

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh zkušebního zařízení pro měření tribologických vlastností
v procesech plošného tváření**

**Design of Test Equipment for Measuring Tribological Properties
in Surface Forming Processes**

Autor: Bc. Ondřej Blecha

Studijní program: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Stejskal

PRAHA 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blecha** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **483227**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh zkušebního zařízení pro měření tribologických vlastností v procesech plošného tváření

Název diplomové práce anglicky:

Design of test equipment for measuring tribological properties in surface forming processes

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout zařízení pro měření tribologických vlastností v procesech plošného tváření

1. Seznámení se s problematikou zkoušení tribologických vlastností v plošném tváření.
2. Výběr vhodné metodiky zkoušky pro proces plošného tváření
3. Návrh zkušebního zařízení dle dané metodiky
4. Ověření zkušebního zařízení
5. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Technická diagnostika a spolehlivost I. Tribodiagnostika
Tribologie. 1.
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ondřej Stejskal ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. František Tatíček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Ondřej Stejskal
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Stejskala, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Ondřeji Stejskalovi za velmi cenné rady a připomínky a za ochotu a vstřícnost v průběhu vypracování celé této práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. nejen za podnětné poznámky, ale i za naměření vzorků pod konfokálním mikroskopem.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Ing. Břetislavu Machkovi za výrobu zkušebního zařízení.

Anotace

Název diplomové práce: Návrh zkušebního zařízení pro měření tribologických vlastností v procesech plošného tváření

Autor práce: Bc. Ondřej Blecha

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Stejskal

Konzultant: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

Rozsah práce: 80 stránek, 19 tabulek, 51 obrázků

Klíčová slova: Tribologie, tváření plechů, strip-drawing test, tribometr, koeficient tření, tribologické podmínky

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá nejprve tribologií obecně, následuje výběr vhodné metody tribologické zkoušky z oblasti tváření plechů a užití této metody pro návrh a výrobu zkušebního zařízení. Zkušební zařízení by mělo umožňovat měřit koeficient tření pro různé tribologické podmínky (teplota, kontaktní tlak, mazivo, rychlost tažení plechu). Rovněž by mělo umožňovat výměnu čelistí, jejich ohřev, nastavitelný kontaktní tlak a měření teploty čelistí v průběhu měření. Naměřené hodnoty by mohly dále posloužit k zpřesnění numerických simulací reálných tvářecích procesů. V rámci této práce bylo zkušební zařízení navrženo, vyrobeno a jeho funkčnost byla ověřena skrze experimentální měření v laboratoři.

Anotation

| | |
|-----------------------------------|---|
| Title of the final thesis: | Design of Test Equipment for Measuring Tribological Properties in Surface Forming Processes |
| Author: | Bc. Ondřej Blecha |
| Supervisor: | Ing. Ondřej Stejskal |
| Consultant: | Ing. František Tatíček, Ph.D. |
| Academic year: | 2022/2023 |
| University: | CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering |
| Department: | 12133 – Department of Manufacturing Technology |
| Head of department: | doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE |
| Extent: | 80 pages, 19 tables, 51 pictures |
| Keywords: | Tribology, sheet metal forming, strip-drawing test, tribometer, coefficient of friction, tribological conditions |
| Abstract: | <p>This thesis firstly deals with tribology in general. This is followed by the selection of a suitable tribological test method used in the sheet metal forming. The chosen method is used for the design of test equipment, which should allow measurement of the coefficient of friction for different tribological conditions. It should be possible to change the dies, heat the dies, adjust the contact pressure or measure the temperature of the dies during the test. The measured data could help improve numerical simulations of real forming processes. In this work, the test equipment was designed, fabricated and its functionality was tested in the laboratory.</p> |

Seznam symbolů a zkratek

| | | |
|-----------------|----------------------|---|
| μ | [-] | Koeficient tření |
| F_T | [N] | Třecí síla |
| F_N | [N] | Normálová síla |
| v | [m.s ⁻¹] | Kluzná rychlost |
| η | [Pa.s] | Dynamická viskozita maziva |
| μ_0 | [-] | Statický koeficient tření |
| μ_1 | [-] | Dynamický koeficient tření |
| F_{fA} | [N] | Tahová síla v první fázi testu (Ohýbání pásu pod napětím) |
| F_{fB} | [N] | Tahová síla v druhé fázi testu (Ohýbání pásu pod napětím) |
| γ | [rad] | Kontaktní úhel (Ohýbání pásu pod napětím) |
| r | [m] | Poloměr kolíku (Ohýbání pásu pod napětím) |
| t | [m] | Tloušťka pásu (Ohýbání pásu pod napětím) |
| F_{bA} | [N] | Brzdná síla v první fázi testu (Ohýbání pásu pod napětím) |
| F_{bB} | [N] | Brzdná síla v druhé fázi testu (Ohýbání pásu pod napětím) |
| R | [m] | Poloměr zaoblení (Ohýbání pásu s bočním stlačením) |
| t_0 | [m] | Výchozí tloušťka pásu (Ohýbání pásu s bočním stlačením) |
| F_1, F_2, F_3 | [N] | Příslušné tahové síly (Ohýbání pásu s bočním stlačením) |
| p | [MPa] | Kontaktní tlak |
| F | [N] | Síla odpovídající stlačení pružin |
| S | [mm ²] | Kontaktní plocha |
| L_0 | [mm] | Volná délka pružiny |
| L_1 | [mm] | Délka pružiny při nejmenším pracovním zatížení |
| L_8 | [mm] | Délka pružiny při největším pracovním zatížení |
| L_9 | [mm] | Délka pružiny při mezním zatížení (limitní stav) |
| F_1, F_8, F_9 | [N] | Příslušné síly k daným délkám pružin |
| s_1, s_8, s_9 | [mm] | Příslušné deformace (stlačení) pružin k daným silám |
| R_e | [MPa] | Mez kluzu |
| R_m | [MPa] | Mez pevnosti v tahu |
| A | [%] | Tažnost |
| d_0 | [mm] | Průměr drátu pružiny |
| D | [mm] | Vnější průměr pružiny |

| | | |
|---------------|----------|---|
| z | [-] | Počet závitů pružiny |
| m | [g] | Hmotnost pružiny |
| L | [mm] | Délka stlačených pružin |
| s | [mm] | Dráha tažení pásu plechu |
| ϑ | [mm/min] | Rychlost tažení pásu plechu |
| \bar{x} | | Střední hodnota |
| SD | | Směrodatná odchylka |
| \bar{F} | [N] | Střední hodnota zatížení na daném intervalu |
| $\bar{\mu}_0$ | [-] | Střední hodnota statického koeficientu tření |
| $\bar{\mu}_1$ | [-] | Střední hodnota dynamického koeficientu tření |

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam symbolů a zkratk..... | 7 |
| 1 Úvod..... | 11 |
| 2 Tribologie | 12 |
| 2.1 Tribologický systém..... | 12 |
| 2.2 Tření | 13 |
| 2.2.1 Zákony tření a koeficient tření..... | 13 |
| 2.2.2 Druhy tření | 15 |
| 2.2.3 Stribeckova křivka..... | 16 |
| 2.2.4 Vnější tření | 17 |
| 2.2.5 Stick-Slip efekt..... | 18 |
| 2.2.6 Parametry ovlivňující třecí sílu | 19 |
| 2.2.7 Teplo vznikající vlivem tření..... | 19 |
| 2.3 Struktura povrchu – drsnost a vlnitost | 20 |
| 2.3.1 Hodnocení struktury povrchu | 21 |
| 2.4 Opotřebení povrchu | 21 |
| 2.4.1 Abrazivní opotřebení..... | 21 |
| 2.4.2 Adhezivní opotřebení..... | 23 |
| 2.5 Mazání povrchu..... | 23 |
| 2.5.1 Tekutá maziva | 24 |
| 2.5.2 Plastická maziva | 24 |
| 2.5.3 Pevná maziva | 25 |
| 2.5.4 Plynná maziva | 25 |
| 3 Tváření..... | 26 |
| 3.1 Základní dělení tváření | 26 |
| 3.1.1 Tváření objemové..... | 27 |
| 3.1.2 Tváření plošné | 27 |
| 3.1.3 Tváření za tepla..... | 28 |
| 3.1.4 Tváření za studena | 28 |
| 3.2 Tažení plechů | 28 |
| 3.2.1 Tribologický systém při tažení plechů..... | 30 |
| 3.2.2 Tribologické a technologické faktory při tažení plechů | 30 |
| 3.3 Tribologické zkoušky v procesu tváření plechů..... | 31 |
| 3.3.1 Ohýbání pásu pod napětím | 33 |
| 3.3.2 Tažení pásu s bočním stlačením | 35 |
| 3.3.3 Ohýbání pásu s bočním stlačením | 36 |
| 3.3.4 Tažení pásu mezi plochými čelistmi | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4 | Zkušební zařízení | 38 |
| 4.1 | Požadavky na zkušební zařízení | 38 |
| 4.2 | Návrh zkušebního zařízení a jeho popis | 38 |
| 4.2.1 | Nastavení kontaktního tlaku | 40 |
| 4.2.2 | Výměna čelistí | 41 |
| 4.2.3 | Měření teploty | 42 |
| 4.2.4 | Základní rozměry zkušebního zařízení | 42 |
| 4.3 | Parametry univerzálního trhacího stroje | 43 |
| 4.4 | Postup měření na zkušebním zařízení | 44 |
| 4.4.1 | Upnutí zkušebního zařízení do trhacího stroje | 44 |
| 4.4.2 | Příprava vzorků a čelistí | 45 |
| 4.4.3 | Nastavení požadované síly a aretace pružin | 45 |
| 4.4.4 | Ohřev čelistí v případě sledování vlivu teploty | 47 |
| 4.4.5 | Upnutí vzorku | 47 |
| 4.5 | Samotná zkouška | 48 |
| 4.6 | Princip vyhodnocení dat | 49 |
| 4.7 | Montáž a výroba zkušebního zařízení | 49 |
| 4.7.1 | Montáž zkušebního zařízení | 50 |
| 4.7.2 | Výroba zkušebního zařízení | 52 |
| 5 | Ověření funkčnosti zkušebního zařízení a vyhodnocení | 54 |
| 5.1 | Příprava vzorků a čelistí | 55 |
| 5.2 | Parametry zkoušek | 55 |
| 5.3 | První zkouška | 57 |
| 5.4 | Druhá zkouška | 62 |
| 5.5 | Porovnání koeficientů tření a velikosti otěru | 66 |
| 5.6 | Vyhodnocení vzorků pod mikroskopem | 69 |
| 6 | Diskuze a závěr | 72 |
| | Seznam obrázků | 75 |
| | Seznam tabulek | 76 |
| | Seznam příloh | 76 |
| | Bibliografie | 77 |

1 Úvod

Plošné tváření se dnes hojně využívá v automobilovém průmyslu, ale i v dalších progresivních odvětvích. Pro správnou optimalizaci tvářecích procesů je třeba porozumět problematice tribologie, neboť tato věda je s tvářením úzce spjata. K optimalizaci těchto procesů se často využívá numerických simulací. Aby tyto simulace co nejpřesněji odpovídaly realitě, je potřeba, aby v nich byly správně definovány okrajové podmínky. Mezi tyto podmínky patří například teplota, typ a množství maziva, kontaktní tlak a podobně.

Cílem této práce je na základě teoretických poznatků a rešerše vybrat z tribologických zkoušek užívaných v plošném tváření plechů jednu vhodnou. Na základě vybrané zkoušky by mělo být navrženo, vyrobeno a posléze i ověřeno zkušební zařízení. Toto zkušební zařízení by mělo umožňovat přesně měřit tribologické vlastnosti (konkrétně koeficient tření) v závislosti na dílčích tribologických podmínkách (typ a množství maziva, teplota, kontaktní tlak, rychlost tažení plechu atp.). Zkušební zařízení by mělo umožňovat snadno nastavit definovaný kontaktní tlak mezi čelistmi a vzorkem. Čelisti by měly být snadno vyměnitelné. Návrh by měl umožňovat sledování teploty v průběhu měření a rovněž i ohřev čelistí na požadovanou teplotu.

Experimentálně získaná data na tomto zkušebním zařízení by mohla být dále využita k definování okrajových podmínek v numerických simulacích tvářecích procesů. Tím by se zvýšila jejich relevance a přesnost, což by mohlo vést k optimalizaci reálných tvářecích procesů a v důsledku toho i k úspoře financí a času.

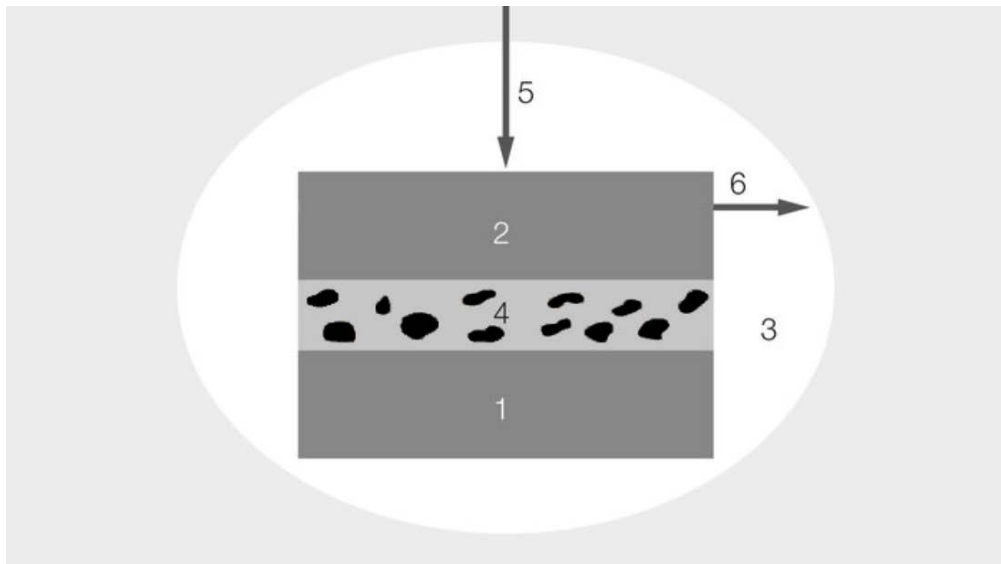
2 Tribologie

Tribologie je relativně nová věda. Její výrazný vzestup nastal v 60. letech minulého století, nicméně problematika, kterou se zabývá, je stará od nepaměti. Název vychází z řečtiny, vznikl spojením slov tribos, tedy tření a logos – věda. Cílem této vědy je popsat a řešit otázky tření, opotřebení, návrhu a vhodného použití maziv. Obecně je tribologie definována jako věda o vzájemné interakci povrchů těles při jejich relativním pohybu. Pohyb může být kluzný, valivý, rotační, nárazový, oscilační nebo se může jednat i o tečení. V praxi dochází ke kombinaci dvou a více druhů relativních pohybů [1-3].

Literatura udává, že až třetina světové produkce energie je ztracena vlivem tření, až 80 % strojů je vyřazováno z provozu vlivem opotřebení povrchových vrstev, že podíl ztrát ložisek sahá až k 50 %. Tyto ztráty lze snížit vhodnou volbou třecích dvojic, vhodným způsobem mazání, vhodným druhem maziva. Důležité je také počítat s okolními vlivy, jako jsou například teplota, prašnost, vlhkost vzduchu. Tření však může být i žádoucí, příkladem mohou být brzdy automobilu [1,3].

2.1 Tribologický systém

Základním pojmem tribologie je tribologický systém (Obr. 1). Tribologickým systémem se rozumí třecí tělesa, mezi kterými dochází ke kontaktu, mezilátka mezi nimi (vrstva maziva, ale i nečistot), okolí (teplota, relativní vlhkost, tlak), zatížení a relativní pohyb těles. Okolí je pasivním prvkem systému. Tribologický systém je v zásadě energetický systém, neboť v něm dochází ke změně mechanické energie na energii tepelnou [1,4,5].



Obr. 1: Tribologický systém, upraveno z [5]

kde 1 je základní třecí těleso, 2 je třecí těleso, 3 je okolí, 4 je mezilátka, 5 je zatížení, 6 je relativní pohyb třecích těles

2.2 Tření

Tření lze popsat jako odpor proti relativnímu pohybu dvou těles, která jsou v kontaktu. Jedná se o odpor, který musí být překonán, aby se těleso mohlo pohnout. Směr třecí síly je vždy proti směru pohybu tělesa. Tření může být jak vnější – styk dvou třecích ploch, tak vnitřní – materiálové vrstvy třecího tělesa [2,6].

2.2.1 Zákony tření a koeficient tření

Zákony tření vychází z poznatků a objevů zejména dvou vědců, jejichž jména jsou Guillaume Amontons (1663 – 1705) a Charles-Augustin Coulomb (1736 – 1806). V literatuře se proto tyto zákony někdy objevují pod názvem Amontonovy-Coulombovy zákony tření. Znění těchto zákonů je následující [7]:

- Velikost třecí síly je přímo úměrná normálovému zatížení (1)
- Velikost třecí síly nezávisí na velikosti styčných ploch třecích těles
- Velikost třecí síly nezávisí na kluzné rychlost

První z těchto zákonů lze matematicky vyjádřit takto:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad [-] \quad (1)$$

kde μ je koeficient tření [-]

F_T je třecí síla [N]

F_N je normálová síla [N]

Dle těchto zákonů třecí síla nezávisí na kluzné rychlosti. To se později ukázalo jako chybný předpoklad, neboť tření je závislé na rychlosti smýkání. Stejně tak není pravda, že koeficient tření je vždy konstantou, velikost třecí síly se totiž v průběhu tření může významně měnit. Koeficient tření nelze považovat za konstantu v následujících případech [8-10]:

- Za působení velmi vysokých normálových sil F_N je maximální smykové napětí na povrchu omezeno mezí pevnosti materiálu, z toho důvodu je omezena i síla F_T a koeficient tření μ klesá.
- Za působení velkých třecích sil F_T může docházet k poškození povrchu, k zadírání, čímž se zvyšuje tření.
- Pokud dojde aplikací maziva k vyplnění mezery mezi povrchy, vzniká vlivem hydrodynamických efektů v mazivu tlak. Tento tlak přenáší část normálových sil F_N a dochází ke snížení tření.

Hodnoty koeficientu tření nabývají různých hodnot, obvykle v rozmezí 0 až 1, nicméně koeficient tření může ve speciálních případech dosahovat i hodnot větších než 1. Rozlišuje se statický a dynamický koeficient tření a to v závislosti na tom, zdali jsou smýkající se tělesa v klidu (statický) nebo zdali jsou smýkající se tělesa v pohybu (dynamický). Obecně platí, že statický koeficient tření bývá vyšší než dynamický koeficient tření [8,11].

2.2.2 Druhy tření

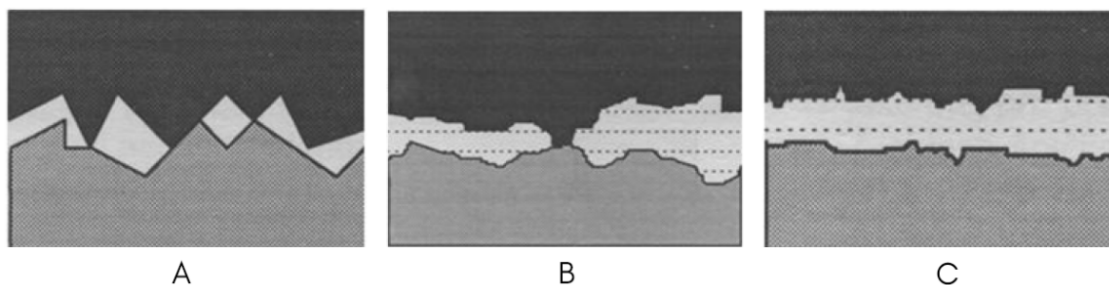
Tření lze z hlediska funkčnosti dělit na třecí jev potřebný a třecí jev nepotřebný. V prvním případě tření vykonává technickou funkci zařízení, příkladem může být pneumatika a vozovka. V druhém případě tření snižuje účinnost zařízení a jedná se o nežádoucí jev, neboť způsobuje energetické ztráty [1,2].

Tření může být suché (Obr. 2A) – tělesa v pevném skupenství se bezprostředně dotýkají svými plochami a třecí síla je vyvozena vzájemným zaklesáváním mikronerovností povrchů. Mohou vznikat nežádoucí bodové mikrosvary. Zde platí, že čím větší je drsnost povrchu, tím větší je třecí síla. Mikronerovnosti se plasticky deformují, může docházet i k odtrhávání vrcholků [1,12].

Při použití maziva může nastat kapalinové tření (Obr. 2C). Tření probíhá v mezivrstvě mezi tělesy. Tato mezivrstva má vlastnosti kapaliny a jedná se o mazací látku [1,12]

Mezi třením suchým a třením kapalinovým je tzv. smíšené tření (Obr. 2B). To nastává, pokud se výstupky povrchů těles v určitých místech dotýkají, ale zároveň existují i místa povrchu, která jsou oddělená mezivrstvou (mazací látkou) [1,12].

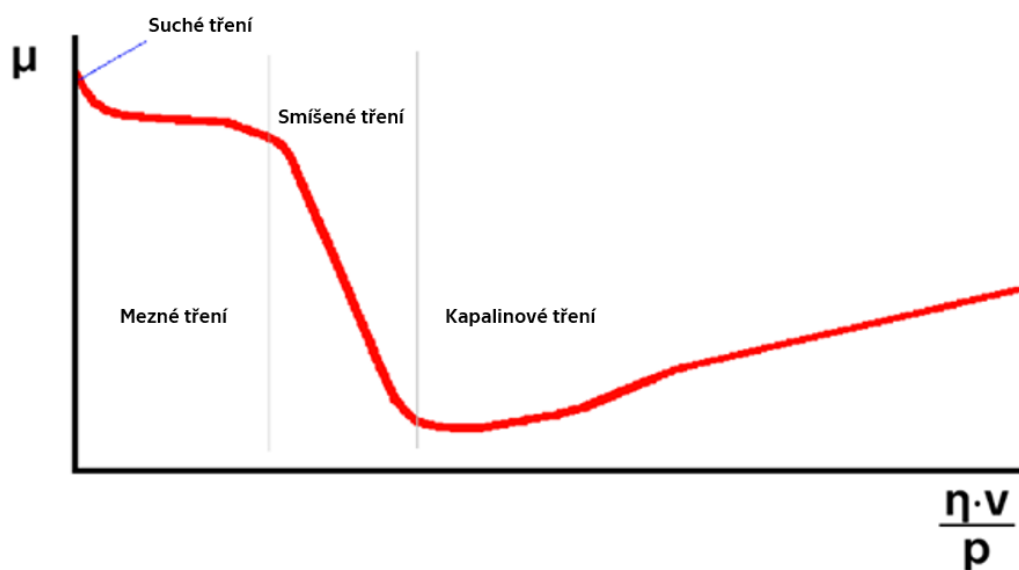
Limitním případem smíšeného, respektive kapalinového tření je mezní tření. Mezní tření vzniká za předpokladu tenké vrstvy adsorbovaných molekul kapaliny či plynu. Vlivem chemické reakce mezi mazivem a třecími povrchy dojde k vytvoření vrstvy o tloušťce pouhých několika molekul. V praxi se objevuje mezní tření v případě malých styčných ploch, které jsou zatíženy velkými silami, při malých kluzných rychlostech či na rozhraní drsných povrchů [4,12].



