



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**METODY A ZAŘÍZENÍ PRO ZJIŠŤOVÁNÍ KOEFICIENTU
TŘENÍ**

METHODS AND DEVICES FOR FRICTION COEFFICIENT MEASURING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Král

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Lukáš Král**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metody a zařízení pro zjišťování koeficientu tření

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o literární rešerši zaměřenou na současný stav poznání v oblasti zjišťování součinitele tření. Stanovení třecích podmínek je nezbytnou součástí výpočtů a analýz tvářecích procesů.

Cíle bakalářské práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na měření součinitele tření,
- popsání v současnosti používaných principů i konstrukčních řešení zařízení pro určování součinitelů tření včetně zhodnocení dopadů na tvářecí procesy.

Seznam doporučené literatury:

BHUSHAN, B. Introduction to tribology. New York: John Wiley, 2002. ISBN 04-711-5893-3.

BLAU, P. J. Friction science and technology: from concepts to applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. ISBN 978-142-0054-040.

FOREJT, M. a M. PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, W. F. a R. M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KRÁL Lukáš: Metody a zařízení pro zjišťování koeficientu tření

Práce se zaměřuje na metody a zařízení pro měření koeficientu tření. Nejprve uvádí vlivy na některé operace objemového a plošného tváření. Následně poskytuje stručný přehled jednotlivých technologických metod měření a obsahuje základní popis konstrukce nepoužívanějších tribometrů.

Klíčová slova: tření, koeficient tření, měření, tribometr, metody

ABSTRACT

KRÁL Lukáš: Methods and devices for friction coefficient measuring

This thesis focuses on methods and equipment for measuring the friction coefficient. First, it presents the effects on some solid and flat forming processes. Subsequently, it gives a brief overview of individual technological methods of measurement and contains a basic description of construction of the most used tribometers.

Keywords: friction, friction coefficient, measuring, tribometer, methods

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁL, Lukáš. *Metody a zařízení pro zjišťování koeficientu tření* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124296>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 10.9.2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce a své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

ÚVOD.....	8
1 TŘECÍ SÍLA A KOEFICIENT TŘENÍ	9
1.1 Statické a dynamické tření	9
1.2 Typy tření dle povrchu	11
2 DOPADY TŘENÍ NA TVÁŘECÍ PROCESY	13
2.1 Vliv tření na procesy objemového tváření	13
2.2 Vliv tření na procesy plošného tváření.....	14
3 METODY A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ KOEFICIENTU TŘENÍ	16
3.1 Základní fyzikální metody	17
3.1.1 Metoda nakloněné roviny	17
3.1.2 Metoda kyvadla	17
3.2 Technologické metody pro zjišťování koeficientu tření	18
3.2.1 Zkouška petchování prstence	19
3.2.2 Petchovací zkouška plošného tlaku Ford-test.....	21
3.2.3 Twist-compression test.....	22
3.3 Podpora numerických metod pro simulace třecího kontaktu	23
3.4 Pokročilé metody využívající tribometrů a jejich konstrukce.....	24
3.4.1 Pin-on-disk	25
3.4.2 Tribometry Pin-on-flat	26
3.4.3 Zařízení Pin-on-cylinder	26
3.4.4 Thrust Washers.....	26
3.4.5 Pin-into-bushing	27
3.4.6 Crossed Cylinders	27
3.4.7 Four-Ball	28
3.4.8 Zařízení Pin and Vee Block.....	28
3.4.9 Zařízení Timken	29
4 ZÁVĚRY	30

Seznam použitých zdrojů

Seznam obrázků

ÚVOD [7], [3]

Tření patří mezi základní fyzikální jevy a je jedním ze stěžejních faktorů pro obecné výpočty v inženýrské praxi. Všichni se s ním dennodenně setkáváme, aniž by si to někteří z nás uvědomovali. Stojí doslova za každým naším krokem, ať už se jedná o tření podrážky při styku obuvi se zemí, či kontakt mezi kostí a chrupavkou v kolenním kloubu. Bez tření by nebylo možné chodit, ale ani například zvedat předměty.

Ve strojírenské praxi obecně převažuje situace, kdy je tření považováno za nežádoucí jev, jelikož v obecném kontaktu způsobuje ztrátu energie a opotřebení pohyblivých součástí. Příkladem může být opotřebení ložisek (obr. 1), či těsnění. To může mít za následek zhoršení pracovních tolerancí, což může vést až k úplnému selhání stroje. V takových případech je pak hlavní snahou konstruktérů tření minimalizovat.

Oproti tomu existují i případy, kdy je prospěšné. To platí typicky pro brzdy (obr. 2) a spojky, nebo součásti fungující na přenosu síly třením (jako řemenové pohony), či styk vozovky se vzorkem pneumatik. V těchto případech je snaha o maximalizování tření.

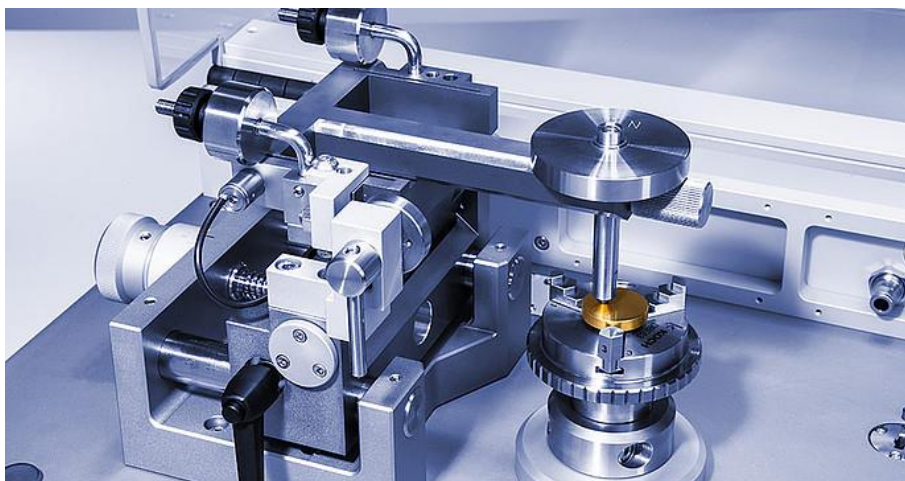
Ať už je tedy tření pro konkrétní aplikaci žádoucí nebo ne, je zásadní znát jeho hodnoty pro konkrétní materiály a podmínky. Toho lze docílit celou řadou testů a experimentů, a to jak specializovanými měřicími zařízeními (obr. 3), tak i metodami technologickými. Právě přehledem metod a základními principy konstrukce měřicích zařízení se zabývá tato práce.



Obr. 1 Řez kuličkovým ložiskem [12]



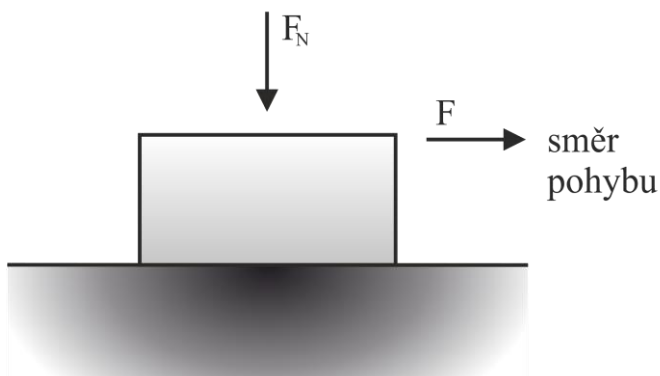
Obr. 2 Brzdový kotouč s čelistí [11]



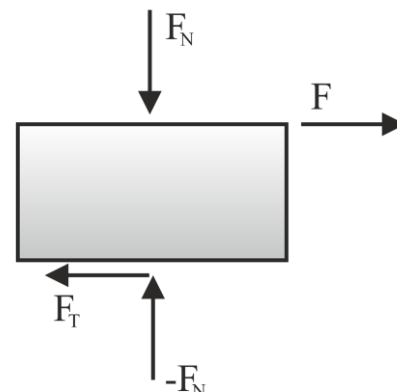
Obr. 3 Tribometr typu pin-on-disk [15]

1 TŘECÍ SÍLA A KOEFICIENT TŘENÍ [1], [3], [4], [13], [7]

Pokud jsou pevná tělesa společně zatížena nenulovou normálovou silou a působí na ně další síla, která má směr rovnoběžný s dotykovou plochou (tangenciální síla) (obr. 4 a obr. 5), pak může nebo nemusí dojít k posuvu nebo klouzání v závislosti na tom, zda dokáže použitá síla překonat třecí sílu, která působí proti ní. Z toho vyplývá definice třecí síly jako odporové síly tečné k rozhraní mezi dvěma tělesy, pokud se jedno těleso při působení vnější síly pohybuje nebo má tendenci se pohybovat vůči druhému.



Obr. 4 Těleso konající smykové tření [3]



Obr. 5 Síly působící na těleso při smykovém tření [3]

F ... tangenciální síla působící ve směru pohybu tělesa

F_N ... normálová síla

F_T ... třecí síla

Tření není materiálová vlastnost, je to reakce systému. Pokud jsou dva pevné povrchy čisté a bez chemických filmů a adsorbátů, dochází k vysokému tření. Povrchové nečistoty nebo tenké filmy ovlivňují tření. U dobře promazaných povrchů je obecně pozorována slabá adheze a tření, avšak přítomnost malého množství tekutiny na rozhraní vede k adhezi zprostředkované kapalinou, což může vést k vysokému tření, zejména mezi dvěma hladkými povrchy.

Koeficient tření je pak definován jako poměr síly odolávající tangenciálnímu pohybu mezi dvěma tělesy k normálové síle, která je navzájem stlačuje.

1.1 Statické a dynamické tření [4], [3]

Díky detailním experimentálním výzkumům bylo určeno, že třecí síla F_t mezi dvěma tělesy, která jsou vzájemně stlačena normálovou silou F_N , vykazuje v hrubé aproximaci následující jednoduché vlastnosti:

- **Statické tření:** K uvedení tělesa ležícího na rovnoměrném povrchu v klidovém stavu do pohybu musí být překonána kritická síla, což je síla statického tření F_s . Tato síla je úměrná normálové síle F_N . Platí vztah:

$$F_s = \mu_s \cdot F_N \text{ [N]} \quad (1.1)$$

kde: μ_s – koeficient statického tření [-]

Koeficient statického tření je závislý na kombinaci kontaktních materiálů, nicméně nevykazuje téměř žádnou závislost na drsnosti kontaktních ploch.

- **Dynamické tření:** F_D je odporová síla působící na těleso po překonání statického tření. Francouzský fyzik Charles-Augustin de Coulomb experimentálně určil, že dynamické tření nevykazuje žádnou podstatnou závislost na kontaktní ploše nebo drsnosti povrchu a současně je úměrné normálové síle F_N . V některé literatuře může být označováno pojmem kinetické tření. Platí vztah:

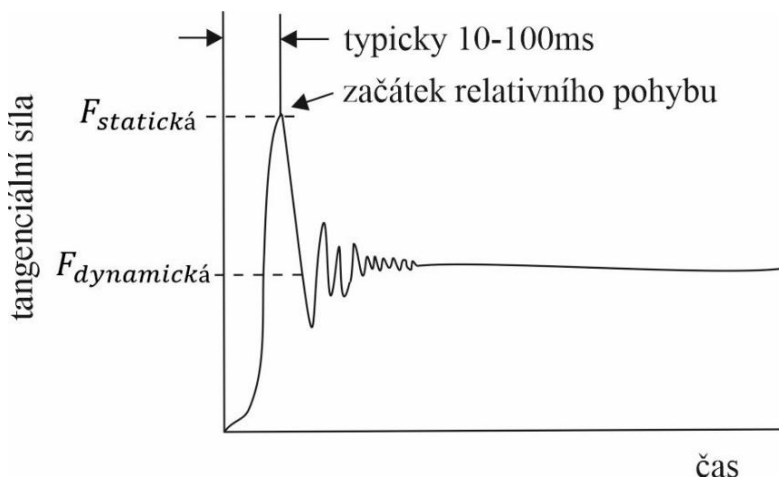
$$F_d = \mu_d F_N [N] \quad (1.2)$$

kde: μ_d – koeficient dynamického tření [-]

Tento zákon dává pouze hrubý přehled vlastností suchého tření. Podrobnější analýza ukazuje, že statické a dynamické třecí síly mají stejný původ a nelze je v mnoha mechanických problémech posuzovat samostatně. Rozdíl mezi statickými a kinetickými koeficienty tření se tedy jeví jako relativní. Často je přechod ze statického na kluzný kontakt nepřetržitý (jako je tomu u poháněného kola) nebo „statické tření“ vyvstává jako kluzné tření při velmi nízké rychlosti (jako v případě tření gumového povrchu, například při kontaktu gumové pneumatiky s vozovkou). Následující tabulka (tab. 1) udává koeficienty statického a dynamického tření pro některé kombinace materiálů.

