



## Diplomová práce

# Zjištění koeficientu tření pro hlubokotažný plech s ochranným povlakem zinek – hořčík

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Autor práce:*

**Bc. Tomáš Reichelt**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

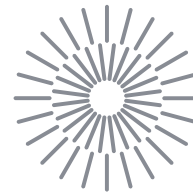
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2024



## Zadání diplomové práce

# Zjištění koeficientu tření pro hlubokotažný plech s ochranným povlakem zinek – hořčík

*Jméno a příjmení:*

**Bc. Tomáš Reichelt**

*Osobní číslo:*

S22000208

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Zadávající katedra:*

Katedra strojírenské technologie

*Akademický rok:*

2023/2024

## Zásady pro vypracování:

1. Materiály používané pro hluboké tažení v automobilovém průmyslu a jejich povrchové úpravy. Princip technologie tažení (konvenční a nekonvenční metody tažení). Tribologické procesy při hlubokém tažení.
2. Metody zjišťování koeficientu tření pro hlubokotažné materiály používané v automobilovém průmyslu.
3. Pro zvolený hlubokotažný materiál provést experimentální zjištění velikosti koeficientu tření v oblasti předřžovače, tažné hrany a brzděné lišty.
4. Statistické vyhodnocení.
5. Diskuze a závěr.

*Rozsah grafických prací:* obrázky, tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 50 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] DAVIES, Geoffrey. Materials for Automobile Bodies. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [2] ASHBY, M. F. Materials selection in mechanical design. 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-0-7506-6168-3.
- [3] MARQUARD, Elizabeth a Heather LAMPMAN. ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming. B.m.: ASM International, 2006. ISBN 0-87170-710-1.
- [4] COTELL, Catherine M., John B. SPRAGUE a F. A. SMIDT Jr. ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering. Novelty, Ohio, United States: ASM International, 1994. ISBN 978-0-871-384-2.
- [5] TRACTON, Arthur A., ed. *Coatings Technology Handbook*. 3. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2005. ISBN 978-0-429-11964-4.
- [6] BHUSHAN, Bharat. Introduction to tribology. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [7] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [8] TOTTEN, George E. a Robert W. BRUCE, ed. Handbook of lubrication and tribology. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. ISBN 978-0-8493-2095-8.

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

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

*Datum zadání práce:* 6. listopadu 2023

*Předpokládaný termín odevzdání:* 6. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
garant studijního programu

V Liberci dne 6. listopadu 2023

## Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

# Zjištění koeficientu tření pro hlubokotažný plech s ochranným povlakem zinek – hořčík

## Anotace

Tato diplomová práce zkoumá tribologické vlastnosti materiálů s povrchovou úpravou zinek – hořčík, které jsou určeny pro proces hlubokého tažení plechů v automobilovém průmyslu. Studie se soustředí na hodnocení koeficientu tření v různých oblastech tažných nástrojů prostřednictvím tribologických zkoušek, které zahrnují protahování jednotlivých pásků materiálu skrz čelisti zkušebního zařízení SOKOL 400. Práce je rozdělena do teoretické a experimentální části.

## Klíčová slova

Tribologie, koeficient tření, automobilový průmysl, hluboké tažení, tahová zkouška, povrchová úprava, drsnost

# Determining the coefficient of friction for deep-drawing sheet metal with a zinc-magnesium protective coating

## Annotation

This diploma thesis examines the tribological properties of materials with a zinc-magnesium surface treatment, intended for the deep drawing process of sheets in the automotive industry. The study evaluates the coefficient of friction in various areas of the deep-drawing tools through tribological tests that involve the stretching of individual strips of material through the jaws of the SOKOL 400 testing device. The work is divided into theoretical and experimental parts.

## Keywords

Tribology, coefficient of friction, automotive industry, deep drawing, tensile test, surface treatment, roughness

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za odborné vedení a poskytnutí nezbytných informací. Dále za trpělivost a poskytnutý čas pro konzultace a měření.

Další poděkování bych rád věnoval Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. a doc. Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za poskytnuté konzultace k odborným, ale i formálním částem mé diplomové práce.

Poděkování bych rád věnoval i mé ženě za její trpělivost a čas, abych se mohl věnovat studiu a psaní této diplomové práce.

Poslední poděkování patří mým rodičům za jejich neustálou podporu během mého studia.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>15</b>
2.1	Materiály používané pro hluboké tažení v automobilovém průmyslu a jejich povrchové úpravy	15
2.1.1	IF ocele (Interstitial Free Steels)	15
2.1.2	IF ocele s BH efektem (Bake Hardening)	16
2.1.3	Mikrolegované ocele (HSLA – High Strength Low-Alloy Steels)	17
2.1.4	Dvoufázové ocele (Dual Phase Steels)	18
2.1.5	Vícefázové TWIP ocele (Twinning Induced Plasticity Steel)	21
2.1.6	Vícefázové TRIP ocele (Transformation Induced Plasticity Steels)	23
2.1.7	Vícefázové CP ocele (Complex Phase Steels)	24
2.1.8	Povrchové úpravy materiálů určených pro hlubokotažné aplikace	27
2.2	Technologie tažení a její princip	28
2.2.1	Konvenční metody tažení	28
2.2.2	Nekonvenční metody tažení	31
2.2.3	Využití přidržovače, tažné hrany a brzdící lišty při tažení	35
2.3	Tribologie a tribologické procesy při hlubokém tažení	36
2.3.1	Druhy tření	37
2.3.2	Druhy opotřebení vyskytující se při procesech tažení	39
2.3.3	Další příklady druhů opotřebení	40
2.3.4	Maziva používaná pro účely plošného tváření	42
2.3.5	Metody zjišťování koeficientu tření pro hlubokotažné materiály používané v automobilovém průmyslu	43
2.4	Geometrické vlastnosti povrchů materiálů (drsnost materiálu)	46
2.4.1	Druhy profilů povrchů – celková výška profilů	47
2.4.2	Vyhodnocovaná délka drsnosti	48



2.4.3	Pravidlo 16 % a maximální hodnoty.....	49
2.4.4	Popis vyhodnocovaných parametrů drsnosti .....	49
2.5	Statická zkouška tahem.....	52
2.5.1	Smluvní a skutečný diagram napětí .....	53
2.5.2	Tažnost a homogenní tažnost materiálu.....	55
2.5.3	Kontrakce materiálu.....	56
2.5.4	Zásoba plastičnosti materiálů.....	56
2.5.5	Smluvní diagram napětí u vystárlé oceli.....	57
2.5.6	Smluvní diagram napětí se smluvní mezí kluzu .....	57
2.5.7	Typy zkušebních tělísek používaných pro tahovou zkoušku.....	58
2.5.8	Dané a měřené parametry průtahoměrem na zkušebních těliscích.....	59
<b>3</b>	<b>Experimentální část .....</b>	<b>60</b>
3.1	Příprava materiálu.....	60
3.1.1	Informace o zvoleném materiálu .....	60
3.1.2	Dělení zvoleného materiálu na tabulových nůžkách .....	61
3.1.3	Odmaštění a sušení nastříhaného materiálu.....	62
3.1.4	Příprava zkušebních tělísek pro účely tahové zkoušky.....	63
3.2	Statická zkouška tahem.....	64
3.2.1	Popis průběhu tahové zkoušky.....	64
3.2.2	Naměřené hodnoty na zkušebním zařízení pro tahovou zkoušku.....	67
3.3	Měření drsnosti .....	68
3.4	Nanesení vrstvy maziva .....	69
3.5	Tribologická zkouška.....	71
3.5.1	Použité zařízení pro měření tribologických zkoušek SOKOL 400.....	71
3.5.2	Nastavení zařízení.....	72
3.5.3	Popis průběhu měření tribologické zkoušky.....	72
3.5.4	Naměřené hodnoty .....	76

3.5.5	Metodika výpočtů koeficientů tření .....	79
3.5.6	Parametry geometrie pro výpočet koeficientů tření u jednotlivých tribologických zkoušek .....	85
3.5.7	Vypočtené hodnoty .....	86
<b>4</b>	<b>Vyhodnocení a diskuse výsledků .....</b>	<b>89</b>
<b>5</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>91</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>93</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>96</b>

## Seznam zkratek

Zkratka	Popis zkratky	Jednotky
$A_{80\text{mm}}$	Tažnost pro měřenou počáteční délku zkušebního tělesa 80 mm	%
$A_g$	Homogenní tažnost	%
$A_x$	Tažnost	%
$E$	Youngův modul pružnosti	MPa
$F$	Tahová síla	N
$F1\_avg$	Průměrná naměřená síla ve sledovaném úseku	N
$F1\_High$	Maximální naměřená síla ve sledovaném úseku	N
$F1\_Low$	Minimální naměřená síla ve sledovaném úseku	N
$F1\_max$	Maximální naměřená síla	N
$F_A$	Změřená tažná síla u varianty A	N
$\bar{F}_A$	Aritmetický průměr tažné síly u varianty A	N
$F_B$	Změřená tažná síla u varianty B	N
$\bar{F}_B$	Aritmetický průměr tažné síly u varianty B	N
$F_C$	Změřená tažná síla u varianty C	N
$\bar{F}_C$	Aritmetický průměr tažné síly u varianty C	N
$F_D$	Změřená tažná síla u varianty D	N
$\bar{F}_D$	Aritmetický průměr tažné síly u varianty D	N
$F_E$	Změřená tažná síla u varianty E	N
$\bar{F}_E$	Aritmetický průměr tažné síly u varianty E	N
$F_N$	Normálová síla	N
$F_T$	Třecí síla	N
$F_{\text{Tažná}}$	Tažná síla	N
$F_x$	Normálová síla	N
$F_y$	Normálová síla	N
$L, l$	Aktuální délka tělíska	mm
$L_0, l_0$	Původní délka tělíska	mm
$L_c$	Zkoušená délka vzorku	mm
$L_e$	Měřená délka průtahoměru	mm
$L_o$	Měřicí délka před zatížením	mm
$L_u$	Délka po přetržení zkušebního tělíska	mm
$M_f$	Teplota konce přeměny martenzitu	°C
$M_s$	Teplota začátku přeměny martenzitu	°C
$P_t$	Hloubka profilu	$\mu\text{m}$
$R$	Smluvní napětí	MPa
$R_a$	Střední aritmetická hodnota drsnosti	$\mu\text{m}$
$R_e$	Mez kluzu	MPa

$R_{eH}$	Horní mez kluzu	MPa
$R_{eL}$	Dolní mez kluzu	MPa
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	MPa
$R_{max}$	Maximální výška profilu	$\mu\text{m}$
$R_{mr}$	Materiálový podíl drsnosti profilu	%
$R_{p0,2}$	Smyková mez kluzu materiálu	MPa
$RP_c$	Počet výstupků	$\text{cm}^{-1}$
$RS_m$	Střední vzdálenost rýh	$\mu\text{m}$
$R_t$	Hloubka drsnosti	$\mu\text{m}$
$R_t$	Celková výška profilu drsnosti	$\mu\text{m}$
$R_z$	Střední hloubka drsnosti	$\mu\text{m}$
$S$	Skutečný průřez zkušebního tělíska	$\text{mm}^2$
$S$	Oblast přetržení zkušebního tělíska	
$S$	Činná plocha styku	$\text{mm}^2$
$S_0$	Počáteční průřez zkušebního tělíska	$\text{mm}^2$
$S_0$	Počáteční průřez	$\text{mm}^2$
$S_k$	Průřez na konci zkoušky	$\text{mm}^2$
$T$	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
$W_t$	Hloubka vln	$\mu\text{m}$
$Z$	Kontrakce	%
$\Delta L$	Změna délky $L$	mm
$a$	Činná délka čelisti	mm
$a_0$	Šířka vzorku určeného pro tahovou zkoušku	mm
$b$	Činná šířka čelisti	mm
$b_0$	Tloušťka vzorku určeného pro tahovou zkoušku	mm
$\text{delta\_F1}$	Rozdíl maximální a minimální naměřené síly ve sledovaném úseku	N
$f$	koeficient tření	-
$l$	Délka	$\mu\text{m}$
$l_k$	Konečná délka	mm
$l_n$	Základní délka	$\mu\text{m}$
$l_r$	Jednotlivá délka	mm
$p$	Kontaktní tlak	MPa
$t$	Čas	s
$v$	Rychlost pohybu	$\text{ms}^{-1}$
$x$	Činná délka čelisti	mm
$y$	Činná délka čelisti	mm
$\alpha$	Úhel opásání	rad
$\varepsilon$	Poměrná deformace	-
$\lambda_c$	Mezní vlnová délka	$\mu\text{m}$
$\sigma$	Skutečné napětí	MPa
$\varphi$	Skutečná deformace	-
$\alpha$	Alfa fáze	
$\gamma$	Gama fáze	

BH	Bake Hardening
CP	Complex Phase Steels
DP	Dual Phase Steels
EBT	Electron Beam Texturing
EDT	Electric Discharge Texturing
FCC	Plošně centrovaná krystalová mřížka
HSLA	High Strength Low-Alloy Steels
IF	Interstitial Free Steels
LT	Laser Texturing
Pretex	Preussag Texturing
SBT	Shot Blasting Texturing
SFE	Stacking Fault Energy
TRIP	Transformation Induced Plasticity Steels
TWIP	Twinning Induced Plasticity Steel

# 1 Úvod

Tribologie, věda o tření, opotřebení a mazání materiálů, hraje klíčovou roli ve vývoji a optimalizaci výrobních procesů v mnoha průmyslových odvětvích, včetně automobilového průmyslu. Tato diplomová práce se zaměřuje na studium tribologických vlastností materiálů s povrchovou úpravou zinek – hořčík, která je využívána při hlubokém tažení plechů, klíčové technologii v automobilovém průmyslu.

Hlavním cílem teoretické části této diplomové práce je vytvořit rešerši používaných materiálů v automobilovém průmyslu s popisem možnosti povrchových úprav, principu technologie tažení, popsat tribologické procesy při hlubokém tažení a metody zjišťování koeficientu tření. Tyto poznatky jsou strukturovány do několika klíčových kapitol.

Cílem experimentální části je zjistit koeficienty tření, které v praxi působí v oblastech přidržovače, tažných hran a brzdných lišt tažných nástrojů za využití tribologických zkoušek.

K vyhodnocení tribologických vlastností byly použity tribologické testy protahování materiálu, které umožňují detailně posoudit koeficient tření mezi plechy a nástroji používanými v automobilovém průmyslu. Pro experimentální část byl zvolen hlubokotažný plech s povrchovou úpravou zinek-hořčík, který byl vybrán pro své výjimečné vlastnosti, které zahrnují dobré tribologické chování a odolnost proti korozi. Tato povrchová úprava, může potenciálně zlepšit procesní efektivitu a kvalitu finálních výrobků v automobilovém průmyslu.

Experimentální část práce zahrnuje přípravu vzorků, jejich stříhání, odmašťování a aplikaci speciálního oleje pro tváření. Následně byly připravené vzorky podrobeny tahovým a tribologickým zkouškám, jejichž výsledky byly analyzovány a prezentovány ve formě tabulek a grafů.

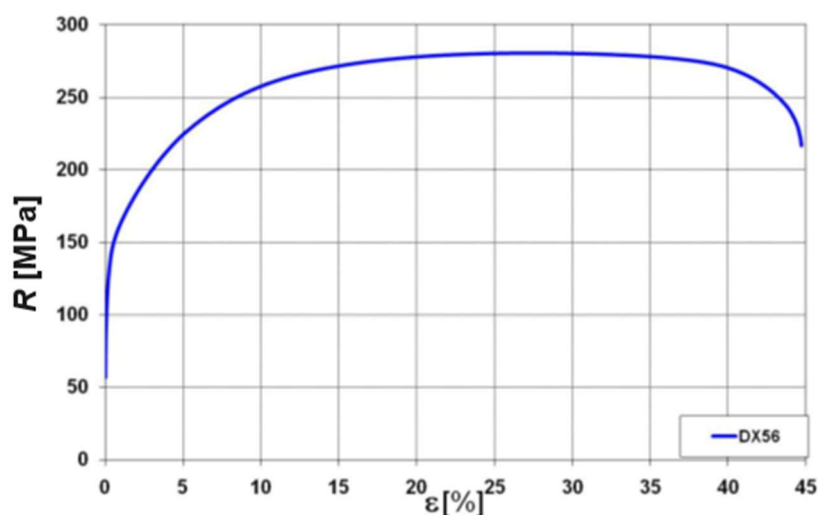
Výsledky této práce nabízejí hlubší porozumění metod zjišťování koeficientu tření a poskytují cenné informace pro vývoj nových materiálů v automobilovém průmyslu. Studie má potenciál nejen zlepšit efektivitu výrobních procesů, ale také přispět k prodloužení životnosti komponent a snížení environmentálního dopadu během výroby automobilů. Závěrečná část poskytne doporučení pro budoucí výzkum.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Materiály používané pro hluboké tažení v automobilovém průmyslu a jejich povrchové úpravy

#### 2.1.1 IF ocele (Interstitial Free Steels)

Oceli bez intersticiálních poruch (IF) představují skupinu materiálů s výbornou tažností (obr. 2.1). Tyto vlastnosti způsobuje jejich feritická struktura, která je modifikována prvky jako jsou hliník (Al), titan (Ti) a niob (Nb), které formují karbidy a nitridy. Tyto karbidy a nitridy „čistí“ feritickou strukturu od intersticiálních atomů uhlíku (C) a dusíku (N) [1, 2].

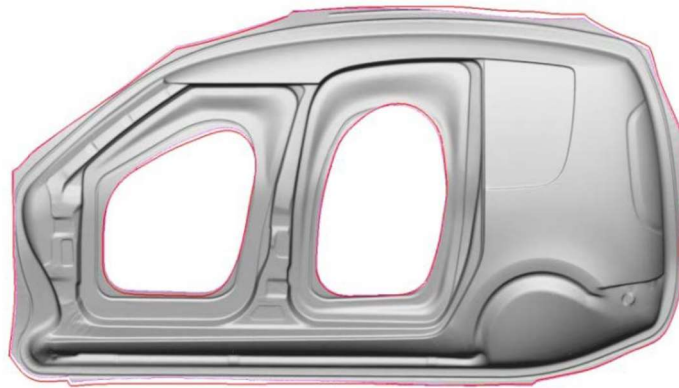


*Obr. 2.1 Ukázka grafu z tahové zkoušky – IF ocele [2]*

Kromě toho v tomto druhu oceli je přítomna síra, přičemž poměr síry k uhlíku a dusíku je S:C:N = 1:10:10. Tento poměr napomáhá přednostnímu vytváření precipitátů TiN a TiC. Síra rovněž stabilizuje tvorbu jemných precipitátů  $Ti_4C_2S_2$  za poměru S:C:N = 1:1:1 [2].

Další prvky jako mangan (Mn), křemík (Si) a fosfor (P) zvyšují pevnost struktury těchto ocelí tím, že tyto prvky vytvoří pevné roztoky ve feritické struktuře. Ocele s vyšším obsahem fosforu jsou označovány jako refofosforizované ocele, které je nutné kombinovat s vyšším obsahem niobu pro zjemnění zrna [1, 2].

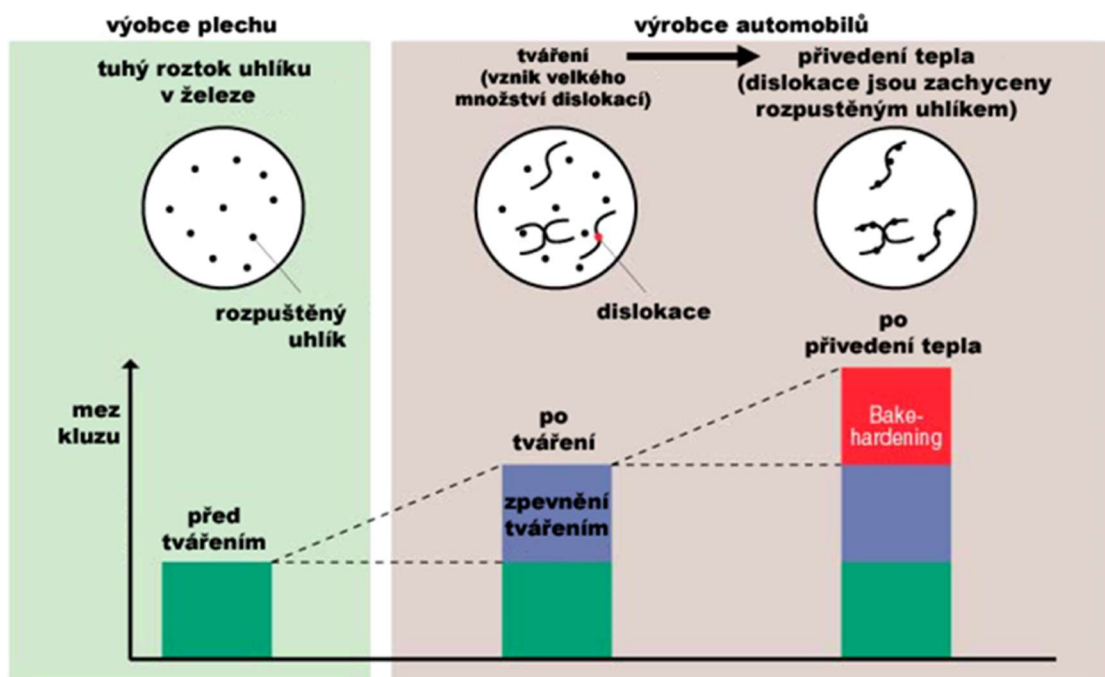
Oceli bez intersticií najdou uplatnění při výrobě tvarově náročných výlisků pohledových dílů automobilových karoserií. Výlisek z IF ocele lze nalézt na obr. 2.2 [2].



*Obr. 2.2 Vylisek z IF ocele [2]*

### 2.1.2 IF ocele s BH efektem (Bake Hardening)

Jedná se o speciální druh oceli, který je optimalizován pro zvýšení pevnosti po tepelném zpracování, což je často prováděno během procesu vypalování laku (170 °C po dobu 20 minut) na karoseriích automobilů. Přesněji jde o schopnost zvyšovat pevnost v průběhu tepelného zpracování způsobené uzamknutím jednotlivých dislokací předchozím tvářením, což je velmi užitečné pro výrobu tenkých, ale odolných plechů, používaných v automobilovém průmyslu. Bake Hardening proces je zobrazen na obr. 2.3 [1, 2].



*Obr. 2.3 Bake Hardening proces [2]*



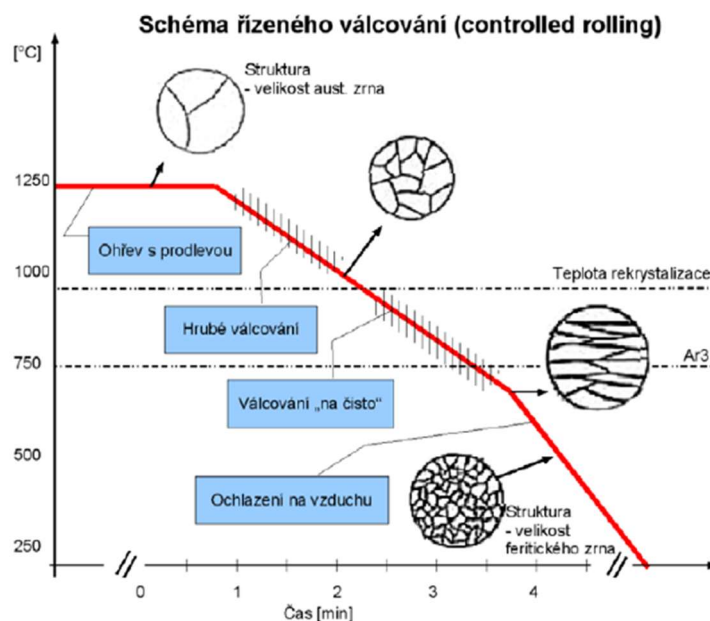
### 2.1.3 Mikrolegované ocele (HSLA – High Strength Low-Alloy Steels)

Vysokopevnostní mikrolegované ocele (HSLA) jsou charakteristické svou feritickou strukturou a obsahem mikrolegujících prvků, jako jsou nikl, vanad, titan, mangan, molybden, zirkon, bor a chrom [1, 2].

Mechanismus zpevnění těchto materiálů je založen na precipitačním vytvrzování, které nastává během procesu tváření. Legující prvky přispívají k tvorbě karbidů, nitridů, karbidonitridů, a k zjemnění zrna. Díky kombinaci malého obsahu těchto legujících prvků a velmi jemnozrné struktury ocele dosahují vynikajícího poměru pevnosti k houževnatosti, což umožňuje výrobu ocelí s cílenými mechanickými vlastnostmi neboli „ocel na míru“. Typicky tyto materiály dosahují pevnosti v rozmezí 700 až 800 MPa, avšak mají nevýhodný poměr  $R_e/R_m$  [1, 2].

Typické složení HSLA ocelí zahrnuje maximálně 0,1 % uhlíku (C), 0,5 až 1,7 % manganu (Mn), 0,05 až 0,3 % křemíku (Si) a mikrolegující prvky, které jsou niob (Nb), vanad (V) a titan (Ti) v celkovém množství cca 0,1 % [2].

Výroba těchto ocelí je realizována technologií řízeného válcování, založené na principu tváření v oblasti austenitu při teplotách kolem 1100 °C a následném tváření při snížených teplotách okolo 800 °C. Nižší teplota zajišťuje oproti konvenční metodě válcování pomalejší rekrytalizaci i růst zrna. Schematicky lze pozorovat na obr. 2.4 [2].



**Obr. 2.4** Schéma řízeného válcování – výroba HSLA ocelí [2]

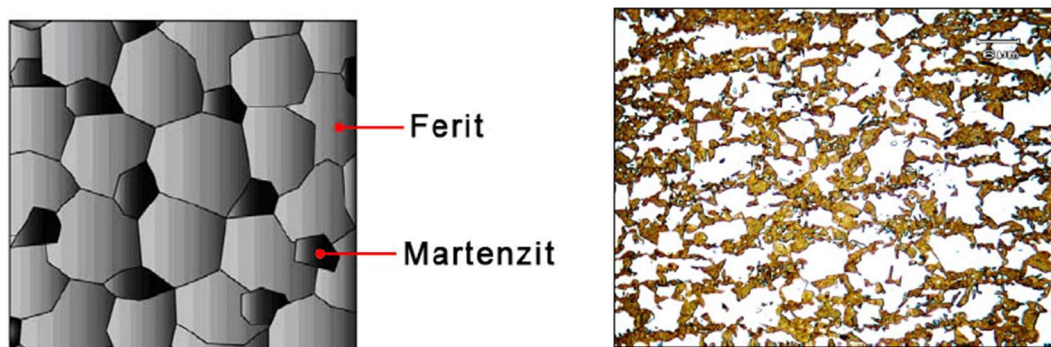
Během procesu válcování za tepla legující prvky zabraňují nadměrnému růstu austenitických zrn, a to v důsledku jemných precipitátů. Tento proces vede k udržení jemné struktury oceli, což je zásadní pro její konečné mechanické vlastnosti [2].

#### Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti u HSLA ocelí [2]:

- **Mangan** působí jako austenitotvorný prvek, který snižuje teplotu transformace austenitu na ferit.
- **Niob** brzdí rekrystalizaci v tuhém roztoku, což vede k tvorbě jemných precipitátů stabilních i při vyšších teplotách, středně silné precipitační zpevnění.
- **Vanad** je známý svou schopností tvorby jemných precipitátů ve feritické matici během ochlazování, což vede k výraznému precipitačnímu zpevnění.
- **Titan**, při obsahu nad 0,05 %, vykazuje silné precipitační zpevnění, ale zvyšuje křehkost feritu.

#### 2.1.4 Dvoufázové ocele (Dual Phase Steels)

Dvoufázové ocele, označované jako DP (Dual Phase) ocele, jsou specifickou kategorií ocelí, jejichž základem je slitina manganu a křemíku. Strukturu tvoří feritická matrice, uvnitř které se vyskytují malé oblasti tvrdého martenzitu (5 až 50 % objemu materiálu) s možným obsahem zbytkového austenitu, který se jako u TRIP ocelí při deformaci může transformovat na martenzit. Struktura je zobrazena na obr. 2.5 [1, 2].



*Obr. 2.5 Struktura DP ocelí [2]*

Feritická matrice poskytuje materiálu dobrou tvárnost a vysoký koeficient deformačního zpevnění, což znamená, že ocele získávají vyšší pevnost při mechanické deformaci. Martenzitické fáze v DP ocelích jsou zásadní pro dosažení vysokých hodnot pevnosti celého materiálu [1, 2].

Ve srovnání s HSLA ocelí mají výhodný poměr  $R_e/R_m$ , kde se tyto oceli využívají pro různé typy automobilových výztuh. Zároveň lze u těchto ocelí sledovat vysoký koeficient deformačního zpevnění [1, 2].

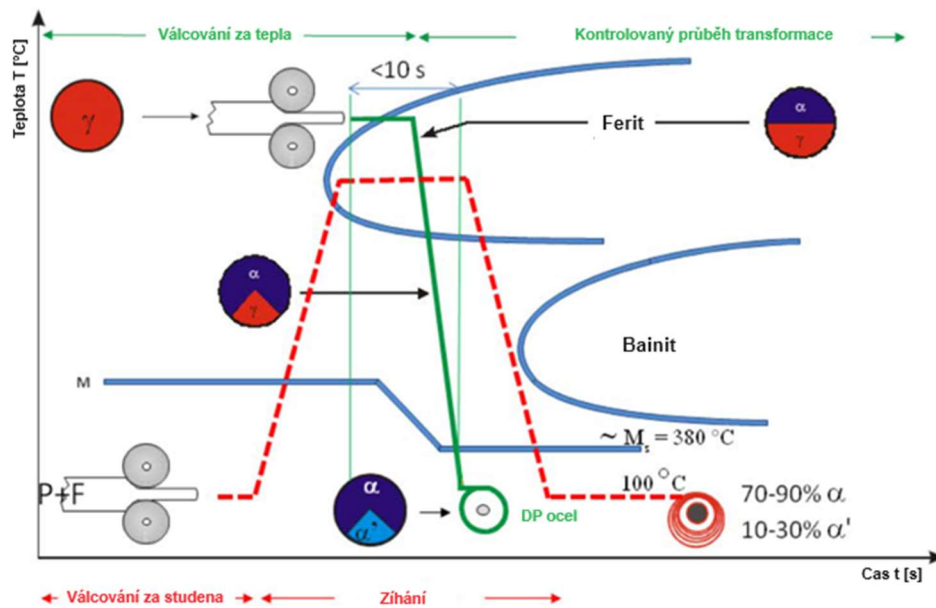
Výrobní procesy dvoufázových ocelí jsou podobné procesům výroby vysokopevnostních nízkolegovaných ocelí (HSLA). Jedná se o řízené ochlazování austenitické nebo feriticko-austenitické struktury v kombinaci s válcováním, kde válcovat lze za studena nebo za tepla. Proces výroby lze pozorovat na obr. 2.6 [2].

