



## Bakalářská práce

# Vliv množství použitého maziva na index hloubení dle Erichsena

*Studijní program:*

*Autor práce:*

*Vedoucí práce:*

*Konzultant práce:*

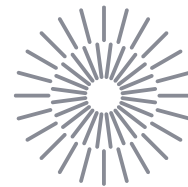
Strojírenství

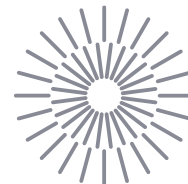
**Jakub Montag**

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.





## Zadání bakalářské práce

# Vliv množství použitého maziva na index hloubení dle Erichsena

*Jméno a příjmení:*

**Jakub Montag**

*Osobní číslo:*

S23000059

*Studijní program:*

Strojírenství

*Zadávající katedra:*

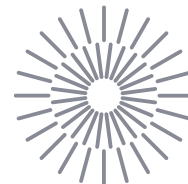
Katedra strojírenské technologie

*Akademický rok:*

2023/2024

### Zásady pro vypracování:

1. Význam tribologických procesů při tváření kovů (druhy tření, používaná maziva a způsob nánášení na povrch, atd.).
2. Přehled základních mechanických zkoušek pro testování plechů.
3. Pro zvolený materiál provést stanovení vlivu použitého maziva na index hloubení dle Erichsena.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Diskuze a závěr



<i>Rozsah grafických prací:</i>	obrázky, tabulky, grafy
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	Cca 30 stran textu
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

### Seznam odborné literatury:

- [1] BHUSHAN, Bharat. *Introduction to tribology*. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [2] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [3] 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.
- [4] ASM INTERNATIONAL, Howard KUHN a ASM INTERNATIONAL, ed. *Mechanical testing and evaluation*. [11. ed.], 1. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000. ASM handbook, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; Vol. 8. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [5] ČSN EN ISO 20482 (420406) *Kovové materiály - Plecha a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.

<i>Vedoucí práce:</i>	doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. Katedra strojírenské technologie
-----------------------	---

<i>Konzultant práce:</i>	Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
--------------------------	--------------------------

<i>Datum zadání práce:</i>	18. září 2023
<i>Předpokládaný termín odevzdání:</i>	2024

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

L.S.

doc. Ing. Iva Nováková , Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci 18. září 2023

## Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

10. května 2024

Jakub Montag

# Vliv množství použitého maziva na index hloubení dle Erichsena

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá působením tribologie při testování materiálů, konkrétně jde o vliv maziva na zkoušku hloubení dle Erichsena. Teoretická část se zaměřuje na druhy tření u technologie tváření. Dále jsou popsány základní druhy mechanických a technologických zkoušek pro testování plechů. Experimentální část bakalářské práce obsahuje samotnou zkoušku hloubením dle Erichsena dvou testovaných plechů. Byly použity plechy HX180 BD + Z100 MB a CR180 BH ZM 40/40E – O. Aplikované bylo mazivo ANTICORIT PL 3802-39 LV, nanesené množství (0,5, 1 a 1,5) g/m<sup>2</sup>. Zkouška byla provedena podle normy ČSN 420406, byly zjištěny výsledky maximální hloubky do porušení materiálu, tak i maximální působící síla od tažníku na plech. Závěrem jsou hodnoty síly a hloubky tažníku vyhodnoceny pomocí statistické metody ANOVA.

## Klíčová slova

Zkouška hloubením dle Erichsena, tribologie, hlubokotažný plech, metoda ANOVA

# Effect of the amount of lubricant used on the Erichsen index of excavation

## Abstract

The bachelor thesis deals with the effect of tribology in materials testing, specifically the effect of lubricant on the Erichsen deep-drawing test. The theoretical part focuses on the types of friction in forming technology. Furthermore, the basic types of mechanical and technological tests for sheet metal testing are described. The experimental part of the bachelor thesis includes the actual Erichsen countersink test of two tested sheets. The sheets used were HX180 BD + Z100 MB and CR180 BH ZM 40/40E - O. The lubricant applied was ANTICORIT PL 3802-39 LV, applied amount (0,5, 1 and 1,5) g/m<sup>2</sup>. The test was carried out according to the ČSN 420406 standard, the results of the maximum depth to material failure as well as the maximum force applied from the tensile bar to the sheet were determined. Finally, the values of force and depth of the tensile bar are evaluated using the statistical method ANOVA.

## Keywords

Erichsen cupping test, tribology, deep-drawing plate, ANOVA method



## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D., za jeho cenné rady, odbornou pomoc, ochotu a poskytnuté materiály na zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich neustálou podporu a důvěru.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část .....</b>	<b>14</b>
2.1	Význam tribologických procesů při tváření kovů .....	14
2.1.1	Druhy tření .....	14
2.1.2	Používaná maziva .....	17
2.1.3	Způsob nanášení maziva na povrch .....	18
2.2	Přehled základních mechanických zkoušek pro testování plechů.....	19
2.2.1	Zkouška tahem .....	19
2.2.2	Zkouška ohybem.....	21
2.2.3	Zkouška tvrdosti.....	21
2.3	Přehled základních technologických zkoušek pro testování plechů .....	22
2.3.1	Zkouška hloubením podle Erichsena .....	22
2.3.2	Zkouška kalíškovací.....	23
<b>3</b>	<b>Experimentální část.....</b>	<b>23</b>
3.1	Použité materiály.....	24
3.1.1	Vlastnosti materiálů .....	25
3.2	Příprava plechu na experiment .....	27
3.3	Samotné měření zkoušky podle Erichsena .....	29
3.3.1	Výsledky .....	31
<b>4</b>	<b>Vyhodnocení a diskuse výsledků .....</b>	<b>35</b>
4.1	Analýza rozptylu (ANOVA).....	35
4.1.1	Vyhodnocení maximální síly.....	36
4.1.2	Vyhodnocení polohy .....	36
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>38</b>
	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>39</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>42</b>

## Seznam zkratek

Zkratka	Popis zkratky	Jednotky
$A$	Tažnost materiálu	[%]
$A_g$	Homogenní tažnost	[%]
$E$	Modul pružnosti materiálu	[MPa]
$F$	Působící síla na vzorek	[N]
$F_0$	Třecí síla od valení	[N]
$F_s$	Testovací kritérium	[-]
$F_t$	Třecí síla	[N]
$H_0$	Nulová hypotéza	
$H_1$	Alternativní hypotéza	
HB	Tvrdosti podle Brinnela	
HDG	Označení pro materiál HX180 BD + Z100 MB	
HRB	Tvrdosti podle Rockwella s kulovým indentorem	
HRC	Tvrdosti podle Rockwella s kuželovým indentorem	
HV	Tvrdosti podle Vickerse	
$L$	Koncová měřená délka tělesa	[mm]
$L_0$	Počáteční měřená délka tělesa	[mm]
$N$	Normálová síla	[N]
$Q$	Síla od podložky	[N]
$R$	Smluvní napětí	[MPa]
$R_a$	Střední aritmetická hodnota drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_e$	Mez kluzu v tahu	[MPa]
$R_{eH}$	Horní mez kluzu v tahu	[MPa]
$R_{eL}$	Dolní mez kluzu v tahu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
RPC	Počet změřených vrcholků	[1/cm]
$R_z$	Střední hloubka drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_0$	Původní průřez zkušebního tělesa	[ $\text{mm}^2$ ]
$Z$	Zúžení	[%]
ZM	Označení pro materiál CR180 BH ZM 40/40E – O	
$h$	Poloha tažníku	[mm]
$p$	Nejmenší hladina významnosti	
$r$	Poloměr kola	[m]
$s$	Rameno valivého odporu	[m]
$\alpha$	Úhel sklonu roviny	[ $^\circ$ ]
$\alpha_s$	Hladina významnosti	

$\Delta L_{Rm}$	Prodloužení vzorku do meze pevnosti	[N]
$\Delta L$	Prodloužení vzorku	[mm]
$\varepsilon$	Poměrná deformace	[-]
$\mu$	Součinitel tření	[-]

# 1 Úvod

V automobilovém průmyslu se při výrobě součástí, ale i ve většině strojírenských podniků uplatňuje technologie tažení plechu. Při tomto procesu tažník protlačí do plechu určitou dutinu, která se nachází v tažnici. Protaháním plechu dutinou vznikne výrobek, označován jako výtažek.

Tento technologický postup má své zásady. Nejdůležitější je výběr materiálu s dobrými tažnými vlastnostmi. Zda je materiál vhodný pro určitou technologii tváření, konkrétně se bude jednat o zkoušku tváritelnosti, se zjišťuje řadou technologických zkoušek. Mezi tyto zkoušky lze zařadit například zkoušku lámavosti nebo zkouška zmáčknutím trubek, lemováním trubek nebo zkoušky drátů. O vhodnosti použití pásů nebo plechu pro tažení se používá zkouška hloubením podle Erichsena. Zkouška probíhá zjednodušeně tak, že se zkoumaný vzorek se upne mezi dvě stěny. Do plechu se poté vtlačuje tažník, který protahuje část plechu až do jeho porušení.

U technologie tažení, ale i u tváření obecně, je celkově důležitá tribologie. Věda, která zkoumá tření, opotřebení nebo mazání. Je tedy třeba zjistit, zda při výrobě nebo opracování plechů hraje použité mazivo nějakou roli například v potřebné síle působící od tvářících přístrojů na daný plech. Tuto otázku by měla zodpovědět tato práce.

Podle prvních odhadů, by použité mazivo mohlo mít na zkoušku hloubením podle Erichsena nějaký vliv, a to díky snížení tření mezi tažníkem a plechem. Použité mazivo by mohlo mít vliv na délku protažení materiálu do momentu, kdy se plech poruší nebo také maximální sílu mezi tažníkem a zkoušeným vzorkem potřebnou k porušení vzorku nebo jinak řečeno, překonání meze pevnosti plechu.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Význam tribologických procesů při tváření kovů

Tribologie je věda o tření, mazání a určování toho, co se děje mezi dvěma povrchy při relativním pohybu proti sobě. U procesu tváření se tribologie uplatňuje velmi často, a to hlavně u tváření za studena, například při válcování jsou v kontaktu válce s tvářeným materiálem, nebo protlačování, kde je ve styku tvářený materiál s průtlačnicí. Stejná situace nastává také u dalších druhů tváření: kování, ohýbaní nebo stříhání. Zkoumáním tribologie v procesu tváření může mít značné výhody, jako je zvýšení kvality tvářených výrobků, zlepšení produktivity nebo snížení opotřebení nástroje [1].

#### 2.1.1 Druhy tření

Třením se označuje síla, která zabraňuje pohybu dvou povrchů po sobě nebo znesnadňuje pohyb v kapalině či plynu, tedy třecí síla je reakcí tečné složky sil působící na těleso a působí vždy proti směru pohybu. Se třením se lze setkat na každodenní bázi, např. při chůzi, kdy se chodidlo dotýká podlahy nebo při řízení automobilu u jeho zrychlení nebo zatáčení. Důležitou roli hraje tření i v procesu tváření, kde se povrchy o sebe také velmi často třou. Tření lze pak rozdělit na několik skupin jako je statické, kinetické, valivé a kapalné [2, 3].

#### **Statické**

Statické tření se objevuje, když jsou objekty v klidu, což znamená například, že pokud bude těleso na nakloněné rovině s malým úhlem sklonu a bude na něj působit gravitační síla, těleso díky statickému tření zůstane v klidu, viz obr. 2.1. Tření mezi povrchy se lze vyjádřit pomocí součinitele tření  $\mu$  a závisí na materiálech pohybujících se těles. Hodnoty součinitele tření pro suché materiály se obvykle pohybují od 0,3 do 0,6 [4]. Občas je toto tření nazýváno Kolumbovské. Vztah pro výpočet třecí síly je dán vztahem:

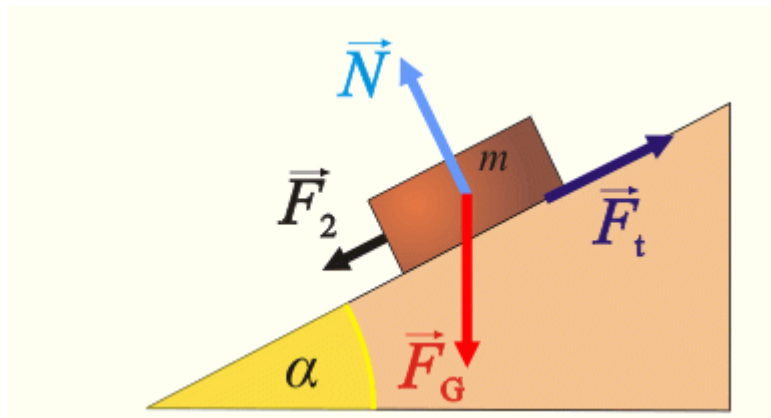
$$F_t = \mu \cdot N \quad (2.1)$$

Kde:

$F_t$  ... Třecí síla [N]

$\mu$  ... Součinitel tření [-]

