



## **Bakalářská práce**

# **Stanovení vlivu deformace na změnu koeficientu tření**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Bc. Vladimír Pelinka**

*Vedoucí práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Stanovení vlivu deformace na změnu koeficientu tření

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Bc. Vladimír Pelinka</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S19000098
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

### Zásady pro vypracování:

1. Význam tribologických procesů při tváření kovů (druhy tření, používaná maziva a způsob nanášení na povrch, atd.)
2. Metody tribologického hodnocení maziv a ochranných povlaků plechů
3. Experimentální zjištění vlivu deformace na velikost koeficientu tření při tribologické zkoušce protahování pásku
4. Analýza kvality povrchu po provedení tribologických testů
5. Závěr



*Rozsah grafických prací:* obrázky, tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 30 stran textu  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] BHUSHAN, Bharat. Introduction to tribology. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [2] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [3] HERTZBERG, Richard W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 4th ed. New York: J. Wiley & Sons, 1996. ISBN 978-0-471-01214-6.
- [4] TULKA, Jaromír. Povrchové úpravy materiálů. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2005. ISBN 978-80-214-3062-4.
- [5] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.

*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 30. listopadu 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. listopadu 2021

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## **Stanovení vlivu deformace na změnu koeficientu tření**

### **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá experimentálním zjištěním vlivu deformace na velikost koeficientu tření při tribologické zkoušce protahováním pásku. V rámci teoretické části jsou poskytnuty informace o tribologii, tření, druzích tření, mazivech, druzích maziv, ochranných povlacích plechů, tribologických zkouškách maziv a ochranných povlacích plechů. V rámci praktické části byla provedena tribologická zkouška protahováním pásku na zařízení SOKOL 400. Zkouška byla prováděna konstantní rychlostí posuvu s diskrétně se zvyšujícím kontaktním tlakem. Naměřené hodnoty tribologických sil byly zpracovány do grafů a tabulek. Z maximální síly v ustálené oblasti byly vypočítány hodnoty koeficientů tření, které jsou poté porovnávány mezi vzorky bez deformace, s 10% deformací a s 20% deformací. Provedena je také analýza kvality povrchu po provedeném tribologickém testování s ohledem na hodnoty drsnosti povrchu vzorků. K ověření statistické významnosti naměřených dat posloužila dvoufaktorová analýza rozptylu ANOVA. V závěru jsou shrnuty hlavní výsledky včetně doporučení k dalšímu výzkumu.

Klíčová slova: tribologie, koeficient tření, deformace, kontaktní tlak, ANOVA

## **Determining the effect of the deformation on the change in the friction factor**

### **Annotation**

This bachelor thesis deals with the experimental determination of the effect of the deformation on the change in the friction factor during a tribological test by stretching the tape. The theoretical part provides information on tribology, friction, types of friction, lubricants, types of lubricants, protective coating sheets and tribological tests of lubricants and protective coating sheets. As part of the practical part, a tribological test was performed by stretching the tape on the SOKOL 400 device. The test was performed at a constant feed rate with discretely increasing contact pressure. The measured values of tribological forces were processed into graphs and tables. The values of friction factor were calculated from the maximum force in the steady region, which are then compared between samples without deformation, with 10% deformation and with 20% deformation. An analysis of the surface quality after tribological testing is also carried out with respect to the surface roughness values of the samples. A two-factor analysis of variance ANOVA was used to verify the statistical significance of the measured data. In the conclusion, the main results are summarized, including recommendations for further research.

Keywords: tribology, friction factor, deformation, contact pressure, ANOVA

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za odborné vedení, podnětné připomínky a za čas, který mi věnoval.

Neopominutelný vděk bych chtěl vyjádřit své rodině, jmenovitě pak své mamince, babičce, bratrovi a přítelkyni, kteří mě po celou dobu mého studia podporovali a vkládali ve mě svou důvěru, která mě motivovala nejen v krušných chvílích.

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	10
1 Úvod .....	12
2 Teoretická část .....	13
2.1 Tribologie .....	13
2.2 Historie tribologie .....	14
2.3 Tření .....	16
2.3.1 Druhy tření .....	17
2.4 Mazání .....	19
2.4.1 Druhy maziv .....	20
2.5 Ochranné povlaky plechů .....	22
2.6 Tribologické zkoušky maziv a ochranných povlaků .....	23
2.6.1 Modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem .....	23
2.6.2 Modelování tření na tažné hraně .....	24
2.6.3 Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou .....	25
2.6.4 Další tribologické zkoušky plechů .....	25
2.7 Deformace kovových materiálů .....	26
3 Praktická část .....	29
3.1 Příprava testovacích vzorků .....	30
3.2 Mechanické vlastnosti testovaného materiálu .....	32
3.3 Zařízení SOKOL 400 .....	33
3.4 Tribologická zkouška protahováním pásku .....	35
3.5 Parametry zkoušky .....	36
3.6 Výsledky testování vzorků bez deformace .....	37
3.7 Výsledky testování vzorků s 10% deformací .....	40

---

3.8	Výsledky testování vzorků s 20% deformací.....	42
3.9	Analýza kvality povrchu po provedeném testování.....	44
4	Diskuse výsledků.....	45
4.1	Statistické vyhodnocení dat .....	47
5	Závěr.....	48
	Seznam literatury .....	50

## Seznam použitých zkratek a symbolů

AD	anno Domini (léta Páně; náš letopočet)
Al	hliník
BC	before Christ (před Kristem; před naším letopočtem)
C	uhlík
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxid vápenatý
Cr	chrom
Cu	měď
DIN	Deutsche Industrie-Norm (německá národní norma)
DLC	Diamond-like carbon (diamant podobný uhlíku)
EG	Electrolytic Galvanizing (elektrolytické zinkování)
Fe	železo
GBP	British pound (britská libra)
H <sub>2</sub> O	voda
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kyselina sírová
HDG	Hot – Dip Galvanizing (žárové zinkování)
max.	maximální
min.	minimální
MoS <sub>2</sub>	disulfid molybdenu
Na	sodík
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PTFE	teflon
SAE	Society of Automotive Engineers (Asociace automobil. inženýrů)
Ti	titan
Zn	zinek
Zn-Fe	intermetalická vrstva železa a zinku



Označení	Název	Jednotka
$\bar{x}$	- střední hodnota	[-]
$\Delta F$	- rozdíl max. a min. tažné síly v ustálené oblasti	[N]
$\Delta L$	- změna délky zkušebního vzorku	[mm]
$A_{80mm}$	- celková tažnost	[%]
$A_g$	- homogenní tažnost	[%]
$E$	- Youngův modul pružnosti	[MPa]
$F$	- zatěžující síla	[N]
$F_{BR}$	- brzdící síla	[N]
$F_{max}$	- maximální tažná síla v celé měřené délce	[N]
$F_N$	- normálová síla	[N]
$F_s$	- maximální tažná síla v ustálené oblasti	[N]
$F_T$	- tažná síla (obecná)	[N]
$L$	- konečná délka zkušebního vzorku	[mm]
$L_0$	- počáteční délka zkušebního vzorku	[mm]
$p$	- kontaktní tlak	[MPa]
$R$	- poloměr	[mm]
$R$	- smluvní napětí	[MPa]
$R_a$	- průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[ $\mu$ m]
$R_m$	- mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	- smluvní mez kluzu	[MPa]
$RP_c$	- počet vrcholů nad určitou výškovou tolerancí	[1/cm]
$S$	- kontaktní plocha	[mm <sup>2</sup> ]
$S_0$	- počáteční průřez	[mm <sup>2</sup> ]
$T$	- teplota	[°C]
$v$	- rychlost	[mm/s]
$\mu$	- koeficient tření	[-]
$l$	- měřená délka	[mm]
$s$	- výběrová směrodatná odchylka	[-]
$\alpha$	- úhel opásání	[°]
$\varepsilon$	- poměrné prodloužení	[1] / [%]
$\sigma$	- napětí	[MPa]

# 1 Úvod

Antropogeneze probíhající již cca 2 miliony let přinesla vývoj člověka od druhu Homo Habilis, člověka zručného, až po dnešní druh Homo Sapiens, člověka moudrého. Tyto dva druhy odlišují mnohé propastné rozdíly, avšak minimálně jedno mají společné. Tím je soužití s přírodou a jejími přírodními jevy.

Přírodní jevy jakožto např. změna počasí či určité fyzikální jevy se odehrávají přirozeně, tedy v čase a prostoru plně řízenými přírodou. V souvislosti s touto její bezmeznou mocí se člověk při svém vývoji musel zaměřit nejen na své přežití, ale i na rozvoj svých schopností a vědomostí, jimiž by mohl přírodní jevy pochopit a získat je tím na svou stranu. Aby se mu to povedlo, musel nashromáždit velké množství informací, naučit se s nimi pracovat, uchovávat je a nadále rozvíjet, a proto vyvinul přírodní vědy.

Jednou z těchto přírodních věd je fyzika, jejíž součástí je i tribologie neboli nauka o tření. Tření je přírodním jevem, kterému se v technické praxi věnuje pozornost již v samotných počátcích návrhů všech mechanických součástí i technologií jejich zpracování. Hraje tak významnou roli, že v případě nedostatečné regulace jeho negativních vlivů se daná řešení stávají technicky i ekonomicky neudržitelnými.

Cílem této bakalářské práce bylo experimentálně stanovit vliv deformace na změnu tribologické vlastnosti – koeficientu tření  $\mu$ . Testovaným materiálem byla hlubokotažná ocel DC05 s povrchovou úpravou HDG, tedy kombinace materiálu a povrchové úpravy, která se v praxi hojně využívá nejen pro díly automobilové karoserie. Experiment byl proveden pomocí tribologické zkoušky protahováním pásku na zařízení SOKOL 400. Tato zkouška simuluje reálné tribologické podmínky při lisování plechu. Testované vzorky – plechové pásky, byly rozděleny do tří skupin, přičemž první dvě skupiny byly před zkouškou zdeformovány o 10% a o 20 % a třetí skupina zůstala bez deformace.

Výsledkem bylo zjištění koeficientů tření  $\mu$  pro všechny skupiny testovaných vzorků v závislosti na měřených kontaktních tlacích  $p = 8, 23, 38, 53$  a  $68$  MPa. Následně byla provedena analýza kvality jejich povrchu na základě měření hodnot drsnosti povrchu. Naměřená a vypočtená data byla nakonec podrobena statistickému vyhodnocení dvoufaktorovou analýzou rozptylu ANOVA.

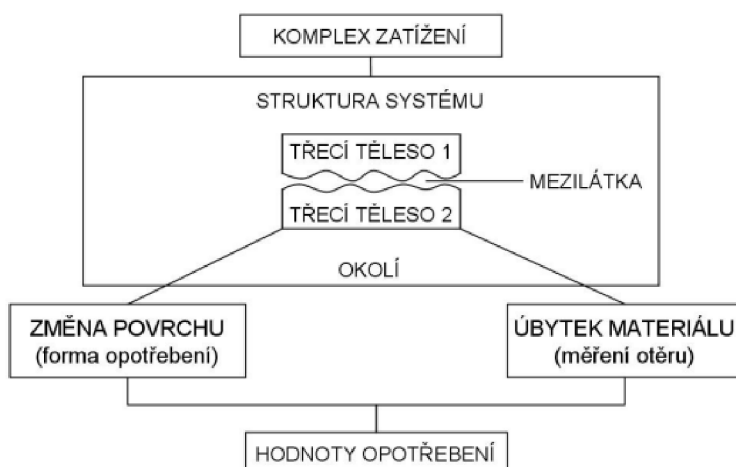
## 2 Teoretická část

Teoretická část této bakalářské práce je rozdělena do několika kapitol. První kapitola pojednává o tribologii a její historii. Druhá kapitola popisuje tření a jeho druhy. Ve třetí kapitole je zmíněno mazání a druhy maziv. Další kapitoly přinášejí informace o ochranných povlácích plechů a jejich tribologickém hodnocení. Poslední kapitola teoretické části definuje deformace kovových materiálů, jejich mechanické vlastnosti a zkoušení.

### 2.1 Tribologie

Tribologie<sup>1</sup> je mezioborová vědní disciplína, jejímž předmětem zkoumání jsou procesy tření, opotřebení a mazání. Přičemž tření lze považovat za součást fyziky a strojírenství, mazání reprezentuje strojírenství a chemii, kdežto opotřebení je předmětem nauky o materiálu. [1]

Výchozím prvkem tribologie je tzv. tribologický systém – viz obr. 1. Rozumí se jím systém vyšší úrovně, skládající se z minimálně dvou tribologických systémů, který je schopný realizovat zadanou technickou funkci. Podle předmětu zkoumání existuje tribologický systém přírodní (člověk, fauna, flóra) a umělý (vytvořený člověkem). [2]

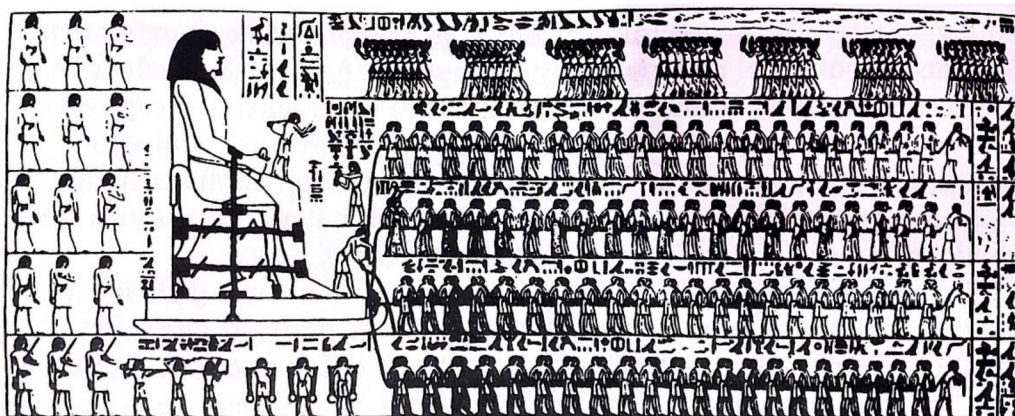


**Obr. 1 Tribologický systém podle DIN 51 320 [3]**

<sup>1</sup> Název tribologie vychází z řeckého *tribos* – tření a *logos* – věda, tedy věda o tření.

