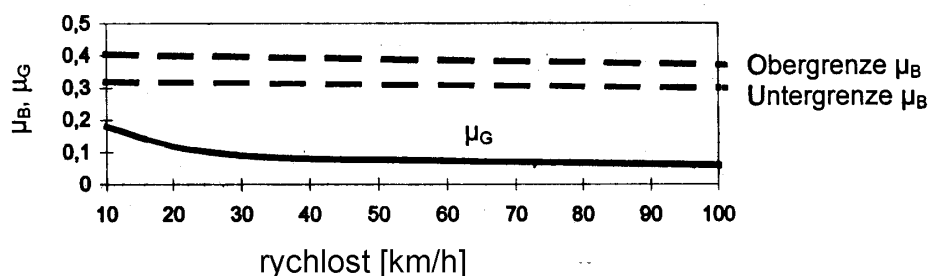


Obr. 19

Experiment byl proveden na speciálně upraveném voze, kde každá náprava mohla být samostatně brzděna zdržovou nebo diskovou brzdou a to až do vzniku skluzu. Zkoušky se konaly na přímém úseku trati na suchých i vlhkých kolejích. Tak bylo získáno poměrně široké pásmo koeficientu adheze. Např. u suchých kolejí v celém rozsahu měření rychlosti se součinitel adheze pohybuje v rozmezí  $\mu = 0,26 \div 0,17$ , zatímco na vlhkých kolejích je zjištěn rozsah  $\mu = 0,22 \div 0,17$ . Na současné poměry je ovšem měřený rozsah jízdní rychlosti do 100 km/h nedostatečný.

O dvacet let později byly konány pokusy v USA, které prokázaly v 70% zkoušek na suché koleji rozsah  $\mu = 0,20 \div 0,12$ ; se střední hodnotou  $\mu_{stř} = 0,16$ . Na vlhkých kolejích pak naměřený rozsah byl  $\mu = 0,10 \div 0,04$  se střední hodnotou  $\mu_{stř} = 0,07$ . Zajímavé bylo zjištění, že na čistých kolejích kotoučová brzda vykazovala vyšší hodnoty součinitele adheze než zdržová, zatímco na vlhkých kolejích vyšší součinitel se dosáhl zdržovým brzděním. Přiměřené použití písku na suchých kolejnicích dosažitelný součinitel adheze se nevyšší a na vlhkých jen na  $\mu = 0,13$ .

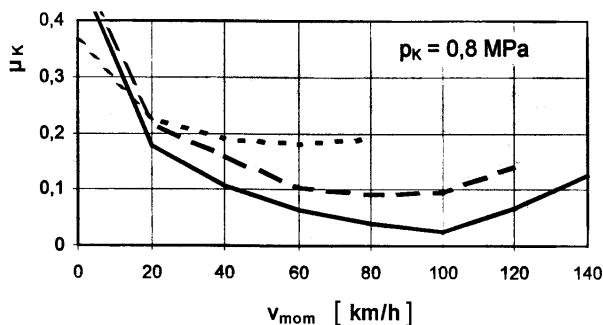
V nejnovějších pramenech [10] se mnohdy uvádějí pouze hraniční pásma adhezniho brzdění či skluzového tření kola. V rozmezí rychlosti jízdy  $V = 0 \div 100$  km/h jsou tyto prameny zřejmé z obr. 20. Čárkovaně je vyznačeno rozmezí součinitele adheze  $\mu_B$  při brzdění, přičemž se neuvádí pro jakou kolej – zřejmě suchou. Součinitel  $\mu_G$  označuje hodnotu tření mezi kolem a kolejnicí při zablokovaném kole. Zdroj pokusů není uveden.



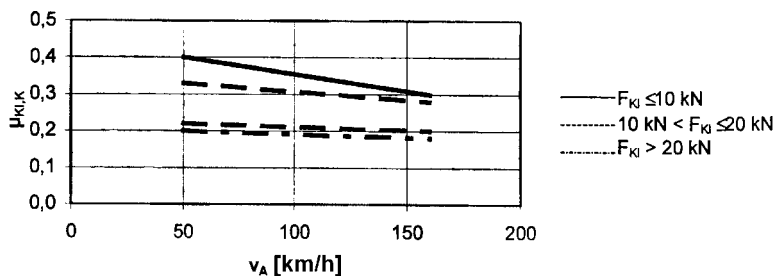
Obr. 20

Praktické využívání součinitele adheze v procesu brzdění, leží ovšem níže než na horní hranici. Z důvodů udržení komfortu pro cestující i respektování horšího stavu koleje je brzdná síla omezena. Brzdová zařízení se nastavují v oblasti rychlostí nad  $V = 20$  km/h u zdrží na hodnotu  $\mu_B \leq 0,15$  a u třecích obložení na  $\mu_B \leq 0,14$ , s možným rozptylem  $0,12 \leq \mu_B \leq 0,15$ . Těmito hodnotami je již fyzikálně dáno omezení brzdové schopnosti vozidel.