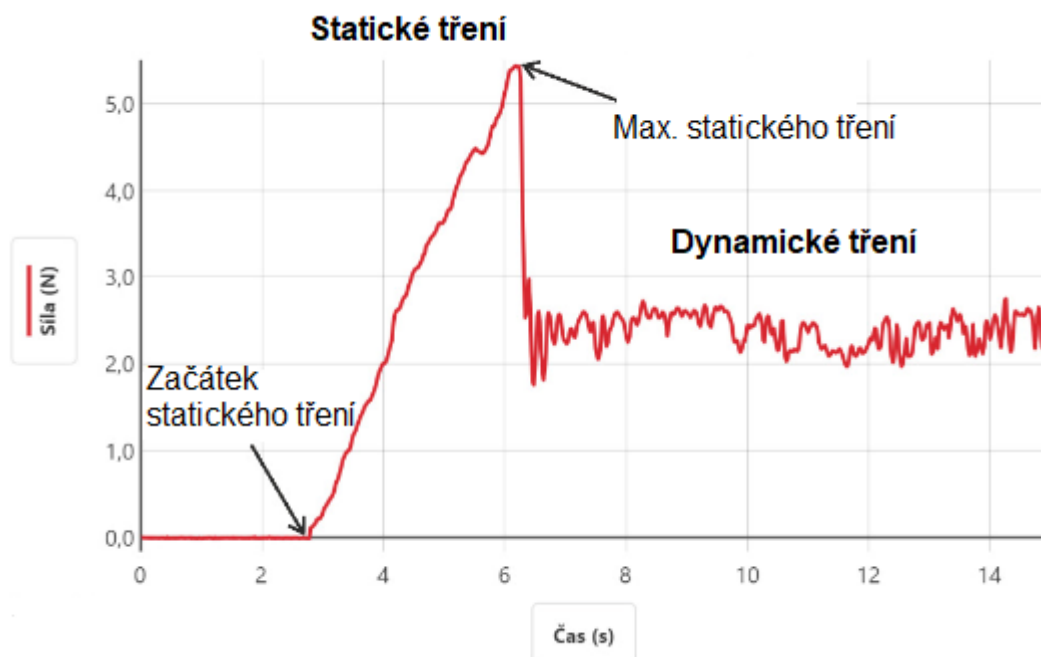
$N$  ... Normálová síla [N]



Obr. 2.1 Silové poměry na nakloněné rovině [5]

## Dynamické

Pokud se použije příklad z minulé ukázky tělesa na nakloněné rovině (obr. 2.1), tak když úhel sklonu roviny  $\alpha$  překoná kritickou hodnotu, těleso se v důsledku gravitační síly začne pohybovat. V tomto případě se už nejedná o statické tření, ale o tření dynamické, resp. kinetické. Z pravidla je koeficient špatně měřitelný a u kinetického tření je vždy menší než u statického, jak je zobrazeno na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Relace mezi statickým a dynamickým třením [6]

## Valivé

Valivé tření vzniká ve chvíli, kdy se těleso kruhového tvaru začne valit po podložce. Valivé tření nebo také valivý odpor si lze tedy představit jako překážku, která se stále odvaluje před valícím se tělesem, což je znázorněno na obr. 2.3 jako síla  $Q$  a velikost  $s$  mezi silami  $N$  a  $Q$ . Toto tření se velice často uvažuje například u valivých ložisek, ozubených kol nebo z běžného života vše, co se odvaluje jako jsou třeba kola u jízdního kola nebo u aut. Výpočet třecí síly je následující:

$$F_0 = s \cdot \frac{N}{r} \quad (2.2)$$

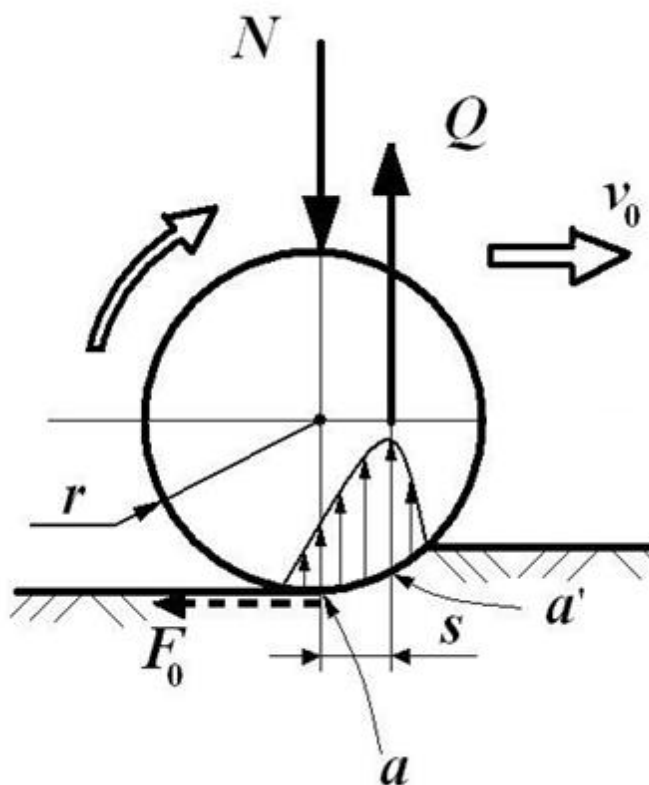
Kde:

$F_0$  ... Třecí síla od valení [N]

$N$  ... Normálová síla [N]

$s$  ... Rameno valivého odporu [m]

$r$  ... Poloměr kola [m]

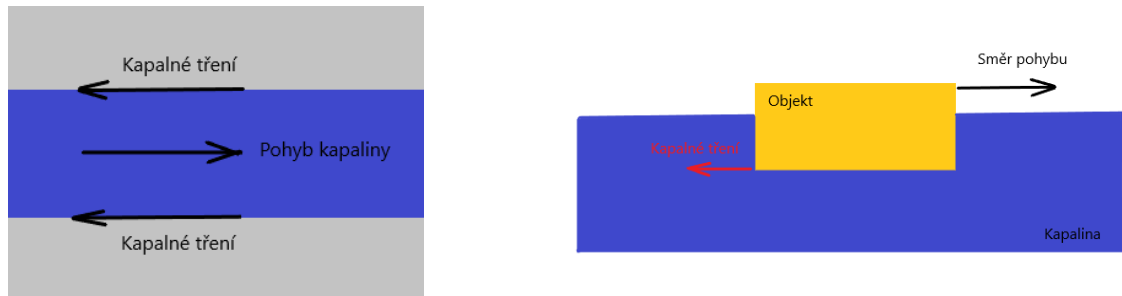


Obr. 2.3 Odpor proti valení [7]



## Kapalné

Kapalné tření je odpor pohybu, které se vyskytuje buď v samotné kapalině nebo odpor jiného média pohybující se tekutinou. Proto se kapalné tření rozděluje na 2 druhy. Prvním je vnitřní tření, které je charakterizováno interakcí molekul kapaliny. Druhým druhem je vnější, což je interakce mezi kapalinou a jiným hmotným objektem. [8]



**Obr. 2.4** Typy kapalného tření (levý obrázek ukazuje vnitřní tření a pravý obrázek ukazuje vnější tření)

### 2.1.2 Používaná maziva

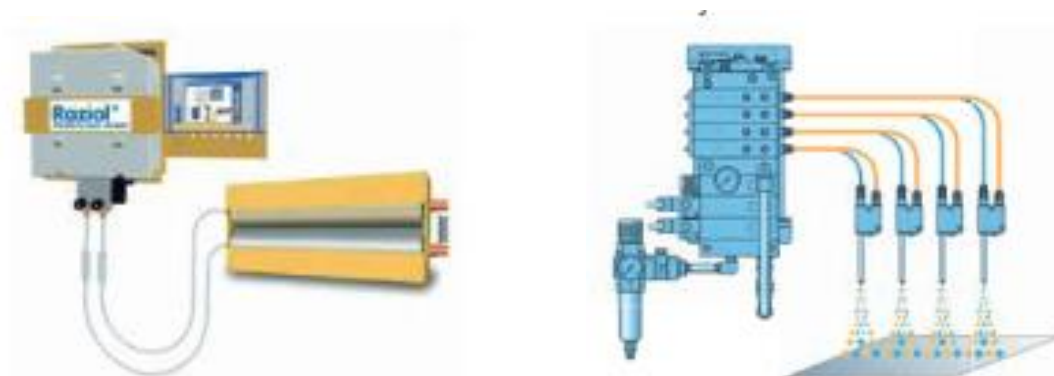
Maziva jsou důležitou součástí strojírenské výroby, používají se například při procesu tváření nebo obrábění. Mají několik úkolů, mezi ně patří zabezpečení odvodu tepla, zbavování se nečistot, ochrana proti korozi nebo snížení tření mezi dvěma povrchy, a tím pádem mohou například zvýšit výkon stroje, prodloužit životnost a spolehlivost zařízení, zlepšit kvality povrchu a přesnosti rozměrů. [9, 10]

Vybrání toho správného maziva není tak zcela jednoduchou záležitostí. Existuje totiž mnoho druhů maziva a lze je rozdělit podle skupenství. První skupinou jsou nejpoužívanější tekutá maziva, kam patří mazací oleje nebo obráběcí tekutiny. Do další kategorie náleží plastická maziva, sem můžeme zařadit třeba mazací tuky. Další třídou jsou pevná maziva, která zastupuje třeba grafit. Poslední skupinu uzavírají plynná maziva, do kterých se řadí třeba i vzduch. Faktorů pro výběr je mnohem více, například aplikace nebo provozní podmínky, kde bude mazivo využíváno. [9, 11]

Maziva v procesu tváření se používají hlavně pro tváření za studena proto, aby se snížilo tření mezi výrobkem a nástrojem a také z důvodů, které byly popsány v prvním odstavci této kapitoly. Používají se především maziva na bázi olejů nebo vody, která se mohou také ještě upravit pomocí přísad neboli aditiv, jako je například grafit. Mohou se ale také použít maziva na plastické nebo tuhé bázi. U tváření za tepla se maziva v takové míře jako u tváření za studena nevyskytují, jelikož tření mezi nástrojem a strojem není tak velké. Přesto jsou případy, kdy mazivo lze využít, pak se používá stejné mazivo jako u tváření za studena.

## 2.1.3 Způsob nanášení maziva na povrch

V procesu tváření se dá způsob nanášení maziva na povrch rozdělit do dvou kategorií. První možnost je nanést mazivo ručně, například pomocí ubrousku, následně přístrojem určit danou tloušťku kapaliny ulpívající na povrchu vzorku. Druhá varianta, která je mnohonásobně nákladnější, ale přesnější a spolehlivější, nebo s možností nanášet třeba i více druhů olejů vedle sebe je použít stroj. Tyto stroje lze ještě rozdělit na kontaktní a bezkontaktní nanášení maziva viz. obr. 2.5. [12, 13, 14]



**Obr. 2.5** Stroje pro kontaktní (levý obrázek) a bezkontaktní nanášení maziva na povrch (pravý obrázek) [12]

Kontaktní stroje využívají pro nanášení válce, kam se mazivo absorbuje a tím je kontaktně nanášeno na polotovar, který mezi válci prochází. Tímto způsobem lze nanášet, jak olej, tak emulze s maximální viskozitou  $180 \text{ mm}^2/\text{s}$ , za použití tloušťky plechu až  $10 \text{ mm}$  a více než  $1,5 \text{ g}/\text{m}^2$  množství. Pro bezkontaktní nanášení se využívají trysky, ve kterých se za pomoci tlakového vzduchu rozvádí nosné medium. U této varianty se dá také použít olej nebo emulze s max. viskozitou  $180 \text{ mm}^2/\text{s}$ , s tloušťkou plechu  $1 \text{ mm}$  až  $10 \text{ mm}$  a aplikovaném množství ( $0,5$  až  $5$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ . Tento způsob má výhodu v tom, že lze mazivo nanášet více druhů maziva, a to i v obrazcích (neboli parciálně), to je zobrazeno na obr. 2.6. [12, 13, 14]



**Obr. 2.6** Možnosti nanášení oleje [12]

## 2.2 Přehled základních mechanických zkoušek pro testování plechů

Pro zjištění fyzikálních vlastností kovů, jako je například modul pružnosti, přetvoření nebo tvrdost, se používají mechanické zkoušky. Existuje mnoho druhů těchto zkoušek, v této kapitole je uveden přehled těch základních, které lze uplatnit při testování plechů.

