



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MAZIVA VHODNÁ PRO TAŽENÍ OCELI

SUITABLE LUBRICANTS FOR DEEP DRAWING OF STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Hřebíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Pavel Hřebíček
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.
Akademický rok:	2018/19

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 oceli

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:

- Analyzovat faktory spojené se snižováním tření při tažení korozivzdorných ocelí.
- Popsat metody používané při hodnocení maziv.
- Navrhnout metodu vhodnou pro testování maziv při tažení plechu při provozní teplotě.
- Experimentálně ověřit vliv teploty na funkci maziv užívaných pro tažení korozivzdorných ocelí.

Seznam doporučené literatury:

MARCINIAK, Z., J. L. DUNCAN and S. J. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 211 s. 2002. ISBN 07-506-5300-00.

HOSFORD, W. F. a R. M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 4th ed. New York: Cambridge University Press. 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.

FOREJT, M. a M. PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 217 s. 2006. ISBN 80-214-2374-9.

WILLIAMS, J. Engineering Tribology. Cambridge University Press. 508 s. 2005. ISBN 05-216-0988-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce je experimentální vyhodnocení vhodnosti maziv pro tažení korozivzdorné oceli 1.4301, a to za zvýšené teploty, která odpovídá teplotě v reálném procesu. Metoda testování maziv je založena na modelování tření mezi tažnou hranou a přídržovačem, které odpovídá reálnému procesu. Konstrukce zkušebního přípravku proto také odpovídala tomuto modelu. Výsledkem práce je porovnání vhodnosti jednotlivých maziv s referenčním mazivem, používaným ve společnosti ACO Industries. Nejlepší výsledky byly naměřeny u maziva AT Kalorex 650 S, které obsahuje ekologicky závadné přísady.

Klíčová slova

Hluboké tažení, tření, tribologie, korozivzdorná ocel 1.4301, testování maziv, vliv teploty

ABSTRACT

The aim of this work is experimental evaluation of suitability of lubricants for drawing of stainless steel 1.4301 at elevated temperature, which corresponds to temperature in real process. The lubricant testing method is based on friction modeling between the pull edge and the retainer, which corresponds to the real process. Therefore, the design of the test fixture also conformed to this model. The result of the work is a comparison of the suitability of every single lubricants with the reference lubricant used in ACO Industries. The best results were obtained with AT Kalorex 650 S lubricant, which contains environmentally harmful additives.

Key words

Deep drawing, friction, tribology, stainless steel 1.4301, lubricants testing, temperature effect

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HŘEBÍČEK, Pavel. *Maziva vhodná pro tažení oceli*. Brno, 2019. 62 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116394>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Maziva vhodná pro tažení oceli** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Pavel Hřebíček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Zdeňkovi Lidmilovi, CSs. za vedení práce, cenné rady a připomínky týkající se zpracování této práce. Děkuji také Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. a Vojtěchovi Řiháčkovi za pomoc při experimentálních zkouškách. Dále děkuji týmu rozvojové technologie společnosti ACO Industries za praktické rady a připomínky. Děkuji i svým rodičům za velkou podporu a trpělivost při mém studiu na vysoké škole.

OBSAH

ABSTRAKT

PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD	9
1. ROZBOR STÁVAJÍCÍHO STAVU	10
2. HLUBOKÉ TAŽENÍ	11
2.1. Proces hlubokého tažení bez ztenčení stěny	12
2.2. Proces hlubokého tažení se ztenčením stěny	12
2.3. Napěťový rozbor tažení	13
2.4. Parametry tažení	15
2.4.1. Tažná síla.....	15
2.4.2. Síla přidržovače.....	16
2.4.3. Počet operací	17
2.4.4. Velikost přístřihu.....	17
2.5. Tažné nástroje pro rotační součásti	18
2.5.1. Geometrie funkčních částí nástroje.....	19
2.5.2. Použití přidržovače.....	20
2.6. Tažné nástroje pro nerotační součásti.....	21
2.6.1. Určení výchozího polotovaru	21
2.6.2. Tažení velkých nepravidelných výtažků	22
2.7. Nekonenční nástroje	23
2.7.1. Metoda Guerin.....	23
2.7.2. Metoda Marform	23
2.7.3. Metoda Hydroform.....	24
2.7.4. Metoda Wheelon	25
2.7.5. Hydromechanické tažení	25
3. TRIBOLOGIE.....	26
3.1. Tření.....	26
3.1.1. Suché tření.....	26
3.1.2. Kapalinné tření	26
3.1.3. Mezní tření.....	27