#### **Válcování za studena:**

Při válcování za studena je výchozí struktura typicky austeniticko-feritická. Polotovár se ohřívá na teplotu přibližně 800 °C, což odpovídá interkritickému žíhání. V této fázi dochází k částečnému rozpouštění feritu v austenitu. Po dosažení požadované teploty následuje řízené ochlazení pod teplotu, na které začíná transformace martenzitu (martenzit start), což vede k transformaci zbytkového austenitu na martenzit, čímž se zvyšuje pevnost oceli [2].

#### **Válcování za tepla:**

Proces válcování za tepla vychází z plně austenitické fáze, kde se ocel ochlazuje s následnou výdrží na feritické teplotě. Po dosažení této fáze je materiál ochlazen pod teplotu martenzit start, což umožňuje transformaci zbytkového austenitu na martenzit. Tento krok je klíčový pro získání žádaných mechanických vlastností, jako jsou vyšší pevnost a tvrdost materiálu [2].



**Obr. 2.6** Schéma řízeného válcování – výroba DP ocelí [2]

Typické chemické složení DP ocelí zahrnuje 0,1 až 0,2 % uhlíku (C), 1,5 % manganu (Mn), 1,5 % křemíku (Si), 0,04 % hliníku (Al), a další prvky jako chrom (Cr) a molybden (Mo) [2].

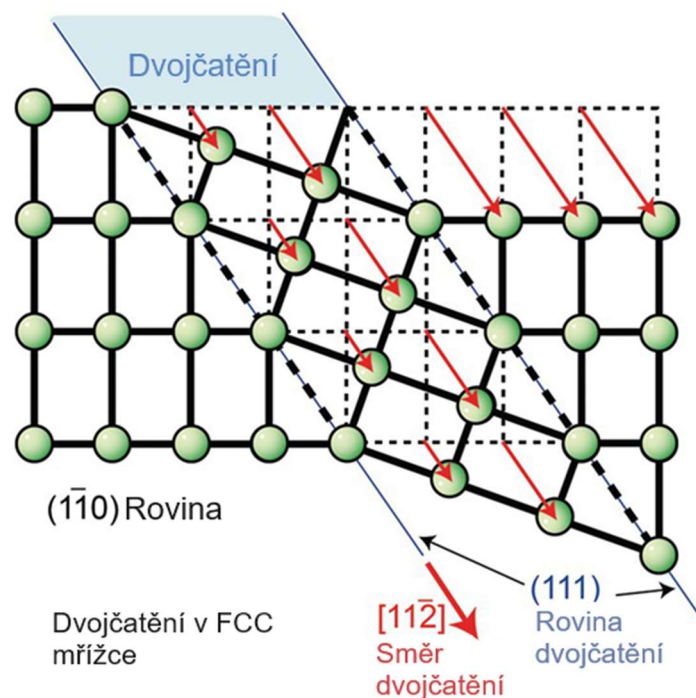
#### Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti u DP ocelí [2]:

- **Uhlík (C)** hraje zásadní roli v distribuci jednotlivých fází a stabilizuje zbytkový austenit.
- **Mangan (Mn)** je austenitotvorný prvek, který potlačuje perlitickou transformaci.
- **Křemík (Si)** je feritotvorný prvek, který zpevňuje ferit a zabraňuje tvorbě cementitu.
- **Hliník (Al)** je silně feritotvorný prvek a podobně jako křemík zabraňuje tvorbě cementitu a zároveň posouvá křivku začátku transformace martenzitu směrem k vyšším teplotám.

## 2.1.5 Vícefázové TWIP ocele (Twinning Induced Plasticity Steel)

Vícefázové ocele, označované jako TWIP ocele (Twinning Induced Plasticity), jsou ocele, které ve výchozím stavu mají plně austenitickou mřížku ve spojení s vysokým podílem legujících prvků (15 až 35 % manganu (Mn) + křemíku (Si) a hliníku (Al)), kde tyto prvky napomáhají stabilizovat austenit při pokojové teplotě [1, 2].

Během tváření dochází ke zpevnění tohoto druhu materiálu z důvodu reorganizace krystalové mřížky, a to důsledkem mechanismu „mechanických dvojčat“, neboli dvojčatění, které probíhá za běžných teplotních a rychlostních podmínek. Tento proces je umožněn především díky vysokému obsahu manganu, který snižuje energii vrstvených chyb (SFE – Stacking Fault Energy). V důsledku toho se dvojčatění jeví jako energeticky výhodnější mechanismus deformace oproti skluzu dislokací. Mechanismus dvojčatění je znázorněn na obr. 2.7 [1, 2].



**Obr. 2.7** Mechanismus dvojčatění [3]

Tyto oceli vynikají mimořádnou kombinací vysoké pevnosti, dosahující hodnot až 1300 MPa, a extrémní tažností (obr. 2.8), která může přesáhnout 50 %. Vlastnosti TWIP ocelí předurčují jejich použití pro výrobu pevnostních výlisků složitých tvarů, deformačních členů a různých výztuh karoserie automobilů. Avšak je třeba mít na paměti, že tyto materiály jsou relativně drahé a obtížně svařitelné standardními metodami svařování [2].



**Obr. 2.8** Využití TWIP efektu u ocelí (deformace > 1000 %) [2]

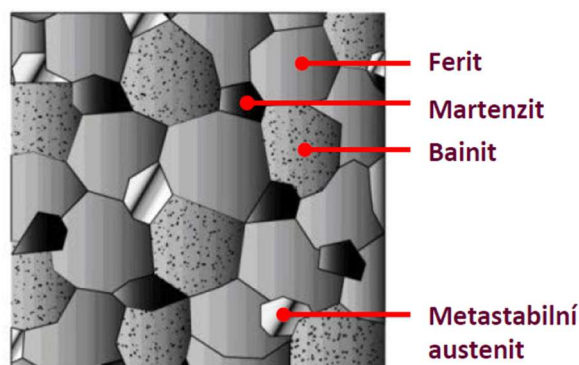
Chemické složení TWIP ocelí typicky zahrnuje 0,4 až 0,9 % uhlíku (C), 15 až 35 % manganu (Mn), 2 až 4 % křemíku (Si) a 2 až 4 % hliníku (Al), s přidavkem dalších prvků jako jsou chrom (Cr), titan (Ti), nikl (Ni) a bor (B) [2].

#### **Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti u TWIP ocelí [2]:**

- **Uhlík (C)** zvyšuje pevnost tuhého roztoku a stabilizuje zbytkový austenit.
- **Mangan (Mn)** je hlavní legující prvek, který stabilizuje austenit a umožňuje dvojčatění i při pokojové teplotě.
- **Křemík (Si)** zvyšuje pevnost tuhého roztoku, snižuje množství FCC fáze a podporuje přeměnu austenitu na martenzit během chladnutí a deformace.
- **Hliník (Al)** stabilizuje austenit a zvyšuje pevnost tuhého roztoku, zároveň zabraňuje tvorbě martenzitu.

## 2.1.6 Vícefázové TRIP ocele (Transformation Induced Plasticity Steels)

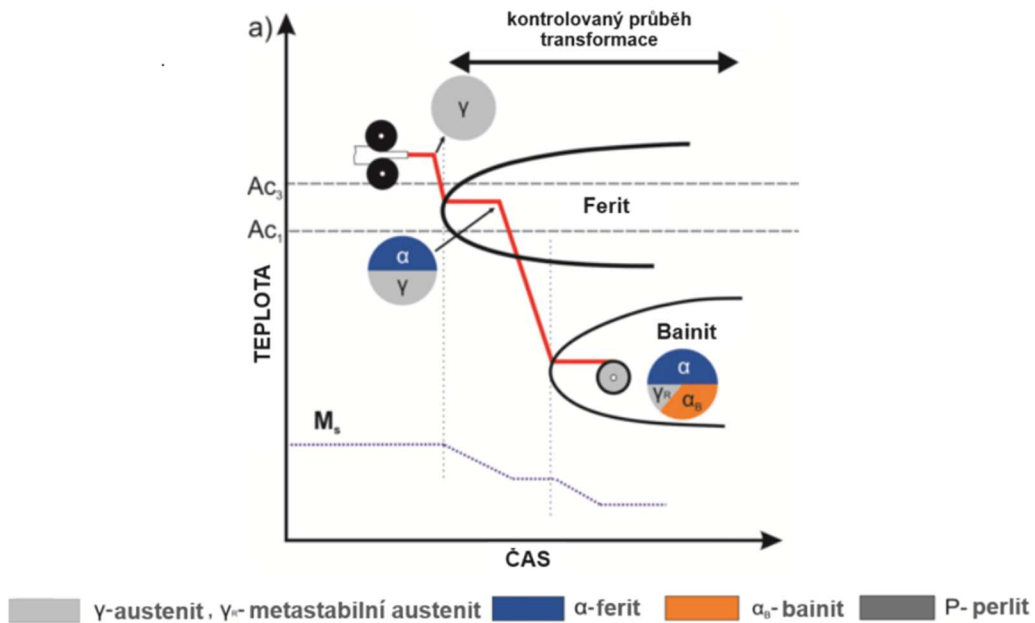
TRIP (Transformation Induced Plasticity) ocele se vyznačují základní strukturou tvořenou feriticko-bainitickou maticí, ve které se nachází 5 až 15 % zbytkového metastabilního austenitu. Během plastické deformace se tento metastabilní austenit transformuje na martenzit. Jedná se o tzv. TRIP efekt, který způsobuje zpevnění, a to důsledkem zvyšujícího se podílu martenzitu při současném hromadění dislokací kolem hranic zrn martenzitické fáze uvnitř feriticko-bainitické matrice. Strukturu TRIP ocele popisuje obr. 2.9 [1, 2].



*Obr. 2.9 Schematicky znázorněna struktura TRIP ocele [2]*

Tato ocel má vysoký exponent deformačního zpevnění, který zajišťuje, že při daných mechanických hodnotách má tento materiál výbornou tvárnost. Bohužel tento materiál vykazuje silnou míru odpružení. TRIP ocele jsou určeny pro deformační výztuhy aut [1, 2].

Výroba TRIP ocelí zahrnuje válcování v oblasti nad teplotou  $A_{c3}$ , následné ochlazení a udržení materiálu na teplotě feritické transformace s cílem zamezit tvorbě perlitu. Dále ochlazení a výdrž na teplotu bainitické přeměny, kde je důležité potlačení precipitace cementitu ze zadržného metastabilního austenitu, kterého se dosahuje pomocí rychlého ochlazení na teplotu svinování ležící v oblasti bainitu okolo 350–490 °C. Celý proces výroby TRIP ocelí je znázorněn na obr. 2.10 [2].



**Obr. 2.10** Schéma řízeného válcování – výroba TRIP ocelí [2]

### 2.1.7 Vícefázové CP ocele (Complex Phase Steels)

CP ocele neboli vícefázové ocele, představují skupinu vysoce pevnostních ocelí, které jsou charakterizovány mikrostrukturou obsahující fáze feritu, bainitu, martenzitu a malé množství zbytkového austenitu. Tato struktura napomáhá k dosažení vynikající kombinace pevnosti, houževnatosti a tvárnosti, což činí CP ocele vhodnými pro náročné aplikace v automobilovém průmyslu, jako jsou bezpečnostní komponenty a nosné konstrukce. Zpevnění tohoto typu materiálu vzniká, tak jako i u ostatních typů ocelí za pomoci precipitačního vytvrzení mikrolegujících prvků. Strukturu CP ocelí lze pozorovat na obr. 2.11 [1, 2].



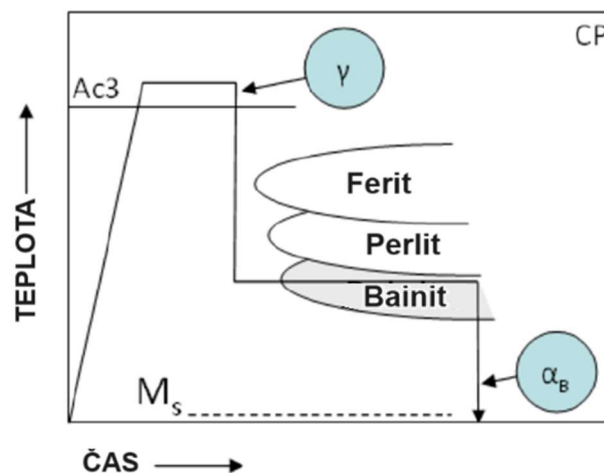
**Obr. 2.11** Schématické znázornění mikrostruktury CP ocelí [2]



Výroba CP ocelí je velmi podobná metodě výroby TRIP ocelí, kde využíváme řízeného ochlazování austenitické struktury v kombinaci s válcováním. Oproti výrobě TRIP ocelí je rozdílem, že jsou upraveny, tak aby obsahovaly menší množství zbytkového austenitu. Křivka ochlazování je velmi podobná křivce při výrobě TRIP ocelí s jediným rozdílem, a to že zde je využito i martenzitické přeměny. Tyto oceli jsou charakteristické svou jemnozrnnou strukturou. Schéma výroby CP ocelí zachycuje obr. 2.12 [2].

### Princip výroby CP ocelí [2]:

- 1) Prvním krokem je zjemnění zrna pomalou rekrytalizací a přidáním legur.
- 2) Dále materiál musí dosáhnout větší teploty, než je teplota austenitické přeměny (nad  $A_{c3}$ ) s následnou výdrží, abychom přivedli materiál do čistě austenitické struktury.
- 3) Následuje homogenizace uhlíku na rovnovážné složení. Důvodem je, že uhlík při ochlazování potlačuje tvorbu feritu.
- 4) Následuje řízené ochlazování a následná výdrž na teplotě bainitické přeměny.
- 5) Posledním krokem je ochlazení přes teplotu  $M_s$ , kde se část zbytkového austenitu transformuje na martenzit.



**Obr. 2.12** Schéma řízeného válcování – výroba CP ocelí [2]

Typicky jsou tyto oceli složeny z 0,1 až 0,2 % uhlíku (C), 1,5 až 2,7 % manganu (Mn), 0,2 až 0,8 % křemíku (Si), a z dalších prvků jako titan (Ti), vanad (V) a niob (Nb). Tyto prvky mají klíčový vliv na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti materiálu [2].

**Vliv jednotlivých prvků u CP ocelí [2]:**

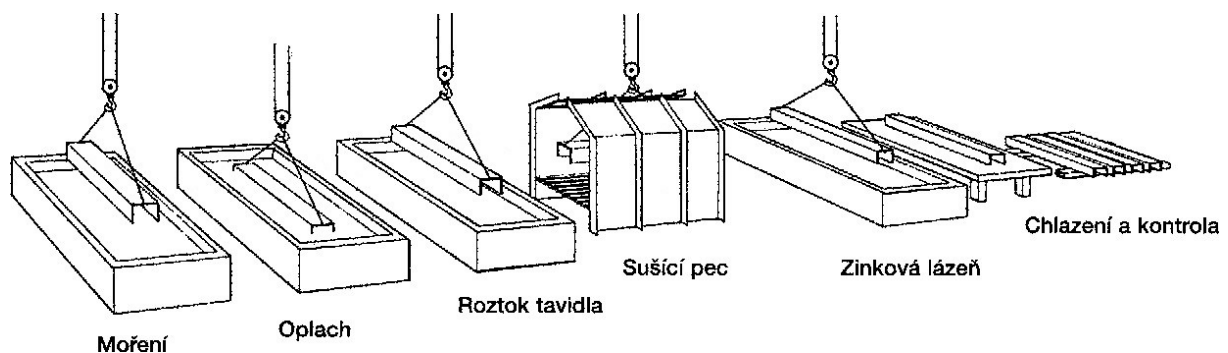
- **Uhlík (C)** určuje distribuci jednotlivých fází, stabilizuje zbytkový austenit.
- **Mangan (Mn)** je austenitotvorný prvek, potlačuje perlitickou transformaci.
- **Křemík (Si)** je feritotvorný prvek, který zpevňuje ferit a zároveň zabraňuje tvorbě cementitu.
- **Titan (Ti), vanad (V), niob (Nb)** zajišťují tvorbu velmi jemné struktury a zároveň umožňují vznik jemných precipitátů při „kalení“.

## 2.1.8 Povrchové úpravy materiálů určených pro hlubokotažné aplikace

Povrchové úpravy ocelí jsou klíčové pro zlepšení jejich vlastností, jako je odolnost proti korozi, adhezi nátěrů a snížení tření během hlubokotažného tváření. V tomto případě se jedná o povrchové úpravy žárového zinkování a fosfátování [4].

### Žárové zinkování

Žárové zinkování je jednou z nejdůležitějších povrchových úprav používaných pro ochranu ocelí proti korozi, kde procesem nanášení této povrchové úpravy je ponoření polotovaru do roztaveného zinku. Tento proces vede k vytvoření zinkové ochranné vrstvy na základním kovovém materiálu. Tato vrstva nám zajišťuje odolnost materiálu v extrémně korozivních prostředích, ve kterých se automobily pohybují. Princip žárového zinkování je zobrazen na obr. 2.13 [4].



*Obr. 2.13 Princip žárového zinkování [5]*

### Fosfátování

Fosfátování je chemický proces, který se aplikuje po zinkování a jehož účelem je především zlepšit adhezi laků, nátěrů. Během fosfátování je materiál ponořen do fosfátového roztoku, což vede k vytvoření mikroskopické krystalické vrstvy na povrchu [4].

## 2.2 Technologie tažení a její princip

Tažení kovů je proces, při kterém je kovový plech tvarován pomocí tažníku a tažnice, kde je plech deformován a přetvořen do požadovaného tvaru. Tento proces může být prováděn za studena nebo za tepla a obvykle zahrnuje aplikaci maziva ke snížení tření a snížení opotřebení nástroje. Pro úspěšné provedení procesu tažení je nezbytné zvolit správný typ materiálu, jeho tloušťku, od které se odvíjí jeho formovatelnost a odolnost vůči trhlinám. Dále je klíčové nastavit optimální tlak a rychlost tažení, což vyžaduje přesné výpočty a zkušenosti [6].

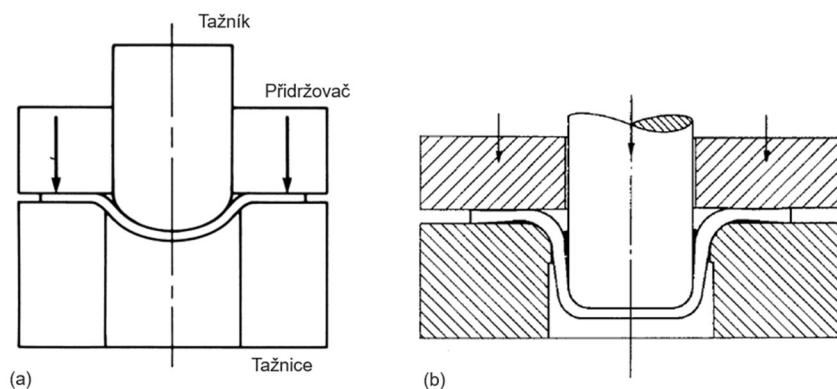
Maziva u technologie tažení hrají významnou roli, neboť snižují tření mezi taženým materiálem a nástroji, čímž dochází k redukci opotřebení a zvýšení kvality finálního produktu [6].

Tažení umožňuje výrobu široké škály kovových dílů, od jednoduchých komponent, až po složité díly. Díky vysoké efektivitě a schopnosti produkovat díly s vysokou přesností a minimálním odpadem je tažení jednou z klíčových technologií ve výrobním průmyslu. Tažení dělíme na konvenční a nekonvenční metody [6].

### 2.2.1 Konvenční metody tažení

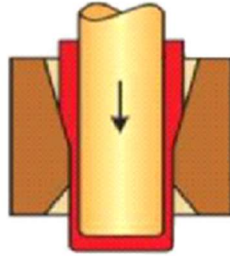
**Mezi konvenční metody tažení patří [6, 7, 26]:**

- 1) **Základní tažení** – využívá základní nástroje a je často používáno pro výrobu jednoduchých tvarů, kde je důraz kladen na rychlost a efektivitu výrobního procesu. Princip základního tažení je zobrazen na obr 2.14.



**Obr. 2.14** Základní tažení [6]

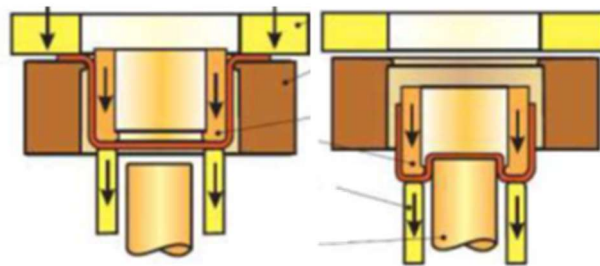
- 2) **Tažení se ztenčením stěny** – je druh tažení, kde dochází k úmyslnému ztenčení stěny, aby bylo možné dosáhnout specifických geometrických tvarů. Tažení se ztenčením stěny je na obr. 2.15.



**Tažení se ztenčením stěny**

*Obr. 2.15 Ukázka tažení se ztenčením stěny [26]*

- 3) **Tažení zpětné (obrácené)** – je druh tažení, které se používá tam, kde se nepoužívá přidržovač, anebo se materiál táhne se zvýšenou tažnou silou. Používá se hlavně pro výrobu kulovitých nebo elipsovitých tvarů. Tento druh tažení lze vidět na obr. 2.16.



**Zpětné tažení**

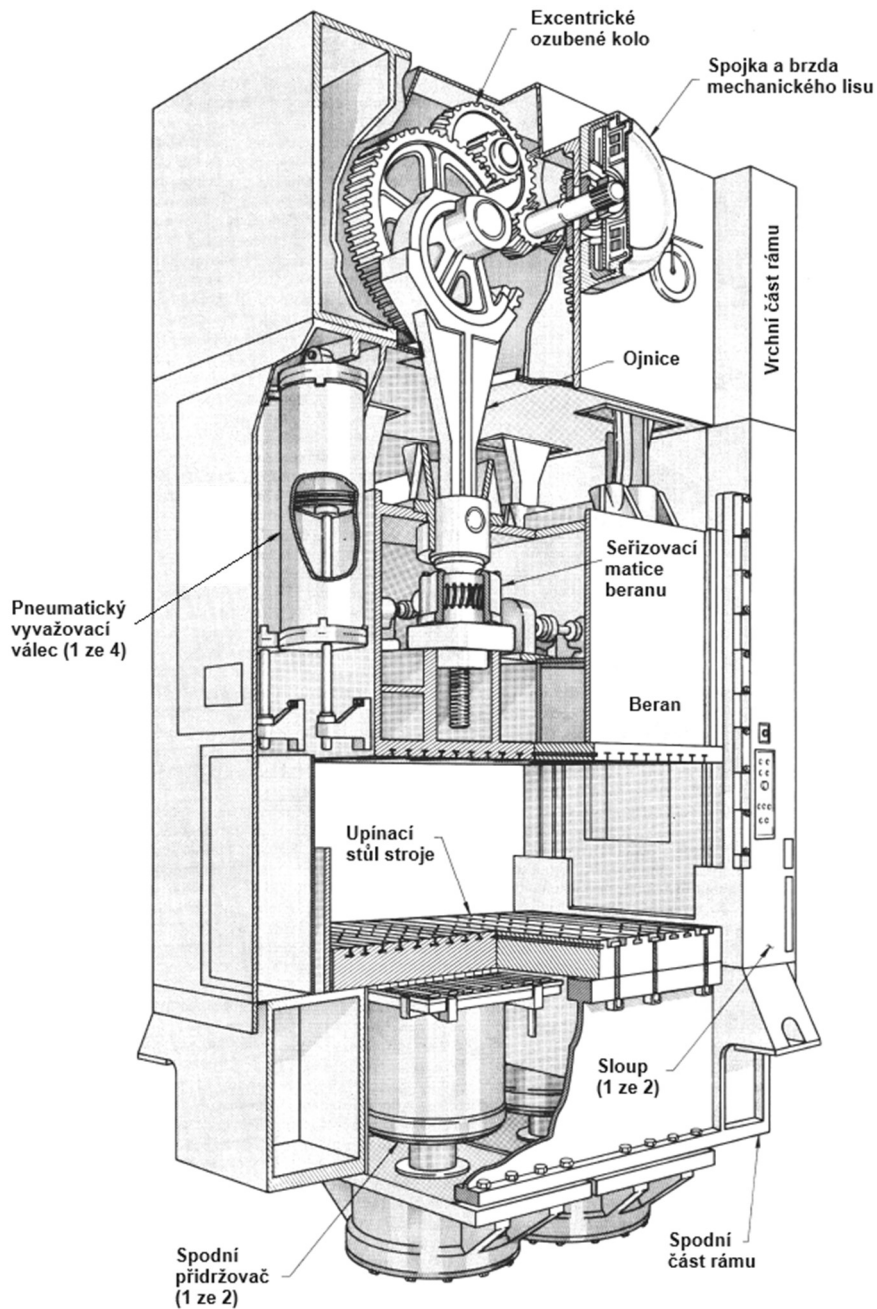
*Obr. 2.16 Ukázka zpětného tažení [26]*

- 4) **Tažení s ohřevem** – je druh tažení, kdy je materiál zahříván mezi vyhřívanými plochami tažnice a přidržovače ke zlepšení jeho plastických vlastností a snížení potřebné síly pro tažení. Používá se pro hořčíkové slitiny, které mají špatnou tváritelnost za studena. Materiál se předehtřívá na teploty 300–350 °C.

Konvenční metody využívají k tažení mechanických, ale i hydraulických lisů.

## Mechanické lisy

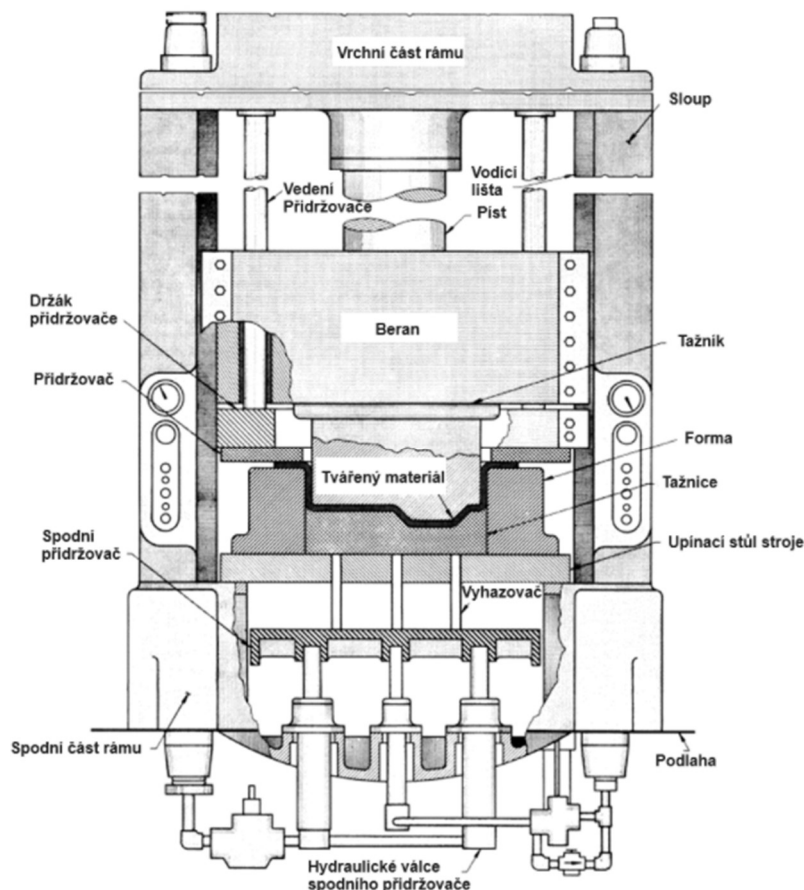
Principem mechanických lisů je transformace kinetické energie z rotačních komponent na lineární pohyb skrze excentrické, klikové mechanismy. Tento převod energie umožňuje lisy provádět rychlé operace s vysokou frekvencí, což je nezbytné pro efektivní masovou výrobu. Mechanický lis je zobrazen na obr 2.17 [6].



**Obr. 2.17** Ukázka mechanického lisu [6]

## Hydraulické lisy

Hydraulické lisy využívají kapalinový tlakový systém, který umožňuje distribuovat vysoký tlak rovnoměrně a efektivně i při nízkých rychlostech. Tento princip činí hydraulické lisy vhodnými pro aplikace vyžadující značnou deformaci materiálu. Hydraulický lis je zobrazen na obr. 2.18 [6].



**Obr. 2.18** Ukázka hydraulického lisu [6]

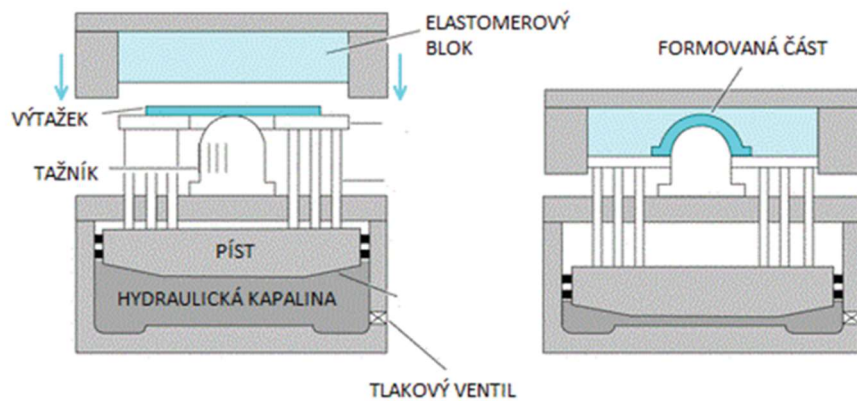
### 2.2.2 Nekonenční metody tažení

Mezi nekonvenční metody tváření patří technologie, které mají buď odlišné rychlosti tváření (se zvýšenou rychlostí) nebo za všestranného působení tlaku a kombinace [7].

Tyto metody umožňují variabilní rádius tažení, lepší kontrolu nad geometrií taženého dílu, což je výhodné při tvorbě složitějších tvarů, jako jsou asymetrické nebo jiné komponenty složitých tvarů. Nekonenční metody jsou často využívány v průmyslových oblastech, kde jsou požadavky na specifické geometrie a nízké objemy výroby, což umožňuje flexibilitu ve výrobním procesu [6].

