



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MAZIVA VHODNÁ PRO TAŽENÍ NEREZAVĚJÍCÍ OCELI

SUITABLE LUBRICANTS FOR DEEP DRAWING OF STAINLESS STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JONÁŠ MÜCK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK LIDMILA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jonáš Mück

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Maziva vhodná pro tažení nerezavějící oceli

v anglickém jazyce:

Suitable lubricants for deep drawing of stainless steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě hlubokých výtažků z austenitických nerezavějících ocelí hraje aplikace vhodného maziva v procesu tažení důležitou roli. Výrobci maziv nabízejí pro tvářecí procesy řadu svých produktů, pro konkrétní využití je však vhodné jejich funkci experimentálně ověřit a až na podkladě provedených testů vybrat nejvhodnější mazivo do výrobního procesu.

Cíle diplomové práce:

Práce bude obsahovat rozbor faktorů a zhodnocení problémů spojených s mazáním se zaměřením na korozivzdornou ocel. Bude navržena vhodná metoda testování maziv při tažení plechu. Budou shromážděna a otestována maziva různých výrobců. Na základě vyhodnocení experimentů budou doporučena nejvhodnější maziva pro tažení nerezavějící oceli jakosti 1.4316.

Seznam odborné literatury:

1. MARCINIAK, Zdislaw, J.L. DUNCAN and S.J. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.
2. BLAŠKOVITŠ, Pavel, Jozef BALLA a Marián DZIMKO. Tribológia. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990, 360 s., příl. ISBN 80-05-00633-0.
3. BAY, N., D.D. OLSSON, J.L. ANDREASEN a Taylan ALTAN. Lubricant test methods for sheet metal forming. Tribology International [online]. 2008, roč. 41, 9-10, s. 844-853 [cit. 2013-03-04]. ISSN 0301679x.
4. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. Hluboké tažení plechu na lisech. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990, 196 s. ISBN 80-03-00221-4.
5. ASM-Metals Handbook: Forming and Forging. Vol.14. USA ASM International, 2004. S.978. ISBN 0-87170-020-4

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 13.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

MÜCK Jonáš: Maziva vhodná pro tažení nerezavějící oceli

Záměrem této práce je experimentální vyhodnocení vhodnosti různých maziv pro hluboké tažení korozivzdorné oceli 1.4404. Metoda testování je založena na modelu tření v místě přidržovače a tažné hrany, kterému odpovídá konstrukce zkušebního přípravku. Porovnáním výstupní závislosti tažné síly na dráze s referenčním výsledkem byla následně určena vhodnost jednotlivých maziv pro tuto aplikaci. Ze vzorků dodaných různými výrobci byl naměřen nejlepší výsledek u oleje AT Kalorex 650 S vyráběného firmou AT Oil, který patří do skupiny ekologicky závadných maziv. Na základě experimentu lze tedy říci, že obsah chlóru v mazivech výrazně zvyšuje jejich mazací schopnosti za vysokých tlaků. Také byla navržena úprava geometrie přípravku, která předpokládá eliminaci některých nežádoucích poruch doprovázejících experiment.

Klíčová slova: Hluboké tažení, korozivzdorná ocel 1.4404, tribologie, tření, testování maziv

Abstract

MÜCK Jonáš: Suitable lubricants for deep drawing of stainless steel

The intention of this thesis is the experimental evaluation of different lubricants and their suitability for deep drawing of stainless steel 1.4404. The testing method is based on the friction model at the point of drawing edge and retainers. This model corresponds with a structure of testing fixture. The suitability of every single lubricant for this application has been determined by comparison of the output, which is dependence of the strength on the track with the reference results. The testing has been performed on many different samples provided by various manufacturers. The best result was measured with the oil Kalorex AT 650 S, manufactured by AT Oil, which belongs to the group of environmentally harmful lubricants. Based on the results of this experiment we can conclude that chlorine content significantly increases the lubrication capability especially under high pressure. The modification of preparation geometry which presumes the elimination of certain undesirable disturbances accompanying the experiment has been also proposed.

Key words: Deep drawing, stainless steel 1.4404, tribology, friction, lubricants testing

Bibliografická citace

MŮCK, Jonáš. Maziva vhodná pro tažení nerezavějící oceli. Brno, 2015. 58 s, 2 výkresy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 25.5.2015

.....
Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Rovněž patří můj dík rodině a přítelkyni za jejich trpělivost a podporu během studia.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
1 HLUBOKÉ TAŽENÍ.....	11
1.1 Proces tažení plechů.....	12
1.1.1 Napěťový rozbor tažení	13
1.1.2 Tažná síla a práce.....	14
1.1.3 Výpočet velikosti přístřihu.....	15
1.1.4 Stanovení počtu tažných operací, součinitel tažení	16
1.1.5 Nástroj pro tažení	17
2 TRIBOLOGIE	22
2.1 Procesy tření.....	22
2.2 Matematické modely tření	25
2.3 Povrch materiálu, jeho hodnocení a opotřebení.....	26
2.4 Vlivy tření na proces tváření	28
2.5 Zkoušky tření při tvářecích procesech	29
3 DRUHY MAZIV	32
3.1 Mazací oleje	33
3.2 Příprava a mazání povrchu.....	35
4 NÁVRH EXPERIMENTU	36
4.1 Příprava experimentu	38
5 PRŮBĚH A VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ.....	45
5.1 Testování maziv při nižší přidržovací síle	47
5.2 Testování pro vyšší přidržovací sílu	50
5.3 Síla nutná pro ohyb po tažné hraně.....	53
6 ROZBOR VÝSLEDKŮ	55
6.1 Zhodnocení experimentu.....	56
7 ZÁVĚRY	58

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů

Seznam obrázků a tabulek

Seznam příloh a výkresů

ÚVOD

Stále se zvyšující tlak na výrobu, jež vyžaduje snižování výrobních nákladů, dává prostor pro využití beztržkových metod výroby. Jedná se tedy především o objemové a plošné tváření. Tyto technologie umožňují výrobu s maximálním využitím materiálu při snadné automatizaci. Také u těchto operací je ovšem nutno zamezit zbytečným ztrátám, které vznikají třením. To má za následek jak náročnější výrobu z hlediska spotřeby energie, tak zvýšené opotřebení nástrojů či zhoršenou kvalitu povrchu výrobku.

Vhodnost maziva pro tažení není určena pouze jeho schopností zamezit tření, ale také odolností vůči korozi a to i za zvýšených teplot, popřípadě jiným požadavkům výroby. Výzkum těchto vlivů spadá do vědního oboru tribologie. Výběr správného maziva může zefektivnit výrobu v řádu desítek procent, a tak umožnit konkurenceschopnou výrobu. Používaná maziva jsou založena na různých bázích, jež jsou doplněny o přísady zajišťující vlastní mazání, emulgační schopnost, smáčivost a ochranu materiálu. Nejnovější trendy vyžadují, aby mazivo bylo také ekologicky nezávadné. Proto je potřeba najít nejvhodnější mazivo kombinující výborné výrobní i ekologické vlastnosti.

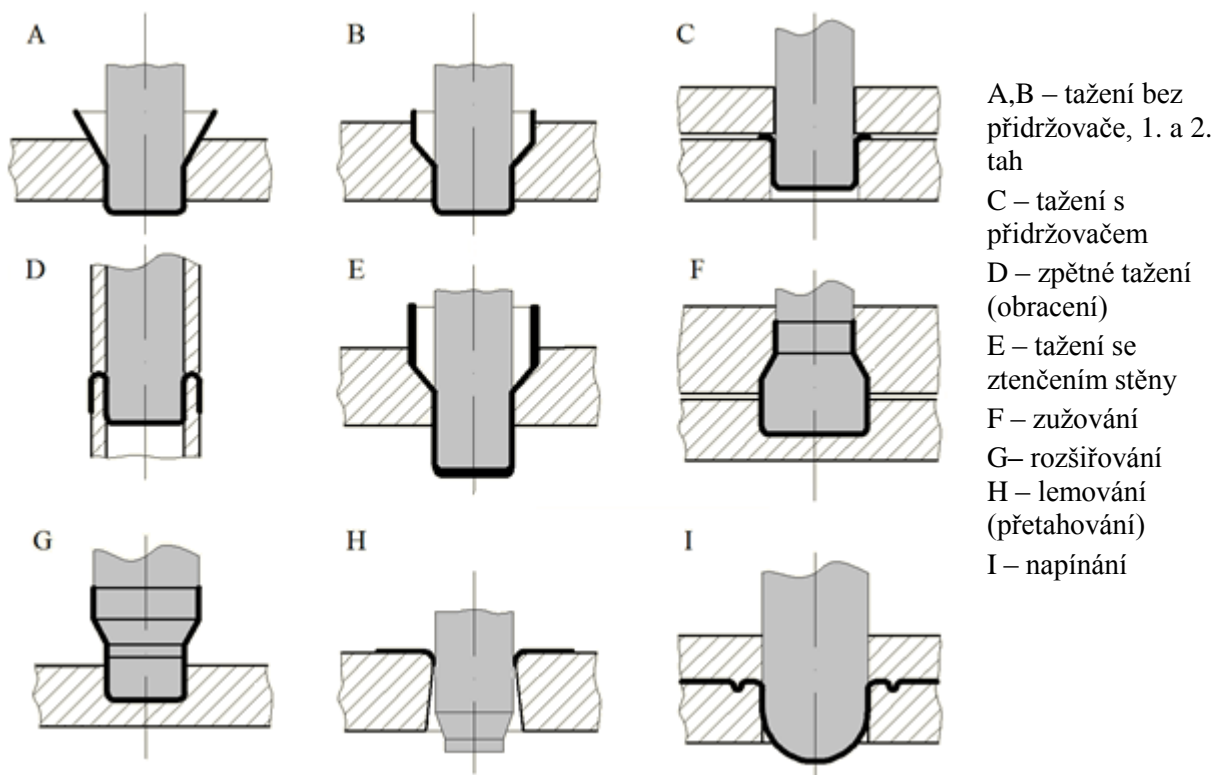
Výrobci maziv doporučují pro pochody objemového i plošného tváření řadu svých produktů. Takže i pro proces tažení nerezavějících ocelí je doporučována poměrně široká škála maziv. Výběr maziva pro konkrétní materiál a podmínky tažení je pak vhodné provést na základě experimentálního prověření jeho účinnosti při experimentu, který věrohodně simuluje tažení daného vylisku.



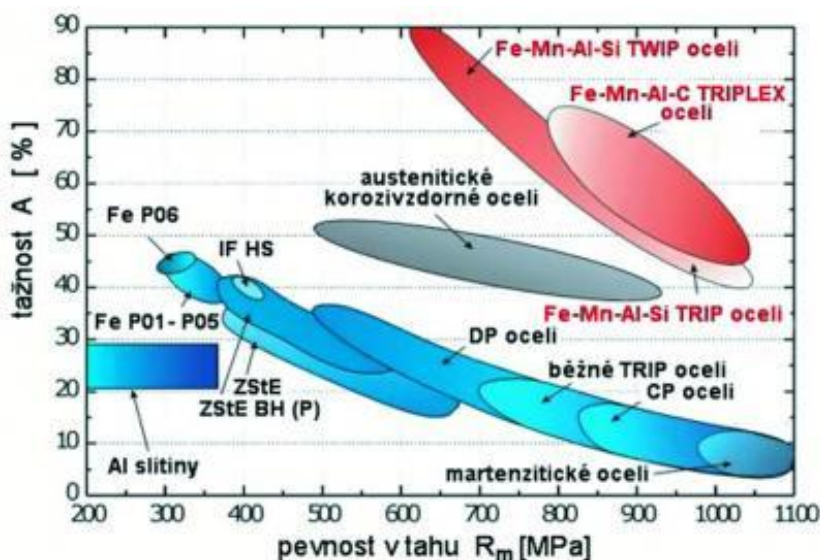
Obr. 1 Příklady součástí vyráběných tažením [10]

1 HLUBOKÉ TAŽENÍ [9], [11], [20], [23], [24], [27]

Pod pojmem tažení plechu rozumíme technologický proces, při kterém dojde k přetvoření rovného plechu (popř. pásu plechu) na prostorovou dutou nádobu – polouzavřené těleso, vyznačující se velkou tuhostí při nejmenší hmotnosti. Změna tvaru je důsledkem působení tažníku přes tažnou hranu tažnice. Tažení lze v zásadě rozdělit na tažení bez zeslabení stěny, se zeslabením stěny výtazku a na jednooperační a víceoperační tažení. Víceoperační tažení se zpravidla užívá, je-li složitost výtazku příliš vysoká nebo dochází k velkému přetvoření. Na obr. 2 jsou zobrazeny základní technologie tažení.



Obr. 2 Základní typy tažení [40]

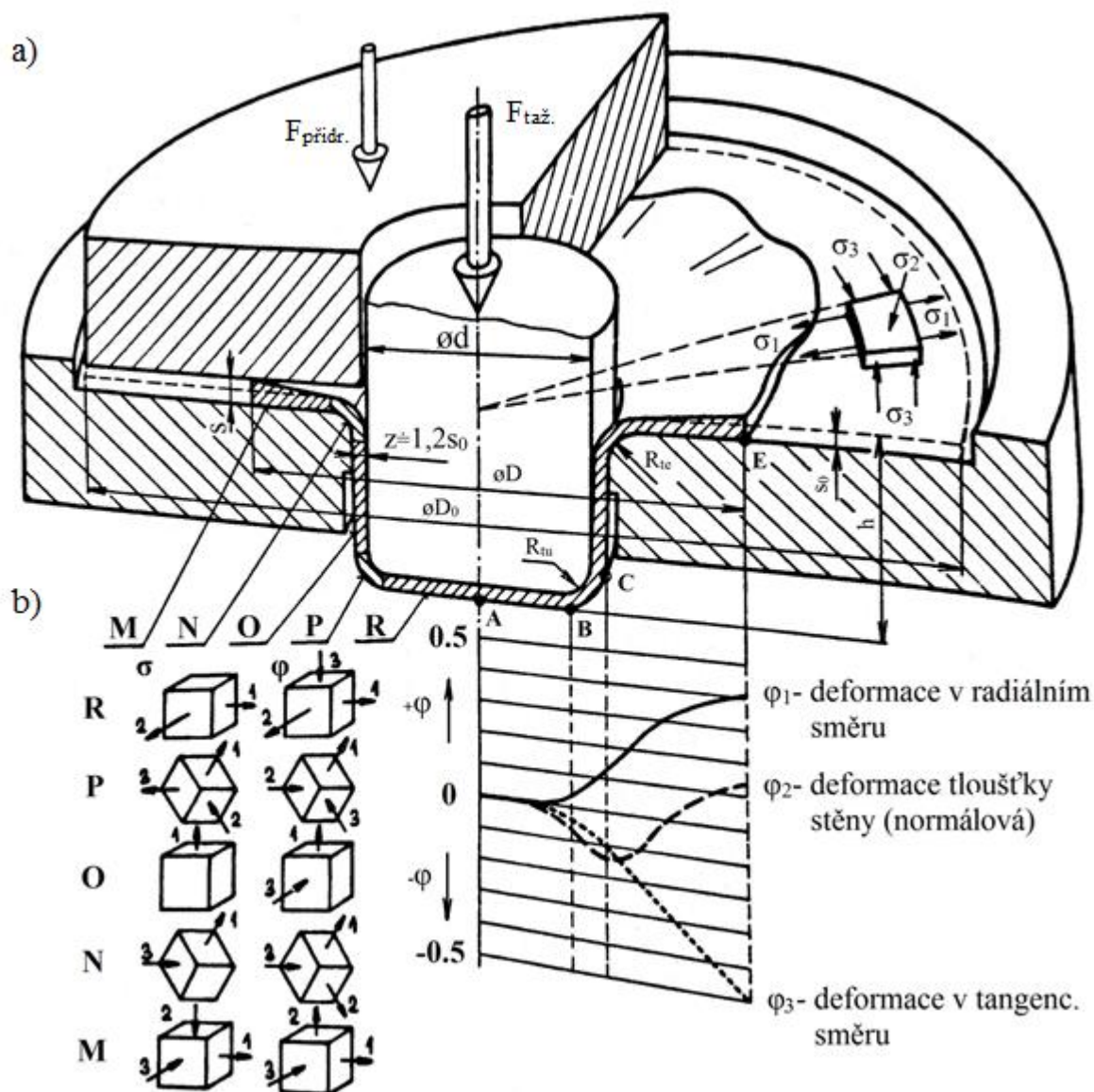


Obr. 3 Závislost tažnosti na pevnost v tahu [25]

Napětí způsobené tažnou silou nesmí přesáhnout mez pevnosti daného materiálu, aby nedošlo k utržení dna. To může také nastat v případě, kdy se vlivem tečného napětí v taženém plechu tvoří vlny, které se mohou volně zvětšovat. Obtížnost tažení je dána především druhem taženého materiálu (obr. 3), ale také tvarovou složitostí výtazku.

1.1 Proces tažení plechů [8], [9], [19], [23], [27]

V průběhu tvorby válcového výtažku tažením (zobrazeném na obr. 4 a) dochází k intenzivnímu petchování v tangenciálním směru v místě příruby (M), které způsobuje napětí σ_3 . Použitím přidržovače zamezíme vzniku vlnění a materiál tak projde nezvlněn otvorem v tažnici. V průběhu také dochází k prodloužení v radiálním směru (působením napětí σ_1). Přesto, že se jedná o tažení bez změny tloušťky stěny, k němu dochází v menším rozsahu na specifických místech. Jedná se především o zúžení v místě prostorového ohybu u dna (P), v místě příruby (M) a rozšíření válcové části (O). V místě příruby může dojít ke zvětšení o 20 až 30 % v závislosti na stupni tažení.



Obr. 4 Proces tažení válcového výtažku s přidržovačem [30], [23]

Tyto místa také vykazují charakteristickou změnu struktury a tedy vlastností materiálu. Velikost těchto změn je přímo úměrná stupni deformace, při kterém dochází ke zpevnění materiálu. Okraje výtažku proto vykazují největší zpevnění. Změna tloušťky materiálu je závislá na řadě faktorů, jimiž jsou například tvar výtažku, stupeň deformace, použité mazivo, stav tažného nástroje, a jiné. Pro zjednodušení výpočtu se však tloušťka plechu považuje za konstantní, díky čemuž můžeme využívat zákon o zachování ploch výtažku.

Na obr. 4 b jsou znázorněna schémata hlavních napětí a deformací ve všech částech výlisku. Vlivem přidržovače vzniká v přírubě výtažku (M) radiální tahové napětí σ_1 současně s napětím tlakovým tangenciálním σ_3 a osovým tlakovým napětím σ_2 . Pokud uvažujeme variantu bez přidržovače, dochází ke změně napětíového schématu, přičemž osová tlaková napětí σ_2 zde není. Poloměr zaoblení tažné hrany R_{te} (oblast N) je zatěžován složitou deformací prostorového ohybu při nejvyšším radiálním zatížení σ_1 a malém tangenciálním tlakovém zatížení σ_3 . Pro snížení napětí v tomto místě je nutná správná volba maziva.

Ve válcové části (O) existuje jednoduchá jednoosá tahová napjatost σ_1 , která přechází do místa prostorového ohybu (P). Zde je prostorově nestejnoroďa napjatost způsobující již zmiňované ztenčení stěny a prodloužení. Toto místo se tak dá považovat za nejnebezpečnější místo pro vznik trhliny a následného utržení dna. Poslední částí je dno výtažku (R), to je namáháno rovinnou tahovou napjatostí a je potřeba jej vzít v úvahu až při víceoperačním tažení, kdy dochází ke zdatelnému zeslabení.

1.1.1 Napětíový rozbor tažení [11], [17], [19], [30]

Výslednou hodnotu radiálního tahového napětí σ_1 je třeba navýšit o vliv tření. Interakcí složek napětí, jež tento vliv zahrnují, určíme výsledné napětí vztahem:

$$\sigma_v = (\sigma_1 + \sigma_{tř} + 2\sigma_0) \cdot e^{\mu\alpha} \quad (1.1)$$

kde $e^{\mu\alpha}$ – součinitel zahrnující vliv tření na hraně tažnice
 $\sigma_{tř}$ – napětí zahrnující vliv tření u přidržovače
 σ_0 – napětí zahrnující vliv ohybu na hraně tažnice

V literatuře se objevuje také rovnice, kdy se uvažuje s neovlivněním napětí zahrnující vliv ohybu součinitelem $e^{\mu\alpha}$, a předpokládá se tedy, že účinek tření na tažné hraně neovlivňuje ohyb na tažné hraně. V rovnici je pak napětí σ_0 mimo závorku a není vynásobeno součinitelem $e^{\mu\alpha}$. Pro výpočet však tato změna není rozhodující, vliv na výsledné napětí je zanedbatelný. Hodnota $e^{\mu\alpha}$ vyjadřuje závislost na úhlu opásání měnicího se až do ustáleného stavu tažení, kdy lze dosadit hodnotu opásání $\alpha = 90^\circ$ a platí:

$$e^{\mu\alpha} = e^{\mu \frac{\pi}{2}} \approx 1 + \mu \cdot \frac{\pi}{2} \approx 1 + 1.6\mu \quad (1.2)$$

kde μ – součinitel kluzného tření
 α – úhel opásání

Součinitel kluzného tření velmi ovlivňuj třecí sílu v oblasti přidržovače a na tažné hran tažnice. Na jeho velikost má vliv především drsnost povrchů (přístřihu, přidržovače, tažné hrany) a použité mazivo.

Dosazením všech vlivů tření získáváme rovnici pro výsledné napětí σ_v . Tato hodnota je rozhodující pro tažení, neboť působí v nebezpečném místě zaoblení výtažku. Přesáhne-li tato hodnota mez pevnosti materiálu R_m , dojde k porušení výtažku.

$$\sigma_v = (\sigma_1 + \sigma_{tř} + 2\sigma_0) \cdot (1 + 1.6\mu) \quad (1.3)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \xi \cdot \sigma_{ps} \quad (1.4)$$

kde σ_{ps} – střední hodnota přirozeného pretvárného odporu
 ξ – Lodeho součinitel

Při využití podmínky plasticity (1.4) můžeme určit radiální tahové napětí pro ideální podmínky tažení bez přidržovače. Jeho hodnota je dána vztahem:

$$\sigma_1 = \xi \cdot \sigma_{ps} \cdot \ln \frac{D_0}{d} \quad (1.5)$$

kde D_0 – původní průměr přístřihu
 d – průměr výtažku

Třecí napětí $\sigma_{tř}$ určíme ze znalosti Coulombova zákona (1.1). Musíme ovšem zavést předpoklad, že napětí je rovnoměrné v celé tloušťce příruby. Pro kruhovou nádobu pak platí:

$$\sigma_{tř} = \frac{2 \cdot \mu \cdot F_{tř}}{\pi \cdot D_0 \cdot s_0} \quad (1.6)$$

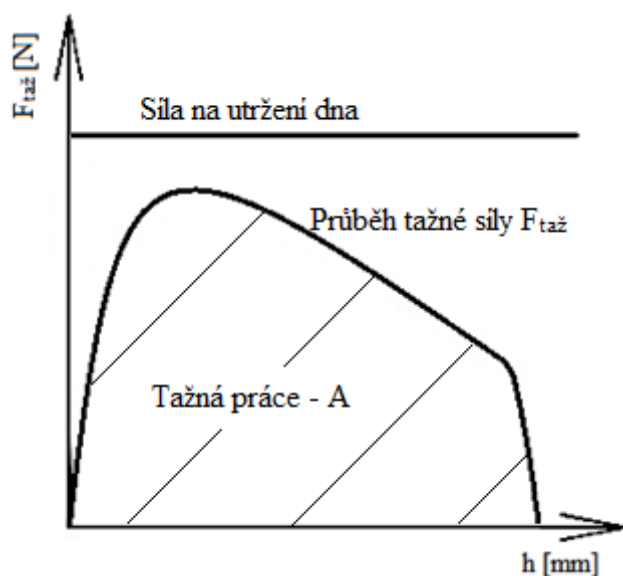
kde s_0 – původní tloušťka přístřihu
 $F_{tř}$ – třecí síla

Sílu přidržovače je nutné nastavit tak, aby nedocházelo ke vzniku zvlnění, je však také důležité brát ohled na nadměrné přetěžování, aby nedošlo k utržení dna již na začátku tažení. Napětí, jež zahrnuje vliv ohybu na tažné hraně (R_{te}) je dvojnásobné, protože se uvažuje s dvojím ohybem. Nejprve dochází k ohýbání přes tažnou hranu a poté k narovnání ve válcové části výtažku. Velikost napětí od ohybu lze vyjádřit z rovnosti rovnováhy prací a po úpravě je jej popisuje vztah:

$$\sigma_o = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{ps} \left(\frac{s_0}{2 \cdot R_{te} + s_0} \right) \quad (1.7)$$

Důležitá je také správná konstrukce zaoblení tažné hrany tažnice, při malém poloměru může docházet vytlačení maziva a zvýšení výsledného radiálního napětí. Opačné nebezpečí hrozí u velkého poloměru, kdy může dojít ke ztrátě stability a vzniku vln.