3.2	Opotřebení	27
3.2.1	Adhezivní opotřebení	28
3.2.2	Abrazivní opotřebení	29
3.3	Mazání	30
4	MAZIVA.....	31
4.1	Ropné oleje	31
4.1.1	Výroba ropných olejů.....	31
4.1.2	Rozdělení minerálních olejů.....	32
4.2	Syntetické oleje.....	32
4.2.1	Rozdělení syntetických olejů	33
4.3	Aditiva	33
4.3.1	Detergenty	33
4.3.2	Disperzanty.....	33
4.3.3	Aditiva zlepšující viskozitu	33
4.3.4	Aditiva snižující pěnovost.....	34
4.4	Maziva pro tažení plechů.....	34
4.5	Bezpečnostní a zdravotní opatření.....	34
4.6	Ekologická nezávadnost	34
5	ZKOUŠENÍ MAZIV	36
5.1	Modelování tření mezi tažnicí a přídržovačem	36
5.2	Modelování tření na tažné hraně	37
5.3	Modelování tření při redukci tloušťky stěny	37
5.4	Modelování tření mezi přídržovačem a tažnou hranou	37
6	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ MAZIV	39
6.1	Zkušební přípravek	39
6.1.1	Dolní čelist	39
6.1.2	Horní čelist	40
6.1.3	Horní deska	41
6.2	Zkušební stroj	42
6.3	Plechý používané pro experiment.....	43
6.3.1	AISI 304 (1.4301)	44
6.3.2	AISI 316L (1.4404)	44
6.4	Zkoušená maziva	45
6.4.1	Prolong 50-12.....	45

6.4.2	Prolong O 3500	45
6.4.3	AT Kalorex 650 S	45
6.4.4	AT Kalorex 1000 EP	46
6.4.5	AT Editol D 140 EPS	46
6.4.6	AT Editol D 040 EPS	46
6.4.7	AT Editol D 050 EPS	46
6.4.8	Martol EP 405 CF	46
6.4.9	Martol Soluble 130.....	46
6.4.10	Atlas 3374-140	47
6.4.11	Wisura ZW 3356	47
6.5	Provedení experimentu	47
6.5.1	Přidržovací síla	48
6.5.2	Testování maziv	48
6.6	Zhodnocení výsledků.....	51
7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	54
7.1	Prolong 50-12	54
7.2	AT Kalorex 650 S.....	54
7.3	Atlas 3374-140	55
7.4	Zhodnocení maziv	56
8	ZÁVĚR	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	61

ÚVOD

Snahou všech strojírenských podniků je dosažení zisku. Aby byl podnik schopný tohoto zisku dosáhnout, musí mimo jiné neustále snižovat náklady na výrobu. Do těchto nákladů se dají započítat také náklady na energie, které jsou nutné pro výrobu součástí.

Tření je proces, který je typický jak pro přenášení sil a pohybu (např. třecí spojky, lanové převody) tak i pro zamezení pohybu (brzdy). Vyvolává takové průvodní jevy, které mohou být zejména v technologických procesech nežádoucí, jako jsou ztráty na energii či ztráty na materiálu opotřebením. Všude, kde se tření nepoužívá pro přenos sil, je bráno jako nežádoucí a je nutné ho eliminovat. Toto lze dosáhnout vhodnou volbou maziv, která mají různé provozní vlastnosti, jako jsou tekutost, chemická stálost, chování ke konstrukčním materiálům (koroze, bobtnání gumy a plastických hmot, ochrana proti vodě), chování při mezním tření a zvláštní úlohy (chladicí schopnost, bezpečnost proti pění a tvorbě emulze). Úkolem technologie je zvolit takové mazivo, které bude nejvhodnější pro výrobu dané součásti, bude chemicky stálé a bude splňovat své mazací schopnosti i za zvýšených provozních teplot. Zároveň se v dnešní době čím dál více dbá na ekologii, tudíž je nutné, aby bylo i ekologicky nezávadné [2, 9].

1. ROZBOR STÁVAJÍCÍHO STAVU

Společnost ACO Industries v Příbyslavi se především zabývá výrobou profesionálních odvodňovacích systémů pro odvodnění průmyslových budov a venkovních zpevněných ploch. Souhrnný postup výroby takovýchto součástí probíhá tak, že se nejprve na laseru vypálí z tabule plechu polotovary ve tvaru rozvinu, či rondele. Poté probíhá zpracování tohoto polotovaru na ohraňovacích lisech či tažných lisech. Před samotným tažením je nutné na polotovary nanést speciální hlubokotažný olej. Po získání finálního tvaru jednotlivých součástí dochází ke kompletaci celkových sestav svařováním.

V procesu tažení hrají důležitou roli maziva pro tažné operace, díky kterým dochází ke snižování tažné síly, tudíž celková náročnost procesu na pohonné energie není tak vysoká. Na tyto tvářecí oleje jsou kladeny vysoké nároky. Nejdůležitějším požadavkem je mazací schopnost, s čímž je spojena schopnost maziva vytvářet souvislou mazací vrstvu, která je schopna unést zatížení vyvolané tvářecím procesem. Dále je to schopnost odvádět teplo a možnost snadného odstranění ze součástí. V současné době je kladen velký důraz také na ekologii a bezpečnost provozu [15].