### 2.2.1 Zkouška tahem

Je to statická (tzn. konstantním nebo pomalu se vzrůstajícím zatížením), normalizovaná zkouška podle ČSN EN ISO 6892-1, kdy se zkušební těleso o konkrétních rozměrech a jednoduchého průřezu (nejčastěji kruhového nebo obdélníkového) upne do čelistí zkušebního stroje. Čelisti se poté začnou určitou rychlostí roztahovat, a tím pádem se začne roztahovat, resp. prodlužovat i zkušební těleso. Tento proces trvá do doby, kdy se vzorek zcela přetrhne. Trhací zařízení (obr. 2.7) mezitím na zapisovači (u starších zařízení) nebo do paměti počítače ukládá závislost působící síly  $F$  a protažení vzorku  $\Delta L$  (tyto hodnoty se poté podle normy přepočítají na normované hodnoty smluvního napětí  $R$  a poměrné deformaci  $\varepsilon$ , viz rovnice 2.3 a 2.4). Pomocí vykresleného diagramu zobrazeném na obrázku 2.8 lze následně zjistit, základní vlastnosti materiálu, jako je například mez kluzu  $R_e$ , mez pevnosti  $R_m$  nebo modul pružnosti  $E$ , což je směrnice přímky, kde platí Hookův zákon. Další zjištěné vlastnosti mohou být deformační charakteristiky, jako je tažnost  $A$  (resp. homogenní tažnost  $A_g$ , která se počítá pro hodnotu meze pevnosti, viz. rovnice 2.5), případně zúžení  $Z$ . [15]

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (2.3)$$

Kde:

$R$  ... Smluvní napětí [MPa]

$F$  ... Síla působící na vzorek [N]

$S_0$  ... Původní průřez zkušebního tělesa [mm<sup>2</sup>]

$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2.4)$$

Kde:

$\varepsilon$  ... Poměrná deformace [-]

$L_0$  ... Původní délka měřeného tělesa [mm]

$L - L_0$  ... Přírůstek délky  $L_0$  (o kolik se vzorek protáhne) [mm]

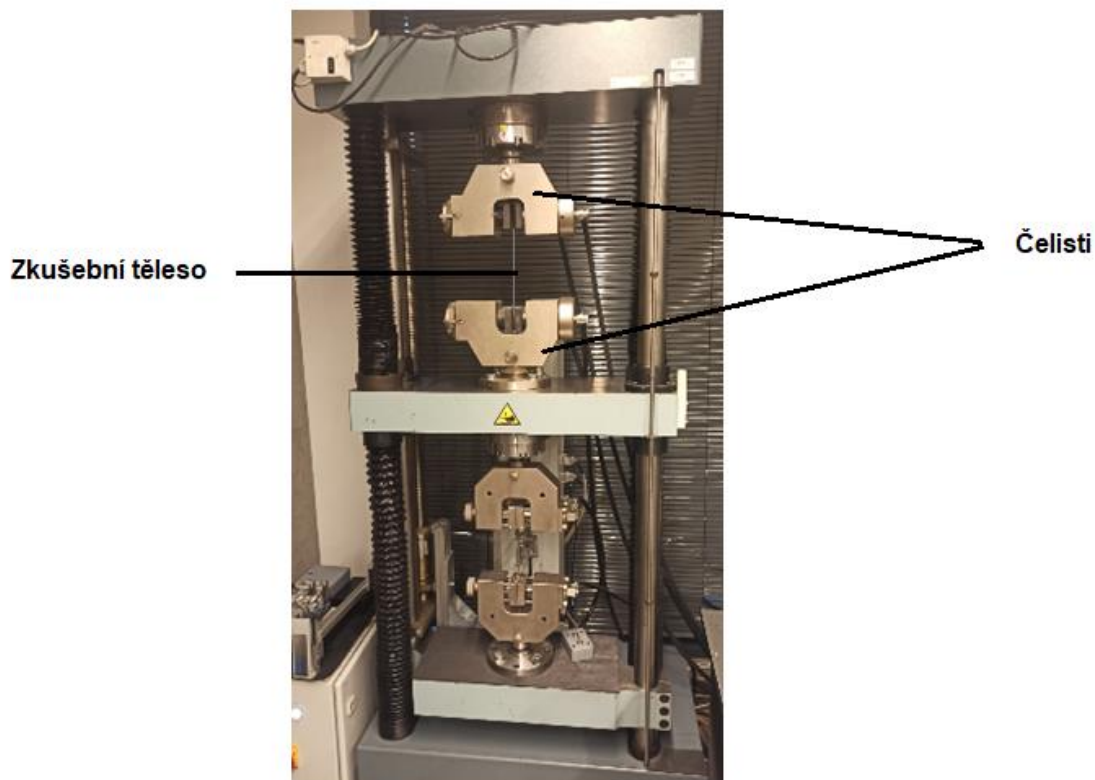
$$A_g = \frac{\Delta L_{Rm}}{L_0} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Kde:

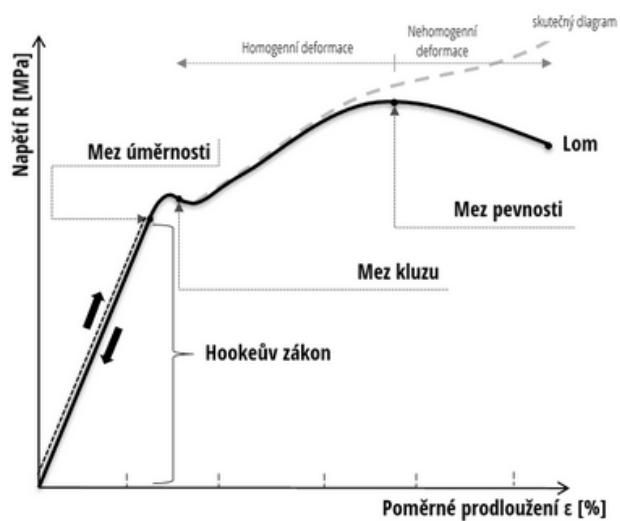
$A_g$  ... Homogenní tažnost [%]

$\Delta L_{Rm}$  ... Délka do meze pevnosti [mm]

$L_0$  ... Původní délka měřeného tělesa [mm]



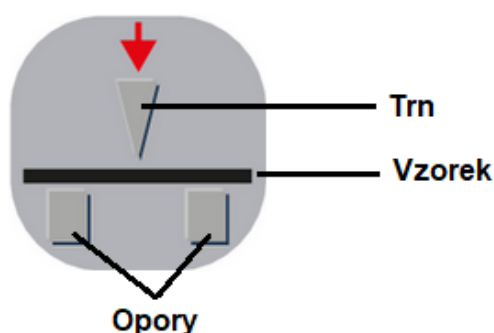
Obr. 2.7 Trhací zařízení



Obr. 2.8 Tahový diagram [16]

## 2.2.2 Zkouška ohybem

Po zkoušce tahem je tato mechanická zkouška v praxi používána nejvíce. Využívá se pro širokou škálu materiálů, jako mohou být slitiny kovů, plasty, dřevo, ale hlavně pro křehké materiály jako jsou litiny nebo konstrukční keramiky z důvodu špatného měření při zkoušce v tahu. Existují totiž 3 druhy zkoušky ohybem, a to dvoubodovým ohybem, třibodovým ohybem a čtyřbodovým ohybem, v praxi se však nejčastěji používá zkouška 3 bodovým ohybem, jehož schéma je zobrazeno na obr. 2.9. [17]



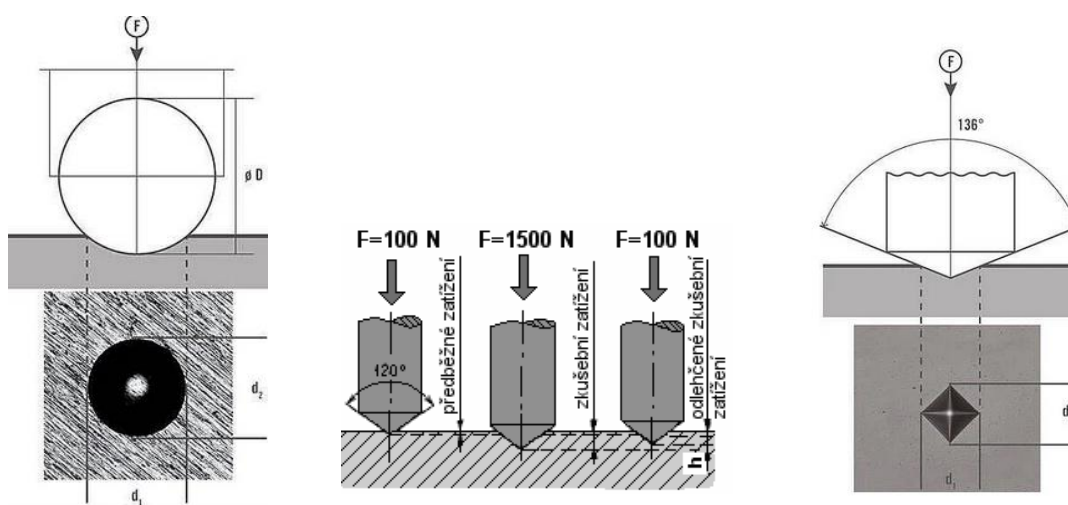
*Obr. 2.9 Zkouška třibodovým ohybem [17]*

Tato zkouška se provádí na tzv. univerzálních strojích, což mohou být lis, vřetenové stroje pro zkoušku tahu nebo tlaku. Princip zkoušky třibodovým ohybem popsán pomocí obrázku 2.9. Je zřejmé, že vzorek většinou kruhového nebo tyčového průřezu se uloží na dvě opory. Trn poté působí silou uprostřed zkušební tyč. Zkouška je ukončena poté, kdy se vzorek přetrhne. Zkouška stanovuje pružnost v ohybu, lomové pevnosti a lomové odolnosti zkoumaného vzorku a je popsána normou ISO 178. [17, 18, 19, 20]

## 2.2.3 Zkouška tvrdosti

Tvrdot se definuje jako odolnost materiálu proti vtlačení jiného tvrdšího tělesa. Tento parametr se ale nedá měřit napřímo, je tedy potřeba odvodit z měřených veličin, jako například ze zkušebního zatížení, hloubky vtisku nebo plochy vtisku. Proto existuje mnoho druhů zjišťování tvrdosti. Ty nejpoužívanější jsou ale jen 3 a to ty statické, mezi které patří zkouška tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse. U zkouška podle Brinella (HB) se do zkoumaného materiálu vtlačuje kulička o přesně daném průměru, zatěžující síle a době setrvání. Vyhodnocení zkoušky se provádí pomocí dvou na sebe kolmých průměrů vytvořeného vtisku. Pokud tzv. indenter (vtlačované těleso) zanechá větší vtisk, tím je zkušební díl měkčí. Zkouška podle Brinella je ujednocena normou ČSN EN ISO 6506-1. [21, 22], U zkoušky podle Rockwella se vyhodnocuje hloubka vtisku za předem daném zatížení. Zkouška se provádí

ve 3 fázích. 1. fází se indentor přivede do kontaktu s materiálem a tím nastaví regernční rovinu. Ve 2. fází se na indentor aplikuje dané zatížení a ve 3. fází se zatížení nechá určitou dobu působit. Z tohoto vyplývá, že čím hlouběji indentor vnikne do zkoumaného dílu, tím je materiál měkčí. Podle typu materiálu se u této zkoušky lze setkat s různými typy indentor, může se vtlačovat diamantový kužel (HRC) nebo kulička (HRB). Zkouška podle Rockwella je popsána normou ČSN EN ISO 6508-1. [21, 23, 25] U poslední zkoušky podle Vickerse je do zkušebního vzorku vtlačován diamantový jehlan za předem definované síly a doby setrvání. Pro vyhodnocení se potom měří velikosti úhlopříček vtlačovaného jehlanu (HV). Zkouška podle Vickerse je popsána normou ČSN EN ISO 6507-1. [21, 24] Tyto zkoušky jsou zobrazeny na obr. 2.10.

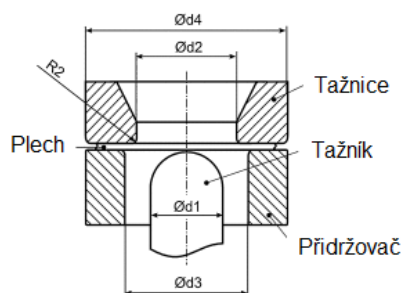


**Obr. 2.10** Zkoušky tvrdosti podle Brinella (levý obrázek) [22], podle Rockwella (prostřední obrázek) [25], podle Vickerse (pravý obrázek) [24]

## 2.3 Přehled základních technologických zkoušek pro testování plechů

### 2.3.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

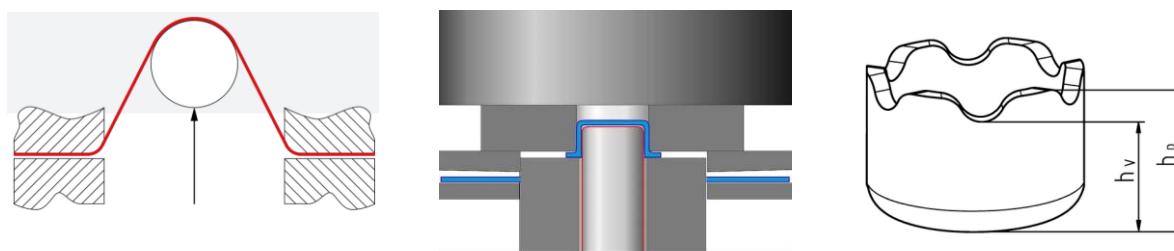
Tato zkouška patří mezi zkoušky tvárnosti za studena a je nejpoužívanější metodou pro stanovení tažnosti plechů a pásů. Zkouška se vykonává tak, že zkoumaný vzorek plechu se sevře mezi tažnici a přidržovač. Do povrchu sevřeného plechu se poté pomalu vtlačuje razidlo nebo také tažník zakončený ocelovou koulí, jak je zobrazeno na obr. 2.11. Zkouška se ukončí poté, kdy na zkušebním plechu se začnou objevovat první trhlinky. Výsledkem je síla působící na razidlo a naměřená dráha tažníku  $h$ , která se měří od bodu doteku razníku až do natržení vzorku plechu. Zkouška podle Erichsena je normalizovaná a je popsána normou ČSN 420406. [20, 26]