1.1.2 Tažná síla a práce [17], [40]



Obr. 5 Závislost tažné síly na hloubce vniknutí tažníku [11], [27]

Určení tažné síly je pro hluboké tažení velmi důležité, se znalostí její maximální hodnoty můžeme správně zvolit výrobní stroj (lis) pro danou operaci tažení. Jak vyplývá z předešlého rozboru napětí, lze určit velikost tažné síly jako:

$$F_{taž} = S \cdot \sigma_v \quad (1.8)$$

Kde S je průřez stěny výtažku a pro kruhovou nádobu tedy platí:

$$F_{taž} = \pi \cdot d \cdot s_0 \cdot \sigma_v \quad (1.9)$$

Na obr. 5 je znázorněn skutečný průběh tažné síly. Maximální hodnota odpovídá stavu, kdy dojde k ustálení procesu a úhel opásání dosáhne hodnoty $\pi/2$. Velikost hloubky, v které se nachází tažník pak odpovídá součtu zaoblení tažné hrany, zaoblení tažníku a tloušťce

přístřihu. Pro urychlení výpočtu se v praxi využívá zjednodušeného tvaru, jenž vychází ze skutečnosti, že tažná síla nemůže být větší, než síla potřebná k přetržení výtažku. Síla vycházející z této skutečnosti je znázorněna v obr. 5. Empirický vzorec pak má tvar:

$$F_{taž_{max}} = C \cdot \pi \cdot d \cdot s_0 \cdot R_m \quad (1.10)$$

kde C – konstanta
 R_m – mez pevnosti

Konstanta C vyjadřuje vliv součinitele tažení s přihlédnutím k poměrné tloušťce. Jeho hodnota je pro vypočtený součinitel tažení uvedena v tabulce 1. Tento výpočet se také využívá pro kontrolu jmenovité síly lisu.

Tabulka 1 Hodnoty součinitele C [30]

d/D	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8
C	1	0,86	0,72	0,6	0,4

K určení tažné síly lze využít také další principy jako například výpočet založený na redukování průměru přístřihu a na síle potřebné k utržení dna. Tento výpočet bere v úvahu neschopnost klikového lisu působit maximální silou v celé hloubce výtažku a zahrnuje také vliv velikosti přetvoření na maximální sílu.

$$F_{taž} = F_{taž_{max}} \cdot \left(\frac{D_0}{d} - 0.7 \right) \quad (1.11)$$

kde $F_{taž_{max}}$ – síla na utržení dna

- Tažná práce

Se znalostí tažné síly také souvisí určení velikosti práce tažení, což umožní přesnější volbu stroje. Výpočet může vycházet ze znalosti přetvárných odporů pro daný materiál při dané geometrii nástroje jako integrál křivky přetvárného odporu (obr. 4). Tento výpočet je však nevhodný pro běžnou praxi, neboť by vyžadoval pro každý materiál a nastavení vlastní experiment. Je proto třeba vycházet ze znalosti tažné síly dané operace. Využívá se závislost maximální hodnoty tažné síly na výšce výtažku.

$$A = F_{taž_{max}} \cdot h \quad (1.12)$$

kde h – výška výtažku

1.1.3 Výpočet velikosti přístřihu [9], [19], [30]

Stanovení velikosti přístřihu vychází ze zákona zachování objemu a zanedbání změn tloušťky plechu při tváření, uvažujeme tedy tloušťku za konstantní. Tím dojde k zjednodušení a výpočet probíhá z rovnosti ploch. Při výpočtu se součást rozdělí na jednoduché tvarové části, pro které lze jednoduše vypočítat povrch. Vypočítaná plocha z výrobního výkresu se poté navýší o 10 % jako přídavek materiálu na odstřížení nebo při víceoperačním tažení přídavek 3 % na první tah a další 1 % pro ostatní tahy. Tento přídavek lze také určit z tabulek pro typy výtažku s přírubou či bez ní a slouží k možnosti odstřížení deformovaných okrajů výtažku vzniklých v důsledku anizotropie plechu, jejímž důsledkem je cípatost výtažku.

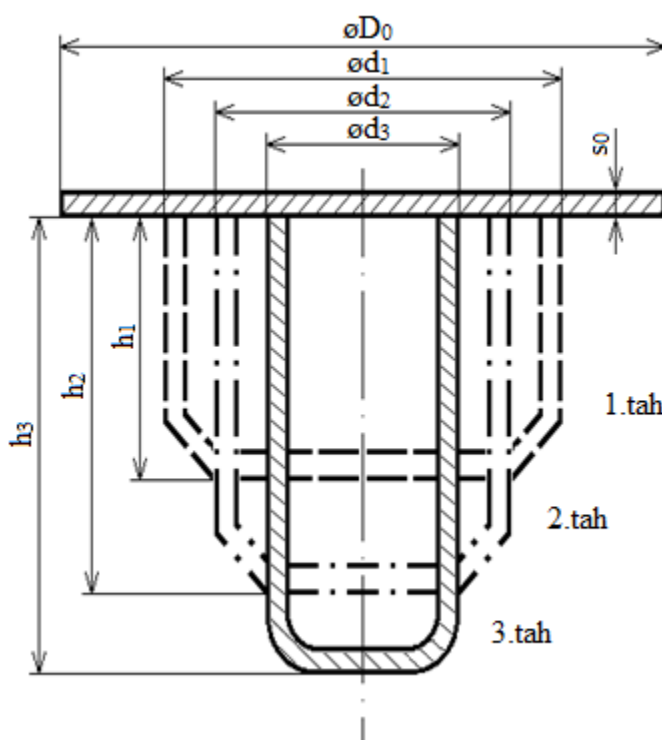
Pro rotační výtazky lze z navýšené plochy S poté určit průměr přístřihu (D_0) rovnicí pro kruhovou plochu:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \quad (1.13)$$

1.1.4 Stanovení počtu tažných operací, součinitel tažení [9], [19], [24], [30]

Při tvorbě technologického postupu výroby dané součásti víceoperačním hlubokým tažením se projevuje snaha o dosažení konečného tvaru co nejmenším počtem operací, tento tlak je vyvíjen především ekonomikou výroby. Je také ovšem třeba brát v úvahu poškození materiálu při nadměrném namáhání a deformacích. Není-li možné zhotovit součást na jeden tah, je nutné postupné redukování průměru v několika dalších tazích, na obr. 6 je znázorněna výroba válcové součásti na tři tahy.

Počet tahů, které je nutno provést, aby bylo dosaženo konečného tvaru výlisku, závisí především na jeho tvaru, velikosti, tloušťce a na jeho materiálových vlastnostech. Během tažení dochází, jak bylo již dříve zmíněno k deformačnímu zpevňování, což má za následek snižování plasticity materiálu při dalších tazích. Obnovení plastických vlastností materiálu lze provést zařazením operace rekrystalizačního žhání mezi jednotlivé tahy. Mezioperační žhání je vhodné zařadit především v těch případech, je-li nutné provádět více jak tři tahy, doporučováno je pak zařazení žhání po třetím tahu. Při určování počtu tažných operací se vychází se znalostí tzv. mezního stavu tažení (součinitel tažení) pro daný tah.



Obr. 6 Schéma víceoperačního tažení [30]

Mezioperační žhání je vhodné zařadit především v těch případech, je-li nutné provádět více jak tři tahy, doporučováno je pak zařazení žhání po třetím tahu. Při určování počtu tažných operací se vychází se znalostí tzv. mezního stavu tažení (součinitel tažení) pro daný tah.

$$m = \frac{d}{D_0} \quad (1.14)$$

$$K = \frac{1}{m} = \frac{D_0}{d} \quad (1.15)$$

Součinitel tažení (1.14) určuje velikost mezního přetvoření pro jeden tah, dojde-li k jeho překročení, vyčerpá se plasticita materiálu a nastane jeho poškození. Převrácená hodnota součinitele tažení se nazývá stupeň tažení (1.15). Velikost celkového součinitele tažení ovlivňuje především homogenita materiálu, štíhlostní poměr s_0/D_0 , tloušťka plechu, mazání, rychlost deformace, velikost přídržovací síly, podmínky tažení a další. Počet tažných operací

Lze určit ze znalostí minimálních hodnot součinitelů tažení pro daný materiál. Tyto informace je možno najít v odborné literatuře. Pro víceoperační tažení platí, že velikost požadovaného celkového součinitele tažení musí být vždy větší, než součin všech hodnot součinitelů tažení v jednotlivých operacích ($m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_n$). Z této podmínky vyplývá, že lze výtažek vyrobit na jeden tah, pokud $m_c \geq m_1$.

$$m_c \geq m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_n = \frac{d_n}{D_0} \quad (1.16)$$

Minimální hodnoty součinitelů tažení pro ocel, mosazi a hliníkové slitiny jsou uvedeny v tabulce 2. Tyto hodnoty se používají především u tažnic a tažníků s větším zaoblením a při tažení vysoce hlubokotažných materiálů.

Tabulka 2 Hodnoty součinitelů tažení [19]

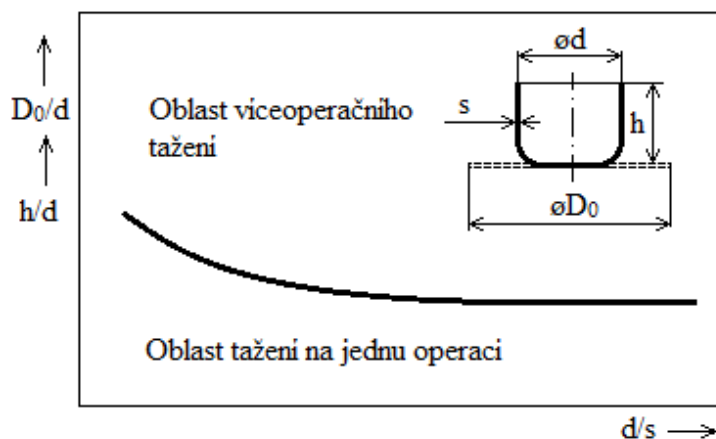
	m_1	m_2	m_3
Ocel	0,48-0,5	0,73-0,75	0,76-0,78
Mosazi a slitiny Al	0,48-0,49	0,69-0,71	0,72-0,74

Další možností určení maximální dosažitelné deformace jsou diagramy mezního stupně přetvoření. Jedná se o experimentálně vytvořené diagramy obsahující hranici mezi dobrými výlisky a oblastí jejich porušení.

Bývají zpravidla určeny poměry geometrických charakteristik součásti a lze je s výhodou použít pro tvarově podobné součásti již při konstrukci výtažků a také pro jejich technologické postupy.

Na obr. 7 je zobrazen příklad diagramu mezního přetvoření s křivkou oddělující oblasti pro jednooperační tažení od oblasti, kde dochází ke ztrátě stability vtahované příruby a k jejímu zvlnění.

Výtažky, které v důsledku geometrických parametrů přesáhnou křivku, je nutné táhnout na dva a více tahy.

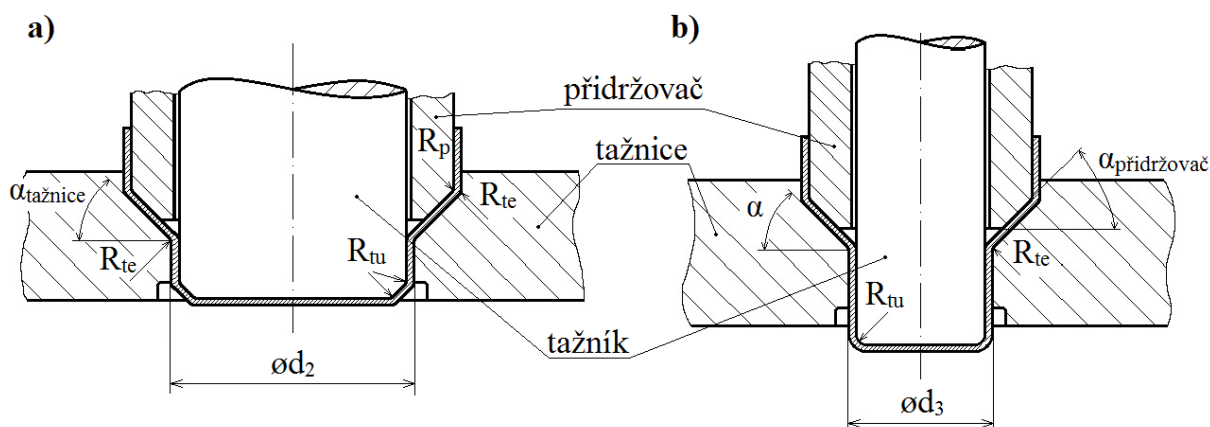


Obr. 7 Diagram mezního stupně přetvoření [19]

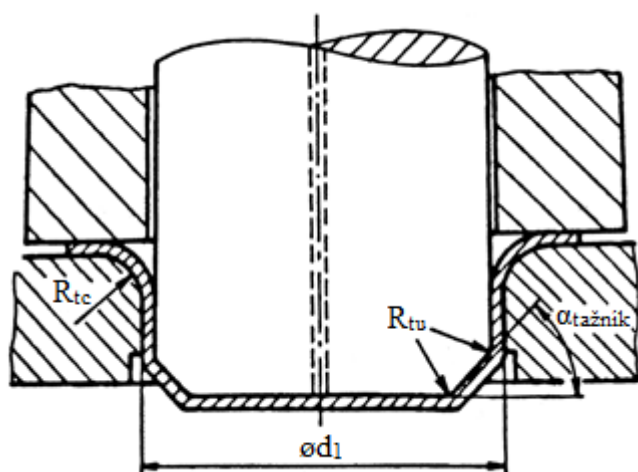
1.1.5 Nástroj pro tažení [9], [11], [12], [24], [27], [40]

Na správné konstrukci tažných nástrojů závisí úspěšná výroba výtažků a zmetkovitost výroby. Jejich návrh není složitý a finančně náročný, je však důležité dbát na požadavky související s vyráběným výtažkem. I malá nepřesnost může zhoršit kvalitu vyráběné součásti. Pro testování příslušného nástroje ve výrobě lze v dnešní době výhodně využít simulační programy. Existuje řada softwarů pro plošné tváření umožňující poskytovat téměř shodné výsledky, jako by vykazovaly ekonomicky náročnější experimenty. Nevýhodou je nemožnost pokrytí všech vlivů ovlivňující proces tažení, i přes to jsou však výsledky více než uspokojivé a při nastavení shodných podmínek lze dosáhnout výsledků téměř odpovídajících reálnému

procesu. Konstrukce nástroje pro tažení se liší pro první a další tahy a jsou zobrazeny na obr. 8 a 9. Velikost úhlu α se pohybuje v rozmezí od 30 do 45°.



Obr. 8 Nástroj pro 2. a předposlední tah (a) a poslední tah (b) [30]

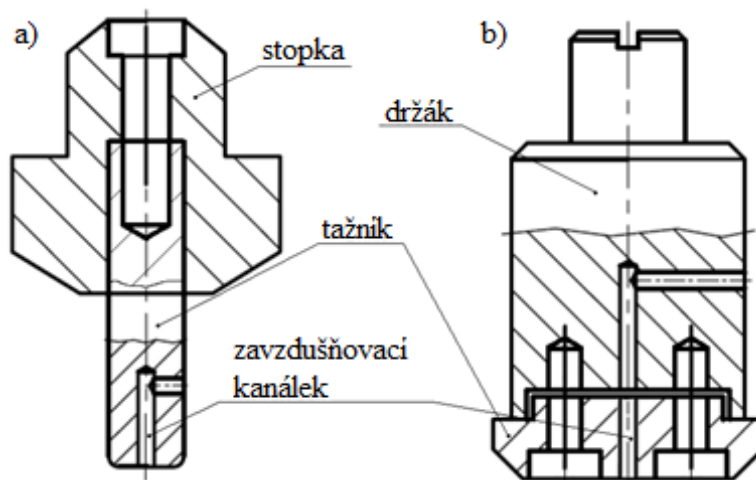


Obr. 9 Schéma nástroje pro 1. Tah [30]

velikosti. Pro malé průměry se tažník upíná přímo ke stopce. U větších průměrů existuje více možností upnutí. V závislosti na tvaru a velikosti lze např. celistvý tažník se závitem našroubovat na držák, upnout pomocí šroubů (obr. 10). Upnutí lze také provést nalisováním, přilepením, či pájením. Pro největší průměry je možné tažník také vložkovat.

- Tažník

Částí nástroje pro tažení odpovídající vnitřní straně výtažku nazýváme tažník. Je tvořen válcovou částí, zaoblenou hranou o daném poloměru a čelem, bývá zpravidla vyroben z nástrojových ocelí dosahujících tvrdostí 58 až 64 HRC po tepelném zpracování. Upevněn je pak v držáku, vyrobeném z konstrukční oceli třídy 11 (11 500, 11 600), případně se využívá šedá litina pro rozměrné nástroje. Konstrukce tažníku je závislá především na jeho



Obr. 10 Tažník pro malé (a) a větší (b) průměry [11]

Vliv zaoblení tažné hrany tažníku příliš neovlivňuje tažnou operaci a jeho tvar závisí na pořadí, v kterém probíhá tah. Pro první až předposlední tah je hrana zkosená, což je zobrazeno

Tabulka 3 Minimální rádius hrany tažníku [30]

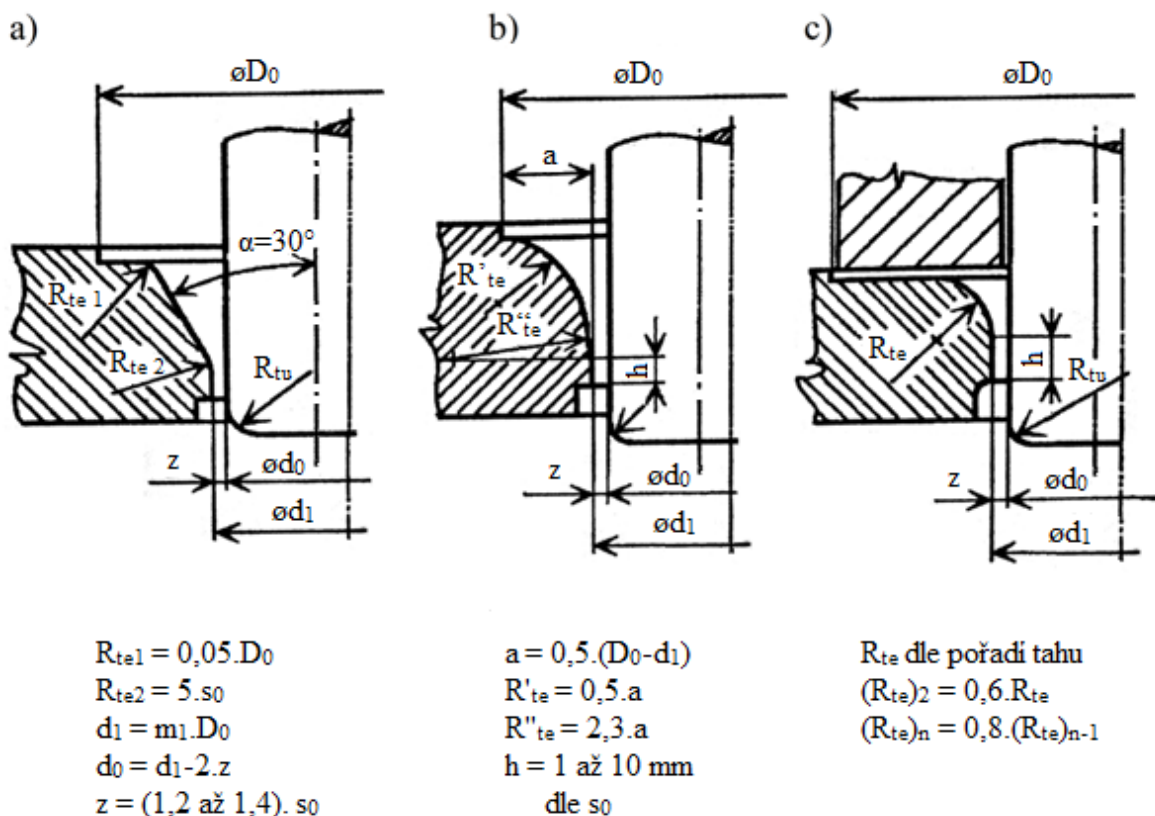
Průměr výtažku [mm]	R_{tu} [mm]
10-100	$(3-4)s_0$
100-200	$(4-5)s_0$
200+	$(5-7)s_0$

v tabulce 3. Je-li ve výkresové dokumentaci požadovaný menší rádius, je nutné provést navíc kalibrační operaci, při které nedochází ke změně průměru, pouze ke změně rádiusu u dna.

na obr. 9 a obr. 8 a. Pro poslední tah je pak hrana zaoblena dle požadovaného poloměru. Velikost zaoblení je třeba volit s ohledem na průměr výtažku a tloušťku taženého plechu. Minimální hodnoty zaoblení hrany tažníku jsou uvedeny

- Tažnice

Tvar a rozměry tažnice závisí na požadovaném výtažku a způsobu jeho vyjímání. Pro jednoduché rotační výtažky má tažnice prstencový tvar. Pro vyjímání výtažku nad tažnicí bývá vnitřní válcová část navrhována se zkosením. Nejdůležitějším místem na tažnici je její zaoblení neboli tažná hrana. Její velikost je závislá na řadě faktorů a má podstatný vliv na tvářecí proces, především na velikost tažné síly, ale také ovlivňuje výskyt zvlnění a přeložení. Větší poloměr tažné hrany umožňuje snížit nebezpečí porušení soudržnosti materiálu při tažení a zároveň umožňuje táhnout větší hloubky výtažků při výhodnějším součiniteli tažení. Tím se sníží potřebná tažná síla a dochází k menšímu ztenčení tloušťky v místě zaoblení dna. Nevýhodou je oproti tomu menší plocha styku s přidržovačem.



Obr. 11 Geometrické charakteristiky základních konstrukcí tažné hrany [30]

To může vést k tvorbě zvlnění a přeloženin, způsobené nízkou hodnotou přidržovací síly. Zaoblení má tedy hlavní vliv na přesnost a kvalitu tažení, proto je normou ČSN 22 73 01 udávána doporučená hodnota zaoblení pro jednooperační tažení dle vztahu:

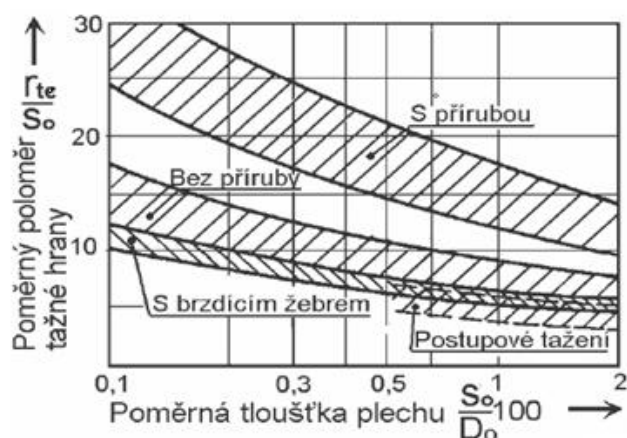
$$R_{te} = (6 \div 10) \cdot s_0 \quad (1.17)$$

Jsou-li hodnoty deformace nízké nebo v případě kdy je prováděn tzv. tah na hotovo, je možné volit i nižší hodnoty zaoblení tažné hrany. V opačném případě (velká deformace) větší zaoblení snižuje namáhání materiálu a nedochází k porušení. Nevýhodou je ovšem nižší přidržovací síla a tedy nebezpečí zvlnění. Pro víceoperační tažení se velikost zaoblení určí vztahem 1.17. Tento vztah je vhodný především pro výtahy z oceli a mosazi. Je-li výtahek vyhotovován z měkčích materiálů jako je například hliník, je nutné zvýšit vypočtenou hodnotu zaoblení přibližně o 10 %.

$$R_{te} = 0,8 \cdot \sqrt{s_0 \cdot (D_0 - d)} \quad (1.18)$$

Tažnou hranu lze konstruovat více způsoby, což se uplatňuje především u tažení bez přidržovače. Ty jsou znázorněny na obr. 11 společně se základními charakteristikami. Tažná hrana se upravuje na jeden poloměr (obr. 11 c), popřípadě se kombinuje s kuželovým zkosením (obr. 11 a). Evolventní zaoblení složené ze dvou tangenciálně napojených rádiusů se s výhodou uplatňuje při tažení s nízkými hodnotami tažné síly při součiniteli tažení až $m = 0,35$. Tento typ se nazývá TRATRIX křivka (obr. 11 b).

Určit velikost zaoblení lze také z diagramu vycházejícího z podobnosti součástí a znalostí z technické praxe. Vychází se ze závislosti poměrné tloušťky plechu na poměrném poloměru tažné hrany (obr. 12) a výsledná velikost poloměru tažné hrany se vypočítá z odečtené hodnoty pro poměrnou tloušťku. Pro případ tažení rozměrných mělkých součástí nebo při malých deformacích se doporučuje volit menší zaoblení tažné hrany $(2 \div 4) \cdot s_0$.



Obr. 12 Graf pro určení poloměru tažné hrany [30]

- Tažná mezera

Při tažení se zeslabením stěny je velikost tažné mezery rovna požadované tloušťce po vytažení a dojde tedy k redukci stěny během procesu tažení. V tomto případě nemá tažná mezera výraznější roli. Nutnost jejího správného návrhu je tedy důležitá především u tažení bez zeslabení stěny, kdy se její správnou hodnotou sníží hodnota tření a nedochází k nežádoucímu ztenčení. Tažná mezera se volí větší než je tloušťka plechu, výjimkou je kalibrace, zde je velikost stejná. Norma ČSN 22 73 01 určuje velikost tažné mezery

(z) následujícím vztahem. Volba nižších hodnot může vést k utržení dna, je-li příliš velká, dochází ke vzniku zvlnění a přeloženin.