Obr. 2: Druhy tření: Suché (A), smíšené (B) a kapalinové (C), upraveno z [4]

2.2.3 Stribeckova křivka

Stribeckova křivka (Obr. 3) je charakteristická pro mazané povrchy. Dle Stribeckovy křivky se tření mezi dvěma povrchy mění v závislosti na kluzné rychlosti, normálové síle a typu maziva. Přesná podoba této křivky je různá pro různé tlaky a pro různou viskozitu maziva [9,12].



Obr. 3: Stribeckova křivka, upraveno z [13]

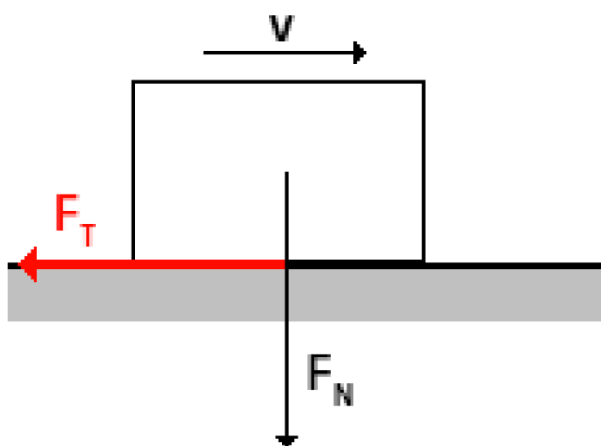
- kde μ je koeficient tření [-]
 v je kluzná rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 η je dynamická viskozita maziva [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
 p je měrný tlak [Pa]

2.2.4 Vnější tření

Vnější tření se dá dle druhu relativního pohybu rozdělit na [4]:

- a) Smykové tření
- b) Valivé tření

Pro problematiku plošného tváření je typické smykové tření. Tento typ tření (Obr. 4) vzniká mezi tělesy při posuvném (translačním) pohybu. Součinitel tření při tomto druhu tření se počítá přímo z Coulombova zákona, viz (1) [4].



Obr. 4: Smykové tření, upraveno z [14]

Tabulkové hodnoty koeficientů smykového tření pro různé dvojice materiálů stykových ploch třecích těles jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Koeficienty smykového tření pro různé dvojice materiálů, upraveno z [1,11]

| Materiály stykových ploch třecích těles | Koeficient tření | |
|---|------------------|---------------|
| | Statický | Dynamický |
| | μ_0 [-] | μ_1 [-] |
| Ocel – ocel; za sucha | 0,150 – 0,200 | 0,100 – 0,150 |
| Ocel – bronz; za sucha | 0,180 | 0,160 |
| Ocel – bronz; mazáno | 0,100 | 0,010 |
| Ocel – led | 0,027 | 0,014 |
| Guma – asfalt; za sucha | 0,850 | 0,300 |
| Guma – asfalt; za mokra | 0,200 – 0,500 | 0,150 |

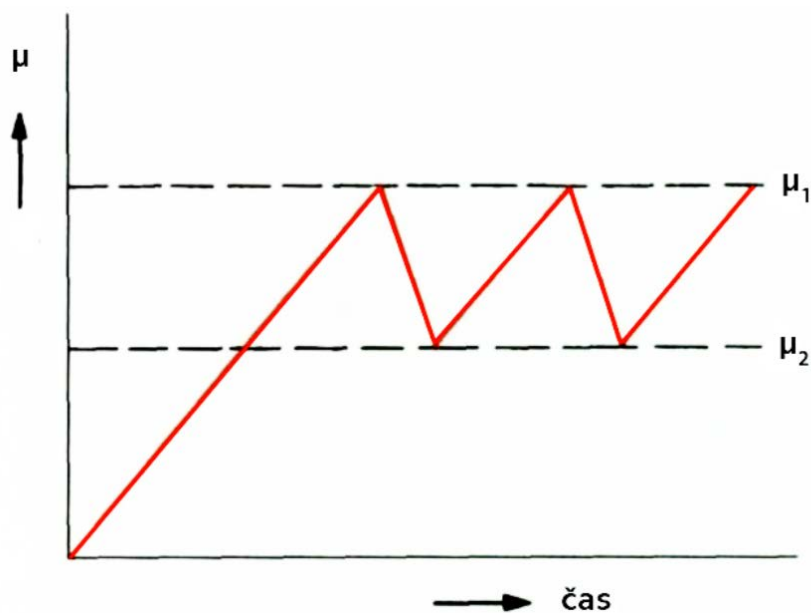
2.2.5 Stick-Slip efekt

Stick-slip efekt, v češtině též jako zadírání, označuje stav, kdy dochází během tření těles ke střídání stavu kluzu (slip) a stavu zadírání (stick) a to v časově krátkých intervalech. Při tomto jevu dochází k opakovaným změnám koeficientu tření s časem (Obr. 5) [15,16].

Tento efekt lze pozorovat při velmi nízkých tvářecích rychlostech u řady tvářecích strojů, například při tažení profilů a trubek. Výjimečně může být pozorovatelný i při hlubokém tažení. Projevuje se vibracemi, drnčením. Vlivem tohoto jevu dochází k poškození povrchových vrstev. Při protahování plechu vznikají na povrchu úzké rýhy, které jsou viditelné i pouhým okem, přičemž orientace rýh je ve směru posuvu plechu. Lokální porušení povrchu může postupně vlivem kontaktu s nástrojem přerůst až v úplné sedření povrchové vrstvy [3,16,17].

Stick-slip efekt lze potlačit či ho úplně eliminovat jedním z následujících způsobů [15]:

- Snížením adheze (mazivo)
- Zvýšením kluzné rychlosti
- Zvýšením tuhosti tribologického systému



Obr. 5: Průběh koeficientu tření během Stick-Slip efektu v čase, upraveno z [17]

2.2.6 Parametry ovlivňující třecí sílu

Na třecí sílu má vliv vícero parametrů. Mezi hlavní parametry, se kterými je při tvářecích procesech třeba počítat, patří [18,19]:

- Kontaktní tlak; třecí síla se zvyšující se normálovou silou či se zvyšujícím se kontaktním tlakem zvětšuje
- Kluzná rychlost; dynamická třecí síla je menší než třecí síla statická
- Drsnost povrchu; tvar a množství výstupků má významný vliv na velikost tření
- Mazivo; mazivo je důležité z hlediska snížení tření; u maziva záleží zejména na jeho typu a vlastnostech, jako jsou teplotní odolnost, reologické vlastnosti, stlačitelnost, viskozita; distribuce maziva záleží na velikosti kontaktního tlaku, na drsnosti povrchu, na kluzné rychlosti
- Teplota; velikost teploty na styčných plochách a v mazivech závisí zejména na tepelné vodivosti
- Materiál; elastické a plastické materiálové vlastnosti mají významný vliv na způsob, jakým spolu budou třecí tělesa interagovat; lze předpokládat, že za působení nižšího kontaktního tlaku bude interakce spíše elastická

2.2.7 Teplo vznikající vlivem tření

Vlivem mechanického tření nerovností a výstupků na površích třecích těles dochází k disipaci energie v teplo. Vzniklé teplo ovlivňuje povrchy třecích těles, má vliv na jejich mechanické vlastnosti i mikrostrukturu. Zároveň dochází k ovlivnění kontaktní geometrie, neboť teplotní gradient vyvolává přídatná napětí a deformace. Pokud se teplota přiblíží limitní teplotě součásti, může dojít k snížení životnosti, spolehlivosti a v krajním případě i k selhání součásti [2, 6].

S růstem teploty může docházet ke snížení i zvýšení koeficientu tření, záleží na materiálu a na dalších podmínkách. Teplo vznikající v důsledku tření má významný vliv na [15]:

- Tvrdost povrchu; se zvyšující teplotou tvrdost klesá
- Mez pevnosti ve smyku
- Viskozitu tekutých a tuhých maziv
- Chemické reakce mezi povrchy třecích těles a okolním prostředím
- Opotřebení
- Vzájemné ulpívání povrchů třecích těles
- Schopnost povrchů adsorbovat či desorbovat znečišťující látky

2.3 Struktura povrchu – drsnost a vlnitost

Již bylo zmíněno, že drsnost povrchu má zásadní vliv na koeficient tření, tedy i na velikost opotřebení a v důsledku toho i na životnost a spolehlivost součásti. Drsnost povrchu je popsána jako výška malých výstupků a nepravidelností na povrchu. V zásadě se jedná o odchylky od ideálního povrchu součásti, přičemž platí, že čím větší jsou tyto odchylky, tím větší je drsnost. Drsnost povrchu se někdy také označuje jako mikrogeometrie. Drsnost povrchu součásti je ovlivněna zpravidla použitou technologií výroby, nástrojem a jeho geometrií, ale i strukturou součásti jako takovou. Při tváření plechů je výsledná drsnost ovlivněna především procesem válcování [9,19,20].

Dalším základním geometrickým parametrem sloužícím k hodnocení povrchu je vlnitost. Drsnost i vlnitost vychází ze snímaného profilu (profile trace), ale liší se od sebe vlnovou délkou. Pro získání těchto parametrů je proto nutné provést filtraci dat právě na základě vlnové délky. Drsnost je krátkovlnná složka profilu povrchu, popisuje nejmenší nerovnosti vznikající během procesu výroby. Tyto nerovnosti mohou mít periodický, ale i náhodný charakter. Vlnitost je složka profilu povrchu o delších vlnových délkách než drsnost. Vlnitost zachycuje periodicky se opakující se nerovnosti, její příčinou může být například chvění či malá tuhost [21,22].

2.3.1 Hodnocení struktury povrchu

Nejběžnější metodou hodnocení povrchu je tzv. profilová metoda. Profil povrchu může být snímán buď kontaktně (dotykovým měřicím přístrojem) či bezkontaktně (nejčastěji opticky). Zejména u měkkých povrchů může použití kontaktního profilometru (drsnoměru) představovat riziko. Profilometr může totiž vlivem interakce svého hrotu s povrchem povrch poškodit. Zatížení a kontaktní tlak musí být proto vždy adekvátní tvrdosti povrchu. Parametry pro hodnocení struktury povrchu jsou definovány a podrobně popsány v normě ČSN EN ISO 21920-2 [21,22].

2.4 Opotřebení povrchu

Opotřebení je definováno jako postupný úbytek materiálu z povrchu součásti v důsledku mechanických vlivů. Dochází k němu na stykových plochách při vzájemném pohybu těles případně při interakcích těles s médiem ať už v kapalně či plynné fázi. Opotřebení je v podstatě nevyhnutelným průvodním jevem procesu tření. Výskyt opotřebení je nežádoucí, neboť způsobuje zhoršení funkčních vlastností a může vést až k selhání součásti. Výjimkou mohou být záběhové procedury, kdy je opotřebení naopak z technického hlediska žádoucí [2,3].

Mezi základní mechanismy opotřebení patří opotřebení abrazivní, adhezivní, erozivní, kavitační, korozivní, únavové a vibrační. V praxi dochází téměř vždy ke kombinaci vícero mechanismů opotřebení současně. K těmto mechanismům se často přidávají ještě další proměnné, jako jsou například vnesené nečistoty, vlhkost a podobně. Tyto proměnné mohou mít na výsledné opotřebení velký vliv. Neexistuje proto žádný univerzální, jednoduchý matematický model, který by byl vždy aplikovatelný [1-3,6].

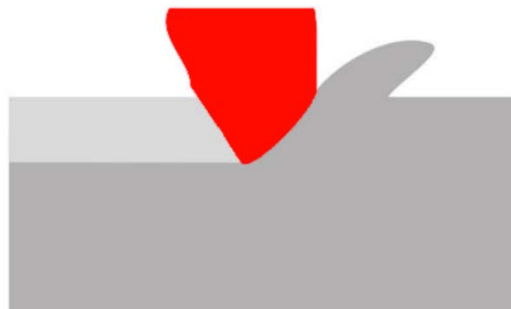
2.4.1 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení (Obr. 6) typicky vzniká, pokud jeden z materiálů třecích těles je drsný a výrazně tvrdší než druhý. Výstupky a mikronerovnosti tvrdšího tělesa pronikají do povrchu měkkého tělesa.

Následně dochází vlivem relativního pohybu třecích těles k mechanickému poškození povrchu. Charakteristickým projevem abrazivního opotřebení jsou rýhy. Jedná se o velmi intenzivní degradační proces, který je ovšem dosti častý. Abrazivní opotřebení se může objevit u všech druhů tření [2,3].

Abrazivní opotřebení může vznikat rovněž vlivem volných částic, které byly odděleny od jednoho z povrchů, byly do systému vneseny z okolí v podobě nečistot nebo vznikly v důsledku chemického procesu – například oxidací [2,6].

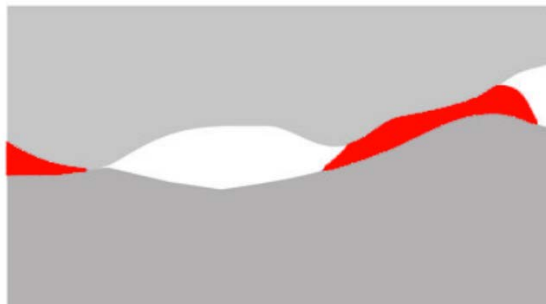
Na velikost abrazivního opotřebení má významný vliv tvar a velikost abrazivních částic. Záleží také, zdali jsou tyto částice oblé či ostré. Pokud mají částice ostré hrany, dochází k násobně většímu opotřebení oproti hranám oblým. Dále závisí na tom, zdali se částice mohou mezi třecími tělesy volně pohybovat, nebo zdali jsou (alespoň částečně) fixovány k povrchu. Částice, které se mohou pohybovat volně, způsobují zhruba desetkrát větší opotřebení než částice fixované. Pokud jsou přítomny volné částice, které jsou větší, než je vůle mezi třecími tělesy, dochází k abrazivnímu opotřebení bez ohledu na mazivo. Někdy také může docházet k rozdrčení abrazivních částic mezi třecími tělesy. Vzniklé úlomky mají často mnoho ostrých hran a v důsledku toho jsou mnohem abrazivnější než původní částice [20,23].



Obr. 6: Abrazivní opotřebení, upraveno z [5]

2.4.2 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení (Obr. 7) vzniká při relativním pohybu třecích těles. Na stykových plochách dochází vlivem tření k degradaci povrchových vrstev a v důsledku toho nastává přímý kontakt čistých kovů, což vede ke vzniku mikrosvarů. Mikrosvary se následně vlivem relativního pohybu těles porušují, čímž dochází k vytrhávání částic materiálu a rovněž dochází k přenosu materiálu z jednoho povrchu na druhý. Adhezivní opotřebení je provázeno značným růstem teploty, a proto mohou vznikat oxidické vrstvy. Vlivem růstu teploty dochází také ke snazší difuzi materiálu mezi dvojicí povrchů. Tento mechanismus opotřebení lze nejlépe potlačit dostatečnou vrstvou maziva, vhodným výběrem třecí dvojice či vhodnou povrchovou úpravou. Významně se promítne i velikost a povaha zatížení, které v tribologickém systému působí, relativní rychlost třecích těles, která má velký vliv na teplotu mezi tělesy či velikost stykových ploch [1,3,23].



Obr. 7: Adhezivní opotřebení, upraveno z [5]

2.5 Mazání povrchu

Mazání je tribologický proces užívající látek, maziv, k tvorbě mazací vrstvy, jež má za cíl zabránit přímému styku povrchů při relativním pohybu třecích těles, tím zmenšit jejich tření a v důsledku toho i opotřebení součástí. Primárním požadavkem na maziva je mazací schopnost, čímž se rozumí schopnost tvořit souvislou mazací vrstvu s nízkým vnitřním třením a zároveň schopnost této vrstvy adhezně přilnout k povrchu součásti. Maziva by měla být chemicky stálá a neměla by korozivně působit na základní materiál. Aplikací vhodných maziv mezi třecí plochy

tribologického systému lze prodloužit životnost třecích ploch, chránit je před nečistotami a korozí, eliminovat energetické ztráty, zajistit požadované chlazení, snížit ekonomickou náročnost a zajistit bezpečný chod [24,25].

Maziva se dle svého skupenství dají dělit na maziva [26]:

- Tekutá
- Plastická
- Pevná
- Plynná

2.5.1 Tekutá maziva

Mezi tekutá maziva patří minerální (ropné) oleje, syntetické oleje a biologicky odbouratelné oleje rostlinného či živočišného původu. Tekutá maziva jsou v praxi nejvíce využívána. Skládají se ze základového oleje a z aditiv. Aditiva zvyšují mazací schopnost maziva, případně dodávají mazivu jiné užité vlastnosti. Mohou mít vliv například na viskozitu či teplotu tuhnutí maziva. Viskozita je fyzikální vlastnost, která vyjadřuje velikost vnitřního tření a tedy i tekutost maziva. Nejedná se o konstantní veličinou, neboť je ovlivněna okolními podmínkami, jako jsou teplota a tlak. K základní charakteristice tekutých maziv slouží tzv. viskozitní třída. Ta udává rozmezí viskozit maziva při stanovené teplotě a je standardizovaná [26,27].

2.5.2 Plastická maziva

Plastickým mazivům se někdy též přezdívá mazací tuky. Mají gelovitou strukturu a jsou složeny ze základového oleje, zpevňovadel a aditiv. Výhodou oproti tekutým mazivům je jejich nižší spotřeba. Navíc vykazují těsnící schopnost a brání tak vnikání nečistot. Tato maziva mají ale pouze omezenou schopnost odvodu tepla a nelze je použít pro oběhové mazání. Lze je ale naopak aplikovat tam, kde by tekutá maziva dlouho nevydržela, protože by stékala nebo by docházelo k jejich odstříku [25,28].

2.5.3 Pevná maziva

Pevná maziva nebo též tuhá maziva jsou pevné látky s mazací schopností, které vykazují zanedbatelnou tvrdost, velkou afinitu ke kovům a nízkou smykovou pevnost. Vzhledem k tomu, že maziva nejsou tekutá, odolávají dobře vysokým teplotám a tlakům. Jejich fyzikální a chemické vlastnosti se mění až při dosažení mezní teploty, kdy dochází k chemické přeměně. Pevná maziva jsou proto vhodná pro mazání částí strojů pracujících za velmi vysokých nebo naopak nízkých teplot v širokém rozsahu (např. -200 až 800 °C). Nevýhodou je, že nejsou schopna odvádět teplo a jejich koeficient tření je obvykle vyšší než u tekutých či plastických maziv. Mezi tento typ maziv patří například grafit nebo sulfid molybdeničitý (MoS_2). Pevná maziva se užívají nejčastěji ve formě šupinek či prášku. Lze je nanášet buď přímo, nebo pomocí nosičů, jako jsou minerální oleje či plastická maziva [20,25,26].

2.5.4 Plynná maziva

Plynná maziva patří mezi nejjednodušší maziva, ale zároveň vykazují nejnižší viskozitu ze všech maziv. Mezi tato maziva patří například vzduch, helium, kyslík či dusík. Jejich využití je především aerostatické a aerodynamické mazání vysokorychlostních ložisek. Plynná maziva lze použít i v prostředí nebezpečné radiace či chemické agresivity. Mezi jejich výhody patří chemická stálost, nízké riziko kontaminace, dobré rozptýlení maziva, nízký koeficient tření a velký rozsah teplot možného použití. Užitečnou vlastností plynů je skutečnost, že jejich viskozita s teplotou roste. U kapalin je tomu naopak. Mezi nevýhody patří nižší schopnost odolávat zatížení a tedy i sklon k bezprostřednímu styku třecích povrchů [1,24,27].

3 Tváření

Tváření kovů je technologický proces výroby, kdy dochází k žádané změně tvaru výrobku či polotovaru. Použitím vhodných nástrojů či zápustek jsou vlivem vnějších sil vyvolány plastické deformace ve výchozím materiálu a to bez odběru třísek. Vstupním materiálem procesu může být ingot či plech. Důsledkem procesu tváření jsou změny mechanicko-fyzikálních vlastností. Průvodním jevem tváření je tření. Výhodou tohoto technologického procesu je vysoká produktivita práce, velká rozměrová přesnost a velké využití materiálu. Nevýhodou je pak zejména cena strojů i nástrojů [29,30].

Podmínkou tváření je, že vnější síly musí vyvolat v tvářeném tělese takový stav napjatosti, aby byla překročena mez kluzu tvářeného materiálu. Zároveň ovšem nesmí být překročena mez pevnosti, jinak by došlo ke ztrátě soudružnosti. Nad mezí kluzu dochází ke vzniku plastických deformací. Na proces tváření má vliv především vnitřní stavba materiálu, způsob zátěže a teplota materiálu [18,31].

Do tvářecího procesu vstupuje mnoho faktorů, jako jsou např. mechanismus plastické deformace, mechanické vlastnosti tvářeného materiálu, či požadavky na výrobek. S ohledem na tyto a další faktory je následně volen vhodný tvářecí proces, nástroj, materiál ale i tvářecí podmínky. Tvářecími podmínkami se rozumí teplota kovadel a materiálu či typ a množství maziva. Z důvodu komplexity tvářecích procesů se při jejich navrhování často spoléhá na různé druhy simulací a modelů [32].

3.1 Základní dělení tváření

Podle působení vnějších sil lze tváření dělit na [29,32]:

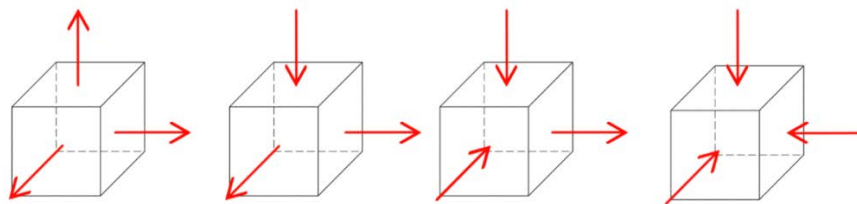
- Tváření objemové
- Tváření plošné

Podle teploty tvářecích procesů lze tváření dělit na [29]:

- Tváření za tepla
- Tváření za studena

3.1.1 Tváření objemové

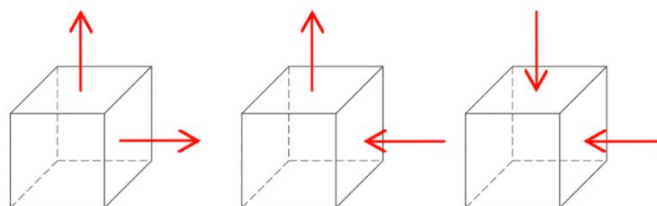
Objemovým tvářením se rozumí takové zatěžování vstupního polotovaru, kdy dochází k deformaci ve všech třech osách souřadného systému. Nastává prostorový stav napjatosti (Obr. 8). Toto tváření způsobuje deformaci, která postihuje celý objem polotovaru nebo jeho většinu. Pod tento typ tváření spadají následující tvářecí metody: protlačování, kování, válcování, tažení drátů. Objemové tváření probíhá převážně za tepla. Vstupním polotovarem jsou tyče, ingoty, bloky [29,30,32].



Obr. 8: Prostorové stavy napjatosti, upraveno z [18]

3.1.2 Tváření plošné

Plošným tvářením se rozumí takové zatěžování vstupního polotovaru, kdy dochází k deformaci pouze ve dvou osách souřadného systému. Nastává rovinný stav napjatosti (Obr. 9). Tloušťka stěny polotovaru zůstává téměř konstantní. Typickým příkladem tohoto typu tváření je tváření plechů. Patří sem ohýbání, tažení, stříhání, lisování. Plošné tváření probíhá převážně za studena. Vstupním polotovarem jsou plechy a pásy [30,32].