Při procesu optimalizace výroby ve společnosti ACO Industries dochází mimo jiné i k slučování tažných operací, tudíž byly vytvořeny nástroje, které na jeden pracovní zdvih vykonají dvě tažné operace, tzv. tvoutažné nástroje. Při této operaci dochází k takovému přetvoření materiálu, že se samotná součást vlivem vnitřních odporů zahřeje. Experimentálně bylo zjištěno, že tyto teploty v některých případech dosahují teplot až 150 °C, což může mít za následek znehodnocení používaného maziva. V těchto operacích je proto zapotřebí použít takového maziva, které má vyšší body vzplanutí. Schopnost maziv odolávat vyšším teplotám je určena jejich aditivou. Ve většině případů jsou tato aditiva na bázi chloru, což je však v rozporu s ekologií a bezpečností provozu. Tato maziva se pak musí ekologicky likvidovat, což ve společnosti ACO Industries zajišťuje speciální externí firma.

Společnost ACO Industries používá pro hlubokotažné operace v současné době olej s označením Prolong 50-12. Dle bezpečnostního listu se jedná o nebezpečnou vysoce hořlavou látku. Je nebezpečný pro lidský organismus a životní prostředí. Obsah chloru je menší než 55 % z celkového objemu oleje a bod vzplanutí je 180 °C. Cílem této práce je navrhnout takové mazivo, které bude ekologicky nezávadné a zároveň bude splňovat podmínky pro bezproblémový průběh procesu [41].

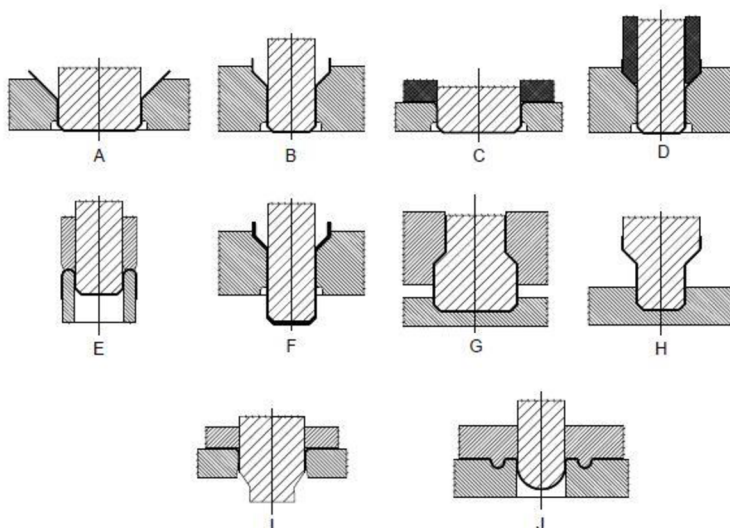
2. HLUBOKÉ TAŽENÍ

Tažení plechu je technologický proces tváření, při kterém se mění rovinný polotovar – přístřih na součást dutého prostorového tvaru, jako jsou jednoduché součásti rotačního tvaru, hranaté výtažky, či složité, nesymetrické součásti v jedné nebo více tažných operacích. Tímto technologickým způsobem lze vyrábět mělké i hluboké nádoby, kryty, víka, součásti karoserií aj.

Při hlubokém tažení vyrábíme součást na jednu či více tažných operací, kde je počet tahů ovlivněn mnoha faktory, jako jsou náročnost tvaru výtažku, materiál výtažku a volba maziva. Do hlubokého tažení patří technologie prostého tažení, tažení se ztenčením stěny, zpětné tažení, rozšiřování či zužování, lemování, vypínání, protahování nebo žlábkování (obr. 2.1).

Pro technologie tažení se nejčastěji používají mechanické lisy jedno i vícečinné, postupové lisy, lisy hydraulické a speciální zařízení.

Hlavní podstatou tažení je tedy prostorový ohyb do nerovinných tvarů, a to bez výrazného ztenčení stěny, nebo se ztenčením stěny v jedné nebo více tažných operacích.



Obr. 2.1: Schémata tažení. A, B – tažení bez přídržovače, C, D – tažení s přídržovačem, E – zpětné tažení, F – tažení se ztenčením stěny, G – zužování, H – rozšiřování, I – lemování, J – vypínání [4].