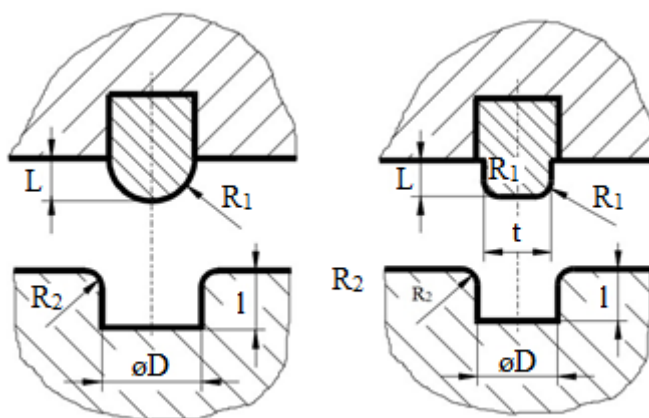
$$z = 1,2 \cdot s_0 \quad (1.18)$$

Vliv na velikost tažné mezery má také materiál a množství tažných operací. Tyto vlivy lze zahrnout do určení velikosti tažné mezery použitím empirických tabulek. Oba vlivy současně zahrnuje Oehlerův vztah.

$$z = s_{max} + k \cdot \sqrt{10 \cdot s_0} \quad (1.19)$$

- Brzdící lišta

Používá se pro zvýšení tření v místě přidržovače bez nutnosti nadměrně zvyšovat tlak přidržovače. Při tažení se zeslabením stěny může vhodnou geometrií částečně zeslabovat tloušťku už v přidržovači. Pro rotační symetrické výtažky se brzdící lišta umísťuje po celém odvodu, u nerotačních součástí je nutné brát zřetel na rohové části, kde v důsledku působení tlakového tangenciálního napětí dochází ke zvětšování tloušťky přístřihu, což se projevuje zvýšeným tlakem přidržovače. Brzdící lišty se tedy u těchto součástí umísťují do míst, kde k tomuto nedochází, aby se vyrovnala velikost přidržovací síly po celém obvodu. Lišta je zpravidla umístěna v přidržovači a v tažnici je zahlobení. Základní tvary brzdících lišt jsou zobrazeny na obr. 13. Při tažení velmi složitých výtažků se používá i více brzdících lišt za sebou. Při jejich použití bývá nutné ukončit tažení před opuštěním přístřihu, proto je potřeba navýšit velikost přístřihu o přídavek, který je potřeba v další operaci odstříhnout.



Obr. 13 Základní typy brzdících lišt [39]

- Materiály tažného nástroje

Doporučené materiály pro části tažného nástroje jsou uvedeny v tabulce 4. Pro funkční části je nutné tepelné zpracování na předepsanou pevnost.

Tabulka 4 Materiály tažného nástroje [30]

Část tažného nástroje	Materiál	Pevnost po tepelném zpracování
Tažník, tažnice	19191, 19436, 12061, 422456	58 až 63 HRC
Základové desky	422456, 422661.2	
Zakládací kroužky	11600	
Přidržovač	19191, 19436, 422456	61 až 63 HRC
Brzdící lišta	19191, 19436, 422456	61 až 63 HRC

2 TRIBOLOGIE [13], [14], [51]

Tribologie je nauka, která zkoumá výzkum a technické využití poznatků a zákonitostí v oblasti tření a mazání. Zabývá se problematikou styku dvou povrchů, jež vůči sobě vykonávají pohyb nebo na sebe působí silami, jež se pohyb snaží vyvodit. Rozlišujeme tyto druh pohybu: valivý, kluzný, kmitavý a nárazový. Skutečný proces nelze popsat pouze jedním pohybem, skládá se současně z dvou i více druhů pohybu a je možné jej charakterizovat



Obr. 14 Motorový olej [21]

vzájemným dynamickým působením třecích ploch, mezilátky a okolím.

Nejedná se o nový vědní obor, neboť problémy s třením se objevily již při vzniku prvních strojů. Jako samostatný obor vznikla tribologie až v 60. letech 20. století a má velký vliv na zvyšování účinnosti strojních součástí. Tření způsobuje velké množství negativních vlivů jak už ve strojích, tak v technických procesech. V některých tvářecích procesech jej lze ovšem také využít jako zdroje tepla či pro přidržování. Proto je důležitá znalost tribologie daného procesu.

2.1 Procesy tření [14], [15], [22], [36], [37], [48], [51]

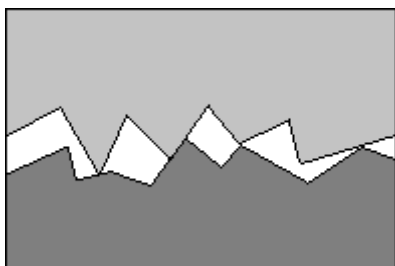
Problematika styku dvou dotýkajících se povrchů s sebou přináší bližší zkoumání třecích mechanismů. Dle hloubky rozboru těchto procesů rozlišujeme zkoumání na úrovni makromodelu a mikromodelu. Úroveň mikromodelu zohledňuje tření jako elementární jev. Při úrovni makromodelu se sleduje celý funkční stav modelu a informace získáváme z vnějšího měření veličin systému (třecí síla při tangenciálním pohybu, třecí práce, třecí moment v rotačním systému, aj.). Obecná definice tvrdí, že tření je odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru. Tato definice ovšem neodpovídá vnitřnímu tření a proto lze také tření vyjádřit jako ztrátu energie na začátku (popř. na konci) pohybu dvou dotýkajících se oblastí. Ze znalostí tribologického systému vyplývá, že mohou nastat čtyři základní druhy tření:

1. Suché tření (tření tuhých těles) - nastává, když dochází k přímému styku dvou materiálů, které se nacházejí v tuhém stavu
2. Kapalinové tření - nastává, pokud vrstva materiálu, v které probíhá tření, má vlastnosti kapaliny
3. Plynné tření - třecí vrstva má vlastnosti plynu
4. Plazmatické - třecí vrstva má vlastnosti plazmy

Při skutečném procesu se tyto stavy tření vyskytují odděleně výjimečně, tření zpravidla probíhá jejich kombinací. Průběh skutečného procesu tření se také odlišuje mírou oddělení povrchů, mezi kterými probíhá tření. Stavy popisující možnosti oddělení jsou suché tření, mezní tření, kapalinové tření a smíšené tření.

- Suché tření

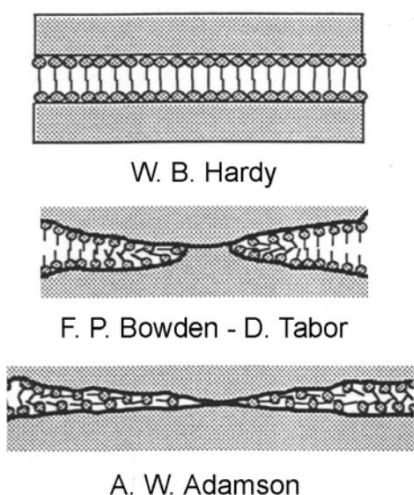
Nejvýraznější vliv na suché tření má vlastnost povrchů (velikost povrchu, mechanické vlastnosti, chemické složení, chemická reaktivita, nečistoty). Dochází k přímému styku dvou materiálů (obr. 15) a vzniku sil bránících pohybu. Tyto síly mají deformační a adhezí charakter a oba jsou ovlivňovány především vlastnostmi povrchů. Deformační charakter se uplatňuje mechanickými vazbami, které se projevují vylamováním zrn, ustrižením výčnělků či jejich plastickou deformací. Tyto projevy jsou dány pevností materiálů, mezi kterými dochází ke tření. U hlubokého tažení je suché tření považováno za nežádoucí, využíváno je pouze jako mechanismus přidržovače.



Obr. 15 Suché tření (tření pevných těles) [14]

- Mezné tření

Tento stav nastává, když mezi povrchy existuje malá vrstva absorbovaných molekul kapaliny (popř. plynu). Většinou nastává u nemazaných povrchů, u kterých chemickou reakcí mezi nimi vznikne požadovaná vrstva, může však nastat i u mazaných povrchů při nedostatečném přívodu maziva. Dojde tak k přiblížení povrchů na kritickou vzdálenost, kdy jejich styku brání pouze mezná vrstva maziva, která je charakteristická velkou přilnavostí k povrchu. Ve výrobní operaci tento stav nastává, pokud dojde k velkému tlakovému zatížení třecí plochy, při malých smykových rychlostech, v případě velké drsnosti povrchů.



Obr. 16 Mezné tření [48]

Na obr. 16 je znázorněna povrchová vrstva při mezním mazání, která se skládá z polárních molekul tvořících dlouhé řetězce. Jejich orientace směřuje kolmo k povrchu a jsou k němu poutány polárními konci. I přes to, že velké množství rafinovaných ropných olejů má nepolární charakter, umožňuje již malé množství obsažené látky polárního charakteru vznik mezní vrstvy. Tyto složky pak absorbují na površích běžných kovů, používaných při tváření.

Absorpce kapalin či plynů na povrchu materiálů, mezi nimiž probíhá tření, je základním mechanismem vzniku mazacího filmu, důležité jsou však také chemické přeměny třecích povrchů. Na únosnost mezní vrstvy má vliv především rychlost a pevnost absorpce, orientace vzhledem k povrchu, teplota a tlak, při kterém tření probíhá (zvětšuje se s rostoucím tlakem a snižující se teplotou).

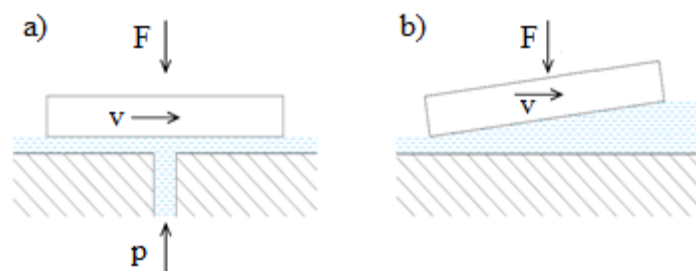
- Kapalinové tření

Charakteristikou kapalinového tření je dokonalé oddělení třecích povrchů vrstvou maziva (obr. 17), jež umožňuje zcela vyrovnat drsnost povrchů a vlastním tlakem vyruší účinky kolmého zatížení působícího na tělesa. Tím je dosaženo závislosti velikosti tření pouze na velikosti vnitřního tření v mazivu. K vyvození tlaku



Obr. 17 Kapalinové tření [14]

kapaliny může dojít dvěma mechanismy a to hydrostaticky nebo hydrodynamicky, což je zobrazeno na obr. 18.



Obr. 18 Mazání hydrostatické (a) a hydrodynamické (b) [38]

Velikost vnitřního tření lze vyjádřit vztahem:

$$F_t = \eta \frac{S_t \cdot v}{h_t} \quad (2.1)$$

kde η – dynamická viskozita
 S_t – styčná plocha třecích povrchů
 v – rychlost pohybu třecích povrchů
 h_t – tloušťka vrstvy maziva

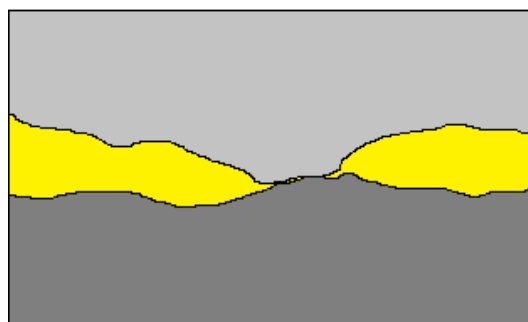
Úpravou lze vyjádřit vztah pro součinitel kapalinového tření:

$$\mu_k = \frac{\eta \cdot v}{h \cdot p} \quad (2.2)$$

kde p – střední měrný tlak (učí se jako $\frac{F_N}{S_N}$, kde S_N je průmět kluzné plochy)

Kapalinové tření je v široké škále aplikací nejvýhodnější mechanismus styku dvou pohybujících se povrchů.

- Smíšené tření



Obr. 19 Smíšené tření [14]

Pokud při kapalinovém tření nedojde k úplnému oddělení třecích ploch mazivem a tím je umožněn dotyk v místech nerovností, nastává současně tření kapalinové a mezní. Tento stav nazýváme smíšeným třením (obr. 19). Vrstva maziva v dotyku nerovností musí být vyšší, než je mezní vrstva. Tento jev nastává především při velkém tlakovém zatížení současně s malou smykovou rychlostí třecích ploch. Velký vliv má také viskozita použitého maziva. Porušení mazací vrstvy je ovlivněno teplotou maziva při zvýšených tlacích a smykových rychlostech. Tento typ tření převažuje při tváření kovů a velikost mezní složky značně ovlivňuje výslednou kvalitu výrobku.

2.2 Matematické modely tření [31], [42], [46], [49]

Matematický model tření vyplývá z charakteristiky, kdy je tření charakterizováno jako kluzný odpor, který se projeví mezi dvěma plochami pohybujícími se vůči sobě tangenciálně. Kluzný odpor pak lze určit jako velikost smykových napětí (τ_R) v mezeře. Teorie plasticity uznává dva modely, které popisují smyková napětí.

- Coulombův zákon

Vztah popisující Coulombův zákon má tvar:

$$F_{tř} = \mu \cdot F_n \quad (2.3)$$

kde F_n – normálová síla (kolmá k povrchu)
 μ – součinitel tření

Velikost součinitele závisí především na materiálu ploch, použitém mazivu, také na tlaku, rychlosti a teplotě. Vztah lze upravit do tvaru: $\tau_R = \mu \cdot \sigma_n$, čímž můžeme určit místní smykové napětí τ_R ze známých hodnot součinitele tření a kontaktního normálního napětí σ_n . Pro případ, kdy dochází k menším hodnotám normálního napětí, než je hodnota přirozeného přetvárného odporu materiálu (σ_p), platí mezi σ_n a τ_R linearita a součinitel tření μ může nabývat různých konstantních hodnot. Tyto hodnoty jsou však omezeny. Pro každé normální napětí existuje odpovídající maximální velikost μ závisující na σ_n a σ_k (mez kluzu ve smyku).

Pro podmínku plasticity HMH,

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_k \quad (2.4)$$

dosahuje maximální hodnota součinitele tření:

$$\mu_{max} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 0.577$$

Podmínka plasticity τ max:

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3), (\sigma_1 - \sigma_3) = \tau_{krit} \\ \tau_{krit} &= \frac{1}{2} \cdot \sigma_k \end{aligned} \quad (2.6)$$

Pro podmínku plasticity τ max dosahuje hodnota μ_{max} velikosti: $\mu_{max} = 0.5$

Z tohoto lze obecně říci, že pro všechny procesy tváření, které probíhají za podmínky $\sigma_n > \sigma_k$, je velikost $\mu_{max} \in \langle 0.5; 0.577 \rangle$. Nastane-li případ, kdy $\tau_R = \tau_{Rmax} = \sigma_k$ a zároveň $\mu = \mu_{max}$ dojde k odstřižení měkčího z třecích materiálů rovnoběžně s plochou dotyku. Tento jev se nazývá *pick-up*.

- Druhý fyzikální model

U tohoto modelu se vychází z obecné závislosti $\tau_R = m \cdot \sigma_k$, která popisuje průběh τ_R pomocí třecího faktoru m . Jeho hodnota se může pohybovat v rozmezí $m \in \langle 0; 1 \rangle$, kdy hodnota 0 značí stav bez tření a hodnota 1 stav adhezního přilnutí.

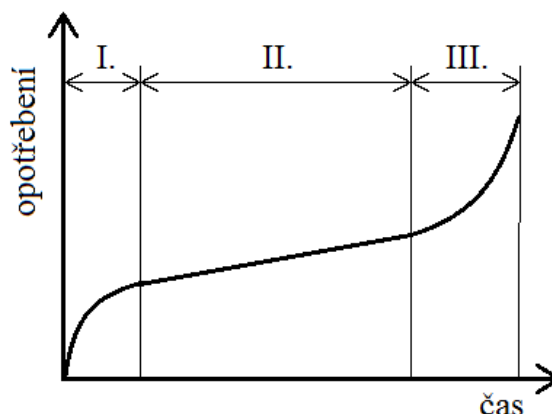
2.3 Povrch materiálu, jeho hodnocení a opotřebení [5], [7], [14], [18], [26], [32], [44], [48]

S problematikou mazání velmi úzce souvisí hodnocení povrchu materiálu, jelikož úspěch mazání je přímo ovlivněn geometrií povrchu. To se projevuje především charakterem procesu tření. Povrch těles v oblasti tribologie je nutné specifikovat několika parametry, jedná se především o jeho fyzikální, chemické a geometrické vlastnosti. Ty pak mají vliv na výslednou kvalitu a jakost povrchů. Povrch každé reálné součásti vykazuje odlišnosti vůči ideálně rovnému povrchu, jedná se především o jeho tvar, polohu a drsnost. Základním parametrem hodnotícím kvalitu povrchu je její drsnost, která je popsána normovanými parametry. Tyto parametry popisuje norma ČSN EN ISO 4287.

Hodnocení povrchu je rozsáhlý problém, z hlediska tribologie jsou používána hodnocení kvality povrchu dle norem nedostačující. Podle aktuálních norem není možné určit pro tribologii zásadní informace jako je velikost styčné plochy, její změna během zatěžování, vlivy technologických parametrů a další. Nejlépe lze povrch pro tribologický systém zobrazit vrstevnicovými mapami, případně pomocí trojrozměrného modelu. Jedná se však o časově a finančně velmi náročné operace a jsou k nim zapotřebí speciální měřicí zařízení.

- Opotřebení při tváření

Tření během tváření je výrazně rozdílné oproti tření mezi strojními součástmi, projevuje se energetickou náročností, velikostí silových účinků na nástroj a řadou dalších projevů. Hlavním z nich je opotřebení nástrojů, které s sebou přináší zvýšené náklady na údržbu, opravy a renovace. Opotřebení mezi nástrojem a výtazkem je velmi složitý děj, který je ovlivňován řadou faktorů tažného procesu. Je to dáno především tím, že nelze určit přesné hranice použitelnosti nástroje. S rostoucím opotřebením se mění charakter silového zatížení a dochází ke změnám namáhání v průběhu životnosti. Opotřebení může vést k nestálosti procesu, vzniku chvění, rázů, růstu třecích sil, popřípadě k zadírání. Proces opotřebení se projevuje změnou geometrie nástroje mechanickým účinkem a může k němu docházet řadou mechanismů a jejich kombinacemi. Mechanismy opotřebení jsou adheze, abraze, eroze, kavitace a další, největší podíl na opotřebení mají právě adheze a abraze.



Obr. 20 Časový průběh opotřebení [14]

Proces opotřebení je charakterizován časovým průběhem, který znázorňuje obr. 20. Skládá se ze tří typických částí, v literatuře

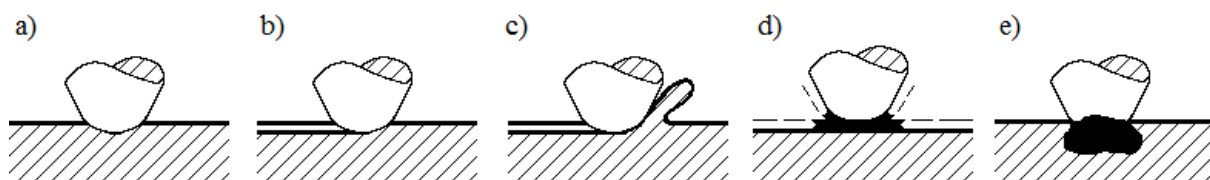
označované jako záběh, běžný provoz a havarijný stav. Záběh je charakteristický zrychleným opotřebením (I.), při kterém dochází k vyrovnání mikrone rovnosti a srovnání drsnosti povrchu plochy, čímž dochází ke změně plochy povrchu. Poté dochází k ustálení a opotřebení je lineární (II.). Po překročení provozní meze dochází vlivem kumulace poškození a únavy materiálu k prudkému nárůstu opotřebení (III.). Zde se již silně projevuje velký úběr materiálu abrazivními částicemi.

- Adhezní opotřebení

Dochází-li během vzájemného pohybu dvou těles k vytrhávání částic kovu, které jsou následně přilnuty na druhý, popřípadě dojde k jejich odpadnutí, nazýváme tento proces adhezním opotřebením. Mechanismus vytrhávání částic se uskutečňuje velkými meziatomovými silami, které vznikají za zvýšené teploty a tlaku, a projevuje se vznikem

mikrospojů. Adhezní opotřebení je nejčasnější mechanismus opotřebení u kovových součástí. Pro toto opotřebení existuje množství hypotéz popisujících jeho princip, avšak žádná z nich dosud neumožňuje celkové hodnocení všech probíhajících procesů.

Dle Kregelského existuje pět druhů adhezního porušení podle velikost deformace v okolí styku (obr. 21). Vychází se ze znalosti poměru hloubky vtažení (a) ku poloměru vlačované mikronerovnosti (r).



Obr. 21 Adhezní porušení dle Kregelského [18]

V případě, že napětí v dotyku není vyšší než mez pružnosti R_e , nastane elastická deformace (obr. 21 a), jejíž charakter závisí na hloubce vtažení (a) mikronerovnosti do tělesa a jejím poloměru (r). Tuto závislost vyjadřuje vztah:

$$\frac{a}{r} \leq \left(c \cdot \frac{R_e}{E}\right)^2 \quad (2.7)$$

kde c – součinitel zpevnění
 E – modul pružnosti v tlaku

Při zvyšování hodnoty r/a dochází k plastické deformaci materiálu a postupně se zvyšuje deformace materiálu. Nejprve dochází k nízkocyklické únavě materiálu (obr. 21 b), poté se po vyčerpání plastické deformace projeví vznik rýhování (obr. 21 c), až po povrchové porušení (odlupování) mikrospojů (obr. 21 d). Pokud je pevnost těchto spojů vyšší než pevnost vrstev pod povrchem, dochází k hloubkovému porušování adhezních mikrospojů (obr. 21 e). Jedná se o intenzivní poškození povrchů, k přenosu materiálu a vzniku volných částic (otěru) na povrchu. Objem otěru (W_0) lze vypočítat následujícím vztahem:

$$W_0 = \frac{K_a \cdot N \cdot L}{3 \cdot p_m} \quad (2.8)$$

kde K_a – součinitel adhezního opotřebení
 N – zatížení
 L – délka třecí dráhy
 p_m – tlak potřebný k dosažení plastické deformace (asi trojnásobek R_e)

Vznik adhezního opotřebení je tedy ovlivněn především hloubkou vniknutí a poloměrem zakřivení mikronerovnosti, velikostí zatížení, rychlostí, kterou se vůči sobě pohybují stykové povrchy. Důležité jsou ovšem také materiálové vlastnosti, které umožňují vytvořit adhezní spoj. Při zvyšujících se rychlostech dochází vlivem zvýšené teploty a rychlosti oxidačních jevů k výraznému vzestupu adhezního opotřebení.



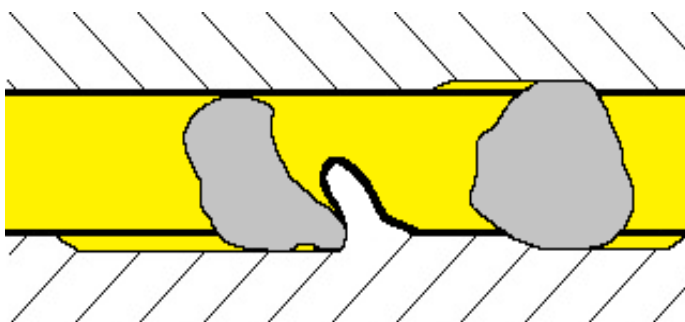
Obr. 22 Zadržný píst motoru [28]

Aplikací vhodného média (maziva) do styku třecích ploch lze výrazně eliminovat vznik adhezních spojů. Nejvyšším stupněm adhezního opotřebení je tzv. zadírání, které vzniká vytvořením většího množství mikrosvarů mezi povrchy. Při tomto procesu dochází již k makroskopickému porušení třecích povrchů, které má za následek výrazné zvýšení teploty v místě spoje a vede ke změně vlastností materiálů a maziva. Tato změna společně s abrazivním účinkem uvolněných částic výrazně deformuje třecí plochu a může dojít až k úplnému porušení třecích vrstev (obr. 22). Vlivem tohoto porušení se zvyšuje odpor vůči relativnímu pohybu a může dojít až k jeho přerušení (pohyb je zablokován).

○ Abrazivní opotřebení

Pro abrazivní opotřebení je charakteristické oddělení části povrchu (mikronerovnosti) a jejich následný pohyb mezi pohybujícími se plochami. I zde má hlavní vliv na velikost opotřebení zatížení, vlastnosti třecích materiálů a mezivrstvy. Důležité je však také množství, velikost a tvar uvolněných částic.

Oddělení částic z povrchu abrazivní částicí je závislé na úhlu, který svírá povrch s hranou částice. V závislosti na jeho velikosti může abrazivní částice způsobovat vznik rýhy na povrchu nebo vznik třísky (obr. 23). Abrazivní částice také způsobují odlišný typ opotřebení, mají-li vázaný charakter.