Obr. 9: Rovinné stavy napjatosti, upraveno z [18]

3.1.3 Tváření za tepla

Se změnou teploty dochází ke změně deformačního odporu materiálu proti tváření. Obecně platí, že plastické vlastnosti kovů se s rostoucí teplotou zlepšují. Tvářením za tepla se rozumí tváření nad teplotou rekrytalizace. Při teplotě rekrytalizace dochází k uzdravování deformovaných zrn, které vznikly vlivem tváření za studena a zároveň k růstu nových zrn. Rekrytalizace je provázena výrazným zjemněním zrn, což má pozitivní vliv na tvařitelnost kovu. Při tváření nad teplotou rekrytalizace dochází ke snížení pnutí v součásti. Proto je možno součást více deformovat, aniž by vznikaly trhliny [33,34].

3.1.4 Tváření za studena

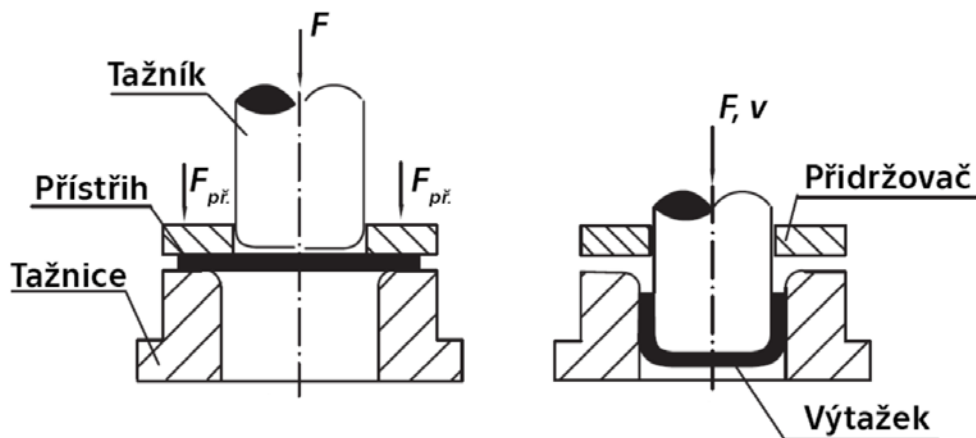
Při tváření pod teplotou rekrytalizace se zrna deformují a dochází k jejich protahování ve směru hlavní deformace. Postupně ubývají pozitivně orientované skluzové systémy a dislokace se protínají. Vlivem růstu dislokací nastává proces zpevňování kovu. Zvyšuje se pevnost, tvrdost, mez kluzu, ale výrazně klesá tažnost a vrubová houževnatost. Při tváření za studena je možné dosáhnout malých rozměrových tolerancí, protože nedochází k tepelnému smršťování při chladnutí materiálu. Další výhodou je, že nedochází k zoxidování povrchu [33,34].

3.2 Tažení plechů

Tažení plechů (někdy označováno též jako hluboké tažení) spadá pod plošné tváření. Při tomto procesu dochází k přetvoření výchozího rovinného polotovaru daných rozměrů (tzv. přístřihu) v dutý prostorový výtažek a to buď jedním či vícero tahy. Tloušťka stěny polotovaru zůstává zhruba konstantní. Technologie tažení zahrnuje prosté tažení, tažení se ztenčením stěny, žlábkování, protahování, zpětné tažení, rozšiřování nebo zužování. Tažením plechů lze získat rotační i nerotační tvary. Touto technologií je rovněž možné vyrábět nepravidelné výlisky (např. díly

karoserie automobilů). Jedná se o velmi častý proces zpracování plechů z důvodu vysoké rychlosti a produktivity [29,35,36].

Principem tažení je zatlačování tažníku do prostoru tažnice, čímž dochází k posunování plechu přes tažnou hranu a k plastické deformaci plechu na požadovaný dutý výtažek. K zamezení vlnění plechu lze použít přidržovač. Princip prostého tažení plechů s přidržovačem zobrazuje Obr. 10 [29,36].



Obr. 10: Princip prostého tažení plechů s přidržovačem, upraveno z [36]

Tažení plechů je provázeno značnými plastickými deformacemi v rámci celého dílu. Napjatost se v jednotlivých místech výtažku liší – mechanické vlastnosti jsou anizotropické. Hlavními oblastmi jsou [36,37]:

- Plochá část přístřihu (příruba)
- Část přístřihu vtahovaná do tažnice (stěna)
- Dno výtažku

Postupným vtahováním ploché části přístřihu tažníkem do prostoru tažnice vzniká radiální tahové napětí. Pokud je použit přidržovač, vyskytuje se v této oblasti i tangenciální tlakové napětí. Tažník přenáší sílu na vznikající dno výtažku - objevuje se zde radiální i tangenciální tahové napětí. Kritickým místem výtažku je ohyb u dna, z důvodu působení vysokého tahového napětí. Vliv tohoto napětí se může projevit ztenčením stěny výtažku. Pokud je ztenčení nadměrné, může dojít ke vzniku trhliny a k utržení dna [29,36].

3.2.1 Tribologický systém při tažení plechů

Tribologický systém při tažení plechů vychází z obecného tribologického systému popsaného v kapitole 2.1 Tribologický systém, přičemž základním třecím tělesem je plech a třecím tělesem je tvářecí nástroj. Každý z členů tribologického systému má na výsledné tribologické vlastnosti významný vliv.

U plechu jsou zásadní jeho materiálové vlastnosti (mez kluzu, pevnost v tahu, tvrdost, tepelné vlastnosti), ale i vlastnosti případného ochranného povlaku (mikrotvrdost, chemické složení, tepelné vlastnosti). U nástroje závisí rovněž na materiálu (tvrdost, textura povrchu, fyzikální vlastnosti) a na ochranném povlaku (mikrotvrdost, přilnavost, tepelné vlastnosti), ale i na geometrii. V případě mezilátky závisí především na typu a viskozitě maziva, ale i na tloušťce mazací vrstvy. Dále je důležité nezanedbat procesní parametry v podobě teploty a vlhkosti prostředí, relativní rychlosti třecích těles či délky a typu kontaktu třecích těles [38].

3.2.2 Tribologické a technologické faktory při tažení plechů



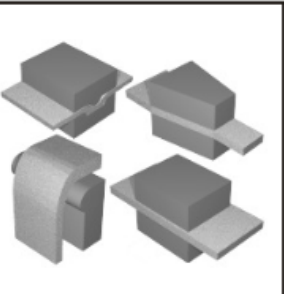
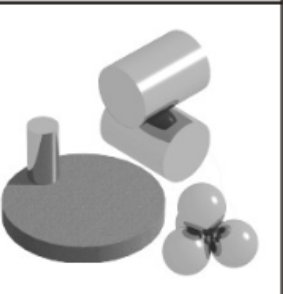
Při tažení plechů má na výsledný výtažek a jeho kvalitu vliv mnoho faktorů technologických i tribologických. Na jedné straně stojí faktory spjaté s tvářecím nástrojem. Sem lze zařadit například zaoblení tažníku a tažnice, vůli mezi tažníkem a tažnicí, tlak přidržovače či rychlost tažníku. Na druhé straně stojí faktory materiálu a tření (viz podkapitola 2.2.6 Parametry ovlivňující třecí sílu) [36].

Sohledem na množství parametrů, které mohou mít na velikost tření v rámci tvářecího procesu významný vliv, je třeba provádět tribologické zkoušky a měření, které se co možná nejvíce blíží reálným tvářecím operacím. Tyto zkoušky probíhají nejčastěji prostřednictvím různých experimentálních přípravků a zařízení. Skrze tyto experimenty a měření lze získat cenná data a lépe tak definovat okrajové podmínky pro numerické simulace tvářecích procesů. Příkladem okrajových podmínek jsou teplota, drsnost povrchu, kontaktní tlak nebo množství maziva. Výsledky

numerických simulací mohou následně vést k optimalizaci tvářecích procesů a tím i k úspoře času, financí a dalších zdrojů [8,19].

3.3 Tribologické zkoušky v procesu tváření plechů

Tribologické zkoušky lze v zásadě rozdělit do dvou skupin a to na zkoušky modelové a zkoušky provozní. Tyto dvě skupiny lze dále dělit do šesti kategorií dle toho, jak snadno jsou jejich výsledky aplikovatelné v průmyslové praxi (Obr. 11) [39,40].

| Tribologické zkoušky | | | |
|--|--|---|--|
|  |  |  |  |
| Kategorie 1 - 3 | Kategorie 4 | Kategorie 5 | Kategorie 6 |
| Reálná zkouška tváření v průmyslovém procesu | Modelová zkouška tváření v laboratoři (v měřítku) | Tribometr pro tváření plechů | Obecný tribometr |
| Zkoušky provozní | Zkoušky modelové | | |

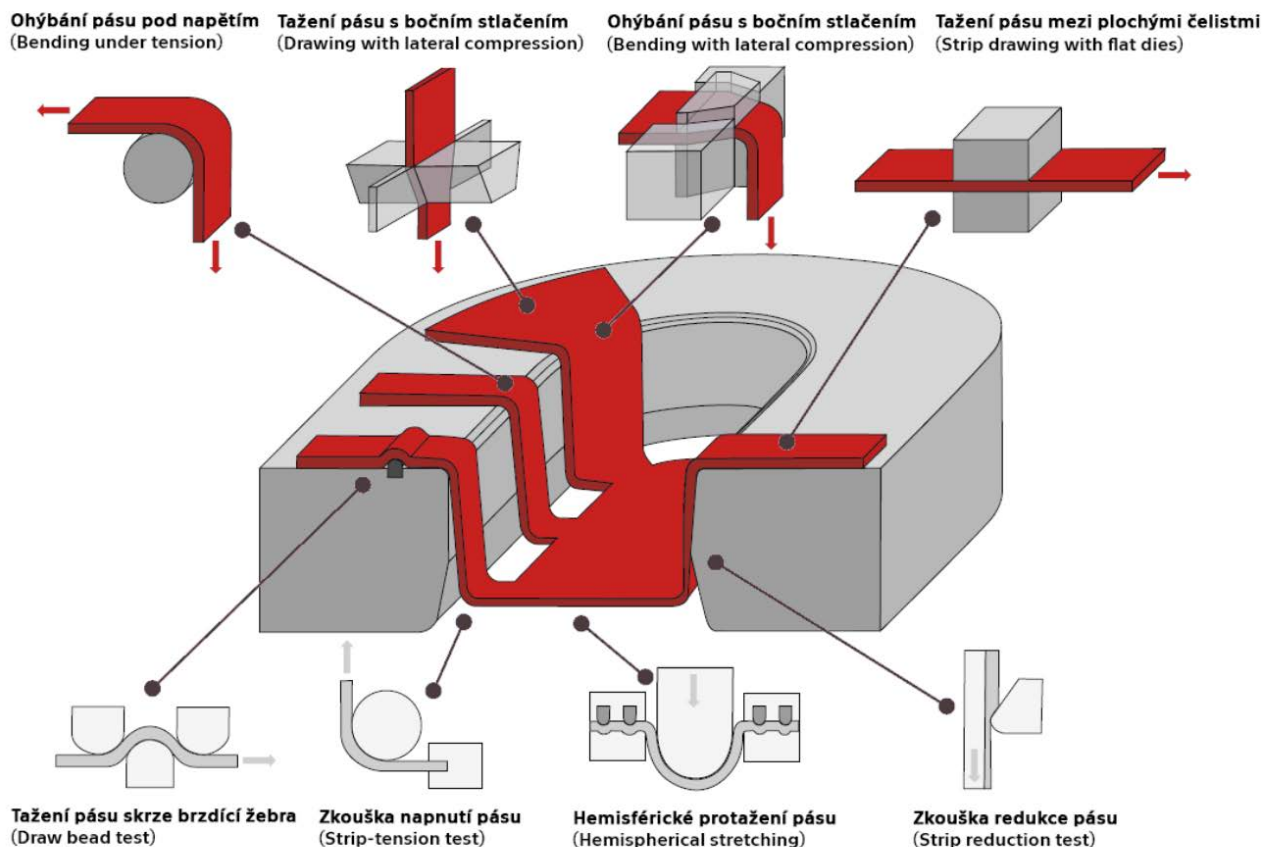
Obr. 11: Rozdělení tribologických zkoušek v procesu tváření, upraveno z [39]

Výhodou tribologických zkoušek kategorie 6 je vysoký stupeň standardizace, nicméně pro užití v tvářecích procesech nejsou zrovna ideální z důvodu malých kontaktních ploch. Při tváření má navíc vznikající plastická deformace (například změna drsnosti plechu) vliv na okrajové podmínky, což se u tribologických zkoušek této kategorie neuvažuje. Mezi zástupce této kategorie patří například metoda pin-on-disc nebo 4-ball test [39,40].

Tribologické zkoušky kategorie 1 až 3 jsou zkoušky integrované přímo do tvářecích operací reálných dílů za podmínek sériové výroby. Výsledky jsou sice přesné, nicméně nevýhodou jsou omezené možnosti změn okrajových podmínek a rovněž obtížné měření tribologických vlastností (např. koeficientu tření). Tyto kategorie zkoušek jsou typicky velmi nákladné [39,40].

Příkladem tribologické zkoušky kategorie 4 je hluboké tažení válcových výtažků (cylindrical cups). Obvykle však není možné měřit přímo třecí síly či koeficienty tření. Tato kategorie je tedy vhodná spíše pro bližší zkoumání tribologických systémů či pro hledání vhodných maziv [39,41].

Pro zjišťování koeficientů tření a obecně pro zjišťování vlivu dílčích tribologických podmínek (vlivu kontaktního tlaku, vlivu relativní rychlosti třecích těles, vlivu teploty, vlivu množství a typu maziva) jsou nejvhodnější tribologické zkoušky kategorie 5. Přehled možných tribologických zkoušek této kategorie vhodných pro proces tváření plechů zobrazuje Obr. 12. Nespornou výhodou oproti kategorii 4 je fakt, že u této kategorie zkoušek lze korigovat dílčí tribologické podmínky nezávisle na sobě. Z toho tedy vyplývá, že v ideálním případě lze získat koeficient tření přímo jako funkci těchto podmínek [39,40].



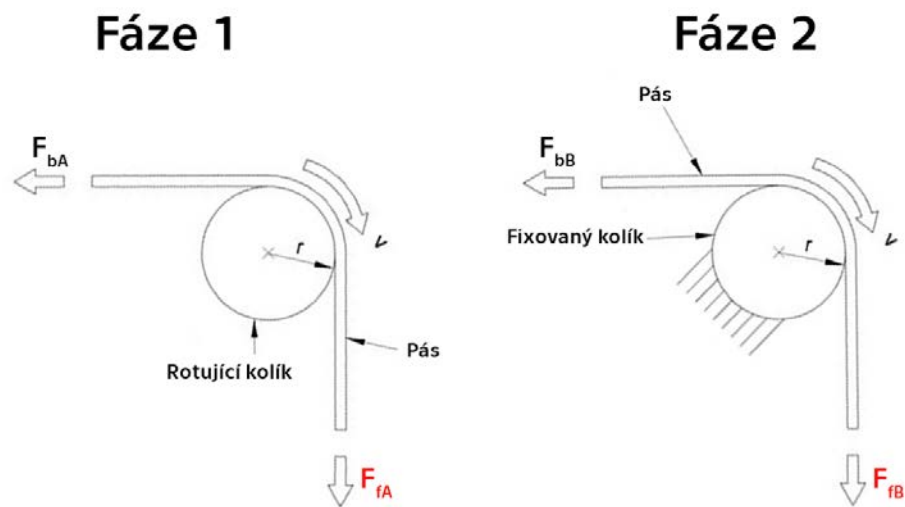
Obr. 12: Přehled tribologických zkoušek kategorie 5, upraveno z [39]

Nejvhodnějšími tribologickými zkouškami pro splnění výše zmíněných požadavků jsou tribometry zobrazené na Obr. 12 nahoře. U ostatních tribometrů nastává problém zejména z hlediska nestejněmého kontaktního tlaku nebo proměnlivé tažné rychlosti z důvodu ztenčování stěny [39].

3.3.1 Ohýbání pásu pod napětím

Principem ohýbání pásu pod napětím je tažení kovového pásu (plechu) přes válcový kolík o daném poloměru, viz Obr. 13. Tato metoda slouží k simulaci tření na tažné hraně a poloměr kolíku tedy odpovídá zaoblení na tažné hraně. Tato testovací metoda standardně probíhá ve dvou krocích: v první fázi se pás táhne přes válcový kolík, kterému je umožněno volně rotovat kolem své osy, v druhé fázi pak přes pevně fixovaný, nepohyblivý kolík (Obr. 13). Předpokladem je, že nedochází k prokluzu pásu

v průběhu testu. Pás je tahově namáhán na obou svých koncích – na jedné straně tahovou silou (F_{fA} , F_{fB}), na druhé straně silou působící proti tahu – brzdou silou (F_{bA} , F_{bB}). V první fázi testu, kdy se kolík může volně protáčet, se předpokládá, že třecí síla je minimální a síla potřebná k tažení pásu je de facto síla potřebná k ohnutí pásu. V druhé fázi testu, kdy je kolík fixován tak, aby byl nepohyblivý, se síla potřebná k tažení pásu skládá ze síly potřebné k ohnutí pásu a ze třecí síly [42,43].



Obr. 13: Ohýbání pásu pod napětím, upraveno z [42]

Třecí sílu lze tedy zjednodušeně určit takto [43]:

$$F_T = F_{fB} - F_{fA} \quad [N] \quad (2)$$

kde F_{fA} je tahová síla v první fázi testu [N]

F_{fB} je tahová síla v druhé fázi testu [N]

Výpočet koeficientu tření touto metodou se zohledněním tloušťky pásu, velikosti kontaktního úhlu a poloměru kolíku může vypadat takto [38]:

$$\mu = \frac{1}{\gamma} \frac{2r + t}{2r} \ln \frac{F_{fB} - (F_{fA} - F_{bA})}{F_{bB}} \quad [-] \quad (3)$$

kde γ je kontaktní úhel [rad]

r je poloměr kolíku [m]

t je tloušťka pásu plechu [m]

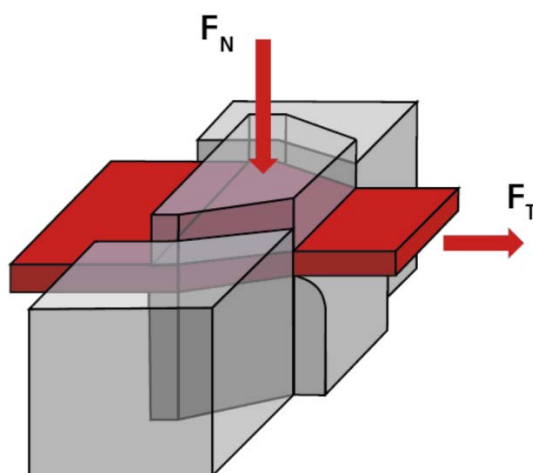
F_{bA} je síla působící proti tahu (brzdná síla) v první fázi [N]

F_{bB} je síla působící proti tahu (brzdná síla) v druhé fázi [N]

V rámci této metody existuje několik různých postupů výpočtů koeficientů tření, obecně ale platí, že výpočty jsou poměrně složité. Problémem je výpočet kontaktního tlaku, kde se postupy liší autor od autora. Hlavní úskalí tkví v tom, že rozložení tlaku nemusí být homogenní. Na homogenitu rozložení kontaktního tlaku má vliv zejména úhel ohybu a poloměr kolíku [39].

3.3.2 Tažení pásu s bočním stlačením

Principem tažení pásu s bočním stlačením je tažení pásu skrze štěrbinu ve tvaru klínu (Obr. 14). Tato metoda slouží k popsání vlivu radiálního tahového napětí při hlubokém tažení kruhového přístřihu. Původně metoda sloužila k určování mezního stupně tažení. Tato metoda může teoreticky sloužit i k určení koeficientu tření, nicméně objevují se problémy svědčící o nehomogenním rozložení kontaktního tlaku – na pásu vznikají boule, v případě tenkých plechů může dojít k náklonu pásu v oblasti tažné hrany. Dalšími problémy této metody jsou velké opotřebení na krajích plechu, značné opotřebení nástrojů, ale i nerovnoměrné rozložení tloušťky plechu [39,44].



Obr. 14: Tažení pásu s bočním stlačením, upraveno z [39]

3.3.3 Ohýbání pásu s bočním stlačením

Ohýbání pásu s bočním stlačením je kombinací ohýbání pásu pod napětím a tažení pásu s bočním stlačením. Obě tyto metody jsou jednotlivě rozebrány výše.

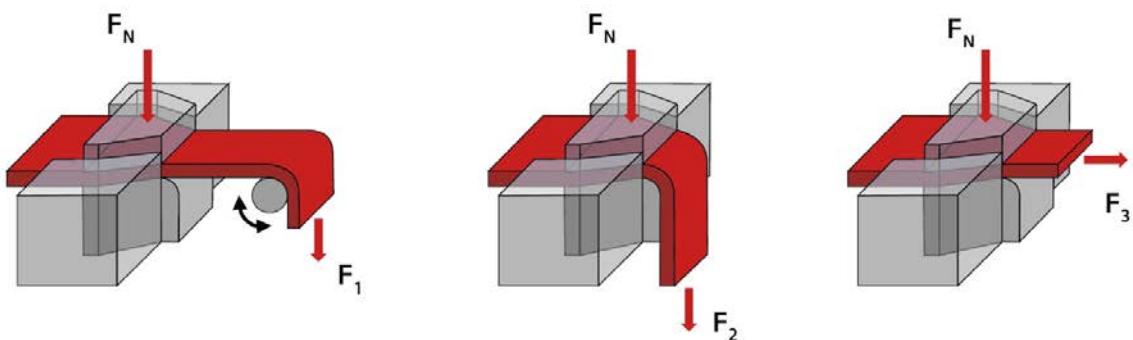
Nevýhodou této metody je, že je dosti komplexní a náročná na provedení. Z toho důvodu se v praxi moc nevyužívá. Pro určení koeficientu tření v místě zaoblení je třeba provést tři měření a to na třech různých konfiguracích (Obr. 15). Z toho důvodu může být měření snadno zatíženo vnesenými chybami a nepřesnostmi. Výpočet koeficientu tření pak vypadá takto [39]:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{R + \frac{t_0}{2}}{R} \cdot \ln \left(\frac{F_2 - F_1 + F_3}{F_3} \right) \quad [-] \quad (4)$$

kde R je poloměr zaoblení [m]

t_0 je výchozí tloušťka pásu [m]

F_1, F_2, F_3 jsou tahové síly pro příslušné konfigurace měření [N]



Obr. 15: Ohýbání pásu s bočním stlačením – jednotlivé konfigurace [39]

3.3.4 Tažení pásu mezi plochými čelistmi

Tažení pásu mezi plochými čelistmi neboli strip-drawing test (Obr. 16) simuluje tření mezi přidržovačem a tažnicí. Značnou výhodou této metody je jednoduchý princip, přímočarost při vyhodnocování koeficientů tření,

ale i dobrá přenositelnost do reálných tvářecích procesů. Užitím této metody lze na rozdíl od ostatních zmíněných metod snadno dosáhnout homogenních a v čase neměnných zkušebních podmínek – lze snadno upravit a nastavit kontaktní tlak, velikost třecích ploch a tažnou rychlost. Pro spolehlivost výsledků a rovnoměrné rozložení kontaktního tlaku je zásadní zejména konstrukční návrh tribometru – pro konzistentní výsledky je důležité, aby byla konstrukce tribometru co možná nejtuzší. Vyšší tuhost rovněž snižuje riziko vzniku Stick-Slip efektu [38,39].

