



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## TŘENÍ V TVÁŘECÍCH PROCESECH

FRICITION IN FORMING PROCESSES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Monika Pažitková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	<b>Bc. Monika Pažitková</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.</b>
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 diplomové práce:

## Tření v tvářecích procesech

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kontaktní tření mezi tvářeným materiálem a nástrojem hraje v tvářecích procesech důležitou, zpravidla negativní roli. S cílem snížit tření se v tvářecích procesech využívají maziva, jejichž vhodná aplikace má mnohdy pro úspěch procesu zásadní vliv. Výrobci maziv nabízejí řadu svých produktů, pro konkrétní využití je však vhodné jejich funkci experimentálně ověřit a až na podkladě provedených testů vybrat nejvhodnější mazivo do výrobního procesu.

### Cíle diplomové práce:

- Analyzovat faktory spojené se snižováním tření při tvářecích procesech.
- Popsat možnosti a metody hodnocení maziv v technologiích plošného a objemového tváření.
- Připravit experiment pro hodnocení maziv využívaných v technologiích objemového tváření.
- Experimentálně ověřit možnost využití pěchovací zkoušky k hodnocení maziv.
- Na podkladě vyhodnocení experimentu zpracovat metodiku pro stanovení součinitele tření s využitím pěchovací zkoušky.

### Seznam doporučené literatury:

WILLIAMS, John 2005: Engineering Tribology. Cambridge University Press . 508 s. ISBN 05-21-0988-7.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. 2011: Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 4th ed. New York: Cambridge University Press,. ISBN 978-1-107-00452-8.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. 2006: Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 217 s. ISBN 80-214-2374-9.

LIDMILA, Zdeněk. 2008: Teorie a technologie tváření I. Brno: Univerzita obrany. 105 s. ISBN 978-8-7213-579-6.

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

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

PAŽÍTKOVÁ Monika: Tření v tvářecích procesech

---

Táto diplomová práca sa zaoberá skúškami tvárniacich operácii, ktoré slúžia k zisteniu koeficientu trenia. V teoretickej časti práce sú jednotlivé skúšky podrobne popísané, pričom najväčší dôraz je kladený na pechovacia skúška. V experimentálnej časti práce boli realizované skúšky pechovania valcov a prstencov. Koeficient trenia valcových vzoriek bol určený výpočtovou metódou a vzorky prstencov boli vyhodnotené pomocou kalibračných diagramov. Práca obsahuje porovnanie výsledkov získaných na nenamazaných a namazaných vzorkách a metodiku pre stanovenie koeficienta trenia. Ako mazivo bol použitý grafit Delta 144. Z uvedených výsledkov vyplýva, že mazivo priaznivo ovplyvňuje tvárniaci proces.

Kľúčové slová: trenie, koeficient trenia, pechovacia skúška, pechovanie. mazivo

## **ABSTRACT**

PAŽÍTKOVÁ Monika: Friction in forming processes

---

This thesis deals with tests of forming operations, which are used to determine coefficient of friction. In the theoretical part of thesis, the individual tests are described in details, with the greatest emphasis on the upsetting test. In the experimental part of thesis was perform upsetting test on the cylindrical and ring samples. Coefficient of friction of the cylindrical samples was determined by a calculation method and ring samples were evaluated using diagram of calibration. The thesis includes comparison of the result received on lubricant and unlubricated samples and method for determined coefficient of friction. Graphite Delta 144 was used as a lubricant. This result show that the lubricant has a positive effect on forming process.

Keywords: friction, coefficient of friction, upsetting test, upset forging, lubrication

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

PAŽÍTKOVÁ, Monika. *Tření v tvářecích procesech* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124347>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracovala samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácii a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 25.6. 2020

.....  
Monika Pažitková

## **POĎAKOVANIE**

Týmto ďakujem pánovi doc. Ing. Zdeňkovi Lidmilovi, CSc. za cenné pripomienky a rady týkajúce sa spracovania diplomovej práce a pánovi Vojtěchovi Řiháčkovi za pomoc pri experimentálnej časti práce. Veľké poďakovanie patrí aj mojim rodičom a všetkým blízkym, ktorí ma podporovali pri štúdiu na vysokej škole.

# OBSAH

Zadanie  
Abstrakt  
Bibliografická citácia  
Čestné prehlásenie  
Poďakovanie  
Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 ROZBOR ZADANIA</b> .....	10
<b>2 LITERÁRNA ŠTÚDIA</b> .....	11
<b>2.1 Tribológia</b> .....	11
2.1.1 Kontaktné procesy .....	12
2.1.2 Trecie procesy .....	13
2.1.3 Procesy opotrebovania .....	16
2.1.4 Mazací proces .....	20
<b>2.2 Trenie v tvárniacich procesoch</b> .....	23
2.2.1 Druhy mazív .....	25
2.2.2 Povlaky .....	27
2.2.3 Skúšky hodnotenia trenia v tvárnení .....	29
<b>2.3 Rozbor metódy pečovania valca</b> .....	32
<b>3 EXPERIMENT</b> .....	37
<b>3.1 Príprava experimentu</b> .....	37
<b>3.2 Priebeh experimentu</b> .....	39
<b>3.3 Vyhodnotenie experimentu</b> .....	39
3.2.1 Makroštruktúra spechovaných vzoriek .....	49
<b>4 METODIKA STANOVENIA KOEFICIENTU TREANIA</b> .....	52
<b>5 ZÁVERY</b> .....	53

Zoznam použitých zdrojov  
Zoznam použitých symbolov a skratiek  
Zoznam obrázkov  
Zoznam tabuliek



## ÚVOD [1], [2], [3], [5], [6], [7], [8], [9]

Tvárnenie je bežne využívanou technológiou pri spracovaní kovových i nekovových materiálov. Zaraďuje sa medzi progresívne a stále sa rozvíjajúce technológie. Podstatnou prednosťou tvárniacich procesov je predovšetkým vysoká produktivita výroby súčastí. V porovnaní s obrábaním sa vyznačujú lepším využitím materiálu, nakoľko sa jedná o beztrieskovú technológiu. Ďalej je významná možnosť automatizácie a pomerne vysoká hospodárnosť. Počas tvárnenia je plošný alebo objemový polotovar plasticky deformovaný do požadovaného tvaru a rozmerov. Ukážka dielcov vyrobených metódou tvárnenia je zobrazená na obr. 1.

Tvárniaci proces ovplyvňuje široká škála faktorov. Predovšetkým pri procesoch, kde dochádza k veľkej deformácii je dôležité poznať všetky veličiny, ktoré samotný proces ovplyvňujú. Hlavný činiteľ, ktorý má výrazný vplyv na proces tvárnenia je trenie. To vzniká medzi styčnými plochami nástroja a polotovaru, kde sa prejaví ako trecie sily. Vo väčšine prípadov má trenie negatívne účinky na proces, ale sú aplikácie, ktoré by bez trenia nebolo možné realizovať. V priebehu vzájomného pohybu nástroja a polotovaru, dochádza dôsledkom trenia k zvyšovaniu teploty. To má za následok nežiadúce ohrievanie, ktoré vedie k zmenám vlastností v materiálu. Plochy sa v priebehu procesu navzájom odierajú a pri dlhodobom používaní dochádza k tvarovým zmenám nástrojov. Tieto zmeny sú nežiadúce, pretože ovplyvňujú výsledný produkt. Pri návrhu technológie je cieľom znížiť opotrebovanie na minimum. Trenie sa vždy premieňa na iný druh energie, a to sa prejavuje v stratách mechanickej energie, čo má za následok zníženú účinnosť procesu. Z tohto hľadiska sa pri tvárnení materiálov hľadajú spôsoby, ktoré by napomohli k zníženiu trenia. Jedným z hlavných spôsobov, ktorým sa to dá dosiahnuť je použitie mazív.

Pre jednotlivé technológie je dôležitý výber a aplikácia vhodného maziva. Správny typ maziva, nanosená hrúbka mazacej vrstvy, kvalitatívne parametre a mnohé ďalšie faktory hrajú dôležitú úlohu pri funkčnosti celého procesu. V praxi ide o dôležitý aspekt, ktorý ovplyvňuje ako technológiu tak i výrobné náklady.



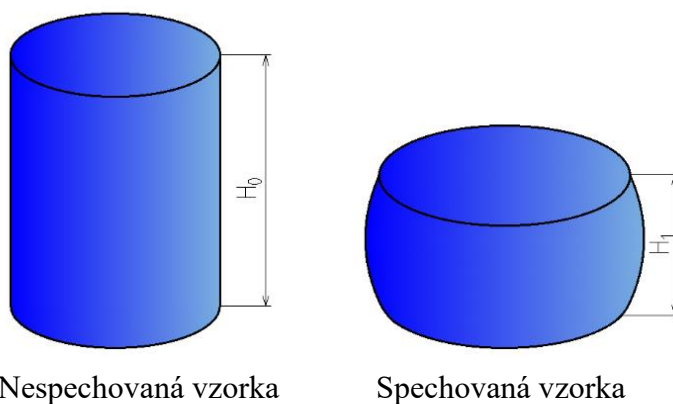
Obr. 1 Súčiastky vyrobené technológiou tvárnenia [5], [7]

## 1 ROZBOR ZADANIA [9], [10], [11], [12]

Trenie je ovplyvňované rôznymi faktormi ako je materiál, tvárniace parametre, geometria nástroja, podmienky mazania, proces tvárnenia a iné. Je dôležité určiť tieto parametre, kvôli stanoveniu tvárnosti materiálu a zlepšeniu kvality pri tvárnení materiálu.

Jednotlivé technológie tvárnenia kovov sa od seba navzájom líšia, hlavne čo sa týka tlaku, teploty, rýchlosti, napätového stavu, tribologických stavov atď. Preto neexistuje žiadny univerzálny trecí model, ktorý by umožnil vyhodnotenie trecích podmienok pri všetkých tvárniacich procesoch. Vo väčšine skúšobných metód sa kontaktné napätie meria v určitej oblasti a získajú sa priemerné hodnoty trecieho napätia. Aby sa stanovené hodnoty v experimentálnych testoch mohli vzťahovať na procesy v praxi, mali by skúšky simulovať reálne podmienky. Väčšina z testov je určená na konkrétne operácie plošného či objemového tvárnenia. Súčasne je potrebné, aby princíp a metodika prevedenia testov bola jednoduchá a umožnila prevedenie skúšky i v prevádzkových podmienkach.

Pri najjednoduchšej metóde objemového tvárnenia, pri voľnom pechovaní valca medzi rovnobežnými plochami pechovacích dosiek, sa vplyv kontaktného trenia prejavuje súdkovitým tvarom napechovaného vzorku, ako je zobrazené na obr. 2. Je možné predpokladať, že s rastúcou hodnotou vonkajšieho trenia na styčných plochách sa súdkovitost' vzorku bude zväčšovať a naopak. Súdkovitost' napechovaného valca je ovplyvňovaná i ďalšími faktormi, ako je geometria pechovaného valca a veľkosť deformácie.



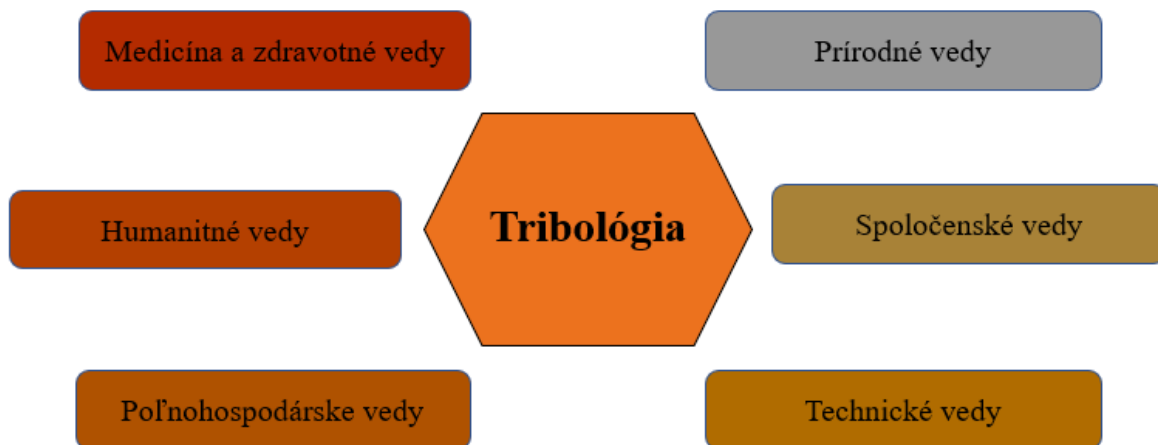
Obr. 2 Napechovaný valček [11]

Pre možnosti využitia pehovacej skúšky, zistenia veľkosti trenia a posúdenia účinnosti mazív pri objemovom tvárnení bude treba spracovať metodiku hodnotenia skúšky. Na základe rozboru metódy pechovania valca je potrebné navrhnúť a experimentálne overiť podmienky skúšky, ktoré umožnia objektívne zistenie veľkosti trenia.

V diplomovej práci bude spracovaná literárna rešerš zameraná na analýzu faktorov ovplyvňujúcich trenie, metódy posudzovania využitia mazív pri technológii tvárnenia a rozbor pehovacej skúšky. Rešeršná časť bude následne využitá k vytipovaniu metódy, ktorá bude s ďalšími získanými poznatkami využitá pri spracovaní a hodnotení trenia pehovacej skúšky.

## 2 LITERÁRNA ŠTÚDIA [9], [42]

V literárnej štúdii bude vykonaný rozbor vplyvu trenia na technologické procesy tvárnenia. Vplyv trenia má hlavne nežiadúce účinky z dôvodu energetických strát pri procesoch, ale na druhú stranu, niektoré technológie by bez trecích síl fungovať nemohli ako napríklad valcovanie. Dôsledkom vzniknutých trecích síl dochádza k opotrebovaniu dielcov a nástrojov. Toto vzniknuté opotrebovanie je možné znížiť pomocou použitia mazív. Tieto tri aspekty trenie, opotrebovanie a mazivá sú popisované a radené už dlhé roky vo vednej disciplíne tribológií, ktorá sa nimi priamo zaoberá a bližšie ich skúma. Tribológia sa považuje za interdisciplinárnu vedu, ktorá spája niekoľko rôznych vedných odborov, vid'. obr. 3. Do tribologického systému sa tiež zahŕňa veľký počet testov, ktoré slúžia pre zistenie prijateľných podmienok pre inovovanie procesov technológie.



Obr. 3 Interakcia tribológie s inými vednými odbormi [42]

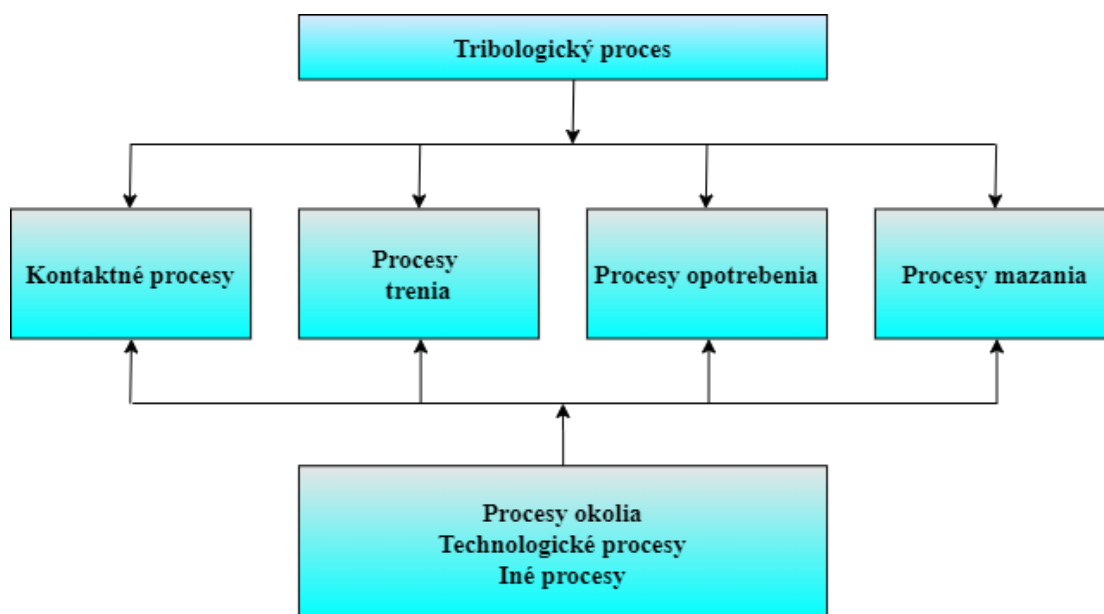
### 2.1 Tribológia [6], [14], [30]

Tribológia je vedná disciplína, ktorá sa venuje oblastiam trenia a opotrebovania trúcich sa častí v kontaktných uzloch pri relatívnom pohybe. Ďalej sa zaoberá vhodnosťou výberu rôznych materiálov a mazív pre tribologický systém. Rieši špecifické mazacie problémy, najmä aplikáci vhodných mazív, ich kompatibilitu s materiálom a použitie špeciálnych povlakov na riešenie mnohých zložitých problémov a dosiahnutie vysokej odolnosti opotrebovania. Ekonomický význam tribológie zahŕňa zabráneniu opotrebovania, čo je hlavnou príčinou plytvania materiálom, energetickým stratám a hlavne škodám. Taktiež tribológia zasahuje aj do životného prostredia a to tým, že sa zameriava na úsporu energie a materiálu.

Tribológia berie do úvahy všetky teoretické a v praxi využívané závery z trenia ako analýzu vstupných veličín do výpočtov nových výsledkov zaoberajúcich sa výstupnými veličinami. Výsledky identifikačných parametrov by mali byť funkciou záruky ekonomiky, zvýšenia efektívnosti a životnosti strojov, prístrojov a nástrojov, zvýšenia produktivity technologických procesov a zníženia spotreby energie.

Tribologické procesy charakterizujú interakcie trecích telies, látok a okolia prebiehajúcich v čase a priestore. Vzťahy medzi prvkami systému určujú tribologické procesy v kontaktnej ploche. Jednotlivé parametre navzájom medzi sebou súvisia a menia sa vzájomne na základe

vstupných veličín. Kombinované efekty týchto procesov ovplyvňujú proces tvárnenia. Na obr. 4 je zobrazené zariadenie tribologického procesu a jeho väzby.

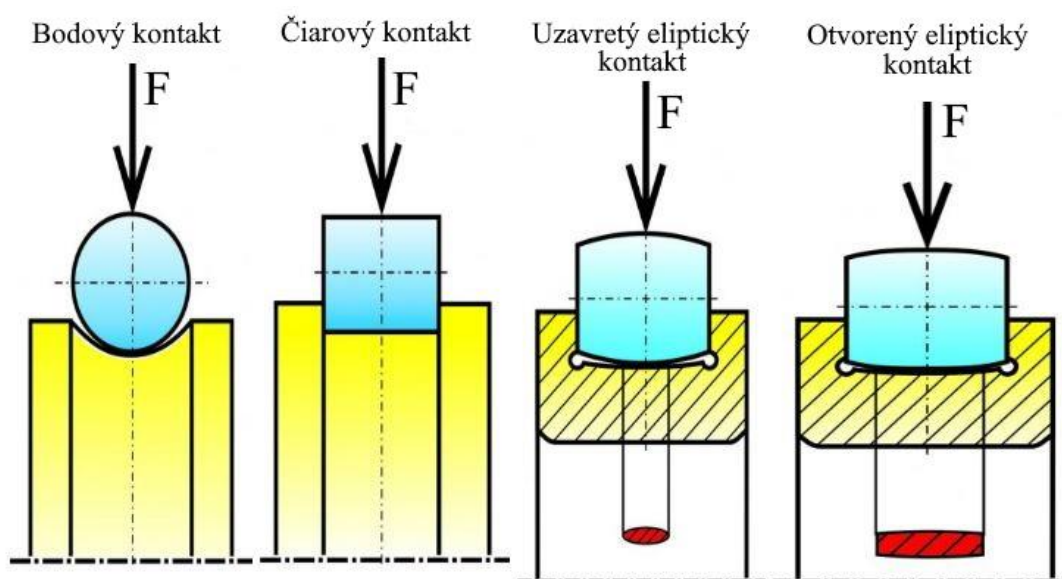


Obr. 4 Zariadenie tribologického procesu a jeho väzby [6]

### 2.1.1 Kontaktné procesy [6], [13], [14]

Tribológia je založená na vzájomnom kontakte telies pri ich relatívnom pohybe. Primárnym problémom je samotný kontakt alebo dotyk medzi aktívnymi členmi systému. Pri kontaktných procesoch je treba počítať s mechanikou kontaktu, materiállovými, fyzikálnymi, chemickými a ďalšími interakciami. Pokiaľ telesá nekonajú žiadny pohyb, teda sú v statickej rovnováhe ide o statický kontakt. Pri vzájomnom pohybe telies ide o opačný jav, dynamický kontakt. Pri tomto kontakte sú zahrnuté dynamické účinky sprevádzané trením, teplom a mazaním.

Pozornosť treba venovať oblasti styku, kde sa kontaktné zaťaženie vyskytuje pri dotyku guľových alebo valcových telies. Tento kontakt je na veľmi malej ploche, čiže pôsobiaca sila v oblasti kontaktu vyvoláva vysoké kontaktné tlaky.



Obr. 5 Druhy kontaktných plôch [13]

Podľa tvaru plochy kontaktu telies sa kontakt delí, ako je zobrazené na obr. 5 na:

- bodový,
- čiarový,
- eliptický.

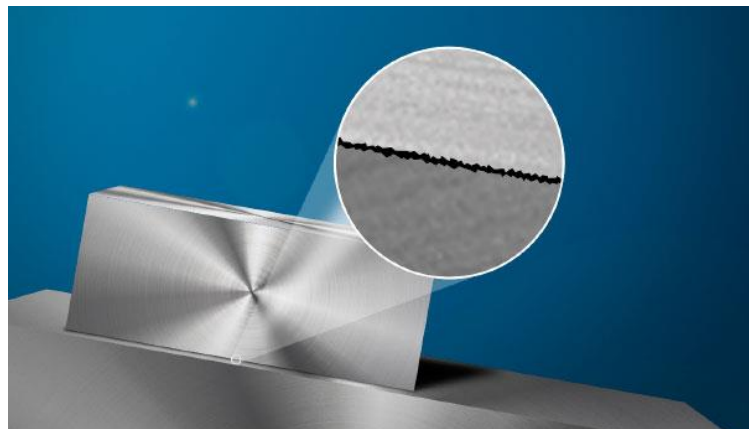
Pri relatívnom pohybe tuhých povrchov vždy dôjde k určitému pretvoreniu každého z nich. Tieto pretvorenia môžu byť výhradne len elastické alebo môžu zahrňovať taktiež plastickú deformáciu, pričom dochádza k trvalej zmene povrchov materiálu.