Obr. 23 Tvorba rýh a třísek abrazi [18]

2.4 Vlivy tření na proces tváření [22], [49], [51]

Nejvýraznějším faktorem, kterým se projevuje tření během tvářecího procesu, je zvyšování energie potřebné ke změně tvaru polotovaru, tedy zvýšení ztrát, což se projeví zvýšením ekonomické náročnosti výroby. Volbou správného maziva pro konkrétní technologickou operaci a materiály tedy lze snížit celkové náklady a také zvýšit životnost nástrojů. Tření při tvářecím procesu je charakterizováno dvěma činiteli:

- a) pasivní činitel – ten zpomaluje rychlost plastické deformace, čímž zvyšuje opotřebení a velikost tvářecí síly (energeticky náročnější)
- b) aktivní činitel – ten umožňuje realizace některých technologických operací jako je válcování, či funkci přidržovače během hlubokého tažení

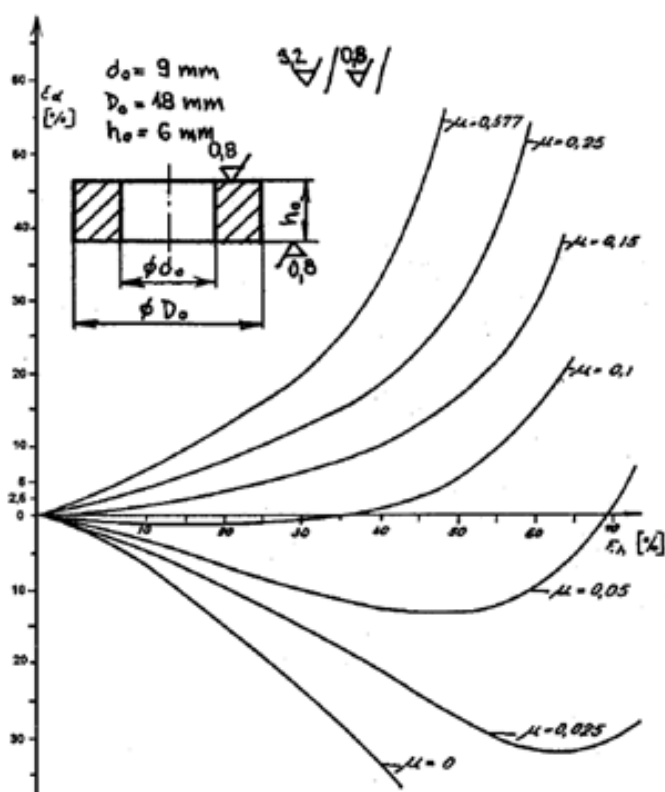
Během tvářecích operací převládá zpravidla mezní tření a je realizováno mezi dvěma prvky, na které působí vnější síly způsobující jejich pohyb. Znalost koeficientu tření pro danou operaci je základním faktorem pro tvorbu počítačových simulací a technologických výpočtů. Výsledek výpočtu při nesprávné hodnotě tření může mít za následek naddimenzování strojů a nástrojů, popřípadě vede k volbě nedostatečně výkonných strojů, což ve svém důsledku zhoršuje ekonomičnost výroby. Pro tvářecí procesy (plošné i objemové) se hodnota tření určuje zkouškami, které především hodnotí vhodnost maziva pro danou operaci. Tyto zkoušky se liší od běžných zkoušek prováděných pro maziva na ložiska, či jiné konstrukční spojení vyžadující mazání.

Na velikost tření mají vliv především tyto veličiny:

- Veličiny tvářecí operace – normálová napětí (jejich hodnota a rozložení), relativní rychlost, změna povrchu a teplot během tváření
- Materiálové veličiny – zde je hlavním parametrem chemické složení a také struktura materiálu, což ovlivňuje jeho tvrdost a tvárnost. Důležité je zamezit tvorbě mikrosvarů mezi plochami, což lze provést vhodnou záměnou materiálu.
- Veličiny maziva – přilnavost k povrchu, viskozita, schopnost odolávat zvýšenému tlaku a teplotě, chemická a fyzikální reaktivita maziva

2.5 Zkoušky tření při tvářecích procesech [22], [35], [49]

Pro tvářecí procesy existuje celá řada zkoušek na zjištění koeficientu tření μ , popřípadě třecího faktoru m . Tyto zkoušky umožňují ověřit vhodnost použitých maziv k danému typu tváření.



Obr. 24 Kalibrační diagram pro poměr vzoru $D_0:d_0:h_0 = 6:3:2$ [49]

deformací výšky a šířky vnějšího průměru (či středních průměrů určených výpočtem z vnitřního a vnějšího průměru) určit rozsah hodnoty součinitele tření pro sérii deformací s různým stupněm přetvoření. Vychází se ze znalosti původní geometrie vzorku, neutrálního průměru (tj. průměr, na kterém je rychlost posunu materiálu nulová) a jeho polohy, která je funkcí tření. Měření vzorku po deformaci lze provést posuvným měřítkem či digitálním mikrometrem, pro vnitřní průměr je nejvhodnější třídotekový dutinoměr. Hodnota neutrálního průměru pak z rovnosti objemu.

- Zkouška pěchování prstence

Zkouška pěchování prstence je nejrozšířenější zkouškou pro objemové tváření. Její vhodnost spočívá především v menší náročnosti při měření, není nutné zjišťovat tvářecí sílu a rychlost přetvoření. Zkouška probíhá za studena pro výpočet součinitele tření při tváření, za poloohřevu a za tepla, není přitom vyžadován vliv teploty ani rychlosti přetvoření na přetvárný odpor. Výsledkem zkoušky jsou data pro všechny možnosti tření od stavu bez tření po stav adheze.

Rozměry prstence se volí v poměru 6 : 3 : 2 (obr. 24) nebo 20 : 10 : 7 pro rozměry $D_0 : d_0 : h_0$. Prstenec se pěchuje na předepsanou poměrnou deformaci výšky a průběh deformace se řídí podmínkami vnějšího tření. Dodržením předepsaného poměru vzorků lze po výpočtu poměrných

Během pěchování kroužku mohou nastat dva stavy. První nastává pro malé hodnoty tření a dochází při něm k toku materiálu v radiálním směru se současným zvětšováním vnitřního i vnějšího průměru. Druhý stav platí při vyšších hodnotách tření, v tomto případě materiál teče také dovnitř kroužku.

Výpočet poměrných deformací:

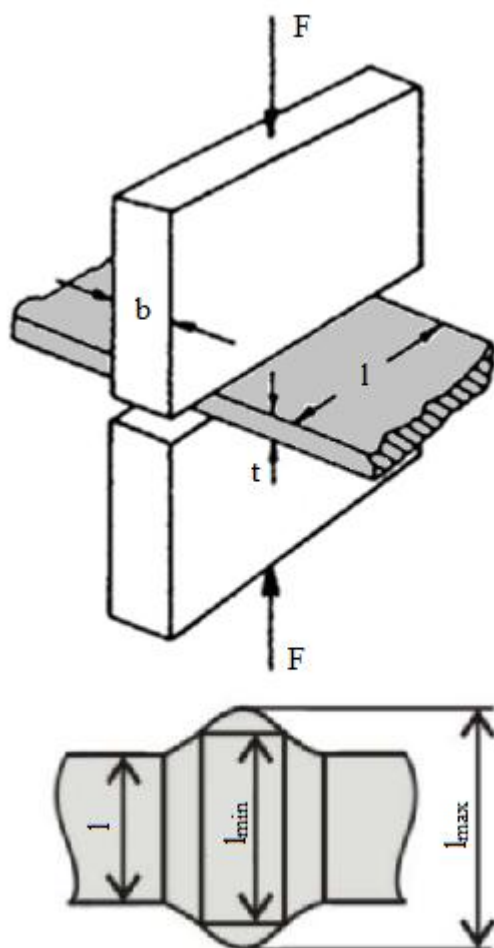
$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100 \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_d = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Velikost tření nebo třecího faktoru je také možno určit analytickým výpočtem, je však nutné zavést podmínky výpočtu. Patří mezi ně například podmínka plasticity HMM, zanedbání zpevňování materiálu a elastické deformace. Nutnou podmínkou také je, aby nedocházelo k nerovnoměrnému soudečkování během tváření. Třecí faktor na kontaktní ploše pak je konstantní a vyjadřuje hodnotu tření.

- Zkouška plošným tlakem (tzv. Ford-test)

Zkouška plošným tlakem byla nejdříve používána pro určení velikosti přetvárných odporů materiálu v závodech Ford společně s měřením tvářecí síly a rychlosti deformace. Nyní se používá k zjišťování hodnot součinitele tření pro procesy tváření, přičemž není nutné měřit tvářecí sílu ani rychlost deformace.



Obr. 25 Schéma zkoušky plošným tlakem [49]

Princip zkoušky spočívá ve vtláčování dvou hranolů proti sobě do pásu zkoušeného materiálu (obr. 25), lze tak testovat různá maziva aplikací do místa vtláčení. Tato zkouška věrohodně simuluje podmínky pro tváření kolem zaoblených hran tvářecích nástrojů. Také je vhodná ke zjištění náchylnosti k *pick-up* (odstřížení měkčího z materiálů, mezi kterými probíhá tření v rovnoběžném směru s plochou dotyku), což se projeví především kolem ostrých hran vtláčovaných hranolů.

Pro zkoušku je nutné dodržet několik pravidel, jedná se především o minimálním poměru šířky vzorku a tloušťky kovadel $b/l > 6$ a poměr tloušťky vzorku ku tloušťce kovadel pak v rozmezí $2 < b/t < 4$, tloušťka kovadel by zároveň měla být větší než 3 mm.

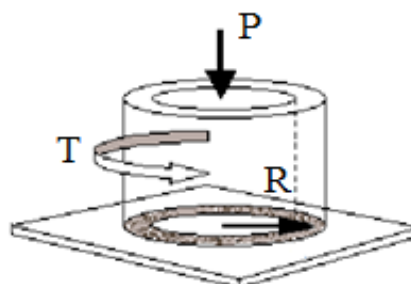
Pro tyto podmínky se velikost tření vyhodnotí z velikosti přetvoření ve směru l , kde vzniká typické vyboulení (obr. 25). Jeho velikost je funkcí tření a při konstantních podmínkách lze tedy třecí koeficient porovnávat pro různá testovaná maziva.

- Zkouška namáháním v krutu a tlaku (Twist compression test)

Zkouška je používána především tehdy, očekáváme-li *pick-up*. Existují dvě varianty zkoušky namáhání v krutu a tlaku, při první je vtlačován pevně upnutý hranol na rotující prstencový vzorek. Druhou variantou je vtlačování rotujícího prstence na nepohyblivý hranol (obr. 26), zde je výhodně možno použít přípravek s připevněným pásem plechu. Při zkoušce je měřen krouticí moment a normálová síla. Z těchto hodnot pak lze přímo vypočítat velikost součinitele tření vztahem:

$$\mu = \frac{F_{tř}}{P} = \frac{T}{R \cdot P} \quad (2.15)$$

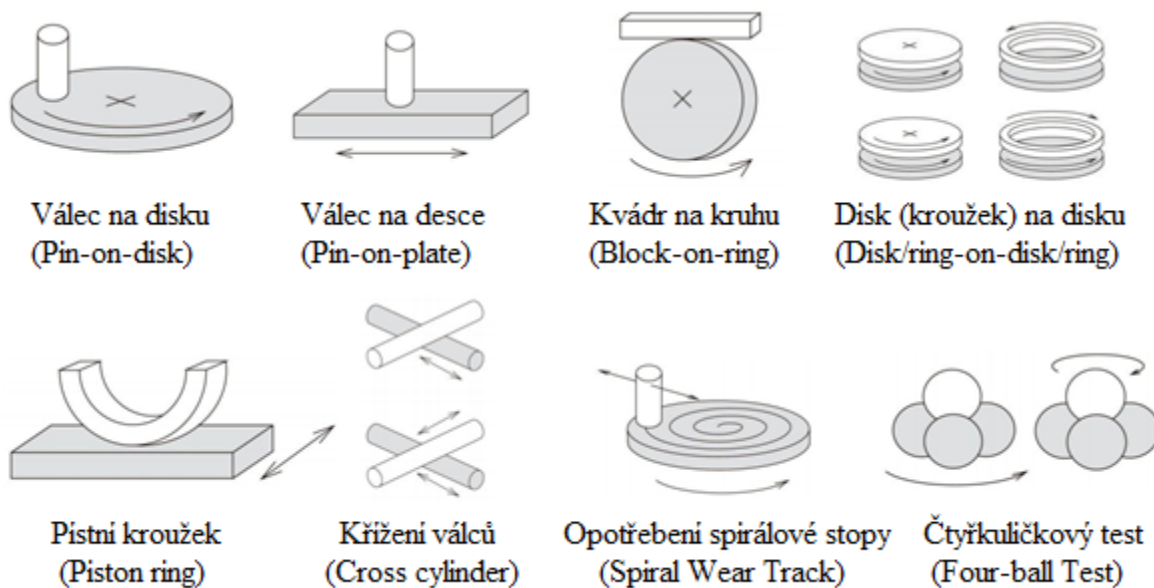
kde T – krouticí moment
 P – měřená normálová síla
 R – velikost ramene krouticího momentu



Obr. 26 Twist compression test [49]

- Další zkoušky tření používané pro tvářecí operace

Zkoušení maziv a zjišťování hodnoty součinitele tření se provádí celou řadou dalších metod a zkoušek. Jejich využití je omezenější, ale zato lépe popisují specifické místa či stavy, které mohou nastat při tvářecích operacích. Na obr. 27 je zobrazeno několik dalších typů zkoušek.



Obr. 27 Příklady dalších typů zkoušek maziv [22], [45]

3 DRUHY MAZIV [37], [38], [43], [50]

Základní vlastností maziv je jejich mazací schopnost, zamezují tedy suchému tření vytvořením takové vrstvy, která má charakteristické nízké vnitřní tření a adhezně lne k povrchu. Tato vrstva musí také splňovat některé další požadované parametry jako je chemická stálost, nekorozivní účinek na materiál, schopnost odvádět teplo a jiné. Maziva jsou pro správnou funkci strojů a výrobu součástí nezbytná, neboť zásadně ovlivňují tření a intenzitu opotřebení. Na trhu existuje velká řada maziv použitelná pro různé aplikace, jejich funkci pro požadovanou výrobu je proto vhodné ověřit experimentem. Veškeré maziva lze rozdělit do čtyř základních skupin:

- Plynná maziva

Tato maziva mají velmi omezené použití, jsou charakteristická stálostí při vysokých teplotách, při kterých ostatní maziva degradují nebo se odpařují a nízkou viskozitou při zvýšené teplotě. Lze je proto výhodně použít pro mazání kluzných ložisek s velkými obvodovými rychlostmi, ložisek s velmi vysokou pracovní teplotou (nad 300 °C), případně u vysokootáčkových vřeten obráběcích strojů.

- Plastická maziva

Plastická maziva nebo jinak také mazací tuky (obr. 28) mají oproti kapalným mazivům nižší odstřík (tedy nižší spotřebu) a poskytují navíc těsnící účinek, čímž se zabrání přístupu nečistot a prachu do mazaných míst. Naopak nevýhodná je jejich vysoká hodnota vnitřního tření, omezená schopnost odvodu tepla a nemožnost oběhového mazání. U některých strojních částí však výhody převažují jejich nedostatky.



Obr. 28 Vzhled plastického maziva [34]

- Pevná maziva

Látky s nízkou tvrdostí, malou smykovou pevností a velkou afinitou ke kovům nazýváme pevná maziva. Oproti plastickým mazivům, jež se při třecím pohybu chovají zdánlivě jako kapaliny, mají pevná maziva zcela jiný charakter. Jejich chemické a fyzikální vlastnosti se při vzrůstajícím tlaku a teplotě nemění až do mezní hodnoty, kdy dochází k chemické přeměně dané látky, což určuje oblast jejich využití. Jedná se především o místa s vysokými teplotami, které není možné během procesu domazávat. Tato maziva také postrádají základní schopnosti jako je odvod tepla, mají zvýšený součinitel tření a nižší trvanlivost. Jejich dostupnost je také mnohem nižší, a proto jsou pevná maziva označována jako doplňková, pro případy kdy jiná maziva nelze použít.

- Kapalná maziva

Kapalná maziva patří mezi nejrozšířenější, proto jsou velmi výhodná pro jejich dostupnost, různorodost a jejich snadnou manipulaci. Podle jejich struktury je lze rozdělit na chemicky jednoznačné látky (sloučeniny), homogenní směsi a kapalně disperze. Rozdíl mezi nimi je především v rozsahu stupně viskozity a jejich specifických vlastnostech. Pro oblast tažení jsou zásadní mazací oleje, které patří mezi homogenní směsi. Z důvodu zaměření diplomové práce budou dále diskutovány pouze mazací oleje.

3.1 Mazací oleje [6], [33], [37], [38], [43]

Mazací oleje bývají obvykle složeny tak, že 95 % tvoří základní olej a zbývajících 5 % aditiva. Olej jako hlavní složka musí splňovat všechny požadované vlastnosti (snížení tření, odvod tepla, ochrana proti korozi, atd.), přídavné látky pak zvyšují (popřípadě snižují) tyto vlastnosti pro požadovaný proces. Podle vzniku lze oleje dělit do těchto tří hlavních skupin:

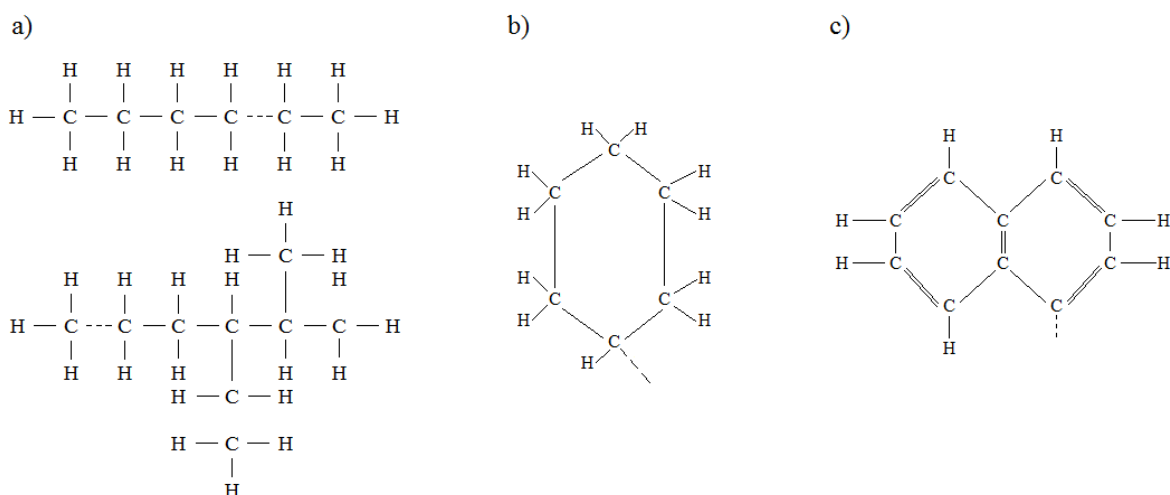
- *biologické oleje* – jejich využití je především v potravinářském a farmaceutickém průmyslu a mohou být rostlinného či živočišného původu, jsou ekologicky nezávadné
- *minerální oleje* – v průmyslové výrobě patří mezi nejpoužívanější typ olejů pro mazání v procesech s vyšší teplotou
- *syntetické oleje* – využívají se pro procesy mazání s vysokými teplotami a vysokým tlakem, jsou ekologicky závadné

• Minerální oleje

Pro své široké využití patří minerální oleje mezi nejpoužívanější maziva ve strojírenství. Existuje velké množství výrobců specializujících se na výrobu olejů pro všechna odvětví strojírenského průmyslu.

Minerální oleje jsou směsi uhlovodíků, získávané frakční destilací ropy. Většina produktů destilace se využívá pro výrobu paliv. Po získání oleje destilací, je nutné jej dále upravovat. Tato úprava obnáší především tzv. rafinaci, což je opakovaná destilace, umožňující odstranění nežádoucích složek (vosky, sloučeniny síry, dusíku, aromatické uhlovodíky). Jejich odstraněním získává minerální olej požadované vlastnosti jako je odolnost vůči korozi, snížená viskozita, a další. Mezi posledními kroky zpracování patří odparafinování, při kterém dochází k odstranění uhlovodíků, vylučujících se při nízkých teplotách, což vede ke snížení bodu tuhnutí minerálního oleje.

V závislosti na typu uhlovodíků, z nichž se minerální olej skládá, je dělíme do několika skupin. Typ uhlovodíků je závislý na složení zdroje ropy. Velikost molekul uhlovodíků je asi 25-30 atomů a jejich uspořádání určuje typ uhlovodíků.



Obr. 29 Příklady uhlikových vazeb v minerálních olejích [38]

Pokud uhlovodíky tvoří dlouhé řetězce (obr. 29 a), jsou tyto oleje nazývány parafíny. Obsahují-li řetězce alespoň jeden jednoduchý cyklický uhlovodík (cyklohexan), jedná se o tzv. naftaleny (obr. 29 b). Jejich výroba je jednodušší (vyžadují méně rafinací) a tvoří polynaftalenovou strukturu. Pokud je množství cyklických uhlovodíků větší a obsahují navíc dvojnou vazbu (obr. 29 c), mluvíme o aromátech (aromatických olejích). Ty se v průmyslu vyskytují podstatně méně, než oleje parafinové či naftalenové. Minerální oleje pro mazací účely se skládají převážně z parafinických a parafinickonaftalenických uhlovodíků.

Problém těchto olejů spočívá především v oxidaci řetězců uhlovodíků. K oxidaci jsou nejvíce náchylné aromatické oleje, parafinové oleje jsou naopak odolné. Do těchto olejů je proto nutné přidávat antioxidanty, popřípadě síru. U síry je však vyžadován co nejnižší obsah, přestože zvyšuje mazací schopnost, neboť způsobuje korozi materiálu.

• Syntetické oleje

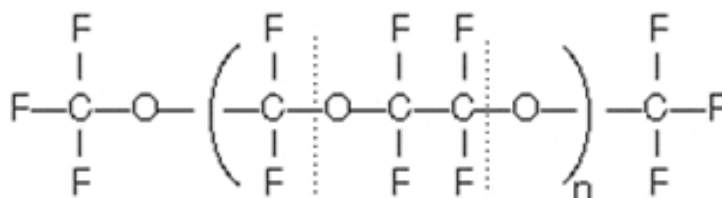
Výroba syntetických olejů spočívá na procesu krakování ropy. Během procesu dochází k osamostatnění uhlovodíků s malým počtem molekul, jedná se především o uhlovodíky s vhodnými vlastnostmi pro mazání. Zbytkové množství nevhodných řetězců zde na rozdíl od minerálních olejů nevzniká, protože výroba probíhá za pomoci katalyzátorů a vysokých tlaků. Za těchto podmínek dochází k rozpadu uhlovodíků na menší molekuly. Řízenou polymerací v následujících operacích pak vznikají syntetické oleje s vysokou viskozitou a nízkou těkavostí.

Syntetické oleje jsou používány od začátku 20. století stále více pro lepší vlastnosti a vyšší odolnost. Jejich použití je vhodné všude tam, kde minerální oleje již nejsou dostačující. Mezi hlavní nevýhody patří vysoká cena, agresivita vůči některým materiálům (plasty, lehké kovy) a jejich ekologická závadnost.

Podle druhu sloučenin, z kterých se syntetický olej skládá, jej dělíme na řadu typů. Nejvýznamnější z nich jsou:

- esterové oleje (především automobilový průmysl)
- silikonové oleje (chemická stálost při vyšších teplotách)
- organohalogeny (obr. 30)

Organohalogeny se vyrábí chemickou reakcí methanu s halogeny, při zvýšeném tlaku a teplotě dosahující až 250 °C. Nejčastěji se používají halogeny chlóru a fluoru, méně pak jódu a bromu. Tyto oleje jsou velmi tepelně stabilní, téměř inertní vůči oxidaci a chemické degradaci, a to především díky vysoce stabilním vazbám C-O a C-F. Používají se v těžkých provozních podmínkách a všude tam, kde se vyskytují vysoce reaktivní chemikálie a kyslík. Při hoření vylučují vysoce toxické plyny, proto je nutné dbát na správnou manipulaci a zamezit styku s otevřeným ohněm.



Obr. 30 Struktura perfluoropolyéteru [29]

3.2 Příprava a mazání povrchu [22], [51], [52]

Před vlastní aplikací maziva při tváření je nutné předem upravit povrch, aby byly dosaženy nejvýhodnější podmínky. K prvotní úpravě dochází již při výrobě vhodným opracováním polotovaru popřípadě již hotových dílů, zahrnuje se zde však také čištění povrchů před tvářecí operací, popřípadě po ní, je-li to vyžadováno.