## 2.2 Historie tribologie

Pohledem do vzdálené historie lidstva lze zaznamenat první doložitelnou zmínku o využití tribologických zařízení v době 3000 BC na území tehdejší Mezopotámie. Tehdejší civilizace využívala pro přepravu nákladu kolové vozíky a pro tvarování keramiky hrnčířské kruhy, tedy mechanická zařízení, vyžadující určitou základní formu otočných a axiálních ložisek. Obyvatelé starověkého Egypta v době 2000 BC využívali pro přesun stavebních kamenných bloků a jiných monumentálních objektů důmyslný transportní systém – viz obr. 2. Tento systém navíc využíval mazání ke snížení kluzného a valivého odporu. V dobách klasického Starověku v období řecko-římském došlo k vynálezu soustruhu a prvotnímu využití páky, převodů a kladek v různých aplikacích. V pozdějších dobách lidé věnovali pozornost tření a jeho vlivům již v počátcích návrhů mechanických zařízení. [4]

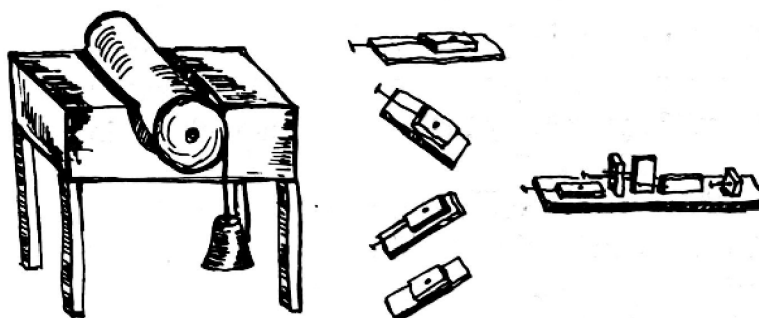


*Obr. 2 Transport kamenného kolosu ve starověkém Egyptě [1]*

První a nejvýznamnější nález pocházející z období našeho letopočtu se uskutečnil ve 20. letech 20. století na jezeře Nemi poblíž dnešního města Řím. Archeologové zde objevili dvě velké lodě, jejichž součástmi byly velké otočné plošiny nesené na valivých ložiscích. Existují určité důkazy i o tom, že se v této době využívala ložiska s kuželovými válečky. [4]

Během středověku v období od roku 400 AD do roku 1450 AD se ke mletí obilí a zejména k čerpání vody využívalo větrných mlýnů, jejichž součástmi byla dřevěná čepová a axiální ložiska mazaná živočišnými tuky. Došlo také k vynálezu mechanických hodin, které obsahovaly železné hřídele usazené v mosazných pouzdrech. [4]

S nástupem novověku se v 15. století rozmohl námořní výzkum, rozvoj navigace, stavba lodí a výroba zbraní. Dochované zápisy největšího myslitele tohoto období, Leonarda da Vinci, obsahují vědecké výzkumy tření a studium ložiskových materiálů a opotřebení. Jeden z jeho dochovaných náčrtů je vidět na obr. 3. [4]



**Obr. 3 Náčrt zařízení na určení čepového tření podle Leonarda da Vinci [5]**

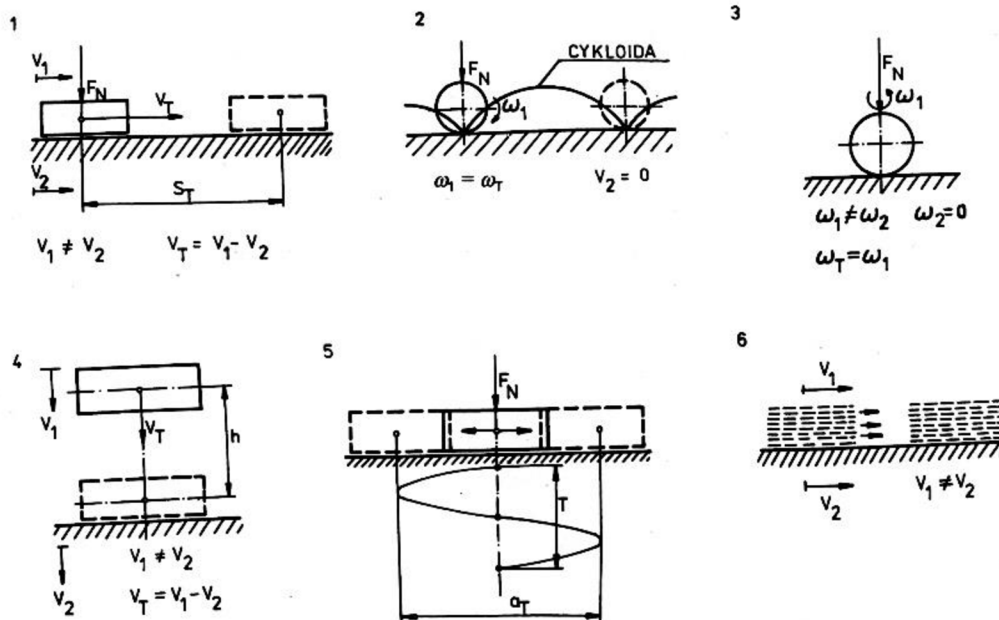
Koncem 17. století francouzský fyzik Guillaume Amontons definoval „zákony tření“, jejichž platnost dodnes nebyla vyvrácena. Jedním z nejdůležitějších je tvrzení, že na těleso volně ležící na povrchu působí třecí síla přímo úměrná jeho hmotnosti. Do této doby se řadí také jeden z největších vědců všech dob, sir Isaac Newton. Právě on položil základy mechaniky, včetně mechaniky tekutin, díky níž došlo k významnému rozšíření studia mazání. [1, 6]

Nicméně tribologie jako věda vešla do popředí až po roce 1966, kdy britská vláda zřídila výbor, jehož úkolem bylo nalézt způsoby, jak snížit nežádoucí vlivy tření na ekonomické ztráty v britské průmyslové ekonomice. Britský vědec Hans Peter Jost přišel s vědeckou zprávou, ve které vymyslel termín tribologie a definoval jej jako vědu, zabývající se studiem tření, opotřebení a mazání. V této zprávě odhadl energetické ztráty spojené se třením na 2 miliardy GBP a přišel s doporučením k nastolení řádné tribologické praxe a postupů, jež měly tyto ztráty snížit až o 25 %. [7]

Nejnovější poznatky z tribologie 21. století pocházejí z oblastí mazání – využití supermazného diamantového uhlíkového filmu (DLC) a biotribologie – tribologické mechanismy lidských orgánů. Dále pak také z oblasti vysokoteplotní tribologie – tváření za tepla, a nakonec z oblasti počítačových numerických simulací – simulace molekulární dynamiky a výpočty prvního principu, které počítají atomové vztahy prostřednictvím základních rovnic kvantové mechaniky. [8]

## 2.3 Tření

Tření je přírodním jevem, který nastává v důsledku interakce dvou a více povrchů materiálů při jejich vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Jednat se přitom může o libovolný typ relativního pohybu (viz obr. 4) nebo jeho kombinace. [1]



Obr. 4 Typy relativních pohybů třecích dvojic; 1 – posuvný, 2 – valivý, 3 – rotační, 4 – nárazový, 5 – oscilační, 6 – tečení [5]

V lidském životě i v technické praxi existují případy, ve kterých je tření nežádoucím, ale i výhodným jevem. Jako příklad mimo technickou praxi se přímo nabízí uvést lidské tělo, v němž se nachází nespočet tribologických systémů. Takové lidské tělo je tvořeno pevnou kostrou s kloubními spoji a mazivem. Krev je v něm transportována v žilách a cévách, jejichž vnitřní povrch proudění zpomaluje. Ke vzniku tření výhodného charakteru dochází vždy při chůzi, sezení či uchopování předmětů. V technické praxi pak lze uvést za příklad technologie tváření kovů. Zde však převládají nežádoucí vlivy tření, které způsobují vyšší spotřebu energie, zpomalení postupu deformace tvářeného materiálu, opotřebování tvářecího nástroje a jiné. Lze však v této oblasti nalézt i výhodné účinky tření, a to například ve formě přidržovače. V konečném důsledku je pak tření v technické praxi tématem, kterému je vždy třeba věnovat pozornost již od samotného návrhu strojních součástí a technologií jejich zpracování.

### 2.3.1 Druhy tření

Tření lze v první řadě rozdělit dle místa vzniku na: [3]

- vnější tření – ve styku třecích těles,
- vnitřní tření – v materiálových vrstvách třecího tělesa.

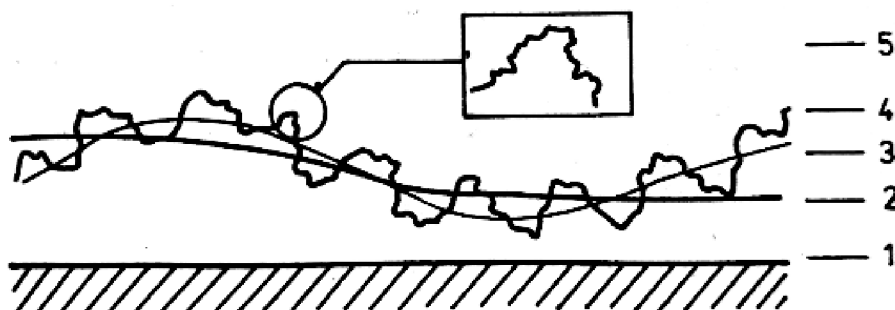
Definice popisující oba tyto stavy zní, že: „tření je ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo na konci relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí.“ [9]

Další rozdělení tření vychází ze skupenství třecích ploch: [10]

- tření tuhých těles,
- kapalinné tření,
- plynné tření,
- plazmatické tření.

Tření tuhých těles lze definovat jako suché tření, jehož třecí oblasti se nacházejí v tuhém stavu. V důsledku absence maziva při něm dochází k deformacím vrcholků mikronevlností povrchů třecích těles – viz obr. 5. Přímo jej ovlivňuje drsnost povrchu a jeho mechanické vlastnosti. Dále se dělí na: [4]

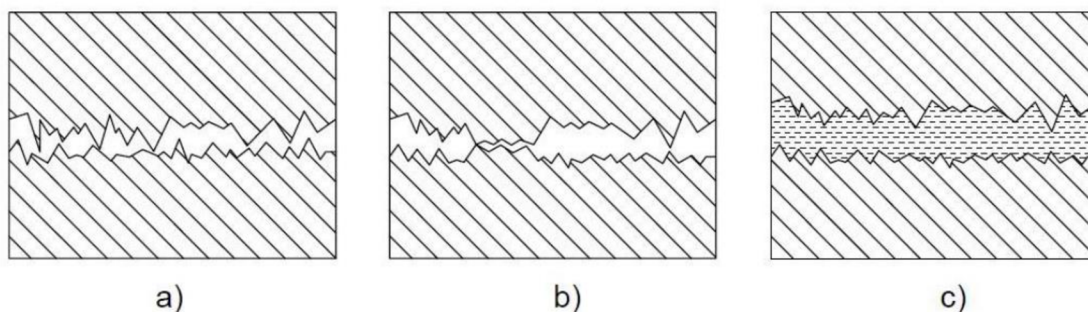
- čisté tření tuhých těles – třecí oblast má vlastnosti základního materiálu tuhého tělesa (viz obr. 6a),
- tření v adhezních vrstvách – tření v nejméně dvou adhezních vrstvách materiálu, které jsou ve vzájemném kontaktu a mají vlastnosti adhezních vrstev, vytvořených na základním materiálu.



**Obr. 5 Schématické znázornění geometrie povrchu; 1 - ideálně rovný povrch, 2 - odchylnky tvaru a polohy, 3 - vlnitost povrchu, 4 - mikroskopické drsnosti, 5 - submikroskopické nerovnosti [5]**

Mezné tření (viz obr. 6b) lze popsat jako nedokonalý stav kapalinného tření, neboť nastává v kombinaci s třením tuhých těles. Vznikne nedostatečnou vrstvou maziva mezi tuhými třecími plochami, a tudíž dojde v určitých místech k jejich přímému kontaktu. Zde je velikost třecí síly závislá již na všech zmíněných faktorech – drsnost povrchu, vlastnost materiálu, mazivo. [11]

Kapalinné tření (viz obr. 6c) charakterizuje stav, v němž má třecí vrstva materiálu vlastnosti kapaliny. Samotný proces tření v tomto případě probíhá v hydrostatické nebo v hydrodynamické nosné vrstvě, tudíž se třecí plochy přímo nedotýkají. Tím pádem není velikost třecí síly závislá na drsnosti povrchu, ani na druhu materiálu, nýbrž na míře tření molekul uvnitř kapaliny (maziva). [5]



**Obr. 6 Druhy tření; a – suché tření, b – mezné tření, c – kapalinné tření [11]**

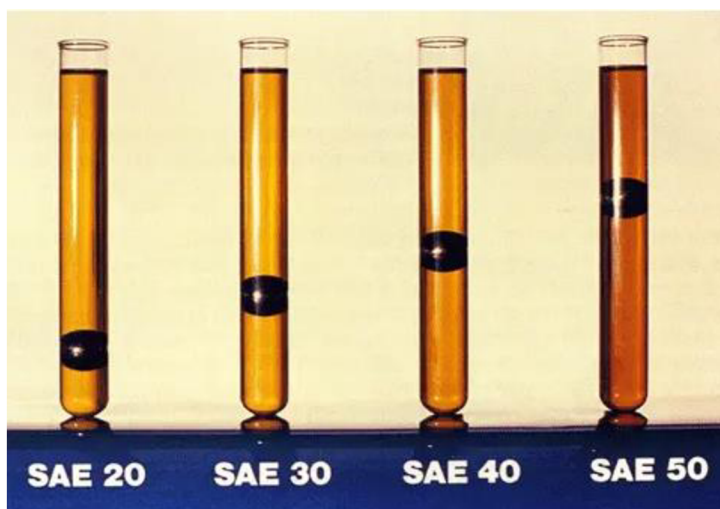


## 2.4 Mazání

Jak již bylo zmíněno na začátku teoretické části této práce, mazání je jedním ze tří zkoumaných procesů tribologie a v technické praxi zároveň neodmyslitelnou součástí tribologických systémů. Zvolením vhodného druhu maziva pro danou technickou aplikaci, např. tváření kovů, lze dosáhnout zejména: [5]

- snížení ztrát mechanické energie,
- zvýšení mechanické účinnosti systému,
- snížení opotřebení tvářecího nástroje i tvářeného materiálu,
- odvodu tepla a dostatečného chlazení,
- protikorozní ochrany a chemické neutrality,
- ochrany proti nečistotám a jejich odstranění,
- vyššího stupně deformace při tváření.

Maziva jsou při použití vystavována hned několika typům namáhání. Jedná se o namáhání mechanické, teplotní a chemické. Při výběru vhodného maziva je třeba zohlednit jeho skupenství a s ním související vlastnosti. Pokud se jedná např. o mazivo v kapalném stavu, je jeho nejdůležitější vlastností viskozita, která určuje míru vnitřního tření v tekutině. Na obr. 7 lze vidět zkumavky olejů s viskozitami dle normy SAE. Odlišné viskozity jsou zde znázorněny pomocí testu dráhy pádu kovové kuličky volně vhozené do zkumavky s olejem. Ve zkumavce s nejnižší viskozitou oleje (SAE 20) kulička urazila nejdelší dráhu, naopak ve zkumavce s nejvyšší viskozitou oleje (SAE 50) dráhu nejkratší. [12, 13]



**Obr. 7 Tekutá maziva s různými viskozitami dle normy SAE [13]**

## 2.4.1 Druhy maziv

Maziva lze rozdělit dle jejich skupenství na: [5]

- tuhá maziva,
- plastická maziva,
- kapalná maziva,
- plynná maziva.