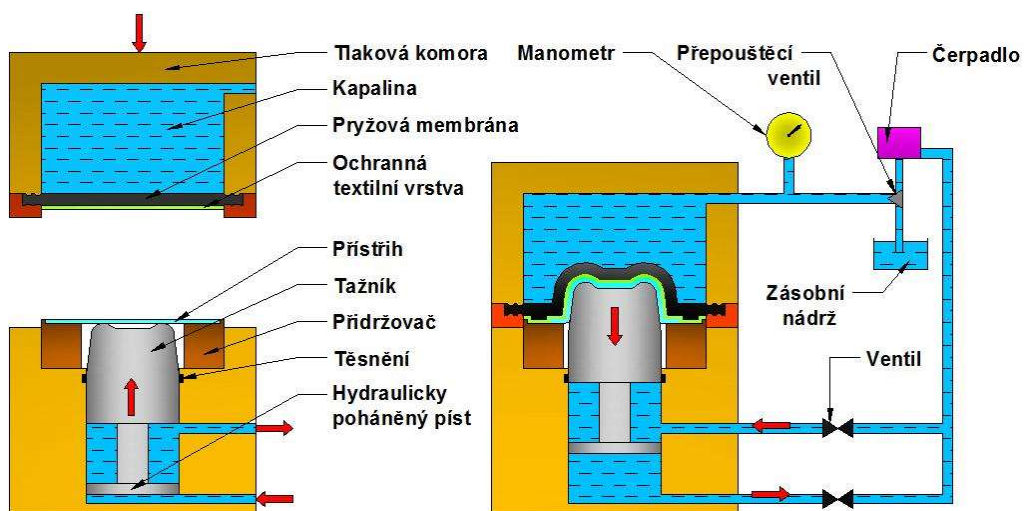
Mezi nekonvenční metody tažení patří [6, 7, 26]:

- 1) **Tváření pryží (metoda Guerin, Marform)** – metody využívající tažnici tvořenou pryží, kterou není potřeba nijak tvarovat. Možnost tvářit i více součástí během jednoho zdvihu lisu. Metoda Marform se od metody Guerin liší tím, že je zde použit přídavný přidržovač. Metodu Marform lze vidět na obr 2.19.



*Obr. 2.19 Příklad tažení metodou Marform [26]*

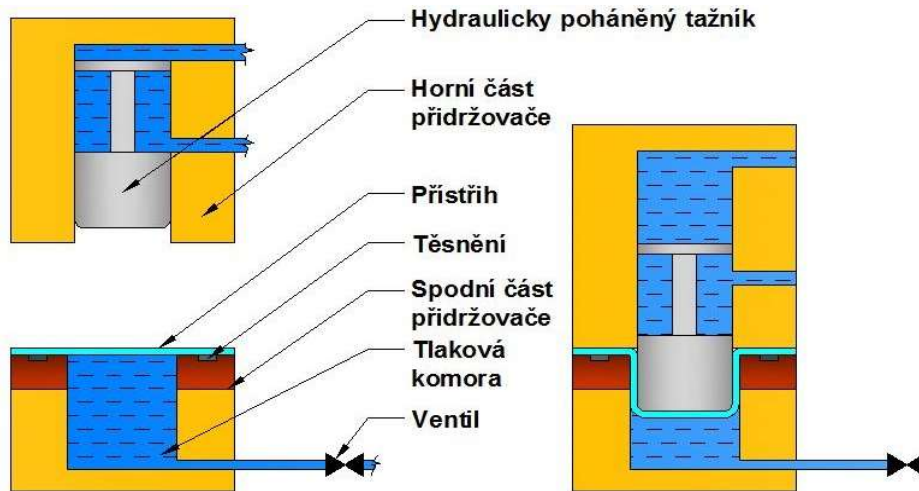
- 2) **Hydroformování** – použití kapalinového tlaku, kde tato technologie umožňuje formovat složitější tvary bez nutnosti komplexních nástrojů. Metodu Hydroform popisuje obr. 2.20.



*Obr. 2.20 Tažení kapalinou – metoda Hydroform [26]*

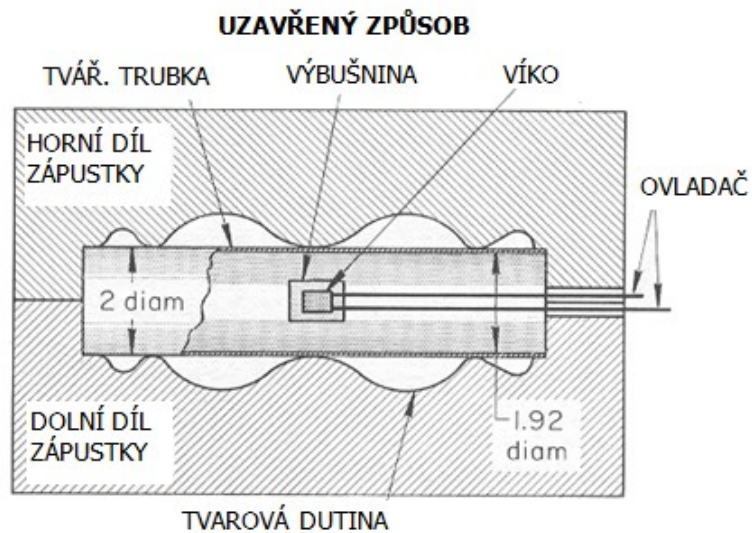


- 3) **Hydromechanické tažení** – kombinace mechanického a kapalinového tlaku, možnost formování složitých tvarů. Metoda hydromechanického tažení je popsána na obr. 2.21.



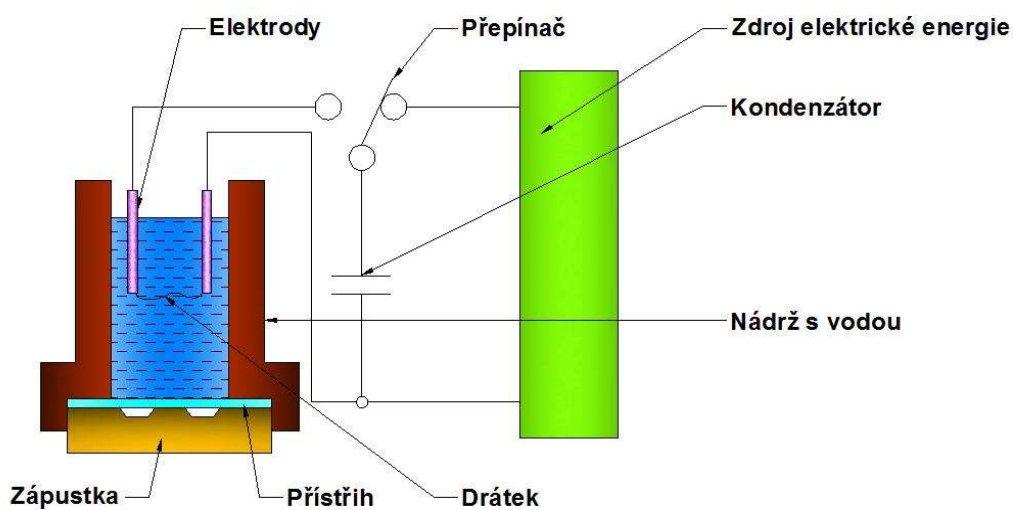
*Obr. 2.21 Hydromechanické tažení [26]*

- 4) **Explozivní formování** – využití výbuchu pro rychlé a intenzivní formování kovů, vhodné pro robustní aplikace. Jedná se o jednoduché tažení, které lze provést na jednu operaci. Metodu explozivního tváření lze nalézt na obr. 2.22.



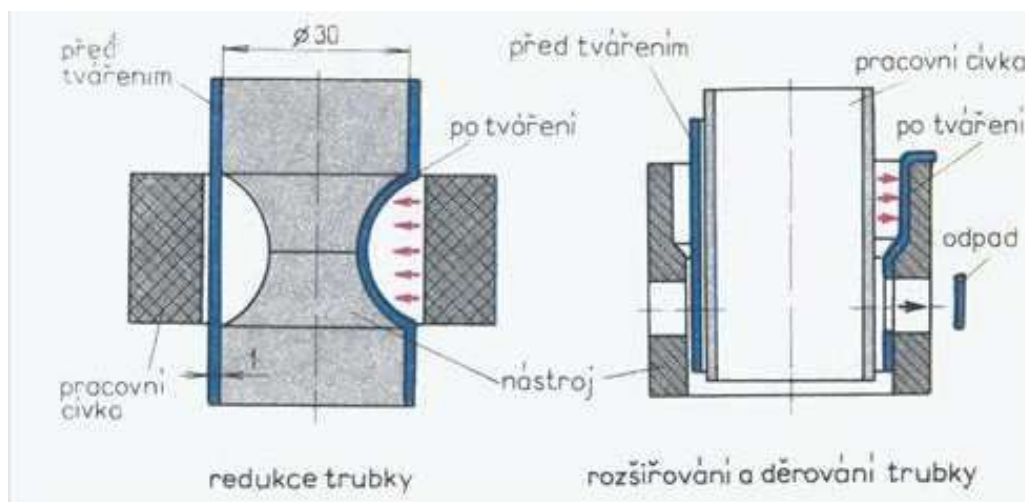
*Obr. 2.22 Tváření výbuchem [26]*

- 5) **Elektrohydraulické formování** – princip technologie je založen na elektrickém výboji, který se šíří kapalným prostředím. Vzniká zde tlaková vlna, která je vyvolána vybitím nahromaděné energie z kondenzátoru přes jiskřiště mezi elektrody, viz obr. 2.23.



*Obr. 2.23 Elektrohydraulické formování [26]*

- 6) **Elektromagnetické formování** – použití magnetického pole k rychlému a efektivnímu tvarování kovů bez fyzického kontaktu nástroje. Princip založený na účinku silného magnetického pole, viz obr. 2.24.



*Obr. 2.24 Elektromagnetické formování [26]*

### 2.2.3 Využití přídržovače, tažné hrany a brzdící lišty při tažení

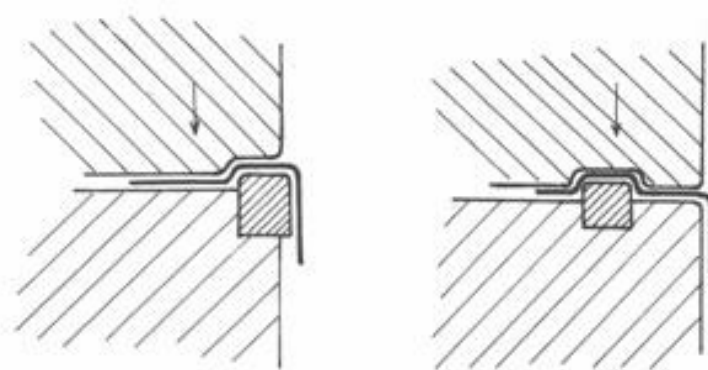
Při tažení kovů se používá přídržovač, tažná hrana a brzdící lišta z několika důvodů, které jsou popsány níže.

Funkce přídržovače, na který zpravidla působí kontaktní tlak, se používá za účelem zabránění vzniku vln, bohužel však kolikrát za cenu pěchování materiálu pod přídržovačem a růstu tloušťky [7].

Tažná hrana je část tažného nástroje, která při tažení tvaruje kov tak, aby získal požadovaný tvar. Tažná hrana pomáhá řídit tok materiálu a zajišťuje, že se kov tažením deformuje rovnoměrně. Tímto způsobem se zabráňuje tvorbě vrásek nebo trhlin v materiálu, které by mohly vést k vadám na výsledném produktu. Tažná hrana bývá vložkována, což umožňuje snadnou výměnu opotřebovaných hran i změnu tvaru [6].

Brzdící lišta je používána ke kontrole rychlosti a tlaku, s jakým materiál vstupuje do tažné formy nebo projde tažnou hranou. Působením odporu pomáhá brzdící lišta udržovat rovnoměrné tažení materiálu, což je klíčové pro dosažení výsledné kvality výtažku. Brzdící lišta také pomáhá redukovat napětí v materiálu během tažení, což je důležité pro minimalizaci rizika poškození materiálu [6].

Schématické znázornění tažné hrany a brzdící lišty je zachyceno na obr. 2.25.



**Obr. 2.25** Schématické znázornění tažné hrany vlevo a brzdící lišty vpravo [7]

## 2.3 Tribologie a tribologické procesy při hlubokém tažení

Tribologie je věda zabývající se technologií interagujících povrchů v pohybu, a to za působení maziv, ale i bez nich [6].

Jeden z hlavních parametrů tribologie je koeficient tření, který vyjadřuje poměr mezi silou tření  $F_T$  působící mezi dvěma povrchy a normálovou silou  $F_N$  aplikovanou na tyto povrchy [6].

Lze vyjádřit pomocí vzorce (2.1):

$$f = \frac{F_T}{F_N}, \text{ někdy značeno } \mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (2.1)$$

kde značí:  $f, \mu$  – koeficient tření [-],  $F_T$  – třecí síla [N],  $F_N$  – normálová síla [N].

Tento poměr je klíčový pro návrh a analýzu jakéhokoliv systému, který zahrnuje kontakt a pohyb mezi těmito povrchy, protože ovlivňuje množství energie potřebné pro pohyb objektů a míru opotřebení, kterému jsou povrchy vystaveny [6].

Všeobecně určením koeficientu tření nám umožňuje optimalizovat materiály a design pro snížení tření a opotřebení. To vede k delší životnosti strojních dílů a menším provozním nákladům [6].

Například u hydrodynamického mazání, je koeficient tření optimalizován na maximum. Tento koeficient hraje důležitou roli při určování účinnosti mazacího filmu mezi pohybujícími se povrchy. Nízké koeficienty tření znamenají, že mazací film efektivně redukuje třecí síly, což je žádoucí ve většině inženýrských aplikací, kde se snažíme o minimalizaci ztrát energie způsobeným třením [6].

Optimalizace koeficientu tření pro tvářecí procesy má zásadní význam, protože přímo ovlivňuje množství energie potřebné k provádění procesu a kvalitě povrchu výrobku, či nástrojovou výdrž. Výsledkem optimalizace je dosažení optimálních výrobních podmínek [8].

Shrnutí lze vyjádřit tak, že tribologie je disciplína zabývající se studiem tření, opotřebení a mazání interagujících povrchů v pohybu. V rámci této vědy jsou zkoumány třecí aspekty a obecně procesy opotřebení. Cílem tribologie je snížení negativních dopadů těchto jevů prostřednictvím návrhu a výběru vhodných materiálů, aplikace povrchových úprav a implementace mazacích systémů [9].

### **Tribologické procesy vyjádřeny v bodech [9, 10]:**

- **Tření** – je studium síly odporu, které se vyskytuje při relativním pohybu dvou povrchů. Tření může být žádoucí (např. brždění vozidla) nebo nežádoucí (např. ztráta energie a opotřebení materiálu).
- **Opotřebení** – je studium ztráty materiálu z povrchů, které jsou v kontaktu a pohybují se vůči sobě. Opotřebení může vést k degradaci funkčních vlastností součástí a systémů.
- **Mazání** – je studium chování tekutin (maziv) mezi povrchy, které jsou v kontaktu. Cílem je snížit tření a opotřebení. Maziva mohou být kapalná, tuhá nebo ve formě plynů.
- **Všeobecně kontaktní procesy**

#### **2.3.1 Druhy tření**

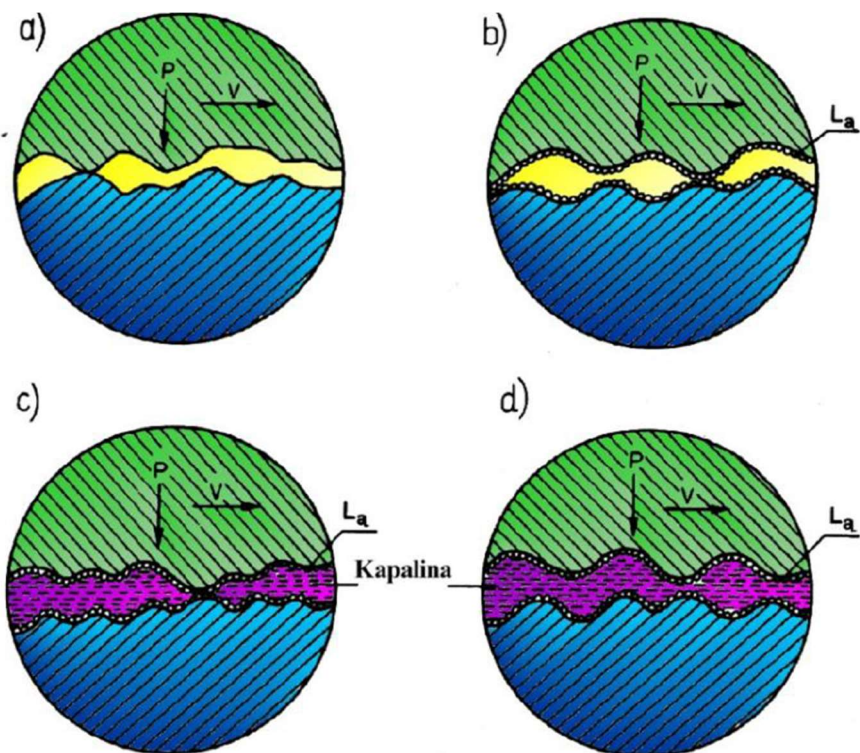
V oblasti tribologie se rozlišují různé druhy tření, které se vyznačují specifickými charakteristikami a aplikacemi v závislosti na konkrétních podmínkách. Tyto podmínky zahrnují použití maziv, viskozitu maziva, rychlost pohybu a zatížení mezi povrchy, které jsou v relativním pohybu [10, 11].

**Druhy tření, které jsou zobrazeny na obr. 2.26 a obr. 2.27 se dělí do následujících kategorií [10, 11]:**

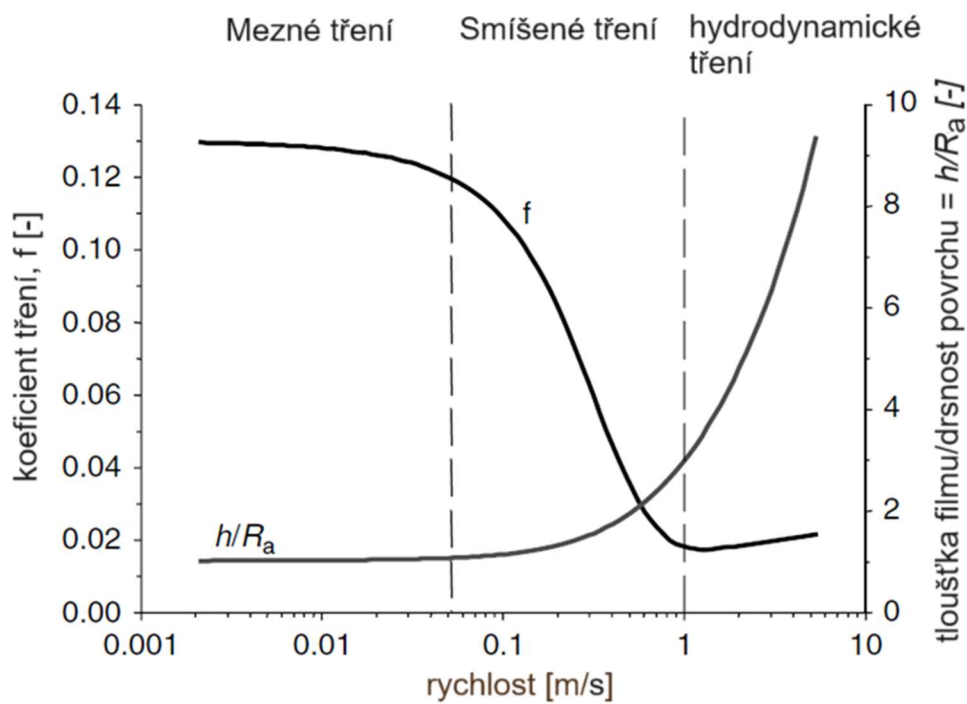
**1) Vnější tření** – působí na dotykových plochách látek.

- a) Suché tření** – jedná se o tření, které vzniká při styku interagujících ploch bez přítomnosti jakéhokoliv maziva. Vzniká tak, že se chybně nanese nebo opomene nanést mazadlo na tvářený materiál.
- b) Mezní tření** – je charakterizováno interagujícími povrchy, kde dochází k fyzickému kontaktu.
- c) Smíšené tření** – představuje mezilehlý režim mezi hydrodynamickým mazáním a hraničním mazáním, kdy část zatížení nese hydrodynamický film a zbývající část nesou interagující povrchy.
- d) Hydrodynamické tření, též kapalinové** – jedná se o situaci, kdy mezi interagujícími povrchy nedochází k fyzickému kontaktu. Rychlostní rozdíl mezi povrchy je kompenzován stříhem v mazivovém filmu, což vede k relativně nízkým třecím silám, a následně k nízkému koeficientu tření. Typicky kolem hodnoty  $f = 0,01$ .

**2) Vnitřní tření** – vnitřní pohyb mezi stavebními částmi látek.



**Obr. 2.26** Schematické znázornění druhů tření: a) suché tření, b) mezné tření, c) smíšené tření, d) hydrodynamické tření [10]



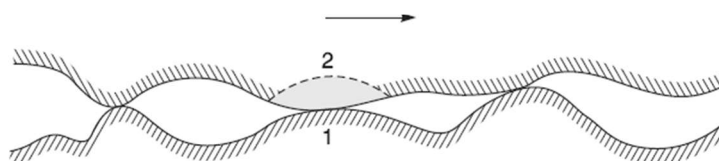
**Obr. 2.27** Striebeckův diagram – schematické znázornění druhu tření v závislosti na koeficientu tření, tlaku a rychlosti mezi povrchy dvou interagujících těles [11]

### 2.3.2 Druhy opotřebení vyskytující se při procesech tažení

Tribologie zahrnuje různé druhy opotřebení, které mohou mít mechanické nebo chemické příčiny a jsou obvykle urychleny třecím teplem. Hlavní typy opotřebení zahrnují následující mechanismy [9]:

#### Adhezivní opotřebení

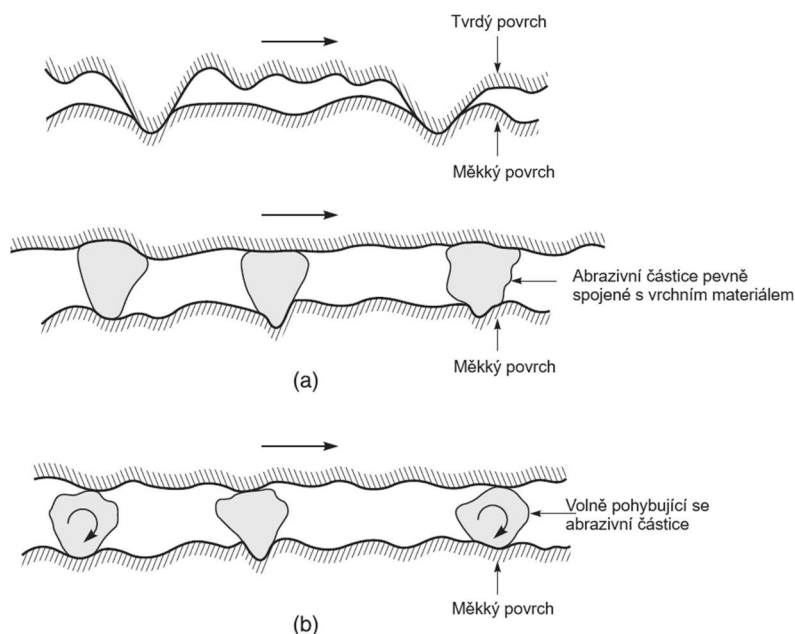
Vzniká v důsledku adheze na kontaktních plochách, což může vést k oddělení fragmentů z jedné povrchové vrstvy na druhou. Adhezivní opotřebení je zobrazeno na obr. 2.28.



**Obr. 2.28** Schematický obrázek naznačující opotřebení vlivem adheze [9]

#### Abrazivní opotřebení

Je způsobeno drsným, tvrdým povrchem nebo tvrdými částicemi, které poškozují interagující povrch plasticou deformací nebo lámáním v případě křehkých materiálů. Abrazivní opotřebení je zobrazeno na obr. 2.29.



**Obr. 2.29** Schématický obrázek naznačující opotřebení vlivem abraze, (a) dva interagující materiály s pevně uloženými abrazivními částicemi, tvrdý materiál (nahore) a měkký materiál (dole), (b) dva materiály s volně pohybujícími se abrazivními částicemi [9]

### 2.3.3 Další příklady druhů opotřebení

Mezi další příklady druhů opotřebení, které mohou v tribologii, nastat řadíme [9]:

#### Únavové opotřebení

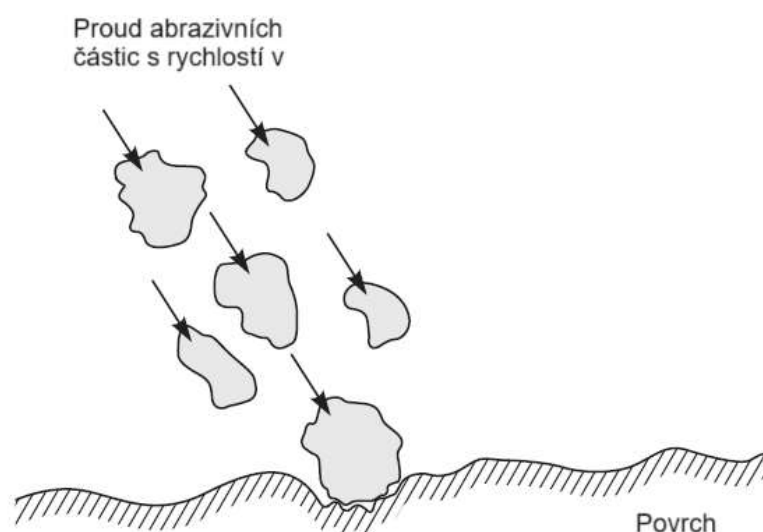
Dochází, když materiál podléhá opakovanému zatížení, což vede k postupné ztrátě materiálu z povrchu. Tento typ opotřebení může nastat u tvářecích nástrojů, ložisek apod. Příklad únavového opotřebení znázorňuje obr. 2.30.



*Obr. 2.30 Příklad únavového opotřebení u kuličkového ložiska [9]*

#### Nárazové a erozní opotřebení

Je způsobeno impaktem částic, kapalin nebo bublin v proudu, které nárazem postupně odstraňují materiál z povrchu. Schematicky znázorňuje obr. 2.31.



*Obr. 2.31 Příklad nárazového opotřebení způsobeným impaktem částic o rychlosti v [9]*



## Chemické (korozivní) opotřebení

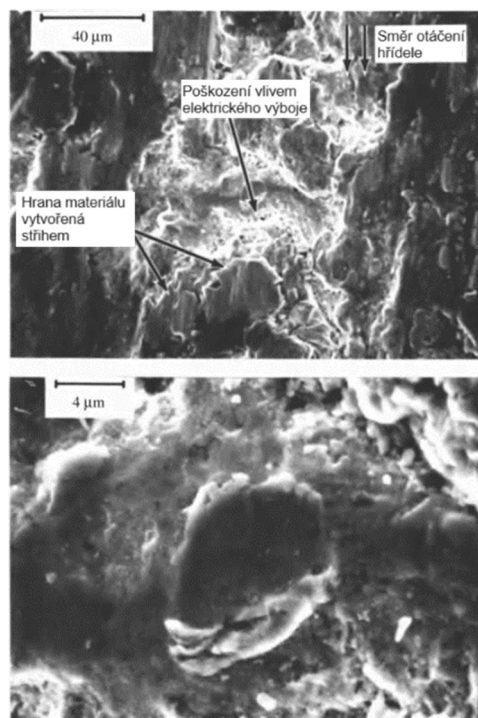
Nastává, když dochází k interakci v korozivním prostředí, což zahrnuje chemickou reakci mezi povrchem a okolím. Příklad je znázorněn na obr. 2.32.



*Obr. 2.32 Příklad korozivního opotřebení [9]*

## Opotřebení způsobené elektrickým výbojem

Nastává v případě vysokého potenciálu mezi povrchy, které se pohybují naproti sobě. Tento jev způsobuje rychlé zahřátí a ochlazení, což má za následek fyzické poškození materiálu. Elektrický výboj působí na materiály po velmi krátkou dobu, zpravidla 100  $\mu$ s. Příklad tohoto opotřebení je znázorněn na obr. 2.33.



*Obr. 2.33 Příklad opotřebení způsobené elektrickým výbojem [9]*

### 2.3.4 Maziva používaná pro účely plošného tváření

Maziva v plošném tváření hrají klíčovou roli při snižování tření a opotřebení nástrojů, a tím zvyšují kvalitu a přesnost výsledných dílů. Jsou nezbytná pro zajištění dostatečného mazacího filmu mezi nástrojem a tvářeným plechem, čímž se zabraňuje přímému kontaktu kov na kov, což by mohlo vést k poškrábání nebo přilnutí materiálu k nástroji [6].

#### 1. Kapalná maziva:

- a. **Minerální oleje:** Tato maziva se často používají pro jejich schopnost snižovat tření a opotřebení. Jsou vhodná pro různé druhy tvářecích operací, a to včetně hlubokého tažení.
- b. **Syntetické oleje:** Syntetické oleje nabízí vylepšené vlastnosti v extrémních podmínkách, jako jsou vysoké teploty nebo silné zatížení, a jsou často používány tam, kde nelze použít minerální oleje.
- c. **Emulze:** Olej ve vodní emulzi je běžně používán, zejména kde je potřeba během formování chlazení, jako například při tváření hliníku a nerezové oceli.

#### 2. Plynná maziva:

- a. **Dusík a argon:** Tyto plyny jsou používány pro svou inertnost při vysoce specializovaných procesech, jako je třeba tváření materiálů, které jsou citlivé na oxidaci. Nicméně ve standardních procesech hlubokého tažení nejsou obvykle používány jako maziva.

#### 3. Plastická maziva (tuky):

- a. **Tuky na bázi mastných kyselin (lithiové tuky):** Tyto tuky jsou vhodné pro aplikace, kde jsou požadavky na mazání méně náročné a kde se vyžaduje dobrá přilnavost maziva, například při nízkých rychlostech a vysokých tlacích.