Tab. 1 Hodnoty koeficientu tření některých kovů, slitin a skla [21]

Materiál 1	Materiál 2	μ_s	μ_d
Hliník	Hliník	1,05 – 1,35	1,4
Hliník	Ocel	0,61	0,47
Měď	Šedá litina	1,05	0,29
Měď	Ocel	0,53	0,36
Šedá litina	Šedá litina	1,1	0,15
Zinek	Šedá litina	0,85	0,21
Sklo	Nikl	0,78	0,56
Ocel	Ocel	0,78	0,42



Obr. 6 Závislost tangenciální třecí síly na čase [3]

1.2 Typy tření dle povrchu [1], [3], [16]

Dalším kritériem, podle kterého lze tření dělit je typ kontaktu mezi povrchy vystupujících těles. Tímto způsobem se tření dělí do čtyř typů na:

- **Suché tření**, také zvané „Coulombovo“ tření. Jak jeho název napovídá, popisuje jev, který nastává při přímém styku dvou suchých povrchů bez přítomnosti mazadla, když se pohybují nebo mají tendenci se pohybovat vůči sobě navzájem. Dochází k opotřebení kluzných ploch, k zahřívání a zadírání. Koeficient tření zde nabývá hodnot od 0,5 do 1. Například při tváření se tento typ tření téměř nevyskytuje, jelikož stykové plochy bývají znečištěny.
- **Mezní tření** je charakterizováno přítomností velmi tenké vrstvy mazadla ($\approx 1\mu\text{m}$) mezi stýkajícími se povrchy. V případě kovových povrchů dochází i k částečnému kovovému styku hrotů povrchových nerovností a k porušení tenkého mazacího filmu. Tento tenký mazací film funguje na základě mezimolekulárních sil, nepopisují ho zákony hydrauliky, ale snižuje tření a omezuje možnost vzniku svarů.
- **Hydrodynamické tření**, někdy označované také jako „kapalinné“ tření, vzniká při dokonalém oddělení ploch vrstvou mazadla, která podléhá zákonům hydrodynamiky. Tření je zde oproti předchozím případům nepatrné a kluzné plochy jsou bez opotřebení nebo jen s minimálním opotřebením. Hydrodynamické tření je doménou ložiskových povrchů a u tvářecích procesů nebývá obvyklé. Hydrodynamický součinitel tření je definován následovně:

$$f_{dyn} = \frac{v \cdot \nu_f}{h \cdot p} \quad (1.3)$$

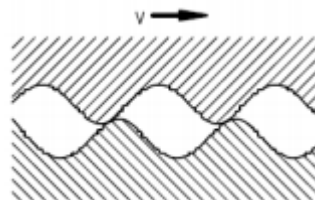
kde: ν_f - konstantní kluzná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

ν - koeficient dynamické viskozity [-]

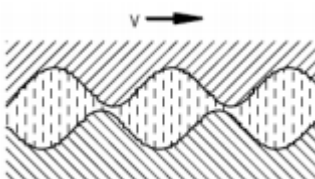
h - tloušťka vrstvy mazadla [mm]

p - měrný tlak [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]

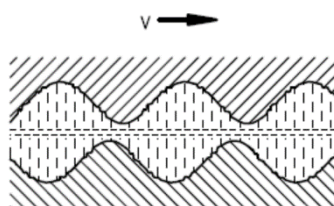
- **Smíšené tření** je kombinací mezního a hydrodynamického tření. Jedná se o nejtypičtější druh tření při tvářecích procesech a nastává u všech technologií používaných při tváření za studena. Velikost součinitele tření se může měnit v širokém rozsahu. Podle druhu použitého mazadla, druhu a jakosti tvářecích ploch se může při tváření za studena součinitel tření pohybovat v rozmezí 0,2 až 0,04.



Obr. 7 Suché tření [16]

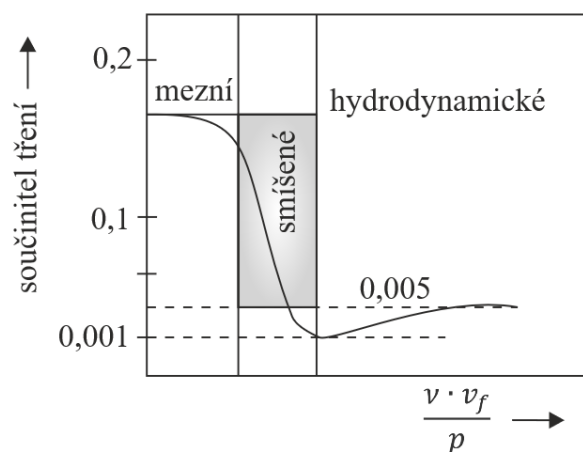


Obr. 8 Mezní tření [16]



Obr. 9 Hydrodynamické tření [16]

Z technologických podmínek mají na velikost součinitele tření rozhodující vliv především teplota, rychlost deformace a měrný (dotykový) tlak při uplatnění fyzikálních vlastností chemického složení materiálu. Průběh přechodu mezního tření na hydrodynamické je zobrazen na tzv. Striebeckově diagramu (obr. 7). Jedná se o křivku závislosti součinitele tření na podílu součinu rychlosti a viskozity ku kontaktnímu tlaku.



Obr. 10 Striebeckův diagram oblastí tření [1]

2 DOPADY TŘENÍ NA TVÁŘECÍ PROCESY [1], [40], [41]

Vnější tření mezi tvářeným materiálem a nástroji je průvodním jevem všech tvářecích pochodů a ve tváření plní většinou úlohu pasivního činitele, který brzdí rozvoj plastické deformace, zvyšuje potřebnou přetvárnou práci a způsobuje opotřebení nástrojů.

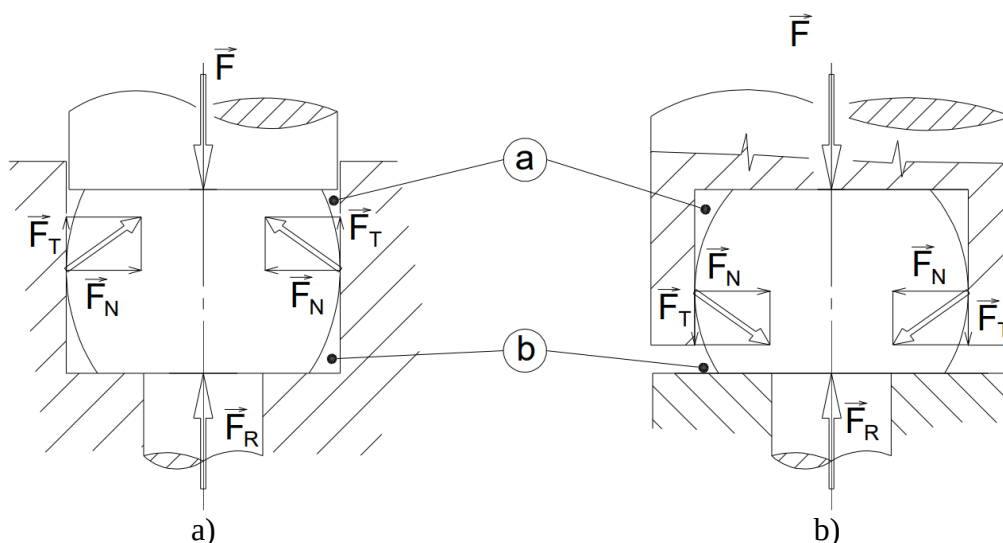
Podmínky mezifázového tření a tok materiálu jsou stále hlavními problémy v oblastech tváření, vědy o materiálech a tribologie. Tření v procesech tváření kovů je velmi zásadní, jelikož společně s materiálem ovlivňuje plastické tváření materiálů, množství pracovních tlaků a tvářecí síly procesů. Vede ke zvýšení spotřeby tvářecí síly (energie) a ke snížení životnosti nástroje. Dále má vliv na kvalitu produktu, ať už se jedná o povrchovou úpravu, vnitřní strukturu anebo životnost produktu. Třecí jevy zahrnují velmi složitou situaci během tvářecích procesů, které vyžadují přesné popisy a experimenty k ověření jednotlivých modelů. Aby bylo možné kvantifikovat třecí sílu, je třeba provést širokou škálu měření.

V procesech tváření objemových kovů se podmínky kontaktního tření během procesu neustále mění a představují složitý analytický problém, který ztěžuje získání spolehlivého matematického modelu pro popis kontaktního tření.

2.1 Vliv tření na procesy objemového tváření [1], [47], [48]

Vliv tření na procesy objemového tváření lze ukázat na příkladu pěchování. Pěchování je jedním z procesů volného kování, což je jeden z nejstarších způsobů zpracování kovů vůbec. Při pěchování dochází k plastické deformaci materiálu mezi dvěma plochými nebo tvarovými čelistmi, respektive v dutině. I když se jedná o jeden z nejjednodušších tvářecích přetvárných procesů je pěchování na druhé straně energeticky nejnáročnější kovářskou operací. Využívá se buď jako přímá kovářská operace, nebo jako předběžná operace pro prokování materiálu.

Právě na pěchování lze demonstrovat jak případ škodlivosti, tak i prospěšnosti tření pro vlastní technologický proces. První jev nastává při pěchování v dutině lisovnice (podle obr. 11 a) Od okamžiku dotyku tvářeného kovu se stěnou lisovnice vnější tření zvětšuje potřebnou pěchovací sílu a uplatňuje se jako pasivní odpor. Naopak při pěchování v dutině pěchovníku (obr. 11 b) působí třecí síly jako aktivní a vnější tření zmenšuje primární pěchovací sílu. V obou případech působí třecí síly proti pohybu tvářeného kovu.

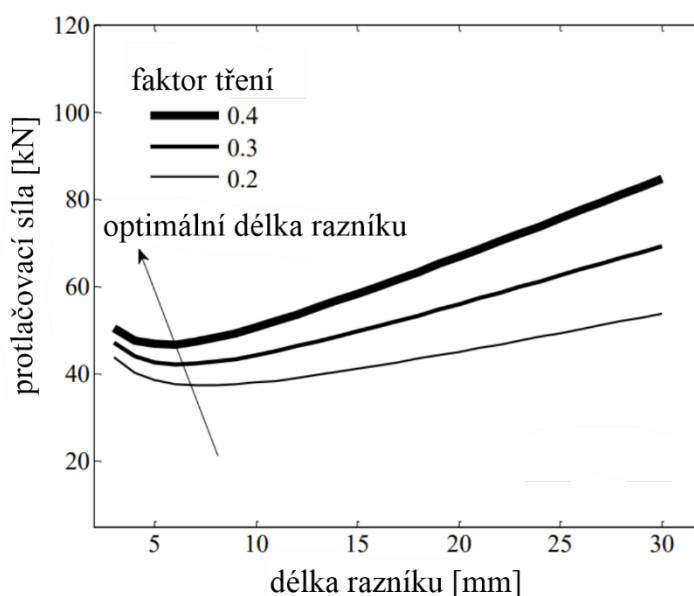


Obr. 11 Vliv tření na operaci pěchování [46]

2.2 Vliv tření na procesy plošného tváření [5], [49], [8], [14], [17], [18], [28]

Vliv tření na procesy plošného tváření lze ilustrovat na třech operacích, a to konkrétně na protlačování, podélném válcování a na tažení.