### Tuhá maziva

Pro tuhá maziva je typické jejich využití v aplikacích s extrémními vlivy, jako je např. tlak a teplota. Do určité teploty jsou tuhá maziva chemicky i fyzikálně stálá, nad určitou teplotou již dochází k jejich chemické přeměně. Nevýhodou tuhých maziv je nízká schopnost odvodu tepla, zvýšený koeficient tření a nízká trvanlivost. Typickým zástupcem tuhých maziv je C a MoS<sub>2</sub>. Jejich typicky černá barva při použití špiní tvářený materiál i pracovníky, proto byla vyvinuta tzv. bílá tuhá maziva, jako je např. Ca(OH)<sub>2</sub> či PTFE. [14]

### Plastická maziva

Plastická maziva se využívají pro mazání valivých a kluzných ložisek, ozubených soukolí či kluzných uložení v běžných provozních podmínkách a v širokém rozsahu teplot, což z nich dělá poměrně univerzální maziva. Skládají se z disperzní a dispergované fáze. Disperzní fáze je tvořena ropným nebo syntetickým olejem a jedná se tudíž o olejovou složku. Dispergovanou fází tvoří zpevňovač, který má rozhodující vliv na vlastnosti maziva a může být dle charakteru mýdlové (Na) či nemýdlové (silikogely, polymery). Součástí plastického maziva může být ještě aditivum, které zlepšuje jeho mazací a protioděrové schopnosti. [3, 12, 14]

### Kapalná maziva

Kapalná maziva představují nejvíce zastoupenou skupinu maziv. Obecně lze rozdělit dle charakteru na: [5]

- chemicky jednoznačné látky (např. H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, glycerin),
- homogenní směsi (živočišné, rostlinné, minerální a syntetické oleje),
- kapalná disperze (např. suspenze C a MoS<sub>2</sub> v minerálních olejích).

Nejdůležitější a v technické praxi zároveň nejvyužitelnější skupinou kapalných maziv jsou homogenní směsi neboli mazací oleje. Skládají se ze základního oleje s přídavkem aditiv. Základní olej nese charakteristické vlastnosti (např. snížení tření, protikorozní ochrana, chlazení) a aditivum tyto vlastnosti ještě zlepšuje. Vzhledem k možnosti jejich široké modifikace se využívají např. jako oleje pro motory silničních vozidel, letecké motory, převodovky, kompresory, ložiska, brzdy, ale i jako oleje pro obrábění a tváření kovů. [3, 5, 12, 15]

### **Plynná maziva**

Jak již název napovídá, jedná se o maziva v plynném skupenství, jako je např. vzduch či helium. Používají se zejména pro mazání vysokorychlostních plynných ložisek pracujících při vysokých teplotách – až 1000 °C. Vzhledem k jejich nepříliš frekventovanému využití jim v této práci nadále nebude věnována pozornost. [12]

### **Maziva pro hluboké tažení**

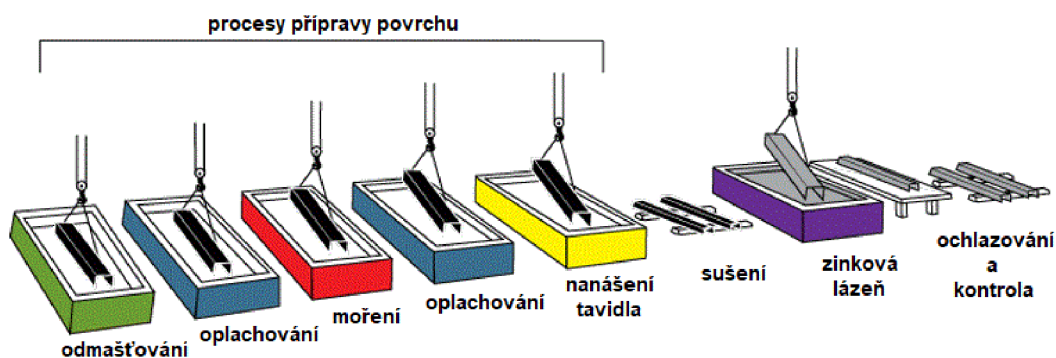
Využití maziv v technologii hlubokého tažení začíná již v samotných hutích při výrobě ocelových svitků. Zde jsou na plechy nanášena tzv. konzervační maziva, která mají za úkol ochránit je před korozí a dalšími vnějšími vlivy během jejich přepravy do místa zpracování. Před samotným zpracováním se plechy opatřují pracími oleji, které zbaví povrch případných nečistot a zároveň díky svým dobrým třecím vlastnostem slouží jako technologické mazivo k tažení. Proces tažení lze nadále podpořit využitím tzv. tažných maziv, která v aplikovaných místech významně sníží koeficient tření. [5]

Maziva se na povrch plechu určeného k tažení nanášejí hned několika možnými způsoby závislými na charakteru samotného maziva. Pokud je totiž mazivo dostatečně nízkoviskózní, využije se nástřiku maziva pomocí mazacích trysek. Tímto způsobem lze opatřit mazivem předem určená místa plechu, zejména pak místa s předpokládaným nejvyšším stupněm namáhání během tažení. Pro nanášení více viskózních maziv se využívá válečku, jenž je naplněn mazivem a na svém povrchu má otvory, kterými mazivo během odvalování po povrchu plechu proniká. Posledním způsobem jsou pak prací stroje, které nanášejí prací oleje buď ponorem nebo ostříkem plechu pomocí definovaného tlaku. [16]

## 2.5 Ochranné povlaky plechů

Jak je známo, kovové materiály podléhají korozi, která má za následek jejich znehodnocování. Aby se tomuto nechtěnému jevu předešlo, tak se konkrétně plechy opatřují ochrannými povlaky, a to ideálně bezprostředně po jejich výrobě. V praxi nejpoužívanější jsou Zn povlaky, které chrání plech zejména před atmosférickou korozí. K jejich nanášení na povrch plechu dochází buď ponorem plechu do lázně roztaveného Zn (HDG – Hot-Dip Galvanizing) či využitím elektrolýzy (EG – Electrolytic Galvanizing). [17]

Žárové zinkování HDG probíhá ponorem oceli do lázně (cca 440 °C) s roztaveným Zn. Výsledkem je vytvoření řady intermetalických vrstev Zn-Fe a vnější vrstvy čistého Zn. Ponořování do Zn lázně předchází přípravy povrchu a celý proces lze vidět na obr. 8. Výhody této metody jsou v její snadné proveditelnosti, nízké environmentální náročnosti a v neposlední řadě v životnosti Zn povlaku. Nevýhodou může být v určitých případech vzhled Zn vrstvy, proto se v aplikacích s důrazem na pohledové vlastnosti povrch plechu nadále upravuje např. lakováním. [18]



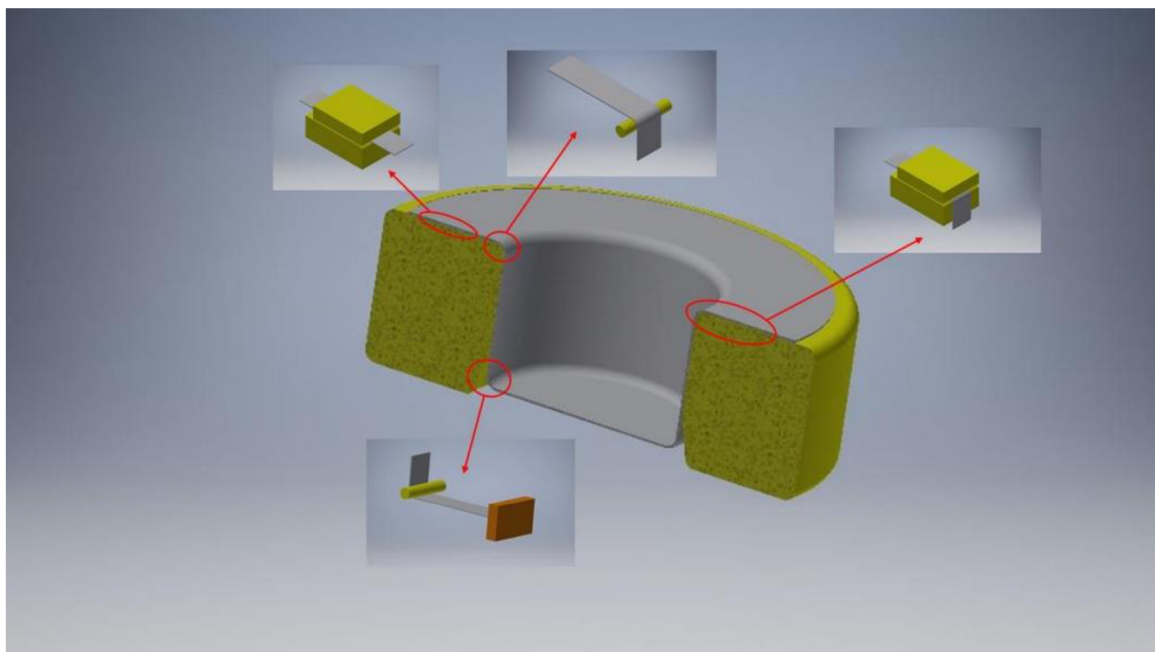
**Obr. 8 Proces žárového zinkování HDG [18]**

Elektrolytické neboli galvanické zinkování EG využívá známé metody elektrolýzy. Ta zahrnuje ponoření oceli (katoda) a inertní anody do vodného roztoku obsahujícího rozpuštěné soli Zn. Přivedením elektrického proudu se rozpuštěný Zn vylučuje na povrch oceli a vytváří zde souvislou vrstvu. Výhody elektrolytického zinkování jsou v lepších pohledových vlastnostech Zn vrstvy a v její vysoké houževnatosti při dalším zpracování plechu tvářením. Tato metoda má však s ohledem na dnešní dobu velkou nevýhodu ve své vysoké environmentální náročnosti, neboť se v jejím procesu používají kyselinové lázně, jejichž likvidace životní prostředí významně zatěžuje. [19]

## 2.6 Tribologické zkoušky maziv a ochranných povlaků

V technické praxi, zejména pak v technologii tažení plechů, dochází ke vznikům velice složitých tribologických systémů. Technologové musejí při návrzích výroby zohledňovat geometrii, materiál a strukturu povrchu třecích těles, druh a hodnoty zatížení, deformace, opotřebení a mimo jiné také použití vhodných maziv a ochranných povlaků. Všechny tyto procesní aspekty mají vliv na hodnoty třecích parametrů.

V rámci přípravy technologického zpracování plechů tažením lze využít hned několika tribologických testů k hodnocení maziv – viz obr. 9. Každý z těchto testů se cíleně omezuje na simulaci pouze určité části technologického procesu, neboť sestavit komplexní test je velmi obtížné. Mezi tyto testy patří zejména modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem, modelování tření na tažné hraně, modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou a ostatní.



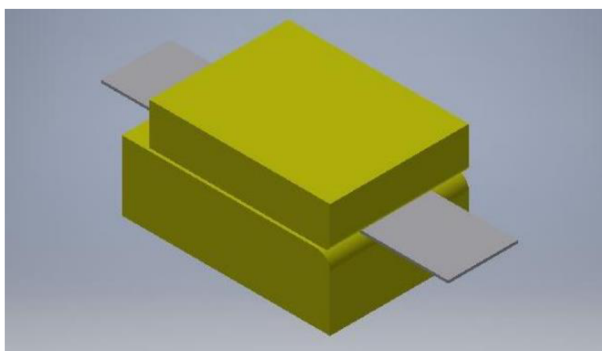
*Obr. 9 Ukázky modelování tření v technologii tažení plechů [20]*

### 2.6.1 Modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem

Jedná se o nejčastěji využívaný test při simulaci tření mezi tažnicí a přidržovačem. Test spočívá v protahování pásku testovaného materiálu mezi zkušebními čelistmi – viz obr. 10. Výhoda tohoto testu je v jednoduchosti nastavení

zkušebních podmínek jako je rychlost posuvu pásku  $v$  a velikost kontaktního tlaku  $p$ , vyvolaného působením normálové síly  $F_N$ . Dále ve snadném měření třecí síly  $F_T$ . Koeficient tření  $\mu$  se následně vypočte z naměřených hodnot. Nevýhodou je však skutečnost, že během testu nedochází k výrazné plastické deformaci testovaného materiálu jako je tomu v reálných podmínkách tažení a také zcela neodpovídá napjatost materiálu. [21]

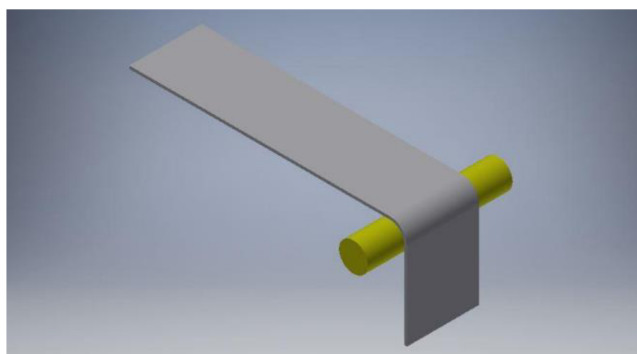
Zmíněný tribologický test je součástí experimentu této bakalářské práce, proto bude nadále specifikován v praktické části jako zkouška protahováním pásku.