#### 4. Tuhá maziva:

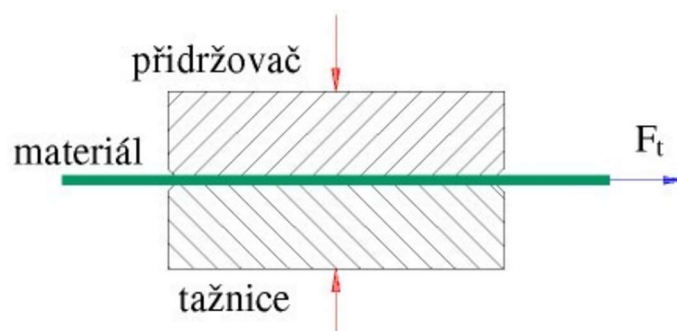
- a. **Grafit a molybden disulfid (MoS<sub>2</sub>):** Tyto materiály jsou používány jako tuhá maziva ve formách prášku nebo pasty, často v aplikacích, kde jsou požadavky na odolnost proti vysokým teplotám a tlakům, jako je tváření odolných kovů v extrémních podmínkách.

### 2.3.5 Metody zjišťování koeficientu tření pro hlubokotažné materiály používané v automobilovém průmyslu

#### Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí

Modelové schéma tření mezi přidržovačem a tažnicí je jeden z nejrozšířenějších testů. Principem je protahování pásky testovaného materiálu skrz zkušební čelisti, viz obr. 2.34. Výhodou tohoto testu je, že lze jednoduše nastavit podmínky (rychlost protahování pásky, velikost kontaktního tlaku a tím i síly  $F_N$ ) a snadno měřit třecí sílu  $F_t$ . U této metody jde snadno vypočítat koeficient tření, který se vypočte z hodnot  $F_t$  a  $F_N$ .

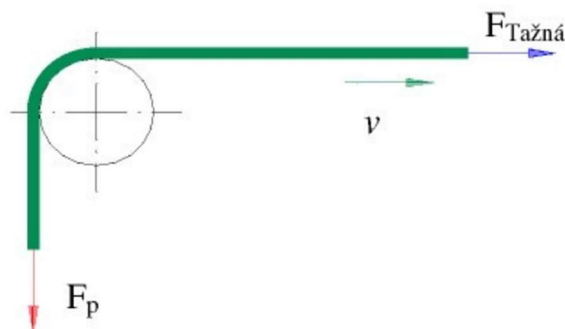
Nevýhodou tohoto testu je, že napjatost testovaného materiálu při zkoušce neodpovídá skutečné napjatosti materiálu pod přidržovačem a v průběhu zkoušky nedochází k výrazné plastické deformaci, tak jako u reálného tváření tažením [12].



*Obr. 2.34 Schéma modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí [12]*

#### Modelování tření na tažné hraně

Modelování tření na tažné hraně je další používanou metodou k zjištění tribologického chování materiálů, kde principem tohoto testu je tažení zkušební vzorku přes tažnou hranu tažnice. Tažná hrana je zde znázorněna válečkem o zvoleném poloměru  $R$ , přes kterou je vzorek tažen konstantní rychlostí a tažnou silou  $F_{\text{tažná}}$ . Velikost tažné síly závisí na velikosti protitahu brzdící síly  $F_p$ , délkou styku testovaného materiálu s tažnou hranou (tzv. úhlu opásání), koeficientem tření na tažné hraně a mechanickými vlastnostmi protahovaného vzorku. Metoda je zobrazena na obr. 2.35 [12].

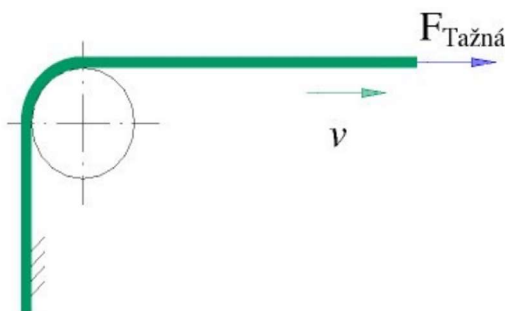


**Obr. 2.35** Schematické znázornění modelování tření na tažné hraně [12]

### Modelování vypínání přes tažnou hranu

Modelování vypínání přes tažnou hranu je principem založené na tažení vzorku přes tažnou hranu ve tvaru válečku o poloměru  $R$  stejně jako u předchozí metody tření na tažné hraně. Rozdílem je, že zkušební vzorek je na jedné straně pevně uchycen a na druhé straně se pohybuje rychlostí  $v$ . Kritériem pro vyhodnocení zkoušky je síla  $F_{\text{Tažná}}$  potřebná pro vytvoření předem zvolené deformace testovaného vzorku. Deformace je podobná té, která nastává při hlubokém tažení na čele tažníku.

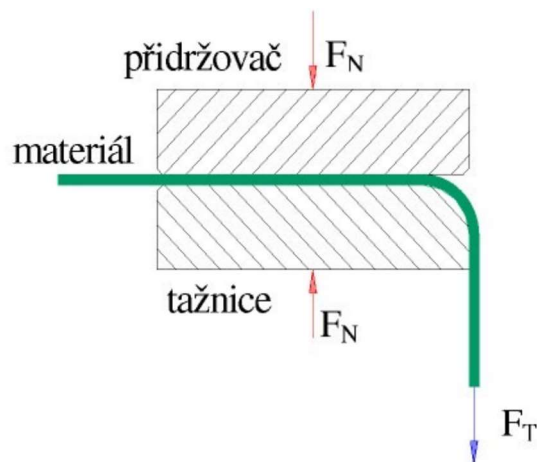
Nevýhodou této zkoušky je, že lze jen obtížně nastavit kontaktní tlak a kluznou rychlost na tažné hraně. Schematicky znázorněno na obr. 2.36 [12].



**Obr. 2.36** Schematické znázornění modelování vypínání přes tažnou hranu [12]

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

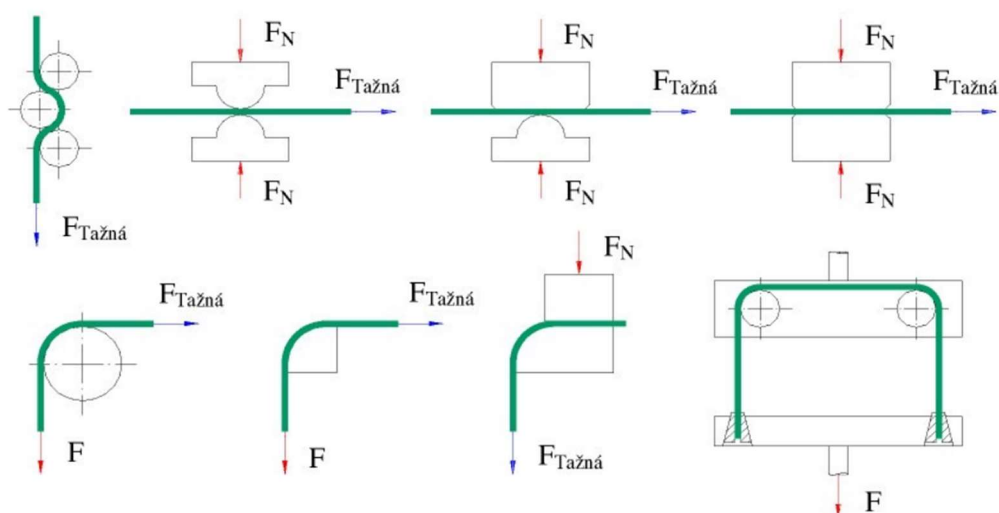
Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou spočívá tažením pásku přes čelisti tažnice a přidržovače. Vyhodnocuje se zde velikost síly  $F_{\text{Tažná}}$  potřebné pro protažení pásku. Jedná se o princip, který se využívá na Technické Univerzitě v Liberci a pro tento způsob byl vypracován experiment, který lze nalézt v experimentální části této práce. Metodu lze vidět na obr. 2.37 [12].



**Obr. 2.37** Schematické znázornění modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou [12]

### Další tribologické zkoušky plechů

V současné době existuje řada laboratorních metod pro hodnocení tribologických vlastností materiálů. Tyto metody umožňují testovat specifické charakteristiky, avšak výsledky tribologických zkoušek nelze vzájemně porovnávat. To je způsobeno rozdílnými technologickými podmínkami, za kterých jednotlivé zkoušky probíhají. Další druhy tribologických zkoušek jsou znázorněny na obr. 2.38 [12].

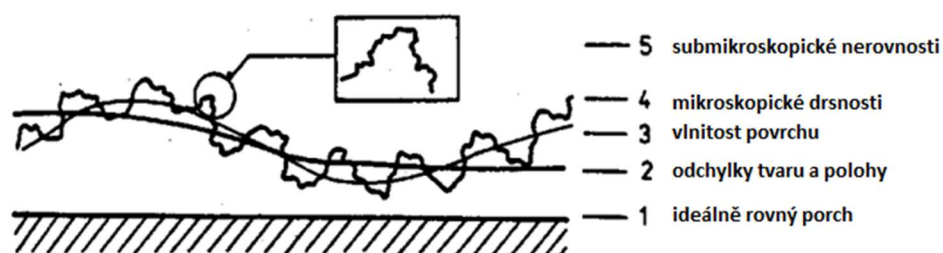


**Obr. 2.38** Ukázka dalších tribologických zkoušek plechů [12]

## 2.4 Geometrické vlastnosti povrchů materiálů (drsnost materiálu)

Drsnost povrchu materiálu představuje další z klíčových vlastností, kterou se tribologie zabývá, neboť má významný vliv na následné výrobní operace. Nepříznivá geometrie povrchu může způsobit zvýšení výrobních nákladů. Proto je před zahájením výrobních procesů, jako je tváření, nezbytné dosáhnout co nejnižší drsnosti povrchu, avšak bez nadměrných nákladů. Drsnost povrchu je považována za jeden z nejdůležitějších parametrů v tribologii [9, 12].

Níže na obr. 2.39 je schématické znázornění geometrie povrchu v řezu.



*Obr. 2.39 Znázornění geometrie povrchu v řezu [13]*

Přestože by bylo ideální z hlediska morfologie vytvořit dokonale hladký povrch, současné technologické možnosti to nedovolují. Nejlepší dostupnou technologií pro získání velmi hladkého povrchu, kterou využíváme, je válcování s použitím texturovaných válců [12].

### **Metody texturování válců [12]:**

- a) **Metoda SBT** – Mechanické otrýskávání jemnozrnným granulátem (Shot Blasting Texturing)
- b) **Metoda EDT** – Matování prostřednictvím elektrojiskrového výboje (Electric Discharge Texturing)
- c) **Metoda LT** – Matování prostřednictvím laserového paprsku (Laser Texturing)
- d) **Metoda EBT** – Matování prostřednictvím elektronového paprsku (Electron Beam Texturing)
- e) **Metoda Pretex** – Matování prostřednictvím chromování válců (Preussag Texturing)

## 2.4.1 Druhy profilů povrchů – celková výška profilů

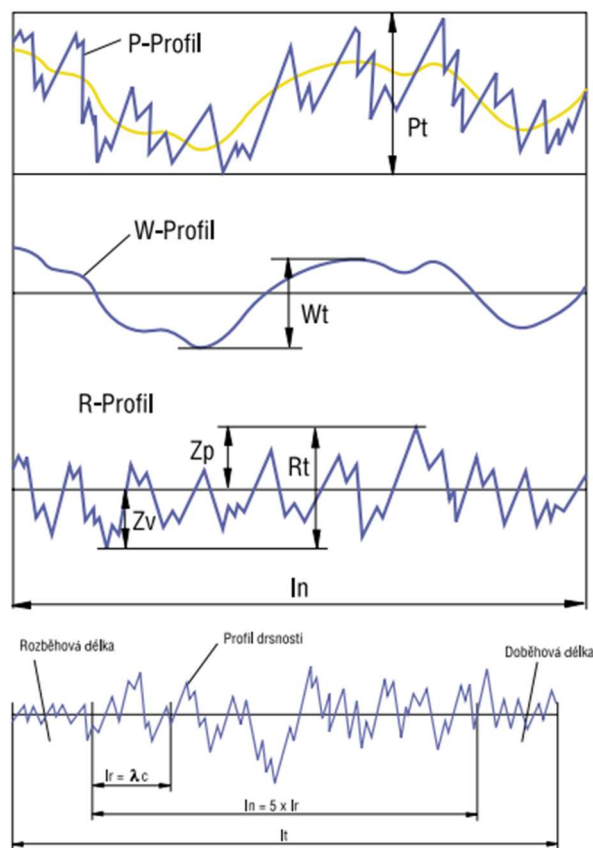
V praxi se často setkáváme s analýzou dvoudimenzionálních profilů, které reprezentují obrazy povrchů. Tyto profily jsou vyjádřeny prostřednictvím hodnot měřených veličin. Hloubka profilu ( $P_t$ ), hloubka vln ( $W_t$ ) a nejvyšší hloubka drsnosti ( $R_t$ ), jsou to hodnoty definovány normou DIN EN ISO 4287.

$P_t$  představuje nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného povrchu uvnitř měřené délky  $l_n$  a je významně závislý na této měřené délce. Slouží k vyhodnocování jednotlivých chyb povrchu.

$W_t$  označuje vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti uvnitř měřené délky  $l_n$ . Tento parametr se používá ke kontrole výrobního postupu, u kterého vlnitost představuje funkční kritérium  $R_t$ .

$R_t$  je vertikální vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším vrcholem R-profilu uvnitř měřené dráhy.

Druhy profilů povrchů jsou znázorněny na obr. 2.40 [6, 12, 14, 25].



**Obr. 2.40** Druhy profilů povrchů [14]

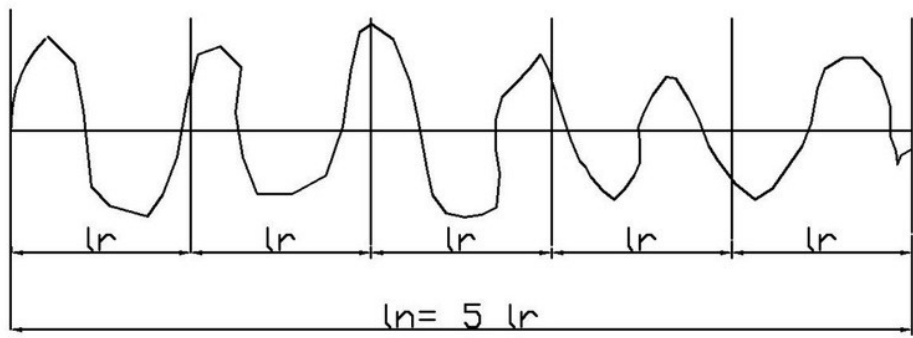
## 2.4.2 Vyhodnocovaná délka drsnosti

Jedním z parametrů měření drsnosti je vyhodnocovaná délka profilu  $l_n$ , neboli cut-off délka, která se skládá z 5 základních délek  $l_r$ . Cut-off délku lze nalézt na obr. 2.41.


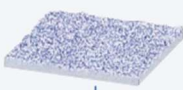
Jedná se o mezní vlnovou délku  $\lambda_c$ , kde cut-off hodnota by měla být specifikovaná na výkrese či výrobní dokumentaci [15, 16, 17].

Pokud není specifikovaná, musí se určit, zda se jedná o periodický či neperiodický profil a následně se odhadují hodnoty  $R_{sm}$ ,  $R_a$ ,  $R_z$  dle dané výrobní technologie.

Poté se provede kontrolní měření a po výsledném vyhodnocení hodnot se musí přístroj přenastavit dle tabulky na obr. 2.42, čím zajistíme přesné měření hodnot drsnosti [16].



Obr. 2.41 Vyhodnocovaná délka drsnosti [16]

Periodické profily např. soustružení, frézování	Měřicí podmínky Podle DIN EN ISO 4288:1998 a DIN EN ISO 3274:1998	Aperiodický povrch (broušení, vyjskřování)																																												
 ↓ Střední vzdálenost rýh elementů drsnosti	Mezní vlnová délka $\lambda_c$ (l) Základní délka $l_r$ Měřená délka $l_n$ Celková délka $l_t$ Rádus hrotu $r_{sp}$ Krátkovlnný filtr $\lambda_s$ (s)	 ↓ Aritmetická střední hodnota $R_a$ Maximální výška drsnosti profilu $R_z$																																												
$R_{Sm}$ (mm)	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\lambda_c = l_r</math> (mm)</th> <th><math>l_n</math> (mm)</th> <th><math>l_t</math> (mm)</th> <th><math>r_{sp}</math> (<math>\mu m</math>)</th> <th><math>\lambda_s</math> (<math>\mu m</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,08</td> <td>0,40</td> <td>0,48</td> <td>2</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>1,25</td> <td>1,5</td> <td>2</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>4,00</td> <td>4,80</td> <td>2 nebo 5*</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>2,5</td> <td>12,5</td> <td>15,00</td> <td>5</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>8,0</td> <td>40,00</td> <td>48,00</td> <td>10</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	$\lambda_c = l_r$ (mm)	$l_n$ (mm)	$l_t$ (mm)	$r_{sp}$ ( $\mu m$ )	$\lambda_s$ ( $\mu m$ )	0,08	0,40	0,48	2	2,5	0,25	1,25	1,5	2	2,5	0,8	4,00	4,80	2 nebo 5*	2,5	2,5	12,5	15,00	5	8	8,0	40,00	48,00	10	25	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>R_a</math> (<math>\mu m</math>)</th> <th><math>R_z</math> (<math>\mu m</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&gt; (0,006) ...0,02</td> <td>&gt; (0,025) ...0,01</td> </tr> <tr> <td>&gt; 0,04 ...0,13</td> <td>&gt; 0,1 ...0,5</td> </tr> <tr> <td>&gt; 0,13 ...0,4</td> <td>&gt; 0,5 ...10</td> </tr> <tr> <td>&gt; 0,4 ...1,3</td> <td>&gt; 2,00 ...10,0</td> </tr> <tr> <td>&gt; 1,3 ...4,0</td> <td>&gt; 10 ...50</td> </tr> <tr> <td></td> <td>&gt; 50 ...200</td> </tr> </tbody> </table>	$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_z$ ( $\mu m$ )	> (0,006) ...0,02	> (0,025) ...0,01	> 0,04 ...0,13	> 0,1 ...0,5	> 0,13 ...0,4	> 0,5 ...10	> 0,4 ...1,3	> 2,00 ...10,0	> 1,3 ...4,0	> 10 ...50		> 50 ...200
$\lambda_c = l_r$ (mm)	$l_n$ (mm)	$l_t$ (mm)	$r_{sp}$ ( $\mu m$ )	$\lambda_s$ ( $\mu m$ )																																										
0,08	0,40	0,48	2	2,5																																										
0,25	1,25	1,5	2	2,5																																										
0,8	4,00	4,80	2 nebo 5*	2,5																																										
2,5	12,5	15,00	5	8																																										
8,0	40,00	48,00	10	25																																										
$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_z$ ( $\mu m$ )																																													
> (0,006) ...0,02	> (0,025) ...0,01																																													
> 0,04 ...0,13	> 0,1 ...0,5																																													
> 0,13 ...0,4	> 0,5 ...10																																													
> 0,4 ...1,3	> 2,00 ...10,0																																													
> 1,3 ...4,0	> 10 ...50																																													
	> 50 ...200																																													

Obr. 2.42 Způsob stanovení cut-off délky [14]



### 2.4.3 Pravidlo 16 % a maximální hodnoty

Jedná se o jednoduché pravidlo, které umožňuje stanovit, zda je povrch materiálu v akceptovatelném stavu. Toto pravidlo, známé jako pravidlo 16 %, se používá v případech, kdy parametr drsnosti není označen s dodatkem „max“. Podle tohoto pravidla je povrch považován za dobrý, pokud naměřené hodnoty jedné veličiny nepřekročí 16 % naměřených hodnot [14].

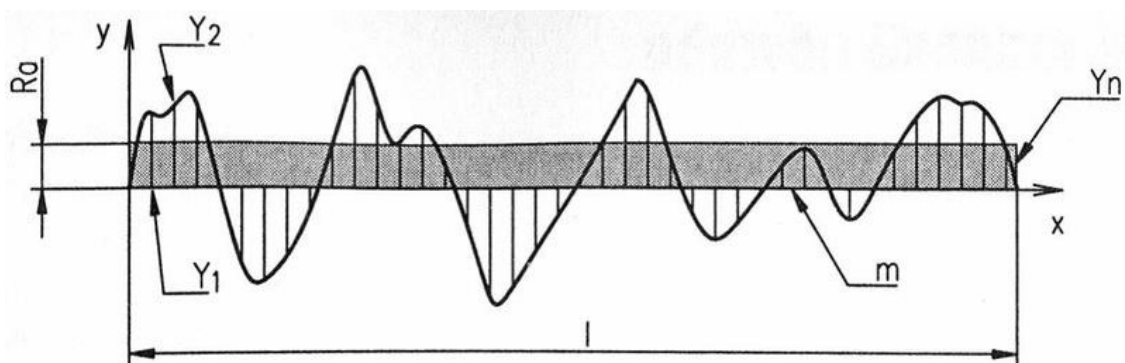
### 2.4.4 Popis vyhodnocovaných parametrů drsnosti

#### Ra – střední aritmetická hodnota drsnosti

Jedna z nejdůležitějších a nejobvyklejších hodnot při měření drsnosti je střední aritmetická hodnota, která je popsána normou DIN EN ISO 4287. Jedná se o aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky  $l_n$  (na obr. 2.43 je znázorněno jako  $l$ ).

Parametr  $R_a$  nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilů a hloubky rýh profilů.

Je to hodnota, která je vhodná pro řízení a regulaci výrobních procesů. Změní-li se hodnota  $R_a$ , je to zpravidla výsledkem změny podmínek výrobního procesu [17, 18, 19].



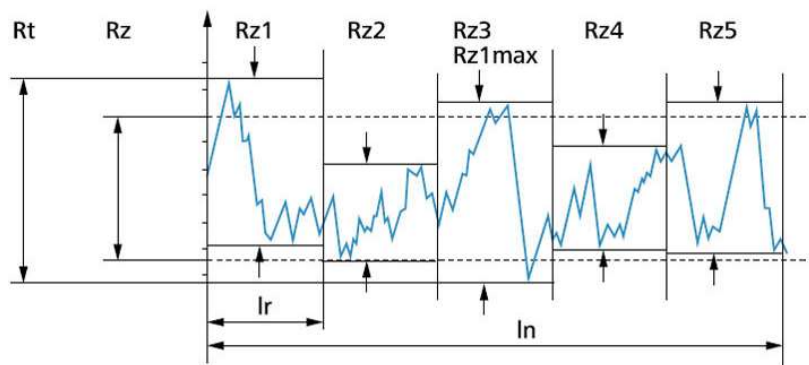
**Obr. 2.43** Ukázka střední aritmetické hodnoty drsnosti  $R_a$  [19]

## Rz – střední hloubka drsnosti

Střední hloubka drsnosti je složena ze součtu výšek nejvyšších a nejnižších profilů na jednotlivých dráhách  $l_r$ . Tento parametr lze vidět na obr. 2.44. Hodnota Rz není citlivá na rušivé vlivy na povrchu jako jsou prach, otřepy, či rýhy, což má řadu výhod pro hodnocení kvality povrchu.

Parametr  $Rz1_{max}$  je definován jako vzdálenost mezi největším výstupkem a nejmenší prohlubní.

$R_t$  je celková výška profilu drsnosti, jedná se o vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu na měřené délce  $l_n$  [18, 20, 21].



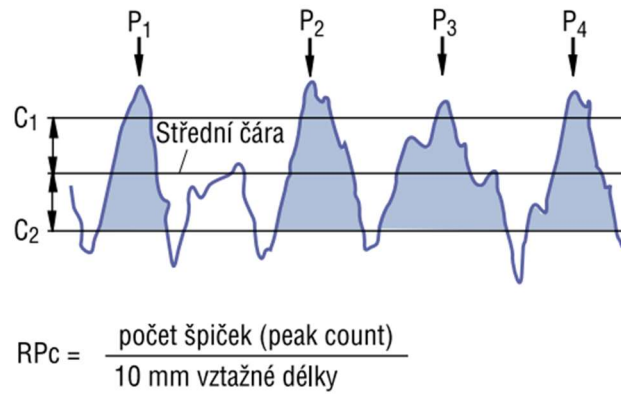
Obr. 2.44 Ukázka střední hloubky drsnosti Rz [14]

## RPc – počet výstupků

Parametr  $RP_c$  charakterizuje počet místních výstupků umístěných v určitém pásmu kolem referenční střední čáry. Výsledky tohoto měření jsou vyjádřeny jako počet výstupků na každých 10 mm nebo na palec délky. Je doporučeno provádět měření na co možná nejdelším úseku. Referenční čára může být nastavena na určitou hloubku, buď vzhledem k nejvyššímu bodu výstupku, nebo ke zvolené vzdálenosti na obě strany střední čáry. Pro vyhodnocení parametru  $RP_c$  je nezbytné specifikovat úroveň řezu  $C_1$  (horní hladina) a  $C_2$  (spodní hladina) [18, 24].

Tento parametr lze v automobilovém průmyslu využít pro posuzování efektu „pomerančové kůry“ na povrchu nátěrů způsobenými výstupky, či pnutí různých nátěrů [18, 25].

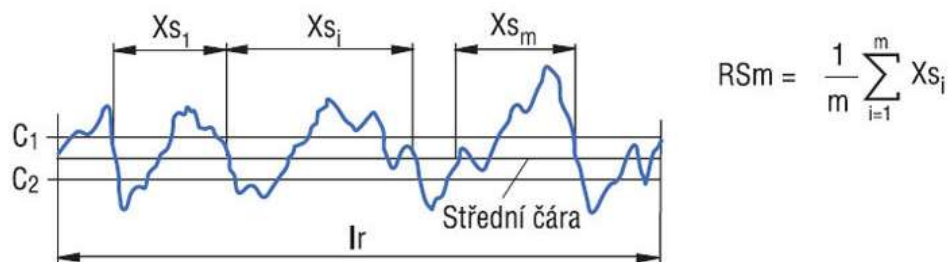
Parametr  $RP_c$  je znázorněn na obr. 2.45.



**Obr. 2.45** Ukázka parametru hodnocení počtu výstupků  $RPC$  [14]

### **RSm – střední vzdálenost rýh**

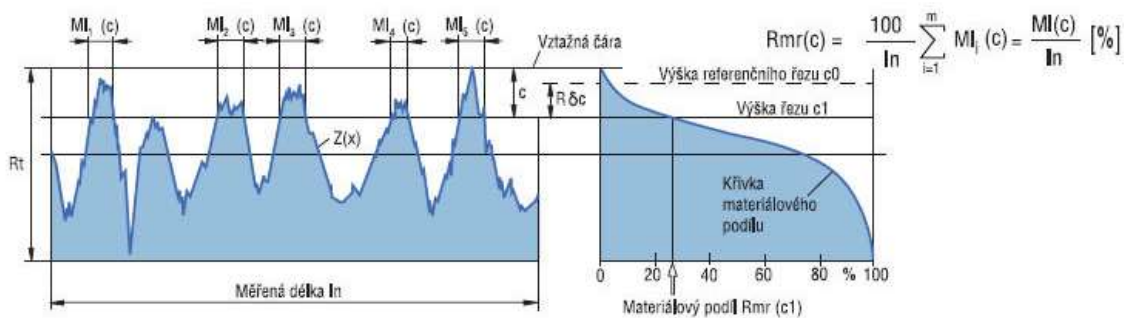
Podle normy DIN EN ISO 4287 je  $RSm$  definován jako aritmetická střední hodnota šířek nerovností profilových elementů profilu drsnosti v rámci vyhodnocované délky  $l_r$ . Vyhodnocení této veličiny vyžaduje zadání hladin řezu  $C_1$  a  $C_2$ , které určují výškové hranice pro měření nerovností na profilu. Parametr  $RSm$  je znázorněn na obr. 2.46 [14].



**Obr. 2.46** Ukázka parametru střední vzdálenosti rýh  $RSm$  [14]

### **Rmr – materiálový podíl drsnosti profilu**

Parametr  $Rmr$ , známý jako materiálový podíl drsnosti profilu, je vyjádřen jako procentuální poměr délky zaplněné materiálem k celkové délce  $l_n$  ve specifikované hladině řezu  $C$ . Tento ukazatel reprezentuje část povrchu, která je tvořena materiálem, v poměru k celkové měřené délce v dané hladině. Parametr  $Rmr$  je znázorněn na obr. 2.47 [14].



**Obr. 2.47** Ukázka parametru materiálového podílu drsnosti profilu  $Rmr$  [14]

## 2.5 Statická zkouška tahem

Tahová zkouška, řídicí se normou ČSN EN ISO 6892-1, se obvykle provádí na normalizovaných zkušebních těliscích. Jedná se o jednu z nezákladnějších metod, jak získat přehled o základních mechanických vlastnostech materiálů.

Dle zmíněné normy, podle níž se tahová zkouška provádí, by teplota v místnosti měla být v rozmezí od 10 °C do 35 °C. V případě zkoušek prováděných za řízených podmínek bychom pak měli teplotu udržovat na úrovni 23 °C s tolerancí  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Principem měření spočívá v zatěžování zkušebního tělesa tahovou silou, až do porušení tohoto tělíska. Během zkoušky je zaznamenáván nárůst délky zkoušeného tělíska (prodloužení) v reakci na aplikovanou tahovou sílu. [22].

## 2.5.1 Smluvní a skutečný diagram napětí

### Smluvní diagram napětí

Smluvní diagram napětí (obr. 2.48) poskytuje základní metodu pro hodnocení mechanických vlastností materiálů, je vhodný pro přibližné hodnocení a umožňuje snadné porovnání různých materiálů. Tento diagram je složen ze smluvního napětí a poměrného prodloužení, kde smluvní napětí ( $R$ ) se vypočítává jako poměr aplikované síly  $F$  k počátečnímu průřezu zkoušeného tělíska  $S_0$  [22, 23, 24].

Tento vztah je vyjádřen rovnicí (2.2):

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (2.2)$$

kde značí:  $R$  – smluvní napětí [MPa],  $F$  – tažná síla [N],  $S_0$  – počáteční průřez zkušebního tělíska [mm<sup>2</sup>].

Poměrné prodloužení ( $\varepsilon$ ) je definováno jako poměr změny délky  $\Delta L$  k původní délce tělíska  $L_0$  [22, 23, 24].

Tento vztah je vyjádřen rovnicí (2.3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.3)$$

kde značí:  $\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-],  $\Delta L$  – změna délky zkušebního tělíska [mm],  $L_0$  – původní délka zkušebního tělíska [mm].