Hned při prvním z těchto procesů, tedy při protlačování, je koeficient tření jedním z nejvýznamnějších parametrů, které je třeba definovat. Výrazně zde ovlivňuje vlastní proces, kvalitu výsledného produktu a ekonomii výroby. Z toho důvodu se musí u protlačovacích operací provádět vhodná povrchová úprava, aby nedocházelo k suchému tření a s ním spojenému zadírání nástroje. Velikost třecích sil mimo jiné závisí na drsnosti povrchu průtlačníku a průtlačnice a na jejich opotřebení v kritických místech. Během procesu protlačování vede síla nutná k překonání tření ke zvýšení celkového tlaku k protlačování. V extrémních podmínkách pak nemůže tření na rozhraní překročit pevnost ve smyku materiálu. Tento extrémní stav se nazývá „sticking friction“ a jedná se o nežádoucí jev, při kterém pracovní plocha přilne k povrchu nástroje. Hodnota tohoto jevu je konstantní pro všechny teploty protlačování. Pro stanovení komplexního vztahu mezi parametry protlačování (jako tření, teplota, napětí, deformace, rychlost deformace atd.) bylo provedeno mnoho studií a analytických metod. Některé z nich poskytly určité porozumění mechanismům, které řídí tření, ale obsahují nedostatečné množství informací pro identifikaci mechanismů, které lze kvantitativně použít k modelování tření pro proces protlačování v průmyslovém kontextu. Experimentálně však bylo zjištěno, že třecí podmínky nejsou konstantní pro všechny teploty v průběhu vlastního procesu protlačování. Zvýšení celkové teploty a stejně tak pokles tlaku totiž vedou u hliníkových slitin ke zvýšení koeficientu tření. Tyto závislosti pak lze využít například k navrhování optimální délky razníku pro protlačovací operace, kdy se se snižující délkou nástroje a klesající silou snižuje také třecí faktor. (viz obr. 12)



Obr. 12 Závislost třecího faktoru na síle protlačování a délce razníku [14]

Naopak prospěšný vliv tření lze demonstrovat na procesu podélného válcování (obr. 13). Zde hraje tření zásadní roli. Proces válcování je totiž umožněn jen v důsledku tření mezi pracovními válci a válcovaným materiálem. V bodě (linii), kde válcovaný materiál vstupuje do mezery mezi válci, je povrchová rychlost válců vyšší než rychlost materiálu. Směr tření je tedy shodný se směrem pohybu válcovaného materiálu a tato třecí síla vtahuje materiál do mezery mezi válci. Během válcování se rychlost výrobku zvyšuje, i když průtok materiálu zůstává po celou dobu deformace stejný. Rychlost materiálu se rovná povrchové rychlosti válců v neutrální rovině. Od vstupního bodu do neutrálního bodu se nachází deformační (zpožďovací) zóna. Za neutrální rovinou, tj. v hlavní zóně, je rychlost deformujícího se materiálu vyšší než obvodová rychlost válců a směr tření se rychle mění.

Aby byla analýza procesu podélného válcování co nejjednodušší, vychází se z předpokladů, jako je deformace rovinného napětí, princip stálosti objemu, konstantní koeficient tření, konstantní povrchová rychlost válců atd. Koeficient tření je závislý na kvalitě povrchu válců, tedy na stykových plochách a také na měrném tlaku, tedy na charakteru prokluzu. Součinitel tření a měrný tlak způsobují vznik dvou sil v místě válcování, a to normálové a tečné síly. Limitní podmínkou válcování, která vychází ze silového působení normálových a třecích sil v místě válcování je:

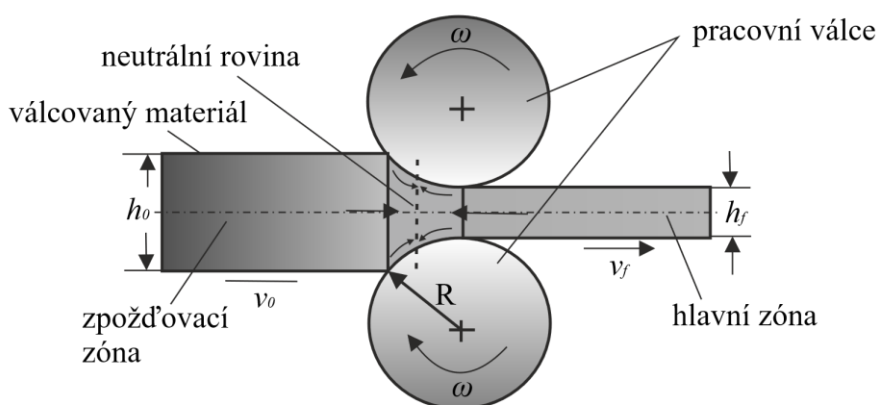
$$f > \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.1)$$

kde: f - koeficient tření [-]

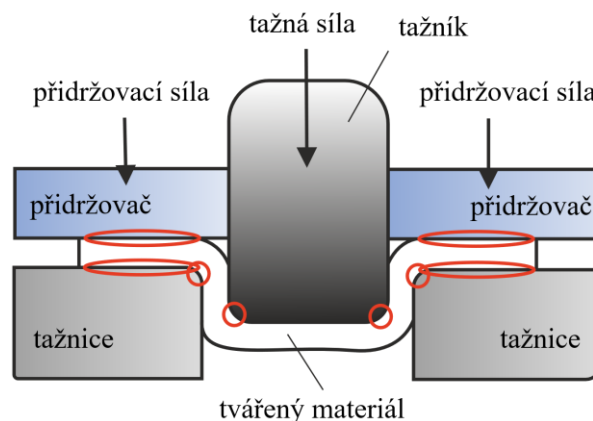
α - úhel záběru [°]

Koeficient tření se během válcování mění, a to zejména mezi začátkem válcování a ustáleným válcováním. Při válcování za tepla se součinitel tření výrazně mění se změnou chemického složení kovu (oceli s vyšším obsahem uhlíku mají nižší součinitel tření) a každé oceli přísluší maximální součinitel tření pro dané podmínky a teplotu. Při vysokých teplotách ovlivňuje součinitel tření vznik okují, součinitel tření klesá. Při malých rychlostech se součinitel tření mění jen nepatrně, se zvyšující se rychlostí nastává výrazný pokles a při vysokých rychlostech je součinitel tření v podstatě stálý.

Posledním zde uvedeným vlivem tření na tvářecí procesy je vliv třecí síly na tažení. Tento proces je podobný protlačování kovů a stejně jako v něm i tady hraje tření klíčovou roli. Třecí síly jsou v procesu tažení zásadní a tření i jeho účinky by tak měly být kontrolovány. Ze strany tažníku je výhodné mít tření co nejvyšší, ze strany tažnice je naopak potřeba tření co nejvíce snížit. Při tažení pak v důsledku tření může vznikat celá škála vad. Ke snížení tření a zlepšení kvality povrchu se proto používá mazacích směsí. Nemaže se však celý přístřih, ale většinou jen místo mezi přidržovačem a materiálem, kde je mazání nejvíce žádoucí. Na obr. 14 jsou označena místa procesu, kde působí třecí síly. Prostředky, které se používají pro mazání nesmí poškozovat povrch nástroje a výrobku a současně musí lehce přilnout a vytvořit rovnoměrnou vrstvu.



Obr. 13 Podélné válcování [17]



Obr. 14 Působení tření v procesu tažení [5], [9]

3 METODY A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ KOEFICIENTU TŘENÍ [2], [6], [3]

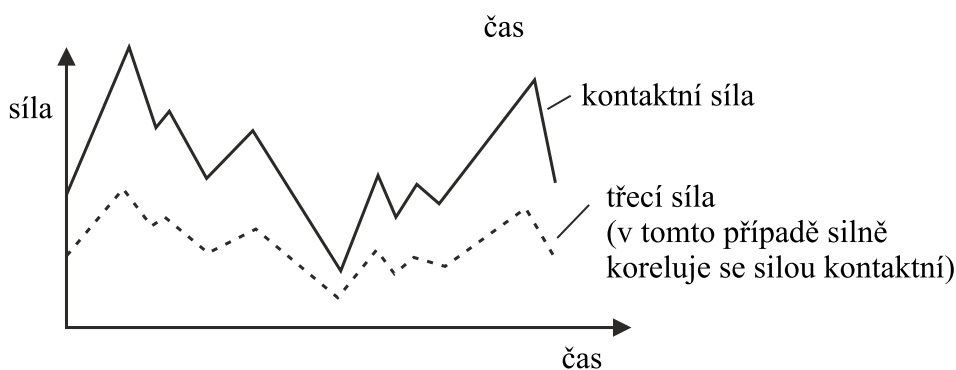
Obecně je měření koeficientu tření extrémně náročným procesem, co se týče požadavků na přesnost. Přesná data o tření a opotřebení vyžadují vysoce kvalitní technologii měření. Základním rysem jakéhokoli zařízení určeného k měření třecí síly je člen k aplikaci známého normálového zatížení. Měření probíhá mezi dvěma zkušebními povrchy, které současně nesou měřitelnou tangenciální sílu. Taktéž musí být možné tuto sílu zvýšit, dokud není dosaženo detekovatelného nebo stálého relativního pohybu. Ke zkoumání konkrétních okolností, například těch, které jsou vystaveny extrémním teplotám nebo podmínkám prostředí, se pak používá mnoho důmyslných sestav.

Pro vyhodnocení tření během plynulého klouzání je obvyklé měřit třecí sílu vhodným dynamometrem (tj. velmi tuhou kalibrovanou pružinou), i když normálové zatížení je často stále nejvýhodněji zajištěno zatížením stálou hmotností.

Kvalita dostupných dat o tření a opotřebení ovlivňuje samotnou interpretaci jevů, takže pro přesná tribologická měření je nezbytné pochopení výhod a omezení jednotlivých technologií měření. Téměř ve všech tribologických testech (s výjimkou testů založených na sklouzávání kvádrů po nakloněné rovině) je koeficient tření odvozován z měření třecí síly. Při měření koeficientu tření nastávají dva problémy:

- třecí síla se neustále mění, takže pojem přesného koeficientu tření je pouze určitou aproximací blížíící se skutečnosti
- výpočet koeficientu tření je založen na jmenovitém kontaktním zatížení, tj. na poměru třecí síly a nominálního napětí

Ve většině případů bývá nominální kontaktní zatížení představováno zavěšeným závažím, aby na kluzné povrchy působilo kontaktní napětí. Je nezbytné využít závaží s jemným odpružením, protože v případě drsných povrchů se může kontaktní zatížení významně lišit, tj. čím drsnější je povrch, tím je větší změna zatížení. Třecí síla je také ovlivněna drsností povrchu. Pokud vztah mezi změnou v kontaktním zatížení a třecí silou není znám, je třeba předpokládat, že se vrchol průběhu třecí síly shoduje s vrcholem kontaktního zatížení, aby se dosáhlo průměrujícího efektu. Pokud existuje průměrující účinek, pak je výše uvedená definice koeficientu tření považována za přibližně správnou. Tento koncept je ilustrován na obr. 15.



Obr. 15 Schématická ilustrace konceptu průměrného koeficientu tření [3]

Definice koeficientu tření jako poměru okamžité třecí síly a okamžitého kontaktního zatížení umožňuje měřit působení drsnosti nebo střížných sil na povrch v určitém časovém bodě. Tato definice koeficientu tření sama o sobě umožňuje, aby byl účinek mikroskopických procesů na kontaktní ploše izolován od procesů makroskopických, jako jsou mechanické vibrace kluzného

systému. Skutečný koeficient tření je také možné změřit současným měřením okamžitého kontaktního zatížení a třecí síly.

3.1 Základní fyzikální metody [2]

V samotných počátcích zjišťování koeficientu tření se spoléhalo na základní fyzikální metody fungující například na principu zavěšeného závaží. Tyto metody však samozřejmě vykazovaly obrovskou nepřesnost měření a jelikož se v nich nevyužívá snímačů pro měření proměnného koeficientu tření byly časem nahrazeny mnohem přesnějšími měřicími technikami. Dnes jsou tyto metody v praxi používány pouze pro speciální měření do podmínek, které například neumožňují instalaci elektronických měřicích snímačů.

3.1.1 Metoda nakloněné roviny [2], [4], [6], [23]

Nejjednodušší a možná i nejstarší experimentální metodou pro stanovení součinitele tření, která je prakticky vždy proveditelná, je měření úhlem sklonu. Při této metodě se měří sklon nakloněné roviny, při kterém se těleso ležící na ní klouzat (obr. 16). Úhel φ mezi vodorovnou rovinou a rovinou nakloněné desky se nazývá úhel tření. Síly působící na takové těleso jsou znázorněny na obr. 17. Po dosažení úhlu tření statická síla dosáhne své maximální hodnoty: $F_s = \mu_s \cdot F_N$

Rovnováha sil v tomto kritickém stavu je následující:

- ve směru osy x: $m \cdot g \cdot \sin \varphi - \mu_s \cdot F_N = 0$
- ve směru osy y: $F_N - m \cdot g \cdot \cos \varphi = 0$

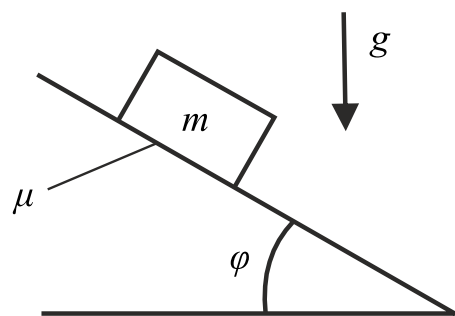
Z toho vyplývá, že tangens úhlu tření je roven součiniteli statického tření. Tedy: $\mu_s = \tan(\varphi)$

Metoda úhlu sklonu byla použita na první experimentální demonstraci vysokých koeficientů tření mezi čistými kovovými povrchy ve vakuu. Toto experimentální uspořádání umožnilo měřit koeficienty tření v jednoduchém vakuovém zařízení, aniž by se musela složitě získávat data získaná z elektrického snímače signálů umístěného uvnitř vakuové komory.