**Obr. 10 Modelování tření mezi tažnicí a přídržovačem [20]**

## 2.6.2 Modelování tření na tažné hraně

Principem tohoto testu je tažení zkušebního pásku konstantní rychlostí  $v$  přes tažnou hranu tažnice, kterou zde představuje váleček o poloměru  $R$  – viz obr. 11. Dalšími okrajovými podmínkami jsou velikost brzdící síly  $F_{BR}$ , úhel opásání  $\alpha$ , koeficient tření  $\mu$  na tažné hraně a samozřejmě mechanické vlastnosti pásku. Pro výpočet tribologických poměrů je třeba vypočítat velikost tažné síly potřebné k udržení konstantní rychlosti tažení pásku. [21]

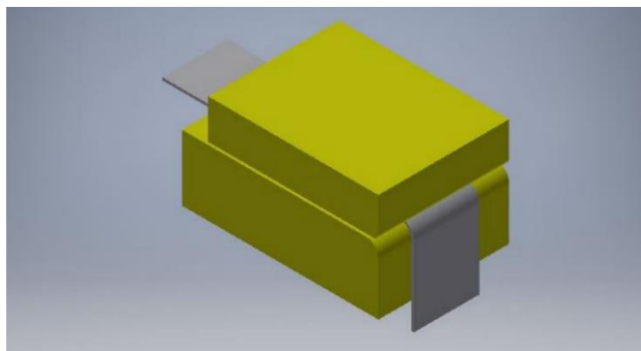


**Obr. 11 Modelování tření na tažné hraně [20]**



### 2.6.3 Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou

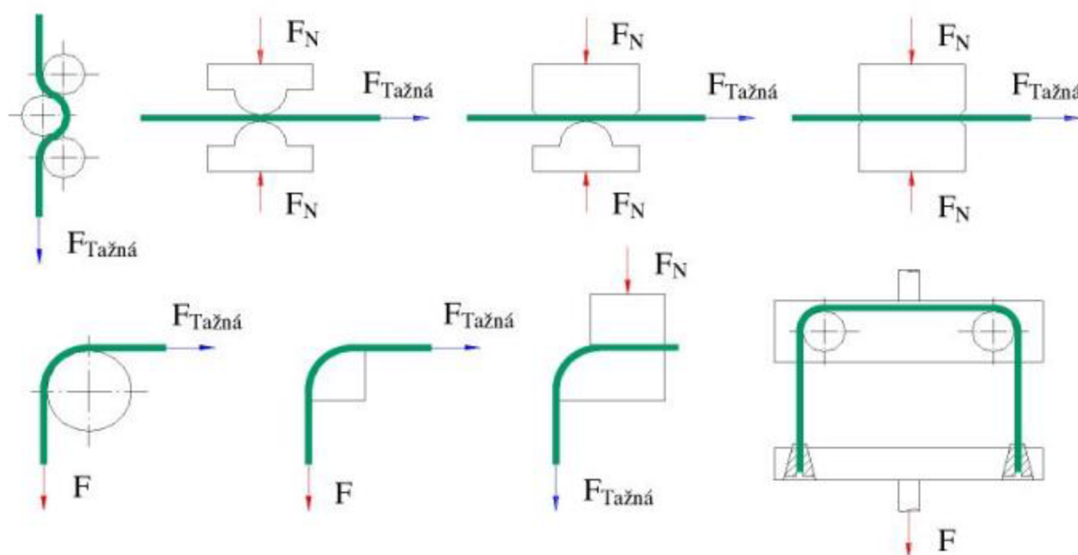
Tento test představuje kombinaci již zmíněných testů a sdílí tedy jejich výhody a nevýhody. Hodnocení tribologických poměrů vyplývá opět z velikosti tažné síly potřebné k protažení pásku mezi zkušebními čelistmi – viz obr. 12. [21]



Obr. 12 Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou [20]

### 2.6.4 Další tribologické zkoušky plechů

V praxi existují ještě další tribologické zkoušky plechů. Jedná se však o určité modifikace či kombinace již zmíněných tribologických zkoušek a z většiny jde o zkoušky technologické. Schématické znázornění dalších z nich lze vidět na obr. 13.



Obr. 13 Schémata dalších tribologických zkoušek maziv a ochranných povlaků [22]

## 2.7 Deformace kovových materiálů

Kovovými materiály se rozumí takové pevné látky, jejichž primární složkou je kovový prvek (Fe, Cu, Al, Ti, Zn, Cr, atd.). Při jejich výrobě nelze dosáhnout absolutně čistého kovu, a proto se vždy jedná o slitiny více kovů. Přítomností sekundárních složek lze řízeně ovlivňovat jejich mechanické vlastnosti. V praxi to znamená, že lze vyrábět kovové materiály v širokém spektru mechanických vlastností, což je řadí do skupiny velmi univerzálních technických materiálů. [23]

V technické praxi je již zvykem dělit vlastnosti kovových materiálů na vlastnosti fyzikální (hustota, elektrické vlastnosti atd.), technologické (tvárnost, obrobitelnost, svařitelnost, slévatelnost) a mechanické. Právě mechanické vlastnosti daného kovového materiálu určují jeho chování při působení vnějších mechanických sil, což může mít za následek deformaci materiálu, projevující se změnou tvaru. [24]

Mezi základní mechanické vlastnosti kovů patří: [25]

- pružnost,
- pevnost,
- houževnatost,
- tvárnost.

Mechanické vlastnosti kovových materiálů se nejčastěji zjišťují statickou zkouškou tahem. Ta spočívá v upnutí zkušební vzorku s danou geometrií do čelistí trhačického stroje a následném prodlužování zkušební vzorku až do jeho přetržení. Během zkoušky se zaznamenává tažná síla  $F$  a změna délky  $\Delta L$ , z čehož se následně vypočítá závislost smluvního napětí  $R$  na poměrném prodloužení  $\varepsilon$ . Tyto veličiny jsou popsány rovnicí (1):

$$R = \frac{F}{S_o} \quad (1)$$

Kde:  $R$  - smluvní napětí [MPa],  
 $F$  - zatěžující síla [N],  
 $S_o$  - počáteční průřez zkušební vzorku [mm<sup>2</sup>].

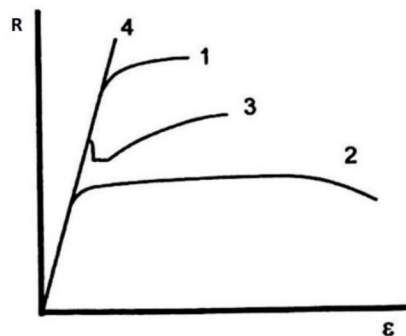


Poměrné prodloužení zkušebního vzorku popisuje rovnice (2) následovně:

$$\varepsilon = \frac{L - L_o}{L_o} = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (2)$$

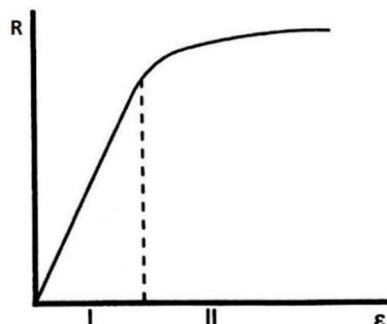
Kde:  $\varepsilon$  - poměrné prodloužení [1],  
 $L$  - konečná délka zkušebního vzorku [mm],  
 $L_o$  - počáteční délka zkušebního vzorku [mm],  
 $\Delta L$  - změna délky zkušebního vzorku [mm].

Výsledkem tahové zkoušky je tahový diagram závislosti zmíněných veličin. Různé tvary tahových křivek dle mechanických vlastností kovu jsou ilustrativně znázorněny na obr. 14.



**Obr. 14** Možné průběhy tahových křivek (1 - materiál pevný a málo tvárný, 2 – materiál tvárný a málo pevný, 3 – materiál s výraznou mezí kluzu, 4 – materiál křehký) [23]

Tahový diagram je zpravidla rozdělen na dvě oblasti deformací a to pružnou (vratnou) deformaci a plastickou (nevratnou) deformaci – viz obr. 15.



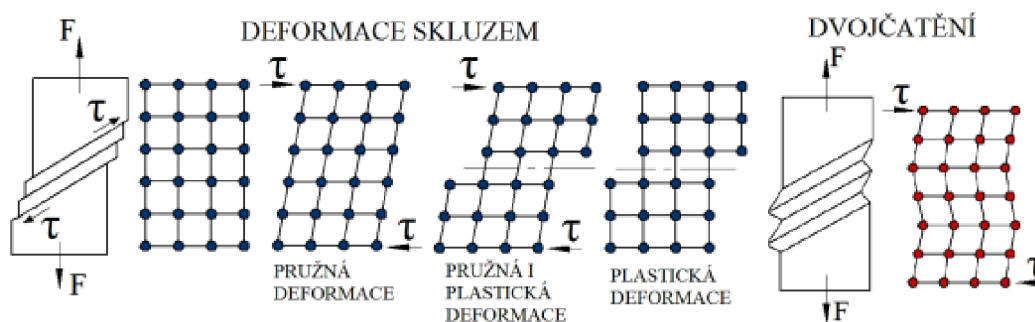
**Obr. 15** Rozdělení tahového diagramu na oblasti pružné (I) a plastické (II) deformace [23]

V oblasti pružné deformace se kov působením tahové síly deformuje a po odlehčení navrátí svůj původní tvar. „Na atomární úrovni je tato deformace spojena pouze s malým vychýlením atomů z rovnovážných poloh.“ [23] Důležitým poznatkem v oblasti pružné deformace je, že zde platí lineární závislost napětí na poměrném prodloužení, což popisuje Hookův zákon v rovnici (3):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Kde:  $\sigma$  - napětí [MPa],  
 $E$  - Youngův modul pružnosti [MPa].

V oblasti plastické deformace se kov deformuje již nevratně. K dosažení plastické deformace je třeba překonat smluvní napětí meze kluzu. Základními mechanismy plastické deformace kovů jsou skluz a dvojčatění – viz obr. 16. Skluz je realizován pohybem mřížkových poruch – dislokací podél roviny skluzu a ve směru skluzu. Dojde přitom ke vzájemnému posunutí dvou částí krystalu a na hranicích zrn se toto projeví vytvořením stupínku. V druhém případě plastické deformace dvojčatěním dochází k přesunu atomů o meziatomární vzdálenosti. Přitom dojde ke vzájemnému natočení dvou částí mřížky kolem jejich roviny symetrie. [24]



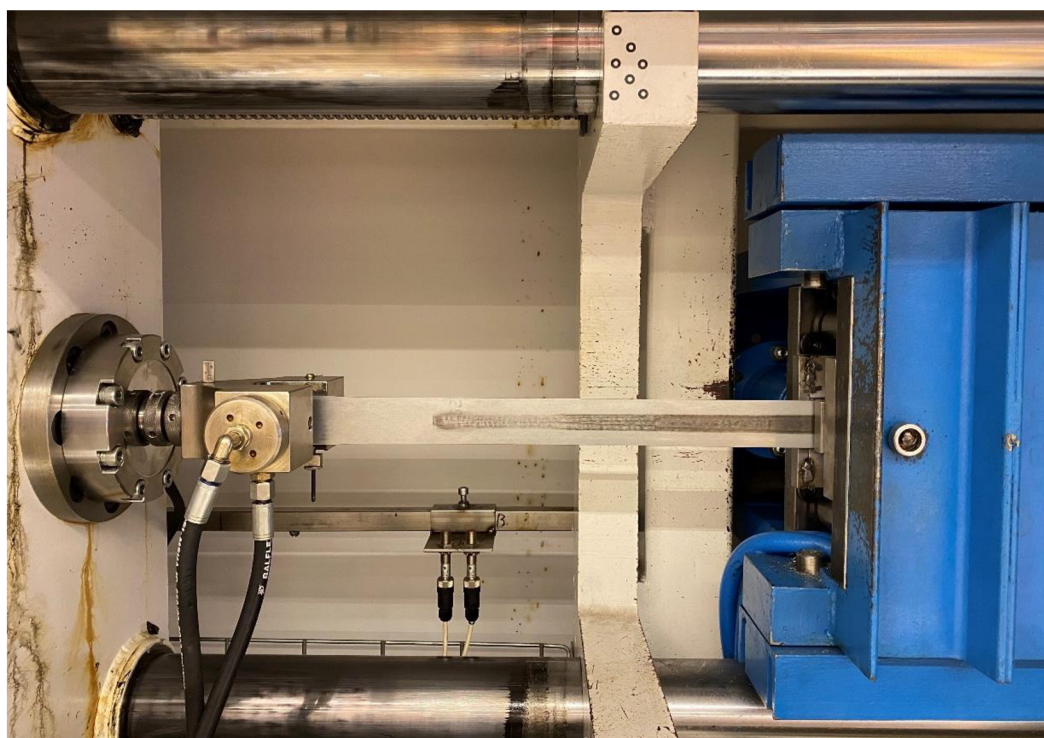
**Obr. 16 Plastická deformace: skluz a dvojčatění [26]**

Existuje však ještě třetí mechanismus plastické deformace, který se nazývá tečení neboli creep. Dochází k němu především při malých rychlostech deformace a zvýšené teplotě. Tečení se projevuje posuvem celých zrn ve směru zátěžné síly. Nedochází přitom k deformacím zrn. [25]

### 3 Praktická část

Cílem praktické části této bakalářské práce bylo experimentální stanovení vlivu deformace na změnu tribologické vlastnosti – koeficientu tření  $\mu$ . V první řadě jsou popsány přípravy testovacích vzorků – plechových pásků, které byly před samotným testováním nastříhány, odmaštěny, zdeformovány a měřila se drsnost jejich povrchu. Následně je přiblížena metodika tribologické zkoušky protahováním pásku na testovacím zařízení SOKOL 400 (viz obr. 17), včetně popisu jeho konstrukčního uspořádání. Nakonec jsou již shrnuty výsledky samotného testování všech tří druhů vzorků – bez deformace, s 10% a s 20% deformací.

Po samotném testování je provedena analýza kvality povrchu s ohledem na jeho drsnost. Výsledky testování, především pak hodnoty koeficientu tření  $\mu$ , jsou následně porovnány – graficky a také procentuálně vzhledem k referenční hodnotě – vzorku bez deformace. Závěrem je provedeno statistické vyhodnocení dat pomocí dvoufaktorové analýzy rozptylu ANOVA.



**Obr. 17 Ukázka průběhu tribologické zkoušky protahováním pásku na zařízení SOKOL 400**

### 3.1 Příprava testovacích vzorků

Nejprve bylo třeba připravit si testovaný materiál, kterým byl ocelový přístřih od výrobce Tata Steel IJmuiden<sup>2</sup> s HDG povrchovou úpravou. Z něj se nastříhalo celkem 24 kusů pásků na šířku 45 mm. Délka pásku byla 850 mm. Stříhání proběhlo na elektromechanických tabulových nůžkách MS 2504 (viz obr. 18) a všechny stříhy byly provedeny kolmo (90°) na směr válcování.



**Obr. 18 Elektromagnetické tabulové nůžky MS 2504**

Nastříhané pásky se následně vyskládaly do úložného rámu a připravilo se pracoviště odmašťovací lázně – viz obr. 19. Odmašťování v tomto případě slouží jakožto chemická úprava povrchu k odstranění konzervačního oleje a případných povrchových nečistot. Rám s pásky se ponořil do odmašťovací lázně, kam byl přiveden stlačený vzduch. Díky probublávání plynu došlo k intenzivnímu odmaštění povrchu

---

<sup>2</sup> Tata Iron and Steel Company Limited (TISCO) je dle svých dat geograficky nejvíce diverzifikovaným výrobcem oceli na světě s výrobními závody ve 26 státech. Dále uvádí, že ve výrobním závodě ve městě IJmuiden (Nizozemsko) dokáže vyrobit 7 500 000 tun/rok svitků válcovaných za tepla/za studena v různých povrchových úpravách.



pásků během cca 20 min. Poté byl rám s pásky z odmašťovací lázně vyjmut a uložen na sušící pult, kde se pásky na vzduchu samovolně vysušily.