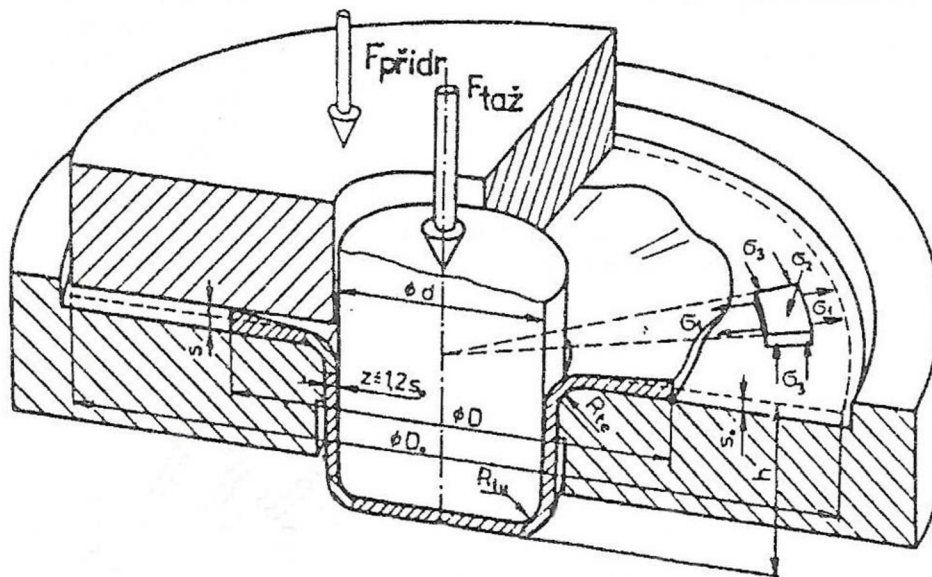
Při technologii tažení se daný materiál zpracovává v nástroji zvaném tažidlo, jehož hlavními částmi jsou tažník a tažnice. Dle konkrétní operace a tvaru součásti je pohyblivý buď tažník, nebo tažnice.

Nejjednodušším způsobem tažení je tažení jednoduchého válcového tvaru se dnem. Obdobným způsobem se pak tato teorie aplikuje na složitější tvary. Při pohybu tažníku do tažnice se posouvá plech přes tažnou hranu tažnice, kde také dochází k největšímu opotřebení. Při procesu tažení je proto nutné brát v úvahu také tření a zpevnění materiálu [2, 3, 4].

2.1. Proces hlubokého tažení bez ztenčení stěny

Při procesu hlubokého tažení bez ztenčení stěny, obr. 1.2, je polotovár postupně vtahován tažníkem do tažnice, přičemž je mezi tažníkem a tažnicí zajištěna dostatečná vůle. Na obr. 2.2 je vyznačen i stav napjatosti v tvářeném materiálu. Ve vtahující se přírubě působí tangenciální tlakové napětí σ_3 a radiální tahové napětí σ_1 . V oblasti příruby tak dochází k pěchování materiálů v tečném (tangenciálním) směru a zároveň k výraznému prodloužení v tahovém směru. V důsledku pěchování se proto zvětšuje tloušťka konce příruby, a to zhruba o 20 až 30 % v závislosti na stupni tažení. V místě ohybu u dna výtažku pak dochází ke ztenčení tloušťky stěny. Při tažení tenkých plechů způsobuje tangenciální tlakové napětí ztrátu stability a zvlnění vtahující se příruby. Pokud hrozí tato ztráta stability plechu, je třeba při tažení použít přídržovač. Při použití přídržovače pak na poloměru tažnice vzniká malá tlaková napjatost tečným směrem a velká tahová napjatost radiálním směrem. Ve válcové části výtažku vzniká pouze jednoosá tahová napjatost, a proto se zde prostorový stav napjatosti mění na rovinný.

Při tažení bez ztenčení stěny se velikost přístřihu stanoví buď pomocí diagramů, nebo z empirických vztahů, kde se předpokládá, že objem tvářeného materiálu se při procesu nemění a zůstává i stejná tloušťka stěny. Tento výpočet pak vychází z rovnosti ploch. Zda bude proces tažení s přídržovačem nebo bez něj, lze zjistit ze vztahů ověřených praxí, které uvádí např. pan Freidling nebo Šofman. U obou případů je způsob tažení závislý na tloušťce plechu a průměru polotovaru [2, 3].



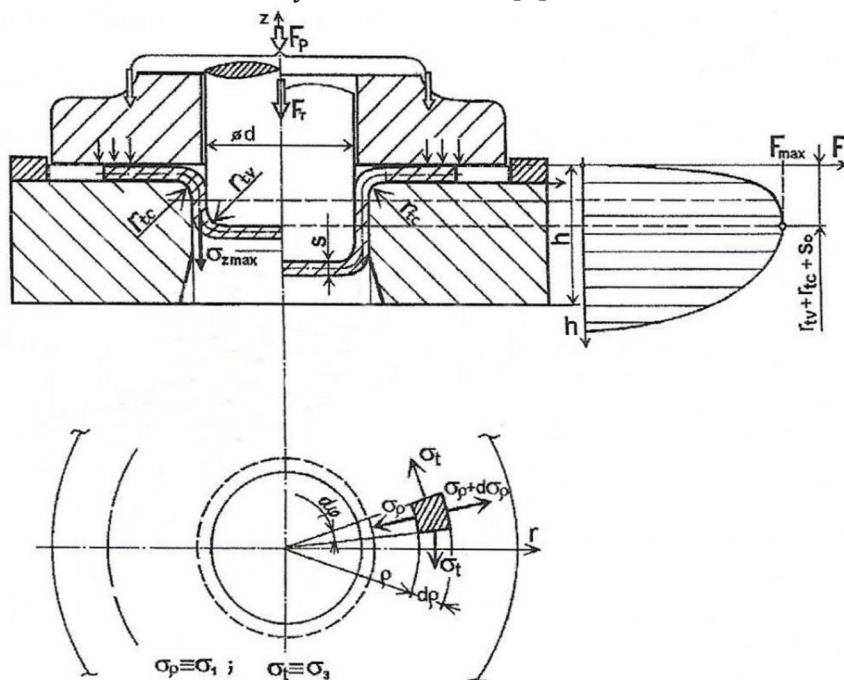
Obr. 2.2: Schéma tažení válcového výtažku. [2].