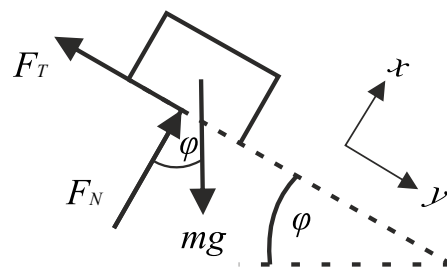
V dnešní době se metoda využívá již velmi zřídka, jedním z příkladů mimo strojírenskou praxi bylo například měření koeficientu tření u zvířecích tlapek v oblasti biotribologie. I když metoda nabízí pouze základní měření maximální hodnoty koeficientu tření, využívá se v těchto případech, jelikož je aplikace měřicích zařízení na tlapky zvířat zkrátka příliš složitá. Tato metoda je také omezena pouze na malá zatížení a není schopna studovat účinky posuvné síly.

3.1.2 Metoda kyvadla [2], [36], [37]

Metoda kmitajícího kyvadla umožňuje měření velmi malých koeficientů tření působících v dynamických kontaktech sestávajících z jedné statické a jedné rotující komponenty. Obvyklým příkladem je radiální ložisko, ve kterém je uložen čep. K měření dle tohoto experimentu je zapotřebí snímače točivého momentu.



Obr. 16 Metoda nakloněné roviny [4]



Obr. 17 Síly působící na těleso při metodě nakloněné roviny [4]

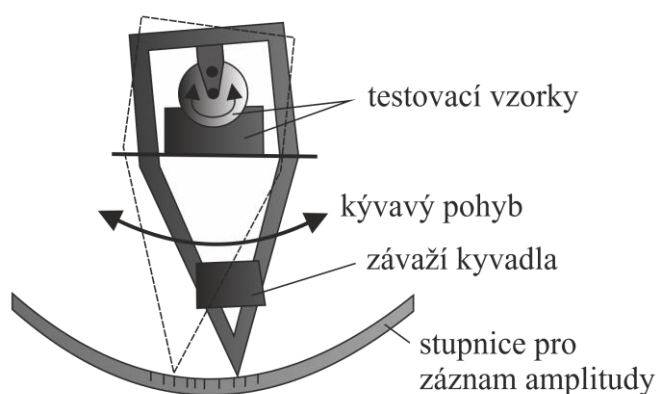
Koeficient tření se pak měří ze ztráty energie kyvadla (obr. 18), kterou lze vyčíst z grafu snížení amplitudy pohybu v čase (obr. 19). Základní nevýhodou kyvadlové metody je to, že vratné klouzání lze studovat pouze v úzkém rozsahu rychlostí. Nejspíše nejužitečnější a nejzajímavější využití kyvadlové metody je dnes při měření koeficientu tření v synoviálních kloubech. Během těchto experimentů je nezbytné zachovat kloub v původním stavu. Neporušené koleno nebo kyčel se synoviálním kloubem se umístí do kyvadlového aparátu a koeficient tření se měří bez nutnosti řešit problémy s montováním převodníků síly do lidské tkáně. K těmto měřením se nejčastěji využívá tzv. Stantonovy rovnice, která předpokládá ztrátu energie kyvadla nezávislou na hmotnosti, ve tvaru:

$$\mu_L = \frac{\Delta\theta \cdot L}{4r} \quad (3.1)$$

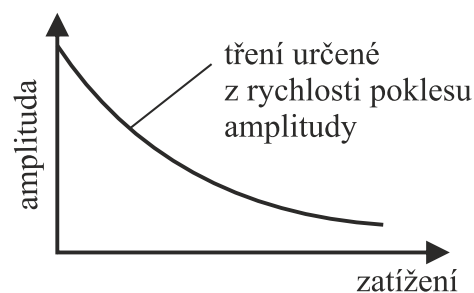
kde: $\Delta\theta$ - změna ve vrcholu rotace kyvadla za cyklus kolem osy [°]

L - vzdálenost mezi těžištěm kyvadla a středem osy [mm]

r - poloměr měřeného vzorku [mm]



Obr. 18 Konstrukční řešení kyvadla pro měření tření [2]



Obr. 19 Graf závislosti amplitudy na zatížení [2]

3.2 Technologické metody pro zjišťování koeficientu tření [19], [42]

Mnoho experimentálních výzkumů zahájených již v minulém století ukázalo, že existují určité laboratorní metody s důvěryhodnými výsledky, které lze použít pro určení tření v reálných procesech tváření kovů.

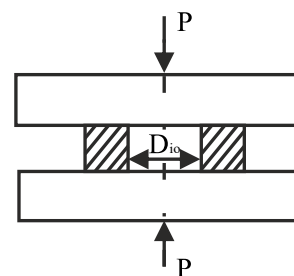
Z těchto metod lze vybrat takové testy, jako je zkouška přechování prstence (podle Male a Cockroft), přechovací zkouška plošného tlaku (plain strain compression test) nebo zkouška kombinovaným namáháním krut-tlak (twist-compression test). Ačkoliv se řadí ke k nejpoužívanějším zkouškám stupně a koeficientu tření v tváření, každý z těchto testů má svá omezení, která neumožňují distribuci výsledků jednoho určitého testu na všechny procesy tváření kovů. Testy by navíc měly být prováděny správným způsobem, aby byly zaručeny co nejpřesnější výsledky. Případná nepřesnost je vyvážena časovou nenáročností těchto metod.

V dnešní době se tyto zkoušky doplňují analýzami metodou konečných prvků pro zajištění co nejpřesnějších výsledků pro konkrétní situace.

3.2.1 Zkouška pčhování prstence [19], [38], [39], [40], [43]

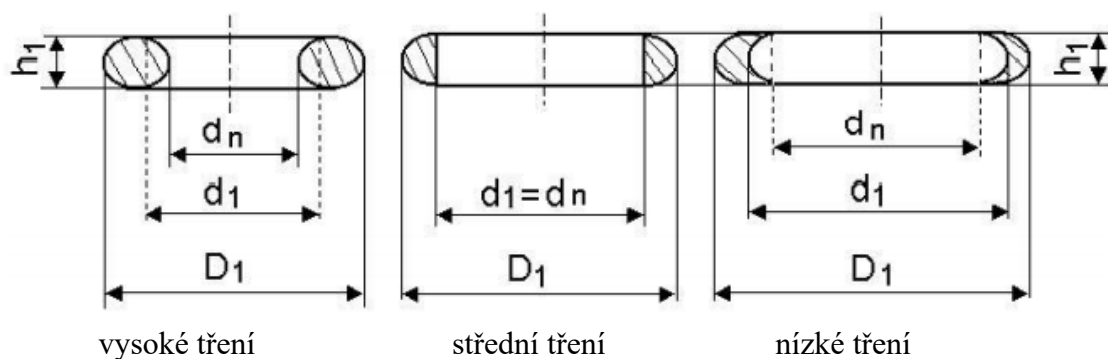
Někdy také nazývána zkouška pčhování prstence podle Male a Cockrofta. Tato technologická metoda pro měření koeficientu tření byla v posledních dvou desetiletích široce přijata. Doposud se jedná o nejrozšířenější zkoušku pro objemové tváření a je výhodná zejména proto, že při ní není nutné měřit tvářecí sílu a přetvárnou rychlost.

Testovacím vzorkem je zde prstenec o rozměrech vnějšího průměru (obr. 20), vnitřního průměru a výšky v poměru (6:3:2). Tento prstenec se pčhuje postupně až na poměrnou deformaci, která obvykle dosahuje výšky až 50 % nebo i více. V této zkoušce probíhá deformace dle podmínek vnějšího tření čímž mohou nastat následující tři stavy (obr. 21):



Obr. 20 Zkouška pčhování prstence [19]

- Dvousměrný tok kovu ve směru vnějšího povrchu a povrchu otvoru (volných povrchů). Zde se zmenšuje sledovaný průměr d_1 oproti neutrálnímu průměru d_n . Tento výsledek indikuje vysoké tření.
- Jednosměrný tok kovu, ale pouze ve směru vnějšího volného povrchu. Zde se zvětšuje průměr D_1 a průměr d_1 se následně rovná průměru d_n . Tento výsledek indikuje střední tření.
- Jednosměrný tok kovu, během kterého se průměr d_1 zvětšuje na průměr d_n a zároveň se rozšiřuje směrem k průměru D_1 . Tento výsledek indikuje nízké tření.



Obr. 21 Deformace vzorku charakterizující různé stupně tření [19]

Tato technika funguje na základě posouzení rozměrové změny zkušební vzorku. Z této změny lze vyčíst koeficient tření a to následovně. Když je zkušební vzorek plochého prstence plasticky stlačen mezi dvěma plochými deskami, vede zvýšené tření k toku materiálu dovnitř, zatímco snížené tření vede k toku materiálu ven, jak je schematicky znázorněno na obr. 21.

Na základě této vlastnosti pak byly vytvořeny specifické křivky, později označované jako třecí kalibrační křivky. Tyto křivky udávají procentuální zmenšení vnitřního průměru zkušební vzorku v závislosti na zmenšení jeho výšky pro různé koeficienty tření.

Vnitřní průměr otvoru reaguje citlivě na vnější podmínky tření. Podle kalibračních diagramů ustanovených na bázi rychlostních polí lze potom také určit i průběh součinitele tření současně

s kritickými deformacemi, při kterých může docházet k utržení maziva. Zkoušku lze provést na různých typech vzorků, vždy však musí být dodržen požadovaný poměr hlavních rozměrů.

Po dokončení spěchování vzorků lze vypočítat poměrnou změnu deformace výšky a vnitřního průměru vzorku podle následujících vzorců. První z nich dává změnu výšky vzorku jako poměr snížené původní výšky vzorku. Druhý pak změnu průměru vzorku jako poměr sníženého vnitřního průměru a průměru původního.

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100[\%] \quad (3.2)$$

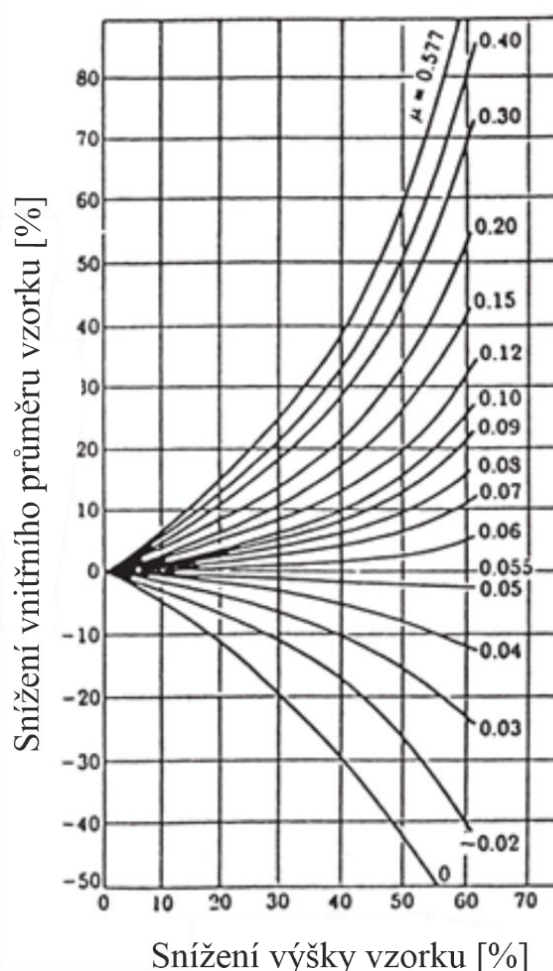
$$\varepsilon_d = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \cdot 100[\%] \quad (3.3)$$

Z vynesných bodů závislosti $\varepsilon_d = f(\varepsilon_h)$ lze potom aproximací vytvořit křivku, která se vynesne do příslušného kalibračního diagramu (obr. 22).

I když je zkouška přechování prstence rychlou a účinnou metodou pro stanovení součinitele tření během velkých deformačních procesů, má i mnoho slabých míst. Jednou ze slabin je například neexistence kompletní platné teoretické analýzy (včetně analýzy metodou konečných prvků) pro konstrukci kalibračních křivek.

V dnešní době se proto pro odvození kalibračních křivek jednotlivých materiálů musí používat kombinace experimentálního měření a simulace přes metodu konečných prvků. Mimo to přerušení během experimentu mění okrajové podmínky a prstenec se také často stává oválným, což velmi komplikuje měření a tím i výslednou přesnost. Dále také není ideální používat zobecněné tabulky tření bez ohledu na typ materiálu a zkušební podmínky. Bylo totiž dokázáno, že typ materiálu, rychlost deformace a vznik „soudkovitosti“ hrají důležitou roli ve tvaru třecích kalibračních křivek.