**Obr. 19 Pracoviště odmašťovací lázně**

Poslední přípravnou operací před tribologickou zkouškou protahováním pásku byla plastická deformace testovacích vzorků. První skupina vzorků byla prodloužena o hodnotu  $\varepsilon = 10\%$ , druhá skupina o hodnotu  $\varepsilon = 20\%$  a třetí skupina zůstala v původní délce. Pro výpočet změny délky  $\Delta L$  deformovaného vzorku se využila již zmíněná rovnice (2), kde pro  $\varepsilon = 10\%$  platí, že:

$$0,1 = \frac{\Delta L_{10}}{850} \quad (4)$$

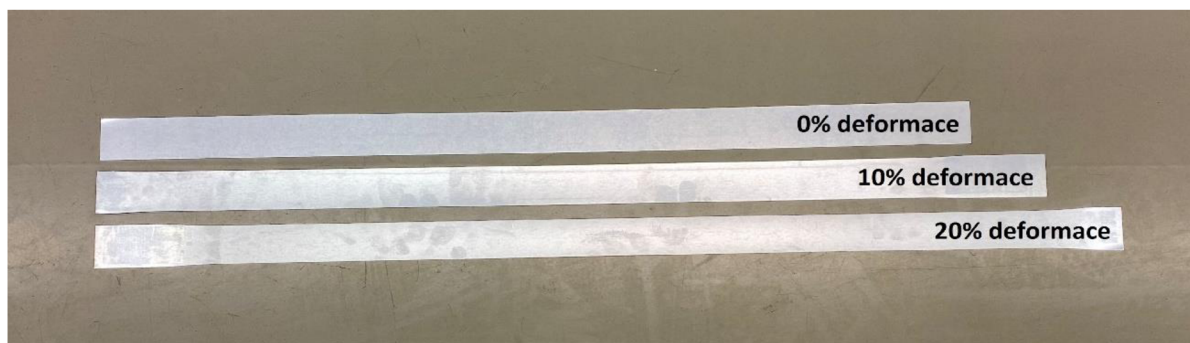
$$\Delta L_{10} = 85 \text{ mm} \quad (5)$$

Stejně tak pro  $\varepsilon = 20\%$  platí, že:

$$0,2 = \frac{\Delta L_{20}}{850} \quad (6)$$

$$\Delta L_{20} = 170 \text{ mm} \quad (7)$$

Poměrné prodloužení deformovaných vzorků bylo provedeno, stejně jako tribologická zkouška protahováním pásku, na zařízení SOKOL 400. Nejprve se vymežila vzdálenost mezi upínacími a testovacími čelistmi tak, aby oba páry čelistí svíraly vzorek na jeho koncích, a to tlakem  $p$  dostatečným k zamezení prokluzu. Rychlost posuvu  $v$  byla nastavena na 10 mm/s. Posuv příčnicku byl nastaven pro deformaci  $\varepsilon = 10\%$  na  $\Delta L_{10}$  a pro deformaci  $\varepsilon = 20\%$  na  $\Delta L_{20}$ . Všechny tři typy vzorků připravených na tribologickou zkoušku protahováním pásku lze vidět na obr. 20.



Obr. 20 Testovací vzorky připravené pro tribologickou zkoušku protahováním pásku

### 3.2 Mechanické vlastnosti testovaného materiálu

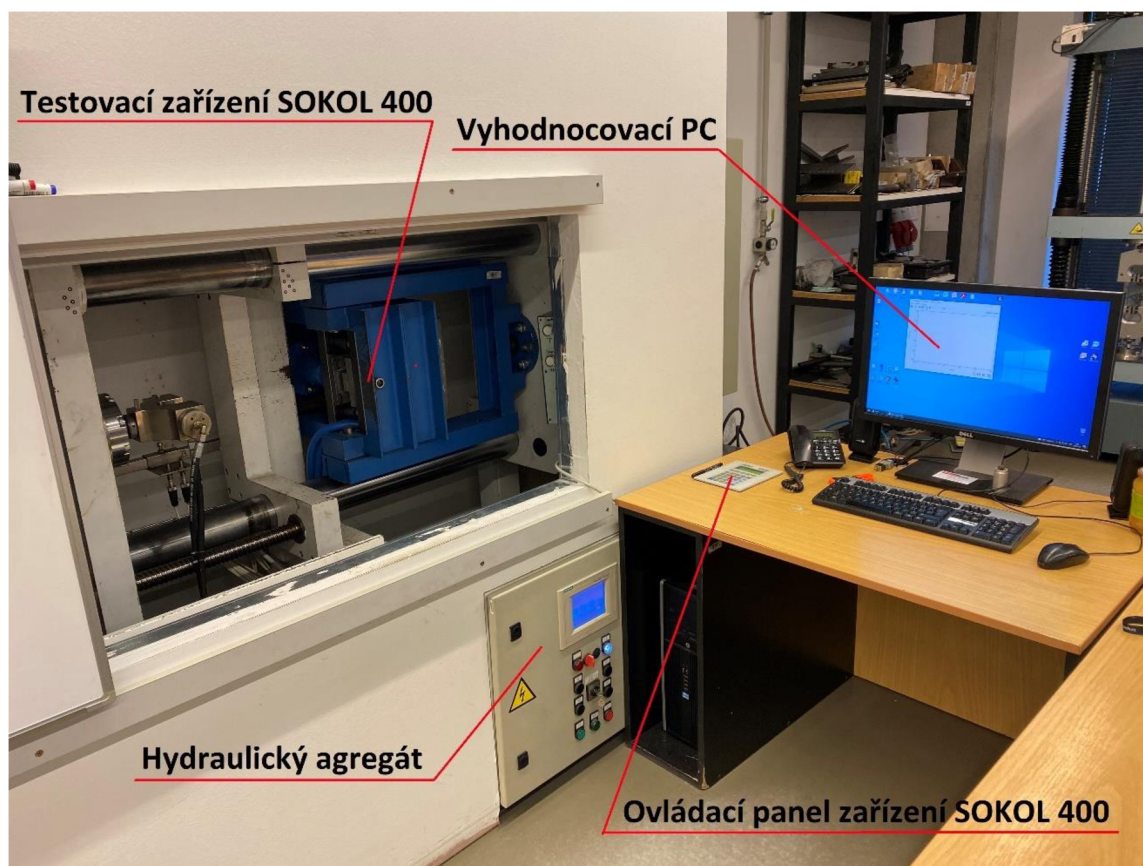
Před samotným testováním byly ještě zjištěny základní mechanické vlastnosti testovaného materiálu pomocí statické zkoušky tahem. Tahovou zkouškou prošlo celkem 5 vzorků od každého směru válcování -  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vzhledem ke směru válcování plechu. Vzorky byly nastříhány na tabulových nůžkách MS 2504, stejně jako testovací vzorky pro tribologickou zkoušku protahováním pásku. Průměrné hodnoty smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ , meze pevnosti  $R_m$ , homogenní tažnosti  $A_g$  a celkové tažnosti  $A_{80mm}$  jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Základní mechanické vlastnosti testovaného materiálu

Směr válcování	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80mm}$ [%]
$0^\circ$	140,50	284,40	26,58	47,50
$45^\circ$	150,10	292,30	23,72	44,31
$90^\circ$	139,80	276,90	25,12	44,40

### 3.3 Zařízení SOKOL 400

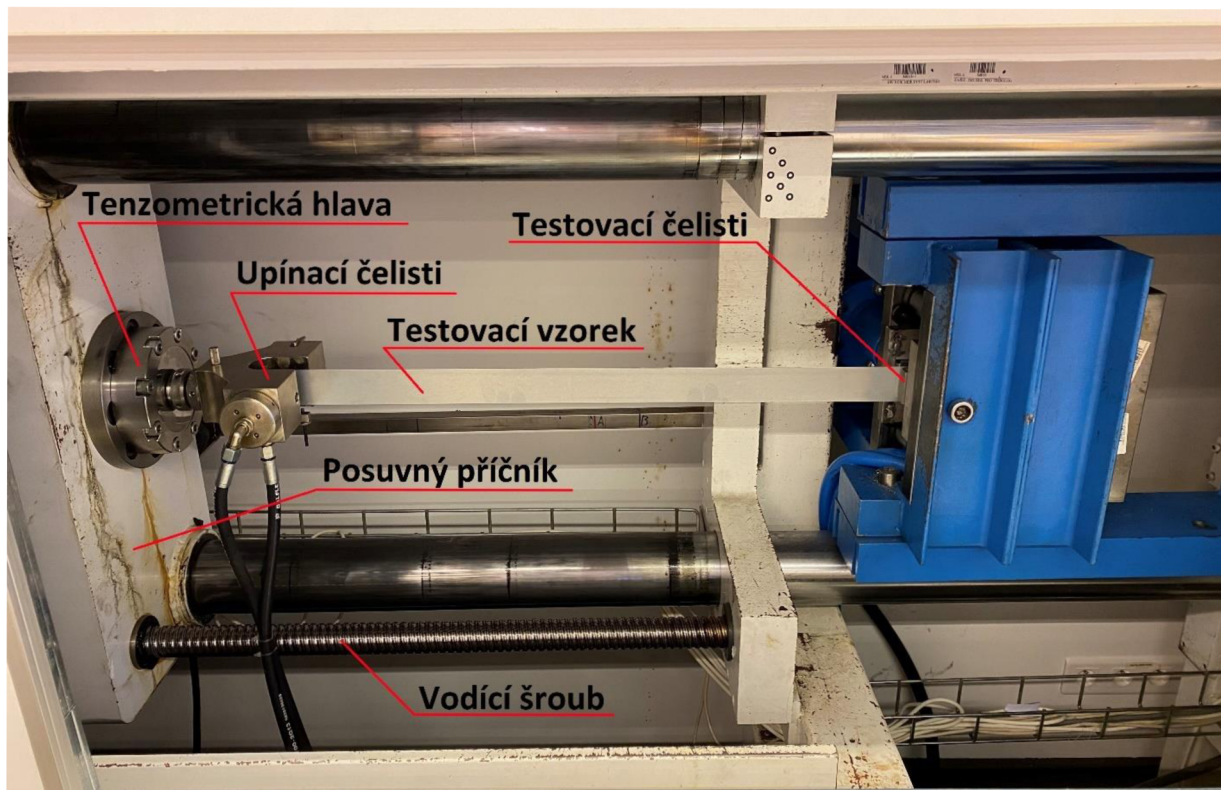
SOKOL 400 je vysokorychlostní testovací zařízení, na kterém se provádí tribologická zkouška protahováním pásku. Zařízení se skládá z mnoha jednotlivých částí – viz obr. 21. Jmenovitě jde o hydraulický agregát sloužící k vyvození tlaku obou párů čelistí, tepelný agregát (není na obrázku) sloužící k nastavení teploty testovacích čelistí, ovládací panel, vyhodnocovací PC a samozřejmě samotné testovací zařízení SOKOL 400.



**Obr. 21 Pracoviště testovacího zařízení SOKOL 400**

Bližším pohledem na zařízení SOKOL 400 lze pozorovat jeho konstrukční uspořádání – viz obr. 22. Testovací vzorek je na levé straně upnutý v hydraulických upínacích čelistech. Za těmito čelistmi je tenzometrická hlava sloužící k měření tažných sil potřebných k protažení vzorku mezi testovacími čelistmi. Tenzometrická hlava i upínací čelisti jsou usazeny v posuvném příčnicku, který pomocí vodícího šroubu vykonává posuvný pohyb definovanou rychlostí  $v$ . Na pravé straně testovací čelisti vyvozují na vzorek definovaný kontaktní tlak  $p$  pomocí hydraulického agregátu.





**Obr. 22** Konstrukční uspořádání testovacího zařízení SOKOL 400

Testovací zařízení SOKOL 400 je schopno protahovat testovací vzorek mezi testovacími čelistmi (viz obr. 23) definovanou rychlostí posuvu  $v$  (rozmezí od 1 mm/s do 400 mm/s). Kontaktní plochu  $S$  mezi vzorkem a testovacími čelistmi definuje geometrie čelistí, neboť jejich šířka je vždy menší než šířka vzorku.



**Obr. 23** Testovací čelisti (kontaktní plocha  $S = 20 \times 20 \text{ mm}^2$ )



### 3.4 Tribologická zkouška protahováním pásku

Tribologická zkouška protahováním pásku spočívá v protažení vzorku mezi testovacími čelistmi definovanou konstantní rychlostí posuvu  $v$ , přičemž čelisti svírají vzorek konstantní normálovou silou  $F_N$ , čímž vytvářejí na kontaktní ploše  $S$  definovaný kontaktní tlak  $p$  dle rovnice (8). Čelisti přitom za pomoci tepelného agregátu udržují konstantní teplotu  $T$ .

$$p = \frac{F_N}{S} \quad (8)$$

Kde:  $p$  - kontaktní tlak [MPa],  
 $F_N$  - normálová síla testovacích čelistí [N],  
 $S$  - kontaktní plocha [mm<sup>2</sup>].

Tribologická zkouška protahováním pásku slouží k experimentálnímu zjištění tribologických vlastností testovaného materiálu, zejména pak k výpočtu koeficientu tření  $\mu$  dle rovnice (9).

$$\mu = \frac{F_T}{2 \cdot p \cdot S} \quad (9)$$

Kde:  $\mu$  - koeficient tření [1],  
 $F_T$  - tažná síla [N].

Výsledkem zkoušky je pak závislost tažné síly  $F_T$  na měřené dráze  $l$ . Tažnou sílu  $F_T$  z rovnice (9) lze následně modifikovat pro účely podrobnějších výpočtů. Další (modifikované) druhy tažných sil jsou uvedeny v tab. 2.

Měřená dráha  $l$  testovacího vzorku má svou tzv. ustálenou oblast (30–100 mm) v každém měřeném kontaktním tlaku  $p$ . Tímto je zajištěno, že vyhodnocované síly  $F_h$ ,  $F_s$  a  $\Delta F$  reflektují hodnoty po ustálení a zamezují tím vlivu velikosti tažné síly při náběhu.

Jeden testovací cyklus zkoušky se provádí na daném vzorku všemi měřenými kontaktními tlaky  $p$ , které se diskrétně mění vždy po dráze  $l = 100 \text{ mm}$ .

**Tab. 2 Modifikované druhy tažných sil**

Označení	Název	Jednotky
$F_{max}$	maximální síla v celé měřené délce (0-100 mm)	[N]
$F_h$	maximální síla v ustálené oblasti (30-100 mm)	[N]
$F_s$	průměrná síla v ustálené oblasti (30-100 mm)	[N]
$\Delta F$	rozdíl max. a min. síly v ustálené oblasti (30-100 mm)	[N]

### 3.5 Parametry zkoušky

Tribologická zkouška protahováním pásku byla provedena dle vstupních parametrů uvedených v tab. 3. Proběhlo celkem 24 testovacích cyklů, z toho 8x vzorek bez deformace, 8x s 10% a 8x s 20% deformací. Na všechny vzorky bylo nanášeno mazivo Fuchs 39LV, jehož množství  $1,5 \pm 0,2 \text{ g/m}^2$  bylo ověřeno pomocí měřicího přístroje od firmy Infracytic GmbH.