Mazáním dosahujeme cíleného vzniku mazacího filmu pro daný postup tváření, jehož účelem je:

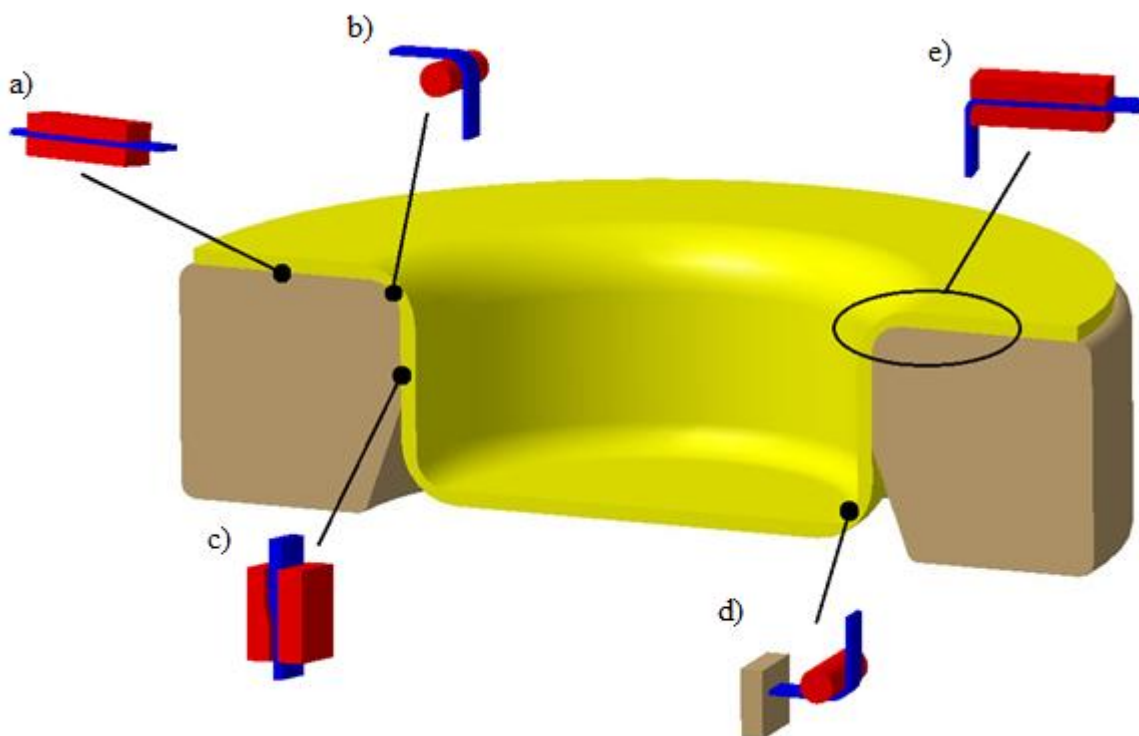
- Zamezit přímému styku nástroje a polotovaru během tváření a tím zamezit vzniku mikrosvarů. To umožňuje zvýšit životnost nástroje a zlepšit výslednou kvalitu povrchu rovnoměrně na celém výrobku.
- Snížit ztráty způsobené třením, což se přímo projeví na snížení potřebné přetvárné síly a energie, a také snížením vznikajícího tepla při přeměně.

Z těchto faktorů vyplývají požadavky na použité mazivo. Volba nejvýhodnějšího maziva je pak určována kritérii, jež přímo závisí na dané tvářecí operaci. Mezi tyto kritéria patří především:

- schopnost spojení účinku mazání a chlazení
- vliv na tok materiálu během tváření
- složitost manipulace s mazivem (nanášení, odstraňování)
- zamezení vzniku koroze
- vhodnost pro další zpracování polotovaru (obrábění, svařování)
- ekonomičnost a bezpečnost

4 NÁVRH EXPERIMENTU [2], [35], [37]

Zkoušení maziv pro hluboké tažení vychází ze znalostí z předešlých kapitol. Jelikož se jedná o velmi složitý a komplexní děj, je velikost třecí síly ovlivněna celou řadou parametrů, které do tohoto procesu vstupují (materiálové charakteristiky nástroje a polotovaru, struktura povrchu, kontaktní tlaky, rychlost deformace, množství a kvalita maziva a další). Aby bylo možno se zmíněnými parametry uvažovat, je nutné rozčlenit proces tažení do částí, které vyhodnocují použitá maziva z různých hledisek.

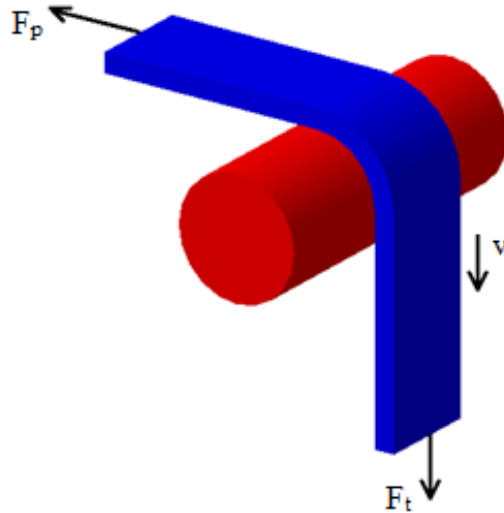


Obr. 31 Vybrané možnosti modelování tření pro hluboké tažení [2]

Na obr. 31 jsou zobrazeny vybrané laboratorní testy využívané pro tribologický popis hlubokého tažení. Umožňují zkoušení jednotlivých maziv s možností přímého porovnání výsledků bez nutnosti znalostí parametrů vstupujících do procesu. Je ovšem nutné dodržet konstantní parametry procesu pro všechny zkoušené maziva (totožná rychlost deformace, tažená délka, předpětí, struktura povrchu, teplota aj.).

- Tření mezi tažnicí a přidržovačem je nejčastější zkouškou pro zjišťování součinitele tření pro hluboké tažení (obr. 31 a). Jedná se o poměrně jednoduchou zkoušku spočívající v protažení pásu plechu mezi přesně definovanými čelistmi, zatíženými přidržovací silou o požadované velikosti. Výhodou této zkoušky je její jednoduchost, rychlost a možnost testování se zvýšenou teplotou čelistí. Nevýhodná je naopak nedostatečná simulace skutečného procesu. Chybí zde napjatost ve zkoušeném vzorku odpovídající tažení v místě přidržovače a totožná velikost plastické deformace. Touto zkouškou lze orientačně určit velikost tažné síly a výpočtem zjistit velikost koeficientu tření.

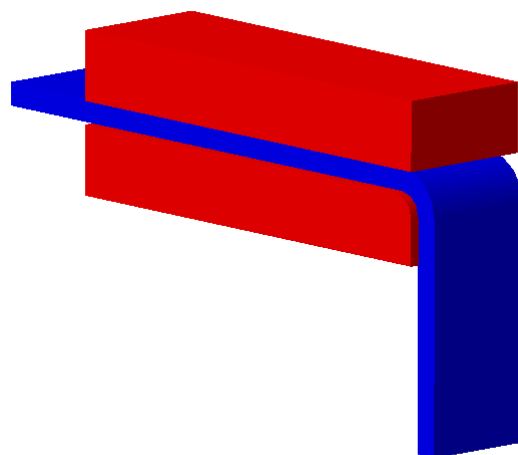
- Modelování tření na tažné hraně (obr. 31 b, obr. 32) již lépe vystihuje podmínky mazání při hlubokém tažení. Toto zkoušení vychází z vyhodnocení dvou po sobě jdoucích testů, kdy v prvním probíhá měření tažné síly při tažení pásku plechu přes pevně upnutý váleček. V druhém případě je váleček upnut volně a může se otáčet. Poloměr válečku odpovídá zaoblení tažné hrany a jeho materiál je taktéž totožný. Vyhodnocení tření vychází z velikosti tažné síly F_t , brzdící síly F_p a velikosti úhlu opásání. Tažení během zkoušky probíhá za konstantní rychlosti. Výsledky zkoušky přesně popisují oblast při tažení přes tažnou hranu, je však nutné zjišťovat velikost síly nutné k dvojímu ohybu pásku (ohyb a následné narovnání). Dalším problémem je zajištění stejnoměrného kontaktního tlaku pásku na váleček během celé zkoušky. Na obdobném principu spočívá také modelování vypínání přes tažnou hranu (obr. 31 d).



Obr. 32 Modelování tření na tažné hraně [2]

- Modelování tření s redukcí tloušťky materiálu (obr. 31 c) rozšiřuje klasickou zkoušku v místě přidržovače, jedná se o jednoduché a rychlé testování vhodnosti materiálu a maziva pro tento typ tažení. Velmi důležitá je zde znalost drsnosti povrchu vzorku. Při této zkoušce však dochází k velkému opotřebení nástroje, proto je nutné jej vhodně konstruovat, aby bylo možné jeho vícenásobné použití (funkční hrana na čtyřech stranách přípravku, obdobně jako u výměnných břitových destiček).

- Aby bylo možno postihnout všechny vlivy tvářecího procesu na použité mazivo, je uvažováno jako nejvýhodnější kombinované modelování tření v místě přidržovače a tažné hrany (obr. 31 e, obr. 33). Dochází zde k vyvození přidržovací síly a zároveň k dvojímu ohybu (ohyb a narovnání), což lze považovat za nejkritičtější oblast pro vznik zadírání. I přes svou relativně jednoduchou konstrukci podává tento typ modelování komplexní výsledky tribologického procesu hlubokého tažení. Další výhodou je možnost snadného nastavení rychlosti tažení a velikosti přidržovací síly, čímž je možné zajistit potřebné podmínky pro zkoušku. Z tohoto důvodu byl tento model zvolen jako výchozí pro experiment.



Obr. 33 Modelování tření v místě přidržovače a tažné hrany [2]

4.1 Příprava experimentu

- Parametry přípravku

Pro dosažení srovnatelných výsledků se skutečným procesem odpovídá konstrukce zkušebního přípravku parametrům tažníku, tažnice a přidržovače ve firmě ACO. Jeho sestavení vyvoluje předpětí odpovídající velikosti přidržovací síle přidržovače při tažení. Do přípravku se upínají dva plechy, aby experiment odpovídal dvojitmu ohybu (ohyb a narovnání) během tažení. Přípravek se skládá ze spodní čelisti (obr. 34), která simuluje funkci přidržovače a je vyrobena z nástrojové oceli 19 537 (dle EN 1.2379) o minimální tvrdosti po tepelném zpracování 60 HRC. Rozměry čelisti jsou 170 mm na 92 mm a její tloušťka pak 30 mm. Tyto rozměry zajišťují dostatečnou tuhost pro experiment. Tažení předehtého pásu plechu je realizováno po středové ploše čelisti o drsnosti povrchu Ra 0,2. Šířka leštěné plochy je 30 mm a z obou stran je ohraničena drážkami, které v případě vyhnutí zamezí poškrábání funkční plochy případnou ostrou hranou taženého plechu. K zabránění vybočení také slouží osm zalisovaných kolíků o průměru 10 mm a délky 70 mm, které při příliš velkém vybočení plechu zaujmou úlohu vedení plechu. V tomto případě je ovšem nutné brát v úvahu zkreslení výsledků v důsledku zvětšení třecí plochy (okrajem plechu o vedení). V kritickém případě může vlivem kontaktu kolíků s hranou plechu dojít k zadírání. Tuto zkoušku je poté nutné vyhodnotit jako neprůkaznou a měření pro toto mazivo opakovat. Ve spodní čelisti jsou zhotoveny čtyři závitové díry velikost M16 pro upínací šroub. Poslední funkční částí je náběhový rádius R2, který plní svou funkci při zavádění plechu do přípravku během tažení.



Obr. 34 Spodní čelist přípravku

Druhou částí přípravku je horní čelist (obr. 35), která se skládá ze dvou totožných dílů, jejichž rozměry odpovídají spodní čelisti. Materiál je opět nástrojová ocel 19 537 o minimální tvrdosti po tepelném zpracování 60 HRC, protože tato čelist představuje tažnici. Leštěná plocha s drsností Ra 0,2 je opět ohraničena drážkami a tolerované otvory pro kolíky slouží ke správnému vedení během sestavení. Rádius R6 na vnitřních hranách je totožný se zaoblením tažnice a je také leštěn na drsnost Ra 0,2.

Další částí přípravku je deska umožňující sestavení pomocí šroubů M16. Je vyrobena také z materiálu 19 537 tepelně zpracovaného na minimální tvrdost 60 HRC a odpovídá rozměrům čelistí. Její funkcí je především rozložení předpětí od šroubů na celou plochu čelistí. Tloušťka desky je 10 mm a obsahuje otvory pro šrouby, vodící kolíky a otvor pro tažené plechy.



Obr. 35 Horní čelist přípravku



Obr. 36 Skříň s přípravkem

Poslední díl slouží k uchycení přípravku ke zkušebnímu stroji. Je jím skříň o rozměrech 124 × 125 × 160 mm. Upnutí ke stroji je realizováno pomocí závitové tyče. Přípravek je ve skříni pouze volně uložen, svrchní deska skříňe slouží jako opěra během zkoušení a je uchycena šesti šrouby M10. Její funkcí je také rozložení namáhání po celé ploše přípravku. Toho je dosaženo vyvrtáním otvorů pro hlavy šroubů a otvor pro tažené pásy. Skříň společně s přípravkem je zachycena na obr. 36. Během sestavování přípravku pro jednotlivé zkoušky je nutné dodržet několik důležitých pravidel, které mají vliv na výsledky experimentu. Jedná se především o důkladné čištění třecích ploch mezi jednotlivými zkouškami, aby nedocházelo k vzájemné kontaminaci maziv a tudíž ke zkreslení výsledků. Důležité je také správné předechnutí pásů plechu (kolmost) a začištění hran po stříhu. Po nasazení horní čelisti je také nutné opakovaně vystředit plech, čímž se

sníží riziko vyhnutí plechu během zkoušky. Pro výsledky a jejich srovnávání je důležitá také hodnota utahovacího momentu při montáži. Je nezbytné, aby její velikost byla pro všechna měření stejná.

- Zkušební stroj

Experimenty byly uskutečněny na zkušebním stroji ZD 40 (obr. 38), který je součástí laboratoře mechanických vlastností materiálů na ÚST FSI VUT v Brně. Stroj ZD 40 dosahuje maximální síly 400 kN, což je dostatečné pro požadované protahování pásků plechu s mazivem. Umožňuje také zatížení testovaných vzorků v tahu, tlaku a ohybu. Snímat dosažené hodnoty je poté možné vestavěným inkrementálním dálkovým snímačem polohy příčnicku (dosahuje rozlišení 0,01 mm) a snímačem síly. Řídící jednotkou je EDC 60 odpovídající třídě přesnosti 1 (chyba se pohybuje v rozmezí $\pm 1\%$). Vyhodnocování výsledku pak probíhá počítačem v programu M-TEST v. 1.7, který je také součástí laboratoře a umožňuje sledovat průběh tažné síly v průběhu zkoušky.

Na obr. 37 je zachyceno upnutí přípravku ve stroji. Jeho konstrukce, jak již bylo uvedeno, odpovídá modelování tření v oblasti přidržovače a tažné hrany. Tím je dosaženo optimální simulace výrobního procesu společně s nenáročnou obsluhou a zároveň podává objektivní výsledky testovaných maziv. Přípravek je složen ze čtyř dílů a pomocné skříně, která umožňuje upnutí ke stroji.



Obr. 37 Upnutí sestaveného přípravku ve stroji



Obr. 38 Zkušební stroj ZD 40 [41]

- Testovaná maziva

Pro experiment byla využita maziva různých výrobců, která se využívají na ÚST FSI VUT a mazivo používané v současnosti firmou ACO. Navíc bylo získáno dalších šest maziv od české firmy AT OIL, která dodala řadu těchto maziv s různým složením. Srovnání základních vlastností všech zkoušených maziv je provedeno v tabulce 5.

Tabulka 5 Základní vlastnosti maziv

Název	Hustota (při 20°C) [g/cm ³]	Viskozita (při 40°C) [mm ² /s]	Bod vzplanutí [°C]	Nebezpečná látka
AT Editol D 040	0,88-0,94	30-48	200	-
AT Editol D 050	0,92-0,94	50-65,5	200	-
AT Editol D 140 EPS	0,89-0,97	120-160	200	-
AT Kalorex 650 S	0,95-1,1	22-35	150	chlór
AT Kalorex 1000 EP	0,95-1,1	50-120	150	chlór
AT Presol GY 80 KFS	0,89-0,95	75-85	190	-
Martol Soluble 130	1,3	140-120	100	chlórové parafíny
Martol EP 180	1,04	180	200	sulfid chlóru
Martol EP 405 CF	0,96	400	250	-
Wisura ZW 3356	0,92	370	180	chlór
Prolong 50-12	1,05-1,25	40-100	180	chlór

Zásadním parametrem je obsah chlóru v mazivech v jakékoli podobě a to převážně z důvodu současného ekologického trendu, kterému se snaží přizpůsobit většina provozů. To se projevuje také na snížených nákladech s jejich manipulací a skladováním. Tyto aspekty posouvají do popředí ekologicky nezávadná maziva. Je však nutné brát také ohled na jejich požadované funkční vlastnosti, což řeší jejich odzkoušení a porovnání experimentem.

- Řada AT Editol

Všechny oleje značky AT, vyrábí firma AT OIL v České republice.

- Olej AT Editol D 040 EPS je speciální olej na bázi esteru, který je určen pro náročné operace stříhání, tažení a ohýbání barevných kovů a ocelí vhodných pro tváření. Skládá se z esterového olejového nosiče, vysokotlakých a protioděrových přísad a inhibitorů koroze. Vyznačuje se také ochranou proti opotřebením nástrojů a krátkodobou korozní ochranou. Neobsahuje přísady na bázi chlóru.

Výrobce doporučuje jeho použití především v oblasti lisování, ohýbání a stříhání barevných kovů a konstrukčních ocelí.

- Také olej AT Editol D 050 EPS je vyvinut na esterové bázi, oproti předchozímu mazivu je navíc určen k obrábění, tažení a ohýbání legovaných ocelí.

Jeho užití je doporučeno pro stříhání a tažení z plechů do tloušťky 5 mm, dále lisování a kalibraci dílů s redukcí nižší než 15 %.

- Mazivo AT Editol D 140 EPS je specializovaný, vysoce aditivovaný olej, který je určený především pro operace stříhání, objemové tváření, tažení a ohýbání legovaných a korozivzdorných ocelí.

Je doporučen k použití pro stříhání a tažení z plechů do tloušťky 8 mm, dále lisování a kalibraci dílů s redukcí nižší než 30 %.

○ Řada AT Kalorex

Oleje řady AT Kalorex patří mezi vysoce aditivované polosyntetické oleje, určené pro všechny typy materiálů.

- AT Kalorex 650 S obsahuje speciálně vyladěnou sestavu přísad, zahrnující protioděrová a vysokotlaká aditiva EXTRA EP, která působí jak při nižších teplotách, tak při teplotách nad 180°C. Obsahuje navíc vázaný chlór a lze jej použít pro obráběcí i tvářecí operace těžko obrobitelných a korozivzdorných ocelí. Toto mazivo vyniká vysokou jakostí povrchu, příznivou energetickou bilancí a schopností prodloužení životnosti nástrojů.

Výrobce doporučuje toto mazivo pro třískové metody výroby s přísadkou v oblasti minimální třísky.

- Olej AT Kalorex 1000 EP obsahuje sestavu vysoce účinných EP/AW přísad, aditiv typu EXTRA EP s obsahem chlóru, estery a přísady proti korozi.

Tento olej také vykazuje vysokou pevnost olejového filmu, kvalitní povrchy tvářených dílů, rozměrovou přesnost a vysokou trvanlivost, která se projevuje především dlouhodobě stabilními technologickými vlastnostmi.

Oblast použití doporučená výrobcem se shoduje s olejem AT Kalorex 650 S.



Obr. 39 Zkoušená maziva firmy AT OIL

○ Řada AT Presol

Tato řada byla vyvinuta pro tváření, lisování, postupové lisování a přesné stříhání hlubokotažných a běžných konstrukčních a hlubokotažných ocelí o síle plechu do 0,5 – 2 mm.

- AT Presol GY 80 KFS je speciálně aditivovaný odparový olej o nízké viskozitě, skládá se z vysokotlakých a protioděrových aditiv na bázi vysokomolekulárních syntetických esterů s funkčními přísadami (EXTRA EP/AW), inhibitorů koroze a povrchově aktivních přísad. Neobsahuje halogenidy.

Je doporučen pro nejnáročnější operace objemového tváření a lisování za studena. Umožňuje objemové tváření s vysokým stupněm redukce a přetvoření (až 70 %). Je vhodné zejména pro konstrukční oceli.

Následující maziva již byla otestována na jiné korozivzdorné oceli s přijatelnými výsledky, a proto byla vybrána i pro tento experiment:

○ Řada Martol

Francouzská firma TOTAL vyrábí kvalitní procesní maziva řady Martol. Tato řada je určena pro všechny tvářecí operace kovů na bázi železa. Také postihují širokou oblast výroby od jednoduchých po nejsložitější výtahy.

- Martol Soluble 130 je mazivo, které lze ředit vodou a obsahuje proto příslušné aditiva, použitelné ve vodní směsi. Pro zvýšení třecích vlastností maziva obsahuje také chlоровé parafíny.
- Mazivo Martol EP 180 je tvořeno minerálním olejem s přísadkou sulfidů chlóru, vysokotlakých aditiv, chlorových parafinů (max 50%) a mastných složek zvyšujících mazavost.
- Posledním testovaným mazivem z této řady je olej Martol EP 405 CF. Základní složkou je také minerální olej, ale neobsahuje žádné aditiva na bázi chlóru. Je tedy ekologicky nezávadné a výrobce jej doporučuje pro jeho vysokou výkonnost.

○ Wisura

Mazivo Wisura ZW 2256 také pochází z Francie a je vyráběno firmou FUCHS. Jeho využití je v oblasti přesného stříhání, hlubokého tažení a dalších tvářecích procesů.

- Aditiva v tomto mazivu neobsahují chlór ani těžké kovy a EP přísady zajišťují vynikající přilnavost. Je možné ji nanášet štětcem, válečkováním i postříkem. Její doporučené použití je pro extrémně obtížné tváření konstrukčních, austenitických a nerezavějících ocelí. K odstranění zbytků maziva je vhodné použít vodní alkalické čisticí přípravky.

○ Prolong 50-12

Mazivo Prolong 50-12 je produktem tuzemské společnosti TRIGA zabývající se výrobou maziv pro průmysl. Využívá se v oblastech náročných tvářecích operací konstrukčních, legovaných a korozivzdorných ocelí, výjimečně slitin Ti.

- Obsahuje přísady vázaného chlóru, vysokotlaká aditiva, EXTRA EP/AW přísady a inhibitory koroze. Základní bázi je vysokotlaký parafinický olej. Výrobce je toto mazivo doporučováno pro svou dlouhodobou trvanlivost a stabilitu. Také uvádí zaručenou vysokou kvalitu funkční vrstvy.

- Ocel 1.4404

Materiál 1.4404 (X2CrNiMo 17-12-2) je austenitická nestabilizovaná chrom-niklová ocel. Dle české normy ČSN je pak jejím ekvivalentem ocel 17 349. Chemické složení a vybrané mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 6. Je odolná vůči korozi v průmyslovém prostředí, zvláště pak proti důlkové korozi za přítomnosti chloridů. Odolnost vůči mezikrystalické korozi je zaručena do teploty 450 °C v silně agresivních prostředích i po svařování. Nízký obsah uhlíku pak zaručuje její svařitelnost. S rostoucí teplotou je výrazný pokles mechanických vlastností (R_m , $R_{p0,2}$). Ocel 1.4404 nelze kalit a je nemagnetická. Během tváření za studena nebo při obrábění s nevhodnými řeznými podmínkami má sklon k deformačnímu zpevňování. Tato ocel je vhodná pro svařované konstrukce v agresivním prostředí (chemický průmysl), v přímořských oblastech a chemicky upravovaných prostředích bazénů. Je možné ji použít také v potravinářském průmyslu (viz příloha 1).

Tabulka 6 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 1.4404

1.4404	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	P [%]	S [%]
	max 0,03	max 1,00	max 2,00	16,5 - 18,5	11,0 - 14,0	2,0 - 2,5	max 0,045	max 0,030
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Žíhací teplota [°C]				
	200	450 - 680	min 40	1000 - 1100				

Ocel 1.4404 patří do skupiny korozivzdorných ocelí, což jsou vysocelegované oceli, vyznačující se zvýšenou odolností proti chemické a elektrochemické korozi. Mezi legující prvky patří především chrom, nikl, mangan a další, jak je zřejmé z tabulky 6. Dělení těchto ocelí probíhá nejčastěji do skupin podle jejich struktury: feritické, martenzitické, austenitické a jejich přechodové skupiny (feriticko-austenitické, atd.). Pro své vlastnosti se korozivzdorné oceli používají v různých odvětvích chemického, potravinářského i automobilového průmyslu, při výrobě lodí a ve stavebnictví.

5 PRŮBĚH A VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Experiment vychází z požadavků výroby konkrétní součástí zhotovovaných z korozivzdorné oceli ve firmě ACO Příbryslav. Nastavené vstupní hodnoty přidržovacích sil a referenční mazivo Prolong 50-12 tedy vychází z této skutečnosti. Jak již bylo zmíněno, experiment byl proveden v laboratoři mechanických vlastností materiálů na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně.

○ Přidržovací síla

Vyvinutí síly odpovídající přidržovací síle během tažení bylo dosaženo šroubovým spojením spodní čelisti s horními. Aby bylo možné měnit sílu přidržovače, je toto spojení realizováno šrouby M16, pevnostní třídy 10.9, což rozšiřuje rozpětí možných zkoušených velikostí zatížení. Šrouby lze zatěžovat až do síly 45000 N, což je pro tento experiment dostačující. Zkoušení proběhlo ve dvou etapách, v první byla zkoušena všechna maziva. Tím bylo možno určit zcela nevhodná maziva a vyřadit je pro zkoušky při vyšší přidržovací síle.

Určení velikosti předpětí, v našem případě přidržovací síly, ve šroubovém spojení lze provést několika způsoby. První možností je měření protažení (změny délky) šroubu. Jedná se o matematickou souvislost mezi protažením šroubu a vzniklou napínací silou. Tento způsob je velice přesný, protože vychází z přímého měření protažení. Z tohoto důvodu je tato metoda také prakticky téměř nepoužitelná a využívá se pouze ve speciálních případech s velkými šrouby. Vylepšením této metody může být měření protažení ultrazvukovou vlnou, zde je ovšem vyžadováno finančně náročné příslušenství. S touto metodou se můžeme setkat především v průmyslu automobilovém při sériové výrobě. Další metodou je měření velikosti utažení kontrolou úhlu otočení. Tato metoda se využívá jen velmi vzácně u specializovaného bezpečnostního šroubování.