Pro získání spolehlivých údajů se proto doporučuje, aby se pro posuzování koeficientu tření z výsledné zkoušky vždy užívalo kalibračních křivek vytvořených speciálně pro zkoumaný materiál a za konkrétních zkušebních podmínek.

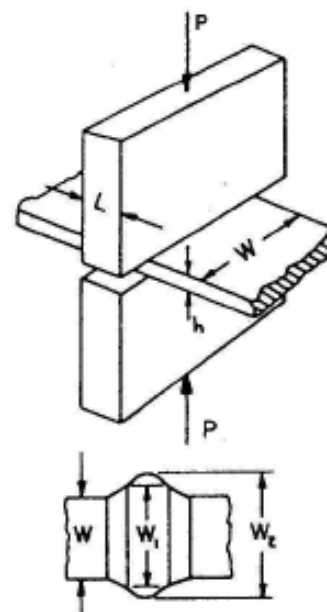


Obr. 22 Zobecněný kalibrační třecí diagram [38]

3.2.2 Pěchovací zkouška plošného tlaku Ford-test [19], [45], [44]

V anglické literatuře označováno jako plain strain compression test nebo někdy také Watts-Ford test. Tato je vhodná zejména pro simulace válcovacích operací. Ty mají zásadní význam ve výrobě, jelikož se válcováním zpracovává přibližně až 50% celkové výroby kovů a slitin. V posledním desetiletí tak byla pěchovací zkouška plošného tlaku jedním z nejčastěji používaným testem v tomto odvětví.

Vzorek ve formě tenké desky nebo pásového materiálu je po celé šířce pásu stlačen dvojicí protilehlých tlačných hranolů, které jsou delší, než je šířka pásu (obr. 23). Na kontaktní plochu lze aplikovat různá maziva (např. grafit, MoS₂, teflon, atd.). Z důvodu toho, že je materiál vytlačován kolem ostrých hran hranolů, ukáže se v průběhu zkoušky možnost sklonu mazaného vzorku k tzv. jevu „pick-up“, tedy k odstřížení měkčího ze zkoušených materiálů. Podmínky zkoušky jsou podobné těm podmínkám, které se vyskytují kolem zaoblení kovacíh nástrojů (nejkritičtější plocha z hlediska mazání). Nástroj pak proniká do vzorku, a zároveň se vlivem trojosého stavu napjatosti pěchovaný pás deformuje tím způsobem, že se začne rozšiřovat do stran - vybouluje se ve směru šířky pásu. Konečný vypouklý tvar se pak pro nízký a vysoký stupeň tření liší. Stupeň tření povrchů kovadel po různých povrchových úpravách a v přítomnosti mazacího filmu charakterizuje vyboulení:



Obr. 23 Plain strain compression test [19]

$$\Delta W = \frac{W_2 - W_1}{2} \quad (3.4)$$

kde: W_2 - maximální rozměr vyboulení u kořene vyboulení [mm]

W_1 - minimální rozměr vyboulení u kořene vyboulení [mm]

Čím je pak větší tření v kontaktní ploše, tím větší je vyboulení, a naopak. Jde o kvalitativní metodu testování tření, která je vhodná buď na testování různých maziv za konstantního stlačení a jakosti povrchu kovadel, anebo testování různých povrchů kovadel (leštěné, broušené, pískované, atd.) za působení určitého maziva při konstantním stlačení. Uplatňuje se zejména v kombinaci s dalšími zkouškami. Doporučené parametry zkoušky jsou:

$$\frac{W}{L} > 6 \text{ a } 2 < \frac{L}{h} < 4 \quad (3.5)$$

kde: W - šířka pěchovaného materiálu [mm]

L - tloušťka tlačného hranolu [mm]

h - tloušťka pěchovaného materiálu [mm]

Původně byla tato zkouška vyvinuta a použita pro zkoumání válcování plechů a pásů, kde jsou podmínky velmi blízké ideálnímu stavu rovinného napětí. Zkouška se mimo jiné používala pro stanovení přetvárného odporu materiálu ve Fordových závodech, včetně měření tvářecí síly a posuvu. V současnosti je metoda využívána k testování tření ve tvářecích procesech bez nutnosti měření uvedených veličin.

3.2.3 Twist-compression test [19], [32], [33], [34], [35]

V české literatuře označováno jako zkouška kombinovaným namáháním krut-tlak. Tato zkouška se obecně využívá k hodnocení maziv a lisovacích materiálů pro použití v procesu tváření kovů. Lze ji však využít i pro stanovení součinitele tření a k posouzení odolnosti materiálu proti adheznímu opotřebení.

Záměrem zkušební metody je totiž získat data, která poskytnou základní údaje o tření pro jednotlivé materiály a povrchové úpravy, díky čemuž pak lze posuzovat jejich odolnost proti opotřebení za specifikovaných podmínek. Tento test je efektivní zejména kvůli následujícím vlastnostem:

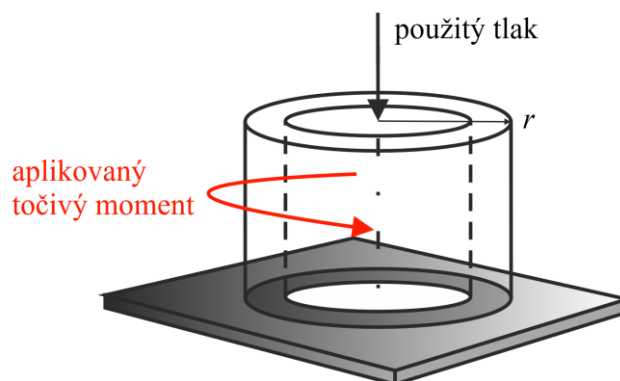
- Kontaktní tlaky lze nastavit tak, aby co nejvíce odpovídaly simulovanému procesu
- Plochý kontakt je zajištěn pomocí samo-vyrovnávacích nástrojů
- Použití maziva zajišťuje simulaci mezního kontaktu s kapalnými mazivy
- Jednoduchý kontaktní model umožňuje určit tření tak, že je třecí síla úměrná síle normálové a je nezávislá na velikosti kontaktní plochy

Samotný test potom probíhá tak, že na rotující dutý válec působí zatížení (obr. 24), kterým je válec přitlačován na stacionární desku. Převodník tlaku měří tlak vyvíjený prstencovým nástrojem na plech, zatímco snímač měří točivý moment, který je přenášen z nástroje na desku. Tření, které vzniká v kontaktní oblasti těchto dvou kusů, vytváří boční sílu. Během zkoušky bývá na stacionární desku nanášeno mazivo a z této konfigurace jsou snímány údaje jak o působícím zatížení, tak o boční síle. Tento test probíhá při 2-30 otáčkách/min a při zatížení až 100 000 N. Plastická deformace je zde spolu s přitlačnou silou limitována zborcením vzorku, ovšem relativní prokluz bývá poměrně silný.

Tato zkušební metoda zahrnuje tři doporučené postupy, které definují různá kritéria selhání:

- Zkouška, která posuzuje materiály podle doby do selhání. To je definováno poruchou, která je charakteristická trvalým nárůstem koeficientu tření, který je pozorován po určitém setrvání na stabilní hodnotě. Zkoušku pak obvykle ukončí obsluha. Adhezní opotřebení je zkoumáno ze zkušební vzorku po ukončení testu. Jedná se o nejprísnejší zkoušku z uvedených.
- Zkouška, která stejně jako předchozí probíhá až do doby, kdy koeficient tření překročí předem stanovenou mezní hodnotu. Tato prahová hodnota je určována podle typu materiálu, kluzné rychlosti a kontaktního tlaku.
- Ve třetím a posledním zkušebním postupu je test přerušen v požadovaném časovém okamžiku, aby byly zachovány kontaktní povrchy v přijatelném stavu.

Při zkoušce lze simulovat různé možnosti tloušťky vrstvy naneseného maziva a průběžný nebo přerušovaný kontakt polotovaru s nástrojem za různých otáček zkušební vzorku.



Obr. 24 Twist-compression test [34]

Data jsou zpravidla měřena elektronicky a koeficient tření je pak spočítán přímo z hodnoty změřené normálové síly a kroutícího momentu.

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{T}{R \cdot P} \quad (3.6)$$

kde: T - kroutící moment [$N \cdot m$]

F - třecí síla [N]

P - změřená normálová síla [N]

R - rameno kroutícího momentu [N]

Tato zkouška se používá spíše jako srovnávací než jako absolutní test. Její jednoduchost společně s možností použít přesně definovaný laboratorní postup z ní činí užitečný nástroj pro hrubé změření koeficientu tření, avšak co se týče testování charakteristik maziv nenahrazuje některé technologické zkoušky, které přesněji napodobují přímé podmínky pro užití konkrétního maziva.

3.3 Podpora numerických metod pro simulace třecího kontaktu [4], [40], [41], [38]

Dnešní trend technologie tváření je charakteristický rostoucími požadavky na složité tvary, malé tolerance a nové materiály, jako jsou žáruvzdorné kovy, které mají nízkou tažnost a vyžadují vysoké tvářecí zatížení. S takovými nároky přichází také nutnost co nejlepší možné charakteristiky materiálu a samotného procesu.

Obecně bývají problémy s kontaktním třením založeny na jednoduchých modelových systémech. I když tyto modely poskytují obecný přehled o komplexních tribologických jevech, nelze celou řadu problémů, zejména pokud se zabývají jemnou optimalizací, vyřešit analyticky. S pokrokem v oblasti výpočetní techniky se však dnes již v těchto případech mohou vědci a inženýři opírat o numerické metody. Současně je třeba si uvědomit, že účinnost numerických metod závisí do značné míry na kvalitě předchozích analytických podkladů a měření.

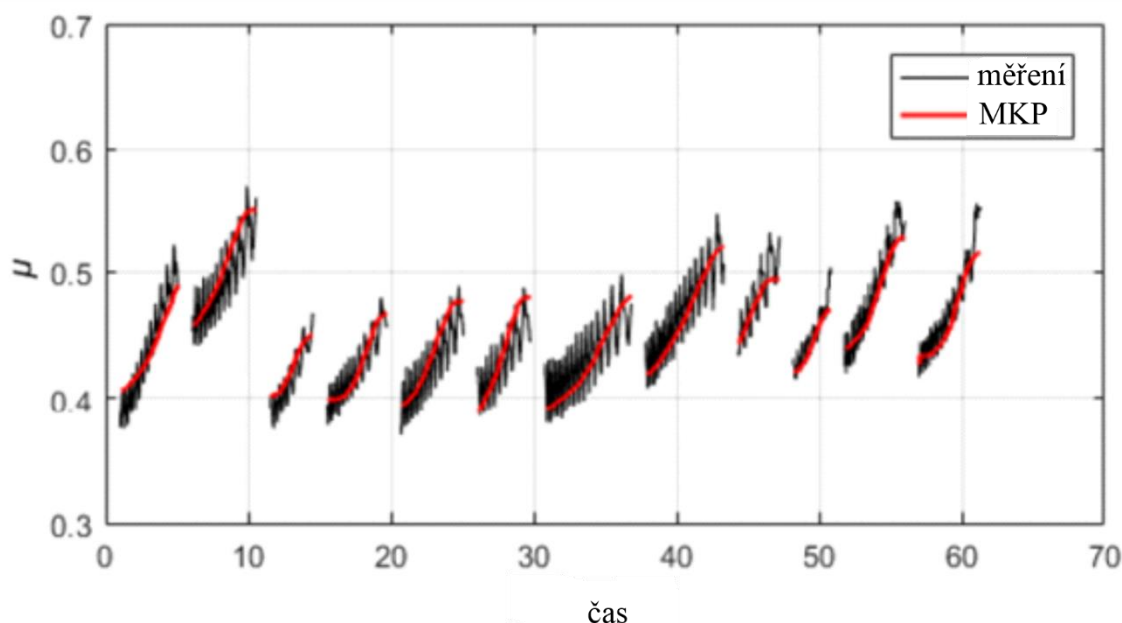
Kvůli nelineárním okrajovým podmínkám jsou technické simulace kontaktu poměrně komplikované, a to jak z hlediska teoretického, tak i numerického. Spolehlivé a efektivní metody pro numerickou simulaci problémů s třecím kontaktem jsou proto v mnoha oblastech pevné mechaniky zcela nezbytné. K dispozici jsou různé simulační metody pro výpočet jak elastických, tak i plastických deformací, které poskytují základní možnosti zkoumání adhezivních kontaktů a třecích jevů.