### Skutečný diagram napětí

Skutečný diagram napětí (obr. 2.48), známý také jako pravý diagram napětí, poskytuje realističtější zobrazení mechanických vlastností materiálu, protože zohledňuje změny průřezové plochy tělíska během zkoušky [24].

V tomto diagramu se napětí  $\sigma$  vypočítává jako poměr aktuálně působící síly  $F$  k aktuální průřezové ploše  $S$  tělíska v daném okamžiku zkoušky [24].

Rovnice (2.4) pro skutečné napětí je:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2.4)$$

kde značí:  $\sigma$  – skutečné napětí [MPa],  $F$  – tažná síla [N],  $S$  – aktuální průřezová plocha zkušebního tělíska [mm<sup>2</sup>].

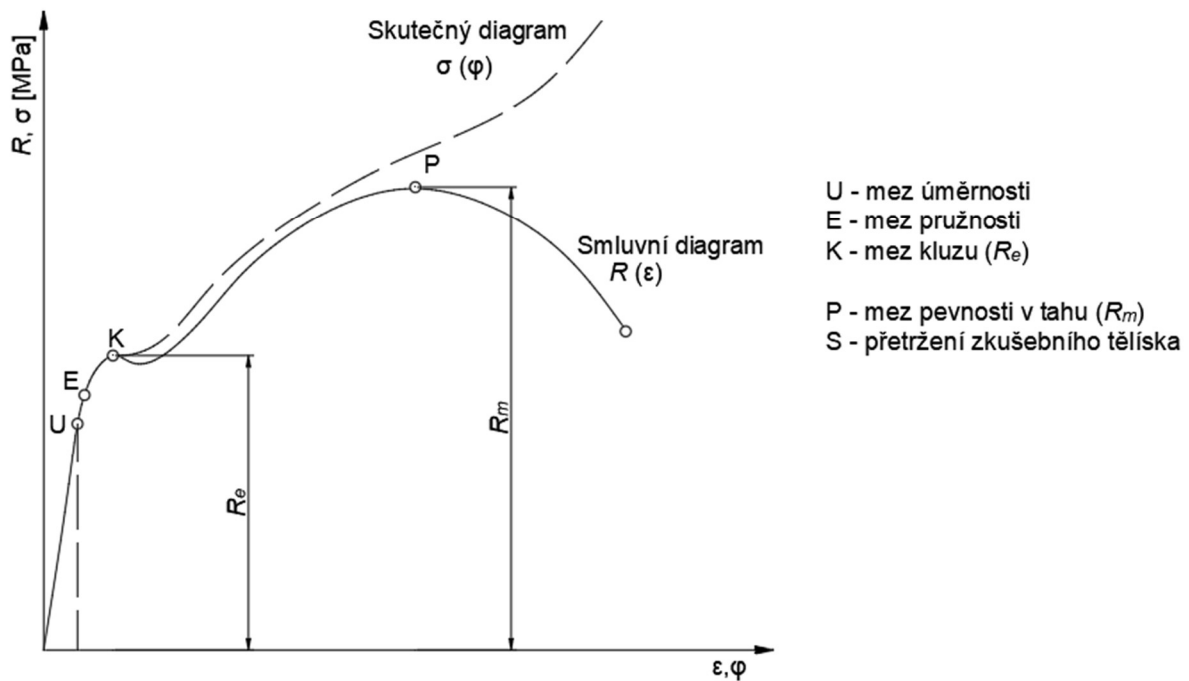
Skutečná deformace  $\varphi$ , která se také nazývá logaritmické prodloužení, se vypočítává pomocí přirozeného logaritmu poměru aktuální délky tělíska  $L$  k jeho původní délce  $L_0$  [24].

Tento vztah lze vyjádřit (2.5):

$$\varphi = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (2.5)$$

kde značí:  $\varphi$  – skutečná deformace [-],  $L$  – aktuální délka zkušebního tělíska [mm],  $L_0$  – původní délka zkušebního tělíska [mm].

Skutečný diagram napětí je důležitý pro přesné určení chování materiálů pod vysokým zatížením a je nezbytný pro aplikace, kde je důležité pochopení plastické deformace a následného chování materiálu po překročení meze kluzu [23, 24].



**Obr. 2.48** Smluvní a skutečný diagram napětí [23]

## 2.5.2 Tažnost a homogenní tažnost materiálu

Tažnost je klíčový mechanický parametr, který charakterizuje schopnost materiálu prodloužit se pod zatížením předtím, než dojde k jeho porušení [22, 24].

Lze vyjádřit vztahem (2.6):

$$A_x = \frac{(l_k - l_0) * 100}{l_0} \quad (2.6)$$

kde značí:  $A_x$  – tažnost [%],  $l_k$  – konečná délka zkušebního tělíska [mm],  $l_0$  – počáteční délka zkušebního tělíska [mm].

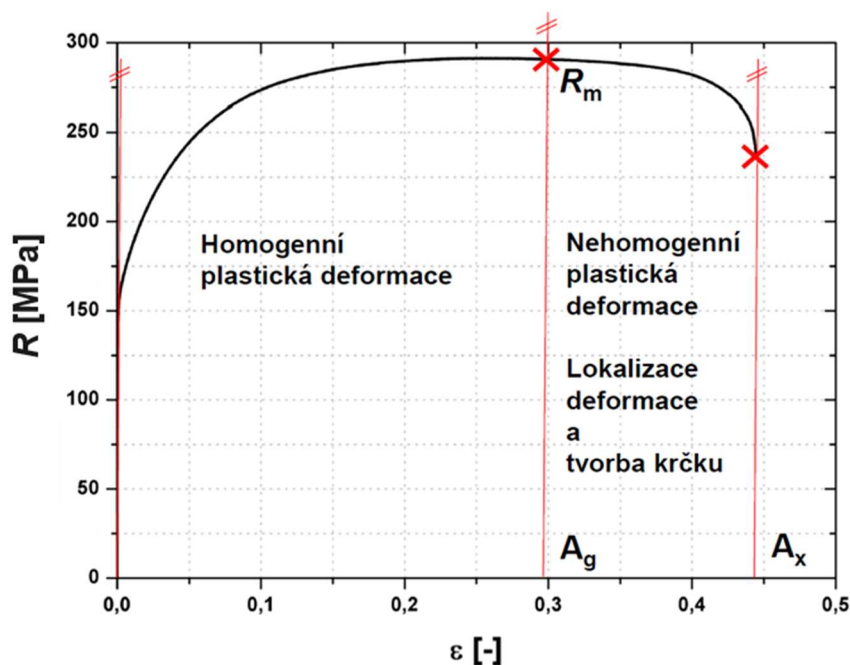
Homogenní tažnost je vlastnost materiálu, která charakterizuje jeho schopnost prodloužit se rovnoměrně po celé délce zkoušeného tělíska [22, 24].

Lze vyjádřit vztahem (2.7):

$$A_g = \frac{(l_{rm} - l_0) * 100}{l_0} \quad (2.7)$$

kde značí:  $A_g$  – homogenní tažnost [%],  $l_{rm}$  – délka zkušebního tělíska v oblasti meze pevnosti v tahu [mm],  $l_0$  – počáteční délka zkušebního tělíska [mm].

Tažnost a homogenní tažnost materiálu jsou znázorněny na obr. 2.49.



**Obr. 2.49** Ukázka tažnosti a homogenní tažnosti ve smluvním diagramu [24]

### 2.5.3 Kontrakce materiálu

Kontrakce materiálu, je jev, při kterém dochází k zúžení průřezové plochy materiálu v reakci na zatížení [22, 23, 24].

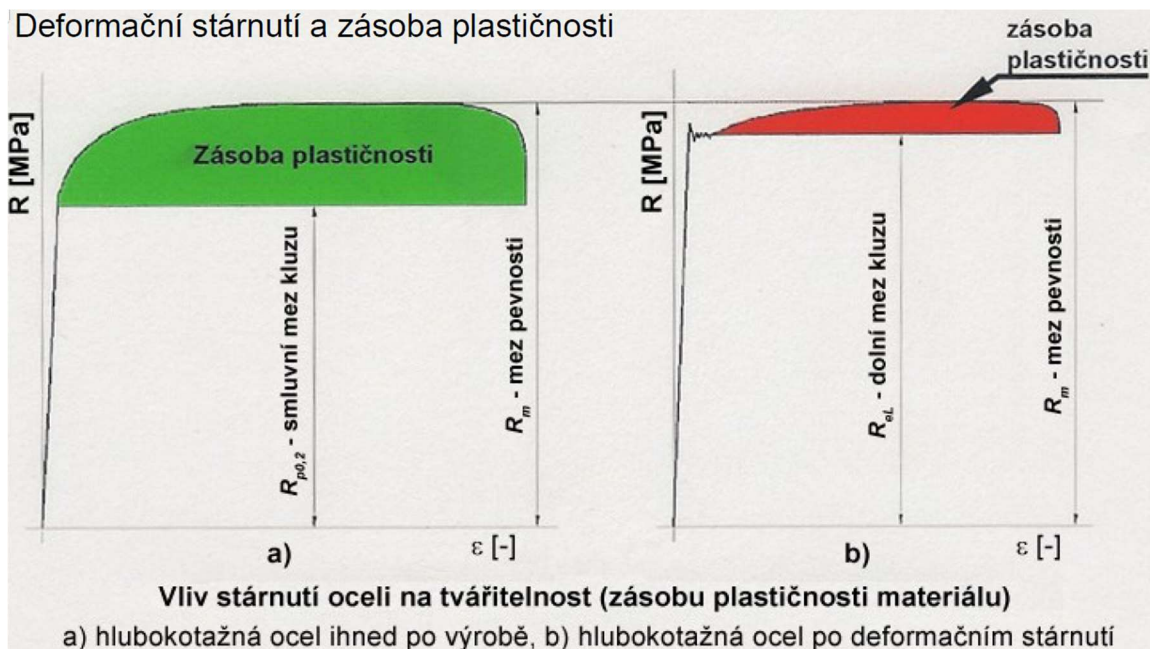
Lze vyjádřit vztahem (2.8):

$$Z = \frac{(S_0 - S_k) * 100}{S_0} \quad (2.8)$$

kde značí:  $Z$  – kontrakce [%],  $S_0$  – počáteční průřez zkušebního tělíška [ $\text{mm}^2$ ],  $S_k$  – konečný průřez zkušebního tělíška [ $\text{mm}^2$ ].

### 2.5.4 Zásoba plastičnosti materiálu

Zásoba plastičnosti je parametr, který určuje schopnost materiálu podstoupit plastickou deformaci po překročení meze kluzu a před dosažením konečného porušení. Je vyjádřena poměrem meze pevnosti v tahu a meze kluzu. Tento parametr je zásadní pro procesy tváření. Materiály s vysokou zásobou plastičnosti jsou schopny lépe absorbovat energii během deformace, což znamená, že mohou být formovány do složitějších tvarů bez praskání nebo lámání. Zásoba plastičnosti pro ocel ihned po výrobě a pro ocel po deformačním stárnutí je znázorněna na obr. 2.50 [24].

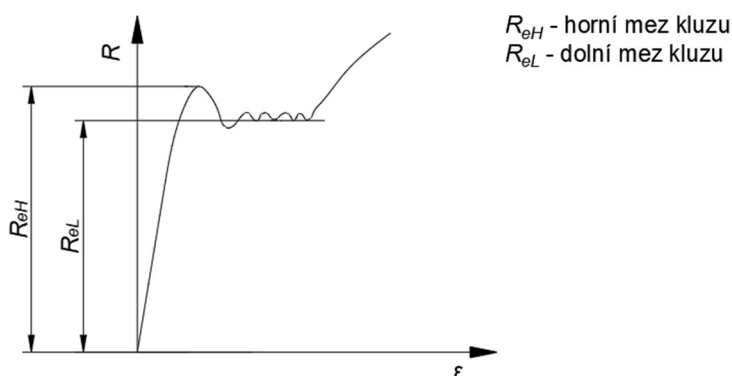


Obr. 2.50 Zásoba plastičnosti v grafech [24]



### 2.5.5 Smluvní diagram napětí u vystárlé oceli

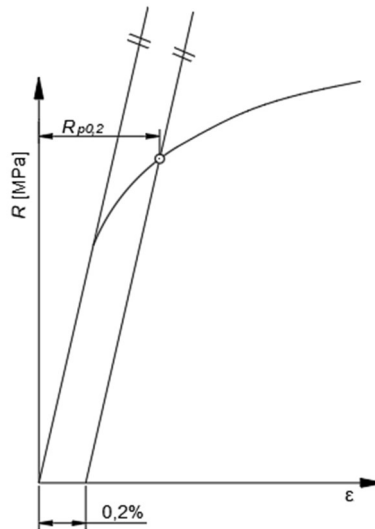
Zestárnutí oceli má značný vliv na její chování během tahové zkoušky, a to zejména v kontextu mechanických vlastností jako je zvýšení pevnosti a tvrdosti, snížení tažnosti, zvýšení křehkosti. Zestárnutí může nastat buď přirozeným procesem stárnutí materiálu vlivem dlouhodobého působení provozních podmínek, nebo uměle, například tepelným zpracováním. Toto stárnutí ovlivňuje mikrostrukturu oceli, což má přímý dopad na její vlastnosti při tahové zkoušce. Smluvní diagram napětí u vystárlé oceli je znázorněn na obr. 2.51 [22, 24].



**Obr. 2.51** Průběh smluvního napětí u vystárlé oceli [22]

### 2.5.6 Smluvní diagram napětí se smluvní mezí kluzu

Smluvní napětí se často volí u materiálů, kde není na tahové křivce jasně viditelná mez kluzu, typicky u materiálů s postupným přechodem do plastické deformace. V takových případech se pro určení meze kluzu používá offsetová metoda, kde se hledá napětí, které způsobí trvalou plastickou deformaci o 0,2 %. Toto řešení umožňuje konzistentní a přesnou analýzu materiálových vlastností pro konstrukční účely. Offsetová metoda poskytuje spolehlivý způsob, jak definovat mez kluzu u materiálů s nezřetelným bodem kluzu. Smluvní diagram napětí se smluvní mezí kluzu je znázorněn na obr. 2.52 [22, 23, 24].



*Obr. 2.52 Průběh smluvního napětí u oceli bez rozpoznatelné mezi kluzu [23]*

## 2.5.7 Typy zkušebních tělísek používaných pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku dle normy ISO 6892-1 se používají zkušební tělíska, jejichž výběr závisí na materiálu, aplikaci a specifických požadavcích zkoušky [22].

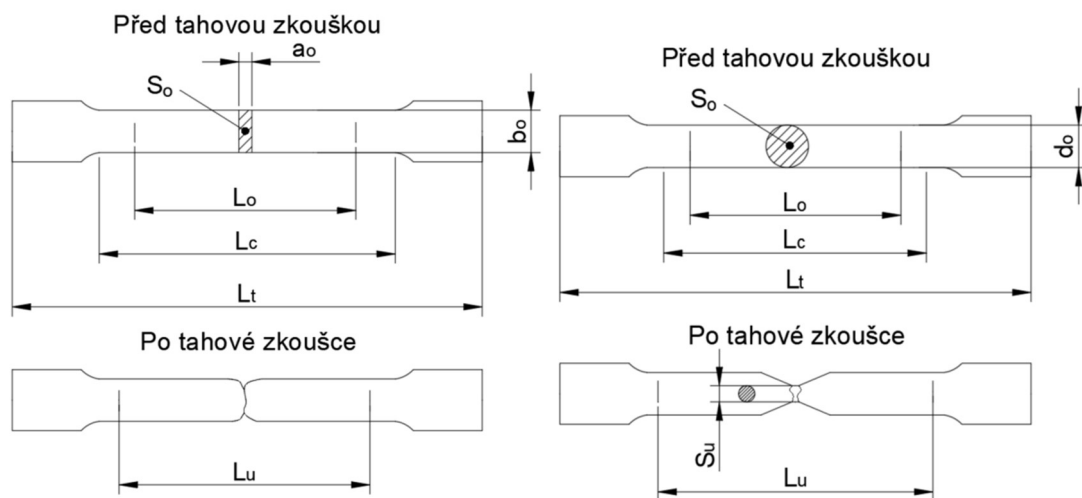
Dělí se na [22]:

- **Prostá zkušební tělíska** – jedná se o tělíska s jednoduchou geometrií, obvykle s konstantním průřezem v celé délce měřícího úseku. Tato tělíska jsou často používána pro základní materiály a umožňují přímé měření mechanických vlastností.
- **Zkušební tělíska se sníženým průřezem** – jsou tělíska, kde je průřez měřícího úseku úmyslně snížen, aby se zvýšila přesnost měření v konkrétní oblasti. Tyto tělíska jsou nejčastěji používána pro materiály s vysokou pevností nebo tam, kde je potřeba zaměřit se na specifickou část materiálu.
- **Zkušební tělíska s kruhovým průřezem** – jsou vhodná pro materiály, které se vyrábějí nebo se vyskytují v konstrukcích v tyčové, či drátové formě. Znázorněno na obr. 2.53.
- **Zkušební tělíska s obdélníkovým průřezem** – tato zkušební tělíska jsou často používána pro plechy nebo pásy, umožňují snadné upnutí a jsou vhodná pro širokou škálu materiálů. Znázorněno na obr. 2.53.

## 2.5.8 Dané a měřené parametry průtahoměrem na zkušebních těliscích

Nárůst délky je možné zaznamenat pomocí průtahoměru, který je před zahájením měření potřeba řádně nastavit. Hlavními délkovými parametry (obr. 2.53), které jsou měřeny pomocí průtahoměru, jsou [22]:

- Měřená délka průtahoměru ( $L_e$ )
  - Zaměřuje se na specifický úsek plastických deformací
  - Ideálně větší než  $0,5 L_o$  a menší než přibližně  $0,9 L_c$
  - Pro měření parametrů „v bodě“ nebo „po dosažení“ maximální síly by měla být  $L_e$  přibližně rovna  $L_o$
- Počáteční měřená délka před zatížením ( $L_o$ )
- Zkoušená délka vzorku ( $L_c$ )
- Konečná měřená délka po lomu ( $L_u$ )



**Obr. 2.53** Příklad zkušebních tělísek využívaných při tahové zkoušce, vlevo s obdélníkovým průřezem, vpravo s kruhovým průřezem [22]

## 3 Experimentální část

Cílem této diplomové práce je realizace experimentálního zjištění koeficientu tření na klíčových místech, a to přídržovači, tažné hraně a brzdné liště, což jsou prvky simulující části forem užívané v rámci tvářecích procesů. Tento výzkum poskytne hlubší pochopení tribologických faktorů, které ovlivňují efektivitu a kvalitu tvářecích procesů, což může přispět k optimalizaci technologických postupů v dané oblasti.

### 3.1 Příprava materiálu

#### 3.1.1 Informace o zvoleném materiálu

Pro tento typ tribologických zkoušek byl zvolen vývojový materiál CR 180 BH ZM 40/40 E-O, který byl poskytnut Technické Univerzitě v Liberci společností Škoda Auto a.s., z jehož označení je možné identifikovat specifikace dané oceli dle normy VW 50065. Detaily jsou uvedeny níže v bodech:

- **CR** – označuje materiál jako za studena válcovaný (cold rolled).
- **180** – značí minimální mez kluzu v megapascálech [MPa], tedy 180 MPa.
- **BH** – značí Bake-Hardening ocel, která zvyšuje svou pevnost po tepelném zpracování.
- **ZM** – znamená „zink-magnesium“ tedy povrchovou úpravu zinek-hořčík, která poskytuje lepší ochranu proti korozi a zajišťuje lepší přilnutí laku na tento typ materiálu.
- **40/40** – vyjadřuje hmotnost zinkového povlaku na obou stranách plechu v gramech na metr čtvereční [ $\text{g/m}^2$ ], tedy 40  $\text{g/m}^2$  na každé straně.
- **E** – označuje, že materiál je určený pro pohledové díly karoserie ("exposed"), kde jsou vyžadovány vysoké estetické požadavky, jako jsou vnější části vozidel.
- **O** – značí, že se jedná o materiál, který je naolejovaný.

### 3.1.2 Dělení zvoleného materiálu na tabulových nůžkách

Po výběru vhodného materiálu pro experimentální část práce bylo nezbytné přistoupit k přípravě plechových tabulí, které byly vstupem pro následné testování. Tyto tabule byly nastříhány na pásy odpovídajících rozměrů za použití tabulových nůžek Durma MS2504, které lze vidět na obr. 3.1.

Každý pásek byl nastříhán na šířku 45 mm a kolmo na osu válcování. Z jedné tabule bylo připraveno celkem šest pásků, které byly určeny k provádění tribologických zkoušek a další dva pásy k účelům tahových zkoušek. Celkově bylo připraveno 32 pásků s rozměry 45 x 700 x 0,7 mm, kde fotografii pásků lze vidět na obr. 3.2.



*Obr. 3.1 Tabulové nůžky Durma MS2504*

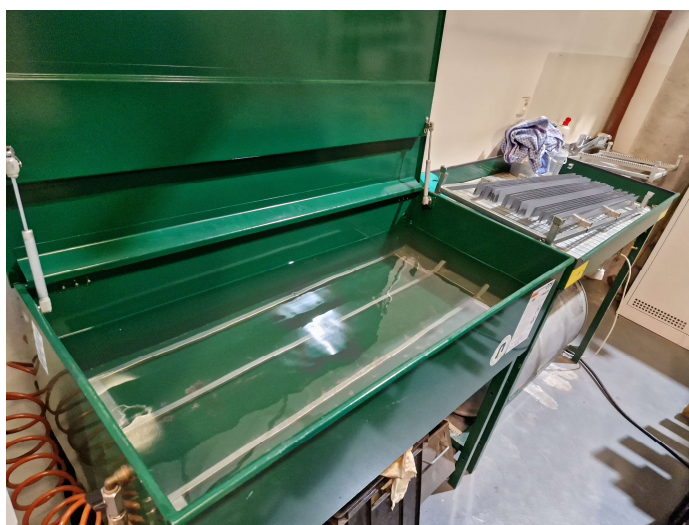


*Obr. 3.2 Nastříhané pásy*

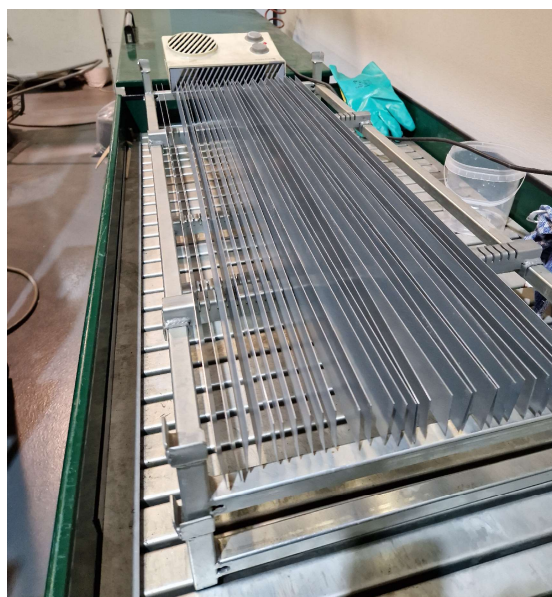
### 3.1.3 Odmaštění a sušení nastříhaného materiálu

Následující etapou experimentální části byla operace odmašťování, při které byly plechové pásy odmaštěny ve speciální lázni. Tato lázeň obsahovala odmašťovací kapalinu D-SOL 100, dodávanou společností QTS CZ s.r.o.. Proces odmašťování trval 20 minut, kde po dokončení procesu odmašťování byly pásy po dobu 10 minut sušeny.

Tento proces odmašťování a následného sušení je klíčový pro zajištění konzistentních podmínek měření. Detaily obou procesů jsou dokumentovány na obr. 3.3 a obr. 3.4.



*Obr. 3.3 Odmašťovací lázeň s kapalinou D-SOL 100*



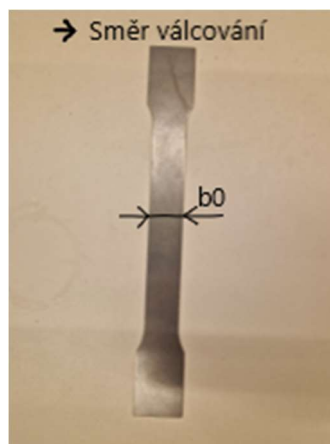
*Obr. 3.4 Proces sušení po odmaštění*

### 3.1.4 Příprava zkušebních tělísek pro účely tahové zkoušky

Dalším krokem po dokončení sušení bylo vyjmutí dvou nastříhaných pásků určených pro tahovou zkoušku. Tyto pásky byly vloženy do stříhacího přípravku, který byl umístěn na výstředníkovém lise s označením LENP 40 s maximální lisovací silou 400 kN. S pomocí tohoto přípravku byla připravena jednotlivá normalizovaná zkušební tělíska. Lis lze vidět na obr. 3.5 a vystřižené zkušební tělísko na obr. 3.6.



**Obr. 3.5** Výstředníkový lis LENP 40 s upnutým přípravkem pro vystřížení zkušebních tělísek

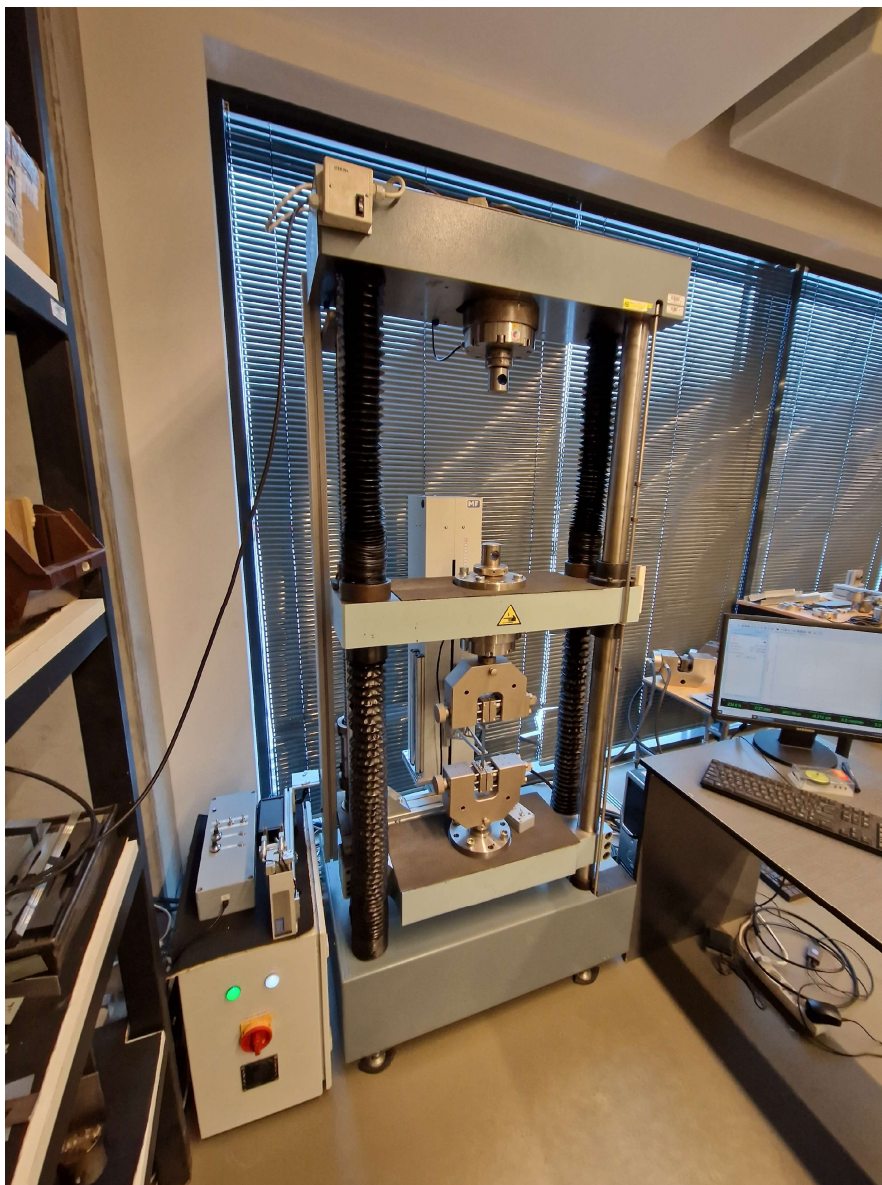


**Obr. 3.6** Vystřižené zkušební tělísko pro účely tahové zkoušky

## 3.2 Statická zkouška tahem

### 3.2.1 Popis průběhu tahové zkoušky

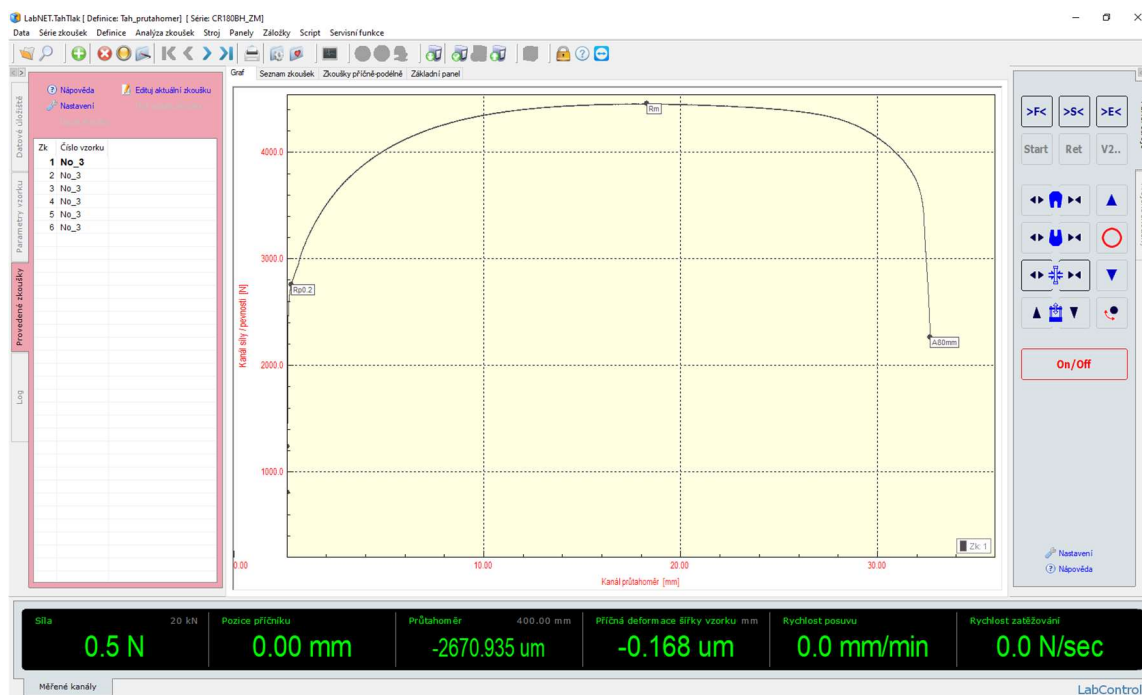
Po dokončení přípravy materiálu bylo provedeno přesunutí ke zkušebnímu zařízení TIRAtest 2300, vybaveného průtahoměrem MFX500, který lze vidět na obr. 3.7. Tahová zkouška byla realizována pro šest zkušebních tělísek, a to v souladu s mezinárodní normou ISO 6892-1.