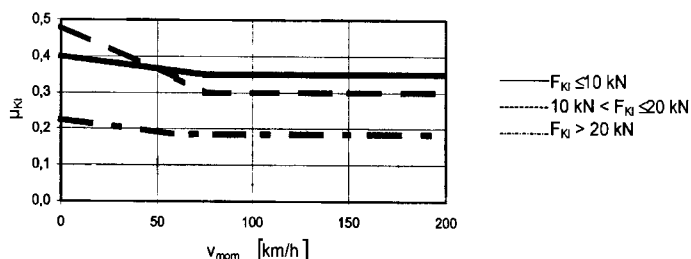
Samozřejmě významnou roli hrají vlastnosti třecích párů brzdových systémů, tj. brzdová zdrž a jízdní plochy kola resp. brzdového obložení a kotouč u kotoučové brzdy. Na obr. 21 je znázorněn rozptyl součinitele tření litinové zdrže pro rychlosti jízdy  $V = 0 \div 140$  km/h, na obr. 22 jsou střední hodnoty součinitele tření nově zaváděných zdrží typu **K** v rozmezí  $V = 50 \div 160$  km/h podle UIC – Fiche 541 příloha 2. Na obr. 23 pak okamžité hodnoty součinitele tření zdrží **K** při rychlosti  $V = 0 \div 200$  km/h podle UIC – Fiche 541 příloha 2.



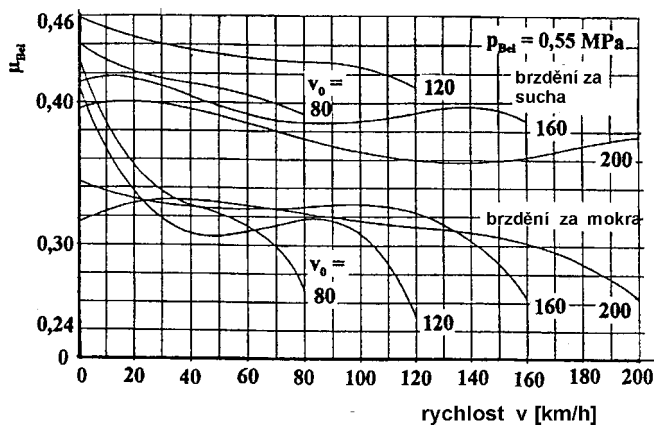
Obr. 21



Obr. 22



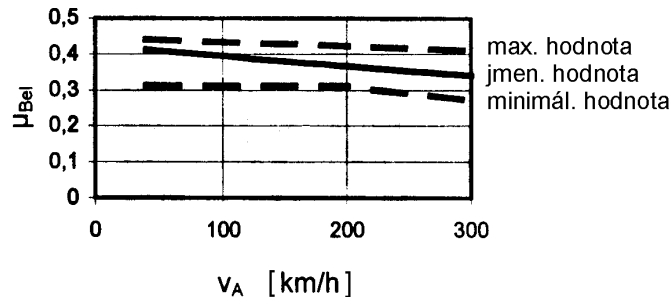
Obr. 23



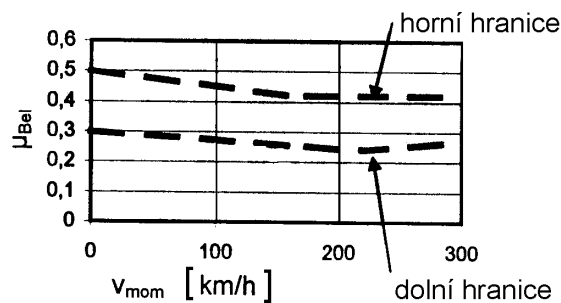
Obr. 24

Na obr. 24 jsou průběhy součinitele tření bezazbestového obložení kotoučové brzdy při brzdění za sucha i mokra, pro rychlosti  $V = 0 \div 200$  km/h.

Oblast rozmezí i vyšších rychlostí je pro kotoučové brzdy zachycena na dalších obrázcích. Obr. 25 znázorňuje pásmo rozptylu součinitele tření kotoučové brzdy při brzdění na sucho podle UIC-Fiche 541, příloha C. Na obr. 26 pak předepsané okamžité hodnoty součinitele tření kotoučové brzdy při brzdění na sucho dle UIC – Fiche 541, příloha 2.b.