**Obr. 2.11** Zkouška podle Erichsena [27]

### 2.3.2 Zkouška kalíškovací

Zkouška, při které se stanovuje tvářecí vlastnosti plechů pro tváření. Používá se pro zjištění náchylnosti plechů na tvoření cípů při protlačování. Pro vyhodnocení zkoušky se poté vyjádří procentuálně rozdíl výšek mezi horní a dolní úrovní cípu, viz. obr. 2.12 pravý. Pro vytvoření kalíšku se používají různé tvary koncového tažníku, například kulový (zkouška podle Fukui JIS Z 2249, viz. obr. 2.12 levý) nebo válcový, který je zobrazen na obr. 2.12 uprostřed (neboli také nazvaná Swiftová kalíškovací zkouška). [28, 29, 30]

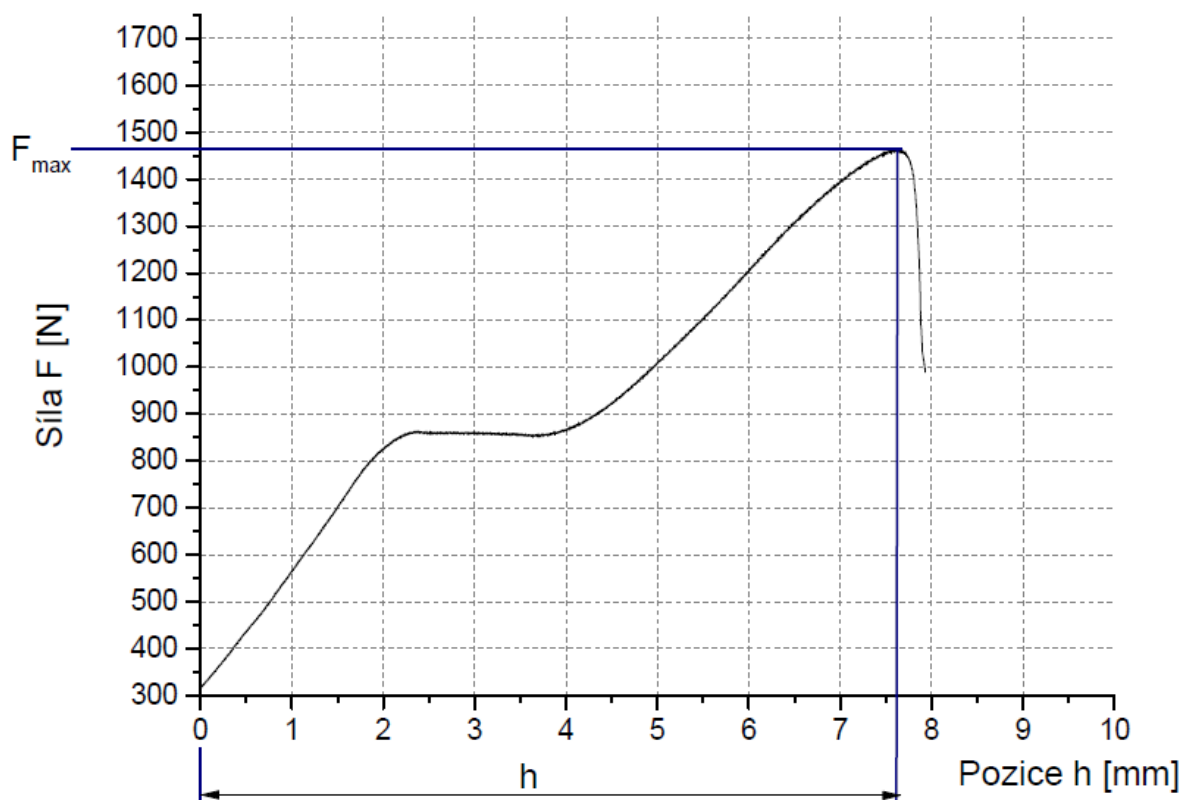


**Obr. 2.12** Zkouška kalíškovací podle Fukui (levý) [30], Swiftová zkouška (uprostřed) [29], vzorek pro vyhodnocení zkoušky [28]

## 3 Experimentální část

Práce má za cíl zjistit, zda množství maziva ANTICORIT PL 3802-39 LV nanesené na 2 typy plechu HDG a ZM má vliv na zkoušku hloubením podle Erichsena dle normy ČSN EN ISO 20482. Zkouška byla provedena na biaxiálním zařízení, které se nachází přímo na Technické univerzitě v Liberci (viz. obr. 3.2). Ze zkoušky se budou vyhodnocovat 2 parametry vycházející z grafu naměřených hodnot, což je maximální síla potřebná k porušení vzorku  $F$  a hloubka tažníku do porušení materiálu  $h$  (zobrazeno na obr. 3.1). Z těchto dvou hodnot je vyhodnoceno pomocí statistického testu ANOVA, zda mazivo na zkoušku má vliv nebo vliv nemá.

Graf závislosti síly na poloze zkoušky podle Erichsena



Obr. 3.1 Parametry pro vyhodnocení

Zkouška s prováděla při pokojové teplotě, což znamená  $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ . Při prvních odhadech by vrstva maziva na zkoušku podle Erichsena mohla mít nepatrný vliv, díky snížení tření mezi tažníkem a plechem.

### 3.1 Použité materiály

Pro zkoušku hloubením podle Erichsena byly zvoleny 2 hlubokotažné plechy s označením:

- 1) HX180 BD + Z100 MB (dále značen jako HDG), označení materiálu dle normy ČSN EN 10152. Materiál s minimální mezí kluzu 180 MPa, žárově pozinkován, množství zinku se jmenovitou tloušťkou povlaku  $7\text{ }\mu\text{m}$  na každé straně, povrch se zvýšenou kvalitou povrchu (M) získanou dokončovacím válcováním s možností lehkých pasivačních skvrn (B).
- 2) CR180 BH ZM 40/40E – O (dále označen jako ZM), označení dle normy VW50065, materiál s minimální mezí kluzu 180 MPa vykazující tzv. BH efekt, žárově nanesená ochranná vrstva zinku s hořčíkem se jmenovitou tloušťkou povlaku  $4\text{ }\mu\text{m}$  na každé straně (40/40), povrchová úprava olejována (O).



### 3.1.1 Vlastnosti materiálů

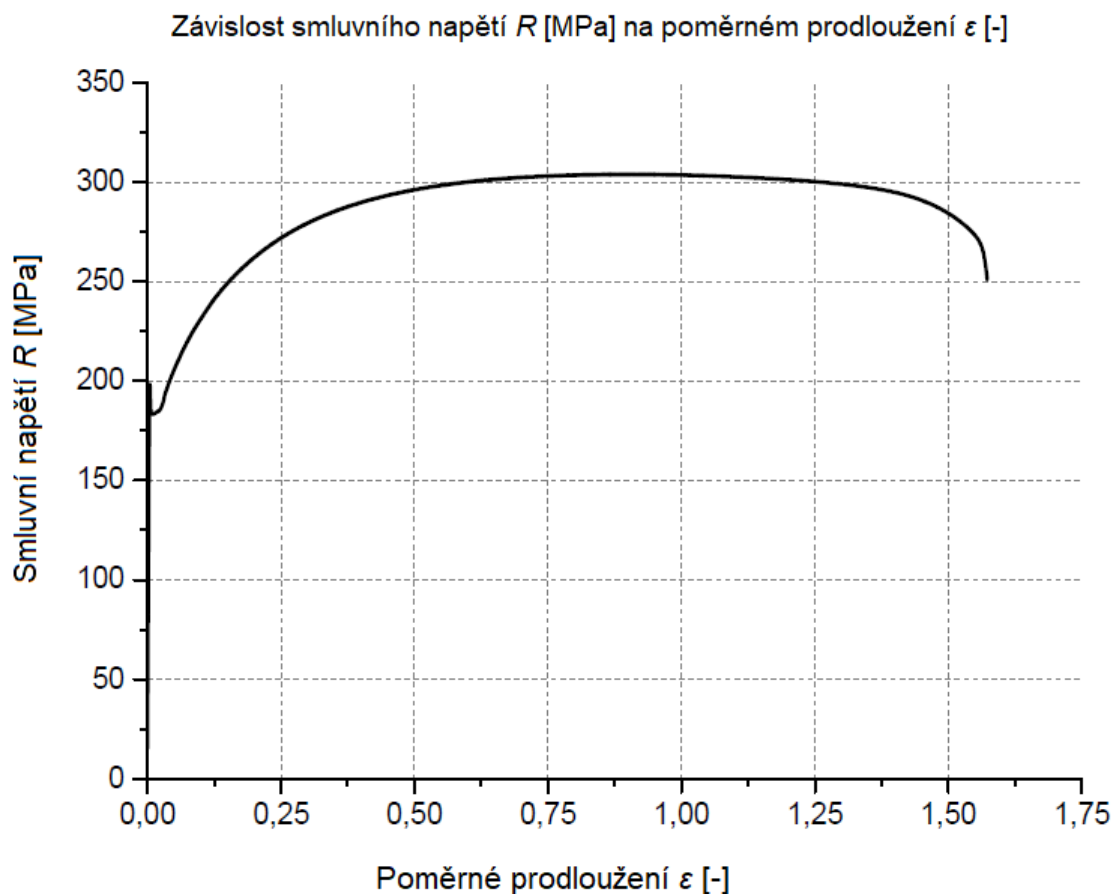
Vlastnosti materiálů se stanovují na základě mechanické zkoušky jednoosým tahem. Po provedení 5 zkoušek tahem pro plechy o rozměrech 5 mm x 20 mm s tloušťkou 0,66 mm, viz. obr. 3.2. Tato problematika už ale byla popsána v kapitole 2.2.1.



*Obr. 3.2 Vzorek HDG (levý), vzorek ZM (pravý)*

#### **Plech HDG**

Ze zkoušky tahem se do počítače zaznamenaly hodnoty síly  $F$  [N] a prodloužení  $\Delta L$  [mm]. Tyto hodnoty se dále přepočítaly podle normy ČSN EN ISO 6892 na závislost smluvního napětí  $R$  [MPa] a na poměrném prodloužení  $\varepsilon$  [-]. Kde smluvní napětí  $R$  se vypočítá podle vztahu (2.3) a poměrné prodloužení  $\varepsilon$  se určí podle vztahu (2.4). Závislost je poté zobrazena na obr. 3.3 nebo jako příloha 2.

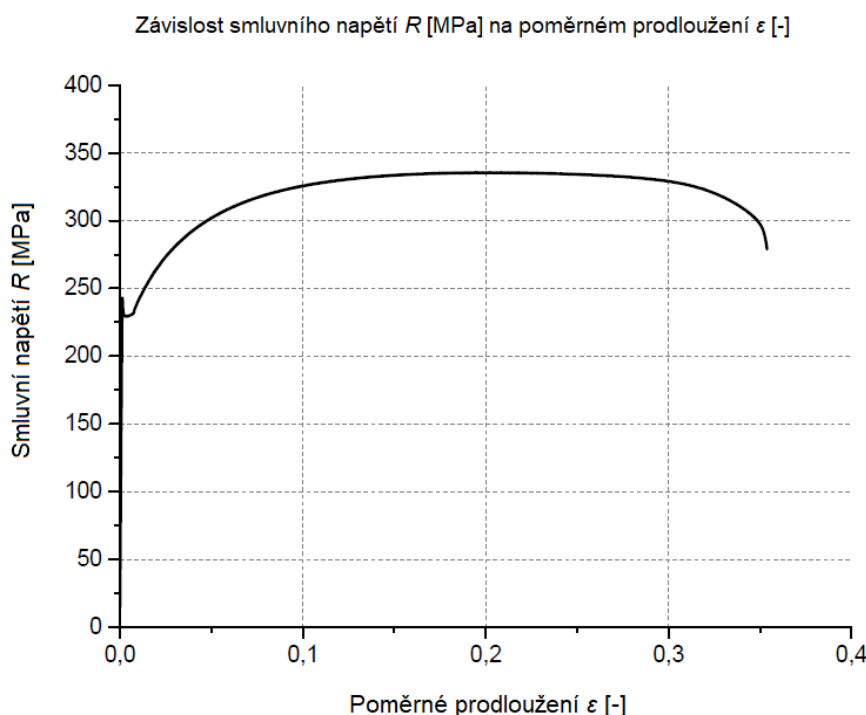


**Obr. 3.3** Graf závislosti napětí na prodloužení pro plech HDG

Poté z obrázku 3.3 lze určit základní vlastnosti materiálu, jako je mez kluzu  $R_e$  (resp. horní mez kluzu  $R_{eH}$  nebo  $R_{eL}$ ), mez pevnosti  $R_m$  a homogenní tažnost  $A_g$  podle vzorečku 2.5. Tyto průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro plech HDG jsou uvedeny společně s plechem ZM v tab. 3.1.

## Plech ZM

Vlastnosti plechu ZM se zjišťovaly podobně jako u plechu HDG. Do počítače se zaznamenaly hodnoty síly  $F$  [N] a prodloužení  $\Delta L$  [mm]. Tyto hodnoty se dále přepočítaly podle normy ČSN EN ISO 6892 na závislost smluvního napětí  $R$  [MPa] a na poměrném prodloužení  $\varepsilon$  [-]. Kde smluvní napětí  $R$  se vypočítá podle vztahu (2.3) a poměrné prodloužení  $\varepsilon$  se určí podle vztahu (2.4). Závislost je poté zobrazena na obr. 3.4 nebo jako příloha 1.