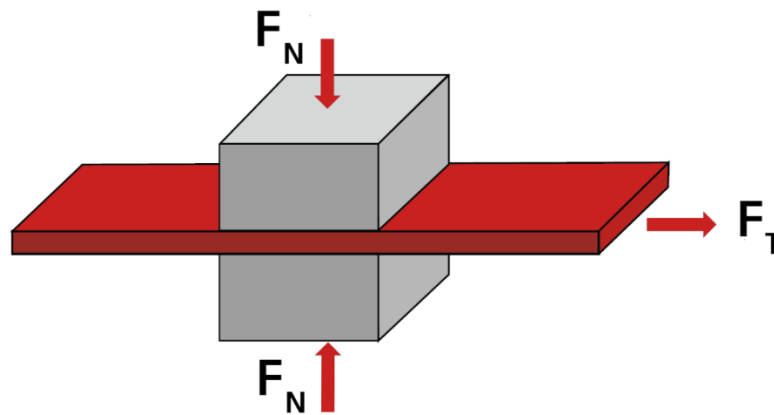
Z možných variant tribometrů byl s ohledem na požadované výstupy diplomové práce (návrh zkušebního zařízení pro posouzení vlivu tribologických podmínek na výsledný koeficient tření) zvolen tento typ tribometru. Koeficient tření se v tomto případě určí takto [38]:

$$\mu = \frac{F_T}{2F_N} \quad [-] \quad (5)$$

kde μ je koeficient tření [-]

F_T je třecí síla [N]

F_N je normálová síla [N]



Obr. 16: Princip tažení pásu mezi plochými čelistmi, upraveno z [39]

Čelisti mohou mít plochý tvar, ale je možné použít i tvar válcový či jiný. Je důležité zmínit, že na výsledný koeficient tření mají vliv jak zmíněné tribologické podmínky (kontaktní tlak, relativní rychlost třecích těles, teplota, množství a typ maziva, topografie povrchu čelistí i plechu), tak právě i tvar čelistí, ale i orientace plechu mezi čelistmi [37,38].

4 Zkušební zařízení

4.1 Požadavky na zkušební zařízení

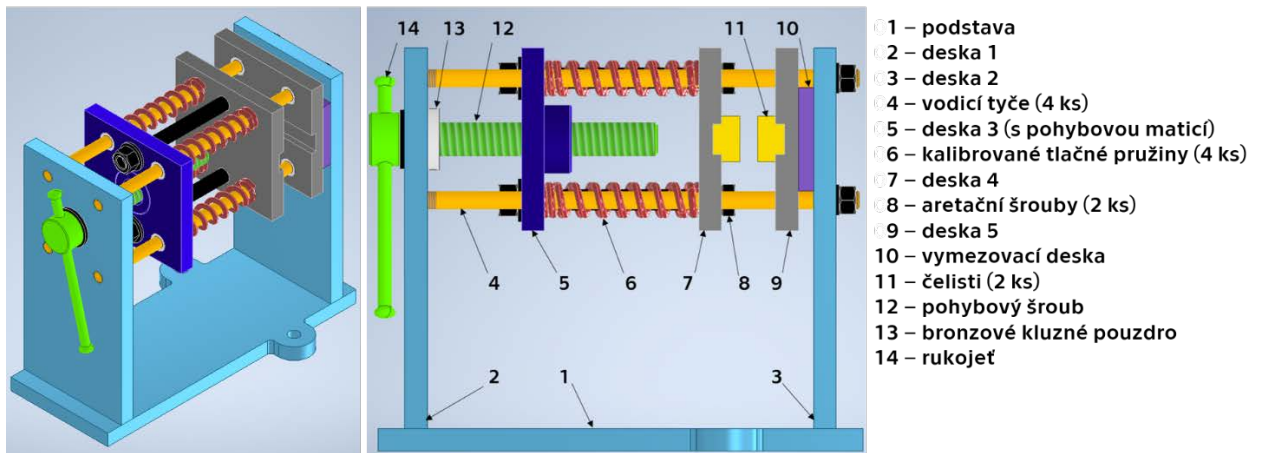
Návrh zkušebního zařízení vychází z využití principu tribologické metody tažení pásu plechu mezi plochými čelistmi (strip-drawing test), jejíž princip je podrobněji rozebrán v podkapitole 3.3.4 Tažení pásu mezi plochými čelistmi. Tato metoda je ideální nejen z hlediska své jednoduchosti na provedení, ale i z hlediska následného vyhodnocení. Za předpokladu vhodné konstrukce zkušebního zařízení poskytuje tato metoda dobrou přenositelnost do reálných tvářecích procesů. Zároveň umožňuje korigovat tribologické podmínky (teplota, topografie povrchů, kontaktní tlak, množství a typ maziva apod.) nezávisle na sobě – z toho tedy vyplývá, že v ideálním případě lze určit koeficient tření jako funkci těchto podmínek [38,39].

Mezi konstrukční požadavky zkušebního zařízení patří v první řadě tuhost celého zařízení, a to z důvodu konzistence výsledků měření. Zkušební zařízení by mělo být alespoň částečně rozebíratelné, ale v žádném případě ne na úkor tuhosti konstrukce. Konstrukce by měla umožňovat snadno nastavit definovaný kontaktní tlak. Rozložení tlaku by mělo být homogenní a kontaktní tlak by měl zůstat po nastavení konstantní. Čelisti by měly být jednoduše vyměnitelné. Zařízení by rovněž mělo umožňovat sledování vlivů teploty během procesů zkoušek. Rozměrová omezení zařízení jsou taková, aby se zařízení spolehlivě vešlo do pracovního prostoru použitého univerzálního trhacího stroje. Zařízení by mělo být navrženo tak, aby bylo možné využít dostupné laboratorní vybavení. V neposlední řadě by mělo být zkušební zařízení jednoduché na obsluhu.

4.2 Návrh zkušebního zařízení a jeho popis

Návrh zkušebního zařízení pro měření tribologických vlastností v procesech plošného tváření vychází z výše zmíněných předpokladů.

Model navrženého zařízení je zobrazen na Obr. 17. Kompletní výkresová dokumentace je pak součástí Přílohy 1.



Obr. 17: Model zkušebního zařízení

Tuhost zkušebního zařízení zajišťuje robustní ocelový rám (Obr. 17, bledě modrá), složený z podstavy a dvou navařených desek (deska 1 a deska 2). Tato část zařízení je tudíž nerozebíratelná. Dále se zařízení skládá ze čtyř vodících tyčí (Obr. 17, oranžová), které jsou z obou stran usazeny v deskách rámu, a to prostřednictvím šroubových spojů. Na jedné straně rámu jsou vodící tyče zašroubovány přímo do desky rámu, na druhé straně rámu vodící tyče prochází skrze průchozí díry v rámu a následně jsou zajištěny podložkami a maticemi. Na vodících tyčích jsou umístěny deska 3, deska 4 a deska 5. Pro zajištění hladkého pohybu desek po vodících tyčích jsou vodící tyče umístěny v přesných bronzových pouzdrech (Obr. 17, bílá).

Deska 4 a deska 5 v sobě mají obdélníkovou drážku pro usazení čelistí. Mezi deskou 5 a deskou 2 může být umístěna vymežovací deska pro vystředění pásu plechu v pracovním prostoru univerzálního trhačíchho zařízení.

Prvkem zajišťujícím nastavení kontaktního tlaku jsou čtyři kalibrované tlačné pružiny (Obr. 17, červená). Stlačení pružin je možné díky pohybovému šroubu a pohybové matici navažené na desce 3. Pohybový šroub je usazen v bronzovém kluzném pouzdru v desce 1 a následně je zajištěn kolíkem procházejícím skrze pouzdro i šroub.

Pro jednoduchou manipulaci a obsluhu je zařízení opatřeno rukojetí, pomocí níž je možné čelisti vůči sobě přibližovat či oddalovat. Rukojeť rovněž slouží ke snadnému stlačování či uvolňování pružin. Po dosažení požadovaného stlačení pružin je třeba rovnoměrně dotáhnout matice na aretačních šroubech, čímž je zajištěný neměnný kontaktní tlak mezi čelistmi v průběhu zkoušky. Rozměry celého zařízení jsou voleny tak, aby bylo možné zařízení bez problému umístit do pracovního prostoru univerzálního trhacího stroje.

4.2.1 Nastavení kontaktního tlaku

Předpokladem pro nastavitelnost definovaného kontaktního tlaku je užití čtyř kusů kalibrovaných šroubových tlačných pružin. Jedním z požadavků na zkušební zařízení je, aby byly pružiny schopny vyvodit sílu 10 kN. Přípravek je však rozebíratelný, díky čemuž je možné pružiny libovolně měnit za jiné typy dle požadavků a potřeb. V navrženém zkušebním zařízení jsou všechny pružiny stlačovány rovnoměrně a velikost celkové působící síly lze určit na základě míry jejich stlačení. S ohledem na skutečnost, že rozměry čelistí a tedy i velikosti kontaktních ploch jsou známé, je možné jednoduše spočítat kontaktní tlak mezi čelistmi dle vzorce:

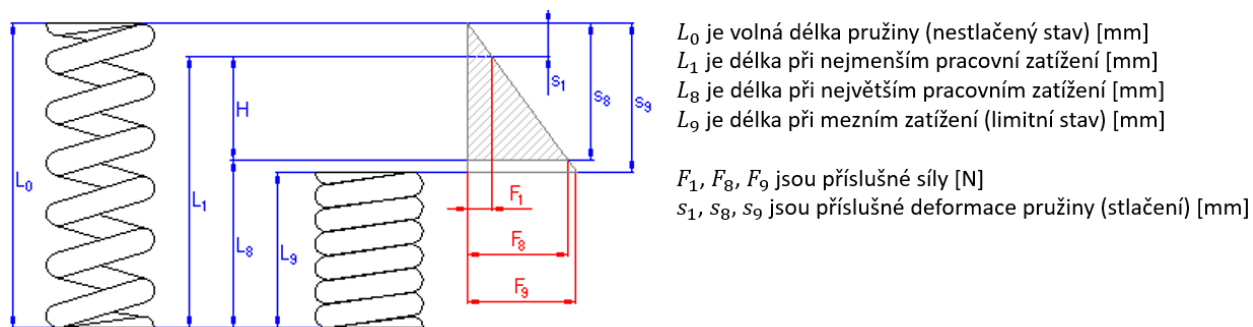
$$p = \frac{F}{S} \quad [MPa] \quad (6)$$

kde p je kontaktní tlak [MPa]

F je síla odpovídající stlačení pružin [N]

S kontaktní plocha [mm²]

Vztah mezi délkou pružin, příslušnou silou a stlačením pro tento typ pružin zachycuje Obr. 18.

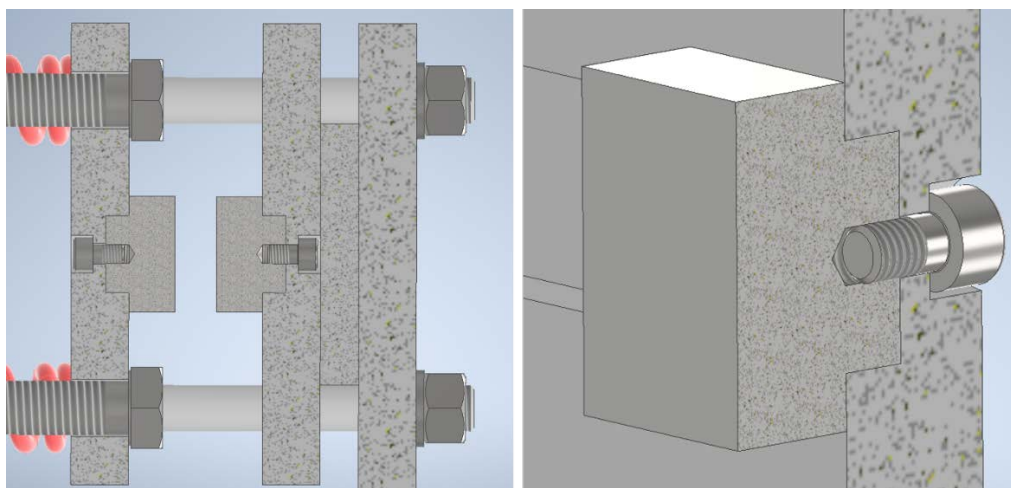


Obr. 18: Kalibrovaná šroubová tlačná pružina, upraveno z [45]

4.2.2 Výměna čelistí

Čelisti jsou nejprve z boku zasunuty do obdélníkových drážek desek 4 a 5. Pro přesné zajištění polohy čelistí jsou uprostřed drážek v deskách průchozí díry. Čelisti pak mají ve svém středu díry s vnitřními závitů. Skrze desky jsou do těchto závitů zašroubovány šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Princip uchycení čelistí zachycuje Obr. 19. Toto řešení umožňuje snadnou výměnu čelistí a zároveň funkční a spolehlivou fixaci čelistí v požadované poloze.

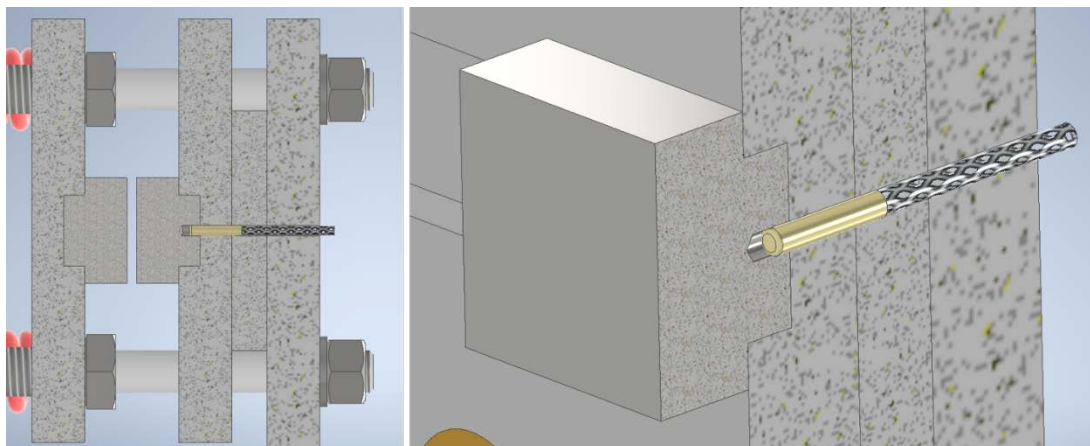
Díky tomu je možné čelisti snadno vyměnit a provádět měření i s jinými sadami, neboť na výsledky měření má vliv nejen tvar čelistí, ale i topografie jejich povrchu, materiál či velikost.



Obr. 19: Princip uchycení čelistí

4.2.3 Měření teploty

Měření teploty v průběhu zkoušek je na navrženém experimentálním zařízení možné díky použití termočlánu. Ten je umístěn ve statické části zkušebního zařízení. Princip je následující: termočlánek je zaveden skrze desku 2, vymezovací desku a desku 5 přímo do otvoru v jedné z čelistí zkušebního zařízení. Umístění termočlánu znázorňuje Obr. 20.



Obr. 20: Měření teploty pomocí termočlánu

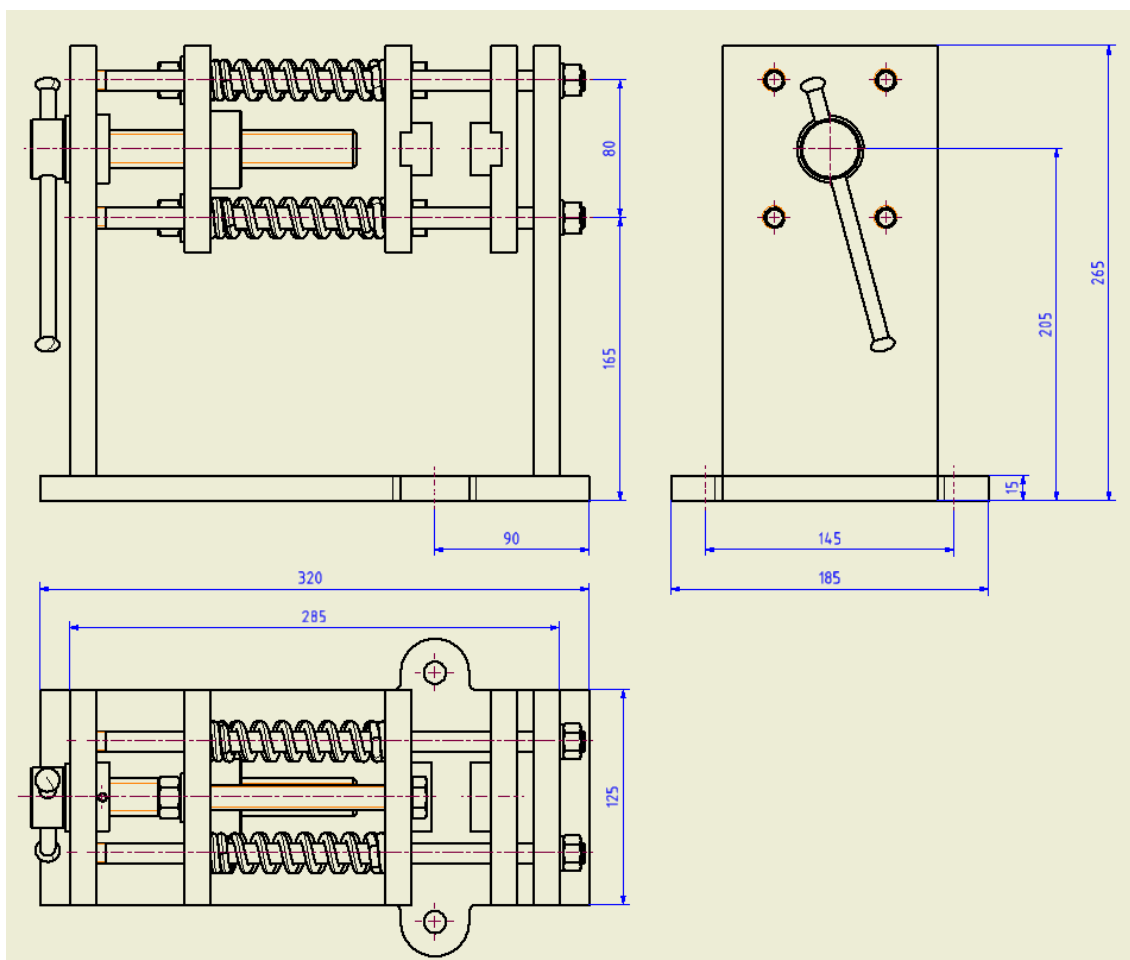
Parametry zvoleného termočlánu jsou uvedeny v Tab. 2 níže.

Tab. 2: Parametry zvoleného termočlánu [46]

| | |
|-------------------------|---------------------|
| Typ: | Termočlánek typu K |
| Teplotní rozsah: | 0 až 500 °C |
| Rozměry pouzdra: | ø3x15 mm |
| Typ kabelu: | Kovové opletení |
| Typ vodičů: | 2 samostatné vodiče |
| Délka přivedení: | 100 cm |
| Výrobce: | Neven |
| Model: | TC-TUM1-3D |

4.2.4 Základní rozměry zkušebního zařízení

Základní rozměry celého zkušebního zařízení zobrazuje Obr. 21. Maximální rozměry jsou 320x185x265 mm (délka, šířka, výška). Rozměry jsou voleny tak, aby se zařízení vešlo do pracovního prostoru použitého univerzálního trhačího stroje.



Obr. 21: Základní rozměry zkušebního zařízení

4.3 Parametry univerzálního trhacího stroje

K provedení samotných měření je vedle zkušebního zařízení třeba využít i univerzálního trhacího stroje. V tomto případě se jedná o v laboratoři dostupný univerzální trhací stroj LabTest 5.100SP1 (Obr. 22). Technické parametry tohoto univerzálního trhacího stroje jsou uvedeny v Tab. 3.



Obr. 22: Univerzální trhací stroj LabTest 5.100SP1

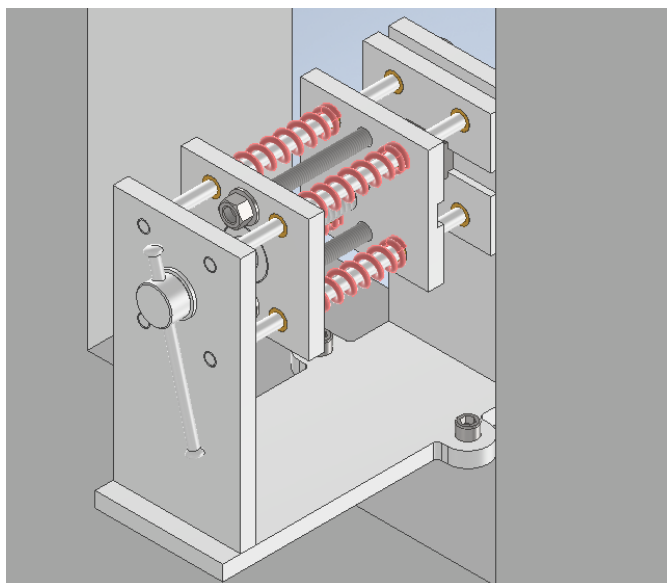
Tab. 3: Technické parametry univerzálního trhacího stroje LabTest 5.100SP1

| | |
|---------------------------|--------------------------|
| Jmenovité zatížení | 100 kN |
| Max. zkušební rychlost | 600 mm/min |
| Výška pracovního prostoru | 1130 mm |
| Šířka pracovního prostoru | 400 mm |
| Tuhost rámu | $1,6 \cdot 10^{-6}$ mm/N |

4.4 Postup měření na zkušebním zařízení

4.4.1 Upnutí zkušebního zařízení do trhacího stroje

Před samotným měřením je třeba zkušební zařízení upnout do pracovního prostoru použitého univerzálního trhacího stroje. Upnutí zkušebního zařízení do stroje je provedeno užitím dvou šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (Obr. 23).



Obr. 23: Upnutí zkušebního zařízení do univerzálního trhačného stroje

4.4.2 Příprava vzorků a čelistí

Před provedením experimentu je třeba náležitě připravit jak vzorky, tak i samotné čelisti zkušebního zařízení. Je nezbytné povrchy vzorků i čelistí zbavit nečistot a následně je odmastit, aby se zamezilo ovlivnění výsledků měření.