Asi nejznámější a také nejpoužívanější metodou je v této době metoda konečných prvků (MKP). Výsledky této metody velmi závisí na okrajových podmínkách procesu, a právě tyto podmínky často souvisejí s kontaktním třením. Kromě toho je klíčovým krokem ve fyzikálním modelování procesu výběr vhodného maziva za účelem stanovení podmínek podobnosti skutečného a modelovaného procesu, ale také platnosti jeho výsledků. Simulovaný tribologický mechanismus procesů je potom díky těmto aspektům podobný mechanismu v procesech skutečných.

Použití metody konečných prvků pro řešení tvářecích procesů si lze ukázat na simulaci zkoušky pěchování prstence právě touto metodou. MKP v tomto konkrétním případě slouží pro stanovení kalibračních křivek daného materiálu. V samotné simulaci je potom díky osově symetrické povaze tohoto problému a existenci dvou os symetrie v každé rovině možno sestavit 2D model představující jednu čtvrtinu válcového prstence.

Metoda konečných prvků se v praxi realizuje pomocí různých komerčně dostupných softwarů a umožňuje v každém okamžiku vypočítat kontaktní tlak a rozložení kluzné rychlosti.

Mezi jednu z nevýhod metody konečných prvků však patří výpočet třecích sil mezi drsnými povrchy, zde je totiž nutnost vytvoření jemné sítě a s tím spojená dlouhá doba zpracování údajů. To je zásadní nevýhoda, pokud jde o rozsáhlé studie parametrů a optimalizace. Obr. 25 ukazuje příklad využití MKP pro ověření výpočtu koeficientu tření diskové brzdy.



Obr. 25 Porovnání výsledků získaných z tribometru a vypočtených pomocí MKP [22]

3.4 Pokročilé metody využívající tribometrů a jejich konstrukce [3], [6]

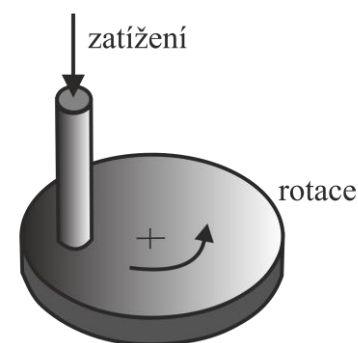
Díky aktivnímu výzkumu mechaniky mezního mazání byla vyvinuta široká škála zkušebních strojů využívajících řady elektronických snímačů pro měření působícího zatížení. Tato zařízení se souhrnně nazývají tribometry a navzájem se liší velkou škálou použitých geometrií, ale i principů měření.

Kvalitativní hodnocení vlastností mazacích kapalin za extrémních tlaků je často prováděno na jednom ze tří komerčně vyvíjených nástrojů, konkrétně na stroji Shell four-ball, stroji Falex pin-and-vee-block nebo na stroji Timken extreme-pressure tester. Tato zařízení se používají pro standardní testy maziv, které jsou stanoveny buď vědeckými institucemi, nebo průmyslovými organizacemi. Tyto tribometry, i když se často používají pro komerční testování a některé výzkumné práce, mají nevýhody měněního se kontaktního napětí během testů a špatně regulované třecí teploty. Velikost kontaktních oblastí mezi kuličkami při testu Four-balls se může lišit od malé oblasti kontaktu až po mnohem větší oblasti v závislosti na měřítku škrábanců vzniklých na kuličkách. Nicméně podmínky kontaktu v každém z nich nejsou ve skutečnosti vhodné pro základní studie aktivních tribologických mechanismů v silně zatížených kontaktech.

Taková zkoumání se obvykle provádějí na strojích se dvěma kotouči (nebo válci), kde dochází k řízenému skluzu. Válec přesněji řídí hydrodynamické nebo elastohydrodynamické podmínky. Při práci s pevnými nebo suchými mezními mazivy lze použít konvenční pístové nebo kotoučové stroje.

3.4.1 Pin-on-disk [3], [6], [23], [26]

Konfigurace Pin-on-disk je pravděpodobně nejběžnější formou zařízení pro měření tření používaného v tribologických laboratořích, kterou lze také použít k měření přidruženého stupně opotřebení a poškození povrchu. V tomto testovacím zařízení hrot setrvává v nehybné pozici, zatímco se pod ním otáčí disk (obr. 26). Díky tomu přichází jakýkoliv konkrétní bod výsledné stopy opotřebení na disku do opakovaného kontaktu s hrotem. Hrot může být neotočná kulička, jezdec zakončený půlkulovým tvarem, válec s plochým koncem nebo dokonce obdélníkový rovnoběžník. V poněkud sofistikovanějším zařízení může být kolík nastaven tak, aby se během experimentu pohyboval v radiálním směru vzhledem k ose disku, takže se neustále dostává do kontaktu s novým povrchem disku. Obecně jsou pro tuto metodu většinou použity dva následující způsoby měření:



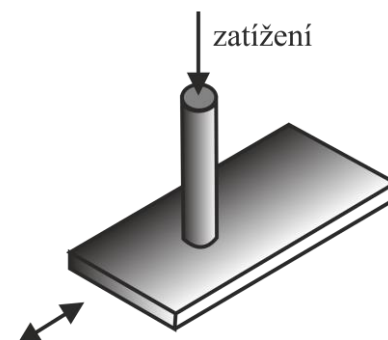
Obr. 26 Metoda Pin-on-disk [6]

- První metoda pracuje na principu úbytku hmotnosti zkušební kolíku, který klouže po rotačním zkušebním kotouči. Po změření tohoto úbytku za určitý čas lze pak vypočítat míru opotřebení za čas. Jelikož musí být při této metodě kolíkový zkušební vzorek v určitých časových intervalech měření demontován a znovu nasazován do zařízení za účelem dalšího testování, je účinnost tohoto testu značně snížena. Mimo jiné zde také nastává další problém. Jakmile je totiž testovací kus demontován a poté znovu namontován do zařízení pro testování, nemůže již být umístěn do stejné polohy, jako před demontáží. Roli v přesnosti dalšího měření pak také hrají zbytky mezi kolíkem a diskem vzniklé z opotřebení kolíku z předchozího měření. Dalším problémem pak může být změna okolních podmínek. Může nastat situace, kdy v okamžiku vyjmutí kolíku a měření jeho hmotnosti kolík absorbuje vlhkost, která má pak za následek změnu jeho hmotnosti a následnou chybu měření.
- Ve druhém případě je využito posuvného měřiče, který je namontován k základně, ve které je uložen rotační disk. Měřicí zařízení pak snímá posun mezi základnou a čepem. Test probíhá pod stálým zatížením a ze změřeného posuvu lze pak získat míru opotřebení kolíkového zkušební kusu. Tento případ umožňuje nepřerušované měření míry opotřebení zkušební vzorku v čase. Protože je však měřidlo posuvu uchyceno k základně, změřená velikost posuvu představuje absolutní posuv vzhledem k základně. To znamená, že se do velikosti změřeného posuvu promítne kromě požadované hodnoty také chyba způsobená posunutím zkušební disku vzhledem k základně. Příčinami této chyby jsou posun způsobený změnou polohy zkušební disku v axiálním směru a tepelná roztažnost celého zařízení v důsledku tepelných změn při generování tepla třením.

V každém z případů se pak také musí rychlost pohonu na disk plynule měnit, aby zůstala zachována stabilní kluzná rychlost. Zařízení lze přizpůsobit a použít i pro provoz za různých podmínek, jako je teplota, vlhkost, tlak, a také v různých plynných nebo kapalných prostředích.

3.4.2 Tribometry Pin-on-flat [3], [6], [31], [32]

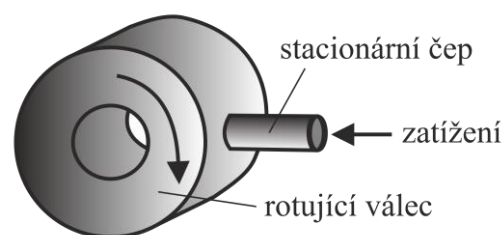
V testovacím zařízení Pin-on-flat se měřicí plocha pohybuje relativně vůči stacionárnímu hrotu ve vratném pohybu (obr. 27). V některých případech je plocha stacionární, a hrot koná vratný pohyb. Místo hrotu může být v zařízení instalováno těleso tvaru koule, půlkulově zakončený kolík nebo válec s plochým koncem. Použitím malé amplitudy kmitání při vysoké frekvenci lze provádět experimenty na zjištění opotřebení otěrem.



Obr. 27 Metoda Pin-on-flat [6]

3.4.3 Zařízení Pin-on-cylinder [3], [6]

Toto zařízení je podobné přístroji Pin-on-disk s tím rozdílem, že zatížení hrotu je kolmé k ose otáčení nebo oscilace (obr. 28). Hrot může být plochý nebo ve tvaru polokoule. Ve druhém případě pak nastane kontakt za nekonformních podmínek. Prvotní styk je potom proveden téměř bodově. Tento fakt má za následek, že tlak působící v místě kontaktu je extrémně vysoký. S postupným měřením a vznikem opotřebení povrchu a případných škrábanců tlak přirozeně klesá. Této nekonformní kontaktní geometrie lze využít buď k simulaci podmínek v silně zatížených kontaktech jako jsou například zuby ozubených kol, nebo k provádění zrychlených zkoušek tření a opotřebení široké škály materiálů pro konkrétní aplikace. Pokud jsou však před testem profily povrchů pečlivě srovnány, takže kontakt je konformní, lze zkoušku použít k simulaci chování takových součástí, jako jsou plochá nebo axiální ložiska, čelní těsnění nebo dokonce spojky a brzdy.



Obr. 28 Metoda Pin-on-cylinder [6]

3.4.4 Thrust Washers [3], [29], [30]

Pomocí této zkušební metody se stanovuje míra opotřebení a koeficient tření pro samomazné materiály. Geometrie zařízení funguje na vzájemném třecím kontaktu dvou zkušebních vzorků ve formě podložek (obr. 29). U měření touto aparaturou se plochý povrch podložky (disk nebo válec) otáčí nebo kmitá pod zatížením na rovném povrchu stacionární ocelové podložky. Testovací vzorky jsou zatíženy čelně, jelikož je zatížení aplikováno paralelně k ose otáčení. Podložky mohou být plné nebo prstencové. Vzorek je upevněn do držáku pomocí čepu a šroubu, tato sestava je pak vložena do testeru. Každá zkouška se skládá ze záběhu trvajícího zpravidla až 40 hodin. Jeho účele je zajistit těsný kontakt mezi protilehlými částmi. Po něm je zkušební vzorek zvážen a změřen a následuje zkouška s vybranou dobou trvání, přičemž všechny tyto procesy jsou prováděny za stejného zvoleného zatížení, stejné rychlosti a stejného počtu cyklů. Zatížení se docílí působením mrtvé váhy na rameno páky obvykle v poměru 10:1 tak, aby stacionární spodní podložka působila axiálně nahoru proti rotující horní podložce. Rameno páky pak může být vyváжено, aby kompenzovalo hmotnost stacionární podložky. K dispozici jsou také kontrolované pneumatické zatěžovací

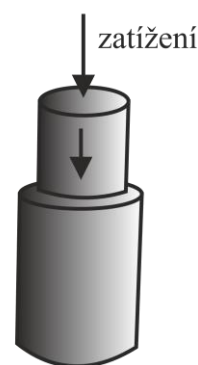


Obr. 29 Metoda Thrust Washers [3]

systemy, které nahrazují tuto klasickou metodu využívající mrtvých vah. Kontaktní plocha bývá vymezena v řádech jednotek cm^2 a průměrná rychlost tření souvisí s rychlostí otáčení vřetena. U každé zkoušky je pak nutné měřit změnu tloušťky zkušební vzorku a točivý moment během ní. K tomu se používá digitálního měřicího zařízení. Koeficient tření se poté klasicky získá z údaje opotřebení vzorku za jednotku času. Tato konfigurace je nejběžnější pro testování materiálů pro aplikace s nízkým namáháním, jako jsou ložiska čepů a čelní těsnění.

3.4.5 Pin-into-bushing [3]

Zde se měří axiální síla nutná k zatlačení nadměrně velkého kolíku do pouzdra (obr. 30). Normálová (axiální) síla působí v radiálním směru a má tendenci rozšiřovat pouzdro. Radiální síla může být vypočtena z materiálových vlastností, interference a změny vnějšího průměru pouzdra. Vydělením axiální síly silou radiální se získá koeficient tření.

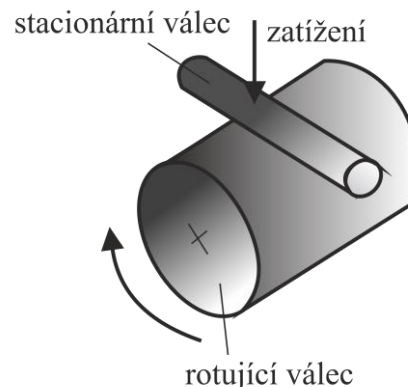


Obr. 30 Metoda Pin-into-bushing [6]

3.4.6 Crossed Cylinders [3], [6], [23]

Zkušební zařízení sestává z dutého (vodou chlazeného) nebo pevného válce působícího jako zkušební vzorek a pevného válce působícího jako rotující nebo kmitající opotřebitelný člen, jehož osa je vzhledem ke stacionárnímu členu otočena o 90° . Zkušební vzorek je tlačěn zatížením proti rotujícímu válci (obr. 31).