**Obr. 3.4** Graf závislosti napětí na prodloužení pro plech ZM

Poté z obrázku 3.4 lze určit základní vlastnosti materiálu, jako je mez kluzu  $R_e$  (resp. horní mez kluzu  $R_{eH}$  a dolní mez kluzu  $R_{eL}$ ), mez pevnosti  $R_m$  a celková tažnost  $A_x$  podle vzorečku 2.5. Tyto průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro plech HDG i ZM a pro 5 zkoušek tahem jsou uvedeny v tab. 3.1.

**Tab. 3.1** Vlastnosti materiálů plechů

Typ plechu	$R_{eH}$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80mm}$ [%]
<b>HDG</b>	$196,03 \pm 1,9$	$183,41 \pm 0,39$	$304,7 \pm 0,73$	$39,06 \pm 0,64$
<b>ZM</b>	$245,01 \pm 2,1$	$230,87 \pm 2,39$	$336,8 \pm 1,73$	$35,95 \pm 0,51$

## 3.2 Příprava plechu na experiment

Jelikož se plechy hlubokotažných ocelí distribuují jako dlouhé a široké desky tažené za studena, bylo třeba pro lepší manipulaci velký plech rozdělit na menší kusy. Tato operace se provedla na elektromechanických tabulkových nůžkách DURMA MS2004. Konečné rozměry plechu tedy byly 90 mm x 240 mm při stálé tloušťce 0,66 mm. V tomto kroku se na výstředníkovém lisu také vystřihly vzorky pro zkoušku tahem (tyto údaje už jsou popsány v minulé kapitole 3.2.1), aby se zjistily vlastností plechů.

V dalším kroku bylo nutno jednotlivé vzorky odmastit, jednak kvůli lepšímu ulpívání oleje na povrchu vzorku nebo kvůli měření kvality povrchu a také kvůli odstranění různých

nečistot, které se na povrchu vytvořily v důsledku skladování a opracování, což by následně mohlo způsobit malé chyby ve zkoušce měření drsnosti a samotné zkoušce podle Erichsen. Tento úkon se provedl pomocí odmašťovací kapaliny QTC C-SOL EXTRA.



**Obr. 3.5** Měření drsnosti povrchu pomocí přístroje MarSurf PS1

V třetím kroku, jak už bylo zmíněno v předchozím odstavci, se provedlo měření kvality povrchu. Na toto měření se použil drsnoměr MarSurf PS1 (viz. obrázek 3.5), se kterým lze měřit střední aritmetickou hodnotu drsnosti Ra, střední hloubku drsnosti Rz a počet vrcholů RPc. Prováděly se 4 měření (2 ve směru válcování a 2 kolmé na směr válcování), přičemž se měřilo 5 kusů plechu. Pro plech HDG, resp. ZM jsou průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami znázorněny v tabulce 3.2, resp. tabulce 3.3.

**Tab. 3.2** Měření kvality povrchu HDG

Směr válcování	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	RPc [1/cm]
0°	1,13 ± 0,03	6,13 ± 0,16	128 ± 4
90°	1,13 ± 0,04	5,54 ± 0,23	125 ± 6

**Tab. 3.3** Měření kvality povrchu ZM

Směr válcování	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	RPc [1/cm]
0°	1,18 ± 0,05	5,79 ± 0,29	90 ± 2
90°	1,16 ± 0,04	5,59 ± 0,23	86 ± 4

Ve čtvrtém a posledním kroku bylo potřeba nanést požadované množství oleje ANTICORIT PL 3802 39 LV na povrch vzorků plechu. Je to olej prací, běžně používaný v automobilovém průmyslu na odstranění nečistot z povrchu a pro tažení výlisků. Na povrch se naněsly 3 vrstvy oleje s množstvím 0,5 g/m<sup>2</sup>, 1 g/m<sup>2</sup> a 1,5 g/m<sup>2</sup>. Olej se nanášel ručně pomocí hadříku a s pomocí zařízení Infralytic NG 1 bylo zkontrolováno dané množství oleje. Pohledy na přístroj, který měřil vrstvy oleje, je zobrazen na obr. 3.6 a 3.7.



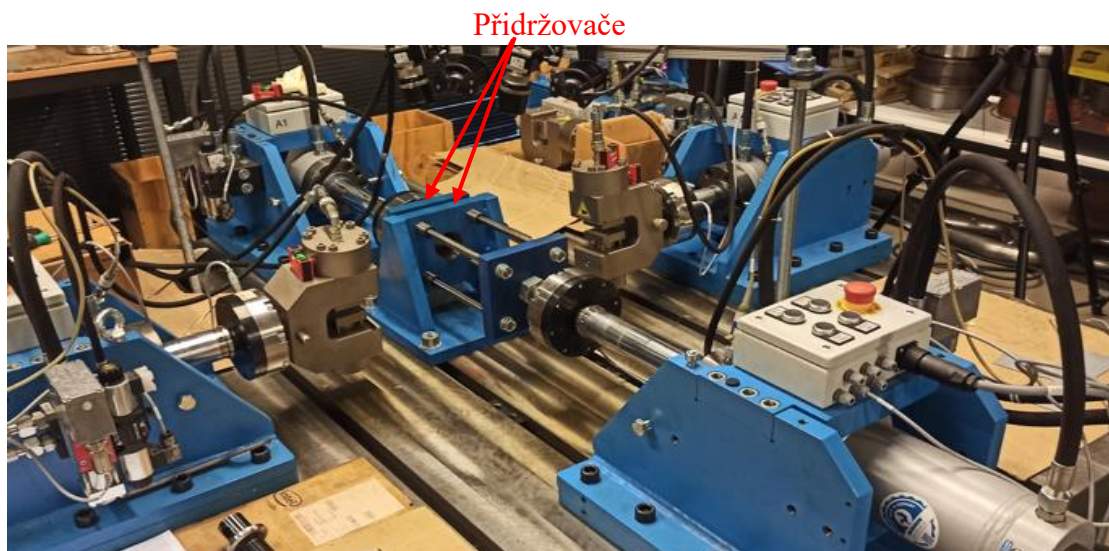
*Obr. 3.6 Přístroj na měření tloušťky oleje – pohled zepředu*



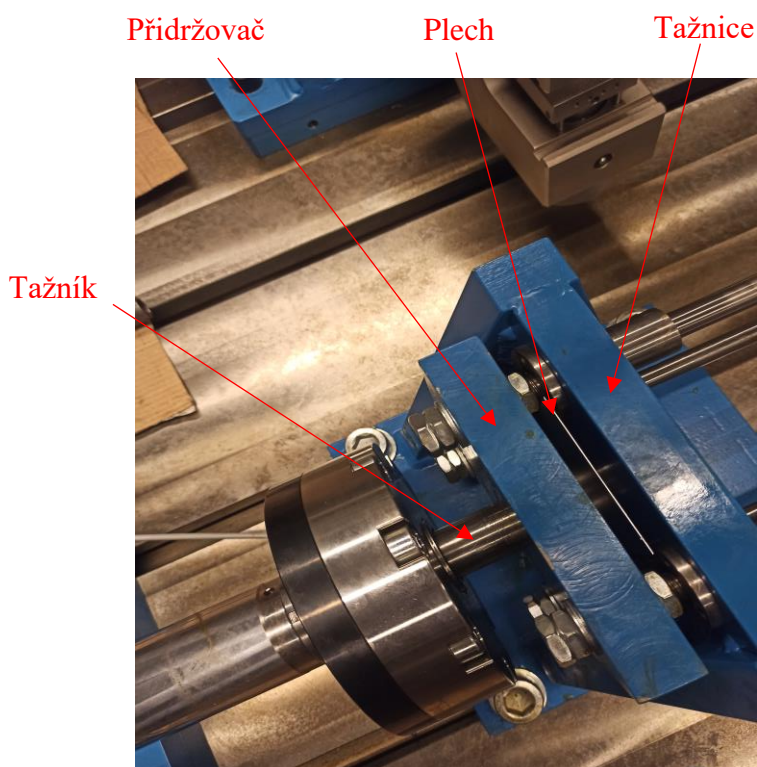
*Obr. 3.7 Přístroj na měření tloušťky oleje – pohled shora*

### 3.3 Samotné měření zkoušky podle Erichsena

Na zkoušku bylo zvoleno zařízení pro biaxiální testy nacházející se přímo v laboratořích strojírenské technologie na univerzitě TUL, na tomto zařízení se budou používat jen dvě naproti sobě umístěné přidržovače (obr. 3.8), mezi kterými bude ustaven plech (obr. 3.9).



*Obr. 3.8 Biaxiální zkušební stroj*

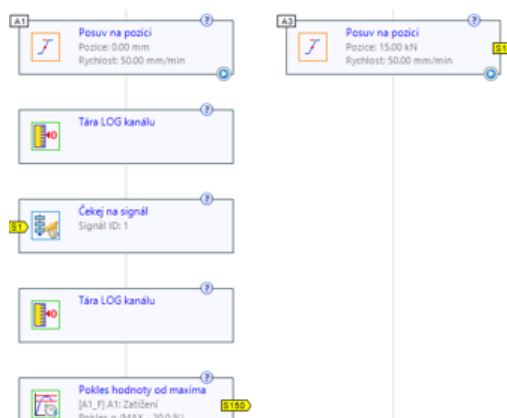


*Obr. 3.9 Uchycení plechu*

Zkouška probíhala následujícím způsobem. Nejprve se mezi tažnici a přidržovač vložil zkoumaný vzorek plechu, což je znázorněno na obr. 3.9. Na počítači přes program Workbench, kterým se ovládá biaxiální stroj, se poté přístroji nastaví 3 parametry. První je přítlačná síla, s jakou bude sevřen plech mezi tažnici a přidržovač, aby se vzorek v průběhu zkoušky nepohyboval. Tato síla se nastavila na 15 kN. Druhý parametr je rychlost posuvu, s jakou se bude tažník pohybovat a zároveň bude vlačován do plechu. Tato hodnota se nastavila na 10 mm/min. A třetím parametrem je procento, o které klesne síla po porušení plechu, což je

také ukončení zkoušky. Tato hodnota se nastavila na 20 %. Celý program je zobrazen na obr. 3.10. Následně proběhlo měření, v jeho průběhu se v počítači ukládala data a zároveň se vykresloval graf v závislosti polohy tažníku  $h$  a síly  $F$  mezi tažníkem a plechem (jak je zobrazeno na obr. 3.1).

Toto měření se provedlo 10krát pro každý typ plechu s daným množstvím oleje, tyto už upravené grafy jsou zobrazeny na obr. 3.11 až 3.16, přičemž každý vzorek je zobrazen jinou barvou.



Obr. 3.10 Nastavený program pro měření

### 3.3.1 Výsledky

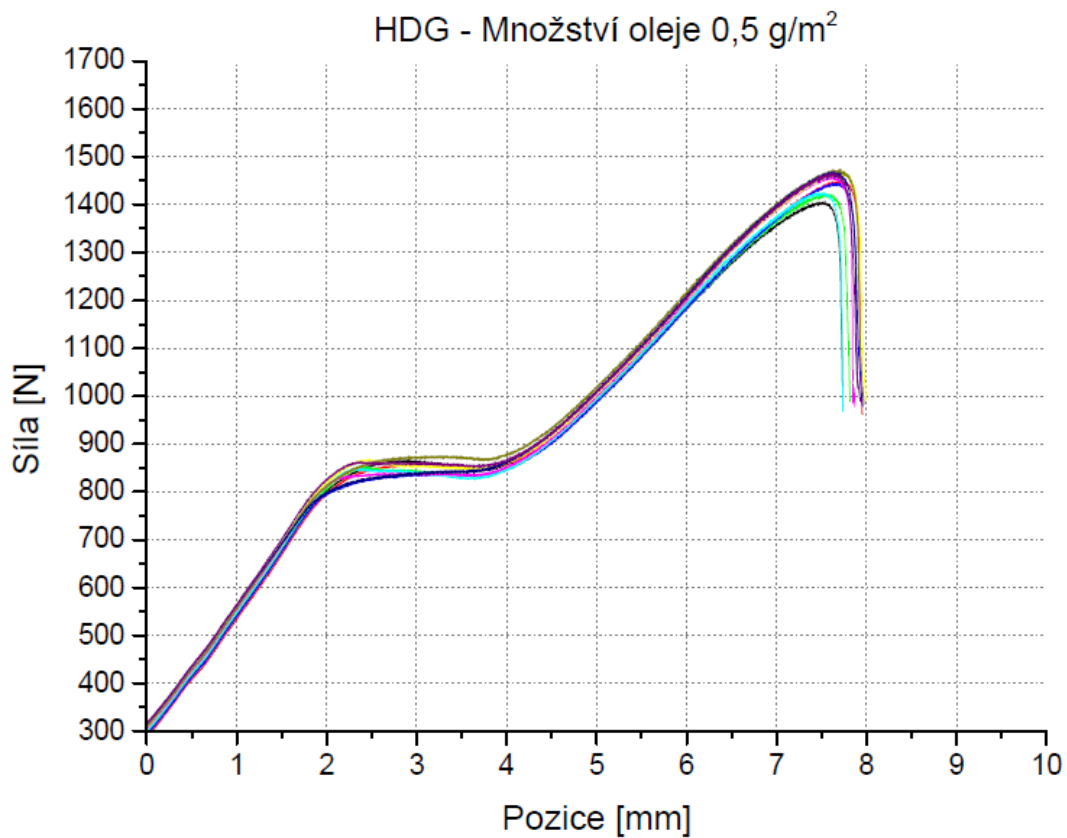
Průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami maximální síly při protržení plechu a polohou, resp. pozici tažníku  $h$  jsou uvedeny v tabulce 3.4 pro materiál HDG a tabulce 3.5 pro materiál ZM. Pomocí statistického testu ANOVA lze určit, zda množství maziva má na zkoušku podle Erichsena nějaký vliv nebo vliv nemá.