Obr. 25



Obr. 26

Povšimněme si nyní podrobněji dalších zjištění, která proces brzdění v souvislosti s adhezí provázejí. Je všeobecně známo, že zdržové brzdění pomocí litinových zdrží součinitel adheze zlepšuje. Jako optimální hodnota se uvádí síla 20 kN pro jednu zdrž. Naproti tomu zdrže z organických třecích materiálů, např. RUBOS, součinitel adheze snižují. Ze zkoušek plyne pokles o cca 15%. Další vlivy způsobující odchylky ve využití adheze pro brzdění jsou dosti významné. Sem patří hustota provozu. Málo pojižděné kolejnice, kde se vyskytují oxidy oceli či hydroxidy pocházející z koroze, ale i výfukové plyny ( $SO_2$ ) z dieselové trakce a navíc za přítomnosti vlhkosti, vykazují velice nízký součinitel adheze ( $\mu = 0,03$ ).

Vliv vykazuje i způsob provozované trakce. Elektrická trakce vykazuje zvýšení střední hodnoty  $\mu_{stř.}$  o 0,04 oproti trakci dieselové. Přisuzuje se to přítomnosti částic oleje i nafty. Další zhoršení brzdící adheze přináší přítomnost nečistot ulpívajících na povrchu kolejnice. Oproti tomu je málo důkazů o tom, že by znečištění životního prostředí zhoršilo adhezi. Nejvýznamnější znečišťující faktor představuje spadlé listí, zejména za přítomnosti vlhkosti. Byla zjištěna vrstva rozdrčeného listí o tloušťce  $15 \div 50 \mu m$ , která spolu s vlhkostí snížila hodnotu součinitele adheze na  $\mu = 0,018 \div 0,040$ . Zlepšující vliv v tomto případě přináší jen využití magnetické třecí brzdy, která zlepšuje výše uvedený součinitel adheze na dvojnásobek.

Pokud se týká prostředků pro zlepšování adheze, tak na prvním místě zůstává pískování přinášející její zlepšení, zejména na vlhkém povrchu. Tento známý pozitivní účinek pískování při brzdění se u vysokých rychlostech (200 km/h.) neprojevuje. Znatelný je pod hranicí  $V = 140$  km/h., kdy za srovnatelných podmínek znečištění koleje bylo dosaženo zkrácení brzdě dráhy o 20% při pískování 720 g/minutu.

Samotné čištění koleje tlakovou vodou bylo neúčinné, oproti použití speciálních prostředků (BR – písková pasta SANDITE), které zlepšující výsledky přinesly. Další prostředky jako např. Mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) či Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ ) zlepšující adhezi ve velmi špatných podmínkách, jsou reálně málo využitelné.

Velmi problematický byl pokus zda je možné zlepšit brzdící proces na takto znečištěné koleji blokováním kol – tedy vypnutím protiskluzových ochranných zařízení. Tento drastický experiment podnikla SNCF na speciálním úseku

a zjistila jeho malou účinnost při rychlosti nižší od  $V = 120$  km/h. Při  $V = 160$  km/h. byl způsob neúčinný. Samozřejmým důsledkem byla plochá místa na kolech.

Povětrnostní vlivy patří k významným. Všeobecně známá je skutečnost, že zejména vlhká kolej za mlhy při měření vykazuje nejnižší součinitel adheze. Déšť působí jen snížení průměrně dosažitelného součinitele adheze. Hodnota, která za běžných podmínek se pohybuje v rozmezí  $\mu = 0,27 \pm 0,06$ , klesá za deště na úroveň  $\mu = 0,21 \pm 0,05$ . Pomocí brzdových zkoušek bylo pak stanoveno, že při požadovaném rozmezí zpoždění  $a_b = 0,7 \div 1,2$  m/s<sup>2</sup> roste riziko skluzu na 1÷42%. Problematika si vyžádala poměrně rozsáhlé pokusy, které v podstatě potvrdily měření Metzko z 30. let, kdy konstatoval, že suchá i v podstatě omytá kolej vykazuje srovnatelnou hodnotu součinitele adheze a spodní hranice leží na  $\mu = 0,17$ . Počátek deště, tedy vlhká kolej, způsobí pokles na hranici  $\mu = 0,08$ . Na vlhké koleji součinitel adheze (vlastně již součinitel tření) zablokovaného kola klesá v rozmezí rychlosti  $V = 30 \div 100$  km/h. na hodnotu  $\mu = 0,04 \div 0,06$ . Na vlhkost koleje působí i relativní vlhkost vzduchu. Znatelný pokles součinitele adheze je možné zaznamenat při nárůstu relativní vlhkosti vzduchu nad 85%.

Vliv rychlosti jízdy má dosti podstatný účinek. To bylo prokázáno v řadě teoretických i experimentálních prací. Je zajímavé, že novější pokusy dávají zapravdu našim poznatkům, že zvýšení rychlosti nevede až k radikálnímu poklesu  $\mu$ , jak bývalo dříve predikováno.

