

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 394

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Stanislav Mannsbart

**Modelování třecího odporu
při objemovém tváření za studena**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Ústav strojírenské technologie

Ing. Stanislav Mannsbart

**MODELOVÁNÍ TŘECÍHO ODPORU
PŘI OBJEMOVÉM TVÁŘENÍ ZA STUDENA**

FRICION MODELING
IN COLD BULK FORMING CONDITIONS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Strojírenská technologie
Školitel: doc. Ing. Karel Novotný, CSc.
Oponenti: prof. Ing. Radko Samek, CSc.
doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.
doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.
Datum obhajoby: 13. 9. 2006

Klíčová slova:

tření, mazání, zkouška pětchování kroužku, MKP

Key Words:

friction, lubrication, ring compression test, FEM

Práce je k dispozici na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

OBSAH

OBSAH	3
1. ÚVOD	5
2. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	6
3. PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY	7
3.1 Teorie tření, režimy tření, opotřebení	7
3.1.1 Teorie tření	7
3.1.2 Režimy tření	7
3.1.3 Opotřebení	8
3.2 Povrch kovů	9
3.3 Třecí odpor v objemovém tváření	9
3.4 Modelování tvářecích procesů	10
3.4.1 Klasická teorie plasticity	11
3.4.2 Numerické metody modelování plastické deformace materiálu	11
3.4.3 Modelování vlivu tření na tvářecí proces	14
3.5 Zkoušky tření	17
3.6 Maziva a jejich užití	19
4. ZKOUŠKA PĚCHOVÁNÍ KROUŽKU	20
4.1 Příprava	20
4.2 Provedení experimentu a zpracování naměřených hodnot	21
4.3 Porovnání s výsledky simulace MKP	24
5. SHRUTÍ VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	25
Seznam použité literatury	27
Životopis	29
Abstrakt	30

1. ÚVOD

Objemové tváření získává stále širší uplatnění při výrobě symetrických součástí, neboť má proti třískovému obrábění řadu výhod. Přináší především podstatnou úsporu materiálu, snížení výrobních časů, zvýšení produktivity, snížení výrobních nákladů a zlepšení mechanických vlastností výrobků.

Jedním ze způsobů, jak snižovat náklady spojené s opotřebením nástrojů, tzn. zejména náklady oprav vlivem opotřebením a odstraňování kolizí, je správné navržení konstrukce nástroje s ohledem na jeho technologické určení a navržení vhodných technologických podmínek.

Souhrnně můžeme říci, že tření v kontaktu nástroj-tvařenec působí takto:

- má vliv na stav napjatosti a přetvoření v objemu materiálu a také v oblasti kontaktu
- významně ovlivňuje spotřebu energie potřebnou pro uskutečnění procesu,
- působí na rozložení a velikost přetvárného odporu a tím ovlivňuje silové namáhání nástroje
- má vliv na opotřebením a tím i na životnost nástrojů
- působí na stav, průběh a rovnoměrnost přetvoření a tím i na výsledné mechanické vlastnosti tvařence
- má vliv na celkový průběh tvářecího procesu

S ohledem na různorodost pracovních podmínek se při tváření kovů používá široký sortiment maziv s příslušnými požadovanými vlastnostmi. Specifikace maziv udávané výrobcem informují uživatele o vhodnosti maziva pro určitou operaci jen slovně. Terminologie používaná výrobcem však bývá často nepřesná a uživatel bývá z komerčních důvodů přesvědčován o vhodnosti toho kterého nabízeného produktu. Nová maziva jsou obvykle vyvíjena dle konkrétního požadavku a teprve potom se hledá jejich širší uplatnění. Vývoj maziva probíhá zřídka před vývojem nové technologie anebo souběžně s ním.

V posledních letech dochází v oboru tváření k masivnějšímu využívání výpočetních systémů na bázi metody konečných prvků. Tato metoda je hojně využívána v technické praxi. Prvotní problémy, které provázely její nasazení pro výpočty složitých úloh technologie tváření se postupně odstraňují. Jedná se zejména o implementaci vhodného (nejvhodněji popisujícího) materiálového modelu, kontaktních podmínek, podmínek přenosu tepla, atd. V současnosti můžeme pozorovat kvalitativní zlepšení všech fází použití simulačních softwarů z hlediska uživatele:

- přechod od jednoduchých rovinných a osově symetrických úloh k trojdimenzionálním,
- příprava (preprocessing) s možností exportu dat z jiných systémů,
- zpracování výsledků (postprocessing) s prvky interaktivity.

2. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

V současnosti existuje široký výběr software pro simulaci tvářecích technologií. Dokonalejší a dražší 3D systémy obsahují rozsáhlejší databáze materiálových vlastností avšak většinou jen pro zahraniční ekvivalenty u nás používaných materiálů. Při aplikaci software uživatel při zadávání podmínek procesu ovšem většinou nemá znalost koeficientu tření a třecího faktoru, jež se mění s technologickými a provozními podmínkami a použitým mazivem.

Ve výrobní fázi chybí znalosti, které mazivo je pro danou technologii nejvhodnější. Technolog se pak většinou řídí zkušenostmi z předešlých let, nebo je jeho výběr determinován doporučením výrobců maziv.

Vzhledem k výše uvedenému je potřeba zabývat se problematikou modelování tření, sumarizovat a analyzovat poznatky z této oblasti a vyhodnotit jejich význam pro realizaci v praxi či další rozvoj vědního oboru, a to i na základě provedených experimentů.

Tato disertační práce je proto zaměřena ke splnění následujících cílů:

1. Provést přehled současného stavu teorie a praxe v oboru tribologie v oblasti tváření za studena.
2. Provést přehled současného stavu řešení pomocí výpočetních metod a jejich vztah k tření.
3. Vybrat a provést tribologické zkoušky, jež jsou pro stanovení koeficientu tření a třecího faktoru nejvhodnější.
4. Provést rozbor těchto zkoušek a prezentovat výsledky.

3. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Tato část disertační práce se bude věnovat poznatkům z oblasti tření, opotřebení, mazání a jeho zkoušení v technologiích objemového tváření. Další část bude věnována modelování tvářecích procesů a problematice modelování tření v analýze tvářecího procesu.

3.1 TEORIE TŘENÍ, REŽIMY TŘENÍ, OPOTŘEBENÍ

[12], [13], [14], [20], [16], [20], [24], [25], [38]

Jedním ze základních jevů doprovázejících každodenní technickou praxi je vnější tření, charakterizované jako odpor proti pohybu stýkajících se těles. Teorie uplatňující se v oboru tváření se opírá o poznatky z tribologie v pružné oblasti zatěžování povrchů. V technické praxi a také technologiích tváření se přistupuje k problematice tření a opotřebení jako k makroskopickému jevu - třecí dvojice látek je tvořena izotropním kontinuem.

Ve fyzikálním popisu tření se setkáváme jak s přístupem makroskopickým, tak i s přístupem mikroskopickým, kdy je jev zkoumán na atomární úrovni. Mikroskopický přístup se zabývá nejen třením v kontaktu dvou materiálů, ale také vnitřním třením (mezimolekulárním třením).

3.1.1 Teorie tření

Teorie tření dělíme zpravidla na:

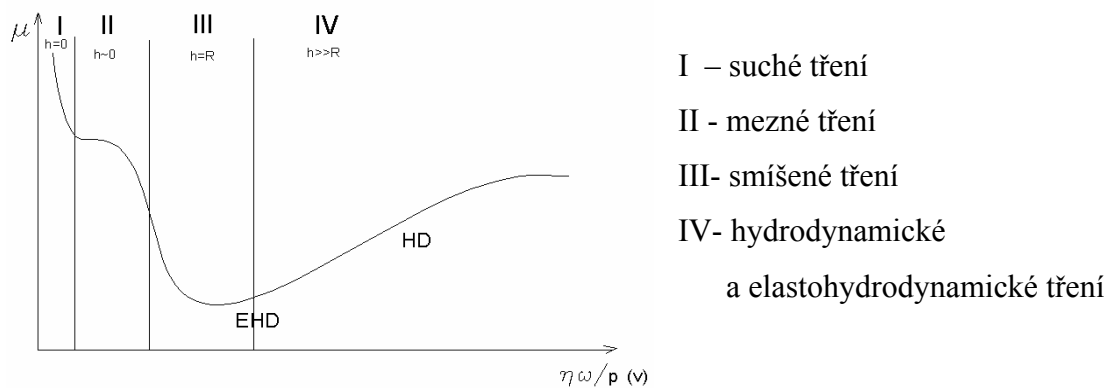
- A. Molekulovou teorii tření
- B. Teorii adhezní (mikrosvarů)
- C. Modifikovanou adhezní teorii
- D. Teorii tření v mikroměřítku

3.1.2 Režimy tření

Při posuzování kontaktu třecí dvojice se rozlišuje suché a kapalinné tření. Při suchém tření dochází k bezprostřednímu kontaktu třecích povrchů, při kapalinném jsou povrchy odděleny viskózní tekutinou (kapalinou nebo plynem).