Zatížení je zprostředkováno mrtvými váhami, obvykle prostřednictvím pákového systému, i když v některých případech může být použita hydraulická nebo magnetická síla. Stacionární těleso má tvar buď koule, čepu nebo válce. Stacionární vzorek je pak uložen v rámu tak, že se může iniciovat malý příčný pohyb. Tento rám pak bývá spojen s převodníkem síly, který zaznamenává míru třecí síly. Hodnota třecí síly pak může být průběžně zaznamenávána při jakémkoli požadovaném zatížení, rychlosti a stavu povrchu.



Obr. 31 Metoda Crossed Cylinders [6]

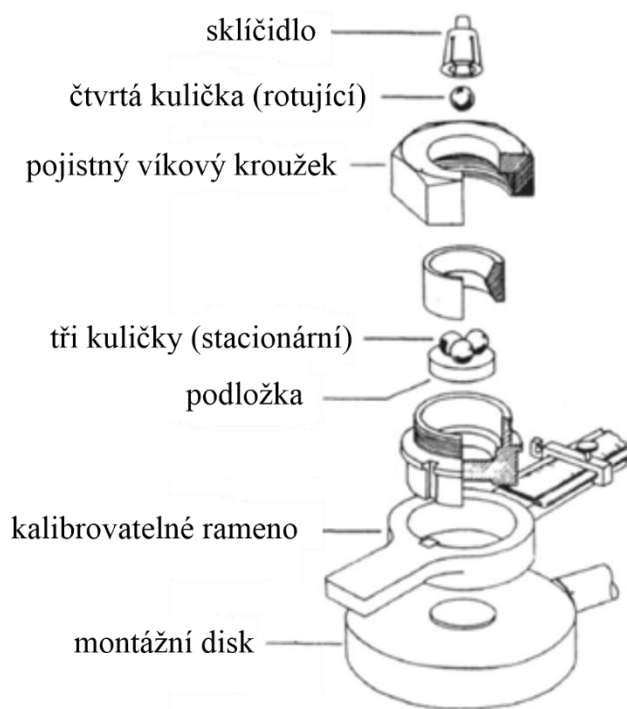
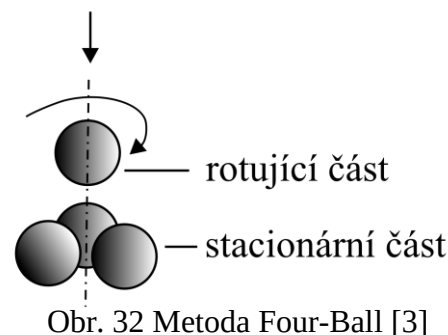
3.4.7 Four-Ball [3], [6]

Zkušební zařízení four-ball, někdy také nazývané Shell four-ball, se používá k určení vlastností maziv, jako je například prevence proti opotřebení nebo extrémnímu tlaku a popisuje také celkové chování tření za daných podmínek. Tato zkouška se skládá ze čtyř koulí v konfiguraci rovnostranného čtyřstěnu. Horní koule se otáčí a tře o spodní tři koule. Ty jsou drženy v pevné poloze. Bývají z kalené oceli (obvykle o průměru 12,7 mm) a jsou usazeny ve stacionárním kelímku, kde je horní čtvrtá koule namontovaná v upínači a zatížena symetricky proti dolnímu tření. Spodní trojice kuliček může být buď sevřena tak, že jejich povrchy po sobě pouze kloužou, nebo se může volně otáčet, a tak generovat valivý kontakt. Uspořádání je znázorněno na obr. 32 a obr. 33. Tato technika bývá používána při hodnocení mazacích olejů určených pro provoz v náročných podmínkách.

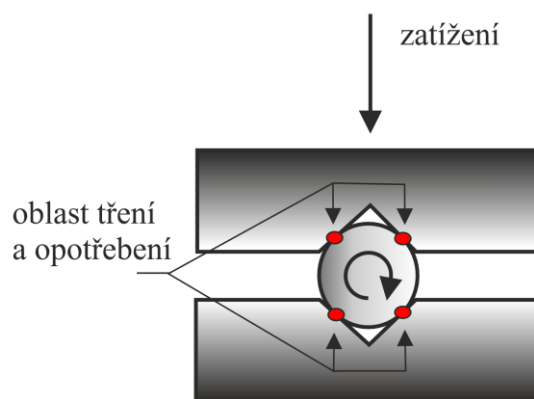
Při zkoumání mezního mazání jsou spodní koule upevněny tak, že ke kontaktu dochází ve třech malých kruhových oblastech. Teplota oleje je dále sledována termočlánkem. Podle zkušební normy se zátěž postupně zvyšuje (při standardní zkoušce až na 1760 otáček/min), do té doby, dokud mazadlo přestane být účinné a namazaná vrstva již nemůže oddělovat jednotlivé povrchy čímž dochází ke kontaktu obou povrchů. V některých případech může dojít i ke svaření, které se vyznačuje zvýšeným hlukem a teplotou. Výhodou zkoušky je, že je rychlá (standardní doba zkoušky je deset sekund), levná a používá pouze malé množství oleje. Jedná se o velmi účinný test pro srovnání různých druhů maziv, ale méně vyhovuje hodnocení absolutních mazacích vlastností vzhledem k poměrně špatně definovaným podmínkám v kontaktních místech.

3.4.8 Zařízení Pin and Vee Block [6], [2], [24], [25]

Někdy také nazývané Falex nebo Falex Pin & Vee Block podle stejnojmenné firmy. Jedná se o klasický a vůbec první standardizovaný tester tribologických vlastností maziv. Vynalezen byl v roce 1929 a ihned se stal standardní metodou pro srovnání jak tření a opotřebení, tak i pro testování extrémních tlakových vlastností lubrikantů. To a také přenosnost těchto metod jsou právě důvody, díky nimž byl tento stroj unikátní. Toto zařízení totiž umožňuje vyvinout velká kontaktní napětí bez nutnosti silné mechanické podpory, což je také jedním z hlavních důvodů, proč je přístroj široce využíván v průmyslových a výzkumných laboratořích.



Široce se využívá k hodnocení vlastností extrémního tlaku pro řezné, tvářecí a válcovací maziva, ale stejně užitečný je pro hydraulické kapaliny, motorové oleje, čistící maziva a povlaky na tuhá maziva. Emulze lze na něm snadno testovat, jak recirkulací, tak i přímou injekcí do kontaktu. Zařízení otáčí zkušebním kolíkem o průměru $\frac{1}{4}$ palce proti dvěma zatíženým blokům s drážkou ve tvaru „V“ a průměrem $\frac{1}{2}$ palce (obr. 34). Vzájemně se zde tedy vyrovnávají 4 kontaktní síly, takže jedinou potřebnou silou je uzavírací síla V-bloku a točivý moment k pohonu kolíku. Krouticí moment poskytuje možnost přímého měření třecí síly bez chyby tření generovaného v ložiscích. Vysoké kontaktní tlaky dosažené během testů pak činí tento přístroj vhodný zejména pro studie zadírání a odírání. Přístroj poskytuje údaje o hodnotě koeficientu tření pro konkrétní kombinace materiálů s mazivy a dále o maximálním zatížení před zadřením a průměru vzniklé dráhy opotřebení po otestování. Ve stroji Falex dochází ke změnám přitlačné síly, pokud během zkoušky dojde k závažnému opotřebení. Používá se i ve verzi s utěsněnou komorou.

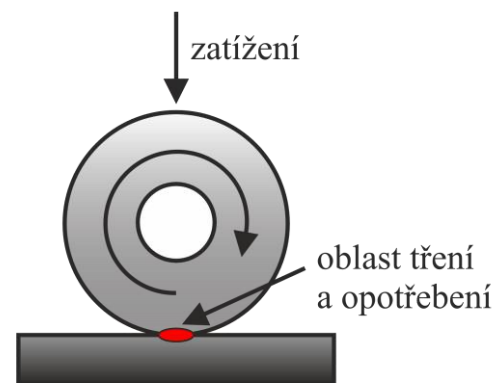


Obr. 34 Zařízení Pin & Vee [3]

3.4.9 Zařízení Timken [6], [2], [3], [10]

Přístroj byl vyvinut firmou Timken Company, po níž také nese svůj název. Prvotním cílem vývoje bylo získat účinný nástroj zejména pro testování únosnosti maziv. Dnes se jedná o rychlý a spolehlivý test, který je užitečný zejména pro činnosti v oblasti výzkumu a vývoje kvality maziv. Zde vyniká zejména díky snadnému nastavení a dostupnosti vzorků. Lze ho však využít i pro hodnocení kvality aditiv pro extrémní tlaky, zatížení, ochrany při extrémních tlacích, dále jako nástroj pro prevenci opotřebení a v neposlední řadě tedy i pro popsání třecích charakteristik.

V tomto zařízení se využívá ocelového ložiska (obr. 35). To rotuje rychlostí 800 otáček/min a při tomto pohybu je tlačeno proti stacionární desce (ocelovému testovacímu bloku) v přítomnosti testovaného maziva. Vytváří se tak liniový kontakt, který je charakteristický pro většinu tribologických kontaktů v reálných aplikacích. Ložisko je připojeno k vřetenu, které otáčí jeho vnitřním kroužkem, zatímco je testovací blok tlačěn proti němu. Pod ložiskovým kroužkem leží nádrž na mazací olej. Existuje však také varianta, kdy je mazivo do kontaktní oblasti přiváděno externě mazacím systémem.



Obr. 35 Zařízení Timken [3]

Zkouška se provádí po dobu 10 minut při postupně se zvyšujícím zkušebním zatížení, dokud se nestanoví maximální zatížení, které lze aplikovat na rameno páky, aniž by na desce vznikly rýhy. Maximální zatížení před tímto porušením je pak nazýváno jako „O.K. zatížení“ a slouží k indikaci pevnosti mazacího filmu. Minimální zatížení potřebné k poškrábání povrchu je označováno jako „Score Load“. O.K. zatížení se používá v zásadě pro měření schopnosti maziva chránit povrch před extrémním tlakem a zároveň pro určení podmínek hraničního mazání.

4 ZÁVĚRY

Tato práce je zaměřena na určování koeficientu tření a její součástí je stručný přehled metod měření a samotné problematiky.

V první části byly představeny vlivy tření na tvářecí jevy. Ty bývají ve většině případů nežádoucí, ovšem existují i případy, kdy je tření při technologickém procesu naopak vyžadováno, jelikož podmiňuje vlastní průběh procesu.

Dále byly představeny technologické metody měření koeficientu tření. Jedná se o testy, které většinou slouží k rychlému určení koeficientu tření bez nutnosti pořizování nákladných tribometrů. Tento fakt však také bývá vyvážen mírou nepřesnosti těchto měření. Technologické metody bývají zejména v posledních letech často doplněny o numerickou simulaci třecího kontaktu. Ta se používá zejména jako účinný prostředek pro ověření či zpřesnění zjištěných dat a nejčastěji takto používanou metodou je metoda konečných prvků.

K přesnějšímu měření koeficientu tření se dnes využívá specializovaných tribologických přístrojů, které se souhrnně označují jako tribometry. Těm byla věnována následující část. Problematika měření koeficientu tření blízce souvisí také s mazáním, značná část těchto přístrojů proto posuzuje třecí kontakt v přítomnosti maziva. V této práci byly popsány základní charakteristiky a konstrukční principy nepoužívanějších tribometrů, jak pro měření tření u suchého kontaktu, tak při přítomnosti maziv. Mezi nepoužívanější tribometry pak patří stroje pin-on-disk pro měření tření a four-ball nebo Timken pro hodnocení maziv.