**Obr. 3.7** Zkušební zařízení pro zkoušku tahem TIRAtest 2300 s průtahoměrem MFX 500



Pro vyhodnocení výsledků tahové zkoušky byl použit analytický software LabNET (obr. 3.8), do něhož bylo nutné zadat vstupní hodnoty, včetně geometrických parametrů vzorků. Tyto geometrické hodnoty, konkrétně tloušťky a šířky vzorků, byly změřeny pomocí digitálního mikrometru od společnosti Mitutoyo Corp, typ 543-561-1. Tento postup umožnil získat přesné výstupy potřebné pro analýzu výsledků tahové zkoušky.



Obr. 3.8 Software LabNET použitý pro zkoušku tahem

### Vstupní hodnoty geometrie (parametry vzorku):

- $b_0$  [mm] – tloušťka vzorku
- $a_0$  [mm] – šířka vzorku

### Požadované výstupní hodnoty z tahové zkoušky:

- $R_{p0,2}$  [MPa] – smluvní mez kluzu, plastické prodloužení měřené průtahoměrem
- $R_m$  [MPa] – mez pevnosti v tahu
- $A_g$  [%] – plastické prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení  $F_m$
- $A_{80mm}$  [%] – tažnost pro měřenou počáteční délku zkušebního tělesa 80 mm
- $E$  [MPa] – Youngův modul pružnosti

Pro zahájení tahové zkoušky bylo nezbytné nastavit v softwaru LabNET řadu parametrů. Počáteční předpětí  $F_0$  bylo stanoveno na 200 N, s rychlostí posuvu příčnicku  $v_0$  ve výši 4 mm/min a prodlevou předpětí trvajícím 4 sekundy. Dále bylo nastaveno přiložení průtahoměru při této hodnotě předpětí.

Hlavním účelem předpětí je zarovnání zkušebního vzorku před samotným zahájením měření, aby byla zajištěna přesnost počátečních dat. Vzhledem k tomu, že známe charakteristiku materiálu a víme, že předpětí neovlivní výsledek zkoušky, a to z důvodu, že je zatěžován hodnotou napětí kolem 15 MPa, což je hluboko před předpokládanou hodnotou meze kluzu zkoušeného materiálu 180 MPa.

Následně byl upraven parametr průtahoměru, což zahrnovalo aktivaci průtahoměru a nastavení jeho počáteční měřené délky  $L_e$  na standardní hodnotu 80 mm.

Po nastavení průtahoměru byly nastaveny hodnoty zkušebních rychlostí, kde rychlost startu zkoušky nazvané v softwaru „nastavení rychlosti  $v_1$  – pozice příčnicku“ byla zvolena s hodnotou 1 mm/min. Dále byl nastaven průběh rychlosti zkoušky s parametrem „nastavení rychlosti  $v_2$  – pozice příčnicku“ o hodnotě 15 mm/min, kde se tato rychlost aktivovala po uplynutí dráhy o hodnotě 600  $\mu\text{m}$ , značené parametrem „aktivace rychlosti  $v_2$  – protažení průtahoměru“.

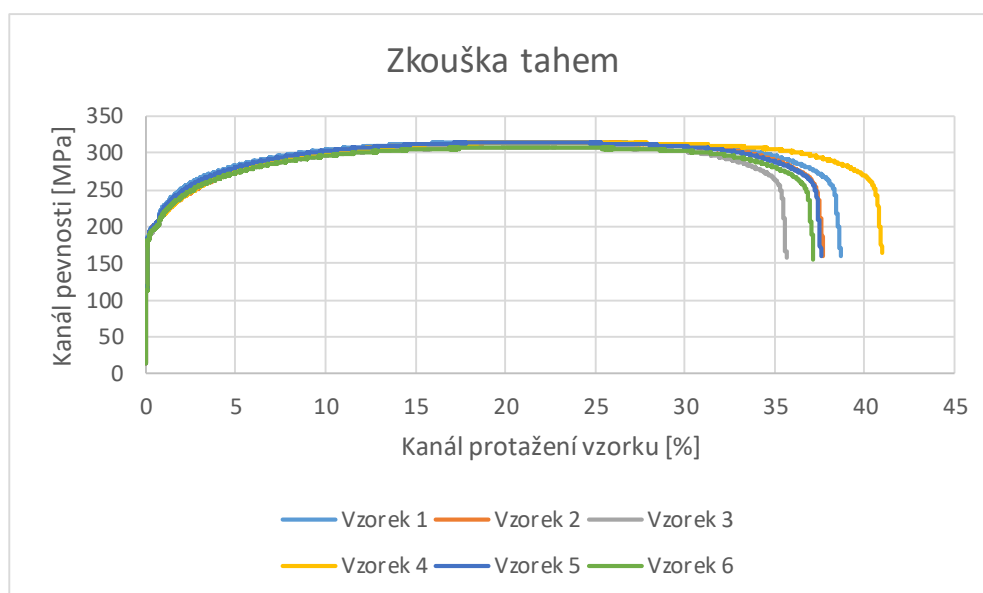
Posledním krokem bylo definování parametrů pro ukončení zkoušky. Byly stanoveny dva parametry, a to pokles síly v procentech od maximální síly ( $\% F_{\text{max}}$ ) na 50 %, nebo dosažení síly 19 kN. Nastavení poklesu síly automaticky ukončí zkoušku v případě porušení zkušebního vzorku. Hodnota 19 kN byla zvolena proto, aby v případě, že se materiál v průběhu zkoušky neporuší při dosažení této síly, nedošlo k poškození tenzometrického snímače síly KAF 20kN, který není dimenzován pro vyšší tahovou sílu než 20 kN.

### 3.2.2 Naměřené hodnoty na zkušebním zařízení pro tahovou zkoušku

Po nastavení parametrů tahové zkoušky bylo možné zahájit testování jednotlivých zkušebních tělísek, kde výstupem byly hodnoty  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A_g$ ,  $A_{80mm}$ ,  $E$ . Díky tomuto měření bylo zjištěno (tabulka 1), že všechna zkušební tělíska, která byla vystřižená kolmo na směr válcování ze dvou připravených pásků, vykazují velmi podobné mechanické hodnoty. Zkouška tahem byla provedena k ověření mechanických vlastností materiálu a zajištění konzistentních podmínek pro následné tribologické testování. Výsledek měření je zobrazen v grafu 1, protokol lze nalézt v příloze č. 1.

**Tabulka 1:** Výstupní hodnoty z tahové zkoušky

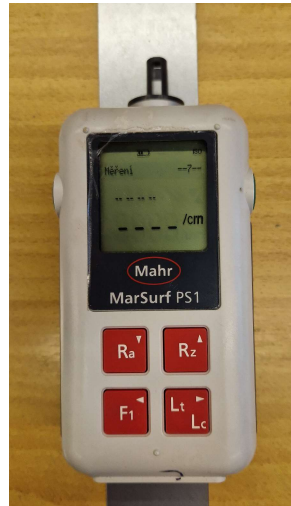
Zkouška	b0 [mm]	a0 [mm]	Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	Ag [%]	A80mm [%]	E [MPa]
1	20,04	0,707	194,68	314,42	22,69	40,78	205700
2	20,04	0,707	194,70	313,87	21,57	38,02	219574
3	20,04	0,707	190,11	308,37	22,21	37,70	210126
4	20,04	0,707	193,84	314,11	22,45	40,87	215914
5	20,04	0,707	194,76	313,81	21,71	39,96	213726
6	20,04	0,707	190,66	307,40	22,18	39,05	210251
$\bar{x}$	20,04	0,707	193,13	312,00	22,14	39,40	212548
s	0,00	0,000	2,16	3,21	0,43	1,36	4901
min	20,04	0,707	190,11	307,40	21,57	37,70	205700
max	20,04	0,707	194,76	314,42	22,69	40,87	219574



**Graf 1** Vyhodnocení tahové zkoušky

### 3.3 Měření drsnosti

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno s využitím drsnoměru Mahr MarSurf PS1 zobrazeného na obr. 3.9. V rámci tohoto testu byly zkoumány hodnoty střední aritmetické drsnosti  $R_a$ , střední hodnoty drsnosti  $R_z$  a počtu výstupků  $RP_c$ . Vzhledem k tomu, že zkoumaný materiál byl vyroben technologií válcováním, bylo nezbytné provést měření drsnosti ve dvou orientacích, a to ve směru osy a kolmo na osu válcování.



*Obr. 3.9 Drsnoměr Mahr MarSurf PS1*

Před zahájením měření bylo nutno provést kalibraci drsnoměru, která byla provedena za pomoci kalibrační funkce přístroje a etalonu, který je zabudovaný v drsnoměru. Pro správné provedení měření bylo nutné na drsnoměru nastavit hodnotu cut-off délky  $l_r$ , která byla nastavena na hodnotu 2,5 mm, kde celková měřená délka byla 17,5 mm, a z toho vyhodnocovaná délka byla 12,5 mm. Dále pro vyhodnocení parametru  $RP_c$  bylo třeba definovat hodnotu hladin  $C_1$  a  $C_2$ , které byly ponechány na výchozí hodnotě nastavení mikrometru Mahr MarSurf PS1 ( $C_1 +0,5 \mu\text{m}$  a  $C_2 -0,5 \mu\text{m}$ ). Pro zobrazení hodnoty  $RP_c$  se na přístroji muselo definovat zobrazení této hodnoty při stisku tlačítka  $F_1$ .

Následně bylo provedeno samotné měření, při kterém byl drsnoměr přiložen na jednotlivé plechové pásky. Start měření nastal za stisknutí obou tlačítek na boku přístroje. Získané hodnoty  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $RP_c$  bylo možné zobrazit po stisknutí příslušného tlačítka.

Měření bylo realizováno ve směru a kolmo na směr válcování u třech pásek určených k tribologickým zkouškám, a to z každé strany. Výsledné hodnoty byly zaznamenány a jsou prezentovány v tabulce 2. Měření drsnosti bylo provedeno k ověření a zajištění konzistentních podmínek u tribologického testování.

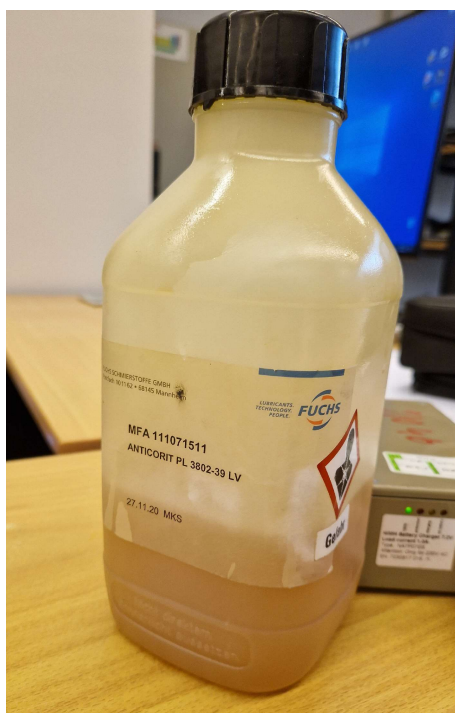
**Tabulka 2:** Naměřené hodnoty drsnoměrem

	Strana pásku	Číslo měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	RPc [1/cm]
<b>Měření kolmo na směr válcování</b>	Horní	1	1,229	6,590	74
		2	1,122	6,000	82
		3	1,240	6,150	80
		$\bar{x}$	1,197	6,247	79
		s	0,065	0,307	4
	Spodní	1	1,104	6,150	83
		2	1,295	6,410	88
		3	1,171	5,840	90
		$\bar{x}$	1,190	6,133	87
		s	0,097	0,285	4
<b>Měření ve směru válcování</b>	Horní	1	1,157	5,950	91
		2	1,151	5,950	98
		3	1,179	6,010	88
		$\bar{x}$	1,162	5,970	92
		s	0,015	0,035	5
	Spodní	1	1,166	5,850	94
		2	1,140	6,150	98
		3	1,244	6,280	97
		$\bar{x}$	1,183	6,093	96
		s	0,054	0,221	2

### 3.4 Nanosení vrstvy maziva

Před provedením tribologických zkoušek bylo nezbytné aplikovat mazivo na předem připravené pásy. Použitým mazivem byl prací olej ANTICORIT PL 3802-39 LV od společnosti Fuchs (obr. 3.10), který byl nanášen na každý pásek v množství  $1,5 \pm 0,2 \text{ g/m}^2$  za pomoci tkaniny. Množství naneseného oleje bylo přesně změřeno speciálním přístrojem od společnosti InfraLytic GmbH typ NG1, fotografii lze vidět na obr. 3.11.

Před samotným měřením bylo nutné nastavit tento přístroj na specifikace materiálu, v tomto případě na parametr „hot zinc“. Tento proces mazání byl zvolen s cílem zajistit konzistentní mazací podmínky během testů a minimalizovat tak variace koeficientu tření způsobenou nekonzistencí v mazacím filmu.



*Obr. 3.10 Lahev s olejem ANTICORIT PL 3802-39 LV*



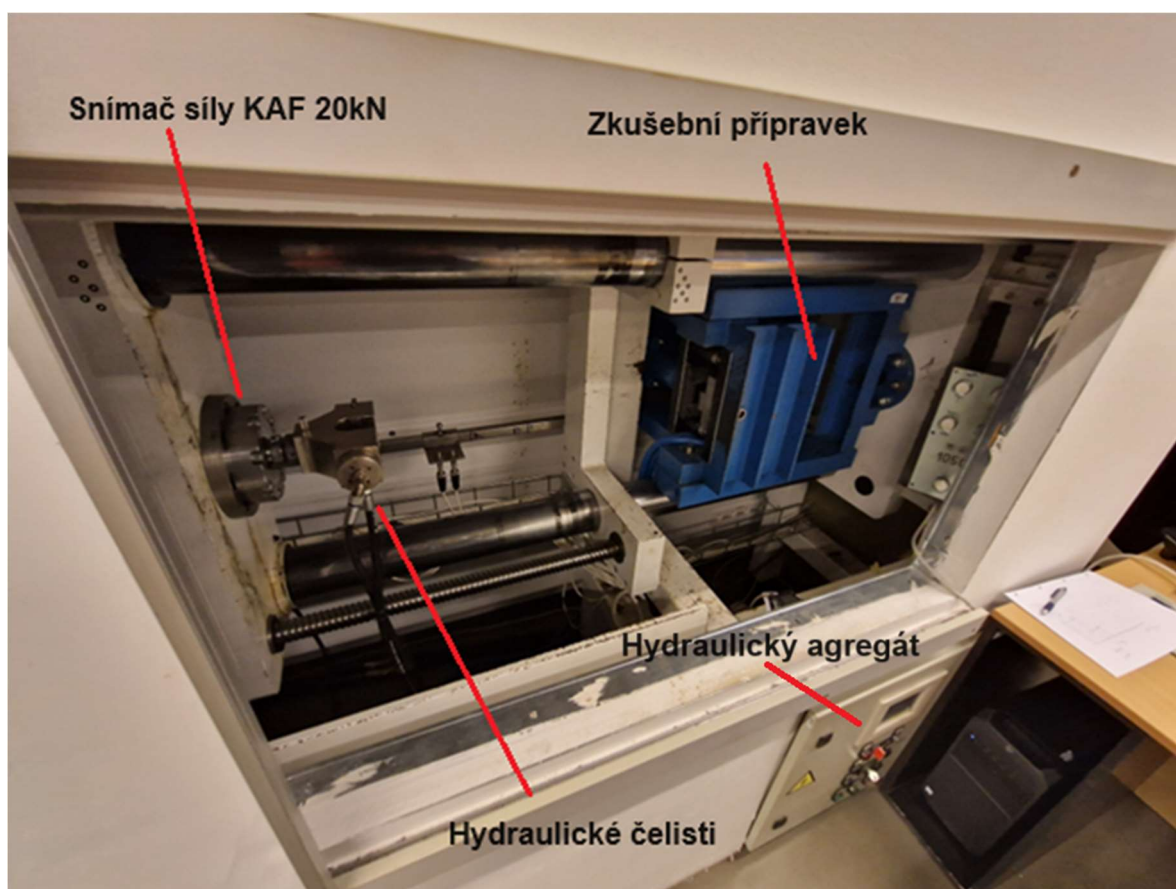
*Obr. 3.11 Přístroj na měření nanesené vrstvy oleje přístroj NG1 vyráběný společností  
InfraLytic GmbH*

## 3.5 Tribologická zkouška

### 3.5.1 Použité zařízení pro měření tribologických zkoušek SOKOL 400

Tribologická zkouška byla provedena na zkušebním zařízení SOKOL 400 ve spojení se snímačem síly KAF 20kN a modulem NI cDAQ-9174 s kartou NI9237 obsahující vestavěný AD převodník s nastavenou hodnotou samplování 2 kHz, který byl připojený k PC. Součástí stroje je teplotní agregát sloužící pro předehřev zkušebních čelistí (není na obrázku) a hydraulický agregát s PID regulací a frekvenčním měničem zajišťující pohon stroje. Stroj byl ovládán skrz ovládací panel (není vidět na obrázku), který je součástí psacího stolu.

Zařízení SOKOL 400 je umístěno na katedře strojírenské technologie, které bylo vyvinuto a zkonstruováno ve spolupráci Technické univerzity v Liberci a Škoda Auto a.s. pro zkoumání tribologických vlastností materiálu, mezi které patří určování koeficientů tření. Zařízení lze sledovat na obr. 3.12.



**Obr. 3.12** Zkušební zařízení SOKOL 400

### 3.5.2 Nastavení zařízení

Před zahájením měření bylo nezbytné na zařízení správně nastavit klíčové zkušební parametry, které zahrnují kontaktní tlak, rychlost protahování, teplotu předeřevu čelistí a měřenou délku.

Nastavení kontaktního tlaku, teploty předeřevu čelistí a rychlost protahování je zásadní k zajištění konstantních zkušebních podmínek. Měřenou délku je potřeba nastavit, aby zařízení dostalo informaci, po jakou dráhu má měřit. Nastavení těchto parametrů je uvedeno v tabulce 3.

*Tabulka 3: Nastavení zkušebního zařízení SOKOL 400*

Nastavení zkušebního zařízení SOKOL 400	
Kontaktní tlak	4 MPa
Rychlost protahování	10 mm/s
Měřená délka	400 mm
Teplota předeřevu čelistí	40 °C

### 3.5.3 Popis průběhu měření tribologické zkoušky

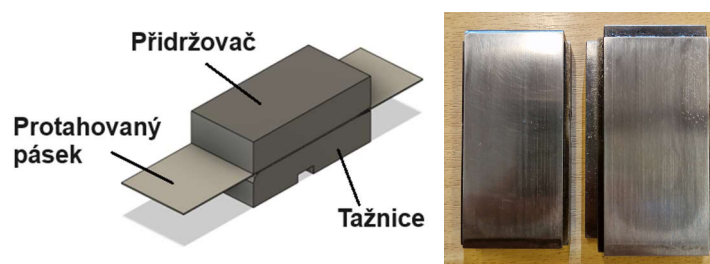
Tribologické zkoušky byly realizovány pro pět různých variant (A, B, C, D, E).

- Varianta A – modelování tření mezi přídržovačem a tažnicí
- Varianta B – modelování tření mezi přídržovačem a tažnicí přes rotaci
- Varianta C – modelování tření mezi přídržovačem, tažnicí a tažnou hranou
- Varianta D – modelování tření mezi přídržovačem a tažnicí s brzdou lištou
- Varianta E – modelování tření mezi přídržovačem, tažnicí s brzdou lištou a tažnou hranou

Pro každou z těchto variant bylo připraveno šest testovacích vzorků, které byly nejprve nastříhány, odmaštěny, podrobeny měření drsnosti a následně namazány pracím olejem. Testy proběhly za konstantních podmínek u všech variant.

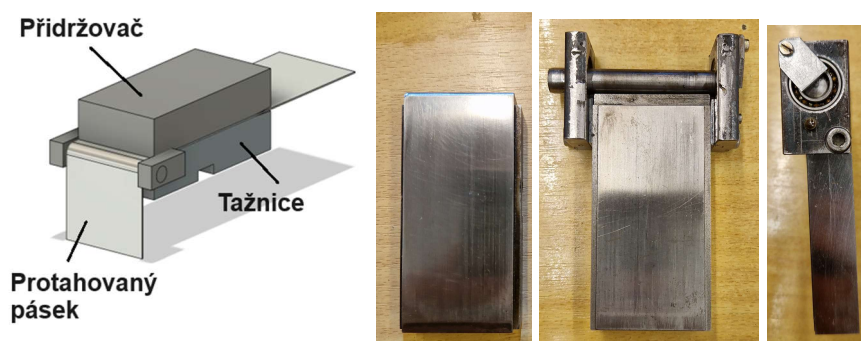


Po nastavení všech parametrů bylo možné započít s tribologickými testy. Nejprve bylo nutné připravit zařízení pro variantu A. Pro tuto variantu byly použity rovné čelisti složené z přidržovače a tažnice, které byly vloženy do zkušebního přípravku stroje. Následně byl skrz čelisti ve zkušebním přípravku provlečen testovací pásek, který byl v levé části zařízení upevněn pomocí hydraulických upínacích čelistí. Poté bylo možné aplikovat kontaktní tlak na čelisti a zahájit samotné měření. Čelisti lze vidět na obr. 3.13.



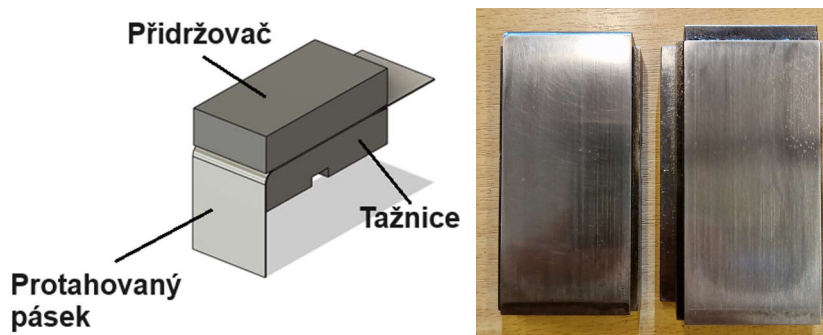
**Obr. 3.13** Varianta A – modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí, vlevo CAD model, vpravo použité čelisti

Po dokončení měření varianty A následovalo měření varianty B, kde bylo zkoumáno tření mezi tažnicí a přidržovačem přes rotaci. Pro tuto variantu bylo nutné vyměnit tažnici z varianty A za tažnici z varianty B, která byla vybavena válečkem umístěným mezi ložisky. Následně bylo nutné zkušební přípravek v zařízení otočit o 90°, aby bylo možné protahovat plechové pásky přes rotující váleček. Pro změření této varianty následoval stejný proces jako u varianty A, a to upnutí do hydraulických upínacích čelistí, aplikace kontaktního tlaku a zahájení měření. Konfiguraci varianty B lze vidět na obr. 3.14. Toto měření bylo provedeno s cílem eliminovat ohybové síly z výpočtů koeficientů tření u variant, kde se táhne pásek přes tažné hrany.



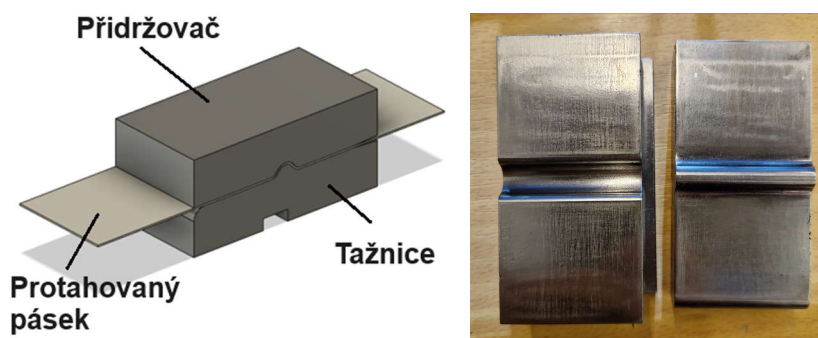
**Obr. 3.14** Varianta B – modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí přes rotaci, vlevo CAD model, vpravo použité čelisti

Po změření varianty B následovalo měření varianty C, kde do zkušební přípravku byly vloženy čelisti použité u varianty A. Zkušební přípravek byl ponechán v otočeném stavu o 90°, aby bylo možné táhnout testovací pásek přes tažnou hranu. Následoval stejný proces jako u předchozích variant, a to upnutí provlečeného pásku do hydraulických čelistí, aplikace kontaktního tlaku a start testu. Konfigurace varianty C je zobrazena na obr. 3.15.



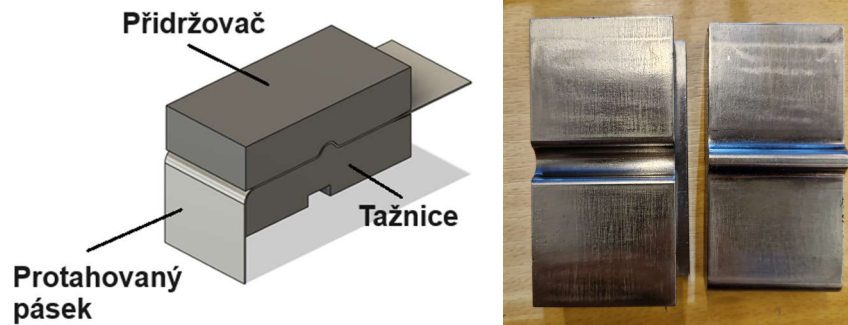
**Obr. 3.15** Varianta C – modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou, vlevo CAD model, vpravo použité čelisti

Další variantou, která následovala byla varianta D, která simulovala tření mezi přidržovačem a tažnicí s brzdou lištou. U této varianty bylo nutné narovnat zkušební přípravek do přímé polohy a vyměnit čelisti z varianty C za čelisti pro variantu D, které jsou zobrazeny na obr. 3.16. Poté, co byly provedeny zmíněné kroky, tak bylo možné provléct a upevnit pásek do hydraulických čelistí, aplikovat kontaktní tlak a začít měřit tuto variantu.



**Obr. 3.16** Varianta D – modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí s brzdou lištou, vlevo CAD model, vpravo použité čelisti

Poslední variantou ve skupině měření je varianta E, která simulovala tření mezi čelistmi s brzdou lištou a tažnou hranu. Příprava měření u této varianty byla jednoduchá. Jednalo se pouze o otočení zkušební přípravku o 90°, aby bylo možné táhnout pásek přes tažnou hranu. Následovalo provlečení pásku, upnutí pásku do hydraulických čelistí a následně započalo měření. Konfiguraci znázorňuje obr. 3.17.



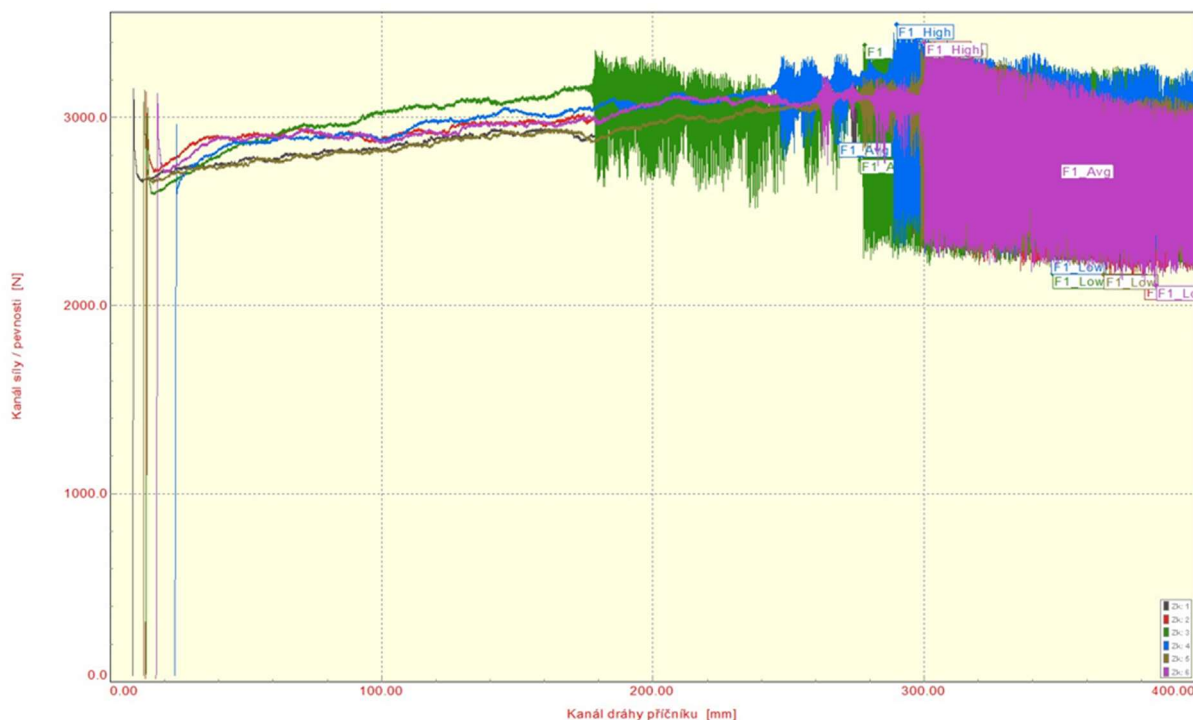
**Obr. 3.17** Varianta E – modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí s brzdou lištou a tažnou hranu, vlevo CAD model, vpravo použité čelisti

Použité čelisti ve všech variantách byly vyrobeny z materiálu GGG 70L, což je označení pro tvárnou litinu. Tento materiál je známý svou vysokou odolností proti otěruvzdornosti, což je důležité pro účely tribologických zkoušek.

### 3.5.4 Naměřené hodnoty

Zaznamenání výsledků měření probíhalo za pomoci softwaru TUL Sampler V4.57.10833.

Výstupem je graf, který je zde zobrazen pod názvem graf 2, kde osa Y reprezentovala kanál síly a osa X kanál dráhy příčniku.