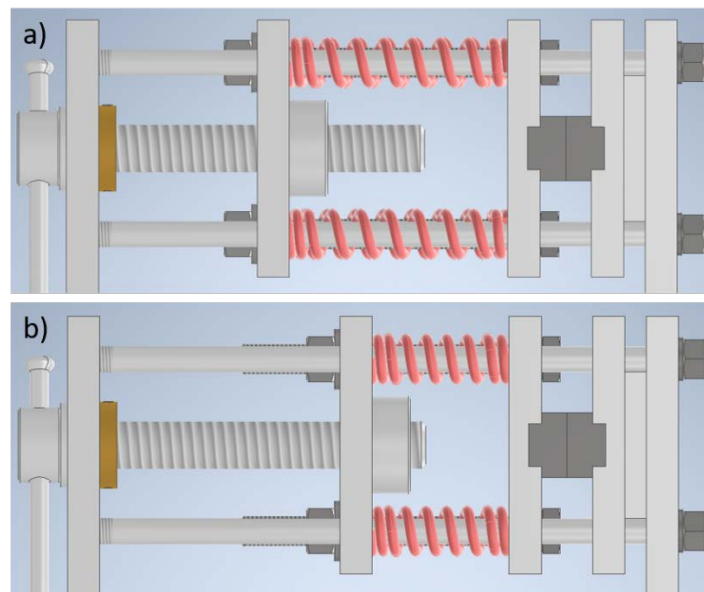
V případě, že je zjišťován vliv předepsaného typu a množství maziva na tribologické vlastnosti (koeficient tření), dojde v této fázi rovněž k aplikaci maziva přímo na zkoušený vzorek, tedy na pás plechu o daných rozměrech.

4.4.3 Nastavení požadované síly a aretace pružin

Požadovaná síla je vyvozena pomocí čtyř kalibrovaných šroubových tlačných pružin. Stlačování pružin je možné díky pohybovému šroubu a pohybové matici navařené na jedné z desek (deska 3). Pružiny jsou stlačovány mezi dvěma deskami rovnoměrně (deska 3 a 4), tudíž lze snadno určit výslednou působící sílu – jedná se o součet sil jednotlivých pružin.

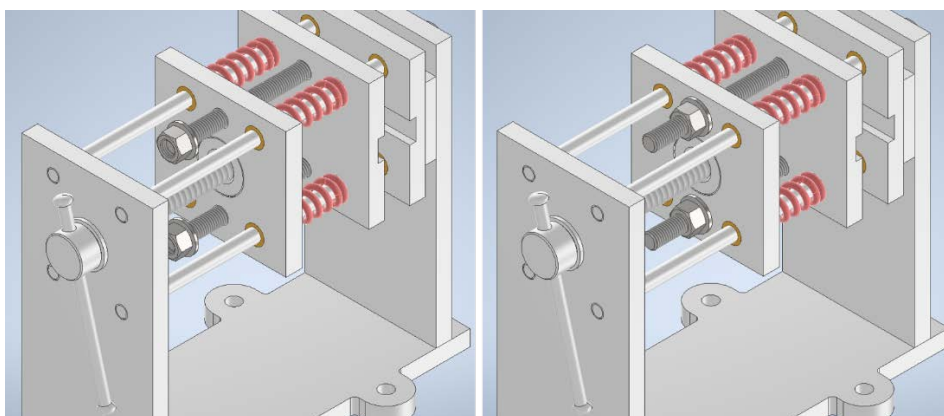
Ke stlačování pružin slouží primárně rukojeť. S její rotací lze dosáhnout pohybu desky s navařenou pohybovou maticí (deska 3) po pohybovém

šroubu. Důsledkem je tedy i stlačování pružin. Stav před stlačením a po stlačení pružin znázorňuje Obr. 24.



Obr. 24: Stlačování pružin – a) výchozí stav, b) stlačený stav

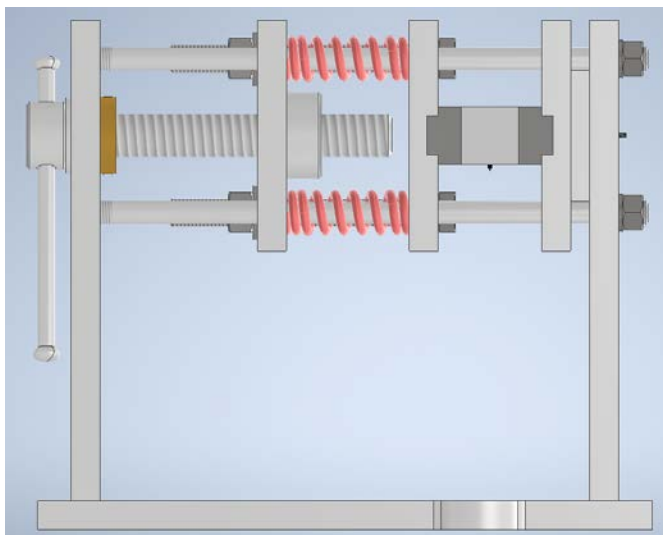
Po stlačení pružin a vyvození požadované síly je třeba desky 3 a 4 v dané poloze aretovat tak, aby vzdálenosti mezi deskami a tím i stlačení pružin zůstaly konstantní. Aretace usnadní a zrychlí celý proces měření dalších vzorků. K aretaci slouží dva šrouby s šestihrannou hlavou umístěné mezi deskami 3 a 4. Aretační šrouby prochází dírami uprostřed mezi vodícími tyčemi, jeden nahoře, druhý dole. K jejich zajištění jsou použity šestihranné matice a podložky. K aretaci pak stačí rovnoměrně dotáhnout dvojici matic na konci šroubů. Proces aretace znázorňuje Obr. 25.



Obr. 25: Aretace pružin

4.4.4 Ohřev čelistí v případě sledování vlivu teploty

Při reálných procesech hlubokého tažení v procesech plošného tváření teploty dosahují až 120 °C. Vliv teploty na třecí vlastnosti tedy není v žádném případě zanedbatelný. Pro simulaci reálného tvářecího procesu je důležité mít možnost čelisti ohřát na požadovanou teplotu a zároveň i sledovat teplotu během celého měření. Ohřev čelistí probíhá vložením ohřívacího zařízení mezi čelisti, přičemž ohřívacím zařízením se rozumí hliníková krychle s topnou spirálou uvnitř (Obr. 26). Teplota je sledována skrze termočlánek umístěný do otvoru v čelisti zkušebního zařízení, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2.3 Měření teploty. Po ohřátí čelistí na požadovanou teplotu je hliníková krychle vyjmuta.



Obr. 26: Nahřívání čelistí

4.4.5 Upnutí vzorku

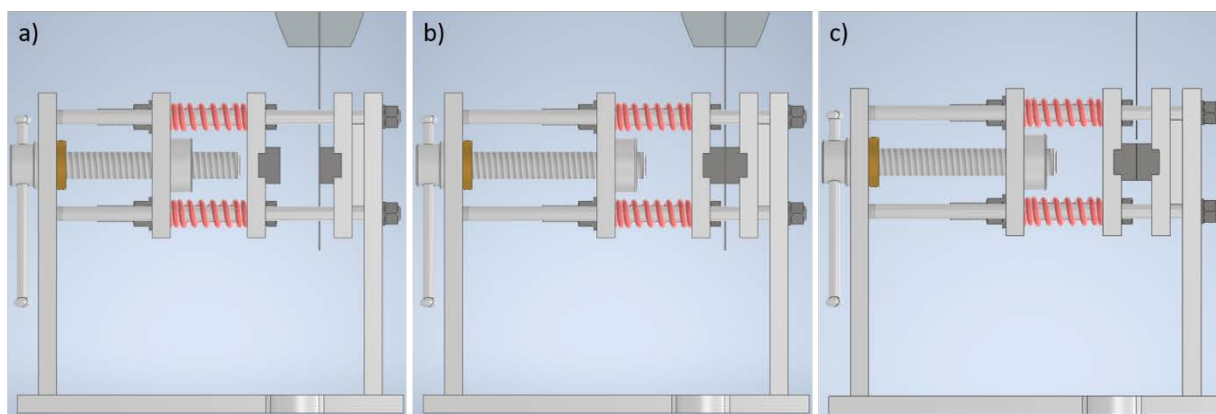
Vzorek v podobě pásu plechu je upnut nejprve mezi čelisti univerzálního trhacího stroje. Následně je upnut i mezi čelisti zkušebního zařízení. V případě potřeby je možné pomocí vymezovací desky dosáhnout toho, aby se rovina mezi čelistmi zkušebního zařízení přesně shodovala s rovinou mezi čelistmi univerzálního trhacího stroje. Díky tomu může být plech v průběhu zkoušky tažen svisle vzhůru.

4.5 Samotná zkouška

Průběh samotné zkoušky se lehce liší v závislosti na momentálně zkoumané tribologické podmínce a jejím vlivu na výsledný koeficient tření. V první fázi je však klíčové, aby pružiny byly stlačeny na požadovanou sílu a v tomto stavu i aretovány.

Pokud se zkoumá vliv předepsaného typu a množství maziva, mazivo je nejprve aplikováno na vzorek plechu. Pokud se zkoumá vliv teploty, proběhne ohřátí čelistí. Pokud se zkoumá vliv topografie povrchu čelistí či vliv jejich tvaru a velikosti kontaktní plochy, pak se do zkušebního zařízení vloží a upne odpovídající sada čelistí.

Dále je však princip samotné zkoušky vždy shodný. Vychází se z předpokladu, že již byly provedeny předchozí kroky, pružiny jsou stlačeny na požadovanou sílu a aretovány. Pás plechu je vhodně upnut mezi čelistmi zkušebního stroje i zkušebního zařízení a nic nebrání tomu, aby mohl být pás plechu tažen svisle vzhůru. Průběh zkoušky zachycuje Obr. 27.



Obr. 27: Princip zkoušky

kde **a)** je výchozí stav, **b)** je upevnění a zatížení vzorku, **c)** je tažení pásu plechu

První fáze a) je výchozí stav. Pružiny jsou stlačeny na požadovanou sílu, vzorek je vhodně upnut. Další tribologické podmínky odpovídají požadavkům dané zkoušky (teplota čelistí, typ a množství maziva, atp.).

V druhé fázi b) dochází k přisunutí čelistí k sobě a k semknutí vzorku plechu. V této fázi je nakonfigurován a zapnut univerzální trhací stroj, který konstantním pohybem čelistí táhne ve svislém směru pás plechu z prostoru mezi čelistmi.

Třetí fáze c) je závěrečná fáze zkoušky. Pás plechu může, ale nemusí, být kompletně vytažen z prostoru mezi čelistmi. Záleží na zvolené délce dráhy tažení plechu a na typu a cíli prováděného měření. Po povytažení vzorku o požadovanou vzdálenost je univerzální trhací stroj zastaven a měření konkrétního vzorku končí – vzorek je vyjmut z čelistí univerzálního trhacího stroje, odložen stranou a označen. Zkušební zařízení je vráceno do výchozího stavu a) a může následovat měření dalšího vzorku.

4.6 Princip vyhodnocení dat

V průběhu zkoušky je zaznamenávána třecí síla vyvinuta univerzálním trhacím strojem v závislosti na dráze tažení vzorku. Normálová síla je známá – jedná se o celkovou sílu stlačení kalibrovaných šroubových tlačných pružin. Z těchto dat lze vyhodnotit koeficient tření pro daný vzorek a dané tribologické podmínky (rychlost tažení, teplota, typ a množství maziva, kontaktní tlak atd.).

Dále je možné hodnotit morfologii povrchu jak zkoušeného vzorku, tak i čelistí zkušebního zařízení a to buď pouhým okem či pod mikroskopem.

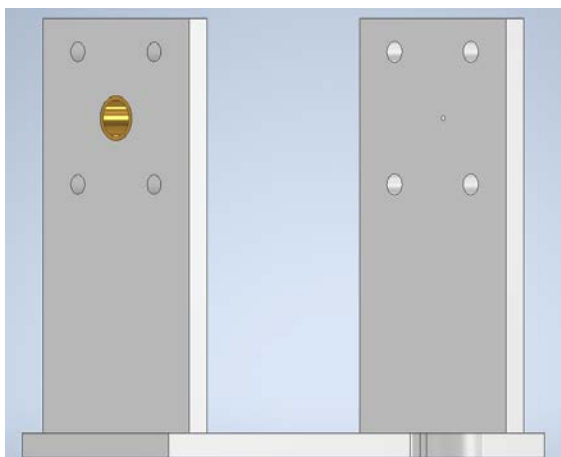
4.7 Montáž a výroba zkušebního zařízení

Jak již bylo dříve zmíněno, zkušební zařízení je navrženo tak, aby bylo alespoň částečně rozebíratelné. Důvodem je zejména možnost výměny pružin za jiný typ. Proto se v montáži využívá hlavně šroubových spojů. Výjimkou je pak rám zkušebního zařízení – jedná se o svařenec tří ocelových desek.

4.7.1 Montáž zkušebního zařízení

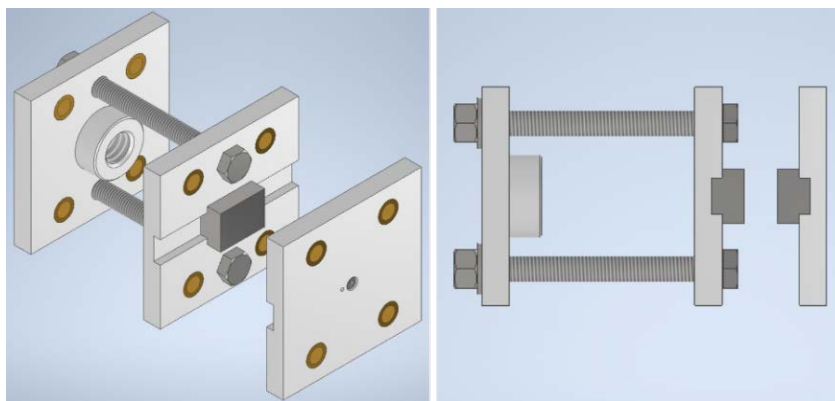
Postup montáže je následující:

1. V prvním kroku je třeba nachystat rám – do díry, kam bude později vložen pohybový šroub (deska 1), je umístěno bronzové kluzné pouzdro (Obr. 28).



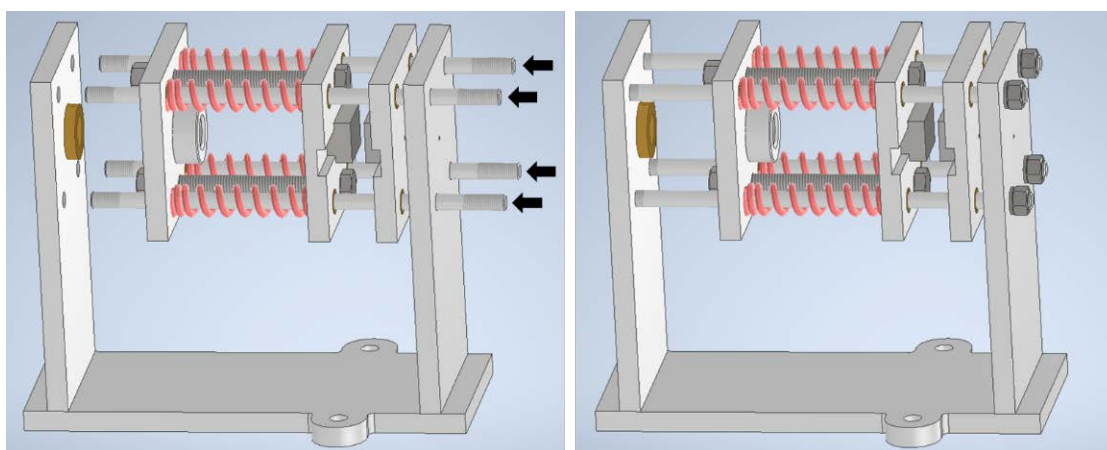
Obr. 28: Rám zkušebního zařízení s kluzným pouzdem

2. V druhém kroku je třeba přichystat jednotlivé desky, které budou pak umístěny na vodicích tyčích (deska 3, 4, 5). Do čtyř připravených otvorů na každé desce jsou umístěna odlévaná bronzová pouzdra. Smyslem těchto pouzder je snížit tření mezi vodicími tyčemi a deskami a usnadnit tak jejich vzájemný pohyb. Zároveň je třeba už v tomto kroku přidat oba aretační šrouby a pomocí podložek a šestihranných matic je následně zajistit, viz Obr. 29. Z důvodu jejich délky by pozdější umístění nebylo možné. Rovněž je doporučeno už v této fázi vložit a zajistit dvojici čelistí.



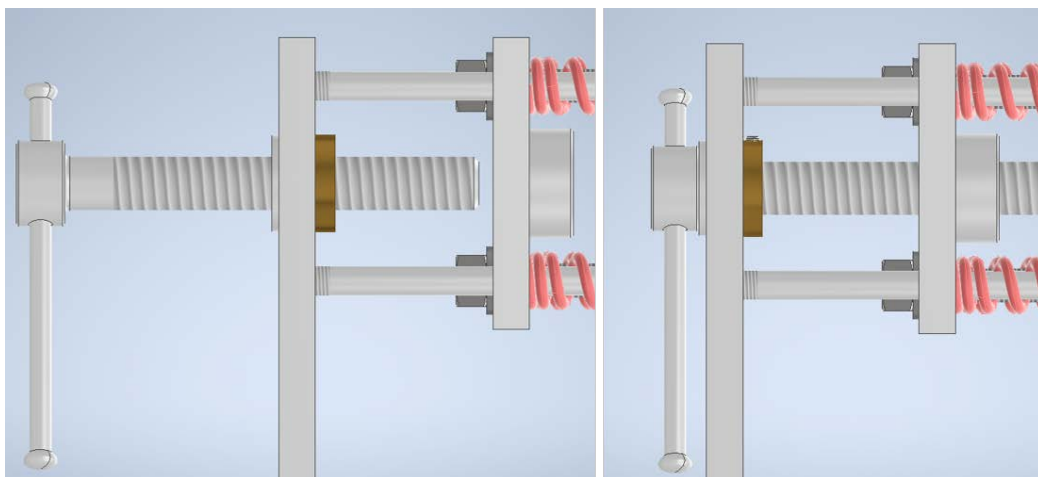
Obr. 29: Umístění aretačních šroubů

3. Dalším krokem je zašroubování vodicích tyčí do desky rámu (deska 1). Vodicí tyče musí být zašroubovány tak, aby na nich už byly nasazeny desky a pružiny ve správném pořadí (Obr. 30). Následně jsou vodicí tyče z vnější strany desky 2 zajištěny podložkami a šestihrannými maticemi.



Obr. 30: Montáž vodicích tyčí

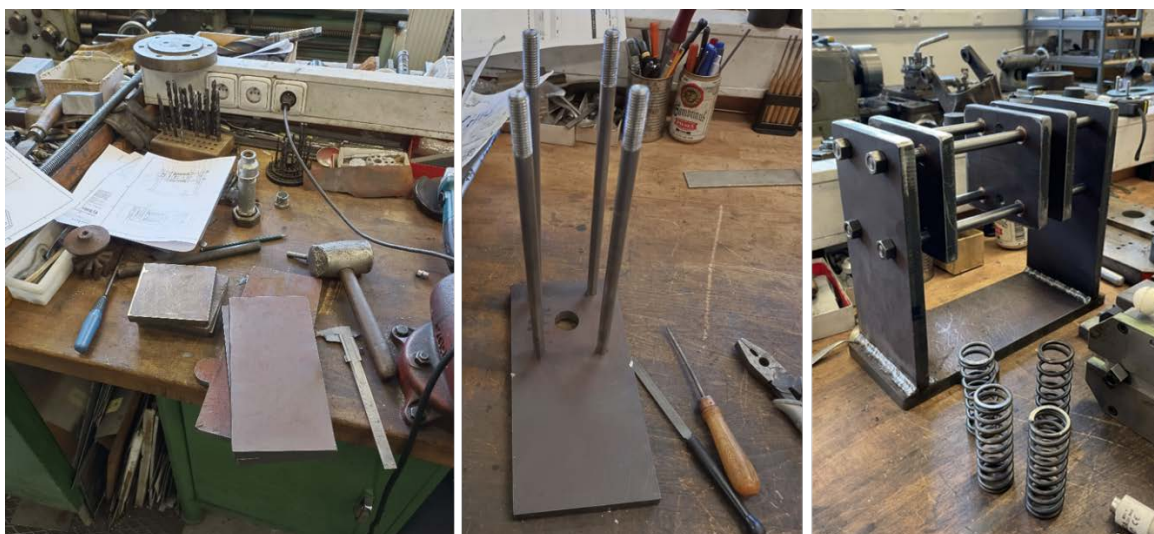
4. Dále je třeba přidat pohybový šroub s rukojetí (Obr. 31). Pohybový šroub je usazen do bronzového kluzného pouzdra v desce 1, přičemž z vnější strany desky je pod hlavu pohybového šroubu umístěna podložka. Pohybový šroub je zašroubován do pohybové matice spojené s deskou 3. Na závěr je pohybový šroub axiálně zajištěn pomocí kolíku, který prochází skrze kluzné pouzdro i pohybový šroub.



Obr. 31: Montáž pohybového šroubu

4.7.2 Výroba zkušebního zařízení

Zkušební zařízení bylo vyrobeno a smontováno dle návrhu, tedy platí, že maximální rozměry jsou 320x185x265 mm (délka, šířka, výška). Vybrané fotky z procesu výroby zachycuje Obr. 32.



Obr. 32: Výroba zkušebního zařízení

Zkušební zařízení je vyrobeno z nelegované konstrukční oceli válcované za tepla S235JR. Mechanické vlastnosti a chemické složení této oceli jsou uvedeny v Tab. 4. Výsledná váha zkušebního zařízení je necelých 20 kg. Finální podoba zkušebního zařízení je zobrazena na Obr. 33.

Tab. 4: Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli S235JR [47]

| Označení oceli dle ČSN EN 10025-2 | | S235JR | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Mechanické vlastnosti | | Chemické složení | | | | | |
| R_e [MPa] | R_m [MPa] | C [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] | N [%] | Cu [%] |
| ≥ 235 | 360 - 510 | $\leq 0,190$ | $\leq 1,500$ | $\leq 0,045$ | $\leq 0,045$ | $\leq 0,014$ | $\leq 0,600$ |



Obr. 33: Finální podoba zkušebního zařízení

Do zkušebního zařízení byly vloženy čtyři kalibrované šroubové tlačné pružiny odpovídající normě ČSN EN 13906-1. Základní parametry těchto pružin jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5: Parametry použitých šroubových tlačných pružin

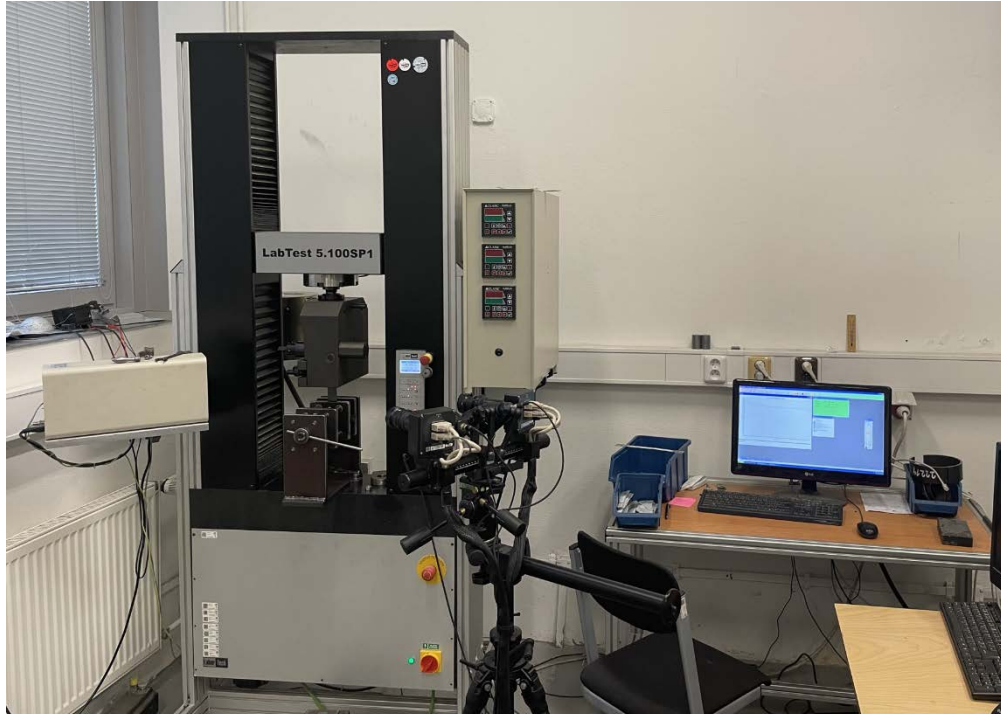
| | |
|---|-------|
| Materiál | Ocel |
| Průměr drátu d_0 [mm] | 3 |
| Vnější průměr D [mm] | 18 |
| Volná délka L_0 [mm] | 113,5 |
| Počet závitů z [-] | 20 |
| Hmotnost m [g] | 82 |

Čelisti zkušebního zařízení mají rozměry 40x30 mm, kontaktní plocha čelistí je tedy 2400 mm². Výsledná kontaktní plocha však závisí na rozměrech měřeného vzorku plechu. Povrch čelistí je broušený.