Obr. 40 Momentový klíč MATADOR [1]

Nejčastěji je využíván postup vyvození předpětí pomocí krouticího momentu. Tato metoda spočívá na výkyvových hodnotách tření na hlavě šroubu a závitů. Její technická realizace je jednoduchá a vhodná pro aplikace s nižší požadovanou přesností. Byla proto také využita pro vyvození předpětí (přidržovací síly) mezi čelistmi zkušebního přípravku. K přesnému utažení byl použit momentový klíč (obr. 40).

Velikost tlaku přidržovače ve firmě ACO pro tažení vpustí je $p_p = 7 \text{ MPa}$. Tohoto tlaku je nutné dosáhnout příslušným zatížením také v přípravku na jeho funkční ploše. Velikost této plochy určíme výpočtem ze známé geometrie přípravku (viz kapitola 4.1):

$$S_f = 75 \cdot 30 = 2250 \text{ mm}^2 \quad (5.1)$$

Sílu předpětí, která je nutná pro vyvinutí stejného přidržovacího tlaku, pak lze vypočítat vztahem:

$$F_{přidr.} = p_p \cdot S_f = 7 \cdot 2250 = 15750 \text{ N} \quad (5.2)$$

Ze znalosti její velikosti a rozměrů použitého šroubu je poté možno určit velikost potřebného utahovacího momentu pro jeden šroub vztahem:

$$M_u = k \cdot F_{přidr.} \cdot d_{šroub} = 0,2 \cdot 15750 \cdot 16 = 504000 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (5.3)$$

kde $d_{šroub}$ – průměr šroubu
 k – součinitel utahovacího momentu, jeho hodnota pro šrouby bez definované úpravy povrchu se pohybuje v rozmezí $k = (0,18 \div 0,2)$



Obr. 41 Umístění pásků plechu do přípravku s nanesenou vrstvou maziva



Obr. 42 Stírání maziva hranou přípravku

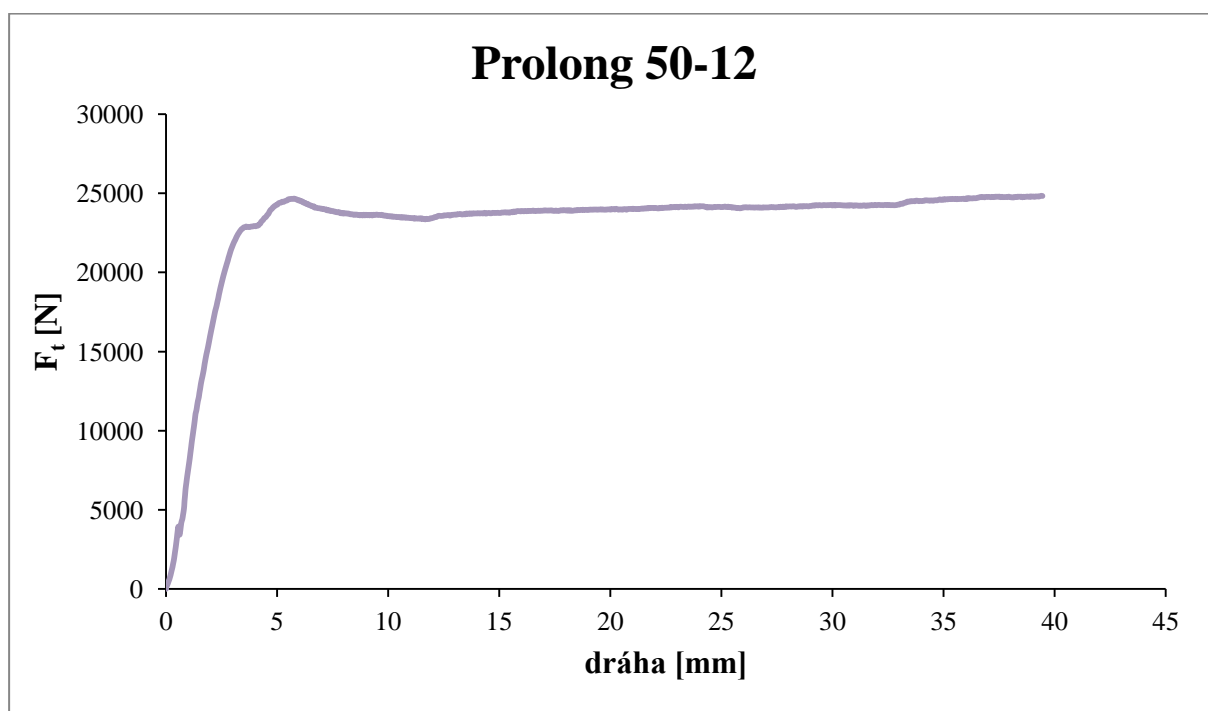
Na obr. 41 je zobrazeno použití oceli 1.4404 pro experiment ve formě předehnutého pásku plechu s aplikovanou vrstvou maziva. Jeho množství v nanesené vrstvě spočívá především na velikosti viskozity daného maziva, kdy s její rostoucí hodnotou mazivo snadněji ulpívá na povrchu plechu a tvoří silnější vrstvu. Viskozita zkoušených olejů se pohybovala v rozmezí 22 - 400 mm²/s (viz tabulka 5). Přebytké množství maziva je stíráno vnější zaoblenou hranou přípravku (obr. 42).

5.1 Testování maziv při nižší přidržovací síle

Aby bylo možné selektovat nevhodná maziva, byla určena snížená hodnota utahovacího momentu $M_u = 20 \text{ Nm}$, pro kterou byla odzkoušena všechna získaná maziva. Tomuto momentu odpovídá snížená přidržovací síla dle vztahu:

$$F_{\text{přidr.}} = \frac{M_u}{d_{\text{šroub}} \cdot k} = \frac{20000}{0,2 \cdot 16} = 6250 \text{ N} \quad (5.4)$$

Dalším vstupním parametrem byla rychlost tažení. Ta byla nastavena na hodnotu 100 mm/min , aby bylo možné kontrolovat správné tažení pásků plechu v přípravku. Tato rychlost je dostatečně nízká, aby bylo možné okamžité zastavení zkoušky v případě vybočení plechu či jeho zadírání.

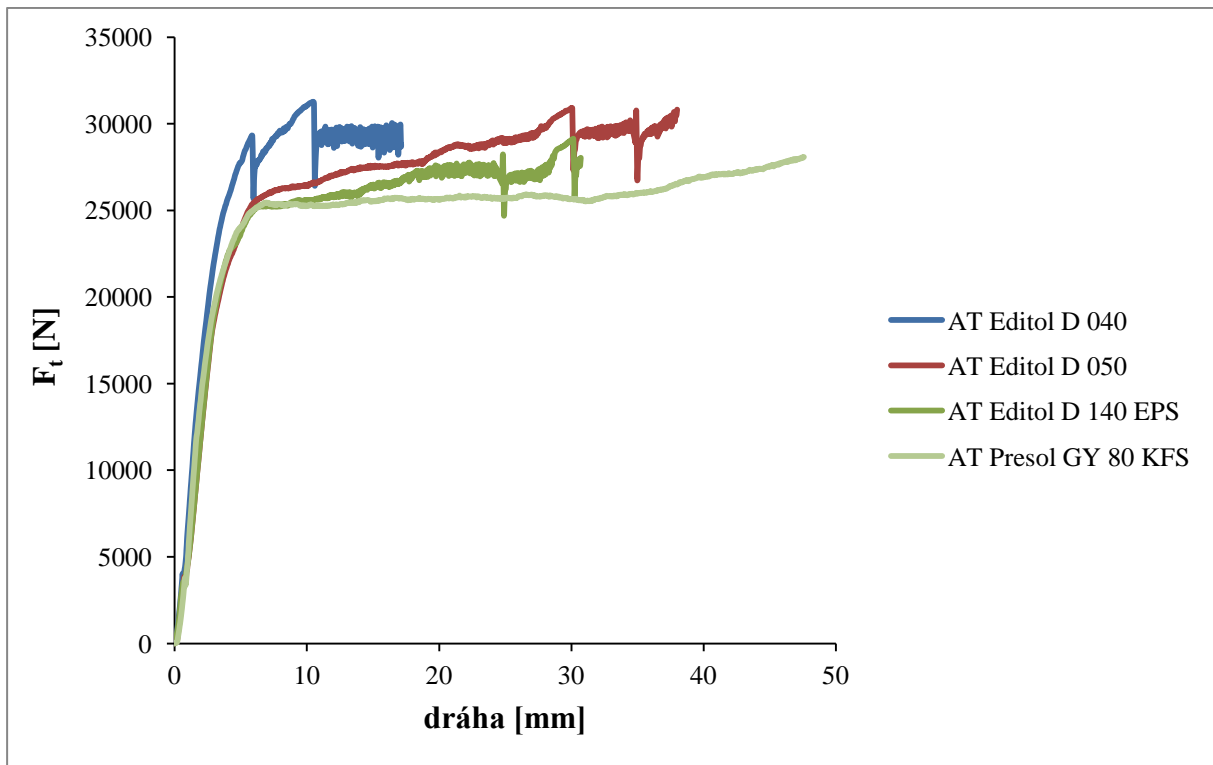


Obr. 43 Referenční výsledek maziva Prolong 50-12

Mazivo Prolong 50-12, v současnosti používané firmou ACO k tažení vpustí, je použito jako referenční. Z výsledků jeho testování (obr. 43) byly odvozeny podmínky vhodnosti ostatních maziv pro tažení oceli 1.4404. Výsledkem zkoušek je závislost tažné síly F_t na dráze tažení plechu. Na obr. 44 je zobrazen graf s výsledky pro maziva zcela nevhodná pro tažení korozivzdorné oceli 1.4404. Jedná se o řadu maziv AT Editol a mazivo AT Presol GY 80 KFS. U těchto maziv je zřejmá vysoká hodnota tažné síly nutné k protažení pásku, maziva AT Editol D 040 a AT Editol D 050 navíc bylo nutné předčasně zastavit z důvodu velkého zadírání, aby nedošlo k poškození přípravku a stroje.

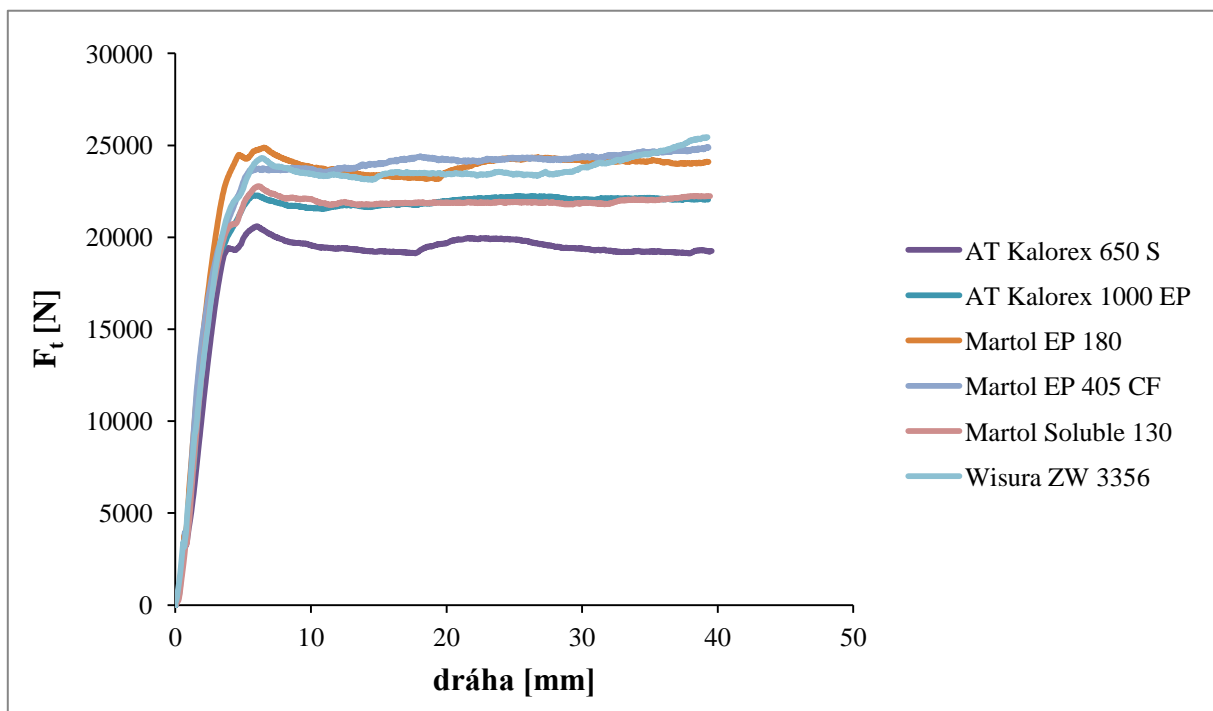
Při zkoušce maziva AT Presol GY 80 KFS došlo k vybočení pásků plechu a tudíž k velkému nárůstu tažné síly. Měření proto bylo nutné opakovat. V opakované zkoušce již k vybočení nedošlo, průběh síly je po počátečním nárůstu stabilizovaný a k mírnému vzrůstu tažné síly dochází až na konci testování.

Zmíněné oleje patří do skupiny maziv neobsahujících žádnou nebezpečnou látku. Z toho lze tedy vyvozovat, že nepřítomnost vázaného chlóru či jeho sloučenin výrazně ovlivňuje jejich mazací schopnosti. I přes to, že se jedná o výhodné ekologicky nezávadné oleje, je patrné, že nezajišťují dostatečné mazání při této aplikaci.



Obr. 44 Maziva nevhodná pro tažení oceli 1.4404

Lepších výsledků než u referenčního maziva Prolong 50-12 bylo dosaženo u olejů zobrazených na obr. 45. Většina z nich obsahuje chlór nebo jeho sloučeniny. Výjimkou je pouze mazivo Martol EP 405 CF. Nejlepšího výsledku pak dosáhl olej AT Kalorex 650 S, který vykazoval průměrné hodnoty tažné síly nižší než $F_t = 20$ kN.



Obr. 45 Maziva s přijatelnými výsledky zkoušky

Maximální zaznamenaná síla měla hodnotu $F_t = 20,6$ kN na začátku zatěžování, kdy je nutné překonávat statickou složku tření. Průběh zkoušky byl navíc téměř stabilní, bez zadřívání či vybočení pásku. Velmi mírné zadřívání vykazovala maziva Wisura ZW 3356 a Martol EP 405 CF, což lze poznat podle narušení hladkosti křivky. Také je u nich zřejmá neschopnost udržení stejnoměrné vrstvy mazacího filmu, což se projevuje pozvolným nárůstem tažné síly při tomto zatížení. Obě tato maziva mají viskozitu vyšší než $350 \text{ mm}^2/\text{s}$ a jako jediné ze zkoušených maziv vykazují tento nárůst.

Z výsledku této zkoušky byla pro testování na maximální přidržovací sílu vybrána tato maziva: AT Kalorex 650 S, AT Kalorex 1000 EP, Martol EP 180, Martol EP 405 CF a Prolong 50-12. U všech těchto maziv byl zaznamenán stabilní průběh tažné síly na dráze tažení (viz obr. 45). U žádného z maziv zároveň její velikost nepřesáhla hranici 25 kN, což lze považovat za dostatečné kritérium pro další testování.

Do testování při maximální přidržovací síle bylo navíc zařazeno mazivo AT Presol GY 80 KFS, přestože nesplňuje předchozí kritéria. Z vyřazených maziv u něj byly zaznamenány nejlepší výsledky, jak poměrně stabilní průběh zkoušky bez zadřívání, tak nižší maximální hodnota tažné síly. Zkoušen byl také olej AT Editol D 140 EPS, u něhož se projevovalo zadřívání již při nižší síle přidržovače. Obě tato maziva byla vybrána, aby došlo k rozšíření počtu zástupců ekologicky nezávadných maziv pro další experiment.

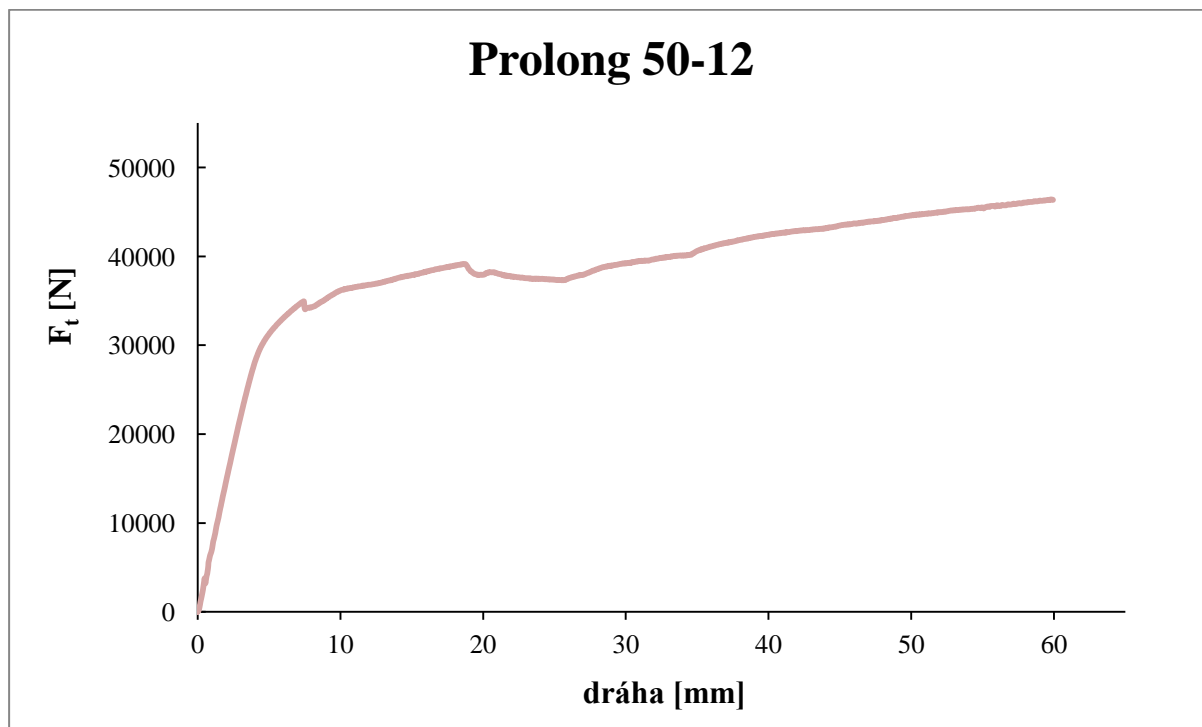
Porovnání získaných výsledků všech maziv je provedeno v tabulce 7. Protože se jedná pouze o maximální naměřené hodnoty tažné síly, je nutné brát v úvahu také průběh zkoušky, především stabilitu a hladkost vykreslené křivky.

Tabulka 7 Výsledky zkoušených maziv

<i>Název maziva</i>	<i>F_t [N]</i>	<i>Zaznamenané potíže</i>
AT Editol D 040	31 267	výrazné zadřívání
AT Editol D 050	30 919	zadřívání
AT Editol D 140 EPS	29 133	zadřívání
AT Kalorex 650 S	20 604	-
AT Kalorex 1000 EP	22 296	-
AT Presol GY 80 KFS	28 089	mírné vybočení
Martol Soluble 130	22 983	-
Martol EP 180	25 456	-
Martol EP 405 CF	27 083	-
Wisura ZW 3356	28 870	mírné zadřívání
Prolong 50-12	25 399	-

5.2 Testování pro vyšší přídržovací sílu

Velikost utahovacího momentu byla zvýšena na hodnotu 50 Nm na jeden šroub, což odpovídá přídržovací síle $F_{přidr.} = 15750$ N. Rychlost tažení zůstala nezměněna na hodnotě 100 mm/min, aby bylo možno průběh tažení sledovat a kontrolovat, popřípadě při velkém zadírání zkoušku předčasně ukončit. Ze zkušenosti s předešlým zkoušením byla stanovena jednotná délka vtahování pásků na 60 mm. Jedná se o dostačující vzdálenost pro vyhodnocení stability mazání taženého plechu.



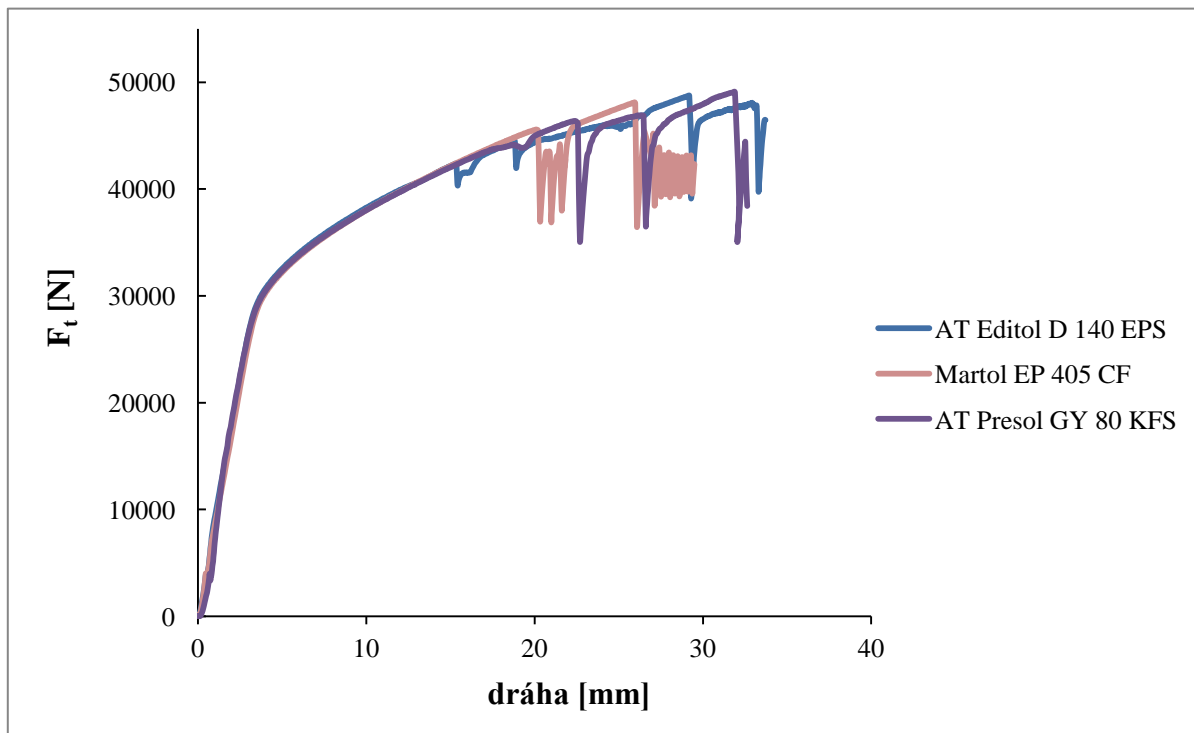
Obr. 46 Záznam zkoušky maziva Prolong 50-12 při vyšším zatížení

Výsledek referenčního maziva Prolong 50-12 je zobrazen na obr. 46. Na jeho průběhu je zřejmý nárůst tvářecí síly v průběhu tažení, zřejmě způsobený snížením mazací vrstvy. To může být způsobeno vlivem stírání maziva na tažné hraně při zvýšeném tlaku přídržovače.



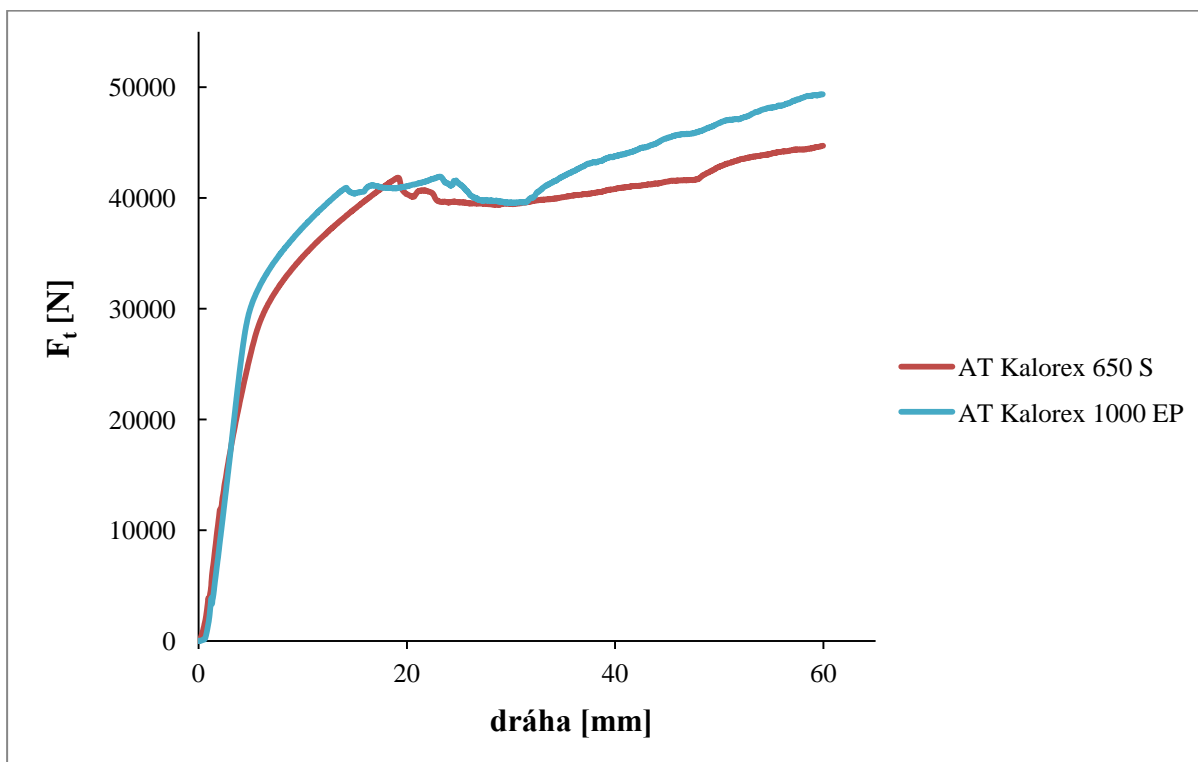
Obr. 47 Detail maziva Prolong 50-12

Na obr. 47 je zobrazen detail aplikovaného maziva Prolong 50-12 na předehnutý pás plechu před vlastní zkouškou. Toto mazivo je téměř bezbarvé (mírně nazelenalé), lehce tvoří souvislou vrstvu, proto je jeho aplikace na dobře očištěný povrch velmi snadná. Tloušťka nanesené vrstvy odpovídá jeho nižší viskozitě (viz tabulka 5), je tenká a rovnoměrná. Během tažení docházelo pouze k velmi mírnému stírání přebytečného maziva.