2.2 Proces hlubokého tažení se ztenčením stěny

Při tažení se ztenčením stěny se mezi tažníkem a tažnicí redukuje tloušťka stěny součásti, tudíž platí, že $z < s_0$, kde z je tažná vůle, přičemž tloušťka stěny dna zůstává zachována. Operaci tažení se ztenčením stěny obvykle předchází tažení bez ztenčení stěny, kdy se z polotovaru nejdříve vytáhne tzv. „kalíšek“. Platí, že čím více je tažných operací, tím více se zmenšuje tloušťka stěny součásti.

Mezi výhody tažení se ztenčením stěny patří dosažení vyšších stupňů poměrné deformace než u tažení bez ztenčení stěny, z čehož vyplývá i snížení počtu tažných operací. Mezi hlavní

nevýhodu patří intenzivní zpevňování materiálu, takže je nutné zpravidla po každé tažné operaci zařadit tepelné zpracování. Okraje výtažku se pak po dvou až třech tazích zarovnávají, aby bylo zaručeno snadné stírání výtažku z tažníku [2].



Obr. 2.3: Schéma první operace tažení s přírubou. [1].

2.3 Napět'ový rozbor tažení

Obr. 1.3 znázorňuje ve své horní části schéma první operace tažení. Ve spodní části obrázku je pak znázorněn vytknutý element v oblasti příruby s napět'ovým rozбором. Tento element je definován šířkou dp a vymežujícím úhlem $d\varphi$. Na tento element pak působí v tečném směru napětí σ_t a v radiálním směru napětí σ_ρ . Velikost celkového deformačního napětí je závislá na radiálním napětí σ_ρ (někdy značeno také jako σ_1), které se mění v závislosti na poloměru dílce ρ . Dále je toto deformační napětí závislé na odporu tření σ_f , které vzniká mezi materiálem a přidržovačem. Vyjadřuje odpor, který materiál potřebuje překonat při pohybu na hraně tažnice. A nakonec je také závislé na součiniteli $e^{f\alpha}$, který symbolizuje vliv tření po tažné hraně při úhlu opásání α , s napětím při ohybu σ_o . Složíme-li všechny tyto závislosti do jedné rovnice, získáme pak výsledný vztah pro deformační napětí při tažení:

$$\sigma_d = \frac{F_T}{S_T} = (\sigma_\rho + \sigma_f + 2\sigma_o) * e^{f\alpha} \quad (2.1)$$

V rovnici je ohybové napětí násobeno dvěma, protože materiál je namáhán dvojitým ohybem, a to při prvotním ohybu přes hranu tažnice, a pak postupným rovnáním. Tuto rovnici někteří autoři (např. Šofman) také uvádí s ohybovým napětím mimo závorku, nenásobené součinitelem $e^{f\alpha}$. Tato změna má však zanedbatelný vliv na velikost výsledného napětí. Pokud pak úhel opásání $\alpha = 90^\circ$ ($\alpha = \frac{\pi}{2}$), můžeme součinitel upravit na vztah:

$$e^{f\alpha} = e^{f\frac{\pi}{2}} \approx \left(1 + f \cdot \frac{\pi}{2}\right) \approx (1 + 1,6 \cdot f) \quad (2.2)$$

Řešením rovnováhy sil na rovinném elementu v oblasti příruby (zobrazeném na obr. 2.3), po zjednodušení a zanedbání nekonečně malých veličin, dostáváme homogenní diferenciální rovnici rovnováhy:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_t}{\rho} = 0 \quad (2.3)$$

Prostou integrací za podmínek plasticity (rovnice 2.4)

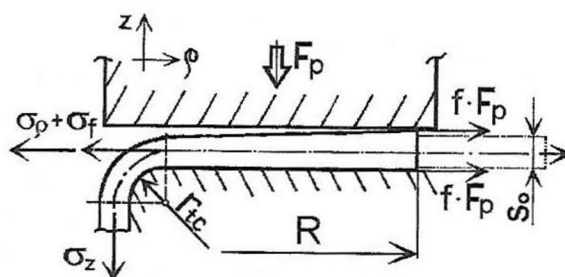
$$\sigma_\rho - \sigma_t = \beta \cdot \sigma_p \quad (2.4)$$