**Graf 2:** Příklad zaznamenání výsledků (varianta A)

Dalším výstupem byly tabulky obsahující naměřené hodnoty jako F1\_max, F1\_avg, F1\_High, F1\_Low a delta\_F1, a to pro každou ze šesti zkoušek. V těchto tabulkách lze zároveň pozorovat vyhodnocení aritmetických průměrů hodnot a výběrových směrodatných odchylek. Tyto výstupy jsou pro každou variantu zobrazeny v tabulce 4, tabulce 5, tabulce 6, tabulce 7 a tabulce 8.

Naměřené hodnoty a grafy lze nalézt v příloze č. 2, příloze č. 3, příloze č. 4, příloze č. 5 a příloze č. 6.

**Tabulka 4: Naměřené hodnoty varianta A**

Varianta A					
Zkouška	F1_Max [N]	F1_Avg [N]	F1_High [N]	F1_Low [N]	delta_F1 [N]
1	3399	2782	3399	2165	1233
2	3403	2754	3403	2105	1298
3	3385	2775	3385	2166	1219
4	3492	2867	3492	2242	1249
5	3392	2776	3392	2161	1231
6	3396	2749	3396	2101	1296
$\bar{x}$	3411	2784	3411	2157	1254
s	40	43	40	52	34

**Tabulka 5: Naměřené hodnoty varianta B**

Varianta B					
Zkouška	F1_Max [N]	F1_Avg [N]	F1_High [N]	F1_Low [N]	delta_F1 [N]
1	4832	4588	4832	4344	488
2	4902	4592	4902	4282	620
3	4863	4418	4863	3972	890
4	4892	4645	4892	4398	494
5	4885	4576	4885	4267	618
6	4957	4503	4957	4049	907
$\bar{x}$	4888	4554	4888	4219	670
s	42	81	42	169	187

**Tabulka 6: Naměřené hodnoty varianta C**

Varianta C					
Zkouška	F1_Max [N]	F1_Avg [N]	F1_High [N]	F1_Low [N]	delta_F1 [N]
1	6877	6768	6877	6660	217
2	6975	6702	6826	6578	247
3	6849	6704	6849	6559	290
4	6911	6688	6803	6572	231
5	6961	6689	6812	6565	247
6	6835	6691	6835	6546	290
$\bar{x}$	6901	6707	6834	6580	254
s	58	31	27	41	30

**Tabulka 7:** Naměřené hodnoty varianta D

Varianta D					
Zkouška	F1_Max [N]	F1_Avg [N]	F1_High [N]	F1_Low [N]	delta_F1 [N]
1	5339	5216	5339	5093	247
2	5385	5262	5385	5139	246
3	5365	5247	5365	5129	236
4	5370	5240	5370	5110	260
5	5328	5205	5328	5082	246
6	5374	5251	5374	5129	245
$\bar{x}$	5360	5237	5360	5114	247
s	22	22	22	23	7

**Tabulka 8:** Naměřené hodnoty varianta E

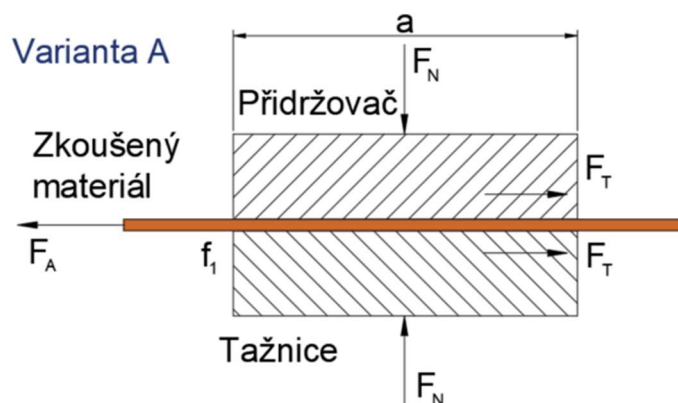
Varianta E					
Zkouška	F1_Max [N]	F1_Avg [N]	F1_High [N]	F1_Low [N]	delta_F1 [N]
1	9998	9709	9921	9498	422
2	9749	9483	9623	9344	279
3	9732	9571	9732	9409	324
4	9978	9690	9901	9479	422
5	9730	9464	9604	9325	278
6	9713	9551	9713	9390	323
$\bar{x}$	9817	9578	9749	9408	341
s	133	102	135	70	66

### 3.5.5 Metodika výpočtů koeficientů tření

#### A. Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí

První variantou, která byla zvolena pro účely určení koeficientu tření ( $f_1$ ) je varianta tření mezi přidržovačem a tažnicí. Varianta je znázorněna na obr. 3.18, kde k získání koeficientu tření bylo potřeba odvodit vzorec.

Vstupními parametry jsou kontaktní tlak a plocha čelistí, na které tento kontaktní tlak působí.



**Obr. 3.18** Varianta A – schéma tření mezi přidržovačem a tažnicí

Z kontaktního tlaku a plochy čelistí, které jsou složeny z délky ( $a$ ) a šířky ( $b$ ) je možné určit hodnotu normálové síly ( $F_N$ ). Vyjádřit lze rovnicí (3.1):

$$F_N = p * S = p * a * b \quad (3.1)$$

kde značí:  $p$  – kontaktní tlak [MPa],  $S$  – kontaktní plocha čelistí [ $\text{mm}^2$ ],  $a$  – délka plochy zkušebních čelistí [mm],  $b$  – šířka plochy zkušebních čelistí [mm].

Dále je potřeba postoupit k určení hodnoty třecí síly ( $F_T$ ), která je složena se součinnu normálové síly a koeficientu tření. Lze vyjádřit rovnicí (3.2):

$$F_T = F_N * f_1 \quad (3.2)$$

kde značí:  $F_T$  – třecí síla [N],  $F_N$  – normálová síla [N],  $f_1$  – koeficient tření [-].

Jelikož na zkoušený materiál působí, jak přidržovač, tak i tažnice musí se vzít v potaz, že zde působí třecí síla z obou stran zkoušeného materiálu, dle vztahu (3.3):

$$F_A = 2 * F_T \quad (3.3)$$

kde značí:  $F_A$  – změřená tažná síla u varianty A [N],  $F_T$  – třecí síla [N].

Dále upravíme do tvaru (3.4):

$$F_A = 2 * F_N * f_1 \quad (3.4)$$

kde značí:  $F_A$  – změřená tažná síla u varianty A [N],  $F_N$  – normálová síla [N],  $f_1$  – koeficient tření [-].

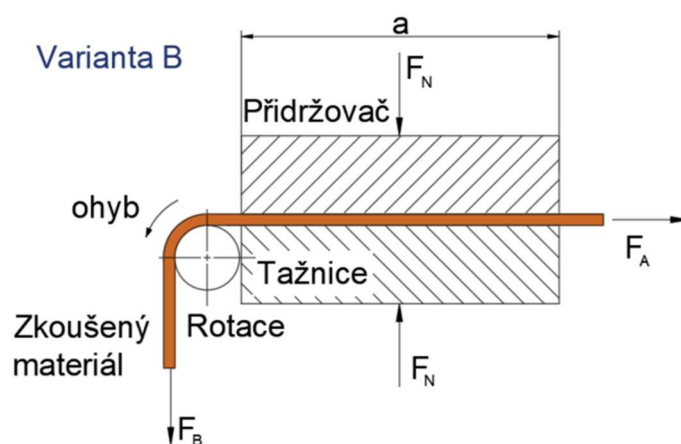
Po dosazení do všech rovnic, za účelem získat hodnotu koeficientu tření, lze vyjádřit hodnotu ( $f_1$ ) za pomoci upravené rovnice (3.5):

$$f_1 = \frac{F_A}{2 * p * a * b} \quad (3.5)$$

kde značí:  $f_1$  – koeficient tření mezi čelistmi [-],  $F_A$  – změřená tažná síla u varianty A [N],  $p$  – kontaktní tlak [MPa],  $a$  – délka plochy zkušebních čelistí [mm],  $b$  – šířka plochy zkušebních čelistí [mm].

## B. Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí přes rotaci (váleček)

Druhá varianta neboli varianta B (obr. 3.19) je potřeba k určení ohybových sil, které působí na tažený materiál při tažení přes tažnou hranu. Tyto ohybové síly budou následně odečítány u dalších variant, a to u variant C, D, E.



**Obr. 3.19** Varianta B – schéma tření mezi přidržovačem a tažnicí přes rotaci

Výpočet ohybových sil (ohyb) působících na tažený materiál je poměrně jednoduchý, kde se vychází ze vzorce (3.6):

$$\bar{F}_B = \bar{F}_A + ohyb \quad (3.6)$$

kde značí:  $\bar{F}_A$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty A [N],  $\bar{F}_B$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty B [N].



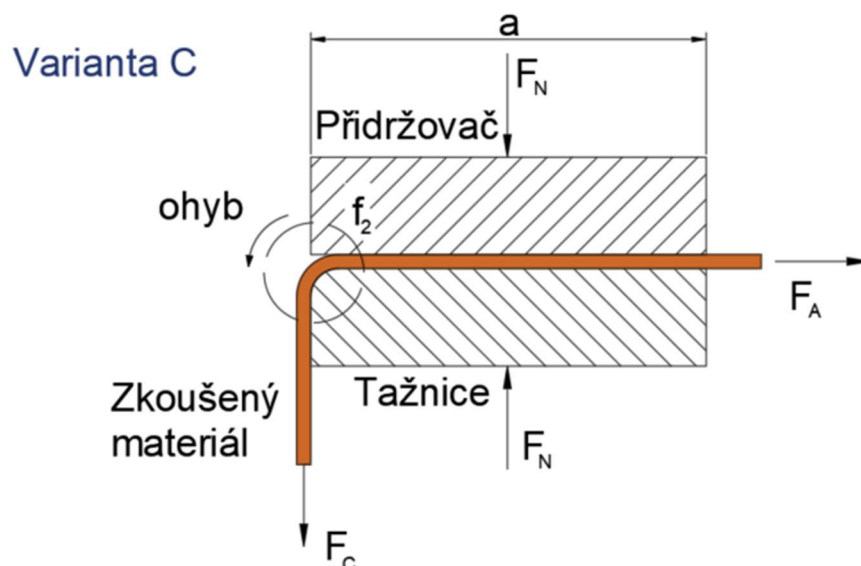
Po úpravě lze ohyb vypočítat pomocí vzorce (3.7):

$$\text{ohyb} = \bar{F}_B - \bar{F}_A \quad (3.7)$$

kde značí:  $\bar{F}_A$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty A [N],  $\bar{F}_B$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty B [N].

### C. Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou

Varianta C je velmi podobná variantě A, s tím rozdílem, že tato varianta simuluje tažení materiálu, přes tažnou hranu tažnice, za konstantní rychlosti a tlaku, kde pro výpočet třecí síly ( $f_2$ ) na tažné hraně je využito Eulerova vztahu. Varianta C je znázorněna na obr. 3.20.



**Obr. 3.20** Varianta C – schéma tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou

Obecný vzorec Eulerova vztahu je znázorněn rovnicí (3.8):

$$F_2 = F_1 * e^{\alpha * f} \quad (3.8)$$

kde značí:  $F_2$  – tažná síla [N],  $F_1$  – protitažná síla [N],  $\alpha$  – úhel opásání [rad],  $f$  – koeficient tření [-].

Následuje úprava Eulerova vztahu, kde síla  $F_1$  byla nahrazena aritmetickým průměrem síly  $\bar{F}_A$  a síla  $F_2$  byla nahrazena silou změřenou  $F_C$ . Úhel opásání do tohoto vztahu vstupuje s hodnotou  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , následně se rovnice musela očistit o ohyb působící v oblasti tažné hrany, který byl vypočten u varianty B.

Upravený vzorec lze vidět níže (3.9):

$$F_C = \bar{F}_A * e^{\frac{\pi}{2} * f_2} + ohyb \quad (3.9)$$

kde značí:  $F_C$  – změřená tažná síla u varianty C [N],  $\bar{F}_A$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty A [N],  $f_2$  – koeficient tření na tažné hraně [-].

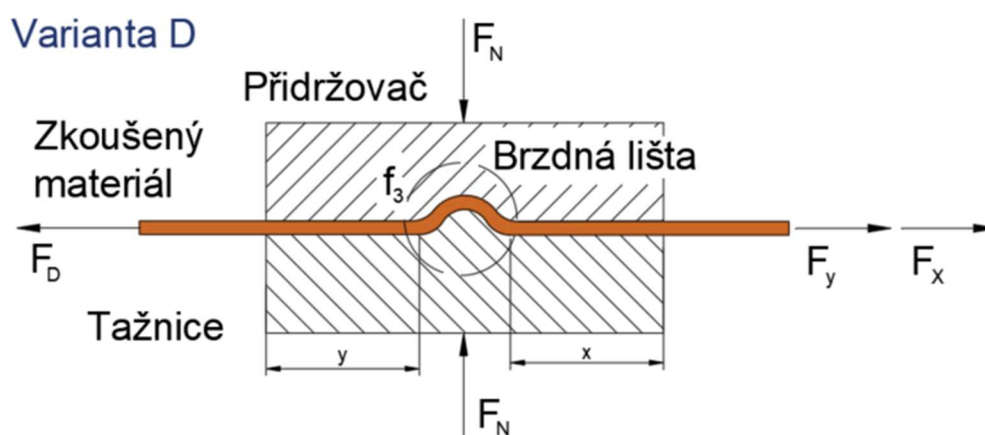
K výpočtu koeficientu tření je potřeba tento vztah ještě jednou upravit. Upravený vzorec (3.10) pro výpočet koeficientu tření ( $f_2$ ) vypadá následovně:

$$f_2 = \frac{2}{\pi} * \ln \left( \frac{F_C - (\bar{F}_B - \bar{F}_A)}{\bar{F}_A} \right) \quad (3.10)$$

kde značí:  $f_2$  – koeficient tření na tažné hraně [-],  $F_C$  – změřená tažná síla u varianty C [N],  $\bar{F}_B$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty B [N],  $\bar{F}_A$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty A [N].

## D. Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí s brzdou lištou

Varianta D (obr. 3.21) je v principu podobná variantě A s výjimkou přidání zaoblené brzdové lišty. Tento princip umožňuje vypočítat koeficient tření ( $f_3$ ) na brzdové liště.



**Obr. 3.21** Varianta D – schéma tření mezi přidržovačem a tažnicí s brzdou lištou

V rámci této varianty je způsob výpočtu založen na rovnicích, které zohledňují normálové síly vypočtené z kontaktního tlaku a koeficient tření ( $f_1$ ) z varianty A působící na plochu charakterizovanou délkami  $x$  a  $y$  se šířkou  $b$ . Tyto rovnice jsou popsány níže, kde se jedná o rovnice (3.11) a (3.12).

$$F_x = 2 * f_1 * p * b * x \quad (3.11)$$

kde značí:  $F_x$  – normálová síla působící v oblasti  $x$  [N],  $f_1$  – koeficient tření působící mezi plochami čelistí [-],  $p$  – kontaktní tlak [MPa],  $b$  – šířka čelistí [mm],  $x$  – délka úseku čelistí  $x$  [mm].

$$F_y = 2 * f_1 * p * b * y \quad (3.12)$$

kde značí:  $F_y$  – normálová síla působící v oblasti  $y$  [N],  $f_1$  – koeficient tření působící mezi plochami čelistí [-],  $p$  – kontaktní tlak [MPa],  $b$  – šířka čelistí [mm],  $y$  – délka úseku čelistí  $y$  [mm].

Po zohlednění normálových sil působících na danou plochu je potřeba zahrnout další parametry. Mezi tyto parametry patří ohybové síly působící na pásek během jeho ohybu přes brzdnu lištu a síly odvozené z Eulerova vzorce, též působící na brzdne liště. Ohyb působící na brzdnu lištu je zde počítán jako dvojnásobek. Dále se u této varianty počítá s úhlem opásání brzdne lišty  $\alpha = \pi$ . Po započítání všech působících sil dostaneme rovnici (3.13):

$$F_D = F_x + F_y + 2 * ohyb + F_x * e^{\pi * f_3} \quad (3.13)$$

kde značí:  $F_D$  – změřená tažná síla u varianty D [N],  $F_x$  – normálová síla působící v oblasti  $x$  [N],  $F_y$  – normálová síla působící v oblasti  $y$  [N],  $f_3$  – koeficient tření v oblasti brzdne lišty [-].

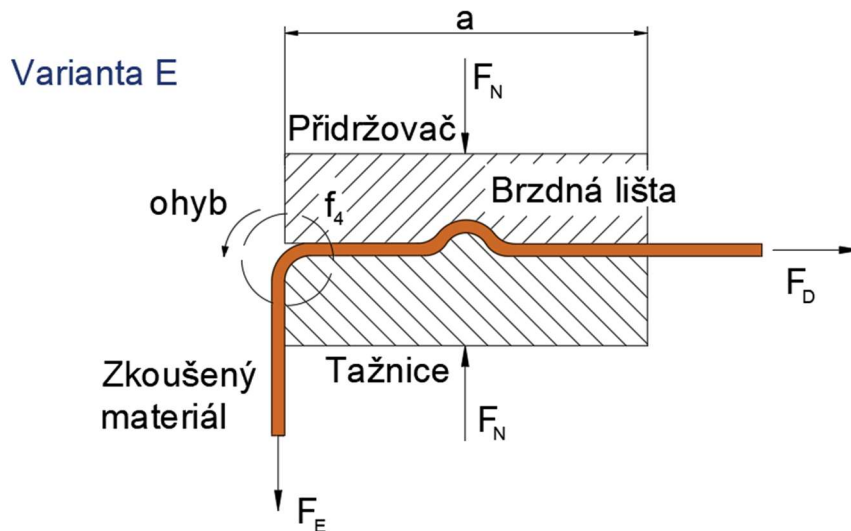
K získání koeficientu tření ( $f_3$ ) na brzdne liště se vztah (3.14) musí upravit na:

$$f_3 = \frac{1}{\pi} * \ln\left(\frac{F_D - F_x - F_y - 2 * (\bar{F}_B - \bar{F}_A)}{F_x}\right) \quad (3.14)$$

kde značí:  $f_3$  – koeficient tření v oblasti brzdne lišty [-],  $F_D$  – změřená tažná síla u varianty D [N],  $F_x$  – normálová síla působící v oblasti  $x$  [N],  $F_y$  – normálová síla působící v oblasti  $y$  [N],  $\bar{F}_B$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty B [N],  $\bar{F}_A$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty A [N].

## **E. Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí s brzdnu lištou a tažnou hranu**

Varianta E (obr. 3.22) je podobná variantě D s tím rozdílem, že materiál je v této variantě tažen přes tažnou hranu. U tohoto způsobu lze vypočítat koeficient tření ( $f_4$ ) na tažné hraně za brzdnu lištou za pomoci Eulerova vztahu a naměřené síly z předchozí varianty.



**Obr. 3.22** Varianta E – schéma tření mezi přidržovačem, tažnicí s brzdou lištou a tažnou hranou

Eulerův vztah (3.15):

$$F_2 = F_1 * e^{\alpha * f} \quad (3.15)$$

kde značí:  $F_2$  – tažná síla [N],  $F_1$  – protitažná síla [N]  $\alpha$  – úhel opásání [rad],  $f$  – koeficient tření [-].

Následně byl Eulerův vztah upraven, dosadila se změřená síla  $F_E$  a aritmetický průměr síly  $\bar{F}_D$ , kde se počítá s úhlem opásání na tažné hraně  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , rovnice se musela očistit o ohyb působící v oblasti tažné hrany, který lze spočítat z varianty B. Upravený vztah lze vyjádřit (3.16):

$$F_E = \bar{F}_D * e^{\frac{\pi}{2} * f_4} + ohyb \quad (3.16)$$

kde značí:  $F_E$  – změřená tažná síla u varianty E [N],  $\bar{F}_D$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty D [N],  $f_4$  - koeficient tření na tažné hraně [-].

Po upravení tohoto vzorce lze odvodit vzorec (3.17) pro výpočet koeficientu tření ( $f_4$ ), který vypadá následovně:

$$f_4 = \frac{2}{\pi} * \ln \left( \frac{F_E - (\bar{F}_B - \bar{F}_A)}{\bar{F}_D} \right) \quad (3.17)$$

kde značí:  $f_4$  – koeficient tření na tažné hraně [-],  $F_E$  – změřená tažná síla u varianty E [N],  $\bar{F}_D$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty D [N],  $\bar{F}_B$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty B [N],  $\bar{F}_A$  – aritmetický průměr tažné síly u varianty A [N].

### 3.5.6 Parametry geometrie pro výpočet koeficientů tření u jednotlivých tribologických zkoušek

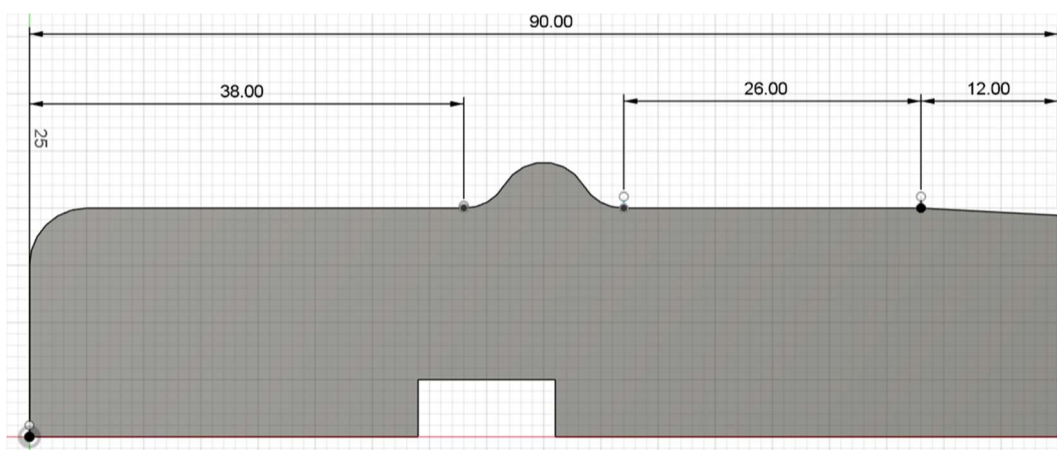
Aby bylo možné vypočítat jednotlivé koeficienty tření pro všechny varianty, tak bylo nutno definovat geometrii čelistí, která byla použita ve výpočtech. V tomto případě se jednalo o délku (a) a šířku (b) třecích ploch čelistí u varianty A.

Dále úhel opásání na tažné hraně, již zohledněn v kapitole 3.5.5, přes který se táhne pásek u varianty C, E.

Jako poslední je potřeba definovat délku za (x) a před (y) brzdou lištou, šířku (b) třecí plochy čelistí a samotný úhel opásání brzdové lišty, již zohledněn v kapitole 3.5.5, použitý u varianty D. Vše je přehledně zobrazeno v tabulce 9, geometrie varianty D na obr. 3.23.

**Tabulka 9:** Vstupní hodnoty do výpočtů

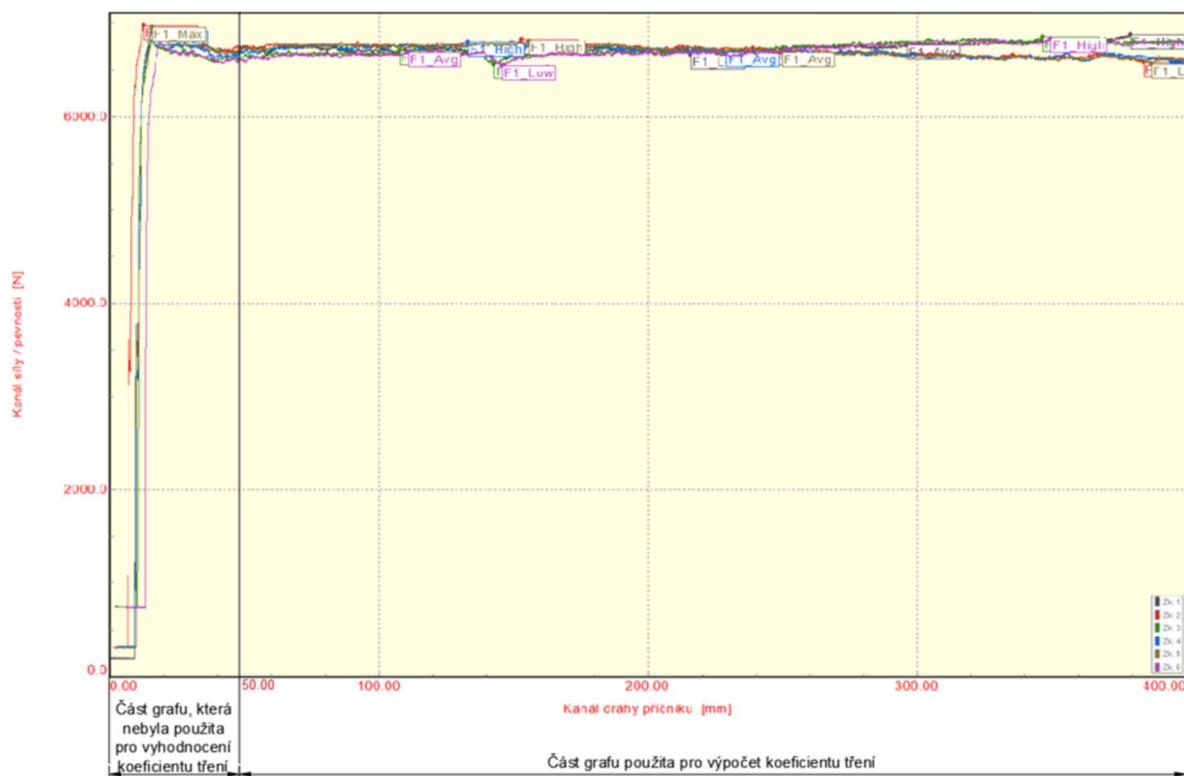
Vstupní parametry geometrie pro výpočty koeficientů tření	
<b>Varianta A:</b>	
délka a	78 mm
šířka b	45 mm
<b>Varianta C:</b>	
úhel opásání	$\pi/2$ rad
<b>Varianta D</b>	
délka y	38 mm
délka x	26 mm
šířka b	45 mm
úhel opásání	$\pi$ rad
<b>Varianta E:</b>	
úhel opásání	$\pi/2$ rad



**Obr. 3.23** Geometrie tažnice s brzdou lištou

### 3.5.7 Vypočtené hodnoty

Poté, co byly identifikovány parametry geometrie čelistí pro jednotlivé varianty a definována hodnota kontaktního tlaku, bylo možné využít naměřených hodnot, kde pro výpočty je vyhodnocovaná část grafu až od dráhy příčnicku 50 mm, kde tento způsob vyhodnocení byl proveden za účelem eliminace možného zkreslení výsledků, které mohlo nastat na začátku měření. Maximální síla za touto hranicí je značena F1\_High (zachycuje graf 3).



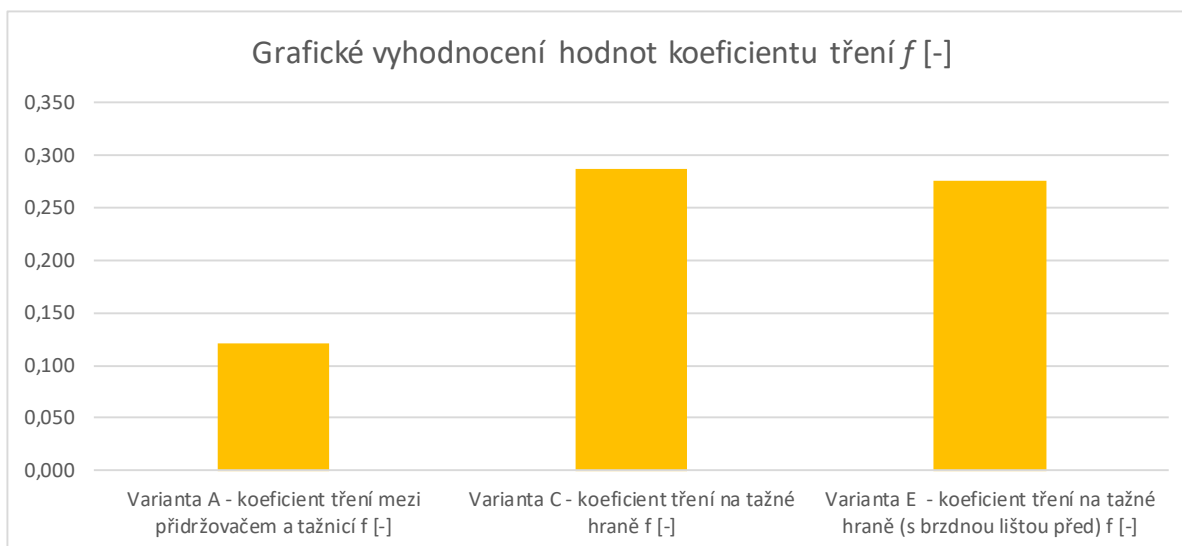
**Graf 3:** Vyhodnocovaná část grafu u měření (varianta C)

S využitím síly F1\_High a odvozených vzorců bylo následně možné vypočítat jednotlivé koeficienty tření.

Vypočtené koeficienty tření jsou shrnuté v tabulce 10 a graficky zobrazeny v grafu 4, kde u varianty A byl spočítán koeficient tření ( $f_1$ ) působící mezi přidržovačem a tažnicí a u variant C a E koeficienty tření ( $f_3, f_4$ ) působící na tažných hranách. Bohužel však nebylo možné spočítat koeficient tření u varianty D, kde bylo zjištěno, že byla nastavena nízká hodnota kontaktního tlaku, a z toho důvodu došlo ke zvednutí zkušebních čelistí. Tento fakt zkreslil měření tak, že přesnou hodnotu koeficientu tření ( $f_3$ ) působícího na brzdné liště nebylo možné dopočítat.