- Elastický kontakt nastáva v prípade, keď sú povrchy spočiatku pri kontakte slabo zaťažené bez tangenciálneho pohybu. Vyplýva to z Hertzovej teórie kontaktného napätia tuhých telies. Teória definuje rozloženie kontaktného tlaku a napätia pre bodový a priamkový styk dvoch elastických telies.
- Plastický kontakt má z makrogeometrického hľadiska menší význam. Vychádza z teórie, že pri prvom pôsobení zaťaženia dochádza ku vzniku plastických deformácií na povrchu telies. Keď dôjde znova k zaťaženiu, tak sa môže plastický kontakt zmeniť na pružný, v prípade ak opätovné zaťaženie je väčšie ako prvé zaťaženie.

S elastickou deformáciou počiatočná povrchová topografia môže byť zotavená, zatiaľ čo pri plastickej deformácii nedôjde k zotaveniu topografie. Akonáhle raz nastane trvalá zmena, povrch topografie sa trvalo zmení a toto môže spôsobiť rozdielne správanie medzipovrchového trenia. Obidva deformačné procesy v mieste kontaktu menia mechanickú energiu a teplo privádzané do systému a tým sa zúčastňujú priamo na vzniku strát.

### 2.1.2 Trecie procesy [6], [11], [15], [16], [17], [18], [19], [38]

Vo všeobecnosti trenie vzniká pohybom dvoch stýkajúcich sa kontaktných plôch. Trenie sa tam vytvára v dôsledku skutočnosti, že kontaktné plochy nikdy nemajú úplne hladký povrch. Na povrchu telies sú mikronerovnosti, ktoré sa pri vzájomnom pohybe o seba zachytávajú a spôsobujú odpor. Ukážka zväčšeného povrchu a zobrazenie jeho nerovností je na obr. 6. Trecí proces sa viaže na relatívny pohyb dvoch stýkajúcich sa častí tribologického systému. Hlavnou príčinou trenia medzi kovmi sú príťažlivé sily, známe ako adhézia. Koncentrácia napätia v blízkosti kontaktných plôch má vplyv na procesy vyskytujúce sa pri interakcii trenia. Väčšina rozptýlenej energie sa pri prekonávaní trenia mení na teplo, ktoré zvyšuje povrchovú teplotu. Teplota môže byť natoľko vysoká, že môže dôjsť k zmäknutiu alebo až roztaveniu povrchovej vrstvy. Takéto ovplyvnenie materiálu vedie k jeho mikroštruktúralnej zmene.



Obr. 6 Zväčšenie kontaktu povrchov [20]

Podstata vzniku trenia vyplýva zo vzájomného pôsobenia povrchov medzi sebou pri mechanickom a makromolekulárnom pôsobení:

- vzájomným zachytávaním sa mikronerovností,
- pružnou deformáciou mikronerovností,
- plastickou deformáciou mikronerovností,
- adhéziou medzi povrchmi.

Trenie je sprevádzané mechanickým pohybom a podľa miesta kontaktných plôch môže vznikáť vonkajšie alebo vnútorné trenie. Vonkajšie trenie je charakterizované stykom dvoch povrchov pri ich relatívnom pohybe. Pri vnútornom trení, prebieha trenie pri vzájomnom posúvaní materiálu vo vrstvách patriacich danému telesu.

Vonkajšie trenie je ďalej rozdelené podľa trecích síl medzi dvoma telesami na:

- statické trenie – dochádza k nemu, v prípade kým nedôjde k prekonaniu kritickej sily, po jej prekonaní dochádza k pohybu telesa. Elastická deformácia môže byť jedným zo zdrojov statického trenia. Koeficient statického trenia závisí od dotyku kontaktných materiálov. Toto trenie je opísané ako trenie, ktoré pôsobí proti vzniku relatívneho pohybu alebo nasledujúceho pohybu a je definované:

$$\mu_s = \frac{F_t}{F_N} \quad (2.1)$$

kde:  $\mu_s$  – koeficient statického trenia [-]

$F_N$  – kolmá tlaková sila [N]

$F_t$  – trecia sila [N]

- kinetické trenie – nastáva v prípade ak odporová sila, ktorá pôsobí na teleso je po sile statického trenia prekonaná. Koeficient kinetického trenia závisí od kontaktného povrchu plochy alebo od jej drsnosti a je definovaný ako trenie proti už prebiehajúcemu relatívnemu pohybu. Statické trenie je oproti kinetickému treniu väčšie o 20 % – 30 %. Koeficient kinetického trenia sa definuje:

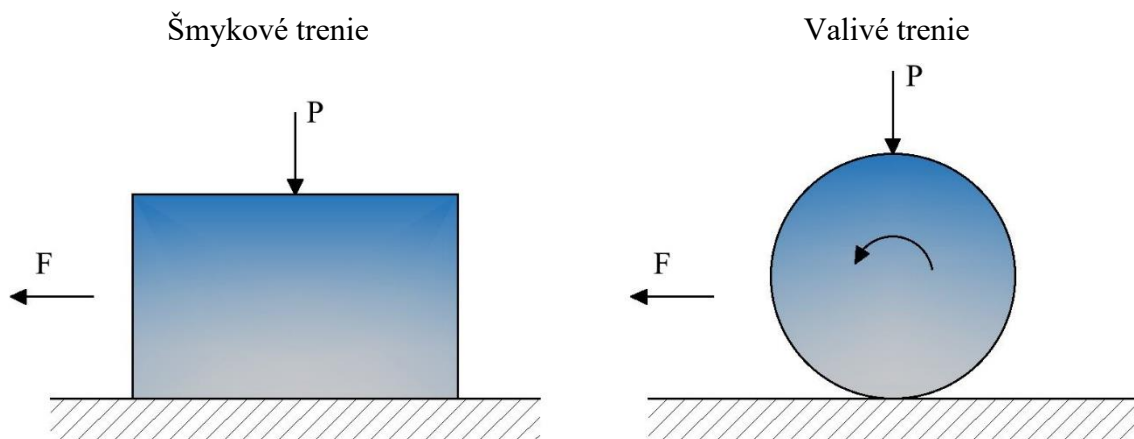
$$\mu_k = \frac{F_t}{F_N} \quad (2.2)$$

kde:  $\mu_k$  – koeficient kinetického trenia [-]

Interakcia pohybu stykových plôch navzájom medzi sebou môže byť šmyková alebo valivá, ako je zobrazené na obr. 7 a preto sa rozoznávajú tieto typy trenia:

- šmykové trenie vzniká translačným pohybom trecieho telesa po rovnom povrchu. Sily trenia vznikajú pri zapadaní mikroskopických častíc i nerovností na povrchu dotýkajúcich sa plôch do seba. Taktiež tieto sily vznikajú elastickou deformáciou nerovností a kohéziou telies v miestach, ktoré sú v takej vzdialenosti od seba, že dochádza k medzimolekulárnemu priťahovaniu.
- valivé trenie vzniká pri rotačnom pohybe telesa po rovnom, prípadne zakrivenom povrchu iného ďalšieho telesa spolu s translačným pohybom po danom povrchu. Trecia sila pri valivom trení je podstatne nižšia ako pri šmykovom. Pri valivom kontakte na povrchu vznikajú adhézne sily, ktoré medzi povrchmi vytvárajú mikrospoje. Taktiež vzniká deformačná zložka trenia, ktorá sa skladá z elastických preklzov a plastických deformácií.



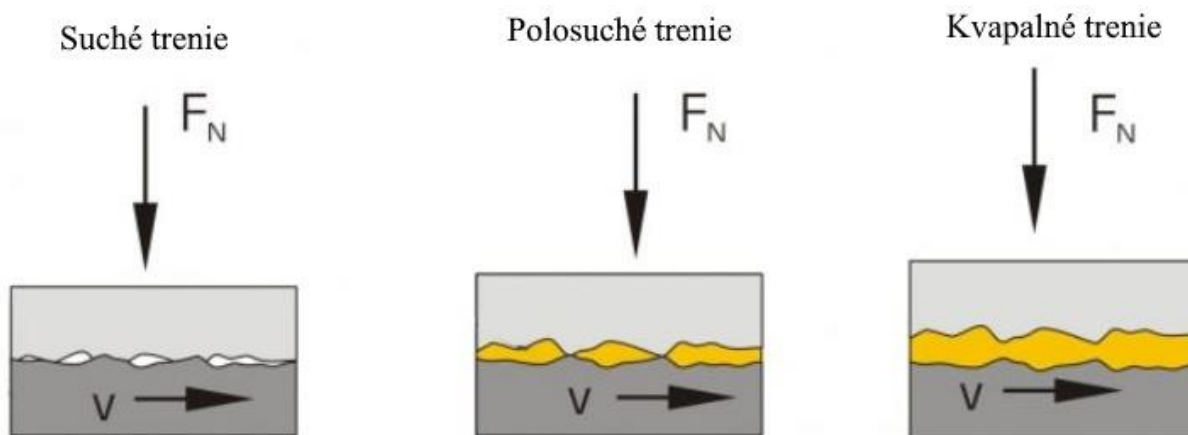


Obr.7 Druhy trenia [38]

Pri technologických procesoch sú rozličné druhy kontaktov medzi povrchmi a môžu existovať tieto typy stavov, ktoré sú zobrazené na obr. 8.

**Suché trenie** je charakteristické pri vzájomnom pohybe povrchov, medzi ktorými sa nenachádza žiadne tekuté či plastické mazivo. Ide o interakciu dvoch povrchov, ktoré sú v tuhom skupenstve a o priamy kontakt jednotlivých nerovností na povrchu. Pri styku jednotlivých výstupkov na povrchu dochádza buď k ich pružnej deformácii alebo môže nastať plastická deformácia nerovností. Jednotlivé nerovnosti majú odlišnú veľkosť i tvar. Pri suchom trení dvoch povrchov dochádza k zvýšeniu teploty. Nerovnosti sa ohrejú natoľko, že môže dôjsť k tvorbe mikrozvarov. Jednotlivé mikronerovnosti sa navzájom zadierajú pri vzájomnom pohybe medzi sebou a môže nastať vylamovanie povrchových častí materiálu, či ich deformácia.

Pri **kvapalnom trení** je medzi povrchmi vrstva, ktorá má vlastnosti kvapaliny. Táto vrstva umožňuje trenie na základe viskozity maziva a príľnavosti na povrch dotkových plôch. Pri pohybe vzniká šmykové napätie, dané viskozitou kvapaliny, ktorá udáva vnútorný odpor proti relatívnemu pohybu plôch medzi sebou, pričom dochádza k strate mechanickej energie. Podmienkou, aby samotný trecí proces prebiehal je súvislá vrstva maziva s rovnomernou hrúbkou. Táto trecia vrstva môže byť buď hydrodynamického alebo hydrostatického charakteru.



Obr. 8 Modely kontaktov medzi povrchmi [21]

**Polosuché trenie** je najčastejšie sa vyskytujúci stav pri tvárniacich operáciách. Povrchy dotýkajúcich sa plôch nie sú dokonale hladké a majú výčnelky či priehlbiny. Keďže výčnelky bývajú vyvýšenejšie, tak vrstva maziva nie je schopná prekryť celú plochu alebo mazivo sa nachádza v priehlbínach. Týmto nedôjde k úplnému prekrytiu povrchov a dochádza tam k priamemu styku kovov. Je to stav trenia, pri ktorom sú vytvorené podmienky ako pre suché trenie tak i pre kvapalinové.

### 2.1.3 Procesy opotrebovania [6], [14], [16], [22], [23], [24], [25], [27], [63]

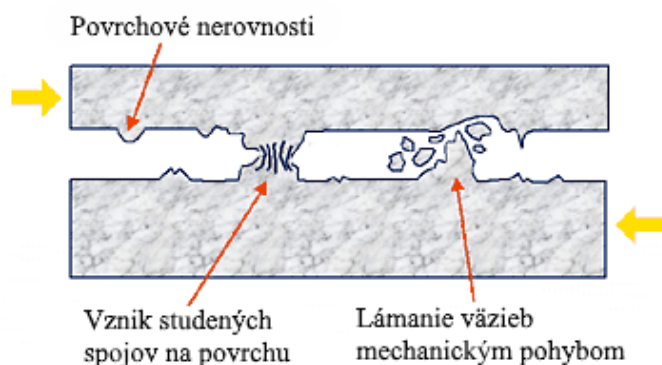
Degradačný proces známy ako opotrebovanie je príčinou vznikajúceho trenia medzi materiálom a nástrojom. Ide o stratu materiálu z povrchu, či jeho presun z jedného povrchu na druhý pri ich relatívnom pohybe. Ide teda o trvalú zmenu tvaru, veľkosti alebo vlastností vrstiev materiálov tvárniacich sa povrchov. Táto zmena opotrebovania nie je žiadúcim faktorom pri technologickom procese. Pri analyzovaní opotrebovania je možné pozorovať jednotlivé javy, ktoré sa vzájomne prekrývajú a sú to:

- vzájomné pôsobenie povrchov pri trení,
- zmeny prebiehajúce v povrchovej vrstve elementov trecej dvojice,
- porušenie povrchov.

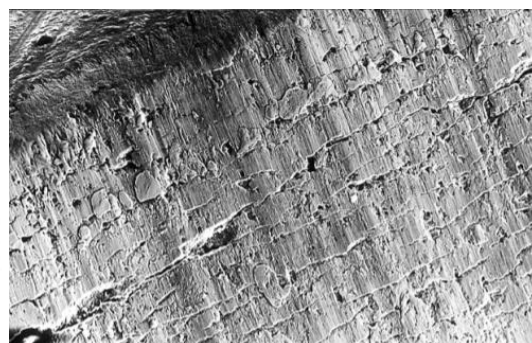
Prístup k opotrebovaniu môže byť na makroskopickú a mikroskopickú úroveň. Makroskopický prístup odpovedá pozorovaním ľudským okom, čiže k väčším alebo menším zmenám v materiálových a tvarových dvojiciach. Ďalším prístupom je mikroskopické opotrebovanie, ktoré zodpovedá sledovaniu základných postupov. Tieto procesy sú na úrovni lokálnej plastickej deformácie, ktorá sa koncentruje na roviny kryštalickej mriežky, dislokácii až k tvorbe vzniku trhlín.

Mechanizmy opotrebovania sa navzájom od seba líšia. V praxi platí, že k opotrebovaniu nedochádza na základe jedného mechanizmu ale jednotlivé druhy opotrebovania pôsobia súčasne. Existujú dva základné mechanizmy opotrebovania a to fyzikálne a chemické. Fyzikálne obsahuje procesy spôsobené trením, adhéziou, abráziou, únavou a eróziou. Pri chemickom opotrebovaní ide o reakciu medzi povrchom a okolitým prostredím alebo o oddeľovanie plodín mechanickým pôsobom.

**Adhézne opotrebovanie** nastáva pri kontakte medzi povrchmi dvoch tuhých telies. Pôsobením normálových síl vzniká deformácia nerovností na povrchu a dochádza k tvorbe mikrospojov. Mikronávary môžu byť spôsobené vznikom Van der Waalsových síl alebo veľmi silných chemických väzieb. Mechanický pohyb medzi nástrojom a materiálom vedie k porušeniu týchto mikrospojov. Pri porušení dochádza k utrhnutiu úlomkov materiálu a k nárastu koeficientu trenia. Zväčšený povrch adhezívneho opotrebovania je zobrazený



Obr. 9 Model adhezívneho opotrebovania [27]



Obr. 10 Adhézne opotrebovanie [36]

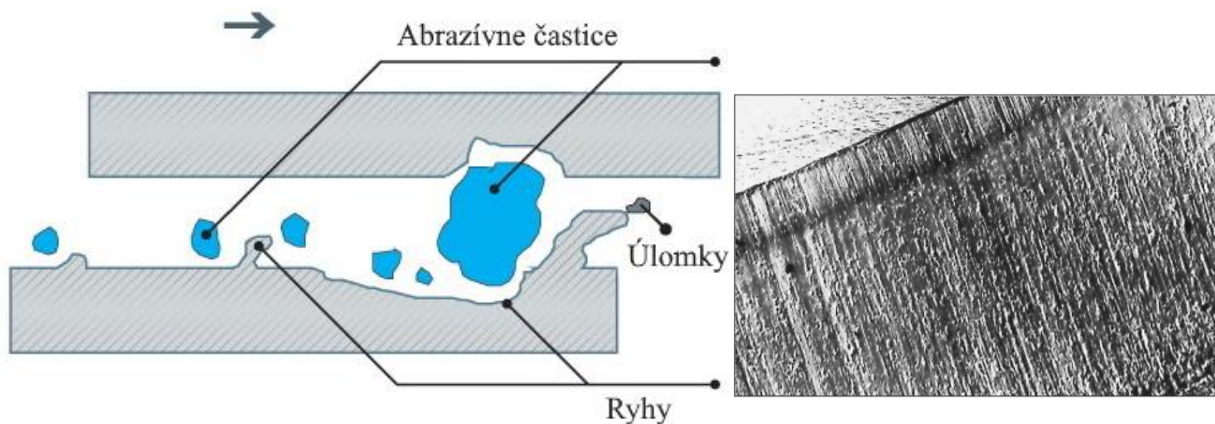


na obr. 10. Pri relatívnom pohybe dvoch stýkajúcich sa plôch vzniká ako prvá elastická deformácia medzi nerovnosťami a následne nastáva plastická deformácia. Schéma vzniku adhézneho opotrebovania je zobrazená na obr. 9. Aj pri použití mazacej vrstvy je pravdepodobnosť vzniku spojov vysoká. Je to z dôvodu, že pri veľkých nerovnostiach a veľkých prítlačných silách sa mazivo pretláča a nastáva dotyk tuhých telies.

Adhézne opotrebovanie môže byť redukované jedným z týchto spôsobov:

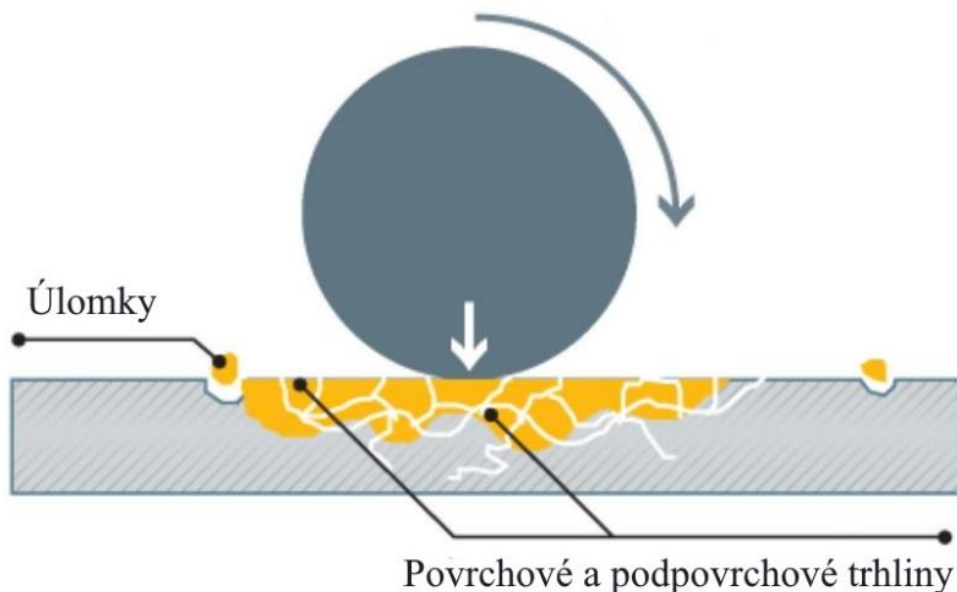
- výber materiálu, ktorý netvorí adhézne spoje a ľahko oxiduje,
- použiť materiál vhodnej tvrdosti stykových dvojíc,
- aplikáciou vhodných povlakov,
- výberom kvalitného mazania trecích plôch s dostatočne hrubou vrstvou.

**Abrazívne opotrebovanie** je spôsobené priamym fyzickým kontaktom medzi povrchmi. Dochádza k plastickej deformácii materiálu na styčnej ploche v dôsledku tvrdých a ostrých častí materiálu, ktoré sú medzi pôsobiacimi povrchmi. Taktiež to môže vzniknúť, ak je jeden z materiálov mäkkší ako ten druhý. Ostré a tvrdé nerovnosti sú vtlačené do mäkkšieho povrchu, čo vedie k plastickej deformácii materiálu okolo tvrdého. Dôsledkom tohto vzniká opotrebenie a ryhy v materiáli. Drážkovaný vzor abrazívneho opotrebovania povrchu je zobrazený na zväčšenom obr. 12. Ryhy sú spôsobené abrazívom. Ich geometria a veľkosť závisí na geometrickom tvare, veľkosti, mechanickej pevnosti a tvrdosti častíc. Abrazívo sa môže nachádzať buď priamo na styčnej ploche materiálu alebo môže byť prítomné v mazacej vrstve medzi dvoma funkčnými povrchmi. Schéma zobrazenia abrazívneho opotrebovania je na obr. 11. Opotrebovaniu sa predchádza po využití správneho mazacieho média, správnu voľbou tvrdosti materiálu či zmenšením merného tlaku.



Obr. 11 Schéma abrazívneho opotrebovania [27] Obr. 12 Abrazívne opotrebovanie [36]

Účinok **únavového opotrebovania** je spojený s cyklickým namáhaním nástrojov. Opakované zaťaženie spôsobuje kontaktné napätie (pri rotačnom alebo valivom pohybe), kde dochádza najskôr k spevneniu povrchu materiálu až k strate pružnosti. Výsledkom je iniciácia tvorby zárodok, mikrotrhlín v povrchu i pod povrchom materiálu. Podpovrchová trhlinka sa rozrastá kvôli ďalšiemu zaťažovaniu a deformácii smerom k povrchu a týmto spôsobom dochádza k porušovaniu povrchovej vrstvy materiálu. Povrchová trhlinka pokračuje smerom do vnútra materiálu, kde sa spája s ďalšími vzniknutými trhlinkami, šíria sa ďalej a podmieňujú vytváranie opotrebovania. Trhlinky majú tendenciu sa šíriť rovnobežne s povrchom materiálu. Schéma zobrazenia únavového opotrebovania s iniciáciou trhlín je na obr. 13.