Režimy tření a mazání dělíme na základě Stribeckova diagramu na:

- A. Suché tření
- B. Mezné tření
- C. Kapalinné tření
- D. Elastohydrodynamické tření
- F. Plastohydrodynamické tření
- G. Smíšené tření



Obr. 3.1 Stribeckův diagram

3.1.3 Opotřebení

Tření s sebou přináší nejen odpor proti pohybu, ale také změny na stykových plochách materiálů třecí dvojice. Mezi tyto změny můžeme zařadit: nanášení, odnos, vázání, sublimování, adsorpci, difúzi, oxidaci, přetváření, zpevňování, tavení, atd.

Základní dělení opotřebení je na:

- opotřebení úbytkové
- opotřebení změnou tvaru
- opotřebení zadíráním

Nejvýznamnější je opotřebení úbytkové, jelikož tímto druhem opotřebení trpí v technologiích tváření většina kontaktních dvojic nástroj-tvařenec. Opotřebení zadíráním má za následek vznik mikrosvarů a tudíž znehodnocení tvařence. Opotřebení změnou tvaru zapříčiňuje vznik drážek, rýh a vtisků.

V praxi rozlišujeme tyto základní mechanismy opotřebení:

- adhezní
- abrazivní
- korozivní
- únavové

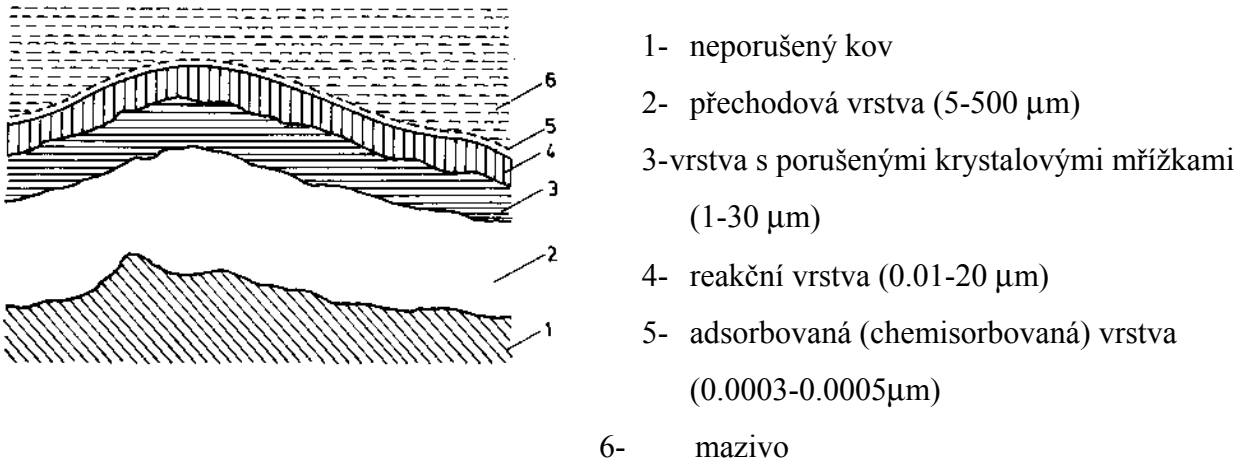
Při studiu opotřebení a volbě vhodného opatření je nutno sledovat tyto činitele:

- typ relativního pohybu (kluzný, valivý, kmitavý)
- složení, makro- a mikrogeometrii povrchu dvojice (menší drsnost podporuje vznik adheze, vyšší drsnost zase vznik abraze)
- pracovní podmínky (zatížení, mazání)
- vlastnosti materiálu, strukturní změny
- vzhled opotřebovaných povrchů
- převládající mechanismus

3.2 POVRCH KOVŮ

[16], [18], [27], [14]

Pro studium tření je nutno zabývat se stavem povrchů v kontaktní dvojici. Reálný povrch je nutno uvažovat jak z hlediska chemické struktury, tak z hlediska geometrického.



Obr. 3.2 Povrchová vrstva kovů

3.3 TŘECÍ ODPOR V OBJEMOVÉM TVÁŘENÍ

[12], [18], [35], [36], [21]

Při tváření kovů se pracuje obvykle v oblasti suchého, mezného a smíšeného tření. U některých aplikací se pracuje i v oblasti kapalinného tření, zde se však jedná o speciální technologie jako např. hydrostatické protlačování nebo protahování průvlekem při hydrodynamickém režimu.

Pro analýzu vztahu mezi smykovým napětím a ostatními parametry se užívá tři modelů:

- Coulombova modelu používající koeficient tření:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.1)$$

Smykové napětí je přímo úměrné kontaktnímu tlaku σ_n a μ je nezávislé na σ_n .

- Modelu užívajícího třecí faktor

$$\tau = m \tau_0 = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Smykové napětí je část meze pevnosti materiálu ve smyku.

- Modelu hydrodynamického tření, kde se užije:

$$\tau = \eta D \quad (3.3)$$

V aplikacích tváření dosahují kontaktní tlaky velikosti násobků meze kluzu v tahu materiálu, avšak smykové napětí τ nemůže přesáhnout mez pevnost ve smyku τ_0 . Jestliže smykové napětí dosáhne τ_0 , pak je zabráněno pohybu v povrchové vrstvě (sticking friction) a deformace pokračuje tokem nebo smykem uvnitř materiálu.

Jelikož $\tau_0 = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_0$, nemůže koeficient tření μ přesáhnout hodnotu přibližně 0.577.

Za podmínky τ_{\max} nemůže koeficient smykového tření přesáhnout hodnotu 0.5.

Na kontaktní ploše, která není mazána a postrádá tudíž nosnou vrstvu maziva, dochází k zplastizování výstupků nerovností a zvyšuje se nebezpečí vzniku difuzního spoje. Při použití maziv se dostáváme do oblasti mezního, smíšeného a, jak bylo uvedeno, i hydrodynamického režimu. Koeficient tření se u mazaných povrchů pohybuje u tváření za studena v rozmezí hodnot 0.015 až 0.25, u tváření za tepla byl experimentálně zjištěn poněkud vyšší, a to v rozmezí hodnot 0.2 až 0.4.

3.4. MODELOVÁNÍ TVÁŘECÍCH PROCESŮ

[1], [4] [5], [6], [7],[8],[9], [10], [11], [15], [17], [19]

Základní dělení modelování tvářecích procesů je na experimentální a matematické.

Experimentální metody slouží k získání potřebných dat pro matematické modelování a mají za úkol ověření matematického modelu.

Matematické metody dělíme na analytické a experimentální. Matematické modelování procesu tváření je užití matematických metod a počítačové simulace k určení vhodné technologie, konstrukce nástrojů a zařízení, k optimalizaci a řízení procesu. Cílem je určení energeticko – silových parametrů, potřebných k realizaci technologie a designu nástrojů a volby strojů, a dále charakteristiky toku materiálu během deformace (ϵ , $\dot{\epsilon}$, v , tvar) a limity tvařitelnosti.

Základem modelování tvářecích procesů je teorie plasticity, která je:

- makroskopická
- fenomenologická

a vychází z mechaniky kontinua. Je popsána těmito základními rovnicemi:

- rovnice rovnováhy sil
- rovnice kontinuity toku (geometrické, kompatibility, zachování objemu)
- rovnice konstitutivní (závislost $\sigma = f(\epsilon)$)
- rovnice okrajových podmínek (statické, geometrické, třecí)

Problematiku modelování tvářecích procesů je vhodné rozdělit do následujících kapitol, podávajících stručný výčet základních metod používaných v teorii a inženýrské praxi pro modelování technologických výpočtů v oblasti tváření kovů:

3.4.1 Klasická teorie plasticity

Klasická teorie vychází ze základních stavebních kamenů - zákonů plasticity, které se popisují těmito typy rovnic:

- a) rovnice závislosti napětí – deformace
- b) rovnice podmínek rovnováhy
- c) rovnice podmínek kompatibility
- d) rovnice podmínek plasticity
- e) rovnice okrajových podmínek

Nejčastěji se používá pro řešení úloh plasticity deformační varianta teorie plasticity (v neznámých posunutích). Analytické řešení úloh, jež jsou popsány parciálními diferenciálními rovnicemi vyšších řádů, jsou řešitelné jen v málo případech, a proto se zavádí různá zjednodušení.