Na výrobu čelistí byla v tomto konkrétním případě použita konstrukční ocel S235JR. Je však důležité zmínit, že ideálně by měl materiál čelistí zkušebního zařízení odpovídat některému z materiálů, který se v praxi používá pro funkční části lisovacích nástrojů.

5 Ověření funkčnosti zkušebního zařízení a vyhodnocení

Ověření funkčnosti zkušebního zařízení proběhlo v laboratoři na již zmíněném univerzálním trhacím stroji LabTest 5.100SP1. Data byla v reálném čase zaznamenávána programem Test&Motion dostupným na počítači, jenž je součástí pracoviště. Měřicí pracoviště v laboratoři zobrazuje Obr. 34.



Obr. 34: Měřicí pracoviště v laboratoři

5.1 Příprava vzorků a čelistí

Tribologickým zkouškám byly podrobeny pásy plechů o rozměrech 30x200x0,7 mm (šířka, délka, tloušťka). Pásy byly nastříhány na požadované rozměry s využitím nůžek na plech. Zkoušeným materiálem byl pozinkovaný hlubokotažený za studena válcovaný ocelový plech DC06+ZE50/50-B-PO odpovídající normě ČSN EN 10152. Tloušťka zinkového povlaku je 5 μm , povrch plechu je fosfátovaný a olejovaný. Tento materiál se hojně využívá v automobilovém průmyslu např. k výrobě karoserií. Mechanické vlastnosti a chemické složení tohoto materiálu jsou uvedeny v Tab. 6. Čelisti zkušebního zařízení byly zhotoveny z konstrukční oceli S235JR.

Tab. 6: Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli DC06+ZE50/50-B-PO [48]

| Označení oceli dle ČSN EN 10152 | | | DC06+ZE50/50-B-PO | | | | |
|---------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| Mechanické vlastnosti | | | Chemické složení | | | | |
| R _e [MPa] | R _m [MPa] | A ₈₀ [%] | C [%] | P [%] | S [%] | Mn [%] | Ti [%] |
| ≤ 180 | 270 - 350 | ≥ 41 | ≤ 0,020 | ≤ 0,020 | ≤ 0,020 | ≤ 0,250 | ≤ 0,300 |

Vzorky, stejně jako čelisti zkušebního zařízení, byly před samotnými zkouškami očištěny a odmaštěny.

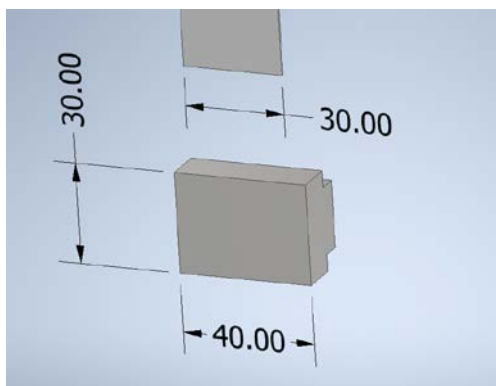
5.2 Parametry zkoušek

V rámci ověření funkčnosti zkušebního zařízení byly provedeny dvě zkoušky s různými cíli měření. První zkouška cílila na zjištění vlivu kontaktního tlaku na statický a dynamický koeficient tření. Druhá zkouška cílila na zjištění vlivu rychlosti tažení plechu na statický a dynamický koeficient tření. Naměřená data první i druhé zkoušky jsou součástí Přílohy 2.

Na obě zkoušky byly použity čtyři, už dříve zmíněné, kalibrované šroubové tlačné pružiny o rozměrech 3x18x113,5 mm (průměr drátu, vnější průměr pružiny, délka pružiny ve volném stavu) s 20 závity. Rozměry zkoušeného

pásu plechu byly 30x200x0,7 mm (šířka, délka, tloušťka), rozměry kontaktní plochy čelistí zkušebního zařízení pak 40x30 mm (viz Obr. 35).

Šířka čelistí je schválně volena větší než šířka pásu plechu. Tím pádem je eliminováno riziko tažení pásu přes boční hranu čelistí v případě, že by se nepodařilo vzorek mezi čelistmi zcela přesně vystředit. Výsledná kontaktní plocha čelistí a vzorku je tedy 1800 mm².



Obr. 35: Rozměry kontaktní plochy čelistí

Rozměry vzorku, typ použitých pružin, velikost kontaktní plochy čelistí a vzorku a dráha tažení byly v průběhu zkoušek neměnné a jsou shrnuty v Tab. 7. Dráhou tažení se rozumí vzdálenost, o kterou je pás plechu svisle tažen z výchozí pozice pomocí univerzálního trhačího stroje.

Tab. 7: Neměnné parametry provedených zkoušek

| Neměnné parametry | |
|--|--------------------------|
| Rozměry vzorku | 30x200x0,7 mm |
| Použité pružiny | 3x18x113,5 mm; 20 závitů |
| Výsledná kontaktní plocha čelisti-vzorek | 1800 mm ² |
| Dráha tažení s | 25 mm |

Mezi variabilní parametry provedených zkoušek patří délka stlačených pružin a rychlost tažení. Délce stlačených pružin pak vždy odpovídá příslušná síla (zatížení) a kontaktní tlak mezi čelistmi a zkoušeným vzorkem. Rychlostí tažení se rozumí rychlost, jakou k svislému tažení

vzorku pomocí univerzálního trhačího stroje dochází. Variabilní parametry provedených zkoušek shrnuje Tab. 8.

Tab. 8: Variabilní parametry provedených zkoušek

| |
|--------------------------------------|
| Variabilní parametry |
| Délka stlačených pružin L [mm] |
| Rychlost tažení ϑ [mm/min] |

5.3 První zkouška

V průběhu první zkoušky byla rychlost tažení plechu nastavena na 20 mm/min. Dráha tažení zůstávala pro jednotlivé vzorky konstantní, a sice 25 mm. Plechy tím pádem nebyly v průběhu zkoušek zcela vytaženy ven z prostoru mezi čelistmi zkušebního zařízení. Měřily se tři sady vzorků po pěti vzorcích, dohromady patnáct vzorků. Pro každou sadu bylo stlačení pružin, a tedy i působící zatížení, různé. Cílem první zkoušky bylo zjistit vliv kontaktního tlaku na statický i dynamický koeficient tření. Zkušební parametry této zkoušky jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9: Zkušební parametry první zkoušky

| | Sada 01 | Sada 02 | Sada 03 |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|
| Délka stlačených pružin L [mm] | 64 | 74 | 84 |
| Odpovídající síla F_N [N] | 2687 | 2144 | 1601 |
| Odpovídající kontaktní tlak p [MPa] | 1,49 | 1,19 | 0,89 |
| Dráha tažení s [mm] | 25 | | |
| Rychlost tažení ϑ [mm/min] | 20 | | |

Ukázka výpočtu koeficientů tření pro vzorek 01-1:

- Koeficient tření statický:

$$\mu_0 = \frac{F_T}{2F_N} = \frac{1090}{2 \cdot 2687} = 0,203$$

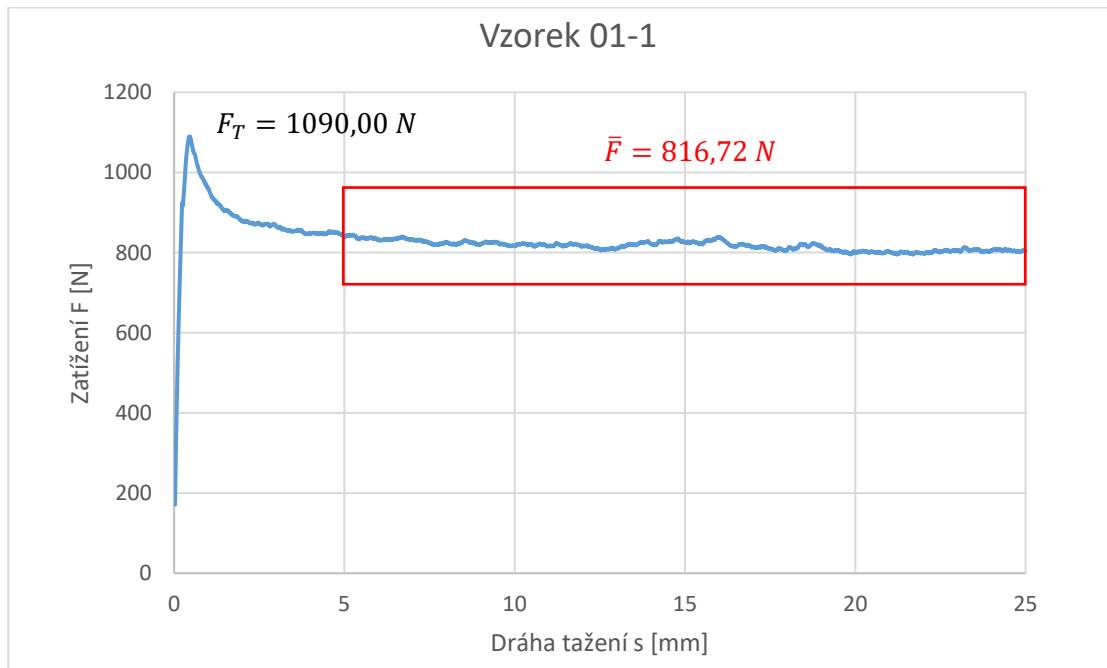
- Koeficient tření dynamický:

$$\mu = \frac{\bar{F}}{2F_N} = \frac{816,72}{2 \cdot 2687} = 0,152$$

kde F_T je maximální zatížení v průběhu zkoušky [N]

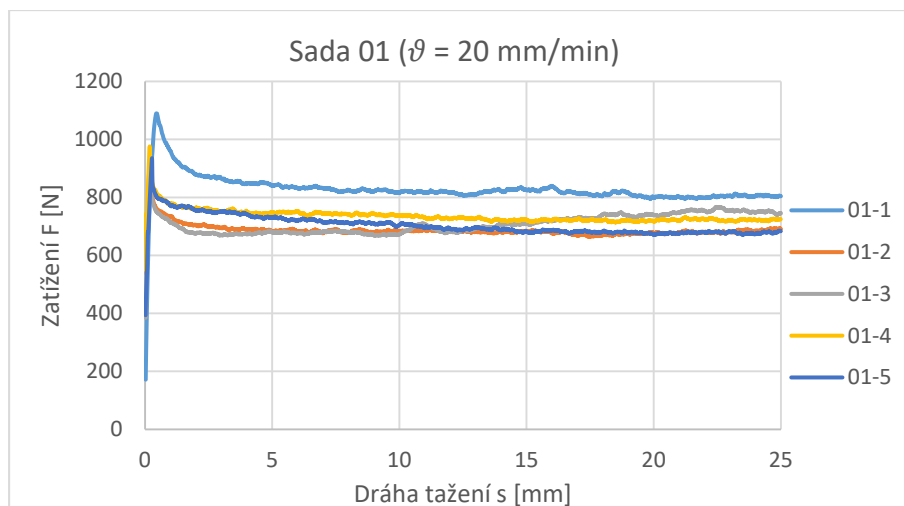
\bar{F} je průměrná hodnota zatížení na intervalu dráhy tažení 5 až 25 mm [N] (Obr. 36)

F_N je normálová síla odpovídající dané délce stlačených pružin [N]

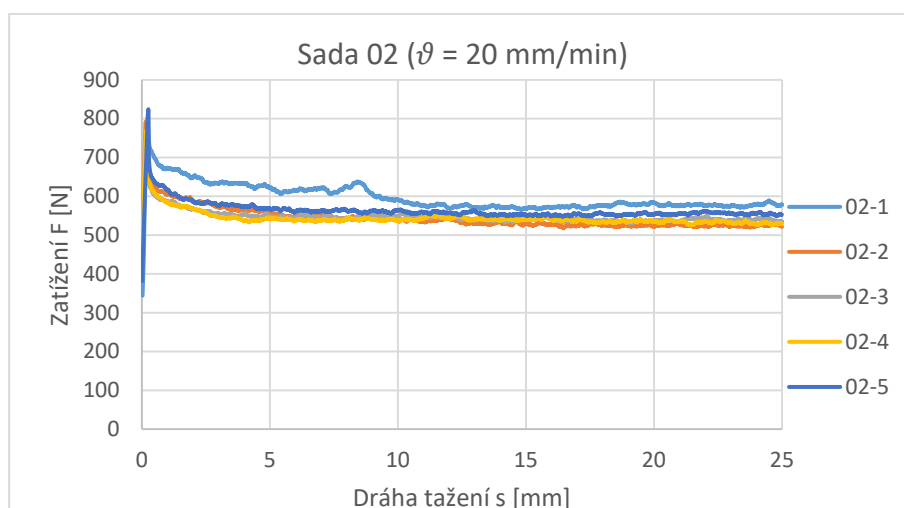


Obr. 36: Princip zpracování naměřených dat

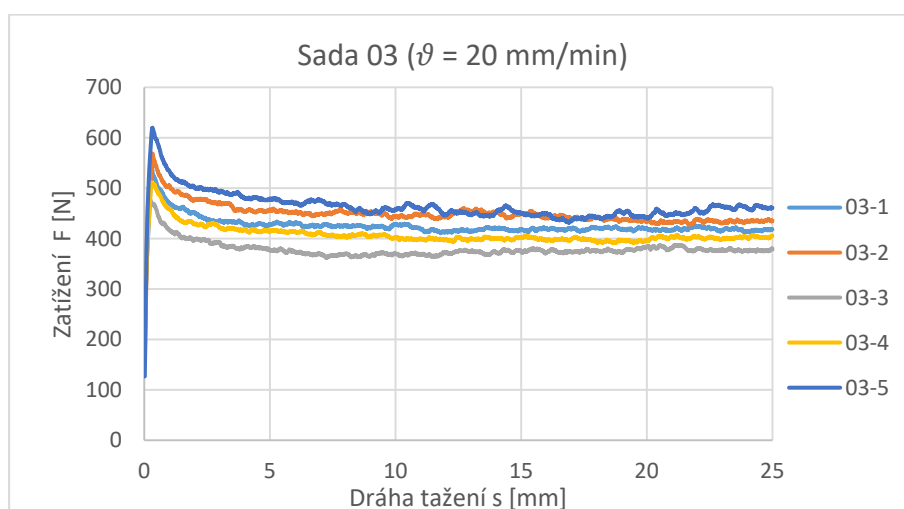
Obdobným způsobem byla zpracována naměřená data pro všechny ostatní vzorky. Naměřená data jsou graficky znázorněna na Obr. 37 – 39. Zpracovaná data v číselné podobě jsou v Tab. 10 – 12. Výsledná podoba naměřených a označených vzorků po provedení zkoušek je zobrazena na Obr. 40 – 42.



Obr. 37: Naměřená data pro sadu 01 (rychlost tažení 20 mm/min)



Obr. 38: Naměřená data pro sadu 02 (rychlost tažení 20 mm/min)



Obr. 39: Naměřená data pro sadu 03 (rychlost tažení 20 mm/min)

Tab. 10: Zpracování naměřených dat sady 01 (rychlost tažení 20 mm/min)

| Označení vzorku | Maximální síla F_T [N] | \bar{F} [N] na intervalu $s \in < 5, 25 \text{ mm} >$ | Koeficient tření μ [-] | |
|----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|--------------|
| | | | Statický | Dynamický |
| 01-1 | 1090,000 | 816,720 | 0,203 | 0,152 |
| 01-2 | 895,700 | 680,980 | 0,167 | 0,127 |
| 01-3 | 896,200 | 713,119 | 0,167 | 0,133 |
| 01-4 | 975,900 | 728,553 | 0,182 | 0,136 |
| 01-5 | 935,500 | 692,185 | 0,174 | 0,129 |
| Střední hodnota [-] | | | 0,178 | 0,135 |
| Směrodatná odchylka SD [-] | | | 0,013 | 0,009 |

Tab. 11: Zpracování naměřených dat sady 02 (rychlost tažení 20 mm/min)

| Označení vzorku | Maximální síla F_T [N] | \bar{F} [N] na intervalu $s \in < 5, 25 \text{ mm} >$ | Koeficient tření μ [-] | |
|----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|--------------|
| | | | Statický | Dynamický |
| 02-1 | 814,900 | 585,214 | 0,190 | 0,136 |
| 02-2 | 792,500 | 532,990 | 0,185 | 0,124 |
| 02-3 | 741,200 | 541,980 | 0,173 | 0,126 |
| 02-4 | 768,500 | 537,858 | 0,179 | 0,125 |
| 02-5 | 824,200 | 556,645 | 0,192 | 0,130 |
| Střední hodnota [-] | | | 0,184 | 0,128 |
| Směrodatná odchylka SD [-] | | | 0,007 | 0,004 |

Tab. 12: Zpracování naměřených dat sady 03 (rychlost tažení 20 mm/min)

| Označení vzorku | Maximální síla F_T [N] | \bar{F} [N] na intervalu $s \in < 5, 25 \text{ mm} >$ | Koeficient tření μ [-] | |
|----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|--------------|
| | | | Statický | Dynamický |
| 03-1 | 546,900 | 420,448 | 0,171 | 0,131 |
| 03-2 | 568,700 | 443,511 | 0,178 | 0,138 |
| 03-3 | 494,000 | 374,041 | 0,154 | 0,117 |
| 03-4 | 511,400 | 401,851 | 0,160 | 0,125 |
| 03-5 | 620,000 | 455,490 | 0,194 | 0,142 |
| Střední hodnota [-] | | | 0,171 | 0,131 |
| Směrodatná odchylka SD [-] | | | 0,014 | 0,009 |

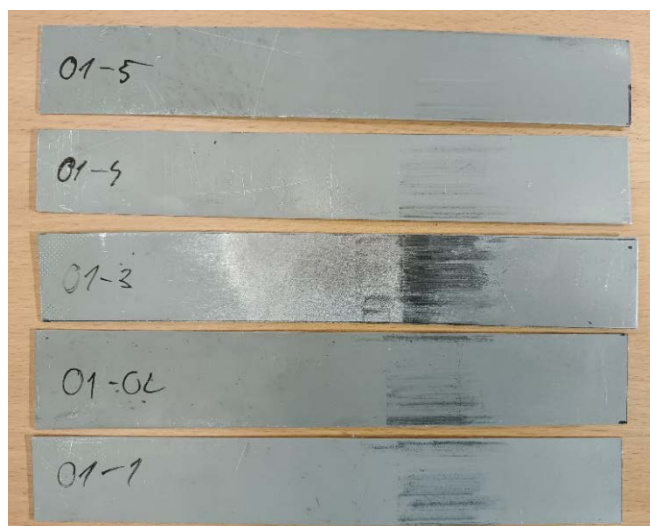
Výpočet střední hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

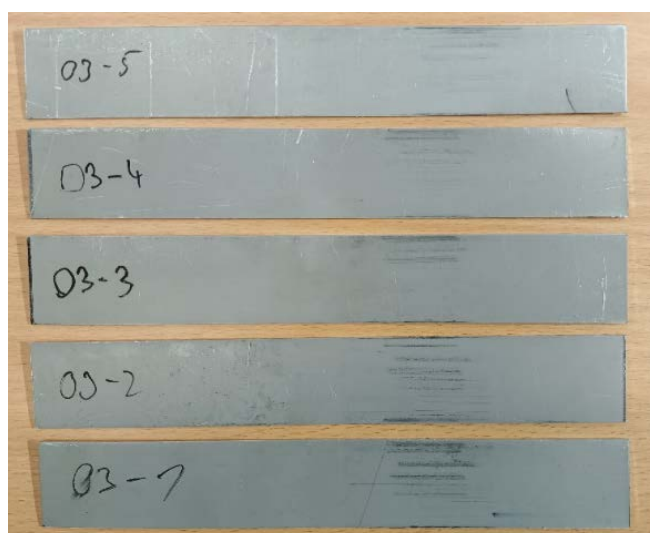
kde x je x -tý prvek, n je celkový počet prvků



Obr. 40: Naměřené vzorky sady 01 (rychlost tažení 20 mm/min)



Obr. 41: Naměřené vzorky sady 02 (rychlost tažení 20 mm/min)



Obr. 42: Naměřené vzorky sady 03 (rychlost tažení 20 mm/min)

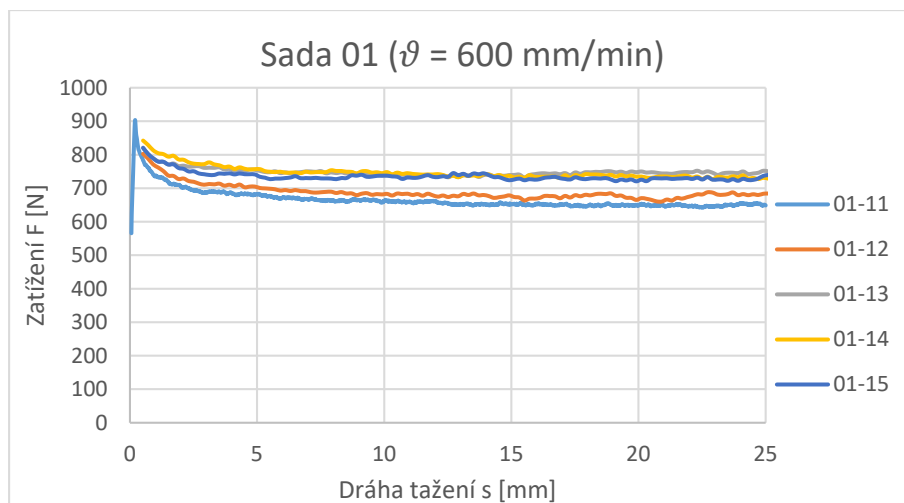
5.4 Druhá zkouška

Druhá zkouška se od té první lišila jen rychlostí tažení plechu. Rychlost tažení plechu byla v tomto případě nastavena na 600 mm/min, což je maximální zkušební rychlost, kterou je použitý univerzální trhací stroj LabTest 5.100SP1 schopen vyvodit. Ostatní zkušební parametry zůstaly nezměněny a jsou uvedeny v Tab. 13. Opět se měřily tři sady vzorků po pěti vzorcích (dohromady patnáct vzorků). Cílem této zkoušky bylo zjistit vliv rychlosti tažení plechu na statický a dynamický koeficient tření.