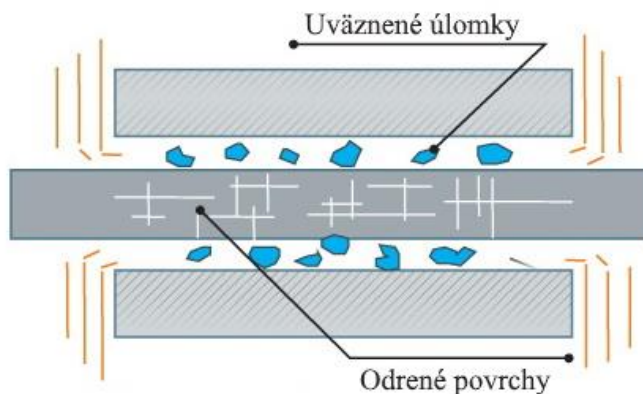


Obr. 13 Model únavového opotrebovania [27]

Tento typ opotrebovania sa najčastejšie vyskytuje pri cyklickom namáhaní. Únavové opotrebovanie je možné znížiť pomocou:

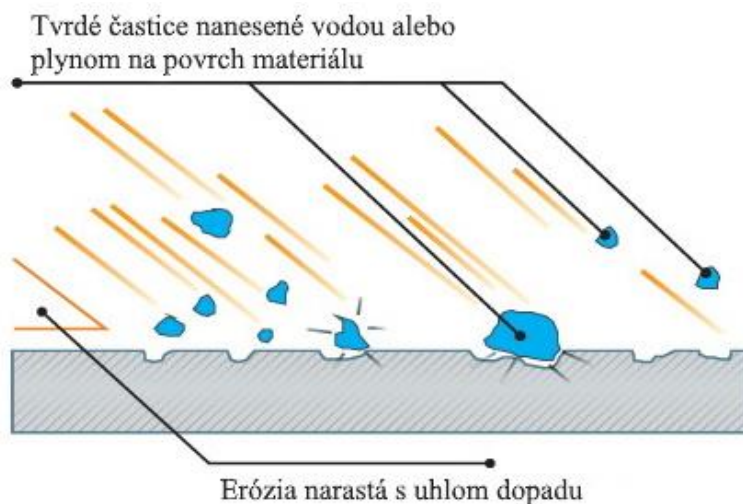
- zníženia kontaktného napätia,
- znížením tepelného cyklovania,
- odstránením nečistôt, inklúzií a iných nedostatkov, ktoré môžu spôsobiť lokálne trhliny materiálu.

**Vibračné opotrebovanie**, vid' obr. 14 sa vyskytuje v kontaktnej oblasti medzi dvoma povrchmi pri zaťažení, kým sú povrchy vystavené pomalému relatívnemu pohybu vibráciami alebo inými silami zaťaženia. Medzi povrchmi sú oddelené častice, ktoré poškodzujú povrch vzájomným oscilujúcim posuvom stykových plôch. Tieto voľné častice medzi povrchmi vznikajú pri vytváraní mikrospojov a následne dôjde k ich utrhnutiu z povrchu materiálu. V začiatočnom štádiu vzniká pôsobením normálových síl elastická a plastická deformácia povrchových vrstiev. Najskôr sa povrchové vrstvy spevňujú a po vyčerpaní plasticity sa začínajú vytvárať malé častice oteru. Na povrchu sa vytvárajú jamky a dochádza k prenosu materiálu z jedného povrchu na druhý. Následne vďaka oxidom v okolitej atmosfére častice oxidujú a hromadia sa medzi stykovými plochami. Vibračné opotrebovanie môže spôsobiť iniciáciu únavových trhlín, podporovať lokálnu koróziu a poškodenie funkčných plôch súčastí, čo vedie k zníženiu presnosti i k zhoršeniu drsnosti.



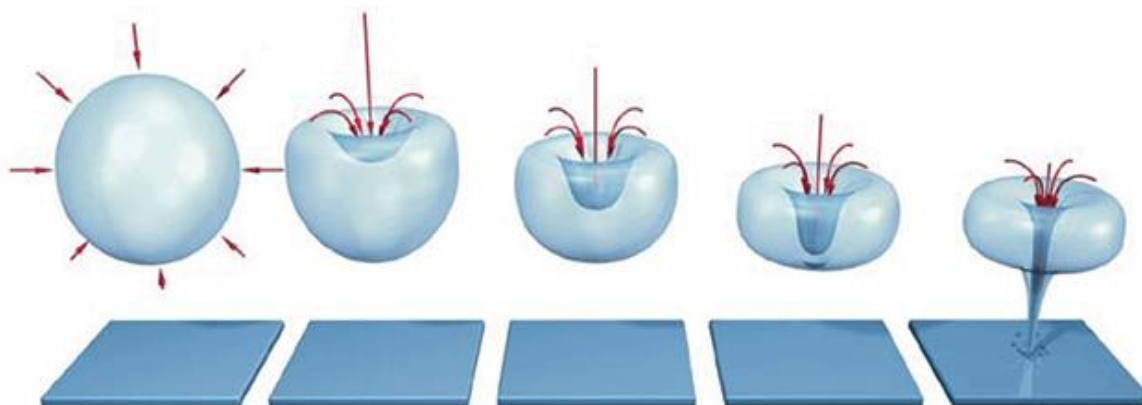
Obr. 14 Schéma vibračného opotrebovania [27]

**Erozívne opotrebovanie** je charakteristické poškodzovaním povrchu materiálu priamym kontaktom časticami, ktoré sú vnesené prúdom kvapaliny alebo plynu. Základný mechanizmus vzniku erozívneho opotrebovania je zobrazený na obr. 15. Na tomto obrázku je povrch materiálu ovplyvnený dopadajúcimi časticami, ktoré narazia na povrch materiálu určitou rýchlosťou a pod určitým uhlom. Na povrchu dochádza k plastickej deformácii spôsobenej časticou prípadne kvapalinou. Miera veľkosti vzniknutého opotrebenia závisí od charakteru geometrie častíc, tvrdosti častíc, ich rýchlosti pohybu, ktorá určuje energiu pri zrážke s povrchom a hlavne od uhlu, pod ktorým častica dopadne. V prípade tvárnych materiálov k maximálnemu opotrebovaniu dochádza pod malým uhlom. Naopak pri krehkých materiáloch maximálne opotrebovanie vzniká pod veľkými uhlami. Pre tento typ opotrebovania je charakteristický vznik priehlbín na telese, ktoré sa zvyšujú ubúdaním materiálu z najnižších miest povrchu a nerovnomerným zvrásnením a zvlnením povrchu.



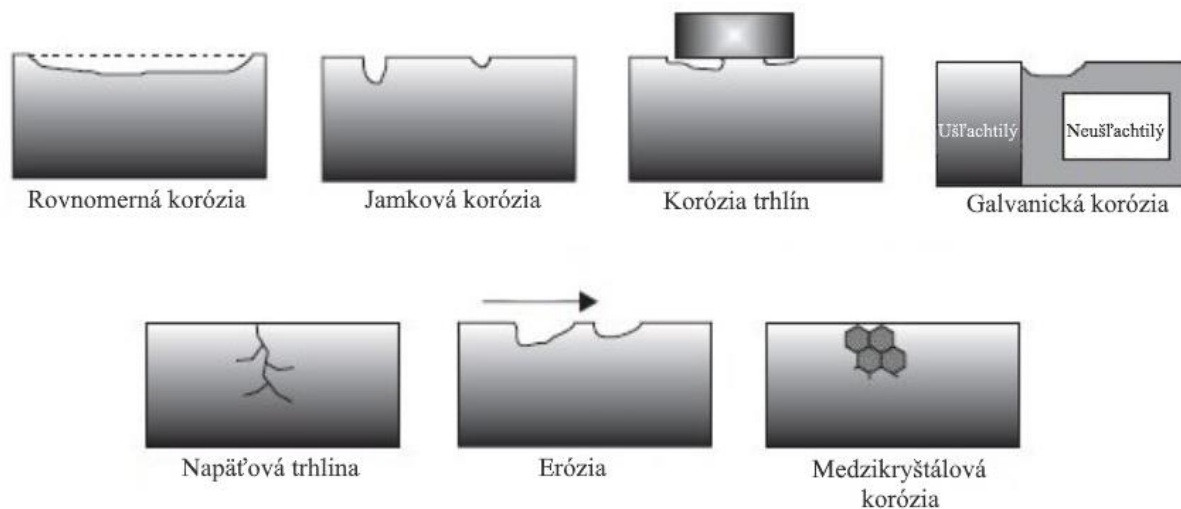
Obr. 15 Mechanizmus erozívneho opotrebovania [27]

**Kavitačné opotrebovanie** je zložitý degradačný proces podmienený vznikom plynových bublín v kvapaline. Vysokou rýchlosťou prúdenia kvapaliny dochádza v určitých miestach k výraznému poklesu tlaku čo vedie k vytvoreniu týchto plynových bublín. Bubliny sú vysoko nestabilné a vplyvom prúdenia dochádza k ich zániku, pokiaľ zanikne blízko povrchu dôjde vplyvom extrémnych podmienok k vytrhnutiu malej časti materiálu z povrchu dielu súčasti. Zobrazenie schémy vzniku kavitačného opotrebovania je na obr. 16. Kavitačné opotrebovanie zhoršuje povrch materiálu tak, že povrch je drsný akoby bol vytrhaný.



Obr. 16 Vznik kavitačného opotrebovania [63]

V prípade **korozívneho opotrebovania**, nastáva reakcia povrchu materiálu s okolitým prostredím, pokiaľ sa v prostredí vyskytujú prvky, ktoré môžu s materiálom reagovať (vzdušný kyslík, vodík, dusík poprípade iné plyny alebo kvapaliny). Niektoré z mechanizmov vzniku korózie sú zobrazené na obr. 17. Pokiaľ sú mechanické komponenty bez mazania dochádza k reakcii s povrchom materiálu. Reaktívne zložky môžu tvoriť korózne opotrebovanie. Okrem toho, prítomnosť nadmerného množstva tlaku alebo protiterové



Obr. 17 Mechanizmy vzniku korózie [28]

prísady či iné chemické látky v mazacom systéme môže spôsobiť korózne opotrebovanie. Vysoká teplota má tiež nepriaznivý vplyv na vznik korózie, napríklad u konvenčných kvapalných mazív môže jej vplyvom dôjsť k reakcii zložiek maziva s povrchom.

Rozsah korózneho opotrebovania je závislé na mnohých faktoroch. Jeden z faktorov je charakter použitého materiálu pri tvárniacich operáciách a taktiež jeho povrchová úprava. Niektoré povrchové úpravy materiálov sú pre jeden druh materiálu nereaktívne, ale môžu ľahko reagovať s iným. Taktiež niektoré zložky z vonkajšieho prostredia sú viac reaktívne s povrchom materiálu ako iné. Ešte jedným dôležitým parametrom je povrchová teplota. Čím vyššia je povrchová teplota v dôsledku trecieho procesu, tým viac vonkajšie prostredie reaguje s pevným povrchom.

Opotrebovanie patrí k jednému z najväčších faktorov, ktoré sú dôsledkom mnohých problémov pri technologických procesoch. Jedným z týchto problémov je i vzniknuté trenie pri tvárniacich operáciách. Nie je možné, dosiahnuť jeho úplné odstránenie, ale môže byť čiastočne eliminované. Napomáha to k zvýšeniu životnosti nástrojov a tým pádom aj k vyšším úsporám. Jedna z možností eliminovania je použitie vhodného mazacieho filmu pre danú technológiu a vhodné pracovné podmienky.

#### 2.1.4 Mazací proces [6], [11], [18], [29], [40]

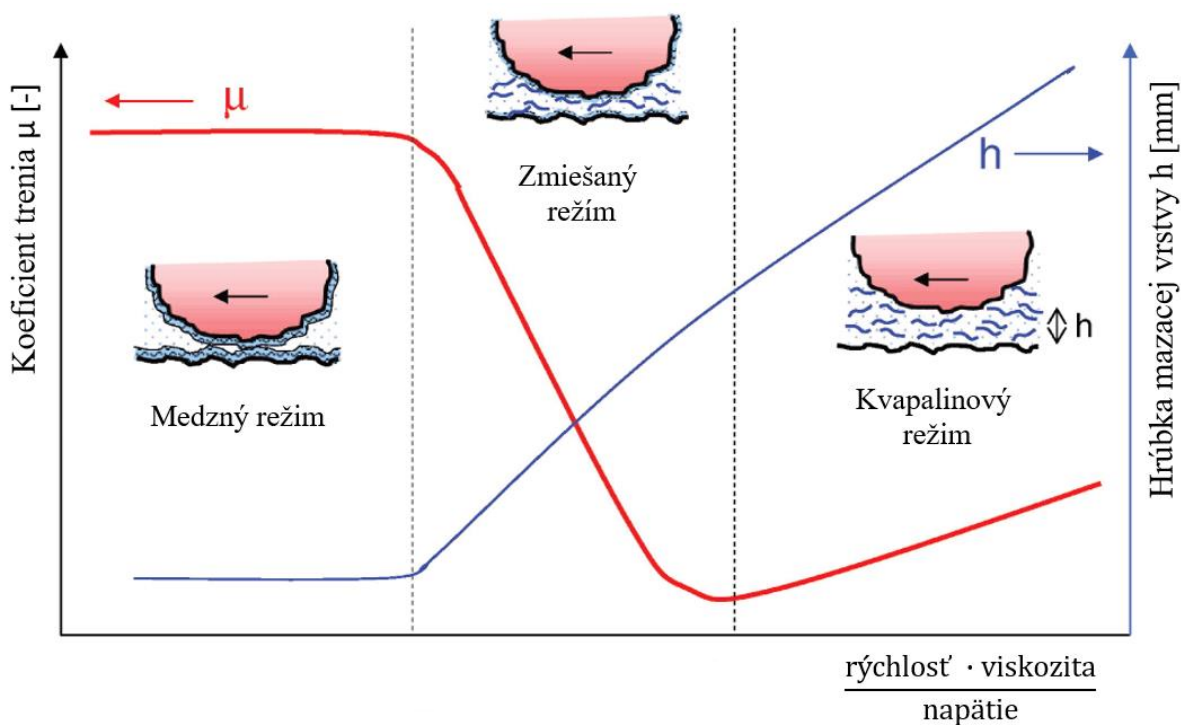
K ďalšej časti tribologického systému, ktorý je najúčinnnejším prostriedkom zníženia trenia a obmedzenia opotrebovania patrí mazanie. Pri mazaní sa vytvára taký stav kedy sa vytvorí dostatočne hrubá vrstva maziva, že nedôjde ku styku nerovností tuhých telies pri pohybe. Mazivo je plnohodnotný, aktívny prvok systému, pretože jeho vlastnosti ovplyvňujú materiálové, mechanické a energetické straty, čím priamo ovplyvňujú životnosť a účinnosť dielcov, nástrojov a strojov. Mazivo môže byť pevného, kvapalného alebo plynného skupenstva.



Požiadavky na mazivá pri technologických procesoch sú:

- dlhodobá životnosť,
- vysoká mazacia schopnosť, ktorá vedie k zníženiu koeficientu trenia a opotrebenia,
- nízka zmena viskozity počas zmien okolitej teploty,
- mazivo musí byť znášavé k povrchu materiálov,
- odolnosť voči účinkom okolia,
- ekologicky nezávadné.

Všetky tribologické procesy sa vo všeobecnosti týkajú priameho fyzického kontaktu medzi relatívnym pohybom povrchov. Všetky tieto procesy môžu byť ovplyvnené alebo modifikované mazaním. V závislosti od hrúbky mazacej vrstvy sa rozlišujú rôzne režimy mazania. Tieto režimy sú popísané v Striebeckovom diagrame. Striebeck vykonal experiment, na ktorom preukázal, že koeficient trenia v mazacom procese je priamo úmerný rýchlosti dotykových povrchov, viskozite maziva a nepriamo úmerný tlaku. Striebeckova krivka poskytuje základné znalosti o tom, ako sa mení trenie s procesnými parametrami. Na základe zmeny trenia je zrejmé, že v modeli dominuje viskozita maziva. Na obr. 18 je tvar Striebeckovej krivky znázornený zjednodušeným spôsobom a tiež zobrazená krivka ako sa mení hrúbka mazacieho filmu v závislosti na jednotlivých režimoch.



Obr. 18 Striebeckov diagram [35]

Režimy mazania závisia od geometrie kontaktných telies, stavu povrchu, kontaktného napätia, tlaku a teploty, rýchlosti kontaktu a fyzikálno-chemických vlastnostiach mazív. V závislosti od rozsahu oddelenia kontaktných povrchov sa mazacie režimy delia na:

- medzný režim,
- zmiešaný režim,
- kvapalinový režim.

V **medznom režime** mazania nie sú kontaktné plochy oddelené vrstvou maziva a zaťaženie je prenesené nerovnosťami, čo spôsobuje veľmi vysoké trecie sily. V týchto

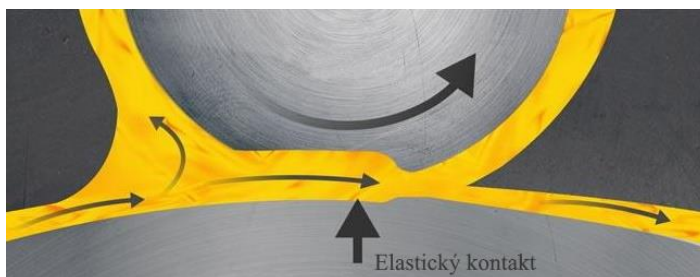
bodoch môžu byť povrchy plasticky deformované. Takýto stav mazania je v Stribeckovej krivke zobrazený na ľavej časti, čiže sa vyskytuje pri veľmi nízkej rýchlosti s mazivom o nízkej viskozite alebo pri vysokých zaťaženiach s alebo bez prítomnosti maziva. Tento stav mazacieho režimu je nežiadúci, pretože zvyšuje opotrebovanie.

**Zmiešaný režim** mazania môže vzniknúť, pri prerušení mazacej vrstvy medzi povrchní a pri dotyku nerovností. Takáto situácia môže vzniknúť ak je vrstva prerušená veľmi vysokým tlakom alebo pri veľmi nízkej rýchlosti povrchov. Vrstva maziva medzi nástrojom a polotovarom je pomerne tenká a preto i v tomto režime dochádza ku vzájomnému kontaktu medzi výčnelkami. Zaťaženie je čiastočne prenesené povrchovými nerovnosťami medzi nástrojom a polotovarom. Hrúbka mazacej vrstvy sa pohybuje v rozmedzí od 0,01 – 1  $\mu\text{m}$ .

**Kvapalinový režim** je charakteristický pre klzné povrchy, ktorá sú oddelené kontinuálnym mazacím filmom. Jeho hrúbka je väčšia ako veľkosť nerovností tým pádom nepríde ku ich vzájomnému kontaktu. Tento režim je charakteristický pri vysokých rýchlostiach relatívneho pohybu s relatívne nízkym zaťažením. Výsledok tohto režimu je veľmi nízke trenie a takmer nulové opotrebovanie. Udržiava sa stabilná výška maziva. Tento druh režimu sa rozdeľuje na:

- Elastohydrodynamické mazanie (skrátene EHL) je definované ako forma mazania tekutou vrstvou, kde elastická deformácia kontaktu povrchov je porovnateľná s hydrodynamickou vrstvou maziva. Faktory, ktoré ovplyvňujú EHL mazanie sú hydrodynamika, elastická deformácia kontaktných telies a zvýšená viskozita maziva. Na obrázku 19 je zväčšený pohľad na mazaný Hertzov kontakt. Ukazuje rozloženie hrúbky mazacej vrstvy medzi dvoma povrchní.

Pri EHL sa mazivo veľmi rýchlo mení z ideálneho stavu tekutiny mimo kontaktu do extrémne viskózneho stavu vo vnútri pôsobením tlaku. Táto zmena stavu pomáha vtiahnuť mazivo do kontaktu zatiaľ, čo vytvára dostatočný tlak na udržanie kontaktov od seba.



Obr. 19 Elastohydrodynamické mazanie [39]

- Pri hydrostatickom mazaní sú dva kontakty povrchu úplne oddelené vrstvou maziva. Na rozdiel od hydrodynamického mazania, kde je tlak mazacej vrstvy udržiavaný viskóznym odporom, u hydrostatického mazacieho režimu sa vytvára tlak pomocou použitia externého zdroja, ktorým je mazivo dodávané. Hrúbka vrstvy môže byť až niekoľko milimetrov a zabraňuje tým priamemu kontaktu nerovností.
- Hydrodynamické mazanie je definované ako forma mazania, kde nedochádza ku kontaktu povrchov. V mazacej vrstve dôsledkom dostatočnej rýchlosti relatívneho pohybu trecích plôch sa vytvára hydrodynamický tlak pomocou, ktorého môže dôjsť k oddeleniu povrchov. Tento režim je charakteristický pri vysokých rýchlostiach relatívneho pohybu s relatívne nízkym zaťažením. Hrúbka maziva sa zvyšuje s rýchlosťou a viskozitou kvapaliny a so zaťažením klesá.

## 2.2 Trenie v tvárniacich procesoch [9], [24], [29], [30], [31], [33], [34], [48], [50]

Trenie pri tvárnení kovov vzniká v dôsledku tesného kontaktu medzi nástrojom a povrchom dielca v kombinácii s vysokými pracovnými tlakmi nástroja. Vo väčšine technológií je nežiadúci z týchto dôvodov:

- tok kovu v dielci je spomalený, čo spôsobuje vznik zvyškového napätia a môže viesť k tvorbe defektov,
- zvýšia sa sily a výkon počas procesu,
- výskyt vysokého trenia vedie k urýchleniu opotrebovania nástroja a tým k zvýšeniu nákladov, kvôli nutnosti častých opráv či výmenou opotrebovaných častí.

Vonkajšie trenie sa v tvárnení prejavuje ako pasívny činiteľ, ktorý brzdí plastickú deformáciu a nepriaznivo ovplyvňuje silu, prácu a životnosť nástrojov a taktiež sa prejavuje ako aktívny činiteľ umožňujúci uskutočniť tvárniace pochody. Pre posúdenie trenia sa používa koeficient trenia, jeho veľkosť závisí na týchto činiteľoch:

1. povrch pracovnej plochy nástroja,
2. povrch tvárneného materiálu,
3. chemické zloženie tvárneného kovu,
4. tvárniaca teplota,
5. pracovná rýchlosť nástroja,
6. mazivo.

Trenie v tvárnení sa oproti iným mechanickým procesom spracovania kovov odlišuje. Je to z dôvodu, že prostredie pri tvárnení sa vyznačuje vysokými tlakmi medzi nástrojom a dielcom, buď elastickou alebo plastickou deformáciou mäkkšieho materiálu a vysokými teplotami hlavne pri prácach za tepla. Tieto podmienky môžu mať za následok pomerne vysoké hodnoty koeficientu trenia. V tabuľke 1 sú uvedené približné hodnoty koeficientu trenia pre jednotlivé operácie.

Tab. 1 Hodnoty koeficientu trenia pre rôzne tepelné procesy tvárnenia [9]

	Teplotný rozsah	Koeficient trenia
Tvárnenie za studena	$< 0,3 T_{Tav}$	0,1
Tvárnenie za poloohrevu	$0,3 - 0,6 T_{Tav}$	0,2
Tvárnenie za tepla	$> 0,75 T_{Tav}$	0,4 - 0,5

V tvárniacich procesoch, charakteristika mazív (najmä koeficientu trenia) ovplyvňujúceho trenie počas procesu je vyjadrené dvoma matematickými modelmi, Coulombov a Trescov. Všeobecne sa vyjadruje koeficientom trenia  $\mu$  a koeficientom trenia v šmyku  $m$ . Coulombov model trenia je definovaný ako:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.3)$$

kde:  $\mu$  – koeficient trenia [-]

Trescov model trenia je definovaný:

$$\tau_r = m \cdot \sigma_k \quad (2.4)$$

kde:  $\tau_r$  – šmykové napätie [MPa]  
 $\sigma_k$  – medza klzu v šmyku [MPa]  
 $m$  – trecí faktor [-]

Pri tvárniacich postupoch platí, že hodnota koeficientu trenia  $\mu$  leží v intervale  $\mu_{max} \in < 0,5; 0,577 >$  a hodnota trecieho faktoru  $m$  nadobúda hodnôt  $0 \leq m \leq 1$ . Pričom platí, že ak sa  $m = 0$  ide o prípad bez trenia a  $m = 1$  ide o prípad adhézneho prilnutia. Koeficient trenia je premenná veličina, ktorého veľkosť sa mení počas tvárnenia a závisí na povrchu nástrojov, teplote, tlaku a rýchlosti tvárnenia.