3.4.2 Numerické metody modelování plastické deformace materiálu

Pro technické výpočty numerickou simulací se používá několik metod, přičemž mezi nejpoužívanější patří:

- metoda horní meze
- metoda okrajových prvků
- metoda konečných prvků

A) METODA HORNÍ MEZE

Princip metody horní meze spočívá v tom, že součet okamžitých výkonů vnitřních sil je roven výkonu tvářecí síly:

$$\sum P_j = \sum \tau_j \cdot w_j \cdot l_j = F \cdot w_o = P_f \quad (3.4)$$

Výkon tvářecí síly se skládá z výkonu spotřebovaného na homogenní plastickou deformaci, ze ztrátového výkonu vlivem diskontinuit rychlostního pole podél povrchu, ze ztrát vlivem tření a z výkonu dodávaného z vnějšku. Je popisován rovnicí:

$$P = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV + \int_{S_s} \tau \dot{u} dS + \int_{S_c} T \dot{u} dS - \int_{S_t} T \dot{u} dS \quad (3.5)$$

Z výkonu lze potom stanovit horní odhad tvářecí síly a tvářecího tlaku.

Mezi možné aplikace patří:

- rychlá předpověď tvářecí síly v zápusťkovém kování
- předpověď toku materiálu
- konstrukce předkovku
- předpověď lokálního tlaku v zápusťce

B) METODA OKRAJOVÝCH PRVKŮ (BEM)

Základem pro analýzu pomocí BEM je materiálový model nestlačitelné newtonské kapaliny

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{i} + 2\eta(T)\mathbf{D} \quad (3.6)$$

Jestliže lze zanedbat elastické vlastnosti, můžeme užít jednoduchý viskózní model, který vychází ze stejného vzorce, ale

$\eta = f(T, \dot{\gamma})$, kde $\dot{\gamma}$ je rychlost smykové deformace.

Okrajové podmínky pro analýzu jsou následující:

- podmínky rychlosti posuvu povrchů
- energetické rovnice pro přestup tepla
- třecí síla

Metoda BEM se aplikuje v technologii tváření při protlačování za tepla, izotermickém protlačování tajičího plastu a také při lisování plechu.

C) METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (FEM, MKP)

Postup řešení úloh MKP analýzy dělíme do tří fází:

1. diskretizace kontinua
2. analýza prvku
3. analýza systému

Pro modelování tvářecích procesů pomocí FEM je nutné uvážit materiálový model. Materiálové modely používané jednotlivými softwary na FEM analýzu jsou následující:

- tuho-plastický model
- tuho-viskoplastický
- elasticko-plastický
- elasticko-viskoplastický

Pomocí **tuhoplastického modelu FEM** jsou řešeny úlohy v případech, kdy můžeme zanedbat pružnou oblast zatížení – zejména v technologii kování. Pro vstup do výpočetního systému FEM se použije rovnice Levy-Misesova:

$$\sigma_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad \text{kde } \bar{\sigma} < \sigma_K \text{ pro tuhou oblast} \quad (3.7)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_K \text{ pro plastickou oblast.}$$

V dalším kroku je třeba ošetřit kontaktní okrajové podmínky (rychlost uzlu = rychlost nástroje). Třecí kontaktní podmínky se udávají dvojím způsobem - pomocí Coulombovského modelu tření nebo faktorem tření. Je nutno ošetřit také neutrální body s nulovou rychlostí. Tímto modelem lze simulovat kombinovaný výpočet deformační a teplotní. Při teplotním výpočtu se vychází z 1. a 2. zákona termodynamiky.

Visko-plastický model FEM využívá Norton-Hoffův zákon. Tento model zahrnuje vliv okolní teploty, deformační zpevňování a kontaktní podmínky.

Konstitutivní rovnicí chování materiálu je pak výše zmíněný Norton-Hoffův zákon:

$$\sigma_{ij} = 2K(\sqrt{3} \bar{\epsilon})^{n-1} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3.8)$$

$n = 1$ odpovídá Newtonské kapalině s viskozitou $\eta=K$

$n = 0$ odpovídá zákonu plastického toku podle HMM podmínky plasticity

$$s \sigma_K = \sqrt{3}K$$

$n \in (0,1)$ je aproximací tváření kovů za tepla,

Pro většinu běžných kovů je n 0,1 až 0,2, superplastické materiály dosahují hodnot 0,5 až 0,7.

Mezi hlavní aplikace tohoto přístupu, jež je sice výpočtově náročnější než tuhoplastický model, avšak použitelnější, patří:

- simulace kontinuálního lití
- válcování za tepla
- superplastické tváření tenkých plechů
- kování za tepla i za studena

Elasticko-plastický model chování materiálu se využije tam, kde předešlé přístupy již nestačí, neboť zahrnuje i vliv elastické deformace. Je možno postihnout také zbytková napětí a odpružení. Tento model se s výhodou aplikuje pro simulaci tváření za studena. Konstitutivní rovnice popisující chování materiálu se dělí na dvě části:

- pro pružnou oblast se použije zobecněný Hookeův zákon:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \left(d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \delta_{ij} d\sigma_{kk} \right) \quad (3.9)$$

- pro plastickou oblast se použije Prandtl-Reusova teorie zahrnující pružnou i plastickou oblast:

$$d\sigma_{ij} = 2G \left[(d\varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p) + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-2\nu} d\varepsilon_{kk} - \sigma_{ij}^n \frac{\sigma_{ke}^n d\varepsilon_{ke}}{S} \right] \quad (3.10)$$

MKP založená na elasticko-plastickém modelu chování má sice vyšší nároky na výpočetní čas, zahrnuje však také geometrickou nestabilitu a může počítat i s materiálovou nehomogenitou.

Metoda konečných prvků je v praxi nejpoužívanější, neboť dává dobré výsledky. Problémem je však implementace vhodného výpočtového modelu materiálových vlastností, protože, jak již bylo uvedeno výše, každý model se hodí pro jiný typ úloh. Kontrola správnosti výsledků řešení je možná jen experimentální cestou. Výsledky ze simulace MKP představují soubor veličin (složky tenzoru deformace a napětí, vektorů rychlosti materiálového toku, rozložení teplot, atd.) prezentovaných numericky nebo graficky. Soubor veličin může být konfrontován s:

- průběhem tvářecích sil
- tvarem a rozměry výrobku
- hodnotou středních kontaktních napětí
- rozložením mikrotvrdomi
- průběhem toku materiálu
- rozložením deformací a napětí (visioplastické a fotoplastické metody)

3.4.3 Modelování vlivu tváření na tvářecí proces

[1], [8], [17], [19], [35]

Následující část se zaměřuje na modelování třecího odporu v analýze metodou konečných prvků, jelikož tato metoda je nejpoužívanější a v současnosti dává nejlepší výsledky použitelné v inženýrské praxi.

Ve výpočtových systémech, kde je použit tuho-plastický a pružně-plastický model chování materiálu je okrajová podmínka tření implementována dvěma základními způsoby:

A. Coulombův model tření

Coulombův model využívá konstantu zvanou koeficient tření, kterou lze vyjádřit:

$$\tau_f = \mu \sigma_n, \text{ kde } \tau_f \text{ je tečné napětí od smykového tření,}$$

σ_n je kontaktní tlak.

Shora uvedený vzorec vychází z klasické teorie tření pro tělesa v pružném stavu.

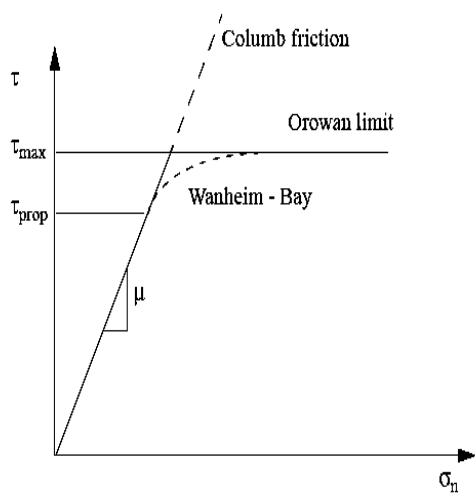
Tento základní vztah byl dále rozšířen o vliv rychlosti - používá se upravený model:

$$\tau = \mu \sigma_n \frac{\dot{u}_T}{|u_T|} \quad (3.11)$$

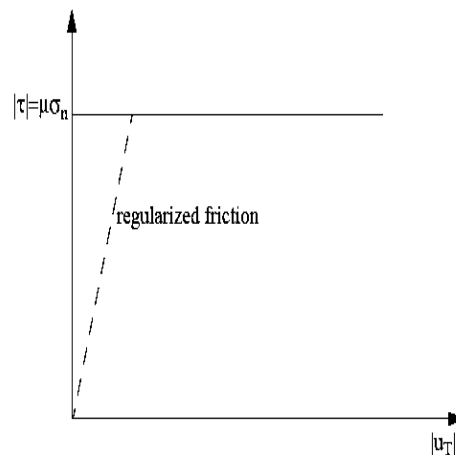
Montmitonnet a Felder (1989) zavedli konstantu p , jež zahrnuje závislost na rychlosti relativního pohybu:

$$\tau = \mu |u_T|^p \sigma_n \frac{\dot{u}_T}{|u_T|} \quad (3.12)$$

Maximální velikost smykového napětí kontaktu třecí dvojice může ovlivnit přítomnost oxidů. Tuto skutečnost postihl ve svém modelu Orowan (1943) zavedením horní meze třecího napětí. Jeho práce dále rozvedli Wanheim a Bay (1987) - viz obr. 3.3.