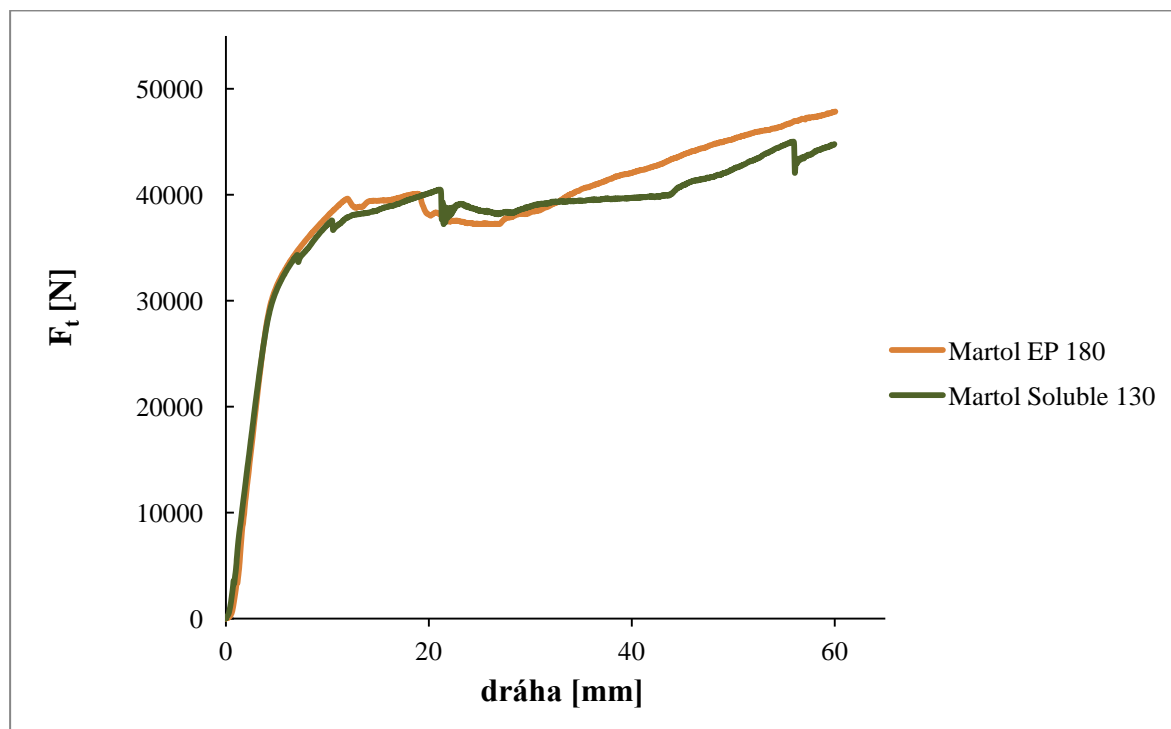
Obr. 48 Výsledky ekologických maziv

Při tažení ekologických maziv AT Editol D 140 EPS, AT Presol GY 80 K_FS a Martol EP 405 CF docházelo již na začátku tažení ke strmějšímu nárůstu tažné síly. Jak je z grafu na obr. 48 zřejmé, došlo k počátkům zadírání již po protažení 15 – 20 mm. U všech maziv bylo nutné zkoušku předčasně ukončit.



Obr. 49 Výsledky maziv řady AT Kalorex

Průběhy velikostí sil potřebných pro protažení oceli 1.4404 s použitím maziv řady AT Kalorex jsou zobrazeny v grafu na obr. 49. Průběh zatížení u obou maziv této řady vykazuje standardní nárůst tažné síly při sesouhlasení poloměrů. Po dosažení stabilního stavu tažení je zřejmý pokles potřebné tažné síly, která při dalším zatěžování opět pozvolna narůstá. Tento nárůst je typický pro všechny provedené experimenty za zvýšeného tlaku přidržovače. U obou maziv řady AT Kalorex je průběh tažné síly hladký, nedocházelo zde k žádnému zadírání ani k vybočení plechu. U oleje AT Kalorex 650 S bylo dosaženo obdobných výsledků jako u referenčního maziva Prolong 50-12.



Obr. 50 Výsledky maziv řady Martol

Mírně odlišný byl průběh zkoušení maziv řady Martol, což je zobrazeno na obr. 50. K ustálení síly tažení došlo u oleje Martol EP 180 již při hodnotě 38 kN. Stejně jako u předešlých maziv však následovalo zvyšování tažné síly. Růst síly zde byl srovnatelný s dosaženým výsledkem oleje AT Kalorex 1000 EP. Obě tyto maziva převyšovala výsledek referenčního maziva Prolong 50-12 zhruba o 2000 N. Při zkoušení maziva Martol Soluble 130 byla celkově zaznamenána nižší hodnota tažné síly, docházelo však zde k mírnému zadírání, což je možné sledovat na dvou výkyvech v grafu tažné síly pro toto mazivo (obr. 50). I přes velmi nízké hodnoty tažné síly se proto jedná o nevhodné mazivo.

Na obr. 51 a 52 jsou fotografie protažených vzorků dokumentující nedostatečnou funkci maziv u vzorků, u kterých docházelo k zadírání. Jedná se o tyto typy poškození:

- Poškození plechu přidržovačem

Obr. 51 je vyobrazuje rozdílné poškození plechu plochou přidržovače. Oba vzorky pochází z testování pro vyšší přidržovací sílu. Tažení vrchního vzorku bylo ošetřeno mazivem AT Kalorex 650 S. Na ploše je zřejmé pouze nízké poškození (lesklá plocha) bez rýh. Při tažení spodního vzorku bylo použito mazivo AT Presol GY 80 KFS. Jsou zde patrné stopy po zadírání (hluboké rýhy) a vybočení způsobené nevhodnými mazacími vlastnostmi. Při této zkoušce došlo navíc k poškození funkční plochy spodní čelisti. Jelikož se jednalo o poslední

zkoušku tohoto experimentu, nebyla nutná její oprava leštěním. V případě dalšího testování je ovšem nutné tuto poškozenou funkční plochu opravit. K nižšímu porušení povrchu plechu pak docházelo na straně horních čelistí během obou nastavení přidržovací síly. Při poslední zkoušce také došlo k jejich poškození a je taktéž nutná jejich oprava před dalším zkoušením.

○ Poškození plechu tažnou hranou

Nejvýraznější poškození plechu je způsobeno tažením přes tažnou hranu (obr. 52). K tomuto poškození docházelo již u testů s nižší přidržovací silou. Příčinou je otevřený mazací systém, při

kterém dochází ke vzniku pouze mezného mazání, tedy k lokálním stykům třecích



Obr. 52 Poškození tažnou hranou



Obr. 51 Poškození od přidržovače

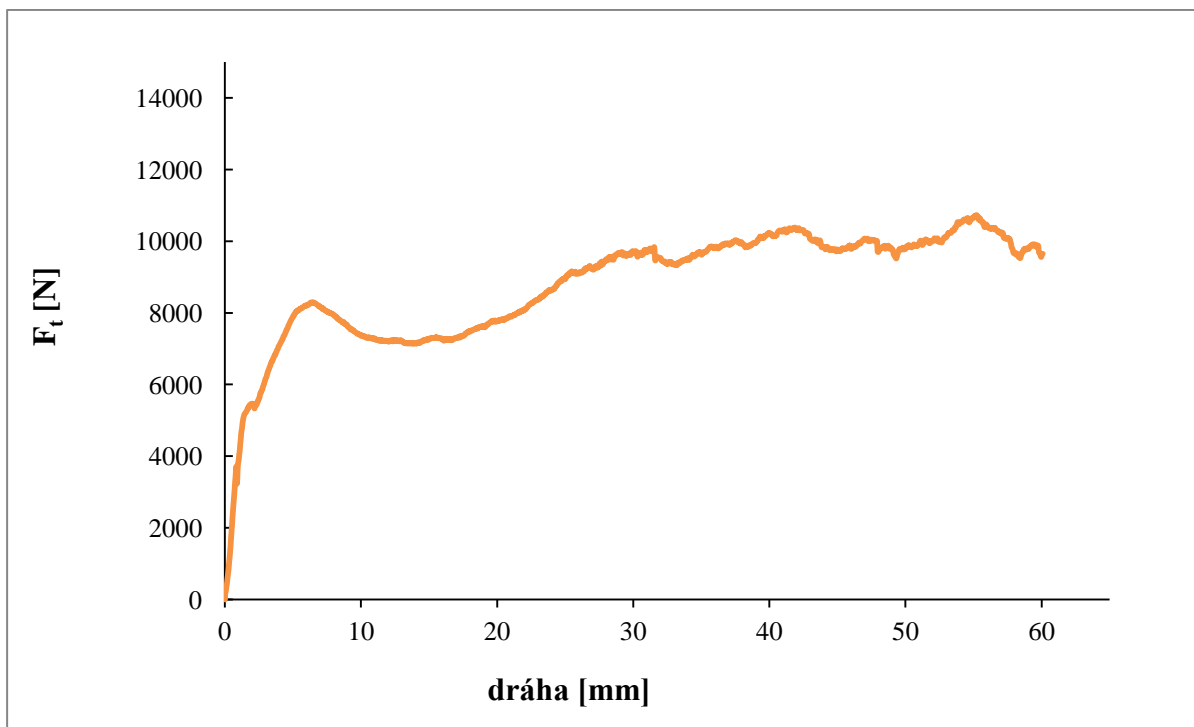
povrchů. Předpokladem pro tažení přes tažnou hranu bez poškození povrchu je kapalinové tření, při kterém je tloušťka vrstvy udržována hydrostaticky (popř. hydrodynamicky).

Probíhající plastická deformace způsobuje také mírné protažení a odpružení plechů, ovšem žádná z těchto okolností neovlivňuje výsledky testovaných maziv. Korozivzdorné oceli se však využívají i pro svůj lesklý vzhled, proto je zde uváděné poškození nežádoucí. Při vlastní výrobě součástí je proto nutné s těmito vlivy počítat, popřípadě proti nim zavést opatření.

5.3 Síla nutná pro ohyb po tažné hraně

Aby bylo možno orientačně určit vliv přidržovací síly na velikost tažné síly, byla změřena velikost síly nutné k dvojímu ohybu (vlastní ohyb a narovnání) po tažné hraně. U této zkoušky došlo k sestavení přípravku s předehnutým plechem bez použití maziva. Šrouby, jež vyvolávají přidržovací tlak, byly utáhnuty pouze tak, aby bylo možné přípravek sestavit. Zkouška poté proběhla jako u všech předchozích maziv.

Po počátečním nárůstu na hodnotu mírně překračující 8000 N, byl opět zaznamenán pokles tažné síly s následným růstem. Protože nebylo použito žádné mazivo, není další průběh hladký a dochází k mírnému zadrhávání. Z grafu na obr. 53 lze vyčíst, že i přes zmíněné zadrhávání nedošlo k zadírání a hodnota tažné síly se pohybuje v rozmezí 9000 - 10000 N. Tato hodnotu lze uvažovat pouze jako orientační. Velikost skutečné síly nutné pro dvojité ohyb pro jednotlivé zkoušky by bylo nutné změřit s použitím daného maziva. Tato měření neproběhla z důvodu velké časové náročnosti a jejich přesná znalost není pro porovnání maziv potřebná.



Obr. 53 Výsledek zkoušky ohybu po tažné hraně

Maximální naměřené hodnoty síly společně se slovním vyjádřením průběhu zkoušky jsou zobrazeny v tabulce 8. Také u těchto výsledků je nutné brát v úvahu průběh jednotlivých zkoušek.

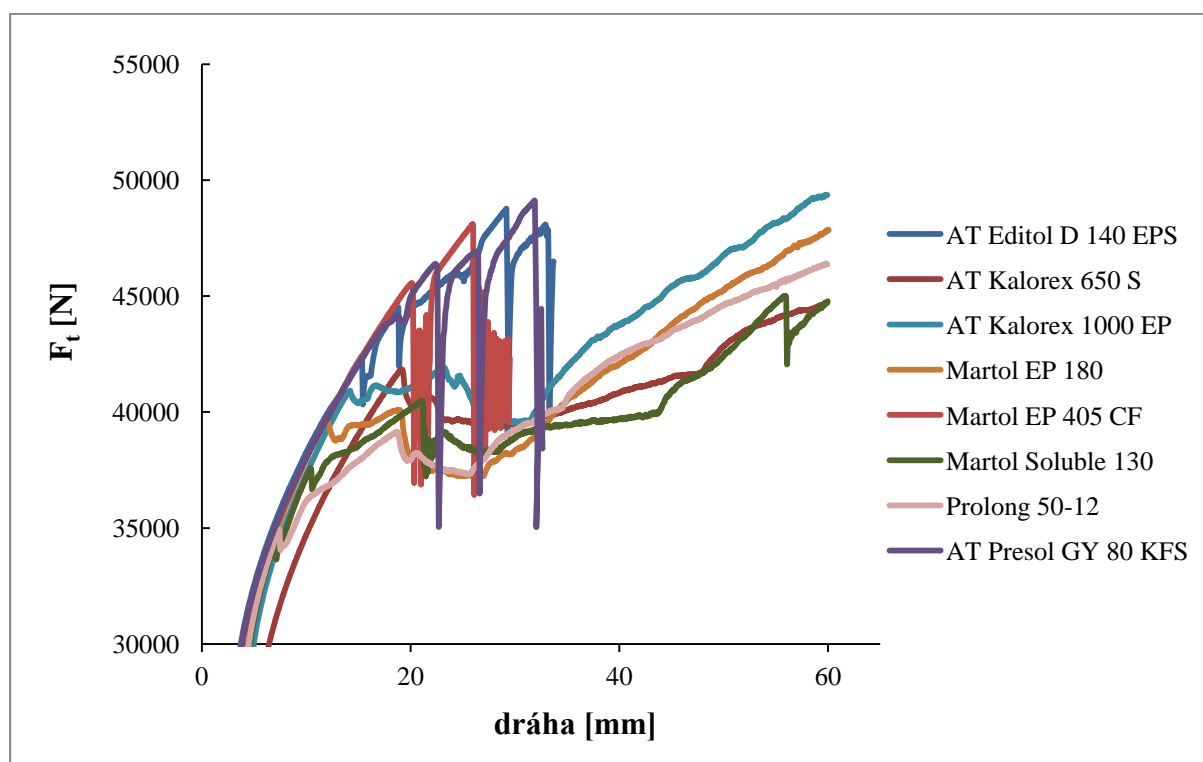
Tabulka 8 Výsledky zkoušek pro vyšší přidržovací síly

Název maziva	F_t [N]	Zaznamenané potíže
AT Kalorex 650 S	44 766	-
AT Kalorex 1000 EP	49 365	-
Martol EP 180	47860	-
Martol Soluble 130	45 010	mírné zadírání
Prolong 50-12	46 402	-
AT Editol D 140 EPS	48 772	zadírání
AT Presol GY 80 KFS	49 123	zadírání
Martol EP 405 CF	48 114	zadírání

6 ROZBOR VÝSLEDKŮ

Ke stanovení vhodnosti použití zkoušených maziv pro hluboké tažení korozivzdorné oceli 1.4404 byla navržena experimentální zkouška. Cílem tohoto experimentu bylo porovnání získaných vzorků maziv s referenčním mazivem Prolong 50-12. K porovnání byly použity záznamy zkoušení, z kterých lze vyhodnotit vhodnost maziva k požadované aplikaci. Na obr. 54 je zobrazeno srovnání všech těchto zkoušek maziv pro vyšší sílu přidržovače.

Všechny zkoušky maziv, které jsou charakteristické svou ekologickou nezávadností, se vyznačovaly vysokými tažnými silami a brzkým výskytem zadírání. Jak již bylo dříve zmíněno, u všech těchto maziv bylo nutné zkoušku předčasně ukončit. Tažené plechy byly značně poškozeny, a proto lze jednoznačně říci, že tato maziva jsou zcela nevhodná pro tažení korozivzdorné oceli 1.4404 při zvýšené přidržovací síle. Dobré mazací vlastnosti prokazují pouze při nižších hodnotách přidržovací síly ($F_{\text{přidr.}} = 6250 \text{ N}$).

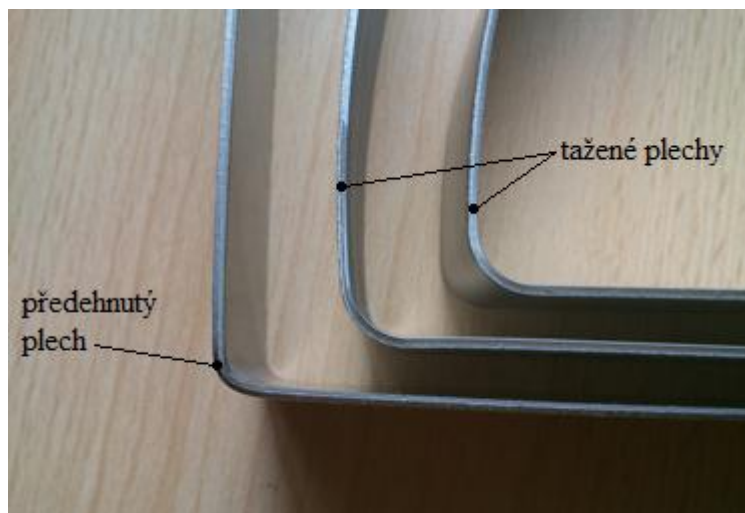


Obr. 54 Záznam všech zkoušek pro vyšší sílu přidržovače

U maziv AT Kalorex 1000 EP a Martol EP 180 se zadrhávání téměř neobjevilo a jejich výsledky zkoušek jsou srovnatelné s referenčním mazivem Prolong 50-12. Jedná se o maziva s obsahem chlóru či jeho sloučenin, který výrazně zvyšuje jejich mazací schopnost. Také oleje AT Kalorex 650 S a Martol Soluble 130 obsahují chlór a zkoušky, při nichž byly použity, dosáhly nižších tažných sil než referenční Prolong 50-12. U oleje Martol Soluble 130 docházelo k mírnému zadírání během zkoušky, proto se jedná o nevhodné mazivo pro danou aplikaci. Celkově nejlepší výsledek byl zaznamenán u oleje AT Kalorex 650 S, a proto jej lze doporučit jako nejvhodnější ze zkoušených maziv pro tažení součástí z oceli 1.4404.

6.1 Zhodnocení experimentu

Počáteční nárůst tažné síly před vlastním vtahováním pásků předehtutého plechu je důsledkem překonání statických složek třecích sil. Dochází při něm také, jak již bylo dříve zmíněno, ke sjednocení velikosti zaoblení předehtutého plechu se zaoblením tažné hrany. Tento rozdíl je patrný na obr. 55 mezi plechy již taženými a plechem netaženým. Během dalšího tažení následně docházelo v některých případech k poškození plechů. V závislosti na intenzitě tohoto poškození a jeho vlivu na průběh tažné síly byly některé provedené testy vyhodnoceny jako neplatné a pro dané mazivo byla zkouška opakována.



Obr. 55 Poloměry předehtutého a taženého plechu

Při výrazném vybočení taženého pásku plechu docházelo k jeho kontaktu s vodícím kolíkem, v místě kontaktu pak vznikla deformace, což dokumentuje obr. 56. Nastala-li tato

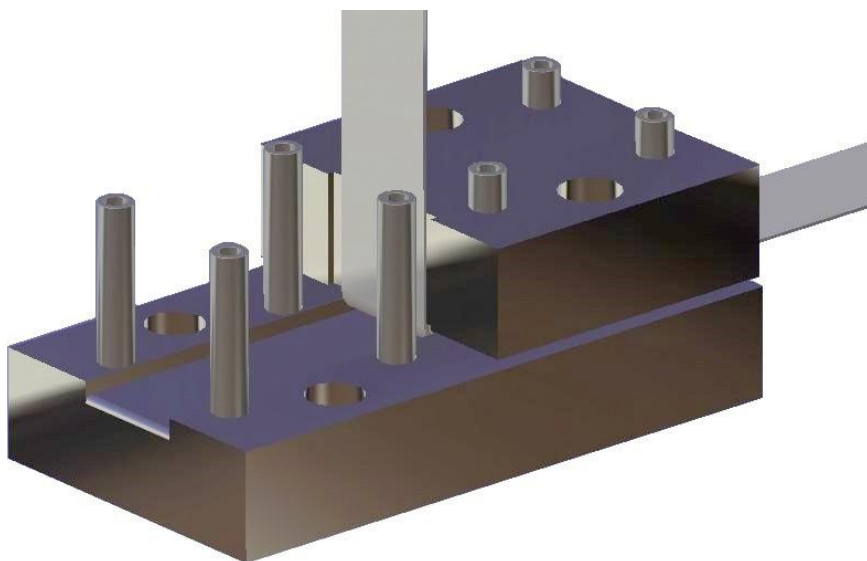


Obr. 56 Poškození způsobené vybočením

skutečnost, bylo třeba zkoušky opakovat. Důvody, které způsobí vybočení protahovaného plechu, mohou být tyto:

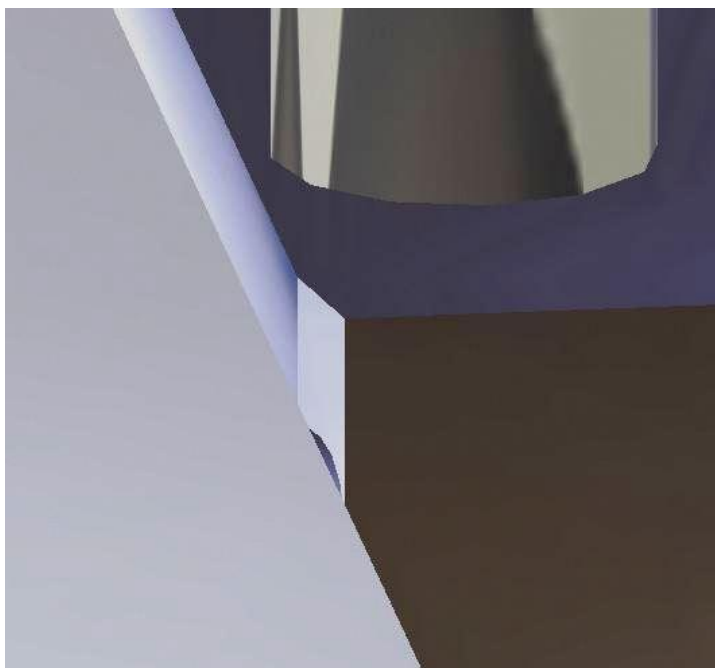
- Nepřesné předehtnutí plechu (je důležité dodržet kolmost ohybu).
 - Druhou možností je jeho nepřesné upnutí do přípravku. Během sestavování je proto nutná kontrola dolehnutí hran plechu s bočními drážkami.
- Další možnou příčinou vybočení je nesterjnoměrně nanesená vrstva maziva, popřípadě nevhodné vlastnosti použitého maziva. Dochází zde ke zvýšení tření na jedné straně třecí plochy (obr. 56), což má za následek nejen vybočení s deformací hrany, ale také vykřivení celého pásku plechu.

Aby se vyloučilo riziko vybočení protahovaného pásu a nutnost opakování zkoušky, byla navržena konstrukční úprava zkušební přípravku. Navržená změna je založena na odlišném vedení předehtého pásu plechu ve vodící drážce. Oproti původní variantě tak případné vyhnutí nemá za následek zachytávání o jeden vodící kolík a následné velké plastické deformaci, jak tomu bylo doposud. Na obr. 57 je zobrazen model upnutí plechu do přípravku s vedením ve vodící drážce. V případě vybočení plechu se předpokládá opření plechu o stranu drážky, která by poté zajišťovala vedení plechu bez deformace.



Obr. 57 Model upraveného přípravku

Vodící kolíky v novém návrhu zůstaly nezměněny, jejich funkcí je nyní pouze ustavení obou čelistí vůči sobě a středění všech částí přípravku během jeho sestavení.