Tab. 3.4 Naměřené hodnoty pro plech HDG

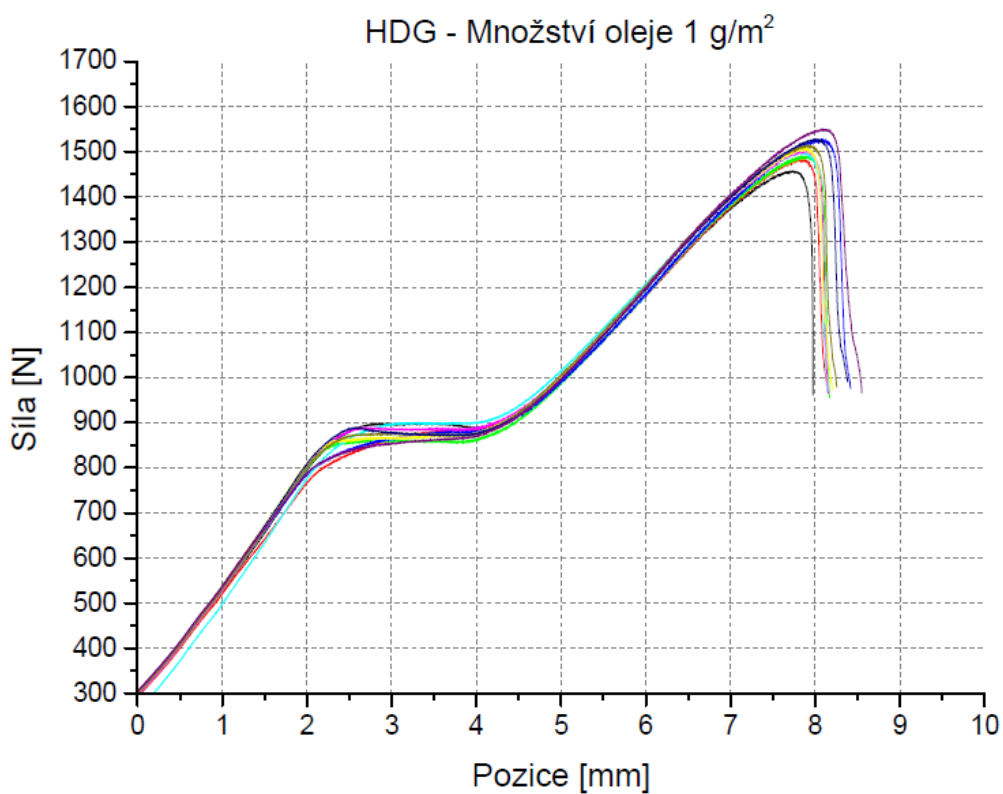
Množství oleje [g/m <sup>2</sup> ]	Síla $F$ [N]	Poloha $h$ [mm]
0,5	1448,5 ± 13,6	7,61 ± 0,05
1	1506,9 ± 15,4	7,91 ± 0,07
1,5	1527,8 ± 7,4	7,96 ± 0,05

Tab. 3.5 Naměřené hodnoty pro plech ZM

Množství oleje [g/m <sup>2</sup> ]	Síla $F$ [N]	Poloha $h$ [mm]
0,5	1475,2 ± 13,8	7,35 ± 0,04
1	1592,4 ± 7,9	7,88 ± 0,06
1,5	1641,8 ± 7,3	8,2 ± 0,06

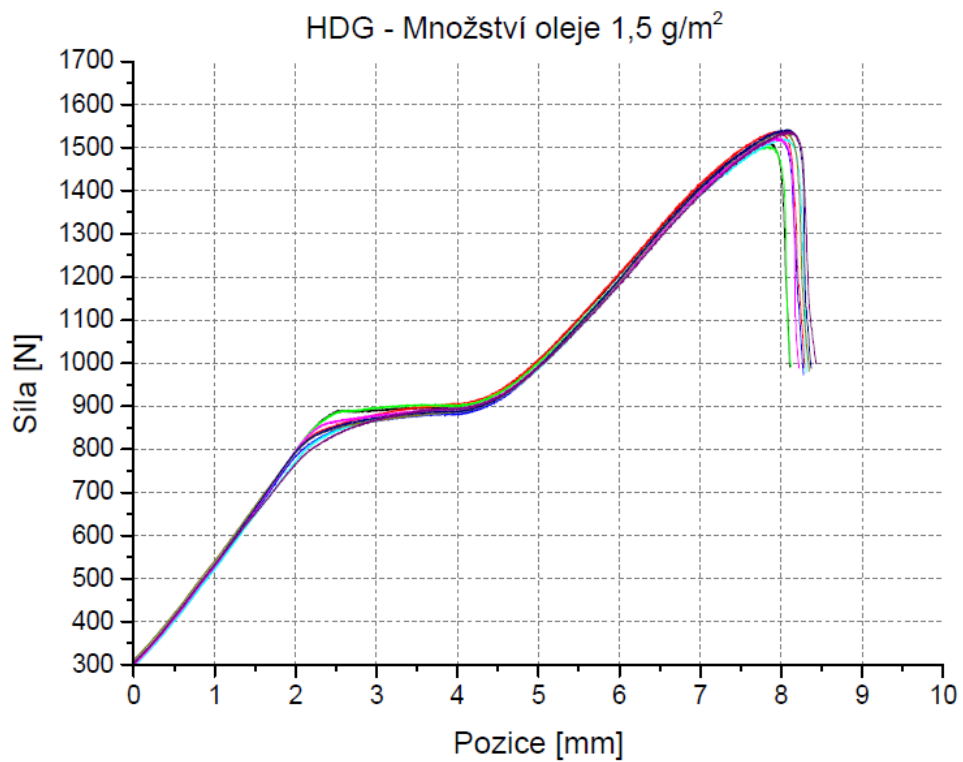


*Obr. 3.11 Graf pro plech HDG množství oleje 0,5 g/m<sup>2</sup>*

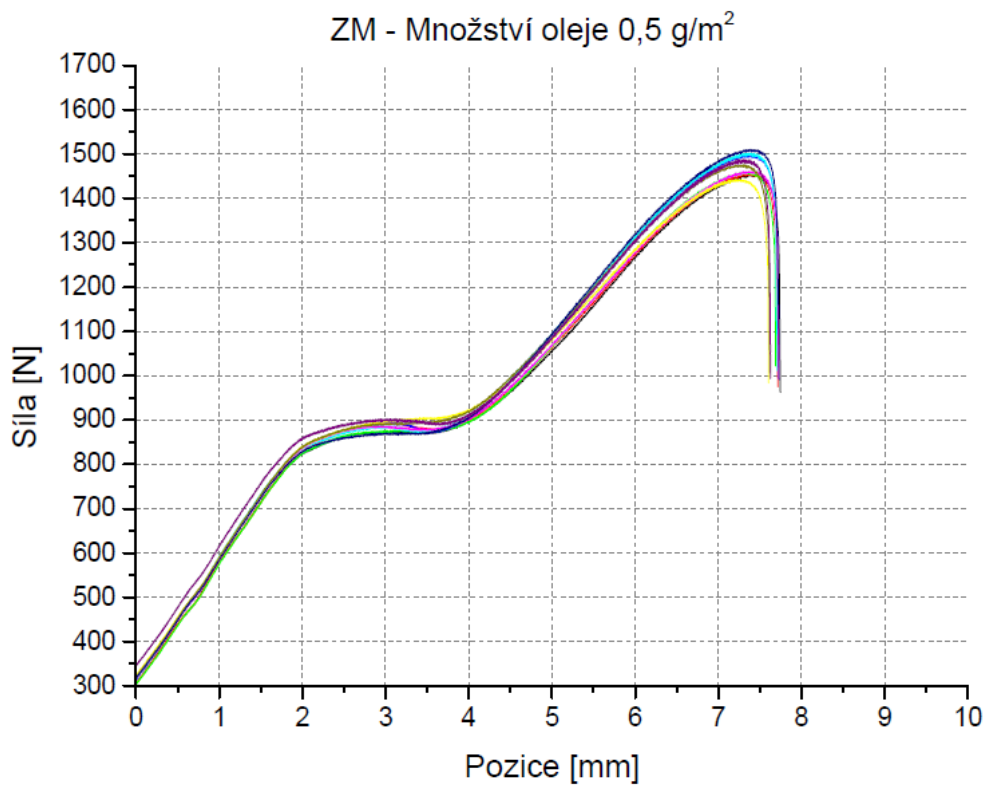


*Obr. 3.12 Graf pro plech HDG množství oleje 1 g/m<sup>2</sup>*

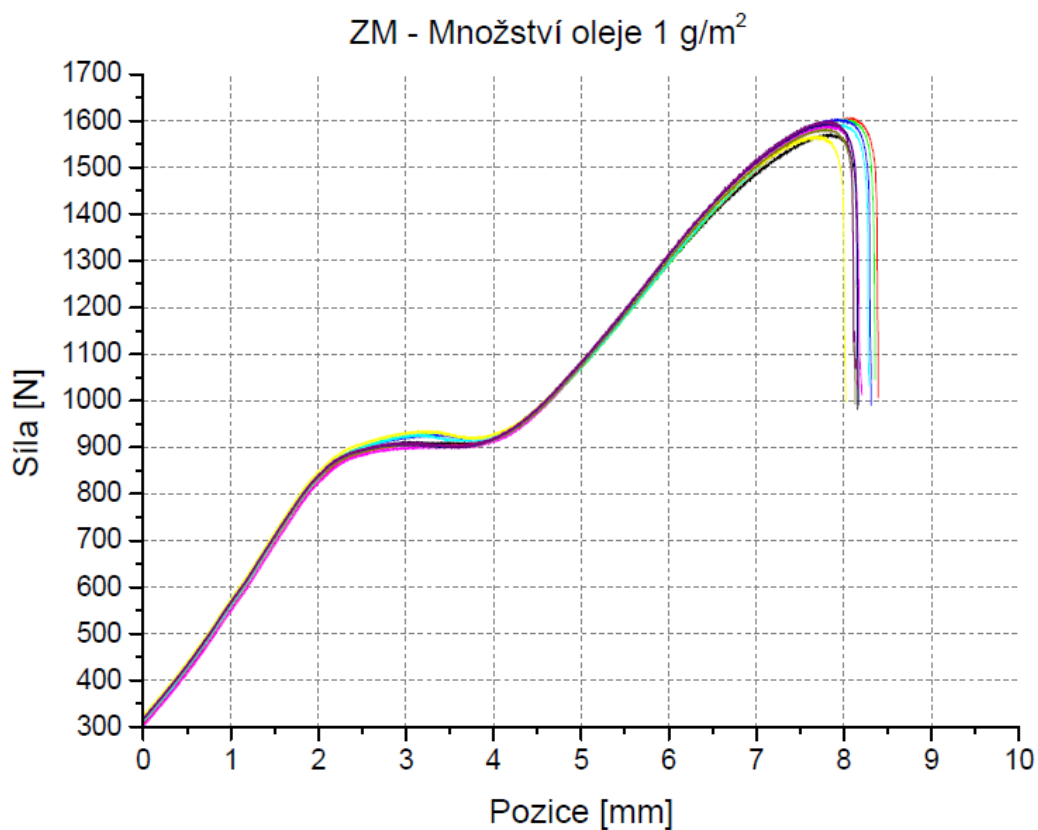




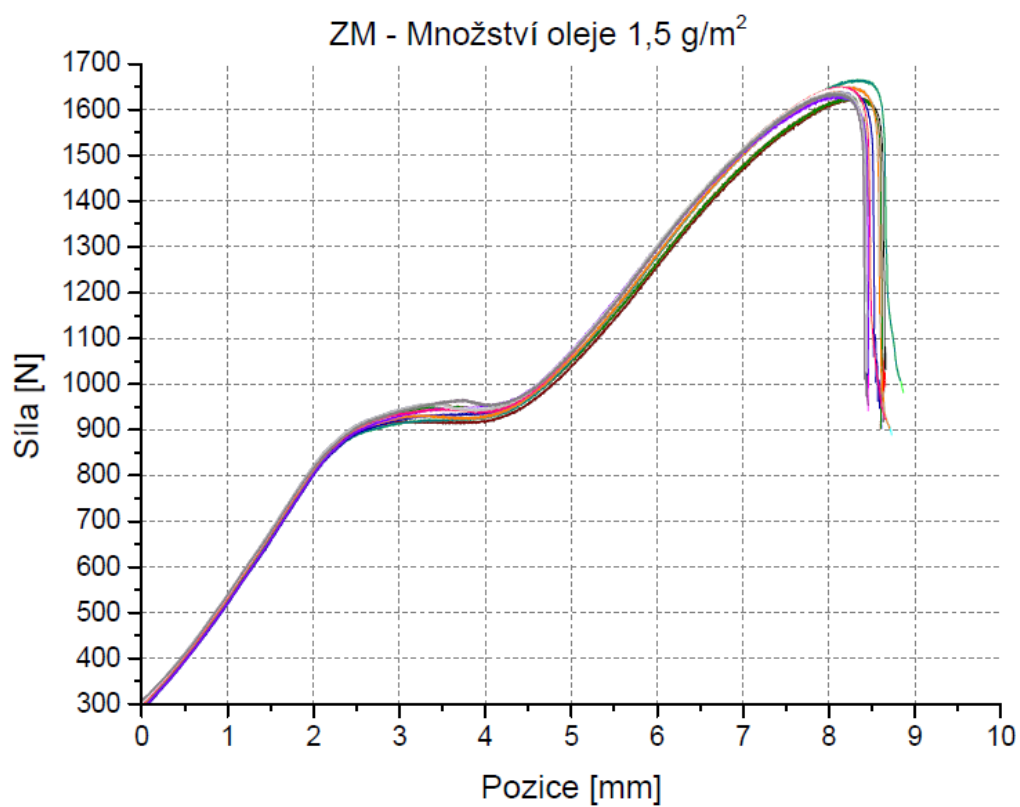
*Obr. 3.13 Graf pro plech HDG množství oleje 1,5 g/m<sup>2</sup>*