řešíme tuto rovnici (rovnice 2.3). Integrační konstanty zvolíme z okrajových podmínek na vnějším poloměru příruby, a to: $\sigma_\rho = 0$, $\rho = \frac{D}{2} = R$. Tímto řešením získáváme rovnici pro ideální napětí, bez vlivu přidržovače a pro střední přirozený přetvárný odpor σ_{ps} .

$$\sigma_\rho = \beta \cdot \sigma_{ps} \cdot \ln \frac{R}{\rho} \quad (2.5)$$

Podle obr. 2.4 zavádí Sachs tření od přidržovače až na vnější okraj příruby, kde je také největší tloušťka materiálu. Třecí síla je pak definována součinitelem tření a tlakem příruby.

$$F_f = f \cdot F_p \quad (2.6)$$



Obr. 2.4: vliv tření na napjatost výtazku. [1].

Je-li napětí rovnoměrně rozloženo po celé tloušťce příruby, lze pak rovnici 2.6 upravit takto:

$2 \cdot \pi \cdot R \cdot s_0 \cdot \sigma_f = 2 \cdot f \cdot F_p$. Odsud pak plyne rovnice pro napětí od tření:

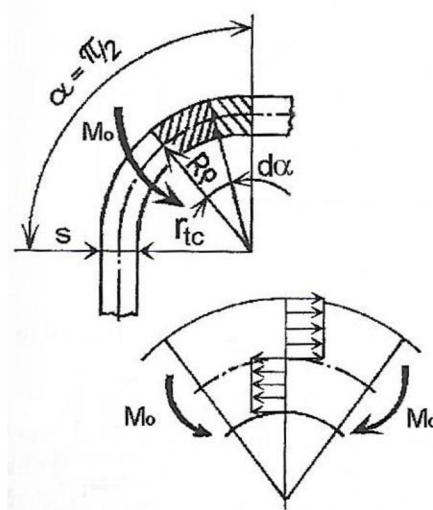
$$\sigma_f = \frac{f \cdot F_p}{\pi \cdot R \cdot s_0} \quad (2.7)$$

Při ohybu na tažné hraně je náhlá změna křivosti spojena s deformační prací. Z podmínky rovnováhy prací mezi prací momentu a prací vnější síly, což znázorňuje obr. 2.5, kdy jednotková šířka $b=1$, lze napsat rovnost:

$$\sigma_o \cdot s_o \cdot R_\rho \cdot d\alpha = M_o \cdot d\alpha$$

A po úpravě

$$\sigma_o = \frac{M_o}{s_o \cdot R_\rho} = \frac{\sigma_p \cdot s_o}{4 \cdot R_\rho} \quad (2.8)$$



Obr. 2.5: Vliv ohybu na tažné hraně [1].

Předpokládáme-li dvojitý ohyb a dosadíme-li rovnost:

$$R_\rho = r_{tc} + \frac{s_o}{2}$$

Získáváme vztah pro ohybové napětí na tažné hraně:

$$2\sigma_o = \sigma_p \cdot \frac{s_o}{2 \cdot r_{tc} + s_o} \quad (2.9)$$

Dosazením všech složek napětí σ_ρ , σ_f a $2\sigma_o$, včetně součinitele při úhlu opásání $\alpha = 90^\circ$, do hlavní rovnice 2.1, získáváme Sachsovo řešení deformačního napětí pro tažení [1, 3, 5].

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left[\beta \cdot \ln \frac{R}{\rho} + \frac{f \cdot F_p}{\pi \cdot \sigma_{ps} \cdot R \cdot s_o} + \frac{s_o}{2r_{tc} + s_o} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot f) \quad (2.10)$$

2.4 Parametry tažení

2.4.1 Tažná síla

Určení tažné síly je důležité především pro správnou volbu výrobního stroje. Musíme volit takový stroj (lis), který je schopný vyvodit potřebnou sílu, na druhou stranu však není vhodné stroj zbytečně předdimenzovat, protože by to bylo neekonomické. Tažnou sílu lze tedy vypočítat ze vztahu:

$$F_{taž} = \pi \cdot d \cdot s_o \cdot \sigma_d \quad (2.11)$$

Kde součin $(\pi \cdot d \cdot s_o)$ vyjadřuje průřez stěny výtazku pro kruhovou nádobu a σ_d odpovídá deformačnímu napětí vypočítanému z rovnice 2.10.