Trenie je potrebné kontrolovať pri procesoch tvárnenia, aby sa dosiahli požadované tvary a geometrie dielcov. Ak však trenie nie je kontrolované, môže vyvolať v dielcoch lokálnu koncentráciu napätia. Toto lokalizované napätie môže prispieť k zhoršeniu mechanických vlastností výrobku, či k ich poruchám. Preto je potrebné navrhnuť vhodné technické parametre najmä ako sú vlastnosti povrchu a mazanie, aby výsledné produkty spĺňali požadovanú kvalitu. Okrem kvality výrobkov je potrebné zabezpečiť aj hospodárnosť procesov a ochranu životného prostredia. Mazanie je najmä zamerané na zníženie trenia a na vzájomnej reakcii pôsobenia medzi dielom a materiálom pracovného nástroja. Výsledkom je výroba vysoko kvalitných dielov a zabránenie ich poškodeniu. Mazivo je v podstate akákoľvek hmota vložená medzi dva povrchy pri ich relatívnom pohybe za účelom zníženia trenia a opotrebovania.

Pri tvárnení materiálu sa vo veľmi málo prípadoch dá počítať s hydrodynamickým režimom mazania. Pre zvýšenie účinnosti sa do mazív pridávajú rôzne druhy aditív, ktoré môžu byť polárneho charakteru či meniť povrch kovu chemickými reakciami. Tým pádom sa kontakt medzi povrchmi zamedzuje. Taktiež zamedzeniu kontaktu povrchov sa dá pridaním tuhých a jemne rozomletých látok, ktoré fungujú ako inertné plnivé alebo ako tuhá látka.

V mnohých prípadoch by sa mazanie malo obmedzovať na zónu tvárnenia. Je to z toho dôvodu, aby neboli ovplyvňované medzné ťažné pomery a pretvárná sila na tvárnenie. Napríklad pri mazaní ťažného dna môže byť dôsledok vzniku trhlin na dne. Preto toto miesto musí ostať bez maziva.



Obr. 20 Mazanie pri tvárnení za studena [37]



Pri aplikácii maziva v praxi, vid'. obr. 20 sa musia spĺňať určité kvalitatívne parametre a taktiež všetky faktory, ktoré s danou technológiou súvisia a zohľadniť ich. Medzi dôležité aspekty k výberu patrí:

1. Stupeň obťažnosti tvárniaceho procesu.
2. Ovplynenie toku materiálu pri tvárnení.
3. Mazací a chladiaci účinok.
4. Jednoduché nanášanie a odstránenie maziva.
5. Antikorózna ochrana.
6. Odvod nečistôt.
7. Pracovné a ekologické podmienky.

### 2.2.1 Druhy mazív [14], [24], [29], [31], [33], [34] , [59]

Procesy tvárnenia kovov zahŕňajú zložité technológie v plošnom i v objemovom tvárnení za tepla, či za studena. Pri týchto procesoch vznikajú často vysoké tlaky a teploty medzi pôsobiacimi povrchmi a taktiež deformáciu povrchu súčasti. Preto v týchto procesoch sa využívajú rôzne druhy mazív pre dané technológie spracovania kovov. Každý druh maziva má svoje výhody a nevýhody, avšak je treba vybrať správny druh. Výber mazív by mal rešpektovať aké sú základné funkcie a požiadavky na mazivá v konkrétnych prevádzkových podmienkach.

Mazivá pri tvárnení materiálu sa všeobecne delia do štyroch skupín:

- mazivo na vodnej báze,
- na olejovej báze,
- syntetický typ,
- pevné mazivo.

Oleje miešateľné s vodou obsahujú vodu s iným aditívom a v oleji môže byť rozpustená, emulgovaná a voľná. Oleje sa miešajú s vodou v koncentrácii 2 % – 10 %. Výhoda použitia je hlavne pri tvárniacich operáciách kde sa uprednostňujú chladiace účinky, pretože viskozita vody je príliš nízka na mazanie. Účinky vody v oleji sú predovšetkým pri urýchľovaní oxidačných reakcií v mazivách, narušovanie hrúbky mazacej vrstvy. Oleje sú náchylné na tvrdú vodu, kde môžu vytvárať nerozpustné precipitáty. Využívané sú pri malých deformáciách a rýchlych tvárniacich procesoch.

Mazivá na báze oleja, vid'. obr. 21 sú zložené z minerálnych alebo ropných olejov. Pre konkrétne technologické podmienky obsahuje výsledné mazivo 70 % – 99 % základného oleja a 0,1 % – 30 % použitých prísad, ktorých môže byť niekoľko druhov. Často pre ich zlepšenie obsahujú tuky pre lepšiu zmáčavosť, rastlinné oleje a estery, ako aj aditíva síry, chlóru, či fosforu pre extrémne tlaky a lepšie mazanie. Výhodou je veľmi dobré mazanie, dobrá ochrana proti korózii a jednoduchá údržba. Veľkou nevýhodou je odvod tepla. Používajú sa pri aplikáciách s nízkou rýchlosťou a kde je potrebné dobré mazanie.



Obr. 21 Olejové mazivo [41]

Syntetické mazivá neobsahujú olejovú bázu a sú zložené z alkalických anorganických a organických látok. Ide o vodné roztoky syntetických mazív, inhibítorov korózie, zmäkčovadlá vody, antibakteriálne prísady a iné. Dodávajú sa vo forme koncentrátov, ktoré sa pred použitím miešajú s vodou. Zvyšujú životnosť systému vynikajúcou odolnosťou voči korózii, mazacími vlastnosťami a stabilitou pri vysokej teplote. Nevýhodou je ich určitá toxicita. Polysyntetické mazivá sú kombináciou minerálnych a syntetických olejov. Obsahujú 40 % – 60 % minerálnych zložiek, 20 % – 30 % syntetických zložiek a zvyšok obsahujú aditíva. Polosyntetické mazivá tak predstavujú kombináciu pozitívnych i negatívnych vlastností minerálnych a syntetických olejov. Majú lepšiu ochranu proti korózii, chladiace účinky a ľahšiu manipuláciu a údržbu ako minerálne oleje.

Tuhé mazivá sú charakterizované nízkou pevnosťou v šmyku v kombinácii s vysokou pevnosťou v tlaku. Táto kombinácia vlastností zaručuje nízky koeficient trenia a schopnosť odolávať veľkému prevádzkovému zaťaženiu. Vykazujú tiež dobrú priľnavosť k povrchu materiálu. Tuhé mazivá zahŕňajú látky s kryštalickou mriežkou, ktorá má vrstevnú štruktúru. Najbežnejšie používané mazivá s lamelárnou štruktúrou sú grafit, vid' obr. 22, sulfid molybdénicitý  $\text{MoS}_2$  a nitrid bóritý BN. Často sú používané ako tepelne stabilné mazivá. Avšak  $\text{MoS}_2$  môže v závislosti od podmienok rozkladať a uvoľňovať síru, čo môže spôsobiť koróziu. Medzi tuhé mazivá sa zaraďujú aj polyméry, kde existujú tri hlavné skupiny ako teflón (PTFE), nylon a syntetické polyméry. Teflón sa používa z dôvodu nízkeho trenia, chemickej stability a nízkej povrchovej energie. Nevýhodou tohto maziva je v relatívne vysokej miere opotrebovania, má vysokú tepelnú rozťažnosť a nízku tepelnú vodivosť, takže nie je vhodné ho používať v prostrediach s vysokou teplotou. Tieto nevýhody sa dajú vyriešiť použitím syntetických polymérov. Syntetické polyméry sú na báze skla a uhlíka teflónu.

Medzi tuhé mazivá patria aj tzv. klzné laky. Ide o veľmi malé častice tuhých mazív v roztokoch anorganických alebo organických spojív s riedidlom. Mazacie častice sú najčastejšie z  $\text{MoS}_2$ , teflonu, grafitu alebo syntetických častíc. Po nanosení vrstvy na povrch materiálu sa vytvorí tenký, pevný mazací povlak. Používajú sa v prípadoch, keď nie je možné použiť iné mazivo.



Obr. 22 Mazivo grafitu [45]

Pri operáciách tvárnenia za studena sa využívajú hlavne minerálne oleje, emulzie na báze vody, mydla či povlaky. Pokiaľ sa pracuje za tepla tak sa využívajú minerálne oleje, grafit i roztavené sklo. Pre ľahké lisovanie sú vhodné mazivá minerálne s nízkou viskozitou, syntetické oleje alebo oleje s vodou miešateľné. Pri ťažkých ťažných operáciách sa používajú mazacie oleje obsahujúce aditíva pre extrémny tlak a povlaky s nízkym trením, napríklad fosfátové.

Prísady do mazív sú dnes už samozrejmosťou. Sú definované ako doplnkové látky, ktoré sú organické alebo anorganické zlúčeniny, komponenty obsahujúce v mazacích olejoch. Obsah prísad v mazacom oleji sa pohybuje v rozsahu od 0,1 % – 30 % a to v závislosti od konkrétneho použitia. Prísady môžu zlepšovať iba jednu vlastnosť alebo hneď niekoľko vlastností. Ide o zlepšenie trecích, fyzikálnych a chemických vlastností základových mazív. Potreby zvyšovania pôvodných vlastností mazív je v dôsledku zlepšenia úžitkových

vlastností, výkonnosti maziva a predĺženie životnosti stroja. Najväčšie množstvo prídavných látok sa využíva najmä pre zlepšenie vlastností olejových mazív. Prísady majú funkcie:

- Zlepšenie už existujúcich vlastností základových olejov prostredníctvom inhibítorov korózie, antioxidantov (zlepšenie oxidačnej stability) prísady proti peneniu a deemulgačných činidiel.
- Potlačenie vlastností nepriaznivých pre základové oleje a to pomocou depresantov, znižovania bodu tuhnutia a zlepšovania viskózneho indexu.
- Poskytnutie nových vlastností, ktoré základné oleje nemajú a to pomocou vysokotlakových prísad, disperzantov, prísady proti opotrebovaniu a ďalšie vhodné prísady.

### 2.2.2 Povlaky [23], [30], [43], [44], [47], [59]

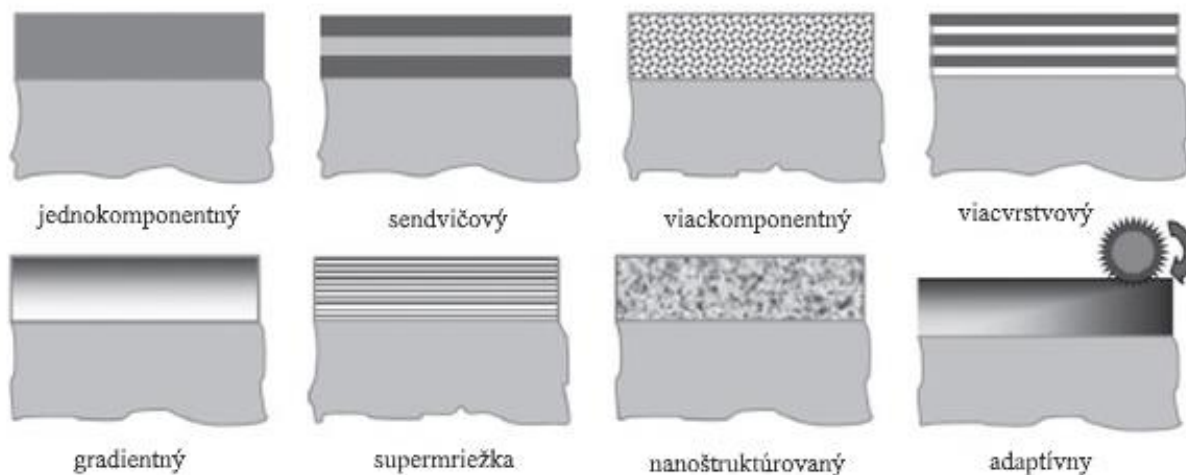
Pri tvárniacich technológiách existujú rôzne spôsoby kontroly a ovládanie trecích procesov a opotrebovania, ktoré boli spomínané už vyššie. Ide o správny výber materiálu, výber vhodného maziva či nastavenia správnych technologických parametrov. Avšak nie vždy je možné takýmto spôsobom zlepšiť danú technológiu, preto v takýchto prípadoch je možné skvalitniť povrchovú vrstvu a to využitím povlaku. Využívanie a výber správnych povlakov výrazne ovplyvňuje kvalitu povrchu a tým sa znižuje trenie a opotrebovanie a taktiež umožňuje vývoj nových konštrukcií, pri ktorých budú požadované vlastnosti splnené.

Povlaky môžu obsahovať niekoľko štruktúr a teda ich kombinácia v rámci jedného povlaku zabezpečí, aby čo najideálnejšie spĺňovali požiadavky z hľadiska bezporuchovej prevádzky aj pri extrémnych podmienkach či predĺženia životnosti. Ide o dosiahnutie rôznych fyzikálnych vlastností, zníženie mechanických a chemických nezhôd medzi základným materiálom a povlakom, zastavenie šírenia trhlín počas prevádzky a iné.

Štruktúrne povlaky, ktoré sú zobrazené na obrázku 23 sa delia:

- jednokomponentné tenké vrstvy – často využívané pri technických aplikáciách a ide o najjednoduchšie povlaky. Patria sem najrozšírenejšie PVD a CVD povlaky tvorené jednou vrstvou.
- viackomponentné tenké vrstvy – pozostávajú z dvoch či viacerých zložiek, ktoré sú vo forme zrn, častíc alebo vlákien. Jednotlivé zložky zlepšujú vlastnosti ako napríklad tvrdosť pri vysokej teplote, odolnosť proti nárazu i oxidácii či iné.
- viacvrstvové tenké vrstvy – môžu byť buď sendvičové vrstvy ktoré môžu znížiť nesúlad mechanických a chemických vlastností medzi základným materiálom a povlakom. Medzi ďalšie viacvrstvové tenké vrstvy patria periodicky sa opakujúce lamely. Tieto zabráňujú šíreniu sa trhlín na hranici jednej z vrstiev.
- nanoštruktúrované povlaky – sú vlastne nanokryštalické a nanokompozitné filmy. Ich zrná majú veľkosť v nanometroch. Zvýšenie tvrdosti a eliminovanie opotrebovania je závislé na poklese veľkosti zrna. Taktiež majú vyššiu odolnosť proti korózii.
- gradientné tenké vrstvy – ide o viacvrstvový povlak, pri ktorom sa realizuje gradientný prechod zo základného materiálu do jednotlivých vrstiev. Je to z dôvodu, že výrazné zmeny medzi jednotlivými vrstvami a základným materiálom môžu vyvolať vysoké napätie na hraniciach a tým iniciovať trhliny.

- superštruktúrované povlaky – sú viacvrstvé periodicky sa opakujúce povlaky. Hrúbka jednotlivých vrstiev je od 5 – 50 nm. Tieto povlaky môžu zvýšiť tvrdosť, húževnatosť a tepelnú stabilitu.
- adaptívne povlaky – povlaky, ktoré sa prispôbujú prevádzkovým podmienkam a vedú zmeniť svoje vlastnosti. Tieto nanokompozitné povlaky môžu na základe aplikovaného zaťaženia a prevádzkového prostredia meniť svoju povrchovú chémiu, štruktúru a mechanické vlastnosti.



Obr. 23 Typy štruktúr povlakov [59]

Ďalšou výhodou, ktoré poskytujú povlakované nástroje, vid'. obr 24, ktoré sa používajú pri tvárnení sú ich špeciálne schopnosti, ktoré boli vyvinuté a patria sem:

- samomazacie schopnosti povlakov sú tie, že pri postupnom opotrebovaní sa z povlaku uvoľňuje mazivo, ktoré ho obsahuje. Musí dôjsť k opotrebovaniu, aby došlo k uvoľňovaniu maziva.
- samoochranné povlaky majú na povrchu ochrannú vrstvu proti opotrebovaniu, ktorý sa vytvára počas bežnej prevádzky.
- samoopraviteľné povlaky by mali byť schopné opraviť degradáciu povrchu počas prevádzky.
- povlaky s integrovanými sensorickými funkciami na základe napr. teploty, tlaku, napätia a iných by mali sledovať ich opotrebovanie. Touto funkciou je možné predpovedať koniec spoľahlivej prevádzky a predísť poškodeniu.

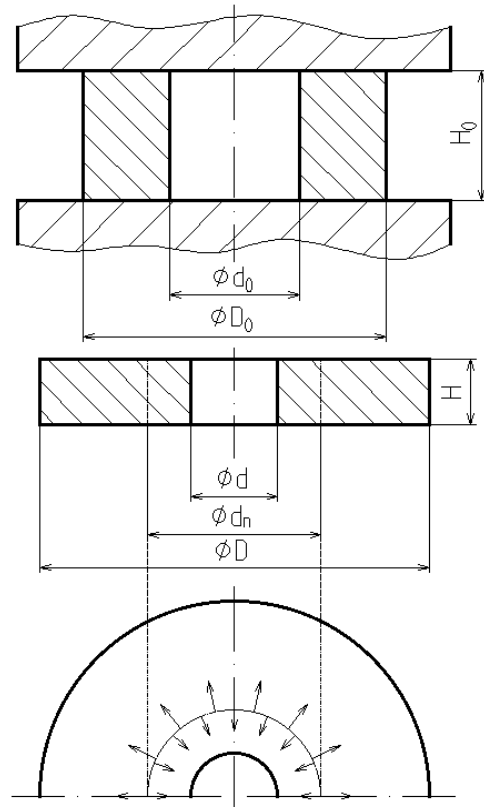


Obr. 24 Povlakované nástroje [46]

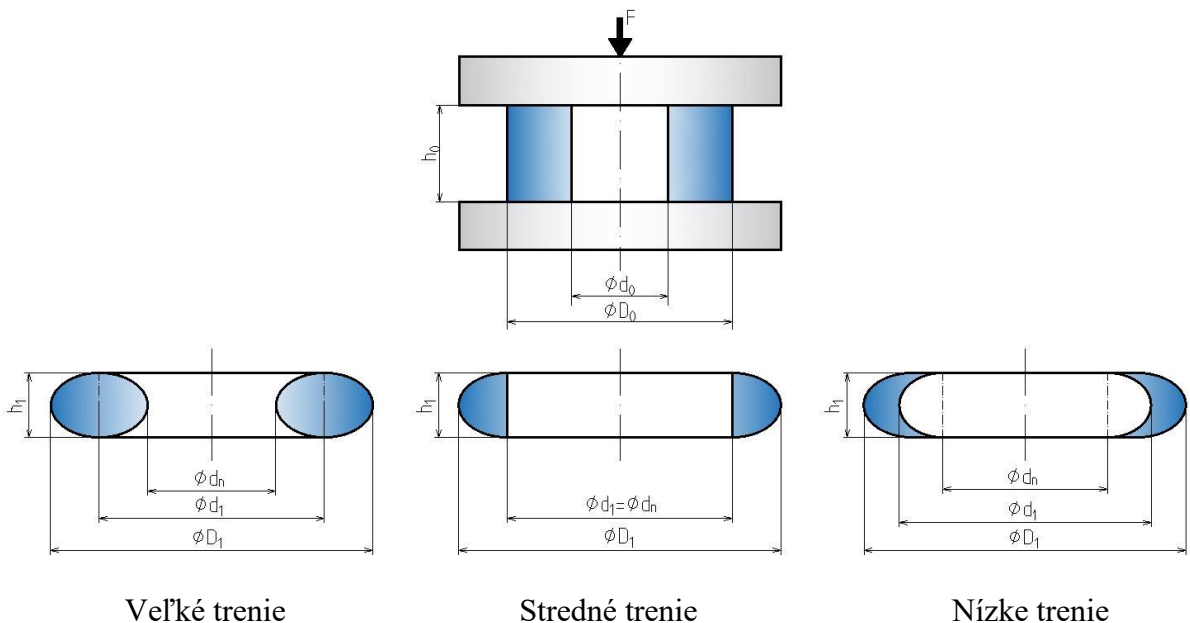
### 2.2.3 Skúšky hodnotenia trenia v tvárnení [10], [49], [50], [52], [53], [54], [55], [56], [62], [64]

Vo vednej disciplíne tribológie existuje veľké množstvo rôznych druhov testov, ktoré pomáhajú predchádzať problémom v praxi a napomáhajú zlepšeniu hospodárnosti pri technologickom procese. Na získanie relevantnej charakteristiky trenia existuje niekoľko experimentálnych metód, pri ktorých sa stanoví koeficient trenia  $\mu$  alebo trecí faktor  $m$ . Aby sa odrazil skutočný proces technológie, skúška by mala zahrňovať vysoký povrchový tlak, značné tečenie materiálu, hrúbku mazacej vrstvy a iné faktory, ktoré ovplyvňujú danú technológiu.

**Skúška pečovania prstenca** je jednoduchou univerzálnou skúškou zistenia koeficienta trenia. Podstata skúšky spočíva vo vyhodnotení súčiniteľa trenia z geometrie napechovaného prstenca štandardných rozmerov. Pre objemové tvárnenie patrí táto skúška k najrozšírenejším a často využívanou metódou. Ak počas pečovania vonkajšia časť kovu tečie v radiálnom smere od osi prstenca a vnútorná časť v smere k ose prstenca ide o veľké trenie kde sa vonkajší priemer zväčšuje a vnútorný sa znižuje. Pri nízkom trení dochádza k tečeniu vnútornej časti kovu smerom od osi. Pri strednom trení kov tečie iba vo vonkajšom smere voľného povrchu. Zobrazenie vplyvu trenia na pechovanej vzorke je zobrazené na obr. 26. Na pechovanom prstenci existuje plocha neutrálnej osi, vid' obr. 25, ktorá sa nachádza medzi oboma pásmami a nemení svoju polohu.