*Obr. 3.14 Graf pro plech ZM množství oleje 0,5 g/m<sup>2</sup>*



*Obr. 3.15 Graf pro plech ZM množství oleje 1 g/m<sup>2</sup>*



*Obr. 3.16 Graf pro plech ZM množství oleje 1,5 g/m<sup>2</sup>*

## 4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

V předchozí kapitole byl popsán postup provedené zkoušky a výsledné hodnoty. Nejdůležitější informace obsahuje tabulka 3.4 a tabulka 3.5, které popisují maximální naměřenou sílu  $F$  a pozici tažníku  $h$ , pro zkoumané 2 druhy plechu (HDG a ZM) a množství maziva ( $0,5 \text{ g/m}^2$ ,  $1 \text{ g/m}^2$  a  $1,5 \text{ g/m}^2$ ) použité na každý vzorek plechu.

### 4.1 Analýza rozptylu (ANOVA)

Pro vyhodnocení výsledků z tabulek 3.4 a 3.5 byla použita statistická metoda, konkrétně se jedná o analýza rozptylu (tzv. ANOVA), která určuje, zda dochází k opakování náhodné veličiny.

Účelem této metody je zjistit, zda určitá hlediska vybrané z konkrétního experimentu (v tomto případě je to zkouška podle Erichsena) jsou hodnoty statisticky významné nebo mají pouze náhodný charakter. Pro použití této analýzy je třeba uvažovat některé následující požadavky. Soubory prvků mají stejnou četnost, mají vzájemnou nezávislost, normální rozdělení a srovnatelný rozptyl.

Existuje více druhů analýz rozptylu, pro tento případ je vhodné použít Dvoufázovou ANOVU s opakováním. Což znamená, že data se vyhodnocují pomocí dvou parametrů, pro náš případ zkoušky dle Erichsena budou vyhodnocující parametry typ plechu (parametr A) a množství maziva (parametr B). Metoda vychází ze 3 hypotéz.

1.  $H_0$ : Vliv parametru A je statisticky nevýznamný (resp.  $H_1$ : Vliv parametru A je statisticky významný).
2.  $H_0$ : Vliv parametru B je statisticky nevýznamný (resp.  $H_1$ : Vliv parametru B je statisticky významný).
3.  $H_0$ : Vliv interakce parametrů je statisticky nevýznamný (resp.  $H_1$ : Vliv interakce parametrů je statisticky významný).

Po stanovení hypotéz se pomocí F-testu vypočte testovací kritérium  $F_s$  a po určení pravděpodobnosti chybného zamítnutí nulové hypotézy, tzv. hladiny významnosti  $\alpha_s$  (obvykle 0,05) a jí odpovídající kritické hodnoty  $F_{\text{krit}}$ . Existují potom 2 druhy vyhodnocení testu. První vyhodnocení je porovnání  $F_s$  a  $F_{\text{krit}}$ , tedy pokud je  $F_s > F_{\text{krit}}$  zamítá se hypotéza  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha_s$  a přijímá se hypotéza  $H_1$ . Druhá metoda pro vyhodnocení testu je pomocí hodnoty  $p$ , což udává nejmenší hladinu významnosti, a tedy platí že pokud  $p > \alpha_s$  dojde k zamítnutí hypotézy  $H_0$  na hladině  $\alpha_s$  a přijímá se hypotéza  $H_1$ . Pokud je  $p \geq \alpha_s$ , pak se hypotéza  $H_0$  nezamítá a je statisticky významný na hladině  $\alpha_s$ .

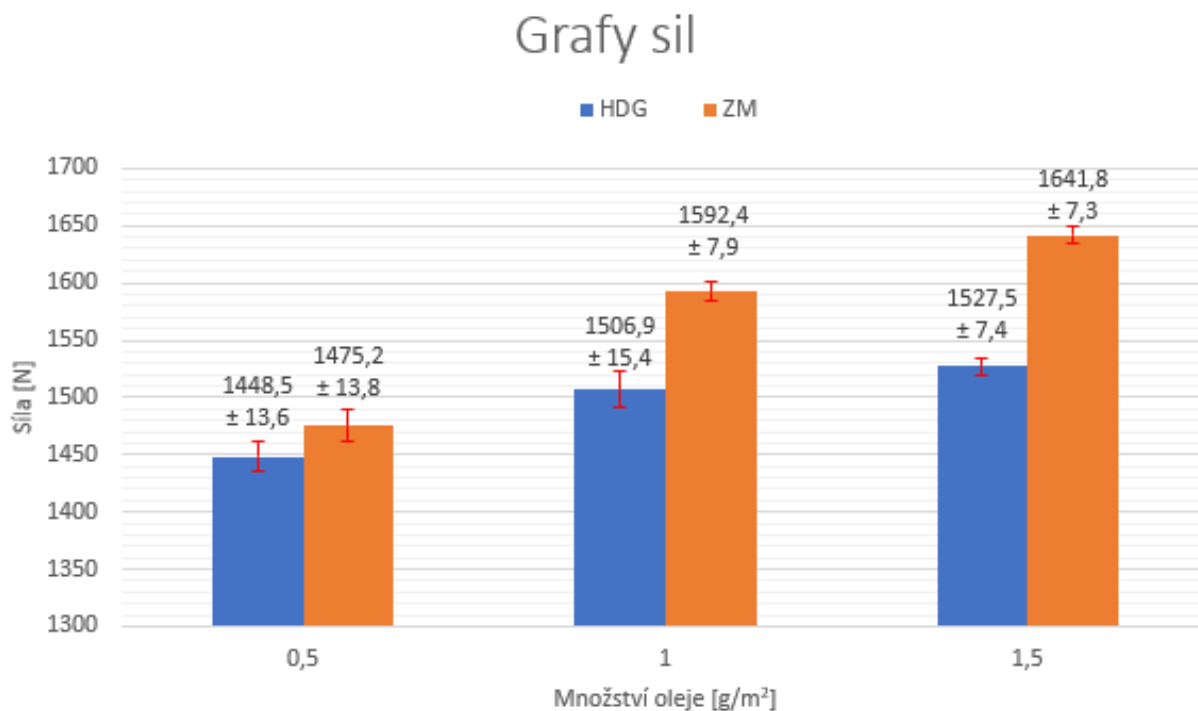
## 4.1.1 Vyhodnocení maximální síly

Z důvodu složitosti výpočtů byla tato metoda zpracována v softwaru MS Excel 2023, kde je tato funkce dostupná. Výsledek této metody je pak zobrazen v tab. 4.1.

*Tab. 4.1* Výsledky statistické zkoušky ANOVA pro maximální sílu

RT	$F_s$	$p$	$F_{krit}$	Výsledek
Typ plechu	225,805	$1,51 \cdot 10^{-20}$	4,02	Má vliv
Množství maziva	212,286	$1,28 \cdot 10^{-19}$	3,168	Má vliv
Interakce	26,211	$1,11 \cdot 10^{-8}$	3,168	Má vliv

Z tabulky 4.1 a obr. 4.1 je patrné, že u obou parametrů A i B (tj. typ plechu i množství maziva) je  $F_s$  mnohonásobně vyšší než  $F_{krit}$  (tedy platí  $F_s > F_{krit}$ ), nebo také  $p < \alpha_s$  ( $\alpha_s = 0,05$ ), z toho vyplývá, že hypotéza  $H_0$  se zamítá a přijímá se hypotéza  $H_1$ , tedy na parametru typu plechu a parametru množství maziva byl prokázán statisticky významný vliv. Tento vliv pomocí stejné metody jako u parametrů A i B se ukázal i u jejich interakce.



*Obr. 4.1* Porovnání sil

## 4.1.2 Vyhodnocení polohy

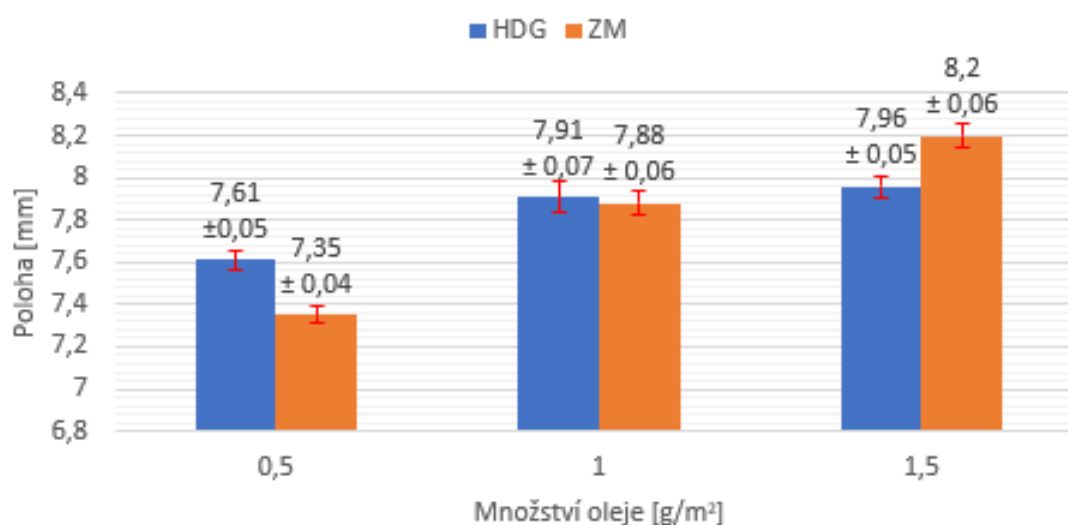
Podobně jako u vyhodnocení síly z předchozí kapitoly se i vyhodnocení polohy tažníku byly výsledky zpracovány pomocí metody ANOVA, která se prováděla díky složitosti výpočtů také v softwaru MS Excel 2023. Výsledky této metody jsou zobrazeny v tab. 4.2.

**Tab. 4.2** Výsledky statistické zkoušky ANOVA pro polohu tažníku

RT	F <sub>s</sub>	p	F <sub>krit</sub>	Výsledek
Typ plechu	0,711	0,403	4,02	Nemá vliv
Množství maziva	207,032	$3,47 \cdot 10^{-16}$	3,168	Má vliv
Interakce	0,31	$2,59 \cdot 10^{-10}$	3,168	Má vliv

Z tabulky 4.2 a obr. 4.2 je patrné, že u parametru A (tj. typ plechu) je  $F_s$  menší než  $F_{krit}$  (tedy platí  $F_s < F_{krit}$ ), nebo také  $p < \alpha_s$  ( $\alpha_s = 0,05$ ), z toho vyplývá, že hypotéza  $H_1$  se zamítá, tedy na parametru typu plechu nebyl prokázán statisticky významný vliv. U parametru B (tj. množství maziva) je  $F_s$  mnohonásobně vyšší než  $F_{krit}$  (tedy platí  $F_s > F_{krit}$ ), nebo také  $p < \alpha_s$ , z toho vyplývá, že hypotéza  $H_0$  se zamítá a přijímá se hypotéza  $H_1$ , tedy na parametru množství maziva byl prokázán statisticky významný vliv. Pomocí stejné statistické metody jako u parametru A se provedl i u parametru B, kde byl statistický vliv prokázán, tedy množství maziva má na zkoušku vliv. Tento vliv se za pomoci použití stejné metody ukázal i u interakce mezi parametrem A i B.

## Hloubka tažení



**Obr. 4.2** Hloubka tažení

## 5 Závěr

Cílem práce bylo zjistit, zda vybrané mazivo (konkrétně se se jednalo o olej ANTICORIT PL 3802 39 LV) nanášené na 2 typy plechů má vliv na zkoušku hloubením dle Erichsena podle normy ČSN EN ISO 20482. Mazivo se nanášelo na plechy v množství 0,5 g/m<sup>2</sup>, 1 g/m<sup>2</sup> a 1,5 g/m<sup>2</sup>. Dva typy plechů jsou v textu označeny jako HDG, resp. ZM, přičemž celkové označení je plech EN 10152 – HX180 BD + Z100 MB, resp. plech EN 10346 – CR180 BH ZM 40/40E – O.