Obr. 3.13 Horní mez třecího napětí



Obr. 3.4 Regulované tření

Pro případy, kdy dochází k náhlým změnám rychlosti, bylo nutno upravit Coulombův model zavedením regulačního parametru. Tento parametr závisí na použitém FEM kódu. Má význam hlavně u kvazistatických jevů.

B. Trescův model tření

Trescův model tření je vyjádřen:

$$\tau_f = m \tau_0, \text{ kde } \tau_0 \text{ je pevnost ve smyku, } m \text{ je tzv. třecí faktor}$$

Třecí faktor je v rozmezí $0 \leq m \leq 1$. Pokud dosáhne $m = 1$, dochází k ulpívání materiálu a kluzu po hranicích zrn. Zavedením tohoto modelu byla v algoritmu FEM analýzy odstraněna nutnost znalosti normálového tlaku, jenž se objevuje jako hlavní veličina v modelu Coulombově. Trescův model doznal v tomto směru postupem času doplnění a úprav, kdy bylo zejména nutno zahrnout vliv rychlosti posuvu v systému nástroj – tvařenec a dále problematiku neutrálního bodu (tj. bodu, ve kterém se mění směr vektoru rychlosti posuvu, tedy $v = 0$ a tedy i τ_f mění směr). Zatímco poloha neutrálního bodu není známa a k aplikaci třecích okrajových podmínek musí být použity speciální techniky výpočtu, je směr třecí síly automaticky vybrán v závislosti na relativním prokluzu na rozhraní nástroj – tvařenec.

Matsumoto a Jackson vzali model τ_f jako iniciální veličinu pro popis rychlostního pole zavedením rychlostního funkcionálu.

K zlepšení konvergenční charakteristiky zavedli Chen a Kobayashi modifikovanou formu Trescova vztahu:

$$\tau_f = - \left[m \tau_0 \left(\frac{2}{\pi} \right) \tan^{-1} \left(\frac{v_R}{v_T 10^{-5}} \right) \right] \quad (3.13)$$

Tento vztah má za následek vylepšení přechodu ze záporného do kladného směru τ_f .

U visko-plastického (tuho-viskoplastického a elasto-viskoplastického) modelu FEM je konstitutivní rovnicí pro vztah $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ **Norton-Hoffův** vztah, který lze vyjádřit:

$$\sigma_{ij} = 2K(\sqrt{3} \dot{\varepsilon})^{n-1} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (3.14)$$

Norton-Hoffův zákon byl pro výpočetní potřeby v rámci analýzy FEM také dále regulován. Viskoplastický model je úspěšně používán i pro případy stlačitelných – porézních materiálů. Do viskoplastického modelu lze zahrnout i anizotropii materiálu a dokonce zjednodušenou formou popsat změnu vlastností vlivem mikrostruktury. Vliv mikrostruktury popisujeme přepočtem na referenční parametr velikosti zrna dle následujícího vztahu:

$$K = K_G \left(\frac{G}{G_0} \right).$$

Pro vyjádření třecího odporu se používá Nortonův zákon tření, jež je analogií k Norton-Hoffovu zákonu a lze jej vyjádřit:

$$\tau = -\alpha K \left| \Delta \mathbf{v} \right|^{m-1} \Delta \mathbf{v} \quad (3.15)$$

3.5 ZKOUŠKY TŘENÍ [12],[21], [18], [23]

K empirickému ověření vhodnosti maziv pro sledovanou technologii tváření a k určení parametrů kontaktu, vyjádřených zejména koeficientem tření či třecím faktorem, byla navržena celá řada zkoušek, které můžeme rozdělit na zkoušky přímé (technologické) a nepřímé (simulační).

A. PŘÍMÉ (TECHNOLOGICKÉ) ZKOUŠKY

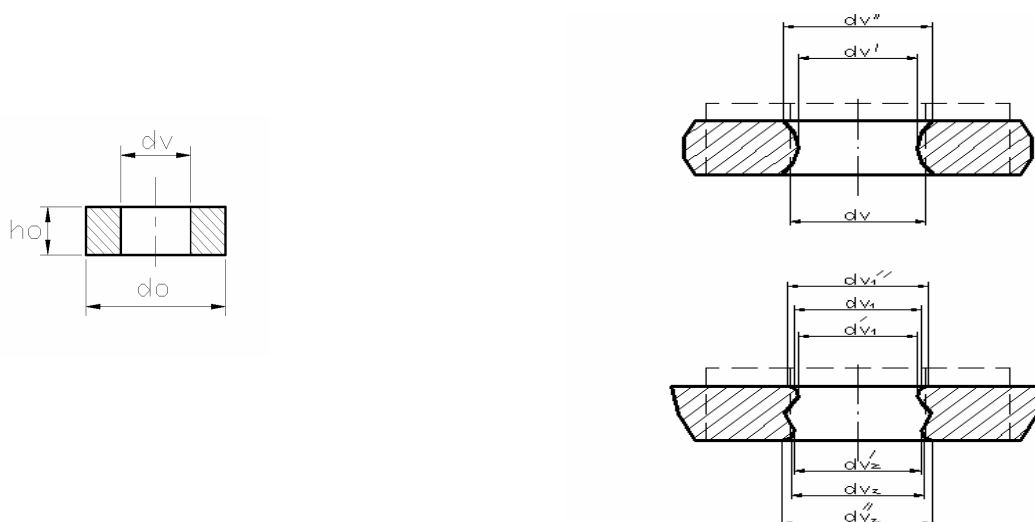
Technologické (přímé) zkoušky simulují podmínky jednotlivých tvářecích technologií za účelem možnosti porovnání a zejména vyčíslení třecích vlastností maziv. Tyto zkoušky jsou navrženy pro jednoduchou geometrii tvařenců – využívají především osové symetrie. Jednotlivé zkoušky se dělí dle technologie, pro kterou jsou navrženy.

B. NEPŘÍMÉ (SIMULAČNÍ) ZKOUŠKY

Simulační testy se provádějí zejména jako testy tření a opotřebení a jako testy vhodnosti maziv pro konstrukční celky. V oboru tváření nemají takovou vypovídací schopnost jako zkoušky technologické, a to z důvodu vysokých zatížení a teplot, které se ve tváření kovových materiálů vyskytují

ZKOUŠKA PĚCHOVÁNÍ KROUŽKU [21], [26], [12], [37], [18]

Na základě přehledu provedeného v předchozí kapitole byla k podrobnějšímu rozboru vybrána zkouška pěchování kroužku, která se řadí k nejvíce používaným zkouškám tření při objemovém tváření za studena a za tepla. Její aplikaci v praxi napomáhá jednoduchá geometrie vzorků a malá náročnost na zkušební zařízení.



Obr. 3.5 Geometrický model pro vyhodnocení pěchovací zkoušky kroužků

Male a Cocroft na základě komparace geometrických změn při pěchování válečku a na základě znalosti koeficientů tření z pěchování válečků a sledování změn geometrie kroužku, sestavili kalibrační diagram pěchovací zkoušky kroužků. Tento diagram byl původně sestaven pro koeficient tření f (obr.3.6 b) a později byl převeden i pro třecí faktor m (obr. 3.6 a).

Při zkoušce tření pěchováním kroužku se měří změna vnitřního průměru v závislosti na změně výšky. Hodnoty se vynášejí do experimentálně-analyticky zhotoveného kalibračního diagramu.

Aby byla jednotlivá měření porovnatelná, bylo nutno zavést geometrický standart kroužku pro tuto zkoušku. Dnes se za standardní kroužek považuje kroužek s poměrem vnější průměr:vnitřní průměr:výška 6:3:2.