Situace však v praxi není zcela jednoznačná a vhodný výběr tribometru vždy záleží na podmínkách určených materiálů a na použití výsledného vzorku. Právě z toho důvodu je běžné, že stále vznikají nové měřicí postupy a modifikace již používaných tribometrů pro konkrétní potřeby měření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [20]

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN isbn80-214-2374-9.
2. STACHOWIAK, G. W., A. W. BATCHELOR a Grazyna B. STACHOWIAK. *Experimental methods in tribology*. Amsterdam: Elsevier, 2004. Tribology series. ISBN isbn0-444-51589-5.
3. BHUSHAN, Bharat. *Introduction to tribology*. New York: John Wiley, c2002. ISBN isbn04-711-5893-3.
4. POPOV, Valentin L. *Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications*. 2nd ed. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-53081-8. ISBN 9783662530801.
5. *Technologie II* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm
6. WILLIAMS, John. *Engineering Tribology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. DOI: DOI: 10.1017/CBO9780511805905. ISBN 9780521609883. Dostupné také z: <https://www.cambridge.org/core/books/engineering-tribology/90E7FFB4FC70C118E1ADDC4ED8E6D471>
7. JONES, David R.H. a Michael F. ASHBY. *Chapter 29 - Friction and Wear*. Butterworth-Heinemann, 2019, s. 469-484. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102051-7.00029-4>. ISBN 978-0-08-102051-7. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020517000294>
8. FLITTA, Isaac a T. SHEPPARD. Nature of friction in extrusion process and its effect on material flow. *Materials Science and Technology*. 2003/07/01, 19, 837-846. DOI: 10.1179/026708303225004422.
9. BOUCHAËLA, Kenza, Mustapha FAQIR, Mohamad Fathi GHANAMEH, Mohammed MADA a El ESSADIQI. *Friction behavior of aluminum-lithium sheet thought deep drawing analysis*. 2019/07/01, s. -5, 1 s. DOI: 10.1109/ICCSRE.2019.8807682.
10. DUCOM INSTRUMENTS. Timken OK Load Tester. *Ducom Instruments* [online]. Nizozemsko: Ducom Instruments, 2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://ducom.com/test-instruments/lubricant-testers/timken-ok-load-tester/>
11. DUBIC, Tihomir. Disc Brake. In: *TurboSquid* [online]. Chorvatsko: TurboSquid, 2012 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3d-models/3d-car-disc-brake/713905>
12. SKF. Deep groove ball bearings. In: *SKF* [online]. Švédsko: skf [cit. 2020-06-1]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings#cid-463368>
13. BLAU, Peter J. *Friction science and technology: from concepts to applications*. 2nd ed. Boca Raton: FL: CRC Press, 2009. ISBN ISBN 978-142-0054-040.
14. HAGHIGHAT, H. a Gholam ASGARI. An upper bound solution of backward tube extrusion through curved punches. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2014/01/24, 20. DOI: 10.12776/ams.v20i1.214.

15. ANTON PAAR. Tribometr Pin-on-Disk: TRB³. In: *Anton Paar* [online]. Rakousko: Anton Paar Slovakia, 2020 [cit. 2020-06-1]. Dostupné z: <https://www.anton-paar.com/cz-cs/produkty/detaily/trb3-tribometr-pin-on-disk/>
16. SVOBODOVÁ, Magdalena. Součásti točivého a přímočarého pohybu: Druhy tření, mazání ložisek. *SPŠ Brno* [online]. Brno: Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská, 2012 [cit. 2020-09-11]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_14-02.pdf
17. DAVIM, J. Paulo, ed. *Modern Manufacturing Engineering*. Švýcarsko: Springer International Publishing, 2015. ISBN ISBN 978-3-319-20152-8.
18. Shahani AR, Setayeshi S, Nodamaie SA, Asadi MA, Rezaie S (2009) Prediction of influence parameters on the hot rolling process using finite element method and neural network. *J Mater Process Technol* 209(4):1920–1935
19. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody* [online]. Brno, 2003 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1_experimentalni_metody_cviceni_2019_forejt_piska_humar_janicek.pdf. Syllabus pro magisterský program. Vysoké učení technické v Brně.
20. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
21. KRATINA, Jakub. Součinitel tření. *E-konstruktor* [online]. Praha: e-konstruktor, 2013 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
22. RIVA, Gabriele, Francesco VARRIALE a Jens WAHLSTRÖM. A finite element analysis (FEA) approach to simulate the coefficient of friction of a brake system starting from material friction characterization. *Friction*. 2020. DOI: 10.1007/s40544-020-0397-9. ISSN 2223-7704. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0397-9>
23. SHETH, Saurin a Dr.Ketan TAMBOLI. *AN OVERVIEW OF SOME EXPERIMENTAL METHODS IN TRIBOLOGY*. 2008/03/24. DOI: 10.13140/RG.2.1.3349.7128/1.
24. FALEX. Falex Pin & Vee Block Tester. *Fact labs* [online]. Belgie: Falex Application Center for industrial Tribology, 2017 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.factlabs.org/component/spsimpleportfolio/item/13-falex-pin-vee-block-tester>
25. FALEX. Falex pin and vee block. *Falex* [online]. USA: Falex Corporation [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.falex.com/wp-content/uploads/2016/12/FalexPinVeeBlock.pdf>
26. KOBAYASHI, Takashi, Eiji SUZUKI a Yoshitaka UCHIYAMA. *Pin-on-disk type wear testing device*. 1989. Japonsko. 4 966 030 US4966030A. Uděleno 1990. Zapsáno 1989.
27. TRIBONET. Four Ball Tester. *Tribonet* [online]. Nizozemsko: Tribonet, 2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/four-ball-tester/>
28. Anon. Metal Drawing. *The library of manufacturing* [online]. [cit. 2020-08-12]. Dostupné z: https://thelibraryofmanufacturing.com/metal_drawing.html

29. *Standard Test Method for Wear Rate and Coefficient of Friction of Materials in SelfLubricated Rubbing Contact Using a Thrust Washer Testing Machine*. 2. (1999). USA: ASTM International, 1994. D 3702 – 94. Dostupné také z: <https://civilengineersstandard.com/wp-content/uploads/2019/02/D-3702.pdf>
30. INTERTEK. Wear Rate and Coefficient of Friction using a Thrust Washer Testing Machine ASTM D3702. *PTLI* [online]. USA: Intertek Plastics Technology Laboratories, 2020 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.ptli.com/testlopedia/tests/Thrust-Washer-D3702.asp>
31. POULIOS, K., N. DRAGO, P. KLIT a L. DE CHIFFRE. A reciprocating pin-on-plate test-rig for studying friction materials for holding brakes. *Wear*. 2014, **311**(1), 40-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.023>. ISSN 0043-1648. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164814000027>
32. GUNDERSON, Rachel R., Justin G. HOPKINS, Richard C. MAIN a Scott E. MALINOWSKI. *Twist Compression and Four-Ball Test Device Redesign* [online]. USA, 2010 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/109388/me450w10project6_report.pdf?sequence=1. Seminární práce. Michiganská univerzita. Vedoucí práce Gordon Krauss.
33. TRIBSYS INC. The TribSys Twist Compression Test. *TribSys* [online]. USA: TribSys, 2005 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://tribsys.com/TCT.htm>
34. FMA COMMUNICATIONS. R&D Update: Twist-compression testing to evaluate friction, lubrication. *The fabricator: Stamping journal* [online]. USA: FMA Communications, 2017 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/r-d-update-twist-compression-testing-to-evaluate-friction-lubrication>
35. *New Test Method for Measuring Friction and Adhesive Wear Properties of Lubricated and Unlubricated Materials Using the Twist Compression Test*. 2009. USA: ASTM International, 2009. ASTM WK24745. Dostupné také z: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK24745.htm>
36. AKELMAN, Matthew R., Erin TEEPLE, Jason T. MACHAN, Joseph J. CRISCO, Gregory D. JAY a Braden C. FLEMING. Pendulum mass affects the measurement of articular friction coefficient. *Journal of Biomechanics*. 2013, **46**(3), 615-618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.09.034>. ISSN 0021-9290. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929012005878>
37. VAN BEEK, Anton. Friction. *Tribology abc* [online]. Nizozemsko: Engineering abc [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.tribology-abc.com/abc/friction.htm>
38. SOFUOGLU, Hasan a Jahan RASTY. On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. *Tribology International*. 1999/06/01, **32**, 327-335. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00055-9.
39. ROBINSON, Trevor, H. OU a Cecil ARMSTRONG. Study on ring compression test using physical modeling a nd FE simulation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004/11/01, **153**, 54-59. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.045.
40. WANG, S.L. a J.A.H. RAMAEKERS. Measurement of friction and material flow-stress by a plane-strain compression tribometer. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, **57**(3), 345-350. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02082-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02082-9). ISSN 0924-0136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0924013695020829>

41. MANDIĆ, V a M STEFANOVIĆ. Friction Studies Utilizing the Ring - Compression Test -Part I. *Tribology in Industry*. 2003, **25**. Dostupné také z: <http://www.tribology.rs/journals/2003/1-2/4.pdf>
42. PETROV, Michael A., Pavel A. PETROV a Ramil R. YAFAEV. To the Question on the Friction Assessment Methods Applied for Metal Forming Operations. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, 2015, **651-653**, 522-529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.522. ISSN 1662-9795. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/KEM.651-653.522>
43. SRIVASTAVA, Arpit, Anurag SRIVASTAVA a Anand MISHRA. Analysis of Friction Factor & Coefficient Of Friction Using Ring Compression Test under Various Lubricants. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*. 2019/06/30, **9**. DOI: 10.31873/IJETR.9.6.2019.71.
44. DROZD, Kamil, Jaromír HORSINKA, Jiří KLIBER, Martin ČERNÝ, Dmytro OSTROUSHKO a Ilija MAMUZIC. *Study of development of strain in plane strain compression test* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-08-15]. Dostupné z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_11/lists/papers/932.pdf. Studie. VŠB-TU Ostrava a Záhřebská univerzita.
45. HAN, Han. *Determination of Flow Stress and Coefficient of Friction for Extruded Anisotropic Materials under Cold Forming Conditions* [online]. Švédsko, 2002 [cit. 2020-09-11]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:7399/FULLTEXT01>. Licenciální práce. Královský technologický institut Stockholm.
46. ČVANDA, Petr. *Úloha maziva v technologii tváření* [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-09-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6163. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Eva Peterková.
47. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Technologie objemového tváření – kování. KSP TUL* [online]. Liberec: Katedra strojírenské technologie TUL, 2018 [cit. 2020-08-14]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm
48. TOMLINSON, A. Open Die Forging. In: *Metal forming* [online]. Velká Británie: Palgrave Macmillan, 1971, s. 19-25 [cit. 2020-08-13]. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-349-01188-9_3. ISBN 978-1-349-01188-9. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-349-01188-9_3
49. FLITTA, I. a T. SHEPPARD. Nature of friction in extrusion process and its effect on material flow. *Materials Science and Technology*. Taylor & Francis, 2003/07/01, **19**(7), 837-846. DOI: 10.1179/026708303225004422. ISSN 0267-0836. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1179/026708303225004422>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řez kuličkovým ložiskem [12]	8
Obr. 2 Brzdový kotouč s čelistí [11]	8
Obr. 3 Tribometr typu pin-on-disk [15]	8
Obr. 4 Těleso konající smykové tření [3]	9
Obr. 5 Síly působící na těleso při smykovém tření [3]	9
Obr. 6 Závislost tangenciální třecí síly na čase [3]	10
Obr. 7 Suché tření [16]	11
Obr. 8 Mezní tření [16]	11
Obr. 9 Hydrodynamické tření [16]	11
Obr. 10 Striebeckův diagram oblastí tření [1]	12
Obr. 11 Vliv tření na operaci přechování [46]	13
Obr. 12 Závislost třecího faktoru na síle protlačování a délce razníku [14]	14
Obr. 13 Podélné válcování [17]	15
Obr. 14 Působení tření v procesu tažení [5], [9]	15
Obr. 15 Schématická ilustrace konceptu průměrného koeficientu tření [3]	16
Obr. 16 Metoda nakloněné roviny [4]	17
Obr. 17 Síly působící na těleso při metodě nakloněné roviny [4]	17
Obr. 18 Konstrukční řešení kyvadla pro měření tření [2]	18
Obr. 19 Graf závislosti amplitudy na zatížení [2]	18
Obr. 20 Zkouška přechování prstence [19]	19
Obr. 21 Deformace vzorku charakterizující různé stupně tření [19]	19
Obr. 22 Zobecněný kalibrační třecí diagram [38]	20
Obr. 23 Plain strain compression test [19]	21
Obr. 24 Twist-compression test [34]	22
Obr. 25 Porovnání výsledků získaných z tribometru a vypočtených pomocí MKP [22]	24
Obr. 26 Metoda Pin-on-disk [6]	25
Obr. 27 Metoda Pin-on-flat [6]	26
Obr. 28 Metoda Pin-on-cylinder [6]	26
Obr. 29 Metoda Thrust Washers [3]	26
Obr. 30 Metoda Pin-into-bushing [6]	27
Obr. 31 Metoda Crossed Cylinders [6]	27
Obr. 32 Metoda Four-Ball [3]	28
Obr. 33 Konstrukční řešení testovacího zařízení Shell four-ball [6]	28
Obr. 34 Zařízení Pin & Vee [3]	29
Obr. 35 Zařízení Timken [3]	29