Obr. 25 Pechovanie prstenca [62]



Obr. 26 Deformácia pechovaného prstenca [56]

Priemer neutrálne plochy je v závislosti na veľkosti súčiniteľa trenia a vychádza zo vzťahu:

$$d_n = d_0 \cdot \left(\frac{D_0}{d_0}\right)^{\mu \cdot n} \quad (2.5)$$

kde:  $d_n$  – priemer neutrálnej plochy pechovaného prstenca [mm]

$d_0$  – vnútorný priemer prstenca pred deformáciou [mm]

$D_0$  – vonkajší priemer prstenca pred deformáciou [mm]

$n$  – súčiniteľ brzdzenia [-], ktorý je daný vzťahom:

$$n = \frac{D_0 - d_0}{2 \cdot H_0}$$

Z priemeru neutrálnej plochy a veľkosti deformácie je možné vypočítať vnútorný priemer napechovaného prstenca:

$$d = \sqrt{\frac{d_0^2 - \varepsilon \cdot d_n^2}{1 - \varepsilon}} \quad (2.6)$$

a vonkajší priemer napechovaného prstenca:

$$D = \sqrt{\frac{D_0^2 - \varepsilon \cdot d_n^2}{1 - \varepsilon}} \quad (2.7)$$

Rozmery vzorky prstenca sú dané v pomere  $D_0:d_0:h_0$ , kde doporučené je voliť pomer 6:3:2. Namazaná vzorka prstenca je umiestnená medzi horný a dolný nástroj, kde je spechovaná o predpísanú deformáciu. Po určitom množstve spechovaných vzoriek vo viacerých stupňoch deformácie sa vyhodnocujú namerané dáta tak, že sa odmeria geometria spechovaných vzoriek. Z týchto nameraných dát sa spočítajú pomerné deformácie výšky a vnútorného priemeru vzorky a vynesú sa do príslušného kalibračného diagramu. Každá počiatočná vzorka má vlastný špecifický diagram, podľa ktorého sa určuje súčiniteľ trenia. Ukážka diagramu pre konkrétnu geometriu prstenca je zobrazená na obr. 27. Výhodou tejto skúšky je hlavne to, že nie je potrebné merať tvárniacu silu a pretvárnú rýchlosť.

Výpočet pomerných deformácií:

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100 \quad (2.8)$$

kde:  $\varepsilon_h$  – pomerná deformácia výšky [%]

$h_0$  – počiatočná výška vzorky [mm]

$h_i$  – spechovaná výška vzorky [mm]

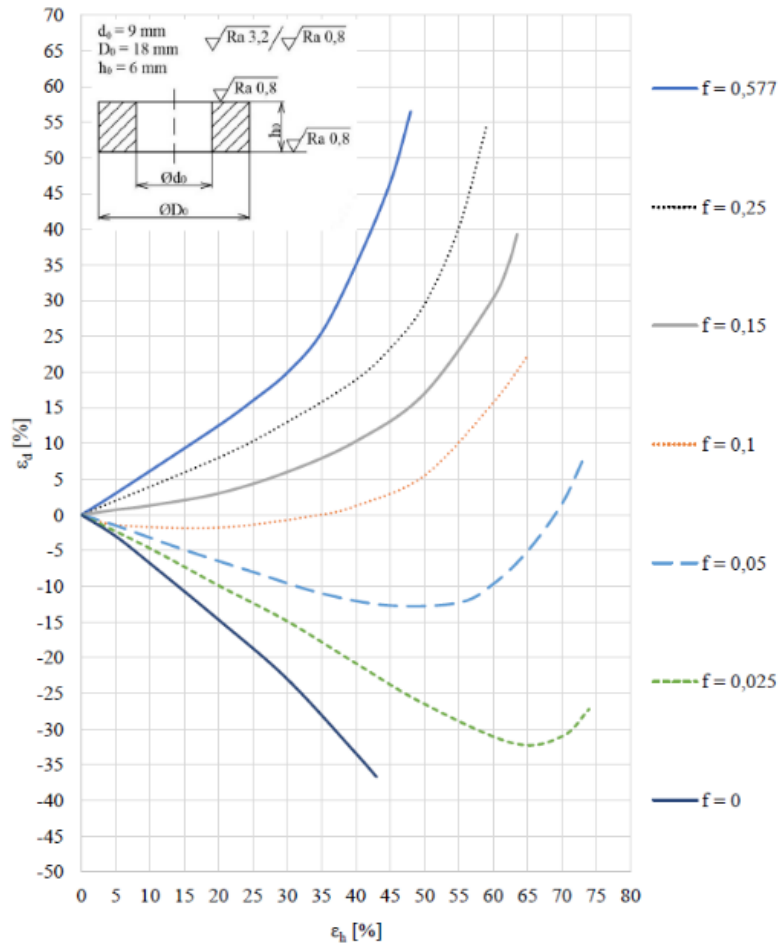
$$\varepsilon_d = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \cdot 100 \quad (2.9)$$

kde:  $\varepsilon_d$  – pomerná deformácia priemeru [%]

$d_0$  – počiatočný priemer vzorky [mm]

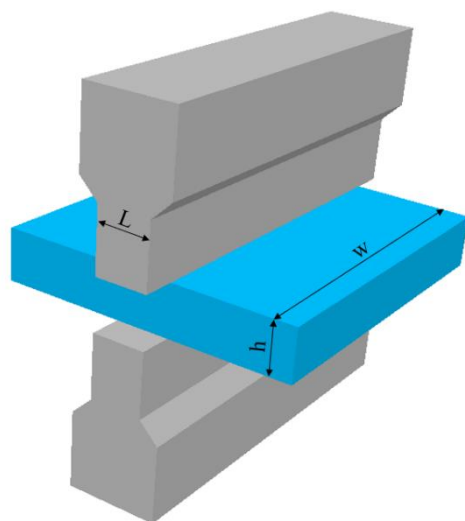
$d_i$  – spechovaný priemer vzorky [mm]





Obr. 27 Kalibračný diagram [56]

**Pechovacia skúška plošného tlaku** je ideálna na testovanie plechov alebo tenkých dosiek. Táto skúška sa používa pre simulovanie operácie valcovania. Schematické zobrazenie testu je znázornené na obr. 28. Pásový materiál je pri skúške stlačený cez šírku medzi dva rovnako široké rovnobežné hranoly, ktoré sú oproti sebe. So zvyšujúcim sa zaťažením na plech, pôsobiace tlakové sily spôsobujú redukciu hrúbky plechu. Táto zmena hrúbky sa meria postupne po každom zaťažení. Pre dosiahnutie rovinného pretvorenia, musia byť hranoly širšie ako skúšobná vzorka. Pre zníženie trenia v kontaktnej ploche môžu byť aplikované rôzne druhy maziva. Materiál pri stláčaní na oboch stranách je vytláčaný okolo ostrých hrán, čím na mazanom vzorku vzniká vplyvom trojosového stavu napätosti vydutie materiálu tzv. pick-up efekt. Vydutie materiálu je rôzne pre nízke a vysoké trenie.



Obr. 28 Skúška plošného tlaku [49]

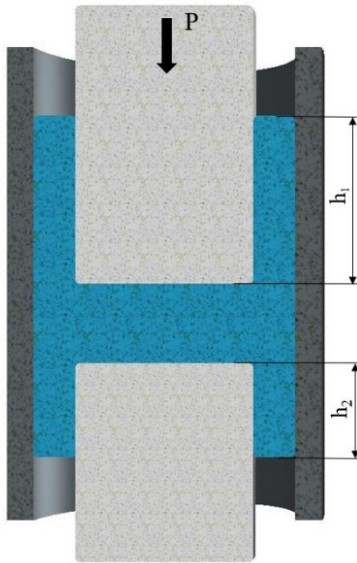
**Skúška kombinovaným namáhaním na krut-tlak** je zobrazená na obr. 30. Pri tejto skúške je na stacionárnom hranole vložená namazaná prstencová vzorka, ktorá je prítlačaná smerom k hranolu a súčasne rotuje s nízkou rýchlosťou. Plastická deformácia s prítlačnou silou sú limitované zrútením vzorku. Skúška testuje mazivá pri rôznych tlakoch a materiáloch. Koeficient trenia medzi rotujúcou vzorkou a nástrojom sa vypočíta:

$$\mu = \frac{T}{P \cdot R} \quad (2.5)$$

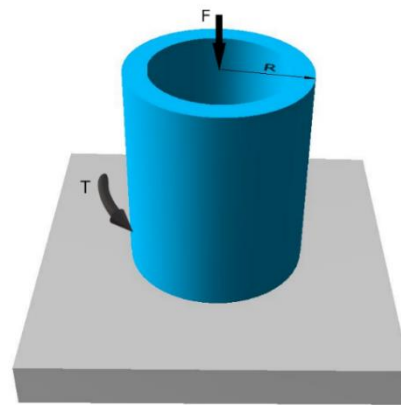
kde:  $T$  – krútiaci moment [Nm]

$P$  – zmeraná normálová sila [N]

$R$  – rameno krútiaceho momentu [mm]



Obr. 29 Skúška združeného pretlačovania [52]



Obr. 30 Skúška kombinovaným namáhaním krut – tlak [53]

Pri **skúške združeného pretlačovania** je spodný ťažník nepohyblivý, zatiaľ čo vrchný sa pohybuje smerom dole a deformuje valcovitý polotovár. Tento polotovár sa pretláča smerom nahor i nadol ako je zobrazené na obr. 29. Koeficient trenia sa určuje pomocou pomerov výšky hornej časti  $h_1$  k výške spodnej časti polotovaru  $h_2$ . Tento pomer  $h_1/h_2$  je citlivý na veľkosť trenia, čím je trenie vyššie, tým sa väčšia časť materiálu pretláča smerom nahor. Táto skúška je určená pre posúdenie trenia v procesoch s vysokými tlakmi a deformáciami.

### 2.3 Rozbor metódy pechovania valca [9], [49], [57], [58], [60], [62]

Metóda pechovania valca patrí medzi jednoduchú operáciu v objemovom tvárnení materiálu, avšak priebeh deformácií je zložitý. Pechovaný polotovár býva vo väčšine prípadov valcovitého tvaru. Pri tejto technológii sa valcová vzorka stlačí medzi dve rovnobežné plochy nástroja a pôsobením tlaku počiatočná vzorka mení svoju geometriu. Dochádza k premiestňovaniu materiálu polotovaru do šírky na úkor jeho výšky a tvárneniu celého objemu. Schéma priebehu technológie tvárnenia je zobrazená na obr. 31.



Veľkosť deformácie sa vyjadruje skutočným (logaritmickým) pretvorením ako pomer počiatkovej a konečnej výšky vzorku:

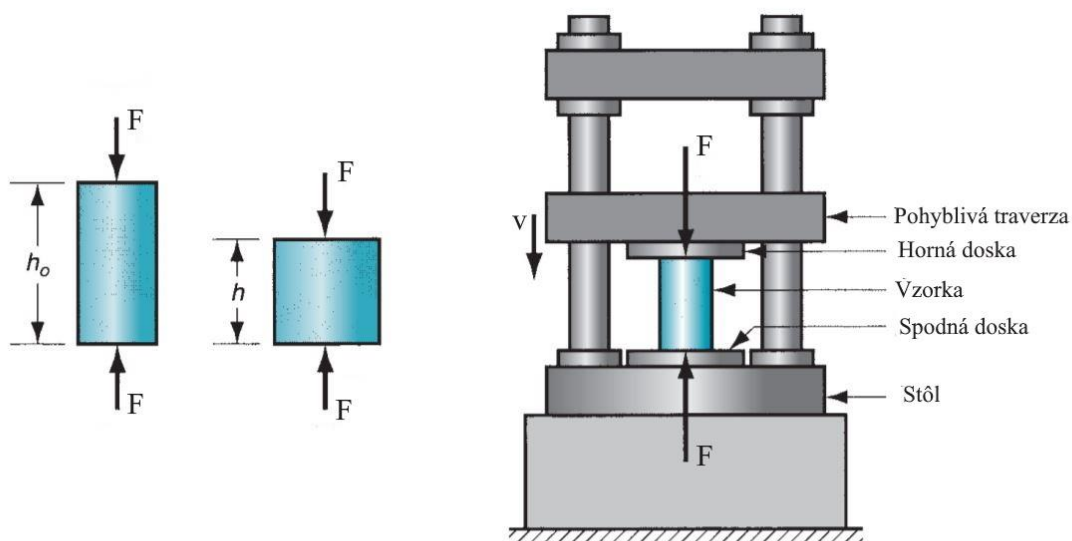
$$\varphi = \ln \frac{h}{h_0} \quad (2.6)$$

kde:  $\varphi$  – logaritmická deformácia [-]

alebo pomernou deformáciou sa vyjadří vzťah:

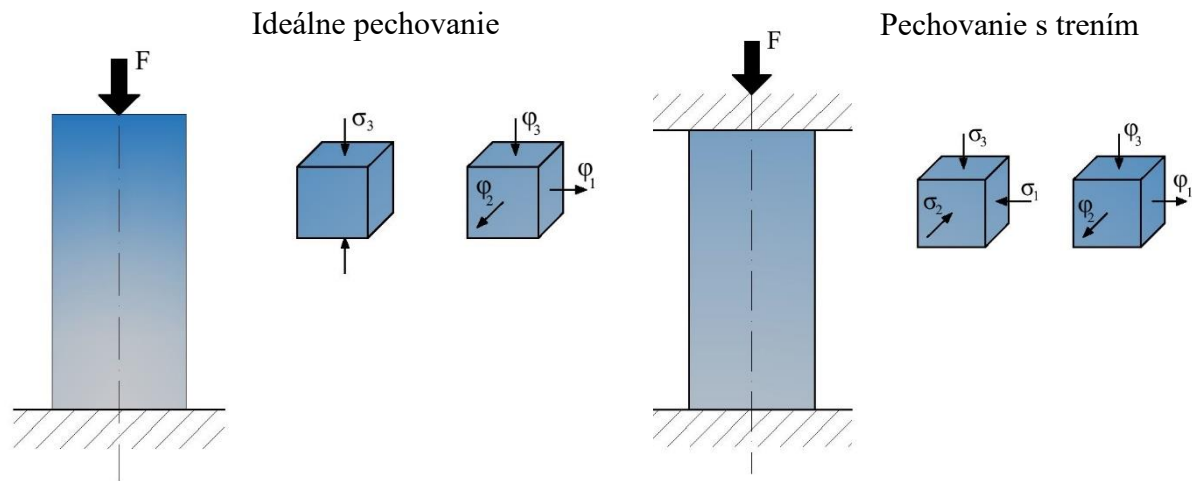
$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (2.7)$$

kde:  $\varepsilon$  – pomerná deformácia [-]



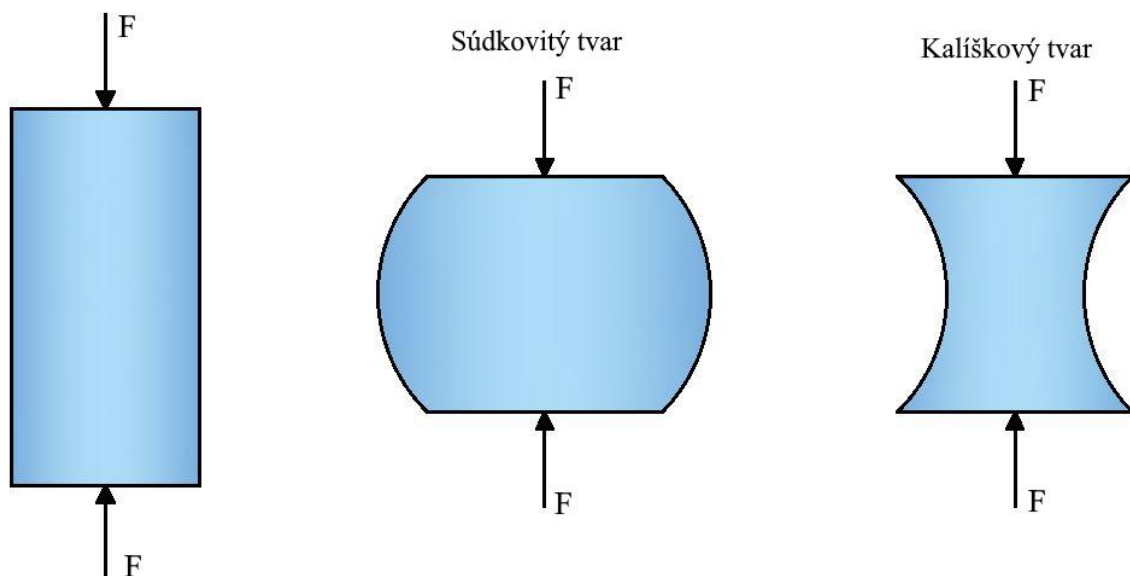
Obr. 31 Pechovanie valca [9]

Pri pechovaní valca za ideálnych podmienok je deformácia valca rovnomerná a nedochádza k súdkovitosti. Je to z dôvodu, že nedochádza k žiadnemu treniu na stykových plochách. Ide o tzv. ideálne pechovanie ako je zobrazené na obr. 32. V tomto prípade na pechovaný valec pôsobí jednoosí tlak. Avšak v praxi sa vonkajšie trenie medzi nástrojom a materiálom vyskytuje. Vonkajšie trenie je vždy sprievodným javom pri pechovaní a je potrebné určiť, či sa uplatňuje ako aktívny alebo ako pasívny činiteľ. Vo všeobecnosti sa pri pechovaní prejavuje ako pasívny činiteľ, čím brzdí rozvoju plastickej deformácie. Trenie zabraňuje rovnomernej deformácie v materiálu a nastáva trojosí stav napätosti ako je zobrazená schéma deformácie na obr. 32.



Obr. 32 Schéma deformácie pri pechovaní [58]

Pri stlačovaní valcovej vzorky má vznikajúce trenie na povrchoch tendenciu brániť šíreniu materiálu na koncoch valca. Ďalšia energia sa spotrebováva vďaka trecím silám, čo vedie k vyššej použitej deformačnej sily. Dôsledkom trenia medzi kontaktnými povrchmi je to, že materiál v blízkosti stredu vzorky sa môže zväčšiť oveľa viac ako na koncoch. Je to z dôvodu, že sa tu uplatňuje zákon najmenšieho odporu. Častice v materiály sa premiestňujú v smere najmenšieho odporu, pretože je to energeticky najvýhodnejšie a snažia sa o vytvorenie tzv. najmenšieho obvodu. Toto má za následok, že vzorka nezostáva valcovitého tvaru ale stáva sa súdkovitou ako je zobrazené na obr. 33. Pokiaľ bude deformácia veľmi rýchla alebo deformačná sila nízka tak sa vytvorí na vzorke kalíškový tvar, vid'. obr. 33. Pri kalíškovom tvare valca deformácia nie je schopná preniknúť dostatočne do hĺbky materiálu. Veľkosť súdkovitého tvaru sa zväčšuje so zvyšovaním trecích síl a znižujúcou sa s výškou vzorky.



Obr. 33 Tvar valca pri pechovaní [60]

Pokiaľ ide o čo najbližšie priblíženie výsledkov z pečovacej skúšky hlavnú úlohu hrá geometria výslednej vzorky, teda súdkovitosť. Na vznik výslednej geometrie valčeka pôsobí veľa faktorov ovplyvňujúce celý proces. Jedným z faktorov je tzv. štíhlostný pomer  $\lambda$ . Ide o faktor, pri ktorom je nebezpečenstvo vybočenia a straty vzpernej stability. Tento pomer by pri pechovaní mal byť  $\lambda \leq 2,5$ . Štíhlostný pomer sa vypočíta podľa vzorca:

$$\lambda = \frac{h_0}{d_0} \quad (2.8)$$

kde:  $\lambda$  – štíhlostný pomer [-]

Hodnotu súdkovitosti pri nerovnomernej deformácii v pechovanom objeme je možné vyjadriť ako pomer objemu súdkovitej časti k celkovému objemu pechovanej vzorky:

$$C = \frac{V_s}{V_c} \cdot 100 \quad (2.9)$$

kde:  $C$  – koeficient súdkovitosti [%]

$V_s$  – objem súdkovitej časti [ $\text{mm}^3$ ]

$V_c$  – celkový objem napechované polotovaru [ $\text{mm}^3$ ]

Stupeň súdkovitosti závisí taktiež na veľkosti trenia na stykových plochách medzi nástrojom a pechovaným materiálom. Z odmerania minimálneho a maximálneho priemeru spechovanej vzorky je možné určiť veľkosť koeficienta trenia podľa vzťahu:

$$\mu = 1 - \frac{D_{min}^2}{D_{max}^2} \quad (2.10)$$

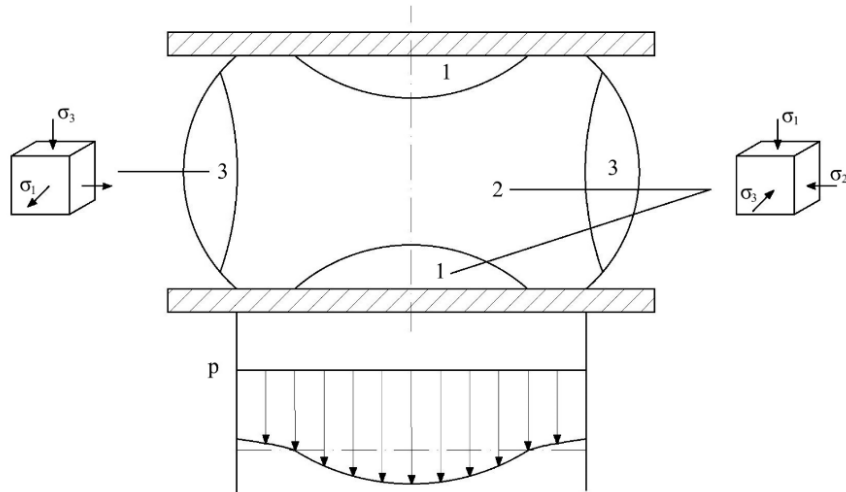
kde:  $D_{min}$  – najmenší priemer valca [mm]

$D_{max}$  – najväčší priemer valca [mm]

Medzi ďalšie ovplyvňujúce faktory patrí chemické zloženie, štruktúra kovov, povrch čela, rýchlosť deformácie, teplota, mazivá, atď. Všetky tieto pôsobiace činitele určujú ako sa bude meniť súdkovitý tvar valčeka počas procesu pečovania.

Počas pečovania s trením vo valci dochádza k rozloženiu nehomogénnej plastickej deformácii, ktorá sa rozdeľuje do troch zón, ako je zobrazené na obr. 34:

- Oblasť 1 je pásmo zabrzdzenia deformácií, nachádza sa pri styku nástroja s materiálom. Je to oblasť, kde deformácia je najmenšia pretože trecie sily na stykovej ploche sú najsilnejšie a dochádza tam k brzdeniu toku materiálu, čiže deformácia je tam najmenšia. Smerom do vnútra materiálu sú trecie sily slabšie.
- Oblasť 2 je pásmo maximálnych deformácií, kde deformácia je najväčšia v oboch smeroch, v axiálnom i radiálnom smere a taktiež šmykové napätia dosahujú najvyšších hodnôt.
- Oblasť 3 je stredné pásmo stagnácie kde vznikajú tangenciálne ťahové napätia, ktoré rastú smerom k bočnému povrchu valca. Ťahové napätie prispieva k súdkovitosti pechovaného polotovaru.



Obr. 34 Pásma pechovaného valca [57]

V priemere pechovaného polotovaru sa rozloženie napätia mení. V ose valca je napätie maximálne a smerom k okrajom napätia klesá. Veľkosť deformačného odporu sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{D_0}{H_0}\right) \quad (2.11)$$

kde:  $\sigma_p$  – prirodzený pretvárný odpor [MPa]

$\sigma_d$  – deformačný odpor [MPa]

### 3 EXPERIMENT

V nasledujúcej časti práce bude popísaný experiment vedúci k posúdeniu vhodnosti pechovacej skúšky pre určenie koeficientu trenia pri tvárniacich procesoch. V rešeršnej časti práce boli popísané metódy slúžiace pre určenie tohto koeficientu, z ktorých bola vybraná pechovacia skúška vďaka jej nízkej náročnosti. Výsledky experimentu budú spracované z namazaných a z nenamazaných vzoriek, kde sa bude pozorovať vplyv mazania na proces.