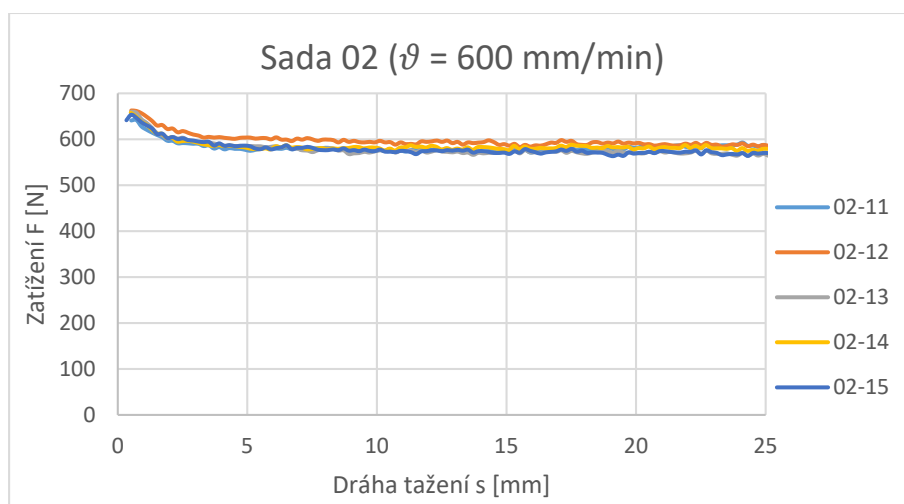
Tab. 13: Zkušební parametry druhé zkoušky

| | Sada 01 | Sada 02 | Sada 03 |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|
| Délka stlačených pružin [mm] | 64 | 74 | 84 |
| Odpovídající síla F_N [N] | 2687 | 2144 | 1601 |
| Odpovídající kontaktní tlak p [MPa] | 1,49 | 1,19 | 0,89 |
| Dráha tažení s [mm] | 25 | | |
| Rychlost tažení ϑ [mm/min] | 600 | | |

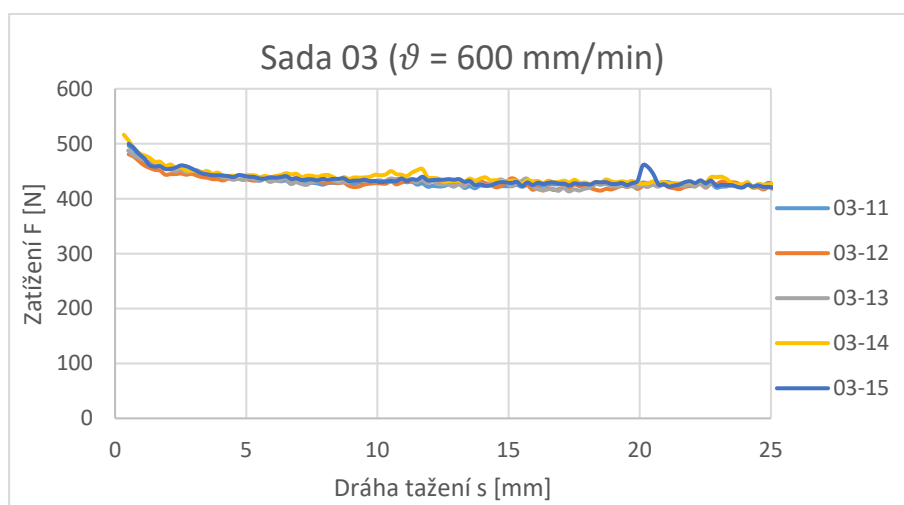
Naměřená data byla zpracována a vyhodnocena stejným způsobem, jako tomu bylo u první zkoušky. Grafické závislosti naměřených dat zachycují Obr. 43 – 45. Zpracování dat pro jednotlivé sady a jejich vyhodnocení je uvedeno v příslušných tabulkách (Tab. 14 – 16). Jednotlivé vzorky byly po provedení zkoušek označeny, vyfoceny a jsou zobrazeny na Obr. 46 – 48.



Obr. 43: Naměřená data pro sadu 01 (rychlost tažení 600 mm/min)



Obr. 44: Naměřená data pro sadu 02 (rychlost tažení 600 mm/min)



Obr. 45: Naměřená data pro sadu 03 (rychlost tažení 600 mm/min)

Tab. 14: Zpracování naměřených dat sady 01 (rychlost tažení 600 mm/min)

| Označení vzorku | Maximální síla F_T [N] | \bar{F} [N] na intervalu $s \in < 5, 25 \text{ mm} >$ | Koeficient tření μ [-] | |
|----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|--------------|
| | | | Statický | Dynamický |
| 01-11 | 903,800 | 655,340 | 0,168 | 0,122 |
| 01-12 | 802,800 | 680,070 | 0,149 | 0,127 |
| 01-13 | 821,400 | 743,843 | 0,153 | 0,138 |
| 01-14 | 842,100 | 739,454 | 0,157 | 0,138 |
| 01-15 | 820,300 | 730,709 | 0,153 | 0,136 |
| Střední hodnota [-] | | | 0,156 | 0,132 |
| Směrodatná odchylka SD [-] | | | 0,007 | 0,007 |

Tab. 15: Zpracování naměřených dat sady 02 (rychlost tažení 600 mm/min)

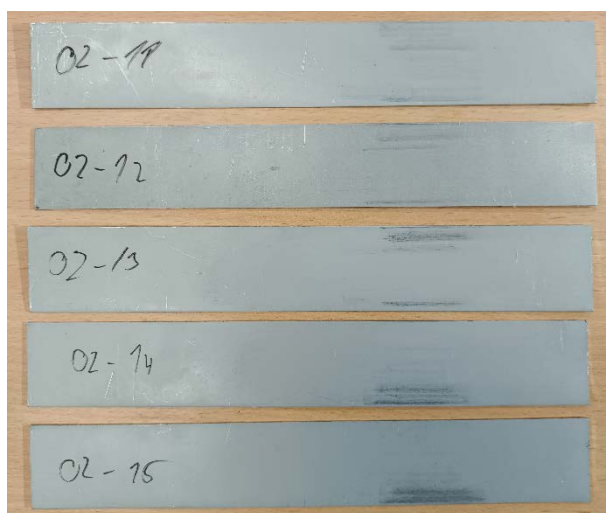
| Označení vzorku | Maximální síla F_T [N] | \bar{F} [N] na intervalu $s \in < 5, 25 \text{ mm} >$ | Koeficient tření μ [-] | |
|----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|--------------|
| | | | Statický | Dynamický |
| 02-11 | 641,800 | 579,021 | 0,150 | 0,135 |
| 02-12 | 662,500 | 592,400 | 0,154 | 0,138 |
| 02-13 | 659,800 | 572,920 | 0,154 | 0,134 |
| 02-14 | 657,600 | 581,035 | 0,153 | 0,135 |
| 02-15 | 653,300 | 573,596 | 0,152 | 0,134 |
| Střední hodnota [-] | | | 0,153 | 0,135 |
| Směrodatná odchylka SD [-] | | | 0,002 | 0,002 |

Tab. 16: Zpracování naměřených dat sady 03 (rychlost tažení 600 mm/min)

| Označení vzorku | Maximální síla F_T [N] | \bar{F} [N] na intervalu $s \in < 5, 25 \text{ mm} >$ | Koeficient tření μ [-] | |
|----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|--------------|
| | | | Statický | Dynamický |
| 03-11 | 496,600 | 426,794 | 0,155 | 0,133 |
| 03-12 | 480,800 | 426,509 | 0,150 | 0,133 |
| 03-13 | 487,900 | 426,770 | 0,152 | 0,133 |
| 03-14 | 516,300 | 434,947 | 0,161 | 0,136 |
| 03-15 | 499,900 | 430,923 | 0,156 | 0,135 |
| Střední hodnota [-] | | | 0,155 | 0,134 |
| Směrodatná odchylka SD [-] | | | 0,004 | 0,001 |



Obr. 46: Naměřené vzorky sady 01 (rychlost tažení 600 mm/min)



Obr. 47: Naměřené vzorky sady 02 (rychlost tažení 600 mm/min)



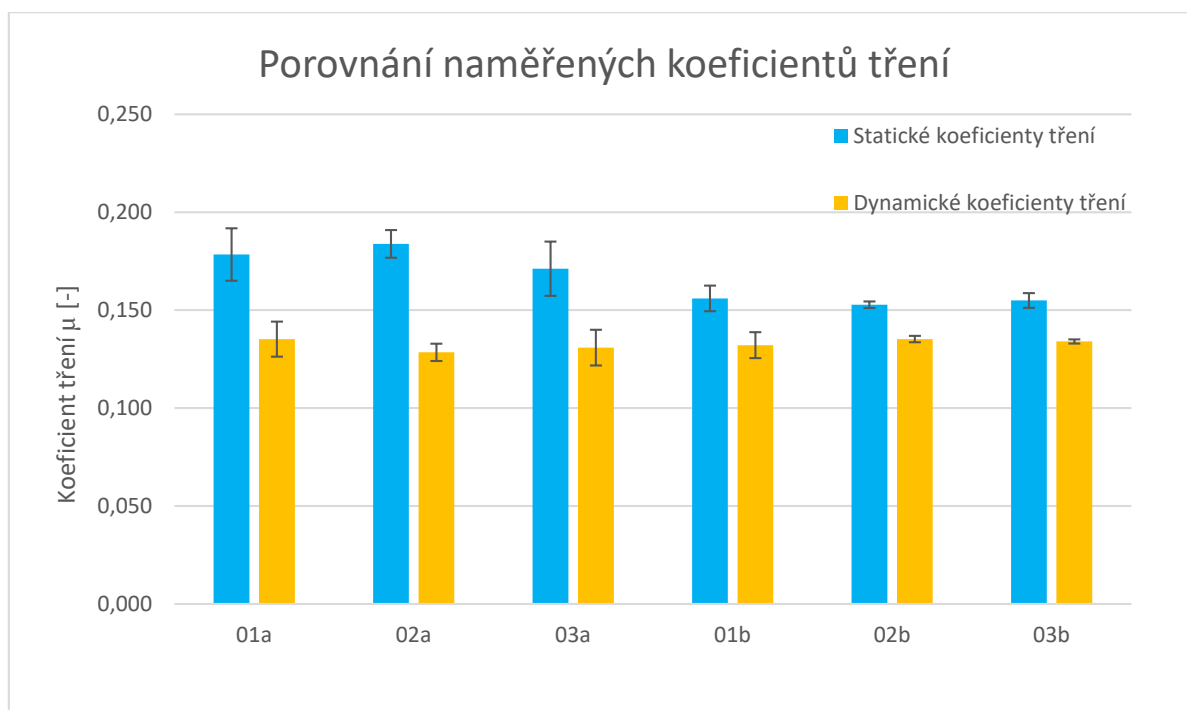
Obr. 48: Naměřené vzorky sady 03 (rychlost tažení 600 mm/min)

5.5 Porovnání koeficientů tření a velikosti otěru

Pro zjednodušení je sada vzorků 01 s rychlostí tažení plechu 20 mm/min dále označována jako sada 01a a sada vzorků 01 s rychlostí tažení plechu 600 mm/min jako 01b. Ve stejném duchu jsou pak takto označeny i všechny ostatní sady, viz Tab. 17. Střední hodnoty koeficientů tření a jejich směrodatné odchylky pro jednotlivé sady vzorků jsou zobrazeny na Obr. 49, číselně jsou pak uvedeny v Tab. 18.

Tab. 17: Popis sad vzorků a jejich označení

| Popis | Označení |
|---|----------|
| Sada vzorků 01 s rychlostí tažení plechu 20 mm/min | 01a |
| Sada vzorků 02 s rychlostí tažení plechu 20 mm/min | 02a |
| Sada vzorků 03 s rychlostí tažení plechu 20 mm/min | 03a |
| Sada vzorků 01 s rychlostí tažení plechu 600 mm/min | 01b |
| Sada vzorků 02 s rychlostí tažení plechu 600 mm/min | 02b |
| Sada vzorků 03 s rychlostí tažení plechu 600 mm/min | 03b |



Obr. 49: Porovnání naměřených koeficientů tření

Tab. 18: Střední hodnoty koeficientů tření jednotlivých sad

| Označení sady | Střední hodnota statického koeficientu tření $\overline{\mu}_0$ [-] | Směrodatná odchylka SD pro $\overline{\mu}_0$ [-] | Střední hodnota dynamického koeficientu tření $\overline{\mu}_1$ [-] | Směrodatná odchylka SD pro $\overline{\mu}_1$ [-] |
|---------------|---|---|--|---|
| 01a | 0,178 | 0,013 | 0,135 | 0,009 |
| 02a | 0,184 | 0,007 | 0,128 | 0,004 |
| 03a | 0,171 | 0,014 | 0,131 | 0,009 |
| 01b | 0,156 | 0,007 | 0,132 | 0,007 |
| 02b | 0,153 | 0,002 | 0,135 | 0,002 |
| 03b | 0,155 | 0,004 | 0,134 | 0,001 |

Z grafu i numerických dat je patrné, že střední hodnoty statického koeficientu tření jsou o něco vyšší než střední hodnoty dynamického koeficientu tření a to ve všech případech. Naměřené hodnoty jak statických, tak dynamických koeficientů tření odpovídají předpokládaným hodnotám uváděným v literatuře pro dvojici třecích materiálů ocel-ocel (statický koeficient tření je v rozmezí 0,15 – 0,20, dynamický koeficient tření je v rozmezí 0,10 – 0,15) [11].

Střední hodnoty statického koeficientu tření pro vzorky s rychlostí tažení 20 mm/min vyšly o něco vyšší než střední hodnoty statického koeficientu tření pro vzorky s rychlostí 600 mm/min. Nejvyšší střední hodnotu statického koeficientu tření měla sada 02a a to $\overline{\mu}_0 = 0,184$, naopak nejnižší hodnotu vykazala sada 02b s hodnotou $\overline{\mu}_0 = 0,153$. Vyšší rychlost tažení má tedy v tomto případě na statický koeficient tření pozitivní vliv.

U dynamických koeficientů tření byly rozdíly téměř zanedbatelné. Nejnižší střední hodnotu dynamického koeficientu tření měla sada 02a s hodnotou $\overline{\mu}_1 = 0,128$. Nejvyšší střední hodnotu dynamického koeficientu tření měla shodně sada 01a a sada 02b s hodnotou $\overline{\mu}_1 = 0,135$.

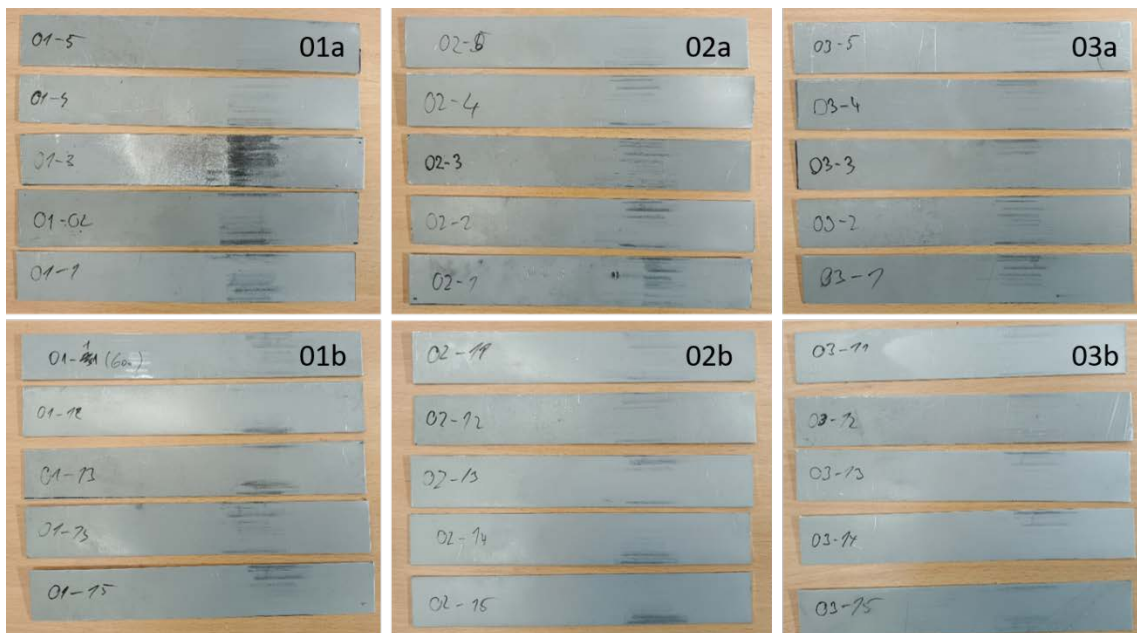
Hlavním ze zkoumaných faktorů byl vliv stlačení pružin (a tedy i vliv kontaktního tlaku) na výsledný statický i dynamický koeficient tření. I zde se dá říci, že rozdíly hodnot získané těmito měřeními jsou minimální.

Po provedení všech měření byly jednotlivé vzorky seřazeny, seskupeny a proběhla zběžná vizuální kontrola (Obr. 50). U první skupiny vzorků, kdy byla rychlost tažení plechů 20 mm/min (sada 01a, 02a 03a), je na první pohled viditelné, že velikost otěru je závislá na velikosti kontaktního tlaku. Největší otěr vykazují vzorky, kdy byl kontaktní tlak nejvyšší, tedy vzorky sady 01a. Nejmenší otěr pak vykazují vzorky sady 03a.

U druhé skupiny vzorků, kdy byla rychlost tažení plechů rovna 600 mm/min (sada 01b, 02b, 03b), rozdíl není tak znatelný. Nicméně i zde platí, že velikost otěru je největší u sady vzorků, kde byl v průběhu zkoušky nejvyšší kontaktní tlak – u sady 01b. Nejmenší otěr u vzorků z této skupiny je viditelný u vzorků sady 03b.

Při porovnání skupin mezi sebou lze říci, že na první pohled vykazují menší viditelný otěr vzorky, kde byla rychlost tažení vyšší. Sada 01a tedy vykazuje větší viditelný otěr než sada 01b. Stejný závěr platí i pro ostatní sady obou dvou skupin – sada 02a vykazuje větší viditelný otěr než sada 02b a sada 03a vykazuje větší viditelný otěr než sada 03b.

Jednotlivé fotografie naměřených vzorků jsou obsahem Přílohy 3.



Obr. 50: Vizuální porovnání vzorků po provedení zkoušek

5.6 Vyhodnocení vzorků pod mikroskopem

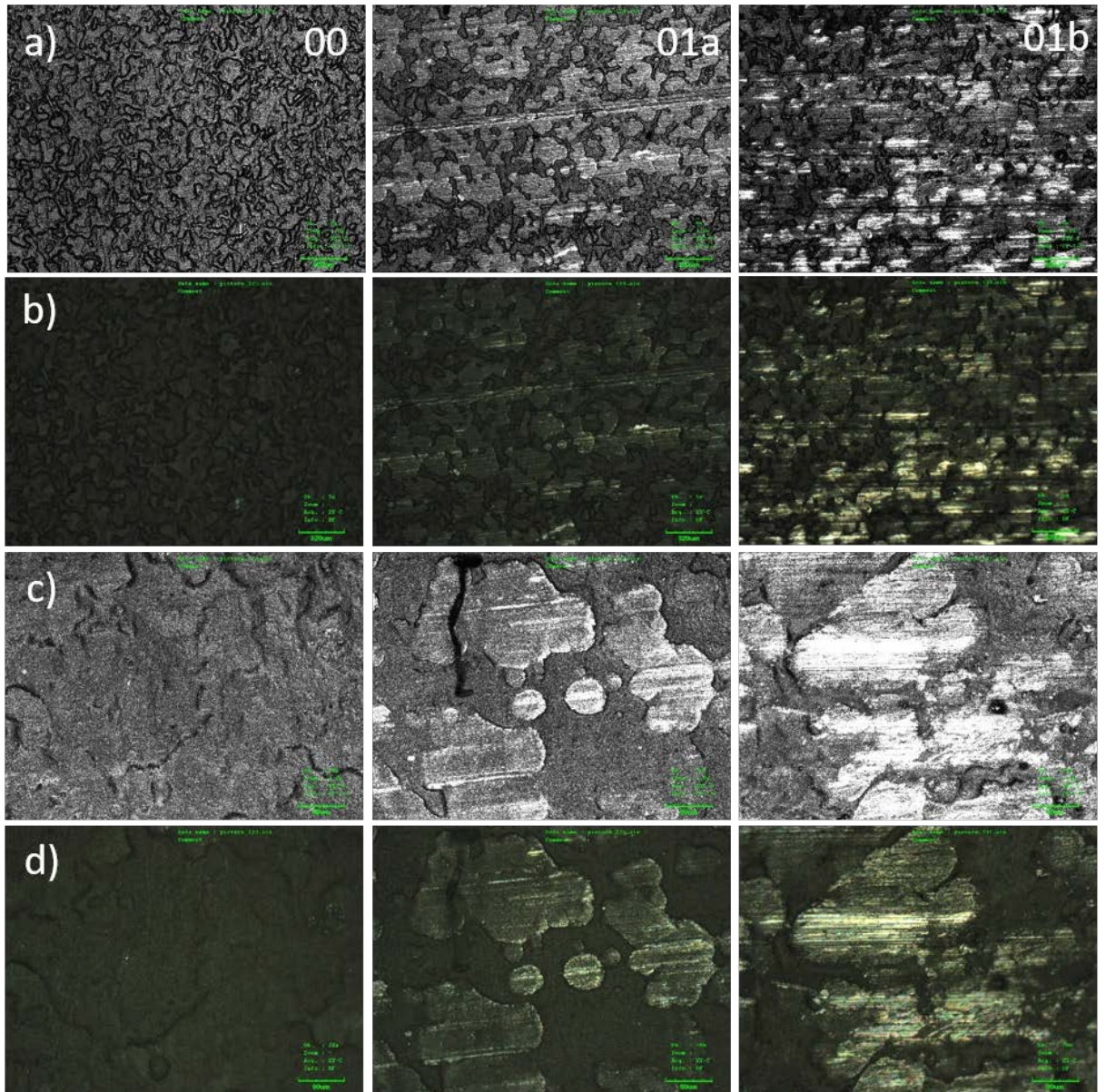
Vybrané vzorky byly následně zkoumány ještě pod konfokálním laserovým rastrovacím mikroskopem LEXT OLS 3000. Tento mikroskop vytváří obraz rastrováním, tedy bod po bodu. Díky tomu je možné získat přesný trojrozměrný obraz povrchu složený z dílčích řezů a dále s ním pracovat. Na základě tohoto 3D obrazu je možné i vyhodnocovat parametry struktury povrchu, jako je například drsnost či vlnitost [49].

V tomto případě byl nejprve pozorován výchozí stav vzorku, tedy pás plechu před provedením samotné zkoušky (označení 00), následně byl pozorován vzorek s rychlostí tažení plechu 20 mm/min (označení 01a) a na závěr vzorek s rychlostí tažení plechu 600 mm/min (označení 01b). Platí, že vzorky 01a a 01b byly při tažení zatíženy silou pružin 2687 N. Zkušební parametry zkoumaných vzorků jsou uvedeny v Tab. 19.