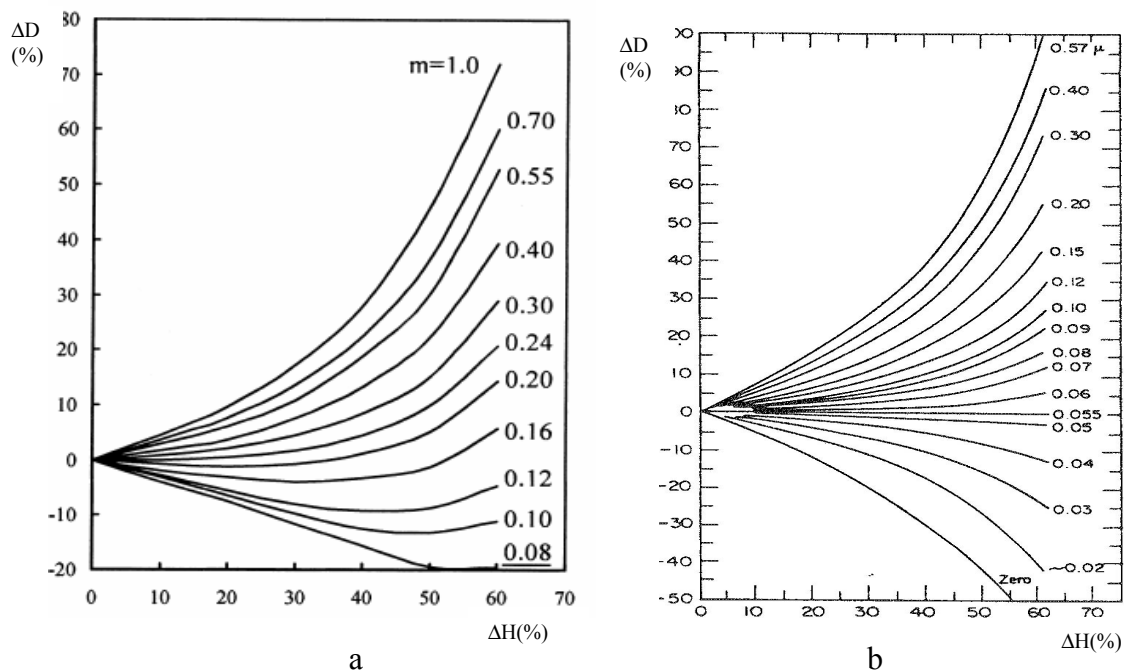
Výpočet poměrné změny vnitřního průměru (svislá osa kalibračního diagramu):

$$\Delta d = \frac{d_v - \frac{2d_v'' - d_v'}{3}}{d_v} 100[\%] \text{ pro kvazistatické podmínky zkoušky} \quad (3.16)$$

$$\Delta d = \frac{d_v - \frac{d_{v1} + d_{v2}}{2}}{d_v} 100[\%] \text{ pro dynamické podmínky zkoušky.} \quad (3.17)$$

Výpočet poměrné změny výšky (vodorovná osa kalibračního diagramu):

$$\Delta H = \frac{H_0 - H}{H_0} 100[\%] \quad (3.18)$$



Obr. 3.6 Kalibrační digram pro standardní kroužek a) pro třecí faktor, b)pro koeficient třen

3.6 MAZIVA A JEJICH UŽITÍ

[12],[13],[14],[20],[16],[20],[24]

VLASTNOSTI MAZIV

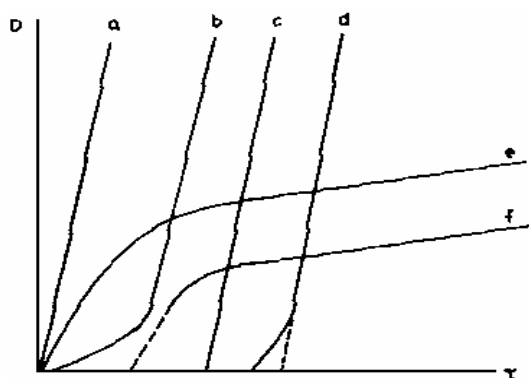
Mezi nejdůležitější vlastnosti z hlediska užití maziv patří:

- Hustota
- Reologické vlastnosti (viskózní)
- Životnost (odolnost proti oxidaci, záření, elektrickým polím, chemickým látkám)
- Teplotní vlastnosti (bod tuhnutí, zákalu, odparnost, vzplanutí, hoření, bod skápnutí, mez pevnosti plastických maziv, atd.)
- Elektrické vlastnosti (vodivost, permitivita)
- Povrchové vlastnosti (povrchové napětí, adsorpce, pění, rozprašování, tvorba emulzí, ochranná schopnost, atd.)
- Fyziologické vlastnosti

Z hlediska výběru vhodného maziva je jednou z nejdůležitějších vlastností jeho reologie. Podle vztahu mezi smykovým napětím τ a smykovým spádem D , kde

$D = \frac{dv}{dz}$ dělíme maziva na :

- tekutiny newtonské, jež mají lineární vztah $\tau = D$
- tekutiny neneutonské, jež nemají lineární vztah $\tau = f(D)$, mezi které patří:
 - Tekutiny pseudoplastické
 - Látky ideálně plastické
 - Látky kvaziplastické
 - Látky dilatantní a látky dilatantní s mezí tekutosti



- a- newtonská kapalina
- b- pseudoplastická kapalina
- c- ideální plastická látka
- d- kvaziplastická látka
- e- dilatantní látka
- f- dilatantní látka s mezí tekutosti

Obr. 3.7 Reologické křivky

DRUHY MAZIV

Rozlišujeme následující druhy maziv:

- plynná maziva
- kapalná maziva
- plastická maziva

Mazivo má ve tváření dva hlavní úkoly:

- zabránit kovovému styku mezi nástrojem a polotovarem a tím snížit riziko adhezního spoje a následného nadměrného opotřebení nástroje,
- snížit třecí ztráty, snížit přetvárné práce, síly a energie a zlepšit tvařitelnost.

4. ZKOUŠKA PĚCHOVÁNÍ KROUŽKU

Na základě provedeného teoretického rozboru byla vybrána zkouška tření pěchováním kroužku mezi rovinnými kovy.

Experimentální řešení je rozděleno do těchto etap:

- příprava
- provedení experimentu
- zpracování naměřených hodnot
- porovnání s výsledky simulace MKP

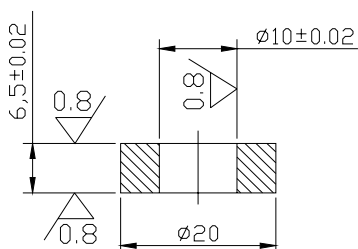
4.1 PŘÍPRAVA

Zkoušené materiály patří do skupiny lehkých kovů - hliníku a jeho slitin určených pro tváření.

Materiály : Al 99.5

AlCu4Mg1

AlMg3

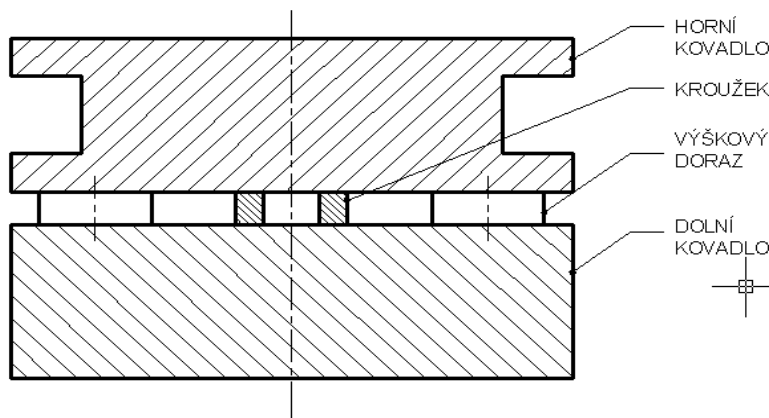


Obr. 4.1 Geometrie vzorků

Maziva: žádné
 Plantoform MBO 2797
 Renoform 319 NAT

Činná část nástroje: Materiál DIN 1.2379,
 Broušeno Ra=0.8, Kaleno popuštěno HRC 60+2
 Použité zařízení: hydraulický lis CTM 130

Měřicí pomůcky : digitální posuvné měřítko
 digitální dutinoměr SCHUT, s rozsahem 6-12 mm
 mikrometr SOMET
 dílenský mikroskop Carl - Zeiss



Obr. 4.2 Schéma zkušebního zařízení

4.2 PROVEDENÍ EXPERIMENTU A ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Naměřené hodnoty shrnout do následující tabulky:

	Al 99,5	AlMg3	AlCu4Mg1
Bez maziva	0,08-0,1	0,08-0,1	0,09-0,1
Plantoform 319 NAT	0,05-0,06	0,04-0,06	0,05-0,06
Renoform MBO 2797	0,03-0,05	0,03-0,05	0,03-0,05

Tab 4.1 Koeficienty tření pro zkoušené kombinace materiálů a maziv

	Al 99,5	AlMg3	AlCu4Mg1
Bez maziva	0,30-0,32	0,30-0,32	0,30-0,32
Plantoform 319 NAT	0,20-0,22	0,20-0,22	0,20-0,21
Renoform MBO 2797	0,16-0,17	0,16-0,17	0,16-0,17

Tab. 4.2 Třecí faktory pro zkoušené kombinace materiálů a maziv

Jak můžeme vidět na grafech pro koeficient tření a třecí faktor, není možno v oblasti měření koeficientu tření sestrojít křivku, jež by odpovídala kalibrační křivce podle diagramu 3.6 a.