Tabulka 10: Vypočtené hodnoty koeficientu tření

Varianta	Číslo měření	F1_High [N]	Koeficient tření $f$ [-]	
A	1	3399	0,121	
	2	3403	0,121	
	3	3385	0,121	
	4	3492	0,124	
	5	3392	0,121	
	6	3396	0,121	
	$\bar{x}$	3411	0,121	
	s	40	0,001	
B	1	4832	Varianta určená pro odečtení sil potřebných k ohnutí pásků u variant C,D, E.	
	2	4902		
	3	4863		
	4	4892		
	5	4885		
	6	4957		
	$\bar{x}$	4888		-
	s	42		-
C	1	6877	0,292	
	2	6826	0,286	
	3	6849	0,289	
	4	6803	0,284	
	5	6812	0,285	
	6	6835	0,287	
	$\bar{x}$	6834	0,287	
	s	27	0,003	
D	1	5339	Koeficient tření není možné z měření vypočítat z důvodu nastaveného malého kontaktního tlaku - došlo ke zvednutí zkušebních čelistí.	
	2	5385		
	3	5365		
	4	5370		
	5	5328		
	6	5374		
	$\bar{x}$	5360		-
	s	22		-
E	1	9921	0,289	
	2	9623	0,266	
	3	9732	0,275	
	4	9901	0,288	
	5	9604	0,265	
	6	9713	0,273	
	$\bar{x}$	9749	0,276	
	s	135	0,010	



**Graf 4:** Grafické vyhodnocení hodnot koeficientu tření – varianta A, C, E



## 4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Celý proces měření popsany v této diplomové práci probíhal při stabilních podmínkách. Pro testy byla zvolena hlubokotažná IF ocel o konzistentních mechanických vlastnostech, které byly ověřeny statickou zkouškou tahem, tak jak je uvedeno v kapitole 3.2. Testovaný materiál vykazoval také vysokou kvalitu povrchu kontrolovanou pomocí měření drsnosti ve směru kolmém a rovnoběžném na směr válcování (kapitola č. 3.3). Pro eliminaci povrchových nečistot byly vzorky plechů odmaštěny a následně na ně byla aplikována konstantní vrstva pracího oleje o hodnotě  $1,5 \text{ g/m}^2$  (kapitola č. 3.4). Stabilní technologické podmínky při tribologickém testu (konstantní přidržovací tlak 4 MPa a rychlost posuvu při protahování 10 mm/s) byly zajištěny hydraulickým agregátem s PID regulací a frekvenčním měničem využívaným pro pohon zařízení SOKOL 400.

Na základě naměřených sil a znalostí geometrie jednotlivých čelistí, nezbytných pro protažení testovacích pásků, bylo možné vypočítat síly nutné k ohnutí zkušebního pásku (varianta B), koeficienty tření  $f$  mezi čelistmi (varianta A) a na tažné hraně (varianta C a E). Popis měření a způsob vyhodnocení koeficientu tření je uveden v předchozích kapitolách. Z naměřených a vypočítaných hodnot koeficientu tření je patrné, že jednotlivé koeficienty se výrazně liší v oblasti přidržovače a oblasti tažné hrany nástroje. Vypočítaná hodnota koeficientu tření  $f = 0,12$  v oblasti přidržovače odpovídá běžně uváděným tabulkovým hodnotám a tato hodnota je také často používána i jako parametr definující tribologické procesy při numerických simulacích technologie hlubokého tažení.

Při výpočtů koeficientu tření na tažné hraně (varianty C a E) bylo zjištěno, že číselné hodnoty jsou velmi podobné. Nezáleží tedy na tom, zda byla použita brzdná lišta, či nikoliv. Tento fakt může sloužit jako ověření správnosti výpočtů, protože lze předpokládat, že podmínky na tažné hraně by měly být pro obě varianty identické. Oproti variantě A, která modeluje podmínky v oblasti přidržovače, bylo zjištěno, že velikost koeficientu tření na tažné hraně je výrazně vyšší. Tato hodnota je více jak dvojnásobná (nárůst cca 2,3 x oproti koeficientu tření v oblasti přidržovače).

Koeficient tření na samotné brzdící liště se bohužel nepodařil vypočítat. Při výpočtu bylo zjištěno, že vypočítané hodnoty dosahují extrémně malých hodnot (koeficient tření v řádu tisícin), které neodpovídají realitě. Při opětovné kontrole vlastního procesu měření bylo zjištěno, že zvolený kontaktní tlak (4 MPa) a jemu odpovídající přitlačná síla 12,5 kN, není dostatečná pro to, aby došlo k úplnému uzavření nástroje. Z tohoto důvodu pak nedochází k vytvoření rovnoměrného kontaktního tlaku po celé ploše testovaného vzorku a tím je celý proces následného výpočtu zkreslen.

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo určit velikost koeficientu tření v různých oblastech tažného nástroje při použití hlubokotažného materiálu s ochrannou vrstvou ZnMg nanášenou žárovým ponorem. Tento materiál je v současné době používán jako alternativní (vývojový) materiál v rámci automobilového průmyslu pro výrobu pohledových dílů karoserie vozidel a znalost chování tohoto materiálu je důležitá zvláště pak pro definici numerických modelů simulace technologických procesů hlubokého tažení.

V teoretické části byly poskytnuty základní informace o materiálech využívaných pro hlubokotažné aplikace, provedena rešerše tažení s popisem konvenčních i nekonvenčních metod, využití přídržovače, tažných a brzdných lišt. Další kapitoly se věnovaly tribologickým procesům, zahrnující druhy tření, opotřebení, použitá maziva a metodiky stanovení koeficientu tření. Nedílnou součástí teoretické části byl též popis geometrických vlastností povrchů a statické zkoušky tahem, a to z důvodu, že drsnost povrchu a mechanické vlastnosti mají obrovský podíl na určení koeficientu tření a stabilizaci tribologických podmínek během procesů hlubokého tažení.

Experimentální část diplomové práce se specificky zaměřuje na různé scénáře, které mohou nastat z pohledu tribologických procesů během hlubokého tažení. Pro zjištění koeficientu tření bylo použito pět variant měření s různými druhy čelistí vyrobených z tvárné litiny GGG 70L, a to, aby bylo možné stanovit koeficienty tření mezi přídržovačem a tažníkem, na tažné hraně a brzdné liště. Testy byly prováděny při použití materiálu CR 180 BH ZM 40/40 E-O v kombinaci a aplikovaným pracím olejem ANTICORIT PL 3802 – 39 LV v množství  $1,5 \text{ g/m}^2$ .

Pro kontrolu stability procesu experimentálního měření bylo nutné provést měření mechanických vlastností a drsnosti povrchu zkoumaného materiálu. Tyto vlastnosti byly změřeny s pomocí testovacích zařízení umístěných na TU v Liberci, a to za účelem zajištění opakovatelnosti tribologických testů a potenciální stabilizaci podmínek tažení.

Z naměřených hodnot vyplývá, že velikost koeficientu tření nelze považovat za konstantní, tak jak je často předpokládáno u výpočtů hlubokého tažení, a jeho hodnota se výrazně mění podle sledované oblasti. V oblasti přidržovače byla naměřena hodnota koeficientu tření  $f=0,12$ , ale v oblastech tažné hrany byla tato hodnota více jak dvojnásobná, a to  $f=0,28$  až  $0,29$ . Tyto vysoké hodnoty koeficientu tření způsobují jednak velké opotřebení taženého nástroje a dále přímo ovlivňují vlastní proces hlubokého tažení výlisku, kdy může docházet k praskání výlisku důsledkem velkých tažných sil.

V průběhu experimentu bylo dále zjištěno, že hodnota běžně používané přidržovací síly (vycházející z předpokladu kontaktního tlaku 4 MPa) je v případě použití brzděné lišty nedostatečná a je nutno používat vyšších přidržovacích sil.

Dosažené výsledky v rámci diplomové práce lze využít pro další výzkum v oblasti tribologického testování materiálů s povrchovou vrstvou ZnMg a dále pak pro numerické simulace procesů hlubokého tažení.

## Použitá literatura

- [1] Volkswagen AG. (2019). Konzernnorm VW 50065: Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung - Werkstoffanforderungen. Wolfsburg: Volkswagen Aktiengesellschaft.
- [2] SOLFRONK, Pavel, Progresivní strojírenské materiály. Přednáška. Liberec: Fakulta strojní TUL, 2022-12-16
- [3] CLYNE, T. W. a CAMPBELL, J. E. Mechanisms of Plastic Deformation in Metals. Online. 1. Cambridge: Cambridge University, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/9781108943369.005>. [cit. 2024-04-25].
- [4] DAVIES, Geoffrey. Materials for Automobile Bodies. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [5] SIOSTRZONEK, René a STRZYŽ, Petr. Duplexní povlaky ocelových konstrukcí. Online. Tzbinfo. C2001-2024. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/15135-duplexni-povlaky-ocelovych-konstrukci>. [cit. 2024-04-27].
- [6] MARQUARD, Elizabeth a Heather LAMPMAN. ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming. B.m.: ASM International, 2006. ISBN 0-87170-710-1.
- [7] LENFELD, Petr. TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ - TAŽENÍ. Online. Technologie II. 2005. Dostupné z: [https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/09.htm](https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm). [cit. 2024-04-24].
- [8] TRACTON, Arthur A., ed. Coatings Technology Handbook. 3. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2005. ISBN 978-0-429-11964-4.
- [9] BHUSHAN, Bharat. Introduction to tribology. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [10] BAKALOVA, Totka, Povrchové úpravy. Přednáška. Liberec: Fakulta strojní TUL, 2023-04-28
- [11] George E. a Robert W. BRUCE, ed. Handbook of lubrication and tribology. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. ISBN 978-0-8493-2095-8.
- [12] KOLNEROVÁ. Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení. Disertační práce. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2005.

- [13] BLAŠKOVIC, Pavel; BALLA, Josef a DZIMKO, Marián. *TRIBOLÓGIA*. 1. Bratislava: Alfa, 1990.
- [14] Systém měření drsnosti - parametry drsnosti. Online. HOMMEL CS S.R.O. Jenoptik.cz. Dostupné z: [https://www.jenoptik.cz/files/094\\_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf](https://www.jenoptik.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf). [cit. 2024-04-24].
- [15] Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřící techniku Mytutoyo SJ 210. Bakalářská práce. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2013.
- [16] FOJTEK, Oldřich; POMYKALOVÁ, Lenka a BUDÍNSKÝ, Dominik. Kontrola drsnosti povrchu. Online. ELUC. 2015. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1102>. [cit. 2024-04-24].
- [17] Parametry drsnosti. Online. Jenoptik.cz. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>. [cit. 2024-04-24].
- [18] Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. Online. NOVÁK, Zdeněk. Mmspektrum.com. 2011. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu>. [cit. 2024-04-24].
- [19] TECHNICKÁ DOKUMENTACE. Online. MAREK, Marek a ŠŇUPÁREK, Petr. VŠB-TU OSTRAVA. Technická Univerzita Ostrava. Dostupné z: [https://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/td/01-textyVSB/005\\_Drsnost%20povrchu.pdf](https://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf). [cit. 2024-04-28].
- [20] NEUMANN, Karel a ŠIMÁČEK, Jiří. Měření drsnosti. Online. ELUC. 2015. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1571>. [cit. 2024-04-24].
- [21] Měření drsnosti povrchu - Drsnoměry Profiloměry. Online. PROINEX INSTRUMENTS, S.R.O. Proinex.cz. C2022-2024. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/a/mereni-drsnosti-povrchu-drsnomery-profilomery>. [cit. 2024-04-24].
- [22] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ISO 6892-1:2009, Kovové materiály – zkoušení tahem. 2010.
- [23] HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.

- [24] SOBOTKA, Jiří, Experimental Methods in Metal Forming. Přednáška. Liberec: Fakulta stojní TUL, 2023-12-08
- [25] MarSurf. Parametry drsnosti povrchu. Online. Klz.inshop.cz. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>. [cit. 2024-04-24].
- [26] SOLFRONK, Pavel, Technologie II. Přednáška. Liberec: Fakulta stojní TUL, 2018-12-05

## Seznam příloh

**Příloha č. 1** Vyhodnocení statické zkoušky tahem

**Příloha č. 2** Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta A

**Příloha č. 3** Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta B

**Příloha č. 4** Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta C

**Příloha č. 5** Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta D

**Příloha č. 6** Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta E



## Příloha č. 1 Vyhodnocení statické zkoušky tahem

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

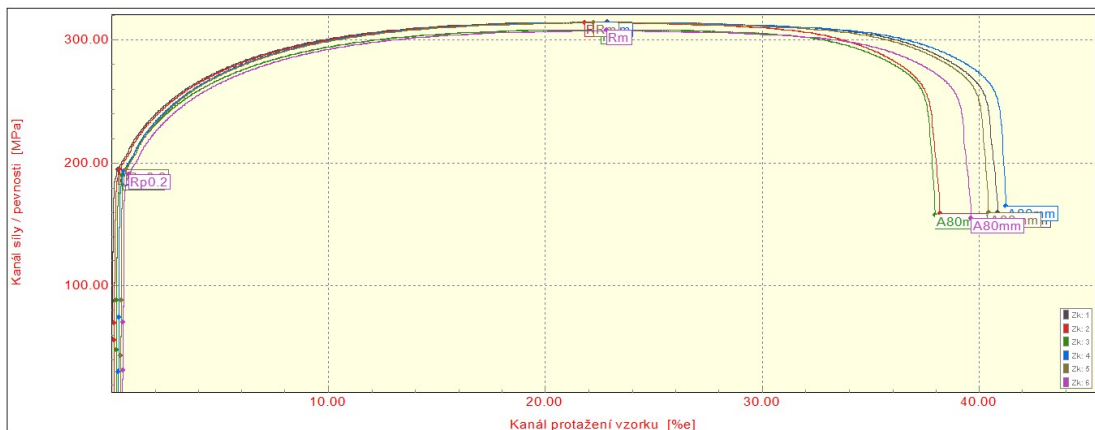
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH ZM 40/40 E - O  
Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : RT  
Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
Vypracoval : Bc. Tomáš Reichelt  
Datum provedení testu : 4.12.2023  
Pozn. :

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	b0 mm	a0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	20.040	0.707	194.68	314.42	22.69	40.78	205700
2	20.040	0.707	194.70	313.87	21.57	38.02	219574
3	20.040	0.707	190.11	308.37	22.21	37.70	210126
4	20.040	0.707	193.84	314.11	22.45	40.87	215914
5	20.040	0.707	194.76	313.81	21.71	39.96	213726
6	20.040	0.707	190.66	307.40	22.18	39.05	210251

Statistika	b0 mm	a0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Průměrná hodnota	20.040	0.707	193.13	312.00	22.14	39.40	212548
Směrodatná odchylka	0.000	0.000	2.16	3.21	0.43	1.36	4901
Minimální hodnota	20.040	0.707	190.11	307.40	21.57	37.70	205700
Maximální hodnota	20.040	0.707	194.76	314.42	22.69	40.87	219574



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

## Příloha č. 2 Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta A



### Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

#### Tribologie - Zkouška protahováním pásku

##### Vstupní hodnoty

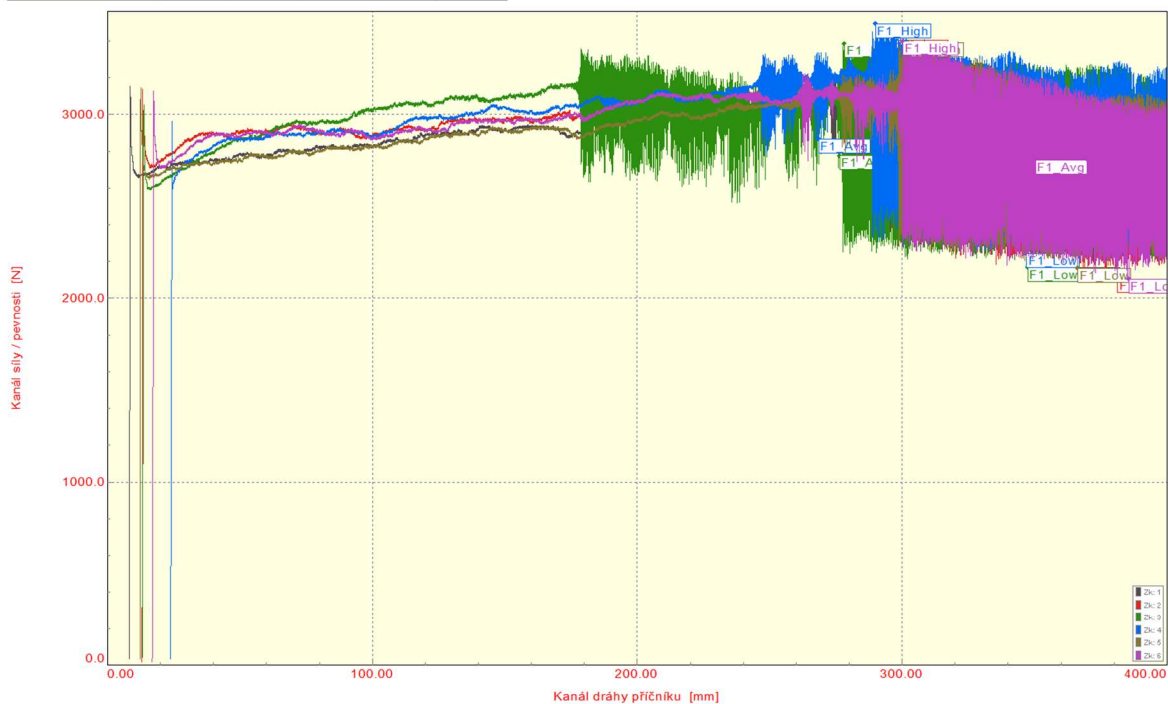
Testované mazivo : Anticorit PL 3802-39LV  
 Množství maziva :  $1,5 \pm 0,2$  g/m<sup>2</sup>  
 Testovaný substrát : ZM  
 Drsnost povrchu : Ra=1,197/1,190  $\mu$ m R<sub>Pc</sub>=79/87 1/cm  
 Materiál nástroje : GGG 70L - gehärtet  
 Kontaktní tlak : 4 MPa

Kontaktní plocha : 45 mm x 78 mm  
 Rychlost posuvu : 10 mm/s  
 Varianta : A  
 Teplota : 40°C  
 Rychlost snímání dat : 2 kHz  
 Měřená délka : 400 mm

##### Výstupní hodnoty

Zkouška	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
1	3399	2782	3399	2165	1233
2	3403	2754	3403	2105	1298
3	3385	2775	3385	2166	1219
4	3492	2867	3492	2242	1249
5	3392	2776	3392	2161	1231
6	3396	2749	3396	2101	1296

Statistika	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
Počet zkoušek	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	3411	2784	3411	2157	1254
Směrodatná odchylka	40	43	40	62	34



## Příloha č. 3 Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta B



### Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

#### Tribologie - Zkouška protahováním pásku

##### Vstupní hodnoty

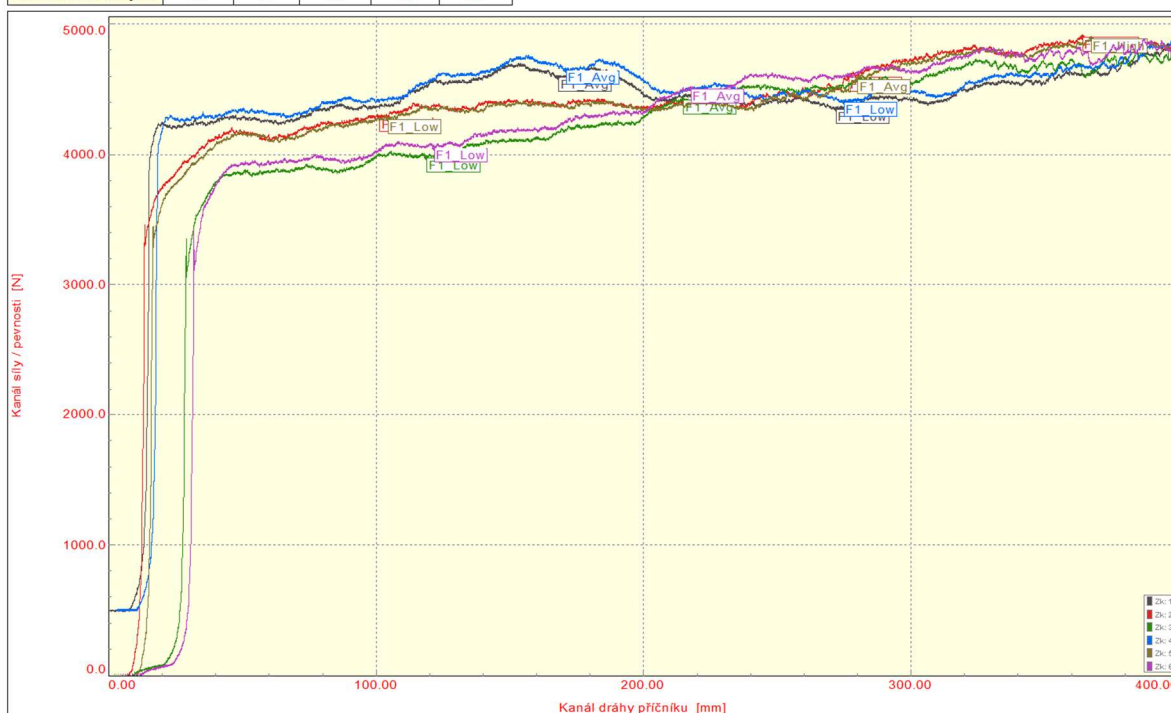
Testované mazivo : Anticorit PL 3802-39LV  
 Množství maziva :  $1,5 \pm 0,2$  g/m<sup>2</sup>  
 Testovaný substrát : ZM  
 Drsnost povrchu :  $R_a=1,197/1,190$   $R_{Pc}=79/87$  1/cm  
 Materiál nástroje : GGG 70L - gehärtet  
 Kontaktní tlak : 4 MPa

Kontaktní plocha : 45 mm x 78 mm  
 Rychlost posuvu : 10 mm/s  
 Varianta : B  
 Teplota : 40°C  
 Rychlost snímání dat : 2 kHz  
 Měřená délka : 400 mm

##### Výstupní hodnoty

Zkouška	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
1	4832	4588	4832	4344	488
2	4902	4592	4902	4282	620
3	4863	4418	4863	3972	890
4	4892	4645	4892	4398	494
5	4885	4576	4885	4267	618
6	4957	4503	4957	4049	907

Statistika	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
Počet zkoušek	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	4888	4554	4888	4219	670
Směrodatná odchylka	42	81	42	169	187



## Příloha č. 4 Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta C



### Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

#### Tribologie - Zkouška protahováním pásku

##### Vstupní hodnoty

Testované mazivo : Anticorit PL 3802-39LV

Množství maziva :  $1,5 \pm 0,2$  g/m<sup>2</sup>

Testovaný substrát : ZM

Drsnost povrchu : Ra=1,197/1,190  $\mu$ m Rp=79/87 1/cm

Materiál nástroje : GGG 70L - gehärtet

Kontaktní tlak : 4 MPa

Kontaktní plocha : 45 mm x 78 mm

Rychlost posuvu : 10 mm/s

Varianta : C

Teplota : 40°C

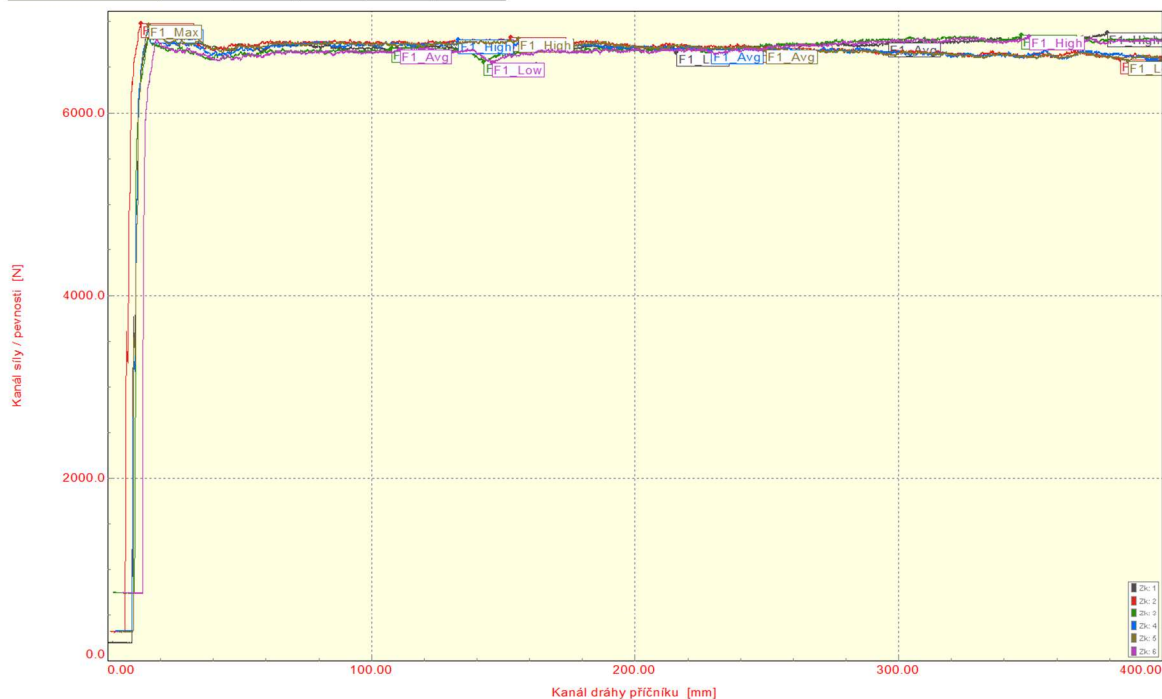
Rychlost snímání dat : 2 kHz

Měřená délka : 400 mm

##### Výstupní hodnoty

Zkouška	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
1	6877	6768	6877	6660	217
2	6975	6702	6826	6578	247
3	6849	6704	6849	6559	290
4	6911	6688	6803	6572	231
5	6961	6689	6812	6565	247
6	6835	6691	6835	6546	290

Statistika	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
Počet zkoušek	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	6901	6707	6834	6580	254
Směrodatná odchylka	58	31	27	41	30



## Příloha č. 5 Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta D



### Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

#### Tribologie - Zkouška protahováním pásku

##### Vstupní hodnoty

Testované mazivo : Anticorit PL 3802-39LV

Množství maziva :  $1,5 \pm 0,2$  g/m<sup>2</sup>

Testovaný substrát : ZM

Drsnost povrchu : Ra=1,197/1,190 μm R<sub>Pc</sub>=79/87 1/cm

Materiál nástroje : GGG 70L - gehärtet

Kontaktní tlak : 4 MPa

Kontaktní plocha : 45 mm x 78 mm

Rychlost posuvu : 10 mm/s

Varianta : D

Teplota : 40°C

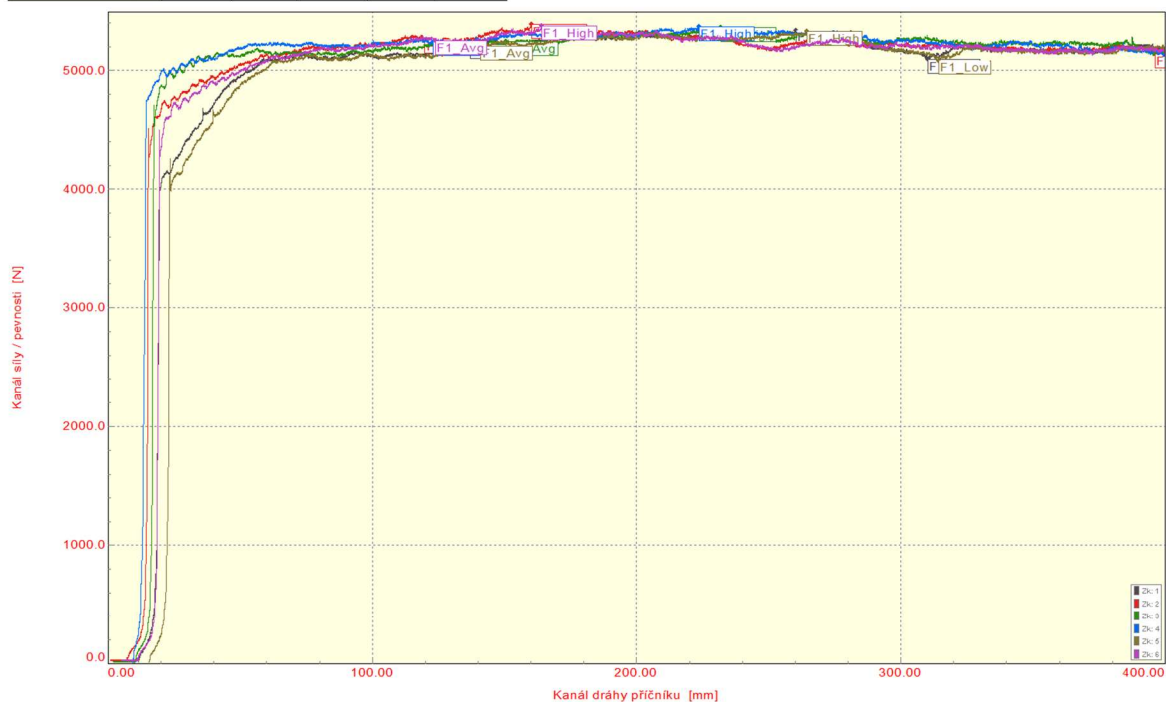
Rychlost snímání dat : 2 kHz

Měřená délka : 400 mm

##### Výstupní hodnoty

Zkouška	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
1	5339	5216	5339	5093	247
2	5385	5262	5385	5139	246
3	5365	5247	5365	5129	236
4	5370	5240	5370	5110	260
5	5328	5205	5328	5082	246
6	5374	5251	5374	5129	245

Statistika	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
Počet zkoušek	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	5360	5237	5360	5114	247
Směrodatná odchylka	22	22	22	23	7



## Příloha č. 6 Vyhodnocení tribologické zkoušky – varianta E



### Technická univerzita v Liberci Katadra strojírenské technologie

#### Tribologie - Zkouška protahováním pásu

##### Vstupní hodnoty

Testované mazivo : Anticorit PL 3802-39LV

Množství maziva :  $1,5 \pm 0,2$  g/m<sup>2</sup>

Testovaný substrát : ZM

Drsnost povrchu : Ra=1,197/1,190 μm R<sub>Pc</sub>=79/87 1/cm

Materiál nástroje : GGG 70L - gehärtet

Kontaktní tlak : 4 MPa

Kontaktní plocha : 45 mm x 78 mm

Rychlost posuvu : 10 mm/s

Varianta : E

Teplota : 40°C

Rychlost snímání dat : 2 kHz

Měřená délka : 400 mm

##### Výstupní hodnoty

Zkouška	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
1	9998	9709	9921	9498	422
2	9749	9483	9623	9344	279
3	9732	9671	9732	9409	324
4	9978	9690	9901	9479	422
5	9730	9464	9604	9325	278
6	9713	9651	9713	9390	323

Statistika	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	F1_Low N	delta_F1 N
Počet zkoušek	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	9817	9578	9749	9408	341
Směrodatná odchylka	133	102	135	70	66