**Tab. 3 Parametry zkoušky**

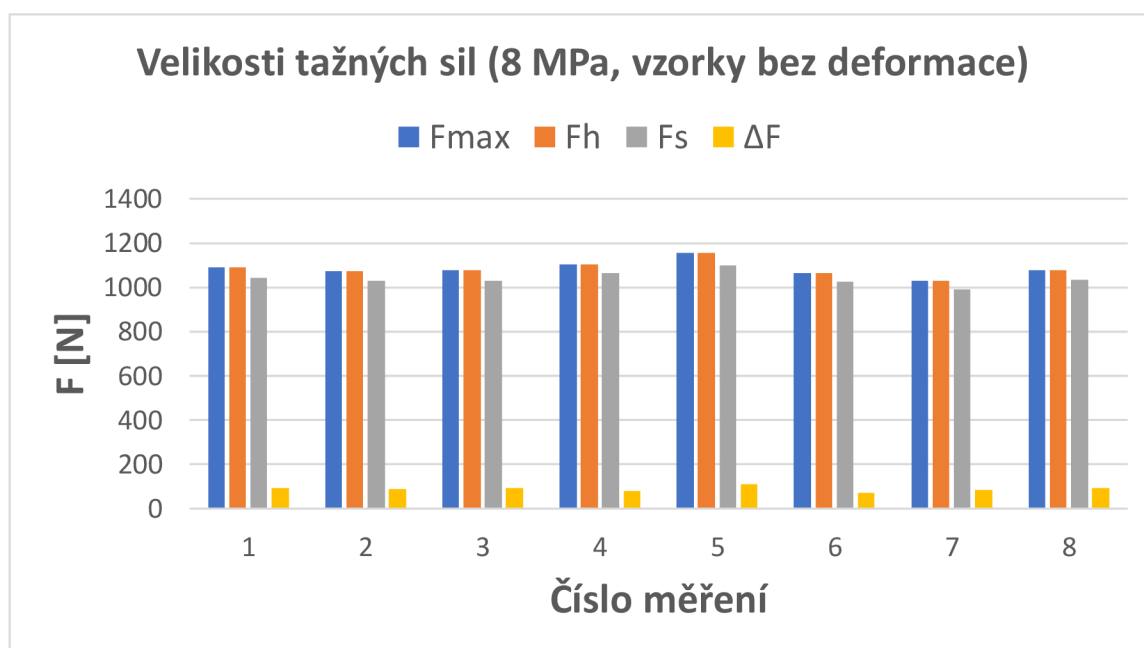
Parametry zkoušky	
Materiál vzorku	Hlubokotažná ocel DC05
Rozměr vzorku	45 x 850 mm
Počet druhů vzorků	3 (bez def., 10% a 20% def.)
Celkový počet vzorků	24
Množství maziva	$1,5 \pm 0,2 \text{ g/m}^2$
Mazivo	Fuchs 39LV
Kontaktní plocha čelistí	$S = 400 \text{ mm}^2$ (20 x 20 mm)
Teplota čelistí	$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
Kontaktní tlak	$p = 8, 23, 38, 53, 68 \text{ MPa}$
Rychlost posuvu	$v = 1 \text{ mm/s}$
Dráha měření	$l = 500 \text{ mm}$ (á 100 mm)

### 3.6 Výsledky testování vzorků bez deformace

Při testování vzorků bez deformace byly naměřeny tažné síly, jejichž velikosti při tlaku  $p = 8 \text{ MPa}$  jsou pro ukázkou uvedeny v tab. 4 a graficky znázorněny na obr. 24. Vypočítány jsou zde i jejich střední hodnoty  $\bar{x}$  a výběrové směrodatné odchylky  $s$ .

Tab. 4 Tažné síly pro kontaktní tlak 8 MPa – vzorky bez deformace

Číslo měření	$F_{max}$ [N]	$F_h$ [N]	$F_s$ [N]	$\Delta F$ [N]
1	1090	1090	1044	92
2	1074	1074	1029	90
3	1076	1076	1030	91
4	1101	1101	1062	78
5	1154	1154	1100	108
6	1063	1063	1026	73
7	1031	1031	990	83
8	1078	1078	1032	91
$\bar{x}$	1083	1083	1039	88
$s$	35	35	32	11



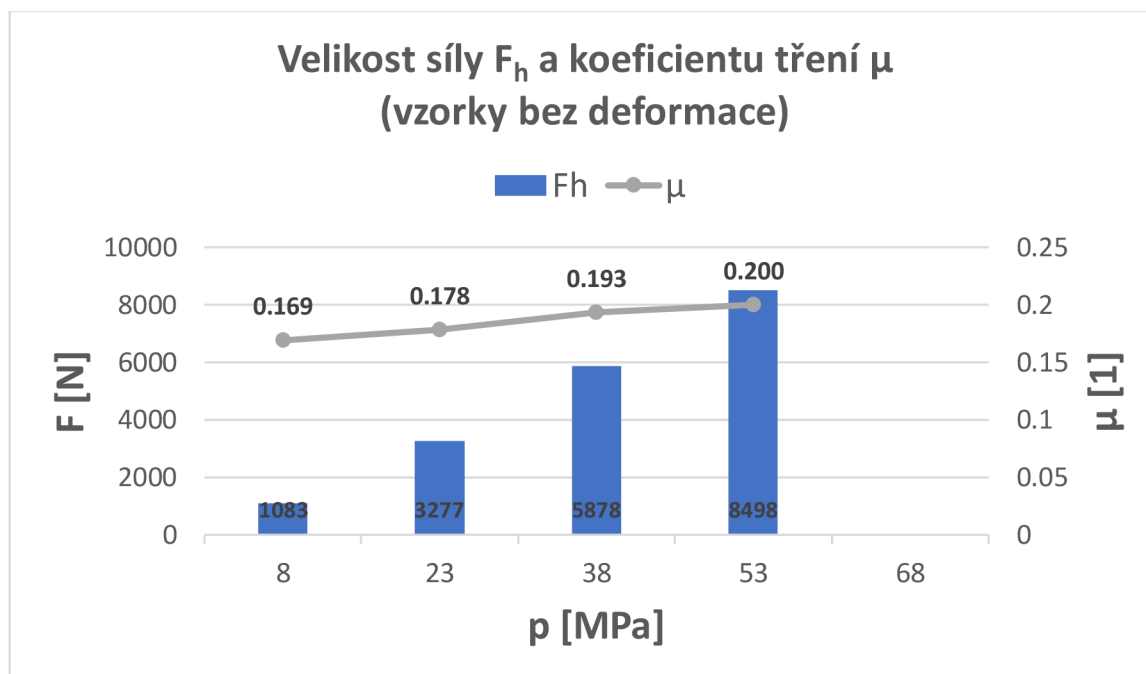
Obr. 24 Velikosti tažných sil (8 MPa, vzorky bez deformace)

Výpočet koeficientu tření  $\mu$  dle rovnice (9) se provádí dosazením maximální tažné síly v ustálené oblasti -  $F_h$ . V tab. 5 jsou uvedeny střední hodnoty  $\bar{x}$  a výběrové směrodatné odchytky  $s$  naměřených tažných sil  $F_h$  a vypočtených koeficientů tření  $\mu$  již v celé měřené délce  $l$  testovacího vzorku bez deformace, tedy pro všechny použité kontaktní tlaky  $p$ .

Tab. 5 Průměry a výběr. směrodatné odchytky síly  $F_h$  a koef. tření  $\mu$  – vzorky bez deformace

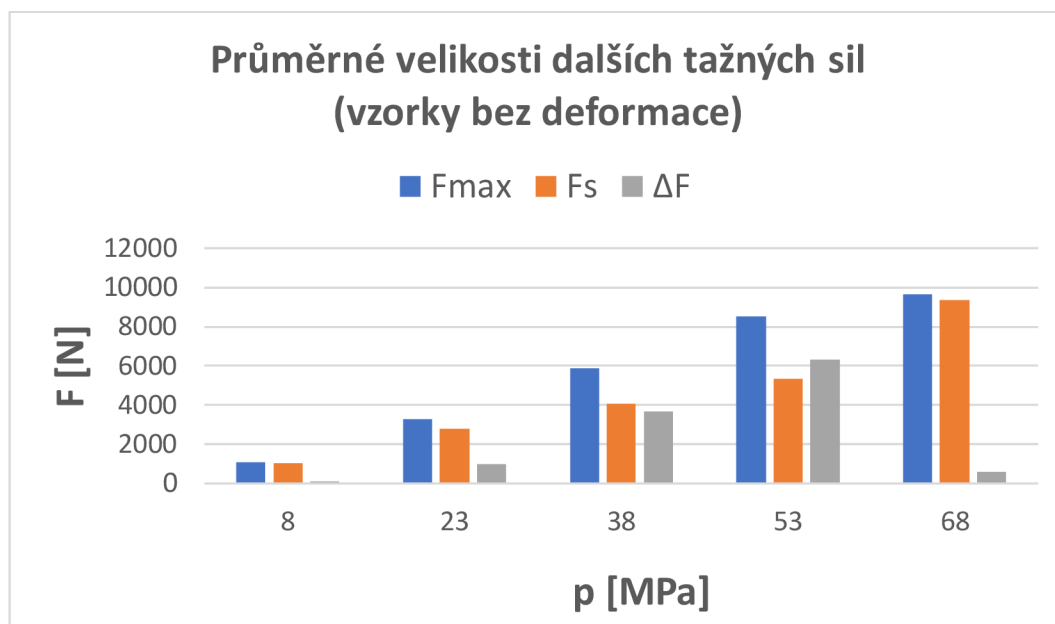
	Kontaktní tlak [MPa]									
	8		23		38		53		68	
	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]
$\bar{x}$	1083	0,169	3277	0,178	5878	0,193	8498	0,200	-	-
$s$	35	0,005	168	0,009	190	0,006	249	0,006	-	-

Průměrné hodnoty naměřených tažných sil  $F_h$  a vypočtených koeficientů tření  $\mu$  pro vzorky bez deformace jsou graficky znázorněny na obr. 25.



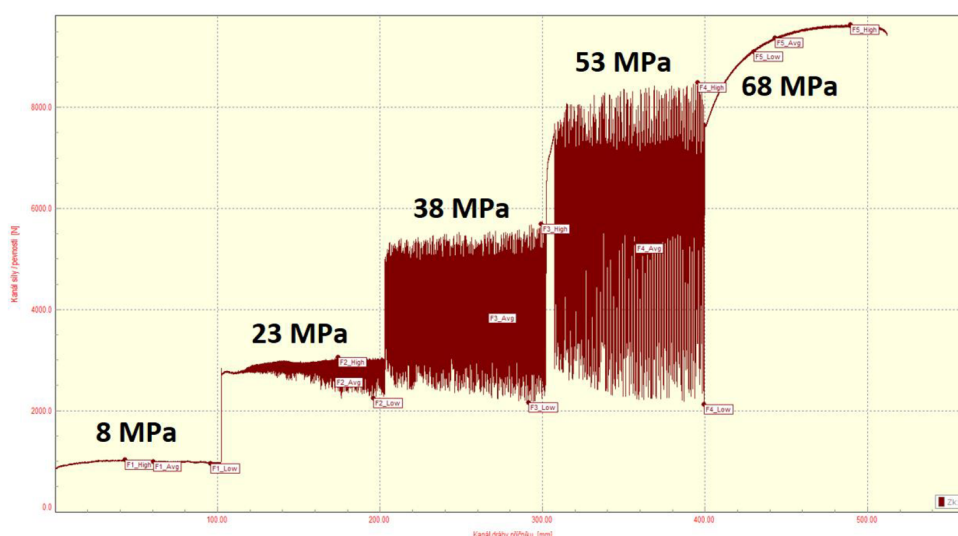
Obr. 25 Velikost síly  $F_h$  a koeficientu tření  $\mu$  (vzorek bez deformace)

Na obr. 26 jsou pak graficky znázorněny průměrné velikosti dalších tažných sil pro vzorky bez deformace.



**Obr. 26 Průměrné velikosti dalších tažných sil (vzorky bez deformace)**

Na obr. 27 je ukázka výchozího grafu závislosti tažné síly  $F_T$  na měřené dráze  $l$  při jednom testovacím cyklu vzorku bez deformace. Z tohoto grafu se odečítají další tažné síly uvedené v tab. 2. Graf je rozdělen na 5 úseků vždy po 100 mm (5 kontaktních tlaků). Každý úsek má po 30 mm své dráhy tzv. ustálenou oblast. Z grafu je patrné, že vzorek bez deformace se již v dráze 400–500 mm mezi čelistmi neprotahoval (v tab. 5 označeno –), nýbrž docházelo pouze k jeho prodlužování.



**Obr. 27 Graf závislosti tažné síly  $F_T$  na měřené dráze  $l$  (vzorek bez deformace)**

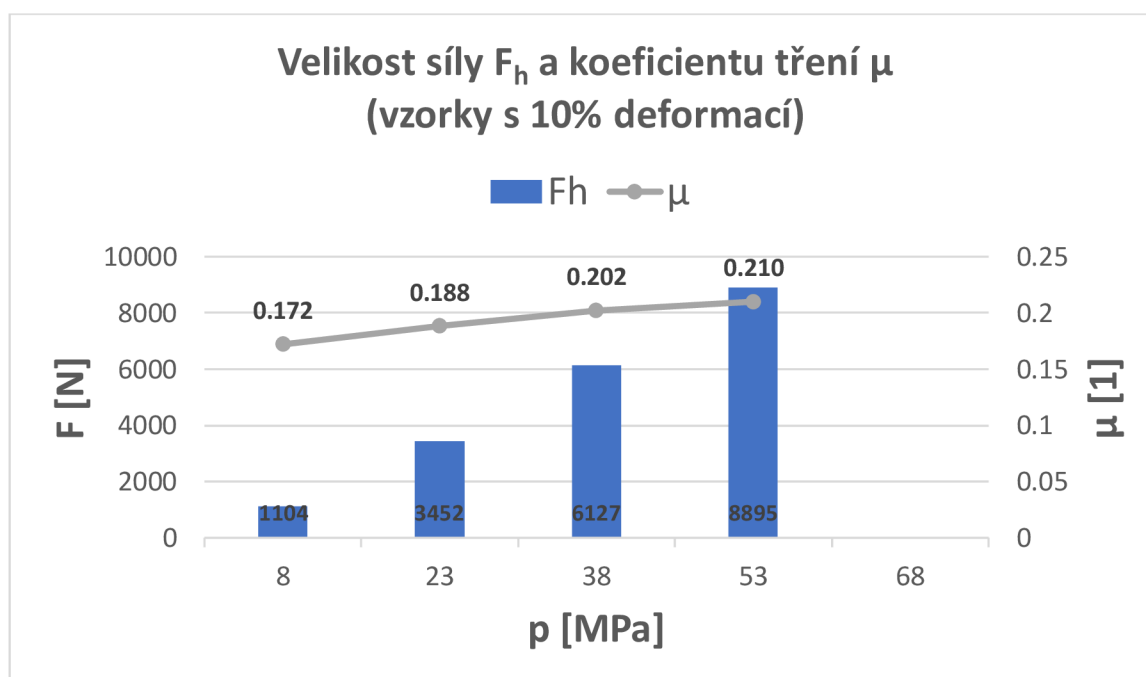
### 3.7 Výsledky testování vzorků s 10% deformací

Pro testovací vzorky s 10% deformací jsou zde v tab. 6 uvedeny již rovnou střední hodnoty  $\bar{x}$  a výběrové směrodatné odchylky  $s$  naměřených tažných sil  $F_h$  a vypočtených koeficientů tření  $\mu$  v celé měřené délce testovacího vzorku s 10% deformací, tedy pro všechny měřené kontaktní tlaky  $p$ .