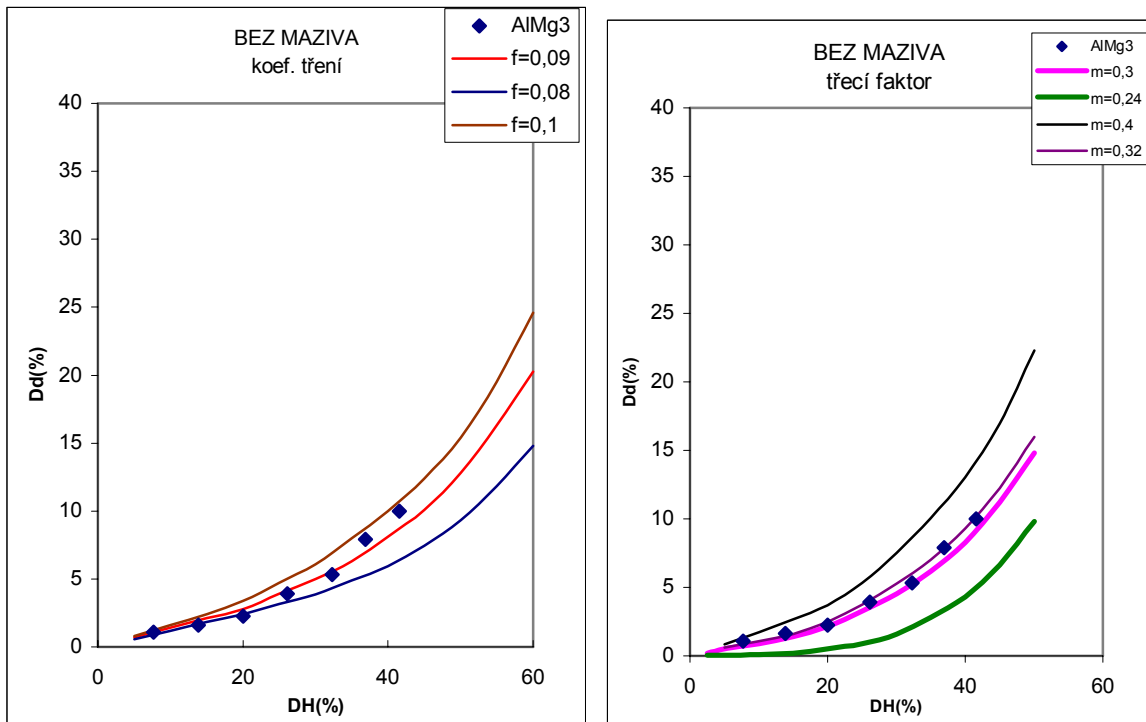
Daleko lepší popis nám udávají křivky kalibračního diagramu pro třecí faktor, tzn. podle zákona konstantního tření (obr. 3.6 b). Hodnoty koeficientu tření tudíž považují jako orientační a pro technickou praxi a výpočty metodou konečných prvků doporučují využít hodnot z tabulky 4.2.

Z výsledků porovnání třecích faktorů (a koeficientů tření) jako měřítek třecího odporu v reálném kontaktu modelového pěchování kroužku hladkými kovy vyplývá, že se mazáním docílí snížení třecího odporu přibližně na polovinu (u maziva Renoform versus žádné mazivo).

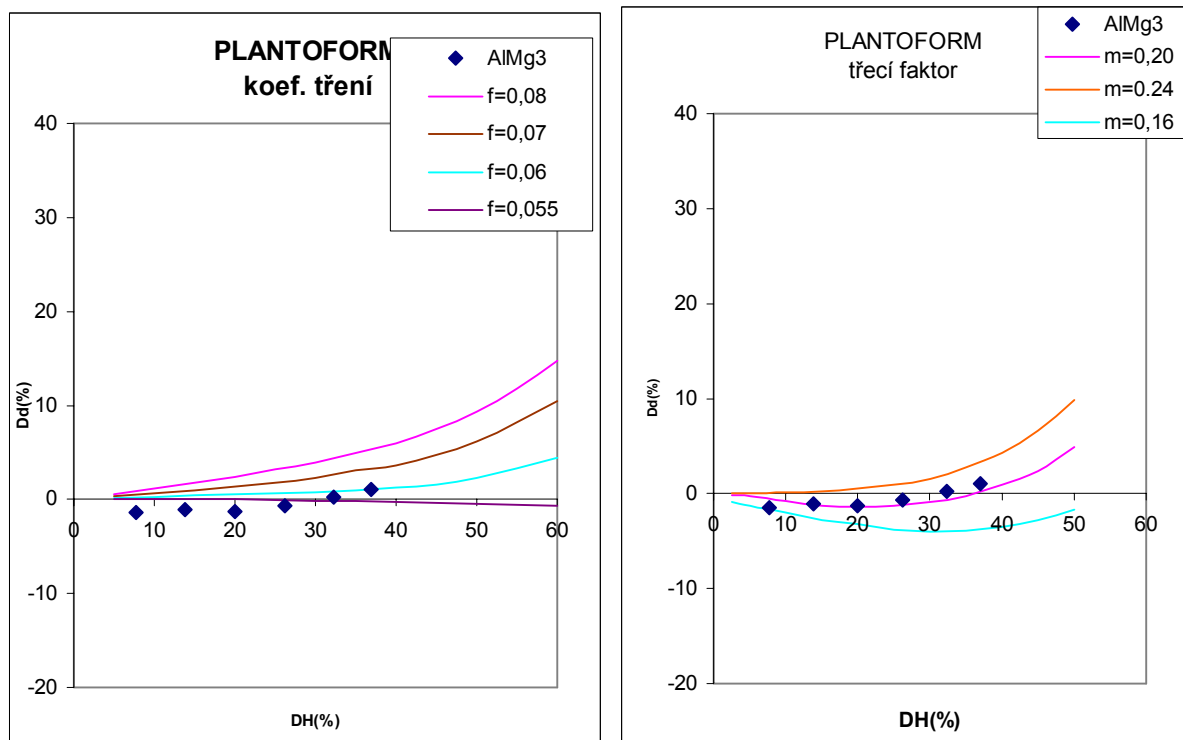
Pokud srovnáme obě používaná maziva, je zřejmé, že mazivo Plantoform 319 NAT, určené hlavně pro technologie plošného tváření, není natolik schopné v kombinaci s použitými materiály snížit koeficient tření, jako mazivo Renoform MBO 2797, určené pro vysoké namáhání při tváření za studena.

Výsledky také můžou interpretovat v jakém režimu mazání probíhala zkouška pěchováním kroužků. Podle Stribeckova diagramu se pohybujeme v oblasti smíšeného tření, tzn. že vrstva maziva není natolik vysoká, aby oddělila od sebe oba materiály, ale plnému kontaktu kovových povrchů je zabráněno.