Obr. 58 Detail zkosení hrany

Vlastní úpravu je možné realizovat přímo na používaném přípravku. U dolní čelisti je nutné provést odfrézování 2 mm, aby se odstranily drážky na stranách třecí plochy. Do takto upraveného povrchu je již možné vyfrézovat vodící drážku. Aby nedocházelo k deformaci na koncích dolní čelisti, kde je vtahován plech, bylo zde navíc umístěno zkosení, jak můžeme sledovat na detailu obr. 58. U horní čelisti lze přímo vyfrézovat tvar dle výkresové dokumentace. Pro obě takto upravené plochy je nutné opět provést příslušné tepelné zpracování a leštění.

7 ZÁVĚRY

K experimentálnímu zhodnocení vhodnosti maziv pro tažení korozivzdorné oceli jakosti 1.4404 byly získány různé typy olejů od tuzemských i zahraničních výrobců, kteří poskytli vzorky maziv používaných pro tažení nerezavějící oceli. Jedním z parametrů bylo porovnání ekologicky závadných a nezávadných maziv pro toto konkrétní využití. K dosažení podmínek odpovídajících výrobě byl využit přípravek vycházející z kombinovaného modelování tření v místě přidržovače a tažné hrany.

Vyhodnocování výsledků spočívá v porovnání průběhu tažné síly při aplikaci zkoušeného maziva s výsledkem referenčního maziva Prolong 50-12. Na základě provedených experimentů lze říci, že ekologicky nezávadná maziva nesplňují požadované mazací vlastnosti. Dobrých výsledků bylo dosaženo u ekologických olejů AT Presol GY 80 KFS a Martol EP 405 CF. Vhodné mazací schopnosti však prokázaly pouze při nižší přidržovací síle, při vyšším zatížení již docházelo k zadírání. Jako nejlepší bylo vyhodnoceno mazivo AT Kalorex 650 S, u kterého jako jediného byl naměřen lepší průběh tažené síly než u referenčního oleje. Lze jej proto doporučit jako nejvhodnější z testovaných maziv pro tažení zadané oceli.

Protože během zkoušení docházelo k poškození některých plechů vlivem vybočení a tedy znehodnocení příslušného experimentu, byla navržena také změna geometrie zkušebního přípravku. Tento návrh byl podložen příslušnou výkresovou dokumentací.

Seznam použitých zdrojů [4]

1. Alfavaria.cz. In: *Momentové klíče* [online]. 2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://shop.alfavaria.cz/produkty/rucni-naradi/momentove-klice/>
2. BAY, N., D.D. OLSSON, J.L. ANDREASEN a Taylan ALTAN. Lubricant test methods for sheet metal forming. *Tribology International* [online]. 2008, vol. 41, 9-10, s. 844-853 [cit. 2015-03-30]. ISSN 0301679x.
3. BLAŠKOVITŠ, Pavel. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990, 360 s., příl. Edícia strojárskej literatúry. ISBN 80-050-0633-0.
4. *Citace* [online]. 2015 [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>
5. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. březen 1999.
6. DBO: oleje a maziva. *Složení olejů* [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.dbo.cz/slozeni-oleju/>
7. Digital Signal and Image Processing. HOTAŘ, Vlastimil. *VYHODNOCOVÁNÍ STRUKTUROVANÝCH POVRCHŮ POMOCÍ MATLABU* [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB08/prispevky/045_hotar.pdf
8. DOUBEK, Pavel. *Technologie II: Technologie tažení výlisků z plechů* [online]. 2014 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_TKP_PR_07_CZE_Doubek_Technologie_tazeni_vylisku_z_plechu.pdf
9. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
10. EVROPSKÁ DATABANKA. *Výroba kovové výlisky kovové polotovary, lisování lisovna kovů*. [online]. 2012 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://nabidky.edb.cz/Nabidka-20702-Vyroba-kovove-vylisky-kovove-polotovary-lisovani-lisovna-kovu>
11. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
12. FOREJT, Milan. *Teorie tváření: Návod do cvičení* [online]. 2004 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/teorie_tvareni__navody_do_cviceni__forejt.pdf
13. FritscheGmbH& Co. KG. *Die Geschichte der Tribologie* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.fritsche-gmbh.de/de/tribologie>
14. HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *Provoz, diagnostika a údržba strojů*. 2013. ISBN 978-80-248-3028-5. Dostupné z: <http://interdiago.vsb.cz/kom/upload/12-Provoz,%20diagnostika%20a%20%20C3%BAAdr%C5%BEba%20stroj%C5%AF%2004.pdf>
15. Infoscience. In: ALTPETER, Friedhelm. *Friction Modeling, Identification and Compensation* [online]. 1999 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://infoscience.epfl.ch/record/28323/files/fulltext.pdf>
16. Katedry strojírenské technologie. *TRIBOLOGIE* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf
17. KLIBER, Jiří. *Teorie tváření: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014, 87 s. ISBN 9788024835877.

18. KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 216 s. ISBN 80-708-2668-1.
19. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření I*. 1. vyd. Brno: Univerzita obrany, 2008, 112 s. ISBN 978-80-7231-579-6.
20. MACHEK, Václav. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 157 s. ISBN 9788001046838.
21. MALICH, Jaromír. *Ireceptář.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.ireceptar.cz/zahrada/zahradni-technika/ktery-olej-pouzivat-na-mazani-retezu-motorove-pily/>
22. MANNSBART, Stanislav. *Modelování třecího odporu při objemovém tváření za studena*. Brno, 2006. 72 s. Disertační práce. VUT Brno.
23. MARCINIAK, Z. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002, 211 s. ISBN 07-506-5300-0.
24. MICHNA, Štefan a Nataša NÁPRSTKOVÁ. *Tváření*. 1. vyd. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012, 223 s. ISBN 9788074144455.
25. MM průmyslové spektrum. ABUŠINOV, Alexandr. *Inovace v ocelích* [online]. 2009 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-v-ocelich-2009.html>
26. MM Průmyslové spektrum. HOUDEK, Josef a Karel KOUŘIL. *Opotřebenění břitů nástrojů ze slinutých karbidů* [online]. 2005 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html>
27. MM průmyslové spektrum. TATÍČEK, František, Tomáš PILVOUSEK a Martin KUBELKA. *Akademie tváření: Hluboké tažení* [online]. 2011 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hluboke-tazeni.html>
28. Motorkáři.cz. [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://img.motorkari.cz/upload/images/database/2011-07/291730.jpg?2329986>
29. NASA SBIR SUCCESS. *Perfluoropolyether Lubricating Fluids* [online]. 2005 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://sbir.nasa.gov/SBIR/successes/ss/114text.html>
30. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I: Plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: Nakladatelství VUT, 1992, 171 s.
31. *Numerical modelling of material deformation processes: research, development and applications*. Editor Peter Hartley, Ian Pillinger, Clive Sturgess. Berlin: Springer, 1992, xviii, 460 s. ISBN 35-401-9584-X.
32. PATA, Vladimír. *Učíme v prostoru: Měření jakosti povrchu* [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=1985
33. Petroleum.cz. *PARAMO, a.s., výroba olejů* [online]. 2007-2015 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/rafinerie/paramo-vyroba-oleju.aspx>
34. *Plastická maziva - tuky*. In: *Eni.com* [online]. 2013 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: http://www.eni.com/cz_CZ/produkty-sluzby/plasticka-maziva/plasticka-maziva.shtml
35. SCHEY, John A. *Metal deformation processes: friction and lubrication*. New York: M. Dekker, 1970, xiv, 807 p.
36. SOLFRONK, Pavel. *Teorie tváření: Tribologie v tváření kovů* [online]. 2014 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.techno->

mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_TTV_PR_04_CZE_Solfronk_Tribologie_v_tvareni_kovu.pdf

37. STACHOWIAK, G. *Engineering tribology*. 3rd ed. Amsterdam: ElsevierButterworth-Heinemann, 2005, xxiv, 801 s. ISBN 07-506-7836-4.
38. ŠAFR, Emil. *Technika mazání*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1970, 381 s.
39. ŠANOVEC, Jan a Petr KÁBRT. *Optimalizace technologií tažení plechových dílů* [online]. 2014 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_00/papers/238.pdf
40. *Technologie II* [online]. 2015 [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm
41. Tempos: Technická měřidla a počítačové systémy. *Bazar zkušebních strojů* [online]. 2015 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.tempos.cz/zkusebni-stroje-bazar>
42. TMT 2011. JURKOVIĆ, Milan a Irfana LJUBIJANKIĆA. *MATHEMATICAL MODELING OF FRICTION FORCE AND FRICTION COEFFICIENT AT DEEP DRAWING PROCESS* [online]. 2011 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2011/018-TMT11-302.pdf>
43. TOTTEN, George E. *Handbook of lubrication and tribology*. 2nd ed. BocaRaton: CRC Press, 2006, ca 1200 s. ISBN 08-493-2095-X.
44. Tribotechnika: časopis o tření, opotřebení a mazání. *Abrazivní opotřebení kovových materiálů* [online]. 2008-2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
45. ÚST ČVUT. *Funkční kompozitní a speciální galvanické povlaky, verifikace tribologických parametrů* [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/STPU/P%20-%20Funk%20kompozitn%20a%20speci%20galvanick%20povlaky,%20verifikace%20tribologick%20parametr%20>
46. Ústav konstruování. *Smykové tření, součinitel smykového tření* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/projekt/obrazky/post_021.pdf
47. Ústav konstruování. *Mezní mazání* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/tribologie/prednasky/prednaska8.pdf>
48. Ústav konstruování. *Tření, mazání, opotřebení* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf>
49. Ústav strojírenské technologie. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody: Syllabus* [online]. 2003 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf
50. VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006, 376 s. ISBN 80-239-6461-5.
51. WILLIAMS, John. *Engineering tribology*. 1. vyd. Oxford: Oxford university press, 1994, 488 s. ISBN 0-19-856503-8.
52. ZRŮNEK, Miroslav. *Úprava povrchu kovových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 117 s.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
a	[mm]	Hloubka vtažení mikronerovnosti do tělesa
b	[mm]	Tloušťka hranolu
C	[-]	Koeficient pro výpočet tažné síly
c	[-]	Součinitel zpevnění
d	[mm]	Průměr výtažku
D ₀	[mm]	Původní průměr přístřihu
d _{šroub}	[mm]	Průměr šroubu
E	[N/mm ²]	Modul pružnosti v tlaku
e ^{μ_α}	[-]	Součinitel zahrnující vliv tření na hraně tažnice
F	[N]	Síla
F _n	[N]	Normálová síla
F _{přidr.}	[N]	Síla přidržovače, přidržovací síla
F _{tř}	[N]	Třecí síla
F _t	[N]	Tažná síla
F _{taž.max}	[N]	Síla na utržení dna výtažku
h	[mm]	Výška výtažku
h _t	[mm]	Tloušťka vrstvy maziva
k	[-]	Součinitel utahovacího momentu
K	[-]	Stupeň tažení
K _a	[-]	Součinitel adhezního opotřebení
L	[mm]	Délka třecí dráhy
l	[mm]	Šířka pásku
m	[-]	Mezní stav tažení (součinitel tažení)
M _u	[Nm]	Utahovací moment
N	[N]	Zatížení
p	[MPa]	tlak
P	[N]	Měřená normálná síla
p _m	[MPa]	Tlak potřebný k dosažení plastické deformace
p _p	[MPa]	Přidržovací tlak
r	[mm]	Poloměr mikronerovnosti
R	[mm]	Velikost ramene krouticího momentu
R _e	[MPa]	Mez pružnosti
R _m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R _p	[mm]	Poloměr zaoblení přidržovače
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R _{te}	[mm]	Poloměr zaoblení tažné hrany
R _{tu}	[mm]	Poloměr zaoblení tažníku
s	[mm]	Tloušťka plechu
S	[mm ²]	Průřez stěny výtažku
s ₀	[mm]	Původní tloušťka přístřihu
S _f	[mm ²]	Funkční plocha přípravku
s _{max}	[mm]	Maximální tloušťka plechu
S _t	[mm ²]	Styčná plocha třecích povrchů
T	[Nm]	Krouticí moment
v	[m/s]	Rychlost pohybu třecích povrchů
W ₀	[mm ²]	Objem otěru
z	[mm]	Tažná mezera

Symbol	Jednotka	Popis
α	[°]	Úhel opásání
$\alpha_{\text{přidržovač}}$	[°]	Úhel zkosení přidržovače
$\alpha_{\text{tažnice}}$	[°]	Úhel zkosení tažnice
$\alpha_{\text{tažník}}$	[°]	Úhel zkosení tažníku
ε	[-]	Přetvoření
η	[Ns/m]	Dynamická viskozita
μ	[-]	Součinitel tření
μ_k	[-]	Součinitel kapalinového tření
ξ	[-]	Lodeho součinitel
σ_0	[MPa]	Napětí zahrnující vliv ohybu na hraně tažnice
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[MPa]	Hlavní napětí
σ_k	[MPa]	Mez kluzu ve smyku
σ_O	[MPa]	Napětí od ohybu
σ_{ps}	[MPa]	Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu
$\sigma_{\text{tř}}$	[MPa]	Napětí zahrnující vliv tření u přidržovače
$\sigma_{\text{tř}}$	[MPa]	Napětí vyvolané třením od přidržovače
σ_v	[MPa]	Výsledné tahové napětí
φ_1	[-]	Deformace v radiálním směru
φ_2	[-]	Deformace tloušťky stěny (normálová)
φ_3	[-]	Deformace v tangenciálním směru
τ_{krit}	[MPa]	Kritická hodnota smykového napětí
τ_{max}	[MPa]	Maximální hodnota smykového napětí

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Příklady součástí vyráběných tažením [10]	10
Obr. 2 Základní typy tažení [40]	11
Obr. 3 Závislost tažnosti na pevnost v tahu [25].....	11
Obr. 4 Proces tažení válcového výtazku s přídržovačem [29], [22]	12
Obr. 5 Závislost tažné síly na hloubce vniknutí tažníku [9], [24].....	14
Obr. 6 Schéma víceoperačního tažení [27]	16
Obr. 7 Diagram mezního stupně přetvoření [19]	17
Obr. 8 Nástroj pro 2. a předposlední tah (a) a poslední tah (b) [30]	18
Obr. 9 Schéma nástroje pro 1. Tah [30]	18
Obr. 10 Tažník pro malé (a) a větší (b) průměry [11].....	18
Obr. 11 Geometrické charakteristiky základních konstrukcí tažné hrany [30].....	19
Obr. 12 Graf pro určení poloměru tažné hrany [30]	20
Obr. 13 Základní typy brzdících lišt [39]	21
Obr. 14 Motorový olej [19].....	22
Obr. 15 Suché tření (tření pevných těles) [14]	23
Obr. 16 Mezní tření [48].....	23
Obr. 17 Kapalinové tření [14]	23
Obr. 18 Mazání hydrostatické (a) a hydrodynamické (b) [38].....	24
Obr. 19 Smíšené tření [14]	24
Obr. 20 Časový průběh opotřebení [14].....	26
Obr. 21 Adhezní porušení dle Kregelského [18].....	27
Obr. 22 Zadřený píst motoru [28]	27
Obr. 23 Tvorba rýh a třísek abrazí [18].....	28
Obr. 24 Kalibrační diagram pro poměr vzoru $D_0:d_0:h_0 = 6:3:2$ [49]	29
Obr. 25 Schéma zkoušky plošným tlakem [49]	30
Obr. 26 Twist compression test [49]	31
Obr. 27 Příklady dalších typů zkoušek maziv [22], [45]	31
Obr. 28 Vzhled plastického maziva [34].....	32
Obr. 29 Příklady uhlíkových vazeb v minerálních olejích [38]	33
Obr. 30 Struktura perfluoropolyéru [29]	34
Obr. 31 Vybrané možnosti modelování tření pro hluboké tažení [2].....	36
Obr. 32 Modelování tření na tažné hraně [2]	37
Obr. 33 Modelování tření v místě přídržovače a tažné hrany [2]	37
Obr. 34 Spodní čelist přípravku	38
Obr. 35 Horní čelist přípravku	39
Obr. 36 Skříň s přípravkem	39
Obr. 37 Upnutí sestaveného přípravku ve stroji.....	40
Obr. 38 Zkušební stroj ZD 40 [38].....	40
Obr. 39 Zkoušená maziva firmy AT OIL.....	42
Obr. 40 Momentový klíč MATADOR [1]	45
Obr. 41 Umístění pásků plechu do přípravku s nanesenou vrstvou maziva	46
Obr. 42 Stírání maziva hranou přípravku	46
Obr. 43 Referenční výsledek maziva Prolong 50-12	47
Obr. 44 Maziva nevhodná pro tažení oceli 1.4404	48
Obr. 45 Maziva s přijatelnými výsledky zkoušky	48
Obr. 46 Záznam zkoušky maziva Prolong 50-12 při vyšším zatížení.....	50
Obr. 47 Detail maziva Prolong 50-12	50
Obr. 48 Výsledky ekologických maziv	51
Obr. 49 Výsledky maziv řady AT Kalorex	51

Obr. 50 Výsledky maziv řady Martol.....	52
Obr. 51 Poškození od přidržovače	53
Obr. 52 Poškození tažnou hranou	53
Obr. 53 Výsledek zkoušky ohybu po tažné hraně	54
Obr. 54 Záznam všech zkoušek pro vyšší sílu přidržovače	55
Obr. 55 Poloměry předehnutého a taženého plechu.....	56
Obr. 56 Poškození způsobené vybočením.....	56
Obr. 57 Model upraveného přípravku	57
Obr. 58 Detail zkosení hrany.....	57

Tabulka 1 Hodnoty součinitele C [27]	15
Tabulka 2 Hodnoty součinitelů tažení [17]	17
Tabulka 3 Minimální rádius hrany tažníku [27].....	19
Tabulka 4 Materiály tažného nástroje [27]	21
Tabulka 5 Základní vlastnosti maziv	41
Tabulka 6 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 1.4404	44
Tabulka 7 Výsledky zkoušených maziv	49
Tabulka 8 Výsledky zkoušek pro vyšší přidržovací síly.....	54

Seznam příloh

Příloha 1 – Materiálový list oceli 1.4404

Seznam výkresů

Výkres dolní čelisti DP-133705-15/01

Výkres horní čelisti DP-133705-15/02

ČSN 41 7349		Austenitická korozivzdorná Cr-Ni-Mo ocel					OCEL 17 349	
Chemické složení [hm. %]								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	
max 0,03	max 2,00	max 1,00	16,5-18,5	11,0-14,0	2,0-2,5	max 0,045	max 0,030	
Polotovary								
[1] tyče tvářené za tepla				[4] trubky bezešvé tvářené za studena				
[2] plechy válcované za tepla				[5] tlusté plechy válcované za tepla				
[3] trubky bezešvé tvářené za tepla								
Mechanické vlastnosti								
Polotovary		[1]			[2]			
Rozměr t, d [mm]		≤60	60–100	100–250	≤10	10–30		
Stav		.4			.4			
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min		176			196			
Mez kluzu R_p 1,0 [MPa] min		215			235			
Mez pevnosti R_m [MPa]		441–686			441–686			
Tažnost A_5 [%] min		45	40	35	34	30		
Vrbová houževnatost	podél	176	137	98	–	137		
KCU 3 [J . cm ⁻²] min	napříč	–	98	68	–	98		
Tvrdość HB		–			–			
Modul pružnosti E [GPa]		200						
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]		–						
Polotovary		[3]		[4]		[5]		
Rozměr t, d [mm]		≤89		≤80		30–80		
Stav		.4		.4		.4		
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min		176		176		195		
Mez kluzu R_p 1,0 [MPa] min		215		215		235		
Mez pevnosti R_m [MPa]		441–735		441–735		440–690		
Mez pevnosti R_m [MPa]		441–735		441–735		440–690		
Tažnost A_5 [%] min		40		40		napříč 34		
Vrbová houževnatost	podél	–		–		125		
KCU 3 [J . cm ⁻²] min	napříč	–		–		80		
Vrbová houževnatost	podél	–		–		70		
KCV ⁻¹⁹⁶ [MPa] min	napříč	–		–		40		
Modul pružnosti E [GPa]		200						
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]		–						
Teplota [°C]		100	200	400	600	800		
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot		195	185	170	155	135		

Ostatní vlastnosti					
Druh oceli podle způsobu výroby		Barevné značení podle ČSN 42 0010		Třída odpadu podle ČSN 42 0030	
elektroocel		červená – světlemodrá – černá		057	
Porovnání se zahraničními materiály					
<i>ISO</i>		<i>EURO</i>		<i>Německo</i>	
Type 19	ISO 683/13-74	X2CrNiMo 17-12-2	EN 10088/1-3-93	X2CrNiMo 17 13 2	DIN 17440-85
Type 19	ISO 683/13-86	X2CrNiMo 17 13 2	EN 88/1-3-86	X2CrNiMo 17 13 2	DIN 17441-85
		X3CrNiMo 17 12 2KD	EN 119-74	X2CrNiMo 17 13 2	DIN 17455-85
				X2CrNiMo 17 12 2	DIN 17457-85
				X2CrNiMo 17 12 2	DIN 17458-85
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Rusko</i>	
Z3CND 18-12-02	NF A35-574-90	316S11	BS 3605/1-91	03Ch17N14M2	
Z3CND 17-12-02FF	NF A36-607-84	316S11	BS 3606-92		
Z2CND 17-12	NF A36-582-79	316S11	BS 970/1-91		
X2CrNiMo 17-12-2	NF EN 10088/1-3-93	316S11	BS 1501/3-90		
		X2CrNiMo 17-12-2	BS EN 10088/1-3-93		
<i>USA</i>		<i>Japonsko</i>		<i>Kanada</i>	
316 L	ASTM A276 -80a	SUS 316	JIS G4303-81		
F 316 L	ASTM A182	SUS 316 L	JIS G4303-91		
F 316 L	ASTM A336	SUS 316 L	JIS G4309-88	-	-
TP 316 L	ASTM A213	SUS 316 L	JIS G3468-88		
TP 316 L	ASTM A312	SUS 316 L	JIS G4308-91		
<i>Itálie</i>		<i>Rakousko</i>		<i>Švédsko</i>	
X2CrNiMo 17 12	UNI 6901-71	X2CrNiMo17 13 2 KKW	ÖNORM M3121-91	2348	SS 142348
X2CrNiMo 17 12	UNI 6904-71				
X2CrNiMo 17 12	UNI 7500-75				
X2CrNiMo 17 12	UNI 8317-81				
X2CrNiMo 17 12 2	UNI EN 10088/1-3-93				
<i>Polsko</i>		<i>Maďarsko</i>		<i>Norsko</i>	
00H17N14M2	PN H-86020-71	-	-	14455	NS 14455
<i>Finsko</i>		<i>Švýcarsko</i>		<i>Španělsko</i>	
X2CrNiMo 17 12 2	SFS 750	-	-	X2CrNiMo 17 13 2	UNE 36016/1-90
				X2CrNiMo 17 13 2	UNE 36016/2-89
<i>Austrálie</i>		<i>Bulharsko</i>		<i>Brazílie</i>	
316 L	AS 1449-94	000Ch17N14M2	BDS 6738-72	V-316 L	Br.800
316 L	AS 2837-86				
<i>Čína</i>		-		-	
00Cr17Ni14Mo2	GB 2270-80				
00Cr17Ni14Mo2	GB 1220-92				
00Cr17Ni14Mo2	GB 4239-91	-		-	
00Cr17Ni14Mo2	GB 4356-84				
00Cr17Ni14Mo2	GB 12770-91				

Teplota [°C]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Nejnižší mez kluzu R_p 0,2 [MPa] za zvýšených teplot	166	161	156	147	137	127	122	117	112	107	102	98
Nejnižší mez kluzu R_p 1,0 [MPa] za zvýšených teplot	201	191	186	176	166	156	152	147	142	137	132	127

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg . m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]	Rezistivita ρ [Ω . m]
7 900	440	16,5 . 10 ⁻⁶	14,7	750 . 10 ⁻⁹

Odolnost proti degradačním procesům

ODOLNOST PROTI PLOŠNÉ KOROZI

odolává po rozpouštěcím žhání řadě agresivních činidel, zejména kyselině sírové a fosforečné a je zcela srovnatelná s ocelí 17 346, je však méně náchylná k nožové korozi

ODOLNOST PROTI MEZIKRYSTALOVÉ KOROZI

zaručená podle ČSN 03 8169; při delším setrvání v oblasti kritických teplot nelze v silně agresivních prostředích mezikystalové napadení vyloučit nad teplotou 450 °C

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

rozpouštěcí žhání 1 020–1 080 °C ochlazovat podle tloušťky buď na vzduchu nebo ve vodě
žhání ke snížení pnutí 850– 950 °C 10 – 15 min. na teplotě, ochlazovat na vzduchu

TVAŘITELNOST

teploty tváření 1 150 – 850 °C ochlazovat na vzduchu

SVAŘITELNOST

podle ČSN 05 1310 – zaručená

OBROBITELNOST

polotovary [1] [2] [5] stav .4 soustružení, hoblování frézování, vrtání

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

zkouška rozšiřováním podle ČSN 42 0415.5 ($\beta = 30^\circ$)

$\frac{d/D}{D_u - D} \cdot 100$	0,9	0,8	0,7	0,6
	34	36	40	45

zkouška smáčknutím podle ČSN 42 0415.4

trubky při úplném smáčknutí nevykazují poškození

Použití

Pro stavbu zařízení tlakových nádob a aparátů v chemickém, farmaceutickém, textilním a potravinářském průmyslu, kde se vyžaduje zvýšená odolnost proti neoxidujícím kyselinám nebo zvýšená čistota produktu, zejména na svařované díly, které mají odolávat mezikystalové korozi a nelze je po svaření žíhat. Vhodné na součásti leštěné na vysoký lesk.