Plechů nejprve bylo potřeba upravit na zkoušku podle Erichsena. Tedy oba plechy byly nastříhány na menší vzorky po 30, kde na každých 10 vzorků se nanášlo buď (0,5 nebo 1 nebo 1,5) g/m<sup>2</sup> množství oleje pomocí hadříku a přístroje na měření množství maziva InfraLytic NG 1. Pro zjištění vlastností plechů se také udělaly tahové zkoušky.

Z tahových zkoušek se zjistilo, že materiál HDG má následující vlastnosti: dolní mez kluzu (196,03 ± 1,9) MPa, horní mez kluzu (183,41 ± 0,39) MPa, mez pevnosti (304,7 ± 0,73) MPa a tažnost pro 80 mm (39,06 ± 0,64) %. Pro materiál ZM byly zjištěny tyto hodnoty: dolní mez kluzu (245,01 ± 2,1) MPa, horní mez kluzu (230,87 ± 2,39) MPa, mez pevnosti (336,8 ± 1,73) MPa a tažnost pro 80 mm (35,95 ± 0,51) %.

Po úpravě plechů se provedla samotná zkouška podle Erichsena, grafy závislosti síly působící na plech  $F$  [N] na poloze tažníku  $h$  [mm] jsou vyznačeny, viz. obr. 3.11 až 3.16. Z těchto grafů se poté určila maximální síla potřebná k porušení plechu a hloubka tažení  $h$  při porušení plechu, tyto průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky jsou uvedené v tab. 3.4 a 3.5. Pro určení vlivu maziva byla použita statistická metoda ANOVA. Pomocí této metody a získaných hodnot vyplynulo, že množství maziva má vliv na oba měřené parametry, tedy na maximální hloubku do protržení materiálu a maximální sílu do protržení materiálu.

## Použitá literatura

- [1] C. W. Lievens and E. Rayborn, “Tribology and the Ocular Surface,” *Clinical Ophthalmology*, vol. 16, pp. 973–980, Mar. 2022, doi: 10.2147/OPTH.S360293.
- [2] “FRICTION | English meaning - Cambridge Dictionary.” Accessed: Mar. 03, 2024. [Online]. Available: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/friction>
- [3] “Tření – Wikipedie.” Accessed: Mar. 03, 2024. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD>
- [4] “Friction - Wikipedia.” Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Friction>
- [5] “Bedna na nakloněné rovině — Sběrka úloh.” Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: <https://reseneulohy.cz/97/bedna-na-naklonene-rovine>
- [6] “graf mezi statickým třením a dynamickým - Google Search.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: [https://www.google.com/search?q=graf+mezi+statick%C3%A9m+t%C5%99en%C3%AD+a+dynamick%C3%A9m&client=firefox-b-d&sca\\_esv=919db838b2730857&udm=2&ei=RJcJZoytHKiui-gPsPacgAM&ved=0ahUKEwiM36HD\\_Z6FAxUo1wIHHTA7BzAQ4dUDCBA&uact=5&oq=graf+mezi+statick%C3%A9m+t%C5%99en%C3%AD+a+dynamick%C3%A9m&gs\\_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcniAiKmdyYWYgbWV6aSBzdGF0aWNrw6ltIHTFmWVuw60gYSBkeW5hbWlja8OpbUi4UICMC1izUHABeACQAQCYAQCgAQCqAQ C4AQPIAQD4AQGYAgCgAgCYAwCIBgGSBwCgBwA&sclient=gws-wiz-serp#vhid=FlCdUmUivZNSsM&vssid=mosaic](https://www.google.com/search?q=graf+mezi+statick%C3%A9m+t%C5%99en%C3%AD+a+dynamick%C3%A9m&client=firefox-b-d&sca_esv=919db838b2730857&udm=2&ei=RJcJZoytHKiui-gPsPacgAM&ved=0ahUKEwiM36HD_Z6FAxUo1wIHHTA7BzAQ4dUDCBA&uact=5&oq=graf+mezi+statick%C3%A9m+t%C5%99en%C3%AD+a+dynamick%C3%A9m&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcniAiKmdyYWYgbWV6aSBzdGF0aWNrw6ltIHTFmWVuw60gYSBkeW5hbWlja8OpbUi4UICMC1izUHABeACQAQCYAQCgAQCqAQ C4AQPIAQD4AQGYAgCgAgCYAwCIBgGSBwCgBwA&sclient=gws-wiz-serp#vhid=FlCdUmUivZNSsM&vssid=mosaic)
- [7] H. Hota *et al.*, “Investigations on the Rolling Friction Coefficient’s Evaluation of Uncovered Steel Parts,” Oct. 2018, doi: 10.26649/MUSCI.2016.109.
- [8] “Fluid Friction: Definition, Laws, and Examples.” Accessed: Mar. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencefacts.net/fluid-friction.html>
- [9] “Mazací oleje - ČAPPO.” Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.cappo.cz/pohonne-hmoty-a-energie-pro-mobilitu/mazaci-oleje>
- [10] “Výběr správného maziva pro procesy tváření kovů // Klüber Lubrication Česká republika.” Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.klueber.com/cz/cs/produkty-sluzby/maziva/procesni-maziva/>
- [11] “Tipy pro výběr správného maziva - Portál pro strojní konstruktéry.” Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://e-konstrukter.cz/novinka/tipy-pro-vyber-spravneho-maziva>

- [12] Z. Odštěpný, Z. Odštipný, F. Cema-Tech, and S. R. O. Hennlich, “HENNLICH s.r.o”, Accessed: Mar. 14, 2024. [Online]. Available: [www.hennlich.cz/cematech](http://www.hennlich.cz/cematech)
- [13] “Kontaktní nanášení | HENNLICH | Žijeme technikou.” Accessed: Mar. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.hennlich.cz/cema-tech/kontaktni-nanaseni/>
- [14] “Bezkontaktní nanášení | HENNLICH | Žijeme technikou.” Accessed: Mar. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.hennlich.cz/cema-tech/bezkontaktni-nanaseni/>
- [15] Luděk Ptáček a kolektiv, *Nauka o materiálu I*. Brno: CERN, 2003.
- [16] “Zkouška tahem - MATCA.” Accessed: Mar. 31, 2024. [Online]. Available: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [17] “Zkouška ohybem | ZwickRoell.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkouska-ohybem/>
- [18] “Zkouška ohybem a kroucením - EUROLAB.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.eurolab.com.tr/cs/testler/elektriksel-guvenlik-testleri/bukmeve-burma-testi>
- [19] N. A. Šapošnikov, *Mechanické zkoušení kovů*, vol. 1. Praha: SNTL, 1953.
- [20] Luděk Ptáček a kolektiv, *Nauka o materiálu I*. Brno: CERN, 2003.
- [21] “Zkoušky tvrdosti: Definování a metody měření tvrdosti | ZwickRoell.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkousky-tvrdosti/>
- [22] “Brinell – zkoušky tvrdosti: ISO 6506, ASTM E10 | ZwickRoell.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/kovove-materialy/normy-pro-zkousky-kovovych-materialu/zkouska-metodou-brinell-dle-iso-6506/>
- [23] “Rockwell – zkoušky tvrdosti: ISO 6508, ASTM E18 | ZwickRoell.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/kovove-materialy/normy-pro-zkousky-kovovych-materialu/iso-6508-zkouska-tvrdosti-podle-rockwella/>
- [24] “Vickers – zkoušky tvrdosti: ISO 6507, ASTM E384 | ZwickRoell.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/kovove-materialy/normy-pro-zkousky-kovovych-materialu/zkouska-vickers-dle-iso-6507/>
- [25] “Rockwell - tvrdost podle Rockwella.” Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-rockwell.htm>
- [26] “ISO 20482: Zkouška hloubením dle Erichsena | ZwickRoell.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni->



materialu/zkusebni-metody-tvareni-plechu/zkouska-hloubenim/zkouska-hloubenim-  
podle-erichsena-iso-20482-a-olsena-astm-e643-84/

- [27] A. Kocańda and C. Jasiński, “Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 211–216, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.ACME.2015.10.007.
- [28] “Kalíškovací zkouška kovů / slitiny hliníku | ZwickRoell.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkusebni-metody-tvareni-plechu/kaliskovaci-zkousky/kaliskovaci-zkouska-podle-en-iso-11531-en-1669/>
- [29] “Zkouška mezního hlubokého tažení (LDR) / Swiftova kalíškovací zkouška | ZwickRoell.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkusebni-metody-tvareni-plechu/kaliskovaci-zkousky/zkouska-mezniho-hlubokeho-tazeni-ldr/>
- [30] “Kušelová kalíšková zkouška podle Fukui (JIS Z 2249) | ZwickRoell.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkusebni-metody-tvareni-plechu/kaliskovaci-zkousky/fukui-jis-z-2249/>

# Seznam příloh

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

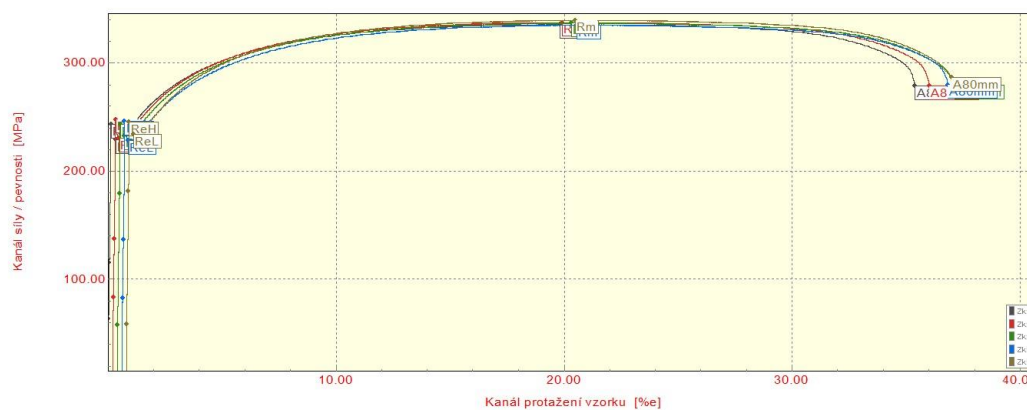
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH ZM 40/40E-O (označení dle VW 50065)  
Rozměry vzorku : [0,65 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : RT  
Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
Vypracoval : Jakub Montag  
Datum provedení testu : 10.11.2023  
Pozn. :

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	ReH MPa	ReL MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	242.94	229.40	335.65	19.66	35.26	204029
2	247.95	230.04	337.38	19.55	35.69	201564
3	243.11	232.42	336.77	19.75	36.62	198701
4	246.09	228.31	334.84	19.80	36.11	197548
5	244.97	234.19	339.34	19.51	36.06	202721

Statistika	ReH MPa	ReL MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Průměrná hodnota	245.01	230.87	336.80	19.65	35.95	200913
Směrodatná odchylka	2.10	2.39	1.73	0.12	0.51	2721
Minimální hodnota	242.94	228.31	334.84	19.51	35.26	197548
Maximální hodnota	247.95	234.19	339.34	19.80	36.62	204029



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

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

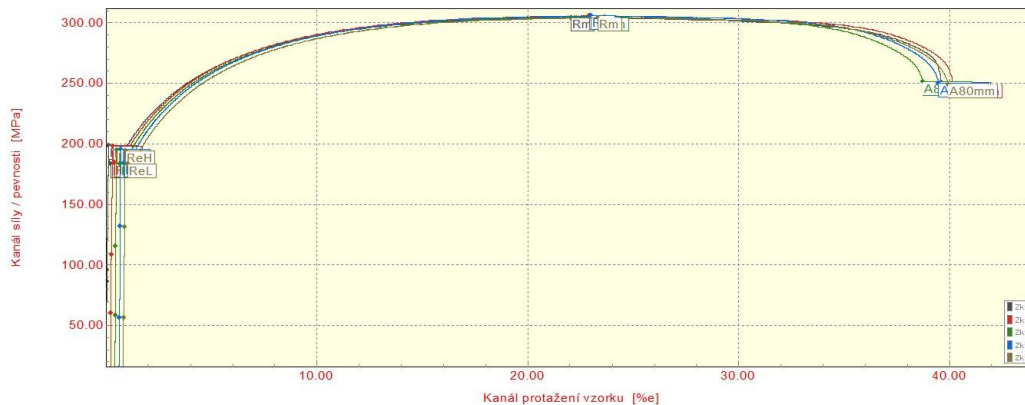
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX180 BD+Z100 MB (označení dle 10152)  
Rozměry vzorku : [0,65 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : RT  
Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
Vypracoval : Jakub Montag  
Datum provedení testu : 10.11.2023  
Pozn. :

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	ReH MPa	ReL MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	198.37	183.17	304.00	21.89	39.49	192505
2	197.78	183.79	305.47	22.57	39.85	191634
3	194.63	183.25	304.63	23.11	38.20	196149
4	195.15	183.85	305.41	22.24	38.76	194335
5	194.24	182.99	303.99	22.38	39.01	192219

Statistika	ReH MPa	ReL MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Průměrná hodnota	196.03	183.41	304.70	22.44	39.06	193368
Směrodatná odchylka	1.90	0.39	0.73	0.45	0.64	1854
Minimální hodnota	194.24	182.99	303.99	21.89	38.20	191634
Maximální hodnota	198.37	183.85	305.47	23.11	39.85	196149



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