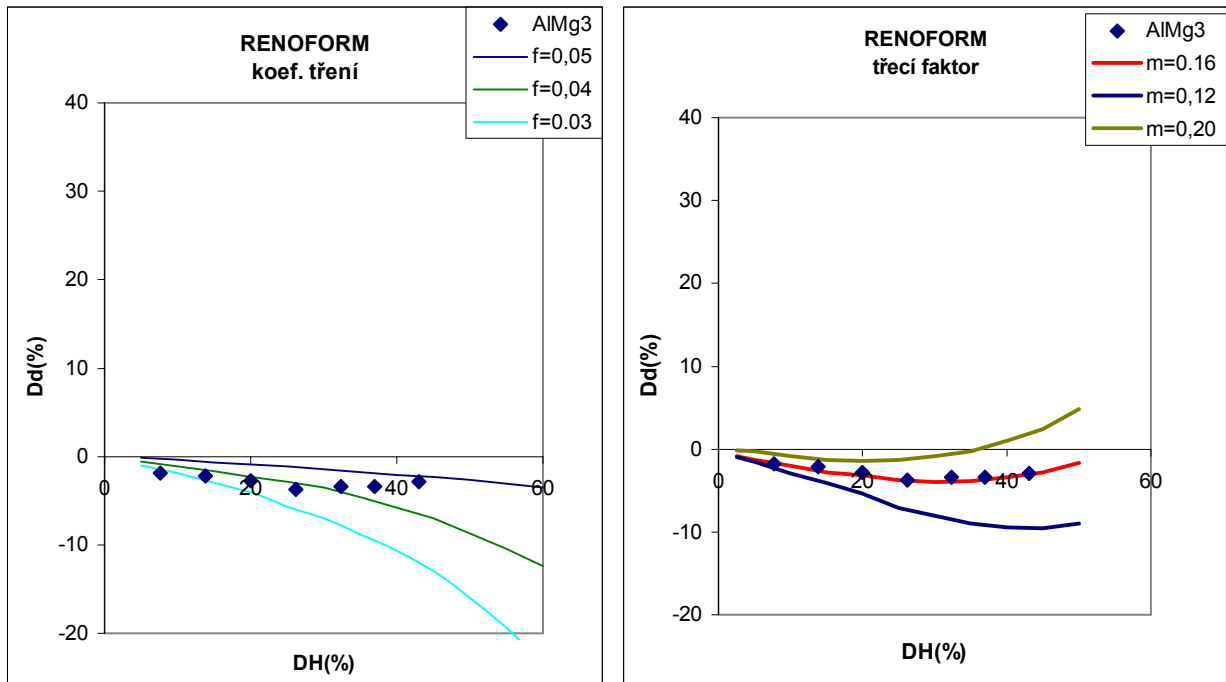
Na níže uvedeném obrázku je znázorněn příklad závislosti poměrné změny průměru na stlačení v kalibračním diagramu pro slitinu AlMg3 v měřených podmínkách mazání.



Obr. 4.3 Naměřené hodnoty pro AlMg3 bez mazání

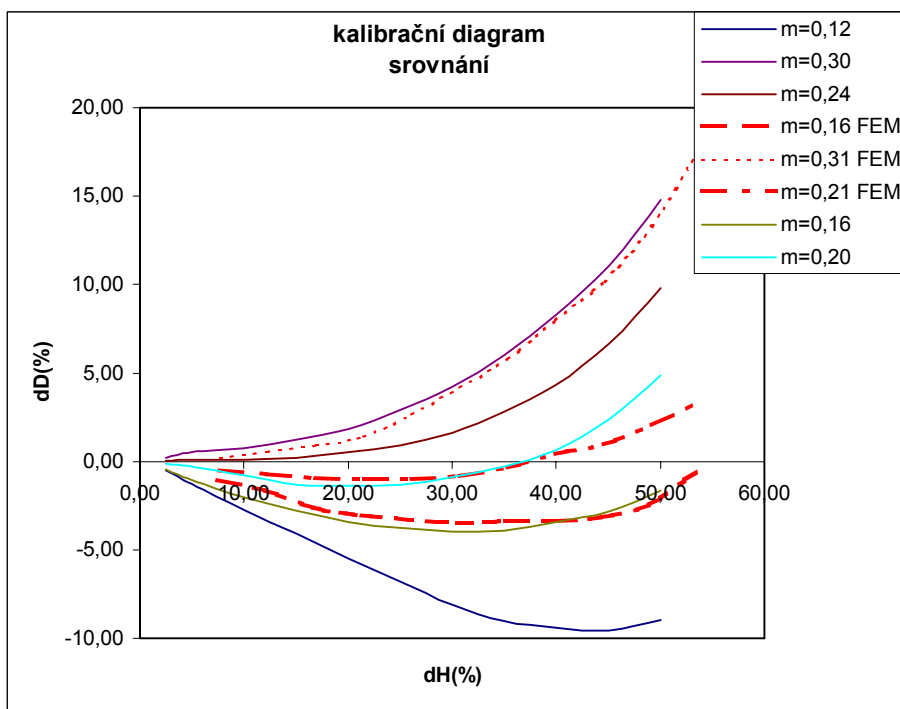


Obr. 4.4 Naměřené hodnoty pro AlMg3, mazáno PLANTOFORM



Obr. 4.5 Naměřené hodnoty pro AlMg3, mazáno RENOFORM

4.3 POROVNÁNÍ S VÝSLEDKY SIMULACE MKP



Obr. 4.6 Srovnání simulace MKP a analytických hodnot v kalibračním diagramu.

5. SHRnutí VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Prvním úkolem této práce bylo provést rozbor současného stavu teorie a praxe v oboru tribologie v oblasti tváření za studena. Touto problematikou se zabývá část třetí. V kapitole 3.1 je proveden souhrn obecné teorie tření a mazání a opotřebení, která je užívána v oblastech pružné deformace materiálů třecí dvojice. Zákonitosti a teorie popsané v této kapitole jsou východiskem pro použití teorie tření při podmínkách objemového tváření. Kapitola 3.2 obsahuje souhrn poznatků z oblasti struktury a topografie povrchu kovů. V kapitole 3.3 jsou popsány přístupy, které jsou používány při popisu chování třecí soustavy při technologiích tváření.

Kapitola 3.4 je zaměřena na rozbor současného stavu řešení pomocí výpočetních metod a jejich vztah k tření. Je zde proveden přehled hlavních možností řešení parametrů tvářecího procesu, tj. analytické metody, metody horní meze, metody okrajových prvků a metody konečných prvků. Závěr kapitoly je věnován modelům tření, jenž se užívají při výpočtech pomocí nejrozšířenější metody - metody konečných prvků.

V kapitole 3.5 provedený výčet zkoušek tření, používaných v inženýrské praxi pro technologie objemového tváření, byl použit jako podklad pro výběr zkoušky tření, jež je pro technologie objemového tváření nejvhodnější. Jedná se o zkoušku pēchování kroužku mezi plochými kovadly, a to v tomto případě za studena.

Byly provedeny zkoušky se třemi druhy materiálů: technicky čistým Al, slitinou AlMg3 a slitinou AlCu4Mg1, což jsou běžně používané konstrukční materiály. Polotovary z těchto materiálů byly obrobena na požadovanou geometrii a podrobena zkoušce pēchování kroužků za třech různých podmínek mazání: zkouška bez maziva, s použitím maziva Plantoform a s použitím maziva Renoform. Hlavním výsledkem zkoušky je na základě změn geometrie zpēchovaného kroužku určení koeficientů tření. Jelikož mělo být provedeno ověření výsledků pēchovací zkoušky s výsledky simulace za pomoci MKP výpočetního programu, byla jako doprovodný parametr sledována tvářecí síla při zkouškách (není nutno sledovat pro měření třecího odporu).

Výsledkem zkoušek jsou grafy hodnot poměrné změny vnitřního průměru kroužku v závislosti na poměrné změně výšky. Pro koeficient tření nebylo možno v oblasti měření sestrojít křivku, jež by odpovídala kalibrační křivce podle obrázku 3.6 b. Daleko lepší popis nám udávají křivky kalibračního diagramu pro třecí faktor, tzn. podle zákona konstantního tření. Hodnoty koeficientu tření tudíž považuji jako orientační a pro technickou praxi a výpočty metodou konečných prvků doporučuji využít hodnot z tabulky 4.2.

Jak je z výsledků patrné, porovnáním třecích faktorů (i koeficientů tření), jako měřítek třecího odporu v reálném kontaktu modelového pēchování kroužku

hladkými kovy, se mazáním docílí snížení třecího odporu na přibližně polovinu (u maziva Renoform versus žádné mazivo).

Pokud srovnáme obě používaná maziva, je zřejmé, že mazivo Plantoform 319 NAT, určené hlavně pro technologie plošného tváření, není natolik schopno v kombinaci s použitými materiály snížit koeficient tření, jako mazivo Renoform MBO 2797, určené pro vysoké namáhání při tváření za studena.

Výsledky nám také můžou interpretovat, v jakém režimu mazání probíhala zkouška pětčováním kroužků. Podle Stribeckova diagramu se pohybujeme v oblasti smíšeného tření, tzn. že vrstva maziva není natolik vysoká, aby oddělila od sebe oba materiály, ale plnému kontaktu kovových povrchů je zabráněno. V oblasti smíšeného tření se v technologiích tváření pohybujeme nejčastěji. Pro snížení třecího odporu (tam kde je to žádáno), ale i opotřebení při tváření by bylo vhodné pohybovat se v oblasti plastohydrodynamického režimu mazání (tření). Toho lze dosáhnout ovšem jen vhodnou konstrukcí nástroje (vytvořit PHD klín pro vtahování maziva) a uplatnění je možné jen u některých technologiích.