#### 3.1 Príprava experimentu [51], [61]

Pre testovanie bol zvolený oceľový materiál značený podľa ČSN 11 500. Ide o bežne používaný nelegovanú uhlíkovú oceľ a jej chemické zloženie je uvedené v tabuľke 2. Čiastočne lisovateľná oceľ, vhodná na strojné súčasti namáhané staticky i dynamicky.

Tab. 2 Chemické zloženie ocele [51]

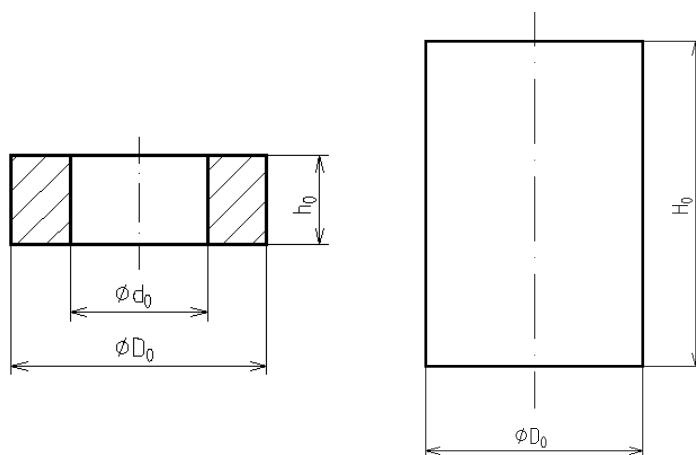
Materiál ČSN 11 500				
Chemické zloženie	Uhlík – C [%]	Fosfor – P [%]	Síra – S [%]	Dusík – N [%]
	max 0,38	max 0,045	max 0,045	max 0,009

Mechanické vlastnosti oceli pred tepelným spracovaním sú zhrnuté v tabuľke 3.

Tab. 3 Mechanické vlastnosti ocele [51]

Materiál ČSN 11 500			
Mechanické vlastnosti	Pevnosť v ťahu $R_m$ [MPa]	Medza klzu $R_e$ [MPa]	HB [-]
	470 – 610	275	max 268

Pre experiment boli zvolené dva typy vzoriek, valcové a prstencové. Boli zhotovené z valcovanej tyče na sústruhu a plochy, ktoré budú v kontakte s tvárniacim nástrojom boli brúsené a prípadné defekty boli ručne vyleštené, tak aby bola docielená konzistentná kvalita povrchu. Otvory v prstencoch boli zhotovené vŕtaním na sústruhu, kde došlo k miernemu vyoseniu otvoru, čo môže mať vplyv na výsledky experimentu. Pre experimentálnu skúšku sa vyrobilo tridsať vzoriek valčekov a osemnásť vzoriek prstencov. Geometria vzoriek pred pechovaním je zobrazená na obr. 35.



Obr. 35 Geometria počiatkových vzoriek

Počiatkové rozmery prstencových vzoriek sú volené podľa kalibračného diagramu, ktorý bude slúžiť k zisteniu koeficientu trenia po skúške. Zvolené rozmery sú uvedené v tabuľke 4 a 5.

Tab. 4 Počiatkové rozmery vzorky valca

Rozmery valca			
Parameter	Označenie	Veľkosť	Jednotka
Počiatkový priemer vzorku	$D_0$	20	[mm]
Počiatková výška vzorku	$H_0$	30	[mm]

Tab. 5 Počiatkové rozmery vzorky prstenca

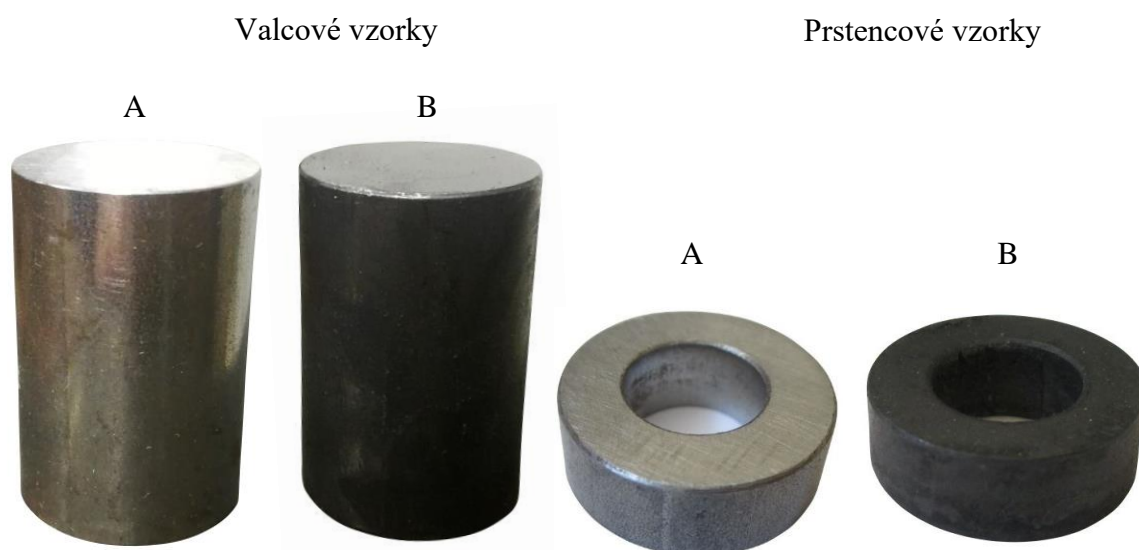
Rozmery prstenca			
Parameter	Označenie	Veľkosť	Jednotka
Počiatkový vonkajší priemer vzorky	$D_0$	19,5	[mm]
Počiatkový vnútorný priemer vzorky	$d_0$	10,5	[mm]
Počiatková výška vzorky	$h_0$	6,8	[mm]

Experiment bol realizovaný pre dva tvárniace režimy, jeden s mazaním a druhý bez mazania. Pre namazané vzorky bolo použité mazivo Delta 144. Ide o mazivo na báze grafitu s prísadou kysličníku kademnatého. Toto mazivo by malo znížiť koeficient trenia pri tvárniacom procese.

Pri nanášaní maziva sa postupovalo takto:

- vzorky boli očistené a odmastené,
- mazivo bolo nanášané ponorom vzorky do kúpeľa,
- následne boli vzorky vybraté a mazivo sa nechalo zaschnúť.

Takto pripravené vzorky sú zobrazená na obr. 36, kde vzorky s označením A nie sú namazané a vzorky s označením B majú na sebe vrstvu grafitového maziva.



Obr. 36 Pripravené vzorky pred pechovaním

Pre určenie ako budú vzorky deformované sa zvolili stupne deformácie, na ktoré budú vzorky spechované. Pre skúšobné vzorky geometrie valca sa volila deformácia o 20 %, 30 %, 40 %, 50 % a 60 %. Pre vzorky s geometriou prstenca to bola deformácia o 20 %, 30 % a 40 %. Vzťah pre stanovenie veľkosti deformácie je:

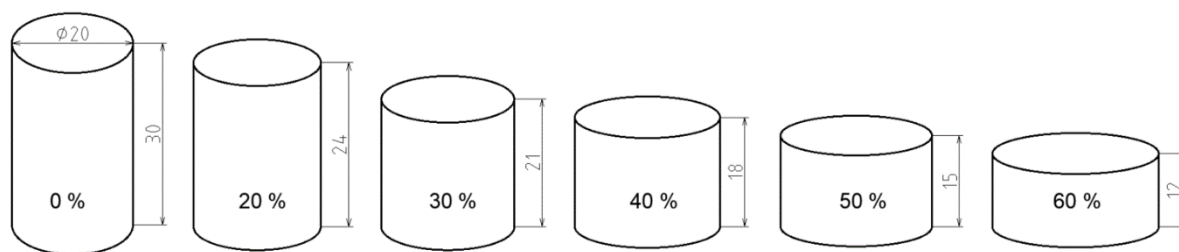
$$R = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100 = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \cdot 100 \quad (3.1)$$

kde: R – veľkosť deformácie [%]

Z tohoto vzťahu (3.1) bola vypočítaná konečná výška, na ktorú boli vzorky pechované. Dosadené hodnoty pre vzorový výpočet konečnej výšky bol pre valcovú vzorku 1 nenamazanú:

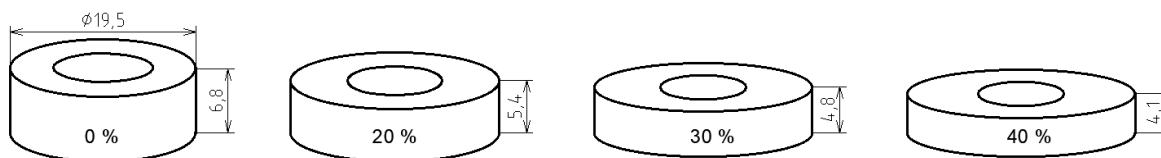
$$H_1 = H_0 - \frac{R \cdot H_0}{100} = 30 - \frac{20 \cdot 30}{100} = 24 \text{ mm}$$

Po dosadení hodnôt pre všetky zvolené deformácie vyšli jednotlivé výšky pre valcové vzorky. Hodnoty týchto výšiek sú zobrazené na obr. 37.



Obr. 37 Konečné výšky valcov

Taktiež boli počítané konečné výšky pre vzorky prstencov. Veľkosť týchto výšok je zobrazená na obr. 38.



Obr. 38 Konečná výšky prstencov

### 3.2 Priebeh experimentu

Experiment prebiehal pri izbovej teplote a realizoval sa na hydraulickom lise CZR 600, o sile 6000 kN. Lis je zobrazený na obr. 39. Priemer spodnej upínacej dosky je 345 mm a vrchnej 350 mm. Ďalšie technické parametre lisu sú popísané v tabuľke 6.

Pri tomto experimente bol použitý nástroj, vid'. obr. 40, do ktorého sa vkladajú skúšobné vzorky. Nástroj slúži pre pechovanie vzoriek za studena i za tepla. Tento nástroj je zložený z pohyblivej a z pevnej časti. Pevná časť nástroja slúži ako základňa, do ktorej sa vloží vzorka, ktorá je pomocou dvoch oceľových tyčiek vycentrovaná. Tieto tyčky sa nachádzajú v spodnej časti nástroja na pozícii 3. Vložená vzorka v nástroji sa uzavrie pohyblivou časťou nástroja, tlačníkom. Tlačník je priamo v kontakte so vzorkou. Takto zložený nástroj je vložený do pracovného priestoru lisu, zobrazený na pozícii 1, kde sa uskutoční vlastný



experiment. Baran lisu pomaly schádza dole a dochádza k deformácii vzorky. K zaisteniu požadovanej veľkosti deformácie bol využitý doraz, ktorý je zobrazený na pozícii 2. Po kontakte barana s dorazom došlo k zastaveniu lisu. Nástroj sa odľahčil, vzorka sa vybrala a bola nahradená ďalšou pripravenou vzorkou, pri ktorej sa tento proces opakoval.

Tab. 6 Parametre lisu

Parameter	Hodnota	Jednotka
Sila	6000	[kN]
Spätná sila	120	[kN]
Zdvih	125	[mm]
Rozmery (d x š x v)	1600 x 1800 x 1980	[mm]



3 – tyče na centrovanie  
Obr. 40 Nástroj pre lis



1 – nástroj, 2 - doraz  
Obr. 39 Hydraulický lis CZR 600

### 3.3 Vyhodnotenie experimentu

Počas pečovania sa postupne aplikoval rôzny stupeň deformácie na jednotlivé polotovary. Po spechovaní všetkých vzoriek bol experiment vyhodnocovaný na základe zmeny ich výslednej geometrie. Vzorky boli merané použitím posuvného meradla značky Proteco s parametrami 0 – 150 mm x 0,1 mm. Meranie prebiehalo na viacerých úsekoch ako výšky, tak i priemeru z dôvodu presnejšieho overenia, nakoľko počas pečovania došlo k deformácii geometrie vzoriek. Z týchto odmeraných hodnôt sa následne vypočítal ich priemer, ktorý je braný ako výsledná hodnota.

Výsledné už zdeformované vzorky prstencov nenamazaných sú zobrazené na obr. 41 a s vrstvou maziva sú zobrazené na obr. 42. Vzorka s číslom 1 je zdeformovaná o 20 %, s číslom 4 o 30 % a s číslom 7 o 40 %. Parametre všetkých prstencov sú uvedené postupne v tabuľkách 8 – 10.



Obr. 41 Nenamazané pechované vzorky prstencov





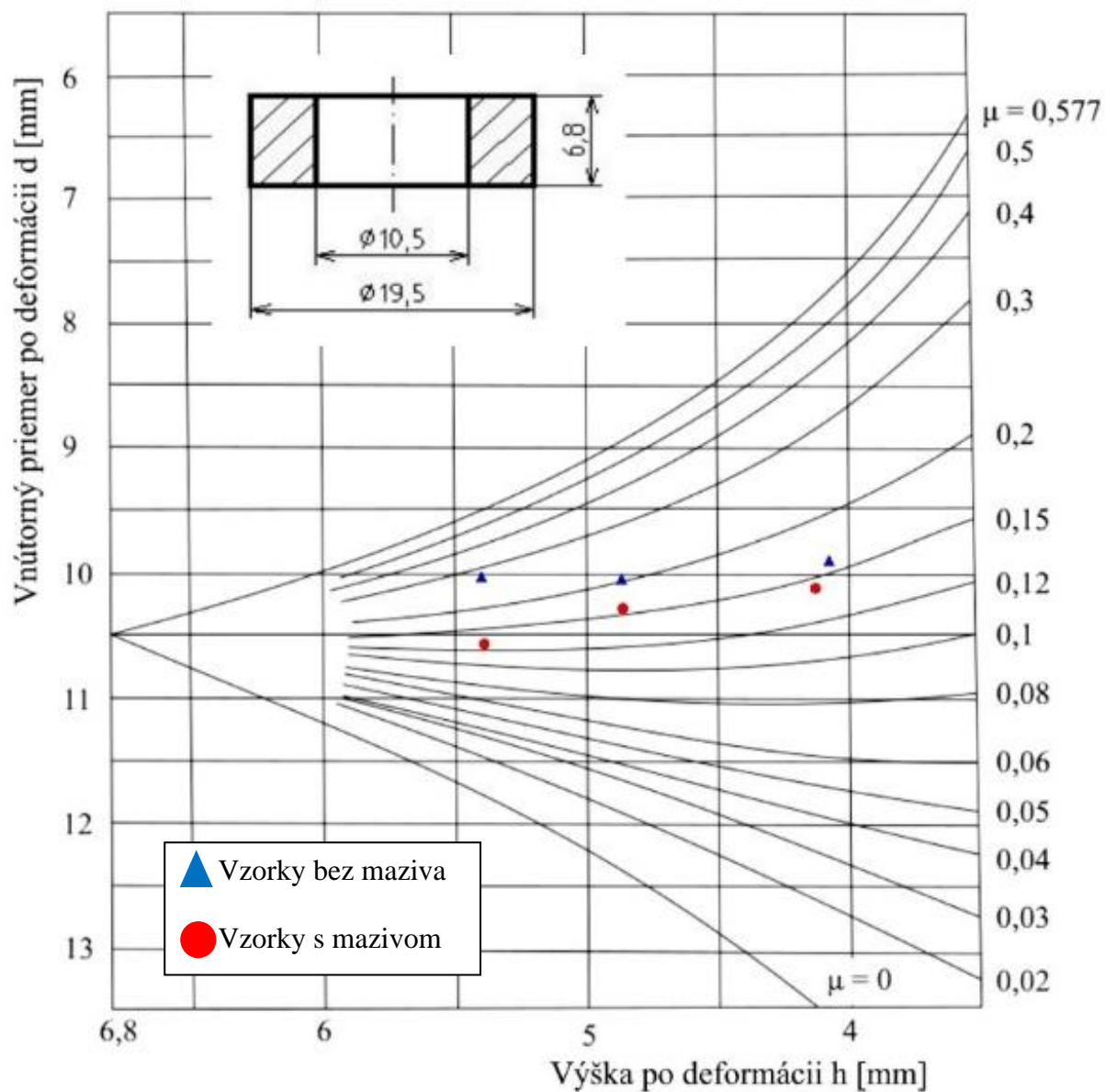
Obr. 42 Namazané spechované vzorky

Parametre všetkých prstencov sú uvedené v tabuľke 7. Pechovali sa pre každú deformáciu tri vzorky. Z týchto parametrov sa následne podľa kalibračných diagramov určí referenčná hodnota koeficienta trenia. Pre každú skupinu vzoriek bol zvlášť vykreslený kalibračný diagram 1 – 3 a ku každému diagramu priradená tabuľka 8 – 9 s hodnotou koeficientu trenia.

Tab. 7 Parametre prstencov

Redukcia	Vzorka	Bez maziva			S mazivom		
		H [mm]	$d_i$ [mm]	$D_i$ [mm]	H [mm]	$d_i$ [mm]	$D_i$ [mm]
20 % H = 5,4 mm	1	5,34	10,44	21,98	5,37	10,73	21,80
30 % H = 4,8 mm	4	4,79	9,78	22,84	4,84	10,55	22,51
40 % H = 4,1 mm	7	4,05	9,24	24,58	4,17	10,30	23,90
20 % H = 5,4 mm	2	5,40	10,03	21,84	5,39	10,55	21,30
30 % H = 4,8 mm	5	4,86	10,04	22,92	4,86	10,27	22,50
40 % H = 4,1 mm	8	4,07	9,90	24,29	4,13	10,11	23,98
20 % H = 5,4 mm	3	5,38	9,97	22,99	5,39	10,48	21,78
30 % H = 4,8 mm	6	4,82	9,81	22,77	4,91	10,43	22,52
40 % H = 4,1 mm	9	4,08	9,40	24,30	4,05	10,34	24,21

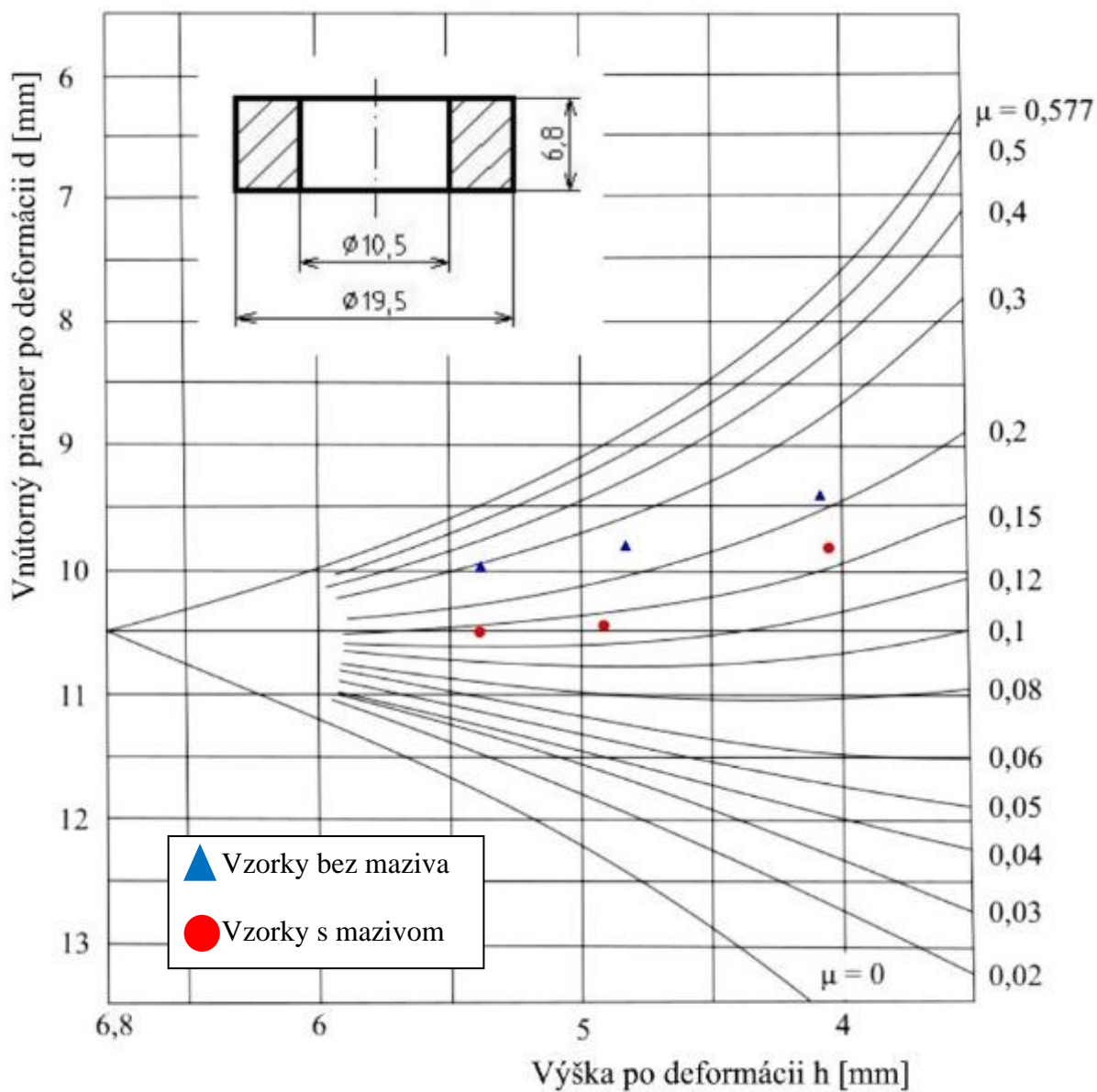




Obr. 44 Kalibračný diagram pre druhú skupinu vzoriek V2

Tab. 9 Koeficient trenia pre druhú skupinu vzoriek V2

		Bez maziva	S mazivom
Redukcia	Vzorka	μ [-]	μ [-]
20 %	2	0,273	0,123
30 %	5	0,205	0,159
40 %	8	0,159	0,143



Obr. 45 Kalibračný diagram pre tretiu skupinu vzoriek V3

Tab. 10 Koeficient trenia pre tretiu skupinu vzoriek V3

Redukcia	Vzorka	Bez maziva	S mazivom
		$\mu$ [-]	$\mu$ [-]
20 %	3	0,288	0,139
30 %	6	0,248	0,137
40 %	9	0,216	0,166

Pri nameraných dátach pechovania prstenca sa koeficient trenia pre nenamazané vzorky pohybuje v intervale  $\mu = 0,144 - 0,288$  a pre vzorky namazané je hodnota intervalu koeficientu trenia  $\mu = 0,100 - 0,166$ . Tým pádom použitie maziva pri tvárnení znižuje koeficient trenia. Ďalej z experimentu vyplýva, že najväčšiu stabilitu výsledkov a tým najmenší rozptyl hodnôt vykazuje veľkosť deformácie 30 %. Pri tejto veľkosti deformácie sa koeficient trenia nenamazaných vzoriek pohybuje v intervale  $\mu = 0,205 - 0,250$  a pri vzorkách namazaných  $\mu = 0,121 - 0,159$ . Túto veľkosť deformácie je možné odporučiť pre praktické využitie a bude taktiež považovaná za referenčnú hodnotu pre vyhodnotenie pechovania valca.