Růst specifického tlaku ve stykové ploše kola i kolejnice snižuje dosažitelný součinitel adheze, ne však zásadním způsobem. Při dvojnásobném zvýšení nápravové normálové síly, klesá součinitel adheze o hodnotu 0,05. Styková ploška, zejména její rozměry hrají důležitou roli, jak jsme prokázali v [1]. Rozhodující je zejména podélný rozměr, který ovlivňuje strmost vzestupné větve. Zvýšení vede nejen k růstu strmosti vzestupné větve, ale druhotně ovlivňuje i zvýšení součinitele adheze. V provozu byl zkoumán vliv oblouku koleje a konstatován pokles součinitele adheze se zmenšením poloměru oblouku. Tato tendence se počala objevovat při  $R < 670$  m. Další vlivy na pokles součinitele lze očekávat vlivem svislých či příčných nerovností koleje, kdy rozkmitání vozidla vede k dynamickým silovým a třecím změnám ve styku kola s kolejnicí.

Kombinované brzdění, tj. současné využití kotoučové a zdržové brzdy na dvojkolí, vede ke zlepšení adheze. Tato tzv. „čistící zdrž“ s přítlakem 0,5 kN byla použita na rychlovlacích Japonska, ale je užitá u některých moderních výkonných lokomotiv. Tato oblast se úzce dotýká i našeho výzkumu, kde mimo čistící efekt povrchu by bylo možné, při vhodné volbě tvaru a přítlaku zdrže, eliminovat martenzitické struktury vznikající v oběžné ploše. Ty se mohou projevit jako zdroje poruch povrchových vrstev kola s dalšími negativními důsledky.

Lektoroval: Ing. Václav Nováček

Předloženo v květnu 2001.

#### Literatura

- [1] Čáp J.: Teoretický rozbor tečných a interaktivních sil ve styku kolo kolejnice. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, 5 (1999), s. 29-47.
- [2] Carter F.W.: On the Action of a Locomotive Driving Wheel, Proc.Roy.Soc. 1926, ser. A, vol 112, s. 151-157.
- [3] Kalker J.J.: On the rolling contact of two elastic in the present of dry friction. Thesis. Delft 1967.
- [4] Saumweber E., Winkle G.: Eine neue Gleitschutzgeneration für die Eisenbahn, Elektrische Bahnen, 9 (1981), s. 331-336.
- [5] Freibauer L.: Adheze kola vozidla na dráze. 7.Vědecká konference VŠDS Žilina 1983, str. 214÷219.
- [6] Čáp J.: Modelové vyšetřování závislosti skluzové charakteristiky na změnách zatížení dvojkolí, Strojírnoství 1974, č. 3, s. 178-183.
- [7] Seqieth Ch.: Die AEG Hochleistungslokomotive 12X, Eisenb.Tech.Rundschau (ETR) 1995, č. 1÷2, s. 73÷80.
- [8] N.N: Haftreibung bei Bremsen und Gleitschulzeinrichtung. Frage B 164, ORE, Utrecht 1985.
- [9] Isajev I. P.: Slučajnyje faktory i koeficijenty sceplenija, Transport, Moskva 1970.
- [10] Gralla D.: Eisenbahnbremstechnik, Werner Verlag, Düsseldorf 1999.



## **Resumé**

### **ADHEZNÍ LIMITY PROCESU TRAKCE A BRZDĚNÍ**

Jaroslav ČÁP

V příspěvku jsou sledovány významné rozdíly, odlišnosti a působící vlivy při procesu trakce a brzdění kolejového vozidla. Tyto se projevují v dosažených hodnotách součinitele adheze i relativního skluzu. Jsou hledány možnosti teoretického i experimentálního studia mechanismu adheze a vzájemné korelace obou procesů.

## **Summary**

### **ADHESION LIMITS OF TRACTION AND BRAKING PROCESS**

Jaroslav ČÁP

The paper deals with significant differences, dissimilarities and operating influences during the traction and braking process of railway vehicle. The mentioned factors are displayed in the reached values of adhesion coefficient as well as relative slip. The possibilities of theoretical and experimental investigation of adhesion mechanism and mutual correlation of both these processes are in search.

## **Zusammenfassung**

### **ADHÄSIONSGRENZWERTE BEIM ZUGBETRIEB-UND BREMSENPROZESS**

Jaroslav ČÁP

Im Beitrag werden bedeutende Unterschiede, Differenzen und wirkende Einflüsse beim Prozess des Zugbetriebes und Bremsens eines Schienenfahrzeuges untersucht. Sie äußern sich in Haftreibwert und im Wert des relativen Schlupfes. Es wird nach Möglichkeiten des theoretischen und experimentellen Studiums des Adhäsionsmechanismus und gegenseitiger Korrelation beider Prozesse gesucht.