Tab. 6 Průměry a výběr. směrodatné odchylky síly  $F_h$  a koef. tření  $\mu$  – vzorky s 10% deformací

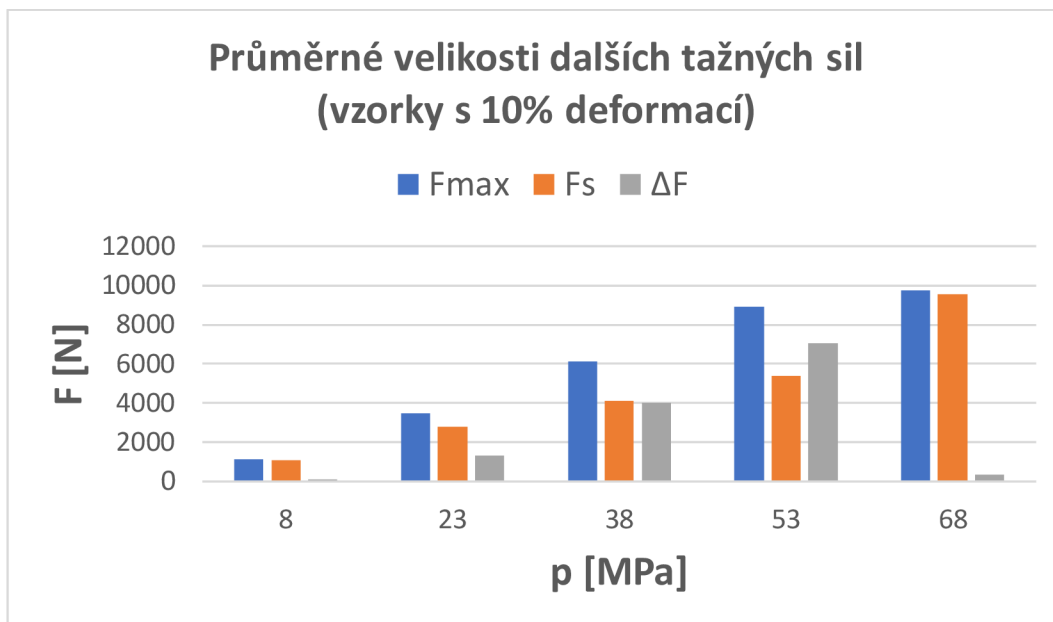
	Kontaktní tlak [MPa]									
	8		23		38		53		68	
	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]
$\bar{x}$	1104	0,172	3452	0,188	6127	0,202	8895	0,210	-	-
$s$	29	0,005	100	0,005	130	0,004	334	0,008	-	-

Průměrné hodnoty naměřených tažných sil  $F_h$  a vypočtených koeficientů tření  $\mu$  pro vzorky s 10% deformací jsou graficky znázorněny na obr. 28.



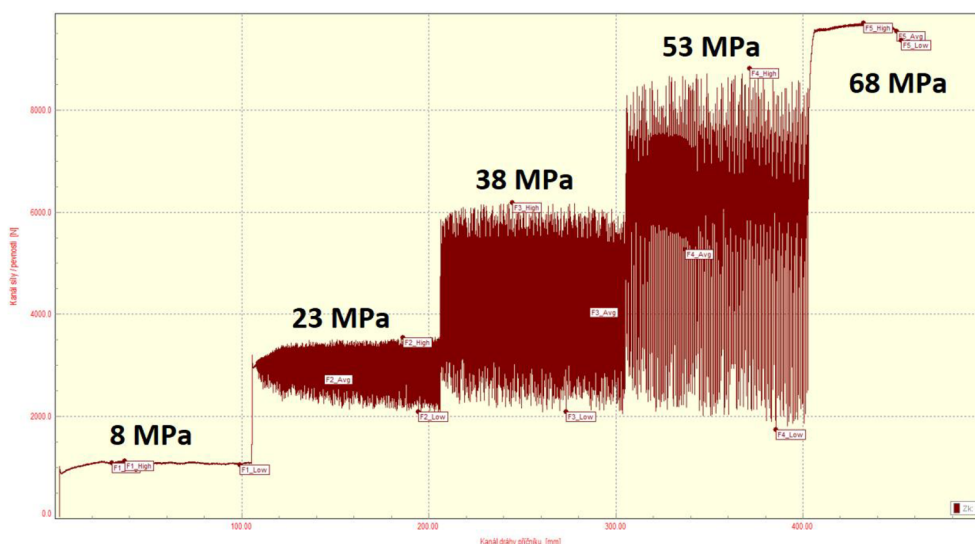
Obr. 28 Velikost síly  $F_h$  a koeficientu tření  $\mu$  (vzorky s 10% deformací)

Na obr. 29 jsou graficky znázorněny průměrné velikosti dalších tažných sil pro vzorky s 10% deformací.



**Obr. 29 Průměrné velikosti dalších tažných sil (vzorky s 10% deformací)**

Na obr. 30 je ukázka výchozího grafu závislosti tažné síly  $F_T$  na měřené dráze  $l$  při jednom testovacím cyklu vzorku s 10% deformací. Z grafu je patrné, že vzorek s 10% deformací se již v dráze 400–500 mm mezi čelistmi neprotahoval (v tab. 6 označeno –), nýbrž docházelo pouze k jeho prodlužování.



**Obr. 30 Graf závislosti tažné síly  $F_T$  na měřené dráze  $l$  (vzorek s 10% deformací)**

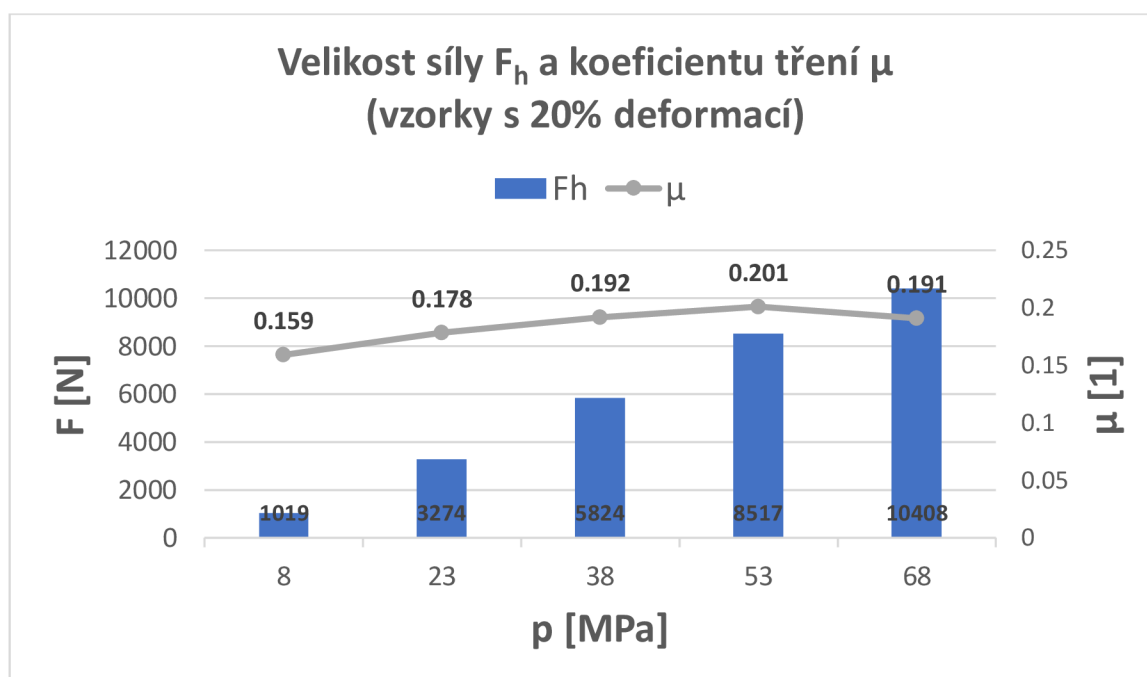
### 3.8 Výsledky testování vzorků s 20% deformací

Pro testovací vzorky s 20% deformací jsou zde na tab. 7 uvedeny opět střední hodnoty  $\bar{x}$  a výběrové směrodatné odchylky  $s$  naměřených tažných sil  $F_h$  a vypočtených koeficientů tření  $\mu$  v celé měřené délce testovacího vzorku s 20% deformací, tedy pro všechny měřené kontaktní tlaky  $p$ .

Tab. 7 Průměry a výběr. směrodatné odchylky síly  $F_h$  a koef. tření  $\mu$  – vzorky s 20% deformací

	Kontaktní tlak [MPa]									
	8		23		38		53		68	
	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]	$F_h$ [N]	$\mu$ [1]
$\bar{x}$	1019	0,159	3274	0,178	5824	0,192	8517	0,201	10408	0,191
$s$	48	0,007	142	0,008	243	0,008	401	0,009	678	0,012

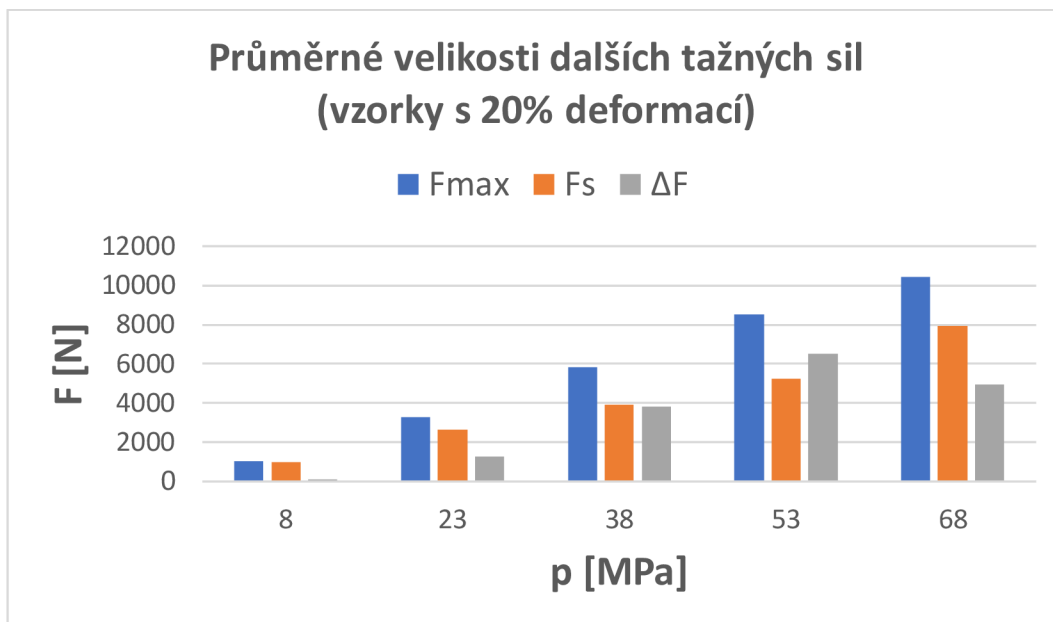
Průměrné hodnoty naměřených tažných sil  $F_h$  a vypočtených koeficientů tření  $\mu$  pro vzorky s 20% deformací jsou graficky znázorněny na obr. 31.



Obr. 31 Velikost síly  $F_h$  a koeficientu tření  $\mu$  (vzorky s 20% deformací)

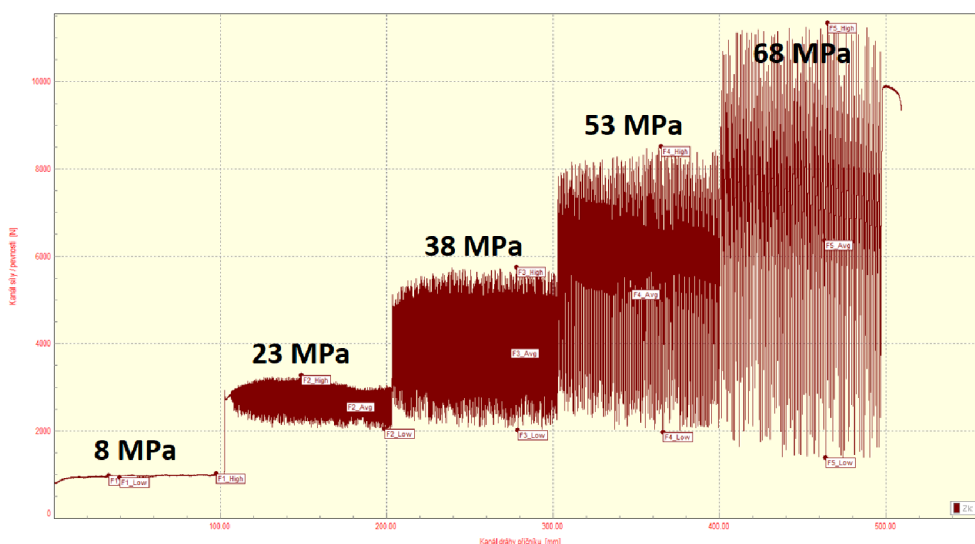


Na obr. 32 jsou graficky znázorněny průměrné velikosti dalších tažných sil pro vzorky s 20% deformací.



**Obr. 32 Průměrné velikosti dalších tažných sil (vzorky s 20% deformací)**

Na obr. 33 je ukázka výchozího grafu závislosti tažné síly  $F_T$  na měřené dráze  $l$  při jednom testovacím cyklu vzorku s 20% deformací. Z grafu je patrné, že vzorek s 20% deformací se mezi čelistmi protahoval i v posledním měřeném úseku 400–500 mm. Nicméně se také přetrhnul, a to vždy na konci tohoto úseku.



**Obr. 33 Graf závislosti tažné síly  $F_T$  na měřené dráze  $l$  (vzorek s 20% deformací)**

### 3.9 Analýza kvality povrchu po provedeném testování

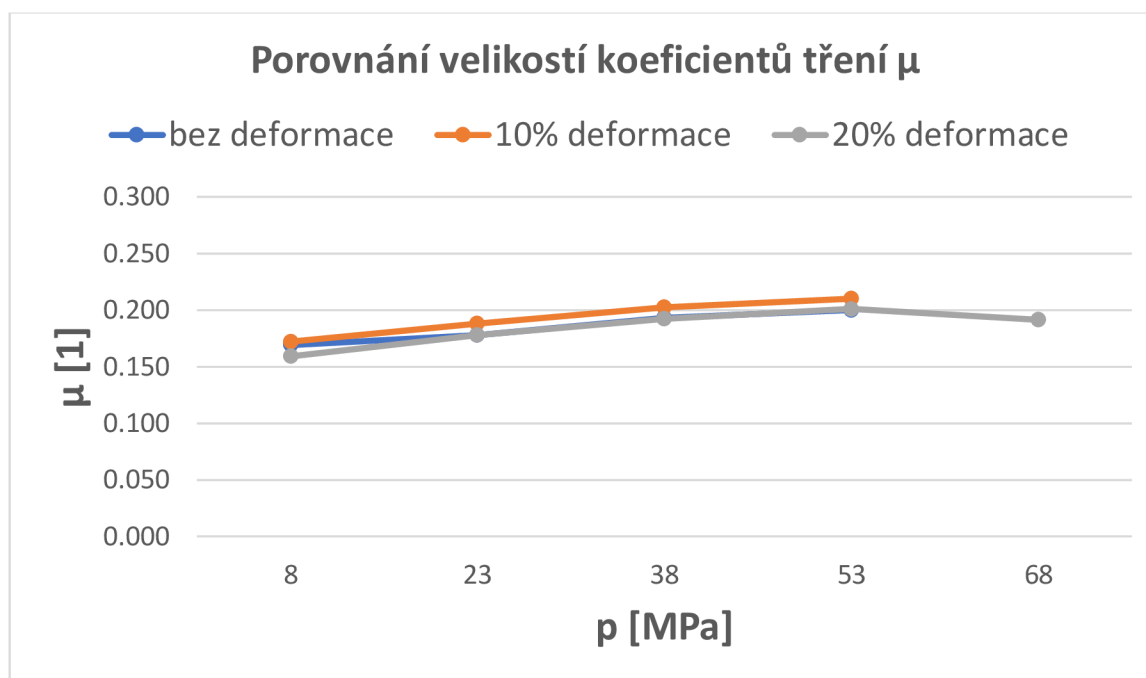
Kvalita povrchu se po provedeném testování analyzovala pomocí měření drsnosti povrchu, konkrétně pak na základě hodnot průměrné aritmetické úchyly profilu  $R_a$  a počtu vrcholů nad výškovou tolerancí na 1 cm povrchu  $RP_c$  – viz tab. 8. Měření bylo provedeno vždy 2x v podélném směru pomocí drsnoměru MarSurf PS1.