Namerané parametre valcových vzoriek sú uvedené v tabuľke 11 pre vzorky bez maziva a v tabuľke 12 pre vzorky namazané. Ukážka niektorých zdeformovaných vzoriek pre jednu skupinu nenamazaných vzoriek je na obr. 46 a pre namazané vzorky sú zobrazené na obr. 47. Vzorky sú zobrazené vzostupne od veľkosti deformácie o 20 %, čo predstavuje vzorku číslo 1 až po redukciu 60 % čo predstavuje vzorku 13. Na ukážke vzoriek, je možné pozorovať zmenu výšky počas pechovania ale taktiež ako sa menil priemer a zväčšovala sa súdkovitosť s narastajúcou veľkosťou deformácie.

Tab. 11 Parametre pre vzorky bez maziva

Nenamazané valcové vzorky				
Veľkosť deformácie	Vzorka	H <sub>i</sub> [mm]	D <sub>min</sub> [mm]	D <sub>max</sub> [mm]
Redukcia 20 % H = 24 mm	1	24,36	21,31	22,59
	2	24,40	21,33	22,62
	3	24,38	21,33	22,61
Redukcia 30 % H = 21 mm	4	21,26	22,67	24,33
	5	21,25	22,66	24,33
	6	21,25	22,57	24,41
Redukcia 40 % H = 18 mm	7	18,17	24,47	26,23
	8	18,16	24,27	26,40
	9	18,13	24,15	26,49
Redukcia 50 % H = 15 mm	10	15,20	26,26	28,92
	11	15,21	26,10	28,97
	12	15,21	25,97	29,02
Redukcia 60 % H = 12 mm	13	12,20	29,28	32,29
	14	12,15	29,29	32,35
	15	12,12	29,19	32,42



Obr. 46 Spechované nenamazané valcové vzorky



Obr. 47 Spechované namazané valcové vzorky

Tab. 12 Parametre pre vzorky s mazivom

Namazané valcové vzorky				
Veľkosť deformácie	Vzorka	H [mm]	D <sub>min</sub> [mm]	D <sub>max</sub> [mm]
Redukcia 20 % H = 24 mm	1	24,37	21,63	22,39
	2	24,38	21,43	22,45
	3	24,37	21,46	22,51
Redukcia 30 % H = 21 mm	4	21,51	22,66	24,11
	5	21,34	22,70	24,25
	6	21,31	22,93	24,11
Redukcia 40 % H = 18 mm	7	18,50	24,35	26,09
	8	18,18	24,33	26,42
	9	18,18	24,36	26,39
Redukcia 50 % H = 15 mm	10	15,54	26,33	28,49
	11	15,33	26,49	28,65
	12	15,23	26,34	28,79
Redukcia 60 % H = 12 mm	13	12,28	29,59	32,08
	14	12,21	29,70	32,16
	15	12,22	29,77	32,17

Z konečných nameraných hodnôt, ktoré boli dosiahnuté pri pechovaní valcov sa vyhodnocuje koeficient trenia pre každú valcovú vzorku na základe vzorca (2.10). Takto vypočítané hodnoty koeficientu trenia sú uvedené v tabuľke 11. Vzorová ukážka výpočtu je pre vzorku 1 bez použitia maziva:

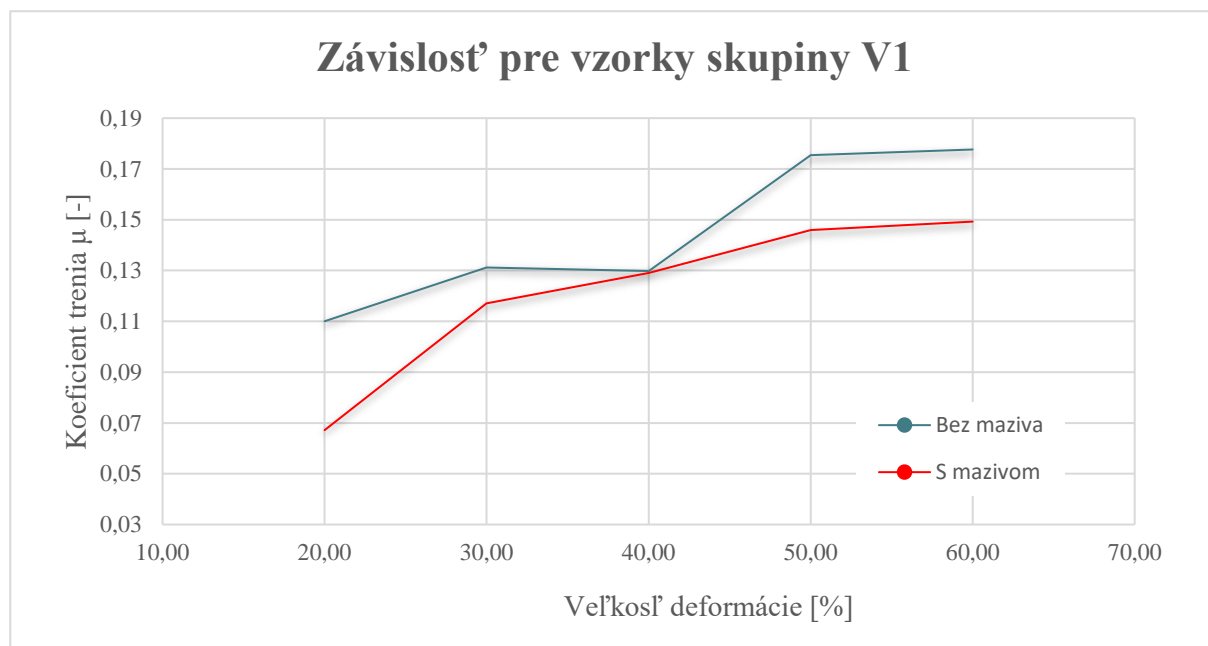
$$\mu = 1 - \frac{D_{min}^2}{D_{max}^2} = 1 - \frac{21,31^2}{22,59^2} = 0,110$$

Z hodnôt koeficientu trenia boli vykreslené grafy 1 – 3. Ide o priebeh zmeny koeficientu trenia v závislosti na zmene veľkosti deformácie pre vzorky s mazivom a bez maziva.

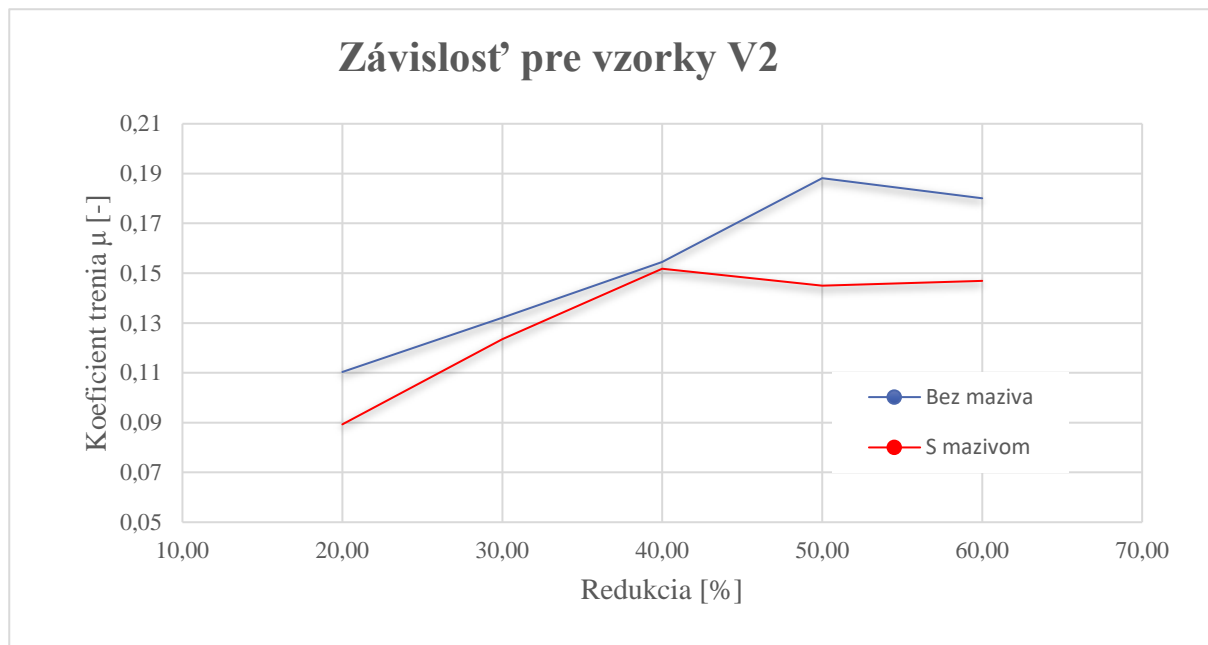
Tab. 13 Hodnoty vypočítaných koeficientov trenia

	Bez maziva	Namazané	Bez maziva	Namazané	Bez maziva	Namazané
	Vzorky V1		Vzorky V2		Vzorky V3	
Redukcia	$\mu$ [-]	$\mu$ [-]	$\mu$ [-]	$\mu$ [-]	$\mu$ [-]	$\mu$ [-]
20 %	0,110	0,067	0,110	0,089	0,110	0,091
30 %	0,131	0,117	0,132	0,124	0,145	0,096
40 %	0,130	0,129	0,155	0,152	0,169	0,148
50 %	0,175	0,146	0,188	0,145	0,199	0,163
60 %	0,178	0,149	0,180	0,147	0,189	0,143

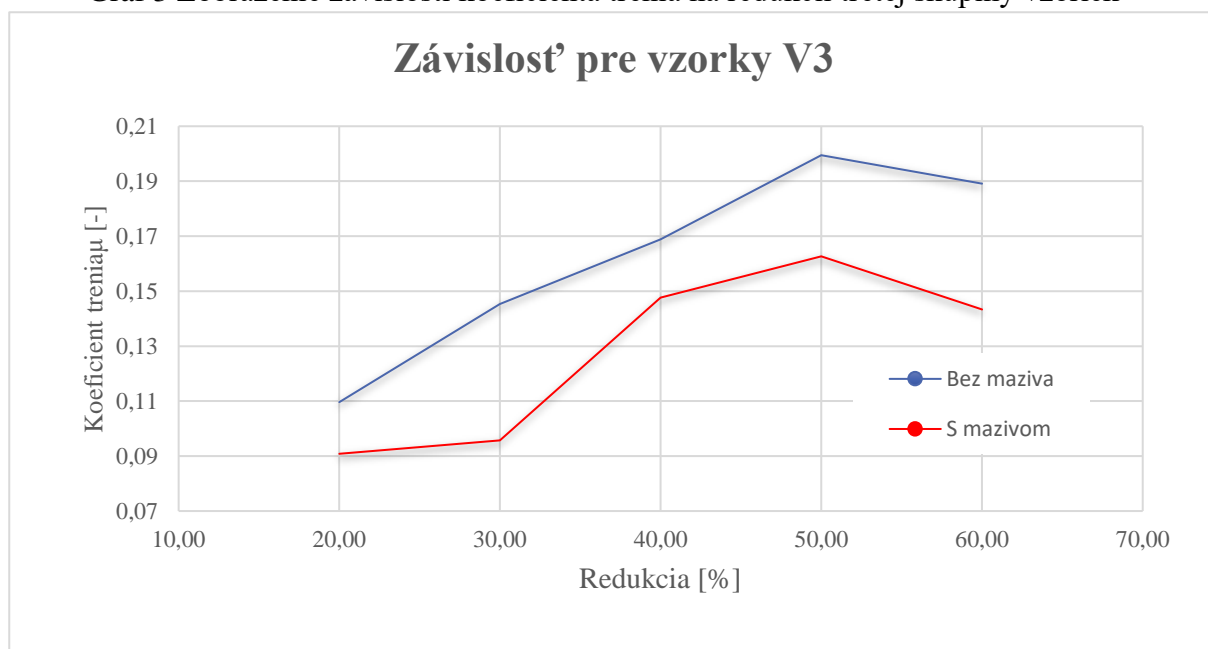
Graf 1 Zobrazenie závislosti koeficienta trenia na redukcii prvej skupiny vzoriek



Graf 2 Zobrazenie závislosti koeficienta trenia na redukcii druhej skupiny vzoriek



Graf 3 Zobrazenie závislosti koeficienta trenia na redukcii tretej skupiny vzoriek



Z experimentálnej časti pečovania valcových vzoriek je výsledná hodnota koeficientu trenia pre nenamazané vzorky v rozmedzí  $\mu = 0,110 - 0,199$  a pri namazaných vzorkách to je  $\mu = 0,067 - 0,149$ . Je zrejmé, že aj v tomto prípade bol preukázaný pozitívny vplyv maziva pre zníženie trenia.

Podľa zobrazenia v grafoch je zrejmé, že stanovená hodnota koeficientu trenia so zvyšujúcou veľkosťou deformácie narastá až do veľkosti 50 % a pri vyšších deformáciách sa už prakticky nemení. Pri tejto veľkosti deformácie sú hodnoty koeficienta trenia



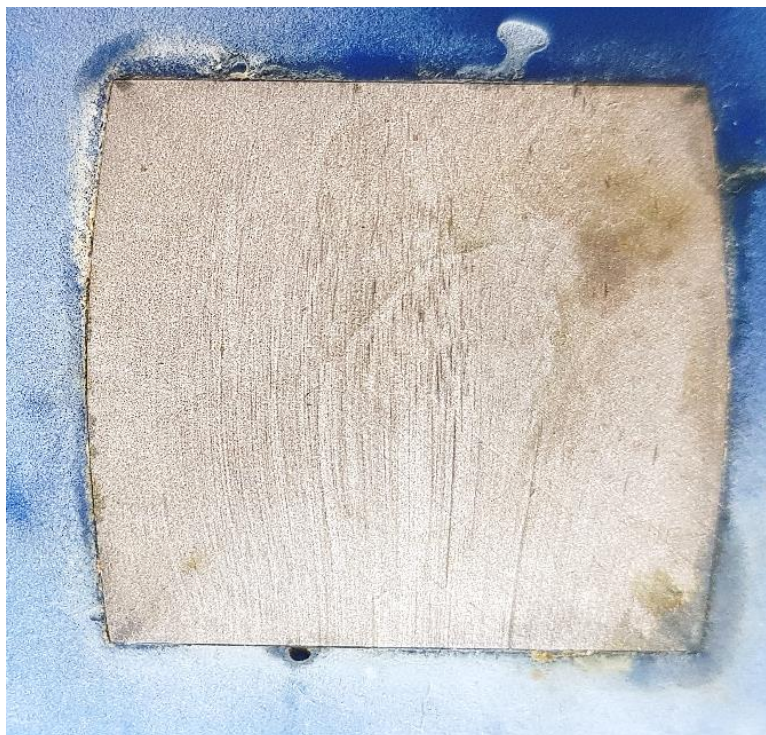
pre nenamazané vzorky  $\mu = 0,175 - 0,199$  a pre namazane vzorky  $\mu = 0,145 - 0,163$ . Tieto výsledné hodnoty sa najviac približujú referenčným hodnotám pechovaného prstenca. Hlavné hodnoty pri mazaných vzorkách sa líšia celkovo málo. Pri nenamazaných vzorkách je rozdiel vyšší, čo môže byť pravdepodobne zapríčinené horšou drsnosťou čiel valcov, pričom sa pri ručnom doleštení väčšej valcovej plochy nedosiahlo tej istej kvality ako u podstatne menšej plochy prstencov. Použitím konzistentného maziva sa tento rozdiel drsnosti povrchu eliminoval.

### 3.2.1 Makroštruktúra spechovaných vzoriek

Pre zistenie ako vo vzorkách dochádza k toku materiálu bolo vybraných niekoľko kusov, na ktorých bola urobená skúška makroštruktúry. Boli vybrané vzorky o veľkosti deformácii 30 %, 40 % a 50 %. Všetky vzorky boli nenamazané, kde by zmeny mali byť lepšie viditeľné. Použité boli valce i prstence.

Vzorky boli rozrezané na metalografickej píle v ose a následne zaliate do živice kvôli jednoduchšej manipulácii. Po vybrúsení boli leptané v roztoku kyseliny chlorovodíkovej s peroxidom vodíku a vodou v pomere 5:1:5. Týmto spôsobom sa štruktúru nepodarilo vyvolať. Ďalej bolo pridané väčšie množstvo peroxidu vodíka pre urýchlenie reakcie avšak ani týmto postupom nebolo docielené vyvolanie štruktúry. Poslednou variantou bolo vyvarenie vzorky v samotnej kyseline chlorovodíkovej, kde sa vzorky umiestnili do kyseliny a následne krátku dobu povarili. Tento veľmi agresívny roztok už dokázal naleptať materiál a zvýrazniť jednotlivé vlákna.

Na obrázku 48 je vidieť mierne vybočenie vlákien materiálu z priameho smeru, ktorý bol vytvorený pri výrobe polotovaru. Je tu možnosť pozorovať, že pri stredových vláknach k vyoseniu nedochádza a ďalej od stredu sa vlákna postupne deformujú v smere kolmom na pôsobenie lisu.



Obr. 48 Makroštruktúra pechovaného valca na 30 % deformácie

Pri ďalšej vzorke bola veľkosť deformácie o 50 %, vid'. obr. 49, čo už vlákna zdeformovalo podstatne viac. Je tu možné pozorovať výrazné tečenie materiálu v smere kolmom na smer pôsobenia lisu. Ďalej je možné pozorovať, že pri stykových plochách je smer vlákien menej vychýlení ako v stredovej časti vzorky. Čo je spôsobené práve vplyvom trenia, kde dochádza na stykových plochách k brzdeniu materiálu.



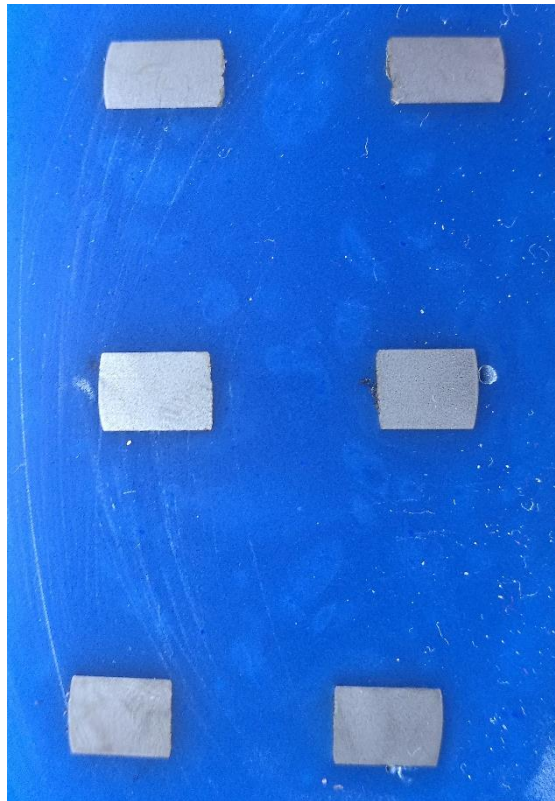
Obr. 49 Makroštruktúra pechovaného valca na 50 % deformácie

Pri ďalšej vzorke s deformáciou o 60 %, vid' obr. 50 sa nepodarilo plochu dokonale naleptať a vrstvy sú horšie viditeľné, aj napriek tomu je možné pozorovať výrazný pohyb materiálu v kolmom smere na pôsobenie tvárniacej sily.



Obr. 50 Makroštruktúra pechovaného valca na 60 % deformácie

Prstencové vzorky sa nepodarilo naleptať tak, aby sa vrstvy zviditeľnili, vid' obr. 51. Pre vyvolanie makroštruktúry prstencov by muselo byť použité iné leptadlo, ktoré však nebolo k dispozícii.



Obr. 51 Povrch prstencov po zleptaní

## 4 METODIKA STANOVENIA KOEFICIENTU TREZIA

Na základe vykonaného experimentu pre stanovenie koeficientu trenia pre pechovaciú skúšku bola stanovená jeho metodika:

### 1. Príprava vzoriek pred samotnou skúškou

- pre prstencové vzorky sa volí normalizovaná geometria podľa kalibračného diagramu, u valcových vzoriek je vhodné zachovať potrebný štíhlostný pomer  $\lambda \leq 2,5$ , aby nedošlo ku strate vzpernej stability vid'. vzorec (2.8):

$$\lambda = h_0/d_0$$

- dôležitá je úprava plôch, ktoré budú v kontakte s nástrojom - brúsením a leštením na požadovanú drsnosť  $R_a = 0,4$
- v prípade použitia maziva sa vyberie vhodné mazivo a nanesie podľa odporúčania od výrobcu

### 2. Prevedenie experimentu

- pri pechovaní prstenca použiť veľkosti deformácie 30 %, pretože pri nižších deformáciách je výsledok nepriaznivo ovplyvnený počiatkom plastickej deformácie
- pri skúške pechovania valca zvoliť veľkosť deformácie 50 %
- jednotlivé vzorky sa budú tvárniť na požadovanú redukciu

### 3. Vyhodnotenie experimentu

- po pechovaní prstenca sa meria výsledná výška a priemer vzoriek. Kvôli anizotropii materiálu je treba meranie prevádzať na viacerých miestach a z týchto hodnôt spraviť aritmetický priemer
- pri prstencoch sa namerané hodnoty zanesú do zvoleného kalibračného diagramu. Nanášajú sa hodnoty buď na základe zmeny vnútorného priemeru prstenca v závislosti na výške alebo v závislosti pomerných deformácii výšky a priemeru, vid' vzorce (2.8) a (2.9):

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100$$

$$\varepsilon_d = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \cdot 100$$

- pri pechovaní valčekov sa meria maximálny a minimálny priemer napechovaného súdku a namerané hodnoty sa dosadia do vzorca (2.10), na základe ktorého sa vypočíta koeficient trenia. Kvôli nerovnomernej deformácii je treba meranie priemerov prevádzať na oboch podstavách a na viacerých miestach a z týchto hodnôt spraviť aritmetický priemer

$$\mu = 1 - \frac{D_{min}^2}{D_{max}^2}$$



## 5 ZÁVERY

Pre stanovenie veľkosti kontaktného trenia a experimentálne overenie mazív v tvárniacich operáciách objemového tvárnenia bola v tejto práci posudzovaná pechovacia skúška. Táto skúška sa vyhodnocovala na vzorkách prstencov a valcov. Cieľom vykonaných experimentov bolo preverenie vplyvu veľkosti deformácie na nameranú hodnotu koeficientu trenia a odporúčenie jeho optimálnej hodnoty pre praktické využitie pechovacích skúšok. Pre komplexnosť výsledku boli experimenty realizované s nenamazanými a mazivom DELTA 144 ošetrenými vzorkami.