Tab. 19: Souhrn zkušebních parametrů zkoumaných vzorků

| Označení vzorku | 00 | 01a | 01b |
|--|----|------|------|
| Délka stlačených pružin L [mm] | - | 64 | 64 |
| Odpovídající síla F [N] | - | 2687 | 2687 |
| Odpovídající kontaktní tlak p [MPa] | - | 1,49 | 1,49 |
| Rychlost tažení pásu plechu ϑ [mm/min] | - | 20 | 600 |

Všechny vzorky byly zkoumány při zvětšeních 120x a 480x a to ve dvou režimech snímání obrazu – v barevném režimu a v konfokálním režimu (Obr. 51). Jednotlivé snímky z konfokálního mikroskopu jsou obsahem Přílohy 4.



Obr. 51: Pozorování vzorků pod konfokálním mikroskopem

- kde
- a) jsou vzorky při zvětšení 120x, barevný režim
 - b) jsou vzorky při zvětšení 120x, konfokální režim
 - c) jsou vzorky při zvětšení 480x, barevný režim
 - d) jsou vzorky při zvětšení 480x, konfokální režim

Ze získaných mikroskopických snímků je zřejmé, že provedená zkouška má na výsledný povrch vzorků vliv – dochází k otěru. Na snímcích je vidět, že tento otěr není v celém místě kontaktu rovnoměrný. To je způsobeno především morfologií povrchu nástroje (čelistí), ale i morfologií povrchu samotného vzorku. Výsledná podoba povrchu je evidentně závislá na dílčích zkušebních podmínkách. Zde konkrétně je vidět, že podoba se liší v závislosti na rychlosti tažení plechu – rýhy u vzorku s vyšší rychlostí tažení plechu jsou hlubší.

Pro vyvození konkrétních závěrů by bylo dobré pomocí konfokálního mikroskopu vytvořit 3D snímky povrchu jednotlivých vzorků a vyhodnotit některé z parametrů struktury povrchu (např. drsnost, vlnitost). Následně by mělo dojít k porovnání vzorků mezi sebou. Zde byly porovnávány vzorky s různou rychlostí tažení plechu, ale se shodným zatížením pružin. Bylo by proto vhodné v budoucnu provést větší počet měření a zjistit, jaký vliv má na výslednou podobu povrchu plechu právě třeba velikost zatížení.

6 Diskuze a závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo na základě teoretických znalostí a rešerše zvolit vhodnou tribologickou zkoušku pro procesy plošného tváření plechů a na základě této zkoušky dále navrhnout, vyrobit a ověřit zkušební zařízení.

Byla zvolena zkouška tažení pásu mezi plochými čelistmi (tzv. strip-drawing test). Tento typ zkoušky je principálně jednoduchý, umožňuje snadno vyhodnotit koeficient tření a za předpokladu vhodné konstrukce zkušebního zařízení poskytuje dobrou přenositelnost do reálných tvářecích procesů. Tato metoda umožňuje měnit tribologické podmínky (např. teplotu, kontaktní tlak, množství a typ maziva) nezávisle na sobě. Z toho tedy plyne, že koeficient tření lze určit jako funkci těchto podmínek.

Zkušební zařízení bylo navrženo tak, aby se bez problému vešlo do pracovního prostoru použitého univerzálního trhačího stroje. Zařízení umožňuje jednoduše nastavit požadovaný kontaktní tlak prostřednictvím čtyř kalibrovaných šroubových tlačných pružin a dvou aretačních šroubů. Stlačení pružin je možné díky pohybovému šroubu a pohybové matici navařené na jedné z desek. Zařízení je až na rám plně rozebíratelné, tudíž pružiny, stejně jako čelisti jsou poměrně snadno vyměnitelné za jiný typ. Ohřev čelistí je možný díky hliníkové krychli s topnou spirálou uvnitř, sledování teploty je zajištěno termočlánkem umístěným do otvoru v jedné z čelistí.

Funkčnost zkušebního zařízení byla ověřena v laboratoři a data byla následně vyhodnocena. Vyhodnocovaly se statické a dynamické koeficienty tření. Zkoušce byl podroben pás plechu z materiálu DC06+ZE50/50-B-PO o rozměrech 30x200x0,7 mm (šířka, délka, tloušťka). Čelisti byly z materiálu S235JR, rozměr jejich kontaktní plochy byl 40x30 mm. Byly provedeny dvě zkoušky. Dráha tažení pásu plechu byla pro obě zkoušky shodná – 25 mm. Zkoušky se lišily v rychlostech tažení plechu. V průběhu první zkoušky byla rychlost tažení plechu nastavena

na 20 mm/min. V průběhu druhé zkoušky pak na 600 mm/min, což je maximální zkušební rychlost, kterou použitý univerzální trhací stroj LabTest 5.100SP1 umožňuje.

V rámci první i druhé zkoušky se vyhodnocovaly vždy tři sady vzorků, sada po pěti vzorcích. Každá sada měla jinak stlačené pružiny, tím pádem i jiné zatížení a jiný kontaktní tlak. Naměřené hodnoty byly graficky i numericky zpracovány a mezi sebou porovnány.

Všechny střední hodnoty statických i dynamických koeficientů tření vyšly v očekávaném rozmezí (0,153 – 0,184 pro statický koeficient tření; 0,128 – 0,135 pro dynamický koeficient tření). Střední hodnoty statických koeficientů tření jednotlivých sad byly vyšší pro vzorky s rychlostí tažení 20 mm/min než pro vzorky s rychlostí tažení 600 mm/min. U středních hodnot dynamických koeficientů tření byl rozdíl mezi vzorky s rychlostí tažení 20 mm/min a vzorky s rychlostí tažení 600 mm/min zanedbatelný.

Z naměřených dat vyplývá, že vyšší rychlost tažení pásu plechu má pozitivní vliv na koeficient tření. Vliv kontaktního tlaku byl víceméně zanedbatelný, což ale může být způsobeno použitím poměrně slabých pružin (maximální zatížení odpovídalo 2687 N, kontaktní tlak 1,49 MPa).

Vzorky byly po zkouškách vizuálně porovnány mezi sebou. Zde bylo zjištěno následující: vyšší velikost kontaktního tlaku má na výsledný otěr negativní vliv. Otěr u vzorků tažených rychlostí 600 mm/min nebyl na první pohled tak velký, jako otěr u vzorků tažených rychlostí 20 mm/min.

Vybrané vzorky byly následně zkoumány pod konfokálním laserovým rastrovacím mikroskopem LEXT OLS 3000 při dvou zvětšeních (120x a 480x) a ve dvou režimech snímání obrazu – v barevném režimu a v konfokálním režimu. Zde se potvrdilo, že provedená zkouška má na výslednou podobu zkoušeného vzorku negativní vliv – vzniká nerovnoměrný otěr, který je způsoben především morfologií kontaktních ploch vzorku plechu a čelistí. Ze snímků z mikroskopu vyplývá, že vzniklé rýhy byly hlubší pro vzorek tažený rychlostí 600 mm/min než pro vzorek tažený rychlostí 20 mm/min.

Do budoucna by bylo vhodné zkušební zařízení osadit silnějšími pružinami a provést měření, ze kterých by šel lépe vyhodnotit vliv kontaktního tlaku na výsledné hodnoty koeficientu tření. Zkušební zařízení umožňuje ohřev čelistí a sledování teploty skrze termočlánek. Bylo by proto vhodné provést další měření a zaměřit se právě na vliv teploty na hodnoty koeficientu tření, doporučený rozsah teplot je v rozmezí 60 až 120 °C. Dále by bylo vhodné volit čelisti z materiálu, který se v praxi užívá pro funkční části lisovacích nástrojů.

Rovněž by stálo za to pomocí konfokálního mikroskopu vytvořit 3D snímky povrchu jednotlivých vzorků, vyhodnotit některé z parametrů struktury povrchu a konkrétně porovnat vliv tribologických podmínek na otěr a výslednou podobu povrchu.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Tribologický systém, upraveno z [5]..... | 13 |
| Obr. 2: Druhy tření: Suché (A), smíšené (B) a kapalinové (C), upraveno z [4] | 16 |
| Obr. 3: Stribeckova křivka, upraveno z [13]..... | 16 |
| Obr. 4: Smykové tření, upraveno z [14] | 17 |
| Obr. 5: Průběh koeficientu tření během Stick-Slip efektu v čase, upraveno z [17] | 18 |
| Obr. 6: Abrazivní opotřebení, upraveno z [5]..... | 22 |
| Obr. 7: Adhezivní opotřebení, upraveno z [5]..... | 23 |
| Obr. 8: Prostorové stavy napjatost, upraveno z [18] | 27 |
| Obr. 9: Rovinné stavy napjatosti, upraveno z [18]..... | 27 |
| Obr. 10: Princip prostého tažení plechů s přidržovačem, upraveno z [36]..... | 29 |
| Obr. 11: Rozdělení tribologických zkoušek v procesu tváření, upraveno z [39] | 31 |
| Obr. 12: Přehled tribologických zkoušek kategorie 5, upraveno z [39]..... | 33 |
| Obr. 13: Ohýbání pásu pod napětím, upraveno z [42] | 34 |
| Obr. 14: Tažení pásu s bočním stlačením, upraveno z [39]..... | 35 |
| Obr. 15: Ohýbání pásu s bočním stlačením – jednotlivé konfigurace [39] | 36 |
| Obr. 16: Princip tažení pásu mezi plochými čelistmi, upraveno z [39]..... | 37 |
| Obr. 17: Model zkušebního zařízení..... | 39 |
| Obr. 18: Kalibrovaná šroubová tlačná pružina, upraveno z [45] | 41 |
| Obr. 19: Princip uchycení čelistí..... | 41 |
| Obr. 20: Měření teploty pomocí termočlánku..... | 42 |
| Obr. 21: Základní rozměry zkušebního zařízení | 43 |
| Obr. 22: Univerzální trhací stroj LabTest 5.100SP1 | 44 |
| Obr. 23: Upnutí zkušebního zařízení do univerzálního trhacího stroje..... | 45 |
| Obr. 24: Stlačování pružin – a) výchozí stav, b) stlačený stav | 46 |
| Obr. 25: Aretace pružin..... | 46 |
| Obr. 26: Nahřívání čelistí..... | 47 |
| Obr. 27: Princip zkoušky..... | 48 |
| Obr. 28: Rám zkušebního zařízení s kluzným pouzdem..... | 50 |
| Obr. 29: Umístění aretačních šroubů..... | 51 |
| Obr. 30: Montáž vodicích tyčí | 51 |
| Obr. 31: Montáž pohybového šroubu..... | 52 |
| Obr. 32: Výroba zkušebního zařízení..... | 52 |
| Obr. 33: Finální podoba zkušebního zařízení..... | 53 |
| Obr. 34: Měřicí pracoviště v laboratoři | 54 |
| Obr. 35: Rozměry kontaktní plochy čelistí | 56 |
| Obr. 36: Princip zpracování naměřených dat..... | 58 |
| Obr. 37: Naměřená data pro sadu 01 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 59 |
| Obr. 38: Naměřená data pro sadu 02 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 59 |
| Obr. 39: Naměřená data pro sadu 03 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 59 |
| Obr. 40: Naměřené vzorky sady 01 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 61 |
| Obr. 41: Naměřené vzorky sady 02 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 61 |
| Obr. 42: Naměřené vzorky sady 03 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 61 |
| Obr. 43: Naměřená data pro sadu 01 (rychlost tažení 600 mm/min)..... | 63 |
| Obr. 44: Naměřená data pro sadu 02 (rychlost tažení 600 mm/min)..... | 63 |
| Obr. 45: Naměřená data pro sadu 03 (rychlost tažení 600 mm/min)..... | 63 |
| Obr. 46: Naměřené vzorky sady 01 (rychlost tažení 600 mm/min) | 65 |
| Obr. 47: Naměřené vzorky sady 02 (rychlost tažení 600 mm/min) | 65 |
| Obr. 48: Naměřené vzorky sady 03 (rychlost tažení 600 mm/min) | 65 |
| Obr. 49: Porovnání naměřených koeficientů tření..... | 66 |
| Obr. 50: Vizuální porovnání vzorků po provedení zkoušek..... | 68 |
| Obr. 51: Pozorování vzorků pod konfokálním mikroskopem | 70 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Koeficienty smykového tření pro různé dvojice materiálů, upraveno z [1,11]..... | 17 |
| Tab. 2: Parametry zvoleného termočlánku [46]..... | 42 |
| Tab. 3: Technické parametry univerzálního trhacího stroje LabTest 5.100SP1..... | 44 |
| Tab. 4: Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli S235JR [47]..... | 53 |
| Tab. 5: Parametry použitých šroubových tlačných pružin..... | 53 |
| Tab. 6: Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli DC06+ZE50/50-B-PO [48]..... | 55 |
| Tab. 7: Neměnné parametry provedených zkoušek | 56 |
| Tab. 8: Variabilní parametry provedených zkoušek..... | 57 |
| Tab. 9: Zkušební parametry první zkoušky | 57 |
| Tab. 10: Zpracování naměřených dat sady 01 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 60 |
| Tab. 11: Zpracování naměřených dat sady 02 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 60 |
| Tab. 12: Zpracování naměřených dat sady 03 (rychlost tažení 20 mm/min)..... | 60 |
| Tab. 13: Zkušební parametry druhé zkoušky | 62 |
| Tab. 14: Zpracování naměřených dat sady 01 (rychlost tažení 600 mm/min)..... | 64 |
| Tab. 15: Zpracování naměřených dat sady 02 (rychlost tažení 600 mm/min)..... | 64 |
| Tab. 16: Zpracování naměřených dat sady 03 (rychlost tažení 600 mm/min)..... | 64 |
| Tab. 17: Popis sad vzorků a jejich označení..... | 66 |
| Tab. 18: Střední hodnoty koeficientů tření jednotlivých sad..... | 67 |
| Tab. 19: Souhrn zkušebních parametrů zkoumaných vzorků..... | 69 |

Seznam příloh

- Příloha 1 – Výkresová dokumentace
- Příloha 2 – Naměřená data a jejich vyhodnocení
- Příloha 3 – Fotografie naměřených vzorků
- Příloha 4 – Snímky z mikroskopu

Bibliografie

- [1] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SPOLEHLIVOST I. TRIBODIAGNOSTIKA* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní, 2000 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Technicka-diagnostika-I-Tribodiagnostika-skripta.pdf>
- [2] WILLIAMS, J. A. *Engineering Tribology*. New York: Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-0-521-60988-3.
- [3] MANG, Theo, Kirsten BOBZIN a Thorsten BARTELS. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. ISBN 978-3-527-32057-8.
- [4] HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *PROVOZ, DIAGNOSTIKA A ÚDRŽBA STROJŮ* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní, 2013 [cit. 2023-01-28]. 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>
- [5] Wear & Tribology: Tribological effects under the microscope. In: *Oerlikon Balzers* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/balzers/cz/cs/portfolio/surface-technologies/wear-tribology/>
- [6] JACKSON, Robert P. *Engineering Tribology* [online]. PDH Online | PDH Center, 2020 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://pdhonline.com/courses/m427/m427content.pdf>
- [7] Introduction to Tribology - Friction. In: *Washington.edu* [online]. [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <http://depts.washington.edu/nanolab/ChemE554/Summaries ChemE 554/Introduction Tribology.htm>
- [8] LUDEMA, Kenneth C. Friction. In: BHUSAN, Bharat, ed. *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology*. II. series. Boca Raton: CRC Press, 2001, s. 205-230. ISBN 08-493-8403-6.
- [9] EMMENS, Wilko Cornelis. *Tribology of flat contacts and its application in deep drawing* [online]. 1997 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6075043/Emmens97tribology.pdf>. Doktorská práce. University of Twente.
- [10] TAN, Xincui. Comparisons of friction models in bulk metal forming. *Tribology International* [online]. **35**(6), 385-393 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00020-8)
- [11] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.

- [12] ČÁBELOVÁ, Kateřina. *Porovnání vlivu velikosti kontaktní plochy na koeficient tření při tribologickém testování: Comparison of influence of size of contact area on friction factor during tribological testing* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/148441>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní. Katedra strojírenské technologie. Vedoucí práce Pavel Solfronk.
- [13] SynLube™ Lube-4-Life® MAGIC #2. In: *SynLube* [online]. [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: http://www.synlube.com/SynLube_Magic2.htm
- [14] Smykové tření. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/36-smykove-treni>
- [15] GUTIÉRREZ, Jairo Alejandro Cortés. *Tribometer set-up and friction coefficient in elastomers of sealing systems* [online]. Turín, 2014 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/16508>. Diplomová práce. Politecnico di Torino. Vedoucí práce Luigi Mazza, Guido Belforte.
- [16] ZBRÁNEK, Ivo. *Vliv technologických parametrů (rychlosti, teploty a tlaku) na velikost koeficientu tření při tažení plechů s povlaky Zn: Influence of Technological Parameters (ρ , v , t) on Coefficient Size of Friction of Metal Sheets with Zinc Coating* [online]. Liberec, 2004 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/147916>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní. Katedra strojírenské technologie. Vedoucí práce Mirko Král.
- [17] ENGER, Marco a Paul FEINLE. Stick-Slip, Testing Methods. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, 1988-1997 [cit. 2023-02-13]. ISBN 978-3-642-22646-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-22647-2_490
- [18] BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK. *Technologie tváření* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2023-01-29]. ISBN 978-80-261-0449-0. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16833/1/TechnologietvareniTTSS.pdf>
- [19] MAKHAMOV, Anvar. *Tribology in Sheet Metal Forming* [online]. Porto, Portugal, 2017 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/143410245.pdf>. Doktorská práce. Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia. Vedoucí práce Abel Dias dos Santos.
- [20] LUDEMA, K. C. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Boca Raton: CRC Press, 1996. ISBN 08-493-2685-0.
- [21] BHUSHAN, Bharat. *Modern tribology handbook: Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques*. II. series. Boca Raton: CRC Press, 2001. ISBN 08-493-8403-6.
- [22] ČSN EN ISO 21920-2 (014457). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [23] POŠTA, Josef, Milan DVOŘÁK a Petr VESELÝ. *Degradace strojních součástí: monografie*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002. ISBN 80-213-0967-9.
- [24] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1621-8.

- [25] ŠAFR, Emil. *Technika mazání*. Praha: SNTL, 1964.
- [26] Mazací oleje. In: ČAPPO: Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/pohonne-hmoty-a-energie-pro-mobilitu/mazaci-oleje>
- [27] AHMED, Nehal a Amal NASSAR. Lubrication and Lubricants. In: GEGNER, Jürgen. *Tribology - Fundamentals and Advancements* [online]. Croatia: InTech, 2013, s. 62-75 [cit. 2023-04-07]. ISBN 978-953-51-1135-1. Dostupné z: doi:10.5772/56043
- [28] STODOLA, Jiří a Jaroslava MACHALÍKOVÁ. *Spolehlivost a diagnostika BSV*. Brno: Univerzita obrany, 2006. ISBN 80-723-1167-0.
- [29] LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-807-4943-041.
- [30] DVOŘÁK, Milan a Michaela MAREČKOVÁ. *Technologie tváření* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm
- [31] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy strojírenské technologie I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06056-8.
- [32] SEMIATIN, S. Lee. Introduction to Forming and Forging Processes. In: SEMIATIN, S. Lee a Joseph R. DAVIS, ed. *ASM Metals Handbook: Volume 14, Forming and Forging*. 9th ed. ASM International, c1988, s. 9 - 24. ISBN 0-87170-007-7.
- [33] FABÍK, Richard. *Tváření kovů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [34] FISCHER, Ulrich. *Základy strojnictví*. Praha: Europa-Sobotáles, 2004. ISBN 80-867-0609-5.
- [35] Deep Drawing. In: SEMIATIN, S. Lee a Joseph R. DAVIS, ed. *ASM Handbook: Volume 14, Forming and Forging*. 9th ed. ASM International, c1988. ISBN 0-87170-007-7.
- [36] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. Second Edition. South Norwalk: Industrial Press, Inc., 2014. ISBN 978-0-8311-3492-1.
- [37] Deep Drawing. In: SEMIATIN, S. Lee, ed. *ASM Handbook: Volume 14B, Metalworking: Sheet Forming*. Materials Park, Ohio: ASM International, c2006. ISBN 0-87170-710-1.
- [38] TRZEPIECINSKI, Tomasz a Hirpa LEMU. Recent Developments and Trends in the Friction Testing for Conventional Sheet Metal Forming and Incremental Sheet Forming. *Metals* [online]. **10**(1), 47 [cit. 2023-03-19]. ISSN ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:doi:10.3390/met10010047
- [39] SCHELL, Lukas a Peter GROCHE. In Search of the Perfect Sheet Metal Forming Tribometer. In: DAEHN, Glenn, Jian CAO, Brad KINSEY, Erman TEKKAYA, Anupam VIVEK a Yoshinori YOSHIDA, ed. *Forming the Future: Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity* [online]. The Minerals, Metals & Materials Series, 2021, s. 81-96 [cit. 2023-03-23]. ISBN ISBN 978-3-030-75380-1. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_7

- [40] CZICHOS, Horst a Mathias WOYDT. Tribological Testing and Presentation of Data. In: TOTTEN, George E., ed. *ASM Handbook: Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 2017. ISBN 978-1-62708-192-4.
- [41] KIM, Hyunok, Ji SUNG, Rajesh SIVAKUMAR a Taylan ALTAN. Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2007, **47**(14), 2120-2132 [cit. 2023-04-06]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.04.014
- [42] FOLLE, Luis Fernando a Lirio SCHAEFFER. New Proposal to Calculate the Friction in Sheet Metal Forming Through Bending Under Tension Test. *Materials Research* [online]. 2019, **22**(6) [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0523
- [43] ANDREASEN, Jan Lasso, David Dam OLSSON, Krzysztof CHODNIKIEWICZ a Niels BAY. Bending Under Tension Test with Direct Friction Measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2006, **220**(1), 73-80 [cit. 2023-06-03]. ISSN 0954-4054. Dostupné z: doi:10.1243/095440505X32913
- [44] MIGUEL-EGUÍA, Valentín, Alberto MATÍNEZ, Juana COELLO SOBRINO a Antonio CALATAYUD-COLOMER. A new approach for evaluating sheet metal forming based on sheet drawing test. Application to TRIP 700 steel. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2013, **213**(10), 1703-1710 [cit. 2023-06-18]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.010
- [45] Výpočet pružin. In: *MITCalc* [online]. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: https://www.mitcalc.com/doc/springs/help/cz/springs.htm
- [46] Termočlánek pro 3D tisk typ-K, 3x15mm. In: *Neven* [online]. [cit. 2023-06-18]. Dostupné z: https://www.neven.cz/kategorie/elektronicke-soucastky/merici-a-regulacni-pristroje/tc-cidla-teploty-termoclanky/termoclanek-pro-3d-tisk-typ-k-3x15mm/
- [47] Ocelový plech S235JR. In: *Gnee steel: Gnee steel link world* [online]. [cit. 2023-08-05]. Dostupné z: https://www.gneesteel.com/cs/products/steel-plate/carbon-steel/s235jr-steel-plate.html
- [48] ČSN EN 10152 (420911). *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tvářenění za studena - Technické dodací podmínky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [49] JIŘIKOVSKÝ, Karel. Nové možnosti ve světelné mikroskopii. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-moznosti-ve-svetelne-mikroskopii