**Tab. 8 Hodnoty měření drsnosti povrchu vzorků**

Druh vzorku	Tlak [MPa]	Parametr	
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$RP_c$ [1/cm]
Bez deformace	<b>Před testováním</b>	<b>1,367</b>	<b>50</b>
	8	1,327	49
	23	1,274	47
	38	1,235	45
	53	1,171	44
	68	1,160	42
10% deformace	<b>Před testováním</b>	<b>1,501</b>	<b>46</b>
	8	1,486	44
	23	1,430	43
	38	1,352	40
	53	1,310	40
	68	1,264	39
20% deformace	<b>Před testováním</b>	<b>1,766</b>	<b>48</b>
	8	1,740	46
	23	1,689	45
	38	1,586	42
	53	1,502	41
	68	1,485	41

## 4 Diskuse výsledků

S ohledem na hlavní cíl této bakalářské práce – stanovení vlivu deformace na velikost koeficientu tření  $\mu$  je na obr. 34 grafické porovnání velikostí koeficientů tření  $\mu$  pro všechny tři druhy testovaných vzorků – vzorky bez deformace, s 10% a s 20% deformací, a to pro všechny měřené kontaktní tlaky  $p$ .



**Obr. 34 Grafické porovnání velikostí koeficientů tření**

Z grafu je zřejmé, že velikosti koeficientů tření  $\mu$  všech tří druhů testovaných vzorků jsou pro každý měřený kontaktní tlak  $p$  (vyjma tlaku  $p = 68 \text{ MPa}$ , ve kterém byly naměřeny tribologické veličiny pouze pro vzorek s 20% deformací) téměř totožné a na první pohled nevykazují významné rozdíly.

S ohledem na podrobnější porovnání velikostí koeficientů tření  $\mu$  testovaných vzorků bez, s 10% a s 20% deformací jsou v následující tab. 9 tyto veličiny porovnány procentuálně vzhledem k referenční hodnotě – vzorku bez deformace.

**Tab. 9 Procentuální porovnání koef. tření  $\mu$  (ref. hodnota vzorek bez def.)**

Tlak [MPa]	$\mu$ – bez deformace		$\mu$ – 10% deformace		$\mu$ – 20% deformace	
	[1]	[%]	[1]	rozdíl [%]	[1]	rozdíl [%]
8	0,169	100	0,172	<b>+1,78</b>	0,159	<b>-5,92</b>
23	0,178		0,188	<b>+5,62</b>	0,178	<b>0,00</b>
38	0,193		0,202	<b>+4,66</b>	0,192	<b>-0,52</b>
53	0,200		0,210	<b>+5,00</b>	0,201	<b>+0,50</b>
68	-		-	-	-	-

Zde je při porovnání vzorku bez deformace a vzorku s 10% deformací mírný nárůst hodnoty koeficientu tření  $\mu$  při tlaku  $p = 23 \text{ MPa}$  o 5,62 %, při tlaku  $p = 38 \text{ MPa}$  o 4,66 % a při tlaku  $p = 53 \text{ MPa}$  o rovných 5,00 %. Hodnota koeficientu tření  $\mu$  vzrostla také při tlaku  $p = 8 \text{ MPa}$ , nicméně však pouze o 1,78 %.

V případě porovnání hodnot koeficientů tření  $\mu$  vzorku bez deformace a vzorku s 20% deformací došlo nejprve při tlaku  $p = 8 \text{ MPa}$  k poklesu o 5,92 %. Následně se při tlaku  $p = 23 \text{ MPa}$  hodnota nezměnila. Nakonec se při tlaku  $p = 38 \text{ MPa}$  snížila o 0,52 % a při tlaku  $p = 53 \text{ MPa}$  se zvýšila o 0,50 %, nicméně tyto rozdíly se dají považovat za zanedbatelné.

Nyní je na místě přejít k porovnání naměřených hodnot drsnosti povrchů testovaných vzorků. Při porovnání hodnot průměrných aritmetických úchylek povrchu  $R_a$  před samotným tribologickým zkoušením, platí, že pro vzorek bez deformace je  $R_a = 1,367$ , pro vzorek s 10% deformací je  $R_a = 1,501$  a pro vzorek s 20% deformací je  $R_a = 1,766$ . Z těchto hodnot je patrná určitá závislost  $R_a$  na deformaci, a to taková, že hodnota  $R_a$  se s rostoucí deformací zvyšuje. Příčinou je pravděpodobně negativní vliv deformace na celistvost povrchové vrstvy Zn.

Porovnáním hodnot  $R_a$  a  $RP_c$  před, v průběhu a na konci testování (ve všech měřených kontaktních tlacích  $p$ ) lze dojít k závěru, že s rostoucím kontaktním tlakem  $p$  se hodnoty  $R_a$  a  $RP_c$  snižují. Z hlediska porovnání dat drsností před tribologickým měřením a po dosažení kontaktního tlaku  $p = 68 \text{ MPa}$  dochází zhruba k 15% poklesu.

## 4.1 Statistické vyhodnocení dat

V rámci statistického vyhodnocení dat jsou naměřená a vypočtená data podrobena statistické analýze rozptylu – dvoufaktorová ANOVA. Hladina významnosti testu je  $\beta = 5\%$ . Statistická analýza si klade za cíl ověřit statisticky významný vliv zvolených faktorů na hodnotu koeficientu tření  $\mu$ . Prvním faktorem je druh deformace – bez deformace, 10% deformace a 20% deformace. Druhým faktorem je velikost kontaktního tlaku  $p$  – 8, 23, 38, 53, 68 MPa. Výsledky dvoufaktorové analýzy rozptylu ANOVA jsou uvedeny v následující tab. 10. [27]

**Tab. 10 Dvoufaktorová analýza rozptylu ANOVA**

Faktor	p – hodnota	F	F <sub>krit</sub>	Vyhodnocení
F1 – druh deformace	$1,5 \cdot 10^{-7}$	19,0905	3,10516	<b>Má vliv</b>
F2 – kontaktní tlak	$2,7 \cdot 10^{-31}$	128,542	2,71323	<b>Má vliv</b>
F1 – F2 interakce	0,43129	0,9994	2,20855	<b>Nemá vliv</b>

### 1) Faktor F1 – vliv druhu deformace

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **má druh deformace statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření  $\mu$ .

### 2) Faktor F2 – vliv kontaktního tlaku

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **má kontaktní tlak statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření  $\mu$ .

### 3) Faktor F1 – F2 – vliv interakcí druhu deformace a kontaktního tlaku

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **nemá interakce druhu deformace a kontaktního tlaku statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření  $\mu$ .

## 5 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo stanovit vliv deformace na změnu koeficientu tření  $\mu$ . Na tomto základě byla v laboratořích Katedry strojírenské technologie provedena tribologická zkouška protahováním pásku na zařízení SOKOL 400. Testovaným materiálem byly plechové pásky z hlubokotažné oceli DC05 s HDG povrchovou úpravou. Ty byly před samotnou zkouškou rozděleny do tří skupin, přičemž první dvě skupiny byly zdeformovány o 10 % a o 20 % a třetí skupina zůstala bez deformace. Před provedením zkoušky bylo třeba vzorky nastříhat, odmastit, měřila se drsnost jejich povrchu a byla na nich provedena statická zkouška tahem.

V rámci teoretické části této bakalářské práce byla věnována pozornost tribologii a její historii, dále pak tření, mazání a jejich druhům. Zmíněny zde byly také ochranné povlaky plechů a tribologické metody jejich hodnocení. Teoretickou část uzavřela kapitola o deformacích kovových materiálů.

Tribologická zkouška protahováním pásku byla provedena na základě vstupních parametrů uvedených v tab. 3. Rychlost posuvu byla stanovena na  $v = 1 \text{ mm/s}$ , kontaktní tlaky mezi vzorkem a čelistmi  $p = 8, 23, 38, 53, 68 \text{ MPa}$  se měnily diskrétně vždy po dráze  $l = 100 \text{ mm}$  (celková měřená dráha tedy byla  $l = 500 \text{ mm}$ ). Čelisti s plochou  $S = 400 \text{ mm}^2$  udržovaly svou konstantní teplotu  $T = 40 \text{ °C}$ . Vzorky nesly mazivo značky Fuchs 39LV s množstvím  $1,5 \pm 0,2 \text{ g/m}^2$ . Celkem bylo provedeno 24 testovacích cyklů, z toho 8x vzorek bez deformace, 8x s 10% a 8x s 20% deformací

Výsledkem experimentu byla naměřená závislost tažných sil na měřené dráze  $l$ . Využitím maximální tažné síly v ustálené oblasti  $F_h$  se pomocí rovnice (9) vypočítaly příslušné hodnoty koeficientů tření  $\mu$ . Hodnoty tažných sil a koeficientů tření  $\mu$  pro všechny tři skupiny vzorků byly následně zaznamenány do tabulek a vyneseny do grafů. Z grafů bylo na první pohled patrné, že se hodnoty koeficientů tření  $\mu$  v rámci porovnání vzorků nikterak zásadně neliší. K podrobnějšímu porovnání posloužila tab. 9, ve které byly hodnoty porovnány procentuálně vzhledem k referenční hodnotě – vzorku bez deformace. V krajních případech se lišily pouze o  $\pm 5 \%$ . K úplnosti závěru byla provedena dvoufaktorová analýza rozptylu ANOVA, která však dosavadní domněnku nepotvrdila, neboť vyšla, že druh deformace (i kontaktní tlak  $p$ ) mají statisticky významný vliv na hodnotu koeficientu tření  $\mu$ .



V případě hodnocení kvality povrchu vzorků s ohledem na jejich drsnost byla zjištěna určitá závislost drsnosti povrchu na stupni deformace, kdy se hodnoty drsnosti s rostoucí deformací lehce zvyšovaly. Naopak po testování se s rostoucím kontaktním tlakem  $p$  mírně snižovaly (cca o 15%).

Pro další experimentální výzkum vlivu deformace na změnu koeficientu tření  $\mu$  lze doporučit např. použití vzorků s EG povrchovou úpravou, testování pevnostních materiálů nebo slitin Al.

## Seznam literatury

- [1] GOHAR, Ramsey a Homer RAHNEJAT. *Fundamentals of Tribology*. 3rd edition. London: World Scientific Publishing Europe Ltd., 2019. ISBN 978-1-78634-517-2.
- [2] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 4th ed. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [3] HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *Provoz, diagnostika a údržba strojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3028-5. Dostupné z: [https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Provoz diagnostika-a-udrzba-stroju-studijni-material.pdf](https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Provoz_diagnostika-a-udrzba-stroju-studijni-material.pdf)
- [4] WILLIAMS, John. *Engineering tribology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0-521-60988-7.
- [5] BLAŠKOVIČ, Pavel, Jozef BALLA a Marián DZIMKO. *Tribológia*. 1. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00633-0.
- [6] ŠTRAJBLOVÁ, Jana. Aktualita z fyziky: Mravenčí fyzika. *Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova* [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.matfyz.cz/clanky/aktualita-z-fyziky-mravenci-fyzika>
- [7] KUMAR, Anoop. Co byste měli vědět, abyste pro vaši aplikaci vybrali správné mazivo [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/udrzba-a-diagnostika/tribodiagnostika/co-byste-meli-vedet-abyste-pro-vasi-aplikaci-vybrali-spravne-mazivo.html>
- [8] SMITH, Brett. What are the Most Recent Advances in Tribology? *AZoM* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20432>
- [9] BARTZ, Wilfried. *Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik*. Tübingen: Expert Verlag, 1988. ISBN 978-3-8169-0313-0.
- [10] BHUSHAN, Bharat. *Introduction to tribology*. B.m.: John Wiley & Sons, Inc., 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [11] ŠAFR, Emil. *Technika mazání*. 2. doplněné vyd. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1970.
- [12] Mazací oleje. *ČAPPO - Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/pohonne-hmoty-a-energie-pro-mobilitu/mazaci-oleje>
- [13] COLLINS, Danielle. What are the best methods for gearbox lubrication? *Motion Control Tips* [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/gearbox-lubrication-best-methods/>
- [14] NACHÁZEL, Zdeněk. Bílá tuhá maziva - ten správný krok v tribologii. *Vše o průmyslu - portál pro bezporuchovou výrobu* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/udrzba-a-diagnostika/tribodiagnostika/bila-tuha-maziva-ten-spravny-krok-v-tribologii.html>



- [15] MÜCK, Jonáš. *Maziva vhodná pro tažení nerezavějící oceli*. B.m., 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] SIMOES, Doris a Mary Linda SCHUMANN. Choosing a lubricant for deep drawing. *Stamping Journal* [online]. 2001. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/choosing-a-lubricant-for-deep-drawing>
- [17] TULKA, Jaromír. *Povrchové úpravy materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2005. ISBN 978-80-214-3062-4.
- [18] LINDSLEY, Melissa. Hot-Dip Galvanizing. *American Galvanizers Association* [online]. 2020. Dostupné z: <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanized-steel-for-transportation/hot-dip-galvanizing-hdg-process>
- [19] HOLMBERG, Kenneth a Allan MATTHEWS. *Coatings tribology*. Oxford: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-444-52750-9.
- [20] BAY, N., D.D. OLSSON a J.L. ANDREASEN. Lubricant test methods for sheet metal forming. *Tribology International* [online]. 2008, **41**(9), 844–853. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2007.11.017
- [21] KOLNEROVÁ, Michaela. *Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení* [online]. B.m., 2005. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38797>
- [22] SOLFRONK, Pavel. *Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisku z plechu* [online]. B.m., 2002. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38720>
- [23] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 978-80-7080-600-5.
- [24] HERTZBERG, Richard W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. ISBN 978-0-471-01214-6.
- [25] SVOBODOVÁ, Jaroslava. *Vlastnosti a zkoušení kovů*. Ústí nad Labem: Fakulta strojního inženýrství, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 2020. ISBN 978-80-7561-250-2.
- [26] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [27] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.