Pre skúšku pechovania prstenca boli použité vzorky štandardných rozmerov a k vyhodnocovaniu veľkosti súčiniteľa trenia boli využité kalibračné krivky. Na základe výsledných hodnôt z pechovania prstencov, pre použitie tejto skúšky sa odporúča použiť vyššie veľkosti deformácií. Ako optimálna veľkosť, s najmenším rozptylom nameraných hodnôt sa ukázala veľkosť 30 %. Hodnoty koeficientu trenia stanovené touto veľkosťou deformácie boli brané ako referenčné hodnoty pri stanovovaní trenia pomocou pechovania valca. Pri nižších deformáciách sú odchýlky väčšie, čo je spôsobené počiatkom rozvoju fázy plastickej deformácie.

Pre experiment pechovania valcových vzoriek bola zvolená geometria s počiatočným priemerom  $D_0 = 20$  mm a s počiatočnou výškou  $H_0 = 30$  mm. Vzorky boli pechované v širokom intervale veľkosti deformácii 20 % až 60 %. S využitím referenčnej hodnoty veľkosti koeficientu trenia zo skúšky pechovania prstenca bola doporučená veľkosť deformácie valcových vzoriek 50 %.

Bolo preukázané, že jednoduchá pechovacia skúška je vhodná na experimentálne overenie mazív v tvárniacich operáciách. Experiment súčasne potvrdzuje, že využitie maziva znižuje koeficient trenia, čo sa priaznivo odrazí v znížení nákladov tvárniacich procesov.

Ako je uvedené v rešeršnej časti tejto práce je výsledná súdkovitosť napechovaných vzoriek závislá i na počiatočnej geometrie. S ohľadom na prípravu veľkého množstva vzoriek pre experiment nebolo v práci preverený vplyv geometrie na koeficiente trenia.

V nadväznosti na experiment sa do budúcnosti odporúča prípadné rozšírenie týchto výsledkov. Bolo by vhodné skúmať vplyv koeficienta trenia pre rôzne počiatočné geometrie vzoriek. A taktiež porovnanie väčšieho množstva použitých mazív a ich vplyv na tvárniaci proces.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [4]

1. Rozdelenie technologických tvárniacich procesov. *Strojárska technológia* [online]. Karol Stofira, 2009 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.strojarskatechnologia.info/13-rozdelenie-technologickych-tvarniacich-procesov/>
2. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Nakladateľstve STU, 2010. ISBN 978-80-227-3242.
3. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
4. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
5. Gemba at PMP – A Powerful Tool for Delivering Customer Satisfaction. *PMP* [online]. USA: Anthony Romero, 2019 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.pmpdeepdraw.com/gemba-at-pmp-a-powerful-tool-for-delivering-customer-satisfaction/>
6. BLAŠKOVIČ, Pavel, Jozef BALLA a Marián DZIMKO. *Tribológia*. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-050-0633-0.
7. Cold Forging. In: *Gestión de Compras: Industrial sourcing* [online]. Albacete: Gestión de Compras [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.gestiondecompras.com/fr/produits/forge/cold-forging>
8. MANG, Theo a Wilfried DRESEL. *Lubricants and Lubrication*. 2nd ed. Germany: Wiley, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.
9. GROOVER, Mikell P. *Foundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4th ed. USA: Wiley, 2010. ISBN 978-0470-467002.
10. How to Measure Friction in Metal Forming Processes? In: *Engineering notes* [online]. VG Sunil [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.engineeringenotes.com/metallurgy/metal-formation/how-to-measure-friction-in-metal-forming-processes-metallurgy/41400>
11. TOTTEN, George E. *Friction, Lubrication, and Wear Technology*. 18 vol. Cleveland: ASM International, 2017. ISBN 978-1-62708-192-4.
12. MICHNA, Štefan a Nataša NAPRSTKOVÁ. *Tváření*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012. ISBN 978-80-7414-445-5.
13. ŽMINDÁK, Milan. Kontakt telies sa nevyhneme. *TriboTechnika* [online]. Techpark, 2008- [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-1-2009/kontaktu-telies-sa-nevyhneme.html>
14. BHUSHAN, Bharat. *Modern Tribology Handbook: Principles of Tribology*. Ohio: CRC press, 2001. ISBN 0-8493-8403-6.
15. ROTHBART, Harold A. a Thomas H. BROWN. *Mechanical Design Handbook: Measurement, Analysis, and Control of Dynamic Systems*. 2nd ed. USA: McGraw-Hill, c2006. ISBN 9-78-007148735-1.

16. HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *Provoz, diagnostika a údržba strojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2013 [cit. 2020-04-10]. ISBN 978-80-248-3028-5. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/cs/studium/vyuka/provoz-diagnostika-a-udrzba-stroju/Provoz-diagnostika-a-udrzba-stroju-Vyukove-materialy.pdf>
17. BLAU, Peter J. *Friction Science and Technology*. 2nd ed. USA: CRC Press, c2009. ISBN 978-1-4200-5404-0.
18. BLOCH, Heinz P. *Practical Lubrication for Industrial Facilities*. 2nd ed. USA: Taylor, c2009. ISBN 0-88173-579-5.
19. MAGDA, Králová. SMYKOVÉ TŘENÍ. In: *Techmania* [online]. Plzeň: Techmania Science Center [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/smykove-treni>
20. FRIKTION: EN NATURKRAFT. In: *Nord - Lock* [online]. Malmö, 2015 [cit. 2020-4-20]. Dostupné z: <https://www.nord-lock.com/sv-se/inblick/kunskap/2015/friktion-en-naturkraft/>
21. TM 260.03 Dynamic friction in pin - disk. In: *Gunt* [online]. Hamburg: G.U.N.T. Gerätebau, 2020 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.gunt.de/en/products/dynamic-friction-in-pin-disk/040.26003/tm260-03/glct-1 :pa-148:pr-1396>
22. BUCKLEY, Donald H. *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication*. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier scientific, c1981. ISBN 0-444-41966-7.
23. STACHOWIAK, Gwidon W. *Wear - Materials, Mechanisms and Practice*. West Sussex: Wiley, c2005. ISBN 978-0-470-01628-2.
24. *Strojárstvo/Strojírenství*. Žilina: Media/ST, 2013, 3(17). ISSN 1335-2938.
25. TRIBOLOGICKÉ SKÚŠKY MATERIÁLOV. *Strojárstvo/Strojírenství* [online]. Žilina: Media/ST, 2014, 18(3), 82 - 83 [cit. 2020-06-23]. ISSN 1335-2938. Dostupné z: <http://www.floowie.com/sk/citaj/stroj-1403-el/#/strana/84/zvacsenie/100/>.
26. FAULKNER, Victoria. Wear Adhesion Scuffing. *Vlfaulkner87* [online]. Word Press, 2013 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://vlfaulkner87.wordpress.com/wear-adhesion-scuffing/>
27. Processes. *PVD Advanced Technologies* [online]. Toronto: PVD Advanced Technologies, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.pvdadvancedtech.com/process/>
28. FRANK, Michael A. *Functionalization of Steels and other Metallic Materials with Hydrophobic Layers - Influence on Wetting and Corrosion Resistance*. Erlangen, 2017. Disertace. Friedrich-Alexander-Universität, Department of Materials Science and Engineering.
29. Lubrication regimes. *SubsTech* [online]. Dmitri Kopeliovich, 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=lubrication\\_regimes&fbclid=IwAR2QJQGRFQe1n2WhbaZmubZgx05jM34dAaiN8TGYj1dlnfzOsWsMWBsU5dY](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=lubrication_regimes&fbclid=IwAR2QJQGRFQe1n2WhbaZmubZgx05jM34dAaiN8TGYj1dlnfzOsWsMWBsU5dY)

30. TRIBOLOGICKÉ POVLAKY PRE TVÁRNIACE NÁSTROJE. *Strojárstvo/Strojírenství* [online]. Žilina: Media/ST, 2016, 20(3), 22-24 [cit. 2020-06-23]. ISSN 1335-2938. Dostupné z: <http://www.floowie.com/sk/citaj/stroj1603-web/#/strana/22/zvacsenie/100/>.
31. *Strojárstvo/Strojírenství*. Žilina: Media/ST, 2017, 21(3). ISSN 1335-2938.
32. GUSEL, Leo a Rebeka RUDOLF. Influence of Friction Coefficient on Mechanical Properties in Process of Cold Bulk Forming. *Machines. Technologies. Materials*. [online]. 2017, 11(11), 537-540 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2017/11/537.full.pdf?fbclid=IwAR3amtzvFM9cqHV59ENf9QfmwBiNiYFj4IVRztwP-X4SHTAQhj1AkFiGRss>
33. STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. *Engineering Tribology*. 3rd ed. Burlington: Elsevier, c2005. ISBN 978-0-7506-7836-0. STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. *Engineering Tribology*. 3rd ed. Burlington: Elsevier, c2005. ISBN 978-0-7506-7836-0.
34. *Strojárstvo/Strojírenství*. Žilina: Media/ST, 2018, 22(9). ISSN 1335-2938.
35. GÁBRIŠOVÁ, Zuzana. Prevádzkové podmienky a porušenie klzných ložísk. In: *Engineering* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/loiska/1558-prevadzko-ve-podmienky-a-poruenie-klznych-loisk>
36. Cold work tooling. In: *Uddeholm* [online]. Uddeholms AB, 2017 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/54/2018/05/Tech-Uddeholm-Cold-work-EN.pdf>
37. Special lubricants for cold forming operations. In: *Bechem* [online]. Hagen: CARL BECHEM [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [https://www.bechem.de/fileadmin/downloads/BECHEM\\_Cold\\_forming\\_oils\\_Multifunctional\\_oils.pdf](https://www.bechem.de/fileadmin/downloads/BECHEM_Cold_forming_oils_Multifunctional_oils.pdf)
38. HUTCHINGS, Ian a Philip SHIPWAY. Friction. *Tribology* [online]. Kidlington. Elsevier, 2017, s. 37-77 [cit. 2020-05-08]. ISBN 9780081009109. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081009109000039>
39. Tribology Explained. In: *Machinery Lubrication* [online]. Tulsa: Noria Corporation, c2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/tribology-31340>
40. ERRICHELLO, Robert. Elastohydrodynamic Lubrication (EHL): A Review. *Gear Technology* [online]. 2015, 32(5), 60-62 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://www.geartechnology.com/articles/0715/Elastohydrodynamic\\_Lubrication\\_\(EHL\):\\_A\\_Review/](https://www.geartechnology.com/articles/0715/Elastohydrodynamic_Lubrication_(EHL):_A_Review/)
41. Circulating Oil. In: *Excel Petroleum Pvt* [online]. Navi Mumbai: Indiamart [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.excelpetroleum.net/industrial-lubricants-oil.html#circulating-oil>
42. DZIMKO, Marián. Úlohy a význam tribológie v technických systémoch. In: *Spla* [online]. Žilina: Žilinská univerzita, Strojnícka fakulta, 2013 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [http://www.spla.sk/uploads/TRIBOTECHNIKA/Prednasky\\_2013/Dzimko,%20M.\\_Univerzita%20Zilina.pdf](http://www.spla.sk/uploads/TRIBOTECHNIKA/Prednasky_2013/Dzimko,%20M._Univerzita%20Zilina.pdf)
43. DOBEŠ, Petr. Kluzné laky - maziva pro nejextrémnější podmínky. *Tech magazín* [online]. Praha: Tech media publishing, 2017, 2017, (1), 50 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [http://www.techmagazin.cz/ke\\_stazeni/tribotechnikaaa20171.pdf](http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/tribotechnikaaa20171.pdf)



44. Namazat na sucho stačí jen jednou. *Tech magazín* [online]. Praha, 2015, (1), 44-45 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [http://www.techmagazin.cz/ke\\_stazeni/TRIBO012015.pdf](http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/TRIBO012015.pdf)
45. Graphite dust: for effective lubrication. In: *Orion* [online]. Guatemala, 2017 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://orionguatemala.com/en/graphite-dust-for-effective-lubrication/>
46. Standard Precision Roll Forming and Metal Stamping Tools. In: *American Punch Company* [online]. Euclid, c2016 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.americanpunchco.com/StandardPrecisionTooling.aspx>
47. KOMLOSSY, Martin, Marián DZIMKO a Marián LEITMAN. Vrstvy a povlaky a možnosti ovplyvnenia kvality a spoľahlivosti konštrukcie. In: *SLPK* [online]. Žilina: Žilinská univerzita, Strojnícka fakulta, 2005 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [http://www.slpk.sk/eldo/2005/014\\_05/38.pdf?fbclid=IwAR1foNm5qa1SDpIcY-ZCXLU1dpy1RKguu5WfLuYRh1Fa1zG4NL4Uzy9r9ZI](http://www.slpk.sk/eldo/2005/014_05/38.pdf?fbclid=IwAR1foNm5qa1SDpIcY-ZCXLU1dpy1RKguu5WfLuYRh1Fa1zG4NL4Uzy9r9ZI)
48. NARAYANAN, Ganesh R. a Jay S. GUNASEKERA. *Sustainable Material Forming and Joining*. New York: CRC Press, 2019. ISBN 978-1-138-06020-3.
49. DIETER, George E., Howard A. KUHN a Lee SEMIATIN. *Handbook of Workability and Process Design*. 2nd. USA: ASM International, 2003. ISBN 0-87170-787-0.
50. PLANČAK, Miroslav et al. Possibilities to measure contact friction in bulk metal forming. *Technički vjesnik* [online]. 2012, 19(4), 727-734 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: [https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=137660&fbclid=IwAR0KqLEJsnUE0sg3i72ut5Ap\\_fWCARauSFdRhONOBX\\_NqRm11D0s9tTV0wE](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=137660&fbclid=IwAR0KqLEJsnUE0sg3i72ut5Ap_fWCARauSFdRhONOBX_NqRm11D0s9tTV0wE)
51. LIDMILA, Zdeněk. Re: DP [e-mailová komunikace]. 14. květen 2020 8:35 [cit. 2020-25-6]
52. KAČMARČIK, Igor, Dejan MOVRIN a Aljoša IVANIŠEVIĆ. One Contribution to the Friction Investigation in Bulk Metal Forming. *Journal for Technology of Plasticity* [online]. 2011, 36(1), 35-48 [cit. 2020-05-11]. ISSN 0354-3870. Dostupné z: <http://content.sciendo.com/view/journals/jtp/36/1/article-p35.xml>
53. R&D Update: Twist-compression testing to evaluate friction, lubrication. In: *Stamping Journal* [online]. Elgin: FMA Communications, 2017 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/r-d-update-twist-compression-testing-to-evaluate-friction-lubrication>
54. CHRISTIANSEN, Peter L., Paulo MARTINS a Niels BAY. Friction Compensation in the Compression Test. *Manufacturing Engineering Education* [online]. Cambridge: Elsevier, 2019, 2019, s. 85-104 [cit. 2020-05-11]. ISBN 9780081012475. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081012475000046>
55. SRIVASTAVA, Arpit, Anurag SHRIVASTAVA a Anand B. MISHRA. Analysis of Friction Factor and Coefficient Of Friction Using Ring Compression Test under Various Lubricants. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [online]. 2019, 9(6), 17-23 [cit. 2020-05-06]. ISSN 2321-0869. Dostupné z: [https://www.erppublication.org/published\\_paper/IJETR2771.pdf](https://www.erppublication.org/published_paper/IJETR2771.pdf)
56. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody* [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního

- inženýrství, 2003 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1\\_experimentalni\\_metody\\_cviceni\\_2019\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1_experimentalni_metody_cviceni_2019_forejt_piska_humar_janicek.pdf)
57. KAJTOCH, Jerzy. Strain in the upsetting process. *Metallurgy and foundry engineering* [online]. Krakow: AGH University of Science and Technology, 2007, 33(1) [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://journals.bg.agh.edu.pl/METALLURGY/2007-01/metalur05.pdf>
  58. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
  59. ZDRAVECKÁ, Eva. Tribologické povlaky pre tvárniace stroje. In: *Engineering* [online]. Košice: CB Media, c2020 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/strojarsstvo-extra/2162-tribologicke-povlaky-pre-tvarniace-stroje>
  60. SOBOTA, Róbert. *Zisťovanie vplyvu faktorov na súdkovitosť pri ubíjaní za tepla pomocou numerickej simulácie*. Trnava, 2010. Vedecká monografia. Materiálovo-technologická fakulta STU.
  61. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
  62. LIDMILA, Zdeněk. 2008: *Teorie a technologie tváření I*. Brno: Univerzita obrany. 105 s. ISBN 978-80-7213-579-6
  63. Cavitation Solution. *MCOR* [online]. Hollywood: Epoxytec Intl, c2016 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.mcor.net/mcorabilities/mcorabilites-for-pumps-fluid-flow/cavitation-solution/>
  64. ERINOSHO, Mutiu F. a Esther T. AKINLABI. Study of Friction during Forging Operation. *WCE 2016* [online]. Proceeding of the World Congress on Engineering, 2016, 2 [cit. 2020-05-11]. ISSN 2078-0966. Dostupné z: [http://www.iaeng.org/publication/WCE2016/WCE2016\\_pp929-932.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2016/WCE2016_pp929-932.pdf)

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Označenie	Legenda	Jednotka
C	Koeficient súdkovitosti	[%]
D <sub>0</sub>	Vonkajší priemer pred deformáciou	[mm]
D <sub>max</sub>	Najväčší priemer valca	[mm]
D <sub>min</sub>	Najmenší priemer valca	[mm]
d <sub>0</sub>	Vnútorný priemer pred deformáciou	[mm]
d <sub>n</sub>	Priemer neutrálnej plochy pechovaného prstenca	[mm]
F <sub>N</sub>	Kolmá tlaková sila	[N]
F <sub>t</sub>	Trecia sila	[N]
h <sub>0</sub>	Počiatočná výška	[mm]
m	Trecí faktor	[-]
n	Súčiniteľ brzdenia	[-]
P	Zmeraná normálová sila	[N]
R	Rameno krútiaceho momentu	[mm]
T	Krútiaci moment	[Nm]
T <sub>Tav</sub>	Teplota tavenia	[°C]
V <sub>c</sub>	Celkový objem napechovaného valcu	[mm <sup>3</sup> ]
V <sub>s</sub>	Objem súdkovitej časti	[mm <sup>3</sup> ]
ε	Pomerná deformácia	[-]
ε <sub>d</sub>	Pomerná deformácia priemeru	[-]
ε <sub>h</sub>	Pomerná deformácia výšky	[-]
λ	Štíhlostný pomer	[-]
μ	Koeficient trenia	[-]
μ <sub>k</sub>	Koeficient kinetického trenia	[-]
μ <sub>s</sub>	Koeficient statického trenia	[-]
σ <sub>d</sub>	Deformačný odpor	[MPa]
σ <sub>k</sub>	Medza klzu v šmyku	[MPa]
σ <sub>p</sub>	Prirodzený pretvárný odpor	[MPa]
τ <sub>r</sub>	Šmykové napätie	[MPa]
φ	Logaritmická deformácia	[-]

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Súčiastky vyrobené technológiou tvárnenia [5], [7] .....	9
Obr. 2 Napechovaný valček [11].....	10
Obr. 3 Interakcia tribológie s inými vednými odbormi [42].....	11
Obr. 4 Zariadenie tribologického procesu a jeho väzby [6].....	12
Obr. 5 Druhy kontaktných plôch [13] .....	12
Obr. 6 Zväčšenie kontaktu povrchov [20].....	13
Obr. 7 Druhy trenia [38].....	15
Obr. 8 Modely kontaktov medzi povrchmi [21] .....	15
Obr. 9 Model adhézneho opotrebovania [27].....	16
Obr. 10 Adhézne opotrebovanie [36] .....	16
Obr. 11 Schéma abrazívneho opotrebovania [27].....	17
Obr. 12 Abrazívne opotrebovanie [36] .....	17
Obr. 13 Model únavového opotrebovania [27].....	18
Obr. 14 Schéma vibračného opotrebovania [27].....	18
Obr. 15 Mechanizmus erozívneho opotrebovania [27].....	19
Obr. 16 Vznik kavitačného opotrebovania [63] .....	19
Obr. 17 Mechanizmy vzniku korózie [28] .....	20
Obr. 18 Stribeckov diagram [35] .....	21
Obr. 19 Elastohydrodynamické mazanie [39] .....	22
Obr. 20 Mazanie pri tvárnení za studena [37] .....	24
Obr. 21 Olejové mazivo [41].....	25
Obr. 22 Mazivo grafitu [45] .....	26
Obr. 23 Typy štruktúr povlakov [59] .....	28
Obr. 24 Povlakované nástroje [46].....	28
Obr. 25 Pechovanie prstenca [62] .....	29
Obr. 26 Deformácia pechovaného prstenca [56].....	29
Obr. 27 Kalibračný diagram [56] .....	31
Obr. 28 Skúška plošného tlaku [49] .....	31
Obr. 29 Skúška združeného pretlačovania [52] .....	32
Obr. 30 Skúška kombinovaným namáhaním krut – tlak [49] .....	32
Obr. 31 Pechovanie valca [9] .....	33
Obr. 32 Schéma deformácie pri pechovaní [58] .....	34
Obr. 33 Tvar valca pri pechovaní [60] .....	34
Obr. 34 Pásma pechovaného valca.....	36
Obr. 35 Geometria počiatočných vzoriek .....	37
Obr. 36 Pripravené vzorky pred pechovaním.....	38
Obr. 37 Konečná výška valcov .....	39
Obr. 38 Konečná výška prstencov.....	39
Obr. 39 Hydraulický lis CZR 600 .....	40
Obr. 40 Nástroj pre lis .....	40
Obr. 41 Nenamazané pechované vzorky prstencov .....	40
Obr. 42 Namazané pechované vzorky prstencov .....	41
Obr. 43 Kalibračný diagram pre prvú skupinu vzoriek V1 .....	42
Obr. 44 Kalibračný diagram pre druhú skupinu vzoriek V2.....	43
Obr. 45 Kalibračný diagram pre tretiu skupinu vzoriek V3 .....	44
Obr. 46 Spechované nenamazané valcové vzorky .....	46
Obr. 47 Spechované namazané valcové vzorky .....	46
Obr. 48 Makroštruktúra pechovaného valca na 30 % deformácie .....	49

Obr. 49 Makroštruktúra pechovaného valca na 50 % deformácie .....	50
Obr. 50 Makroštruktúra pechovaného valca na 60 % deformácie .....	50
Obr. 51 Povrch prstencov po zleptaní .....	51

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Hodnoty koeficientu trenia pre rôzne tepelné procesy tvárnenia [9] .....	23
Tab. 2 Chemické zloženie ocele [51] .....	37
Tab. 3 Mechanické vlastnosti ocele [51] .....	37
Tab. 4 Počiatočné rozmery vzorky valca .....	38
Tab. 5 Počiatočné rozmery vzorky prstenca .....	38
Tab. 6 Parametre lisu .....	40
Tab. 7 Parametre prstencov .....	41
Tab. 8 Koeficient trenia pre prvú skupinu vzoriek V1 .....	42
Tab. 9 Koeficient trenia pre druhú skupinu vzoriek V2 .....	43
Tab. 10 Koeficient trenia pre tretiu skupinu vzoriek V3 .....	44
Tab. 11 Parametre pre vzorky bez maziva .....	45
Tab. 12 Parametre pre vzorky s mazivom .....	46
Tab. 13 Hodnoty vypočítaných koeficientov trenia .....	47