Výsledky pro kvazistatické podmínky jsou použitelné pro technologie prováděné na hydraulických lisech. Soubor koeficientů tření a třecích faktorů (viz tab. 4.1 a tab. 4.2) jsou vstupními daty pro analýzu tvářecích procesů, ať se jedná o analýzu klasickými výpočetními metodami anebo především o metodou konečných prvků.

Přínos této dizertační práce spočívá zejména v ověření vhodnosti maziva na bázi syntetického oleje pro technologie tváření za studena, v ověření modelu tření v analýze MKP a vytvoření základní databáze třecích faktorů (koeficientů tření) pro vybrané slitiny Al.

Bez prací v oblasti tribologie v oboru tváření kovu by nebylo možné dosáhnout zpřesnění výpočtových metod, které jsou podkladem pro návrhy technologií v praxi.

V budoucnu by bylo vhodné vypracovat další práce, které by rozšířily databáze zejména v následujících parametrech tváření - rozšíření souboru materiálů tvařenců, rozšíření souboru maziv a rozšíření pracovních podmínek o podmínky dynamické.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HARLEY, P. - PILINGER, J. - STURGESS, C.: *Numerical Modelling of Material Deformation Processes*. London: Springer-Verlag, 1992.
- [2] LANGE, K.: *Handbook of Metal Forming*. New York: McGraw-Hill Inc., 1985.
- [3] KULIŠ, Z.: *Plasticita*. Praha: ČVUT v Praze, 1991.
- [4] FOREJT, M.: *Teorie tváření*. Brno: VUT v Brně, 1992.
- [5] BREBBIA, C.: *The boundary element method for engineers*. London: Penetch Press, 1980.
- [6] BROŽ, P. - PROCHÁZKA, P.: *Metoda okrajových prvků v inženýrské praxi*. Praha: SNTL, 1987.
- [7] BROŽ, P. - PROCHÁZKA, P.: *Řešení nelineárních úloh mechaniky metodou okrajových prvků*. Praha: Grada, 1995.
- [8] ROWE, G. - STRUGRESS, C.: *FEM plasticity and metal forming analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [9] KÁNOCZ, A.: *Metoda konečných prvků v mechanice poddajných těles*. Praha: ČVUT v Praze, 1998.
- [10] KOLÁŘ, V.: *FEM: Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997.
- [11] KRATOCHVÍL, C. - ONDRÁČEK, E.: *Mechanika těles - počítače a MKP*. Brno: VUT v Brně, 1987.
- [12] SCHEY, J.: *Metal deformation processes – friction and lubrication*. New York: Marcel Dekker, 1970.
- [13] HUTCHINGS, I.: *Tribology - friction and wear of engineering materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [14] WILLIAMS, J.: *Engineering tribology*. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- [15] Manuály: FORM 2-D, MARC AUTOFORGE 2.2, MSC SUPERFORGE , DEFORM
- [16] ŠTĚPINA, V. - VESELÝ, V.: *Maziva v tribologii*. Bratislava: Veda, 1985.
- [17] PETRUŽELKA, J.: *Výpočetní metody ve tváření*. Ostrava: VŠB-TU, 2000.
- [18] ŠANOVEC, J. - ČERMÁK, J - MÁDLE, L.: *Mezní problémy a výpočetní technika ve tváření*. Praha: ČVUT v Praze, 1987.
- [19] LINDGREN, L.: *Formulation and Modelling in Simulation of Material Processing - course notes*. Luleå: TU, 1998.
- [20] BEČKA, J.: *Tribologie*. Praha: ČVUT v Praze, 1997.
- [21] BLAŠČÍK, F. – POLÁK, K.: *Teória tvárnenia*. Bratislava: ALFA, 1987.
- [22] KAZUHISA, M. *Solid Lubrication Fundamentals and Applications*. NASA/TM— 1998-107249/CH1-REV1, NASA, 1998.
- [23] GIERZYNSKA, M. *Tarcie zużycie i smartowanie w obrobce plastycznej metali*. Warszsawa: WNT, 1983.

- [24] BLAŠKOVIČ, P. - BALLA, J. - DZIMKO, M.: *Tribológia*. Bratislava: ALFA, 1990.
- [25] ASM Handbook, vol.3, *Friction, Lubrication and wear technology*, ASM 1992.
- [26] AVITZUR, B.: *Metal forming: processes and analysis*, New York: McGraw-Hill Inc., 1968.
- [27] OLIVA, V. - OLEXA J.: *Úvod do teorie tření, opotřebení a kontaktního porušování*. ČVUT v Praze, 1978.
- [28] HU, Y-Z, ZHU, D.: *A Full Numerical Solution to the Mixed Lubrication in Point Contacts*. Journal of Tribology. 2000 vol. 122, no. 1, p. 1–9.
- [29] GARBAR, I. I.: *Critical Structures of Metal Destruction Under the Process of Wear*. Journal of Tribology. 2000, vol. 122, no. 1, p. 361–366.
- [30] POLONSKY, I. A. - KEER, L. M.: *Fast Methods for Solving Rough Contact Problems: A Comparative Study*. Journal of Tribology. 2000, vol. 122, no. 1, pp. 36–41.
- [31] GUANTENG, G. - CANN, P. M. - OLVER, A. V. - SPIKES, H. A.: *Lubricant Film Thickness in Rough Surface, Mixed Elastohydrodynamic Contact*. Journal of Tribology. 2000, vol. 122, no. 1, p. 65–76.
- [32] MIYOSHI, K.: *Solid Lubrication Fundamentals and Applications, Properties of Clean Surfaces: Adhesion, Friction, and Wear*. NASA. 1998, NASA/TM—1998-107249/CH3.
- [33] MIYOSHI, K. - ZABINSKI, J.S. - WU, R.L.C.: *Sliding Wear and Fretting Wear of DLC-Based, Functionally Graded Nanocomposite Coatings*. NASA. 1999, NASA/TM— 1999- 209076.
- [34] MIYOSHI, K.: *Solid Lubrication Fundamentals and Applications, Introduction and Background*. NASA. 1998, NASA/TM—1998-107249/CH1-REV1.
- [35] WANHEIM, T. - BAY, N.: *A Model for Friction in Metal Forming Processes*. CIRP Ann. 1978, vol. 27, p. 189-194.
- [36] PETERSEN, S. B. - MARTINS, P. A. F. - BAY, N.: *Friction in Bulk Metal Forming: a General Friction Model vs. the Law of Constant Friction*. Journal of Materials Processing Technology. 1997, vol. 66, p. 186-194.
- [37] WANG, J.: *A new evaluation to friction analysis for the ring test*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 41 (2001) p. 311–324.
- [38] GAO, Y. F.: *A micromechanical dislocation model of rough surface contact plasticity*. Proceedings of World Tribology Congress, Washington 2003.
- [39] LI, L. - PENG, D.: *An experimental study of the lubrication behavior of A5 glass lubricant by means of the ring compression test*. Journal of Materials Processing Technology č 102, r. 2000, s 138-142.
- [40] ROQUE, Cr. - BUTTON, S.: *Application of the Finite Element Method In Cold Forging Processes*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, č 22, r.2000.
- [41] PETRUŽELKA, J.: *Tvaritelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: VŠB-TU, 2000

ŽIVOTOPIS

Adresa: Stanislav Mannsbart
Jírova 3
628 00 Brno
Česká republika
E-mail: stmann@seznam.cz

Ing. Stanislav MANNSBART

OSOBNÍ ÚDAJE

Datum narození: 27. 3. 1975
Místo narození: Bruntál
Národnost: česká
Stav: svobodný

VZDĚLÁNÍ

1989 - 1993 Střední průmyslová škola v Bruntále
obor strojírenská technologie

1993 - 1998 Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie - odbor tváření

1998-2001 Postgraduální studium na Vysokém učení technickém v Brně
Fakulta strojního inženýrství,
Obor strojírenská technologie

ZAMĚSTNÁNÍ

-2002 - 2006 TPL, s.r.o. ,
konstruktér

DOVEDNOSTI

Cizí jazyky: Angličtina
Software: AutoCad, SolidWorks, ProEngineer, CATIA
Řidičský průkaz sk. B

ABSTRACT

PhD work deals with friction phenomena and its determination in technical application, mainly in forming, and furthermore with computer modelling of friction. It concerns summary of knowledge in the field of tribology, testing and modelling forming technologies. The work focuses especially on ring tests, that are to determinate the friction resistance during cold forming operations. These tests are made with the set of common used aluminium alloys (Al99,5, AlMg3, AlCu4Mg1) and chosen samples of metal forming lubricants recommended for these technologies. The results of tests are friction factors and coefficient values, which are the input for computations of forming process parametres. The results of ring tests are compared with FEM simulation results.