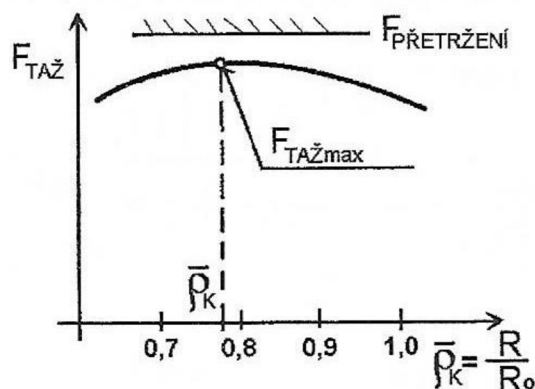
V praxi se též pro urychlené výpočtu používá zjednodušený vztah k určení maximální tažné síly – síly na utržení dna. Tento vztah lze jednoduše použít pro kontrolu jmenovité síly lisu.

$$F_{taž} = C \cdot \pi \cdot d \cdot s_0 \cdot R_m \quad (2.12)$$

Kde C je součinitel zohledňující vliv součinitele tažení při poměrné tloušťce s_0/D_0 a R_m je mez pevnosti materiálu. Vybrané hodnoty součinitele C jsou zobrazeny v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Vybrané hodnoty součinitele C [2].

$m=d/D_0$	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80
C	1,00	0,86	0,72	0,60	0,40



Obr. 2.6: Průběh tažné síly [1].

Na obr. 2.6 lze vidět průběh tažné síly v závislosti na poměru R/R_0 , kde R je aktuální poloměr příruby při tažení a R_0 je poloměr přístřihu. Tento obrázek také zobrazuje maximální tažnou sílu $F_{TAŽmax}$, která musí být menší než síla potřebná k přetržení výtažku $F_{PŘETRŽENÍ}$. Jinak řečeno, dovolené napětí musí být menší než mez pevnosti materiálu [2, 3].

2.4.2 Síla přidržovače

Sílu přidržovače lze zjistit, známe-li hodnoty měrného tlaku přidržovače (například podle ČSN 22 73 01, $p_p = 2 \div 3 \text{ MPa}$)

$$F_p = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_0^2) \cdot p_p \quad (2.13)$$

Kde: D – maximální průměr styku přidržovače se součástí
 d_0 – minimální průměr styku přidržovače se součástí
 p_p – měrný přidržovací tlak

Tyto rozměry jsou patrné na obr. 1.3.

Celková tažná síla je pak rovna součtu tažné síly a síly od přidržovače [1, 2, 3].

2.4.3 Počet operací

Pro každý tah se určuje součinitel tažení m , který se vypočítá podílem aktuálního průměru ku průměru z předchozí operace (průměru přístříhu), tedy:

$$m = \frac{d}{D_0} \quad (2.14)$$

Pokud je hodnota součinitele tažení v první operaci nižší než doporučená hodnota (pro každou ocel jiná, např. pro ocel 11 311 je $m_{mez} = 0,48$), je nutné provést tažení na více operací. Víceoperační tažení pak provádíme tak, abychom vyrobili danou součást na co nejméně tahů. Průměr součásti zhotovených jednotlivými tahy se pak vypočítá následovně:

$$d_n = m_n \cdot d_{n-1} \quad (2.15)$$

Po úpravě a zlogaritmování rovnice 2.14 získáme vztah pro potřebný počet operací n . Střední hodnota součinitele tažení pro 2. a další operace se většinou uvažuje $m=0,75$.

$$n = 1 + \frac{\ln(d_n) - \ln(m_1 \cdot D_0)}{\ln(m')} \quad (2.16)$$

Celkový součinitel tažení se pak vypočítá jako součin jednotlivých součinitelů tažení z každé operace.

$$m_c = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n \quad (2.17)$$

Je třeba uvažovat fakt, že s rostoucím počtem tažných operací klesá tvařitelnost materiálu, a proto se pro navrácení tvařitelnosti využívá tepelného zpracování. Obecně platí, že po 2 až 3 tažných operacích následuje tepelné zpracování (žihání) [2, 4, 5, 6].

2.4.4 Velikost přístříhu

Velikost přístříhu plechu pro tažení lze určit buď z diagramů, nebo pomocí empirických vztahů. Jak už bylo řečeno v kapitole 2.1, vychází se z předpokladu stálosti objemu, tudíž z rovnosti ploch před tažením a po tažení. S ohledem na anizotropii plechu, která se projeví v cípatosti výtažku je třeba zvětšit velikost přístříhu o 3 % v první tažné operaci, a pro každou další operaci se přístříh zvětšuje o další 1 %.

Například pro válcový výtažek bez příruby se velikost přístříhu vypočítá z následujícího vztahu:

$$D_0 = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad (2.18)$$

Respektive pro tažení výtažku s přírubou:

$$D_0 = \sqrt{d_p^2 + 4 \cdot d \cdot h - 3,44 \cdot d \cdot r} \quad (2.19)$$

Kde: d vnitřní průměr výtažku

d_p průměr příruby výtažku po tažení

h minimální výška výtažku

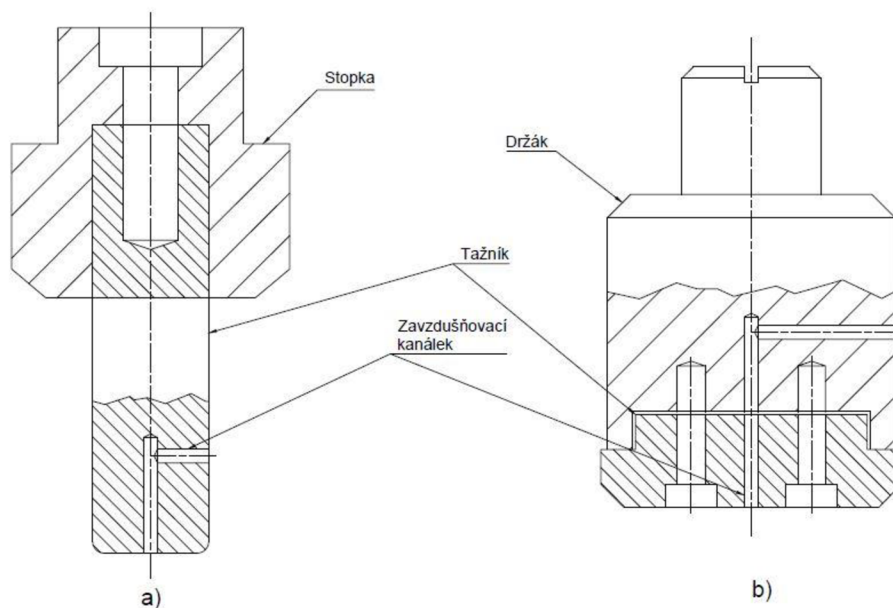
r poloměr zaoblení přechodu dna výtažku od stěny a stěny od příruby

U hranatých tvarů se velikost a tvar přístřihu určují různými grafickými metodami, či jejich kombinacemi. Stále platí, že plocha přístřihu je rovna ploše výtažku s přídavky na ostřížení, protože dochází k mírnému prodlužování bočnic [2, 4].

2.5 Tažné nástroje pro rotační součásti

Jak už bylo zmíněno v kapitole 1, hlavními částmi tažného nástroje jsou tažník a tažnice, případně i přidržovač. Použitím přidržovače zabráníme nežádoucímu zvlnění plechu. Nástroje rozdělujeme na nástroje pro první tah a nástroje pro další tahy. Tyto nástroje lze však i v některých případech sloučit, čím získáme vícetažné nástroje, kdy se na jeden zdvih nástroje vykoná více tahů, či poskládat za sebe, čímž získáme postupové nástroje. Zde je však zapotřebí dávat pozor na to, aby nebyla vyčerpána zásoba plasticity materiálu a tím pádem vzniku defektu [1, 8].

Tažník je aktivní částí nástroje. Jeho vnější průměr určuje vnitřní průměr výtažku. Pro malé průměry je tažník zhotoven z jednoho kusu, pro větší průměry bývá dělený, jak je znázorněno v obr. 2.7. Středem tažníku (v jeho ose) je pak veden kanálek, který slouží k zavzdušnění výtažku, tj. usnadňuje jeho stažení z tažníku. Do nástroje se tažník upíná za stopku. Držák tažníku se stopkou se vyrábí většinou z konstrukčních ocelí, vlastní tažník pak z nástrojových ocelí třídy 19, které jsou tepelně zpracovány na 60 až 62 HRC, rozměrné tažníky se vyrábějí z litiny [1, 2, 10].

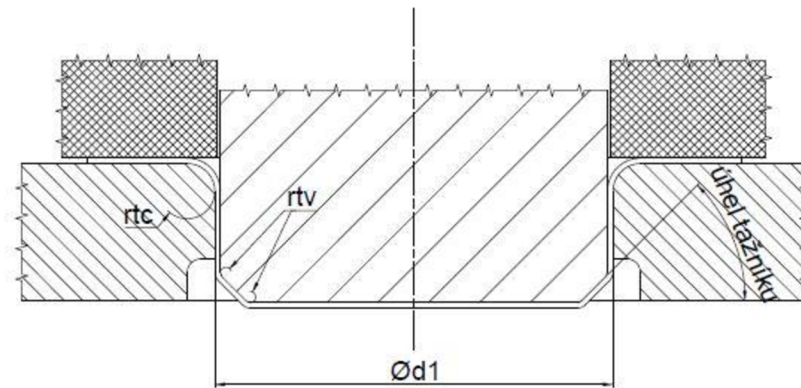


Obr 2.7: Tažník pro malé (a) a větší průměry (b) [1].

Tažnice má tvar a rozměry závislé na požadovaném výtažku, pořadí operace a způsobu vyjímání výtažku z nástroje. Poloměr zaoblení hrany tažnice má bezprostřední vliv na velikost tažné síly. Pro jednoduché válcové výtažky má tažnice tvar prstence. Pokud je výtažek vyjímán zespodu nástroje, má tažnice spodní hranu ostrou, která stírá hotovou součást z tažníku. Je-li však výtažek vyjímán nad tažnicí, bývá spodní část tažnice vyráběna s odlehčením (se zkosením) [1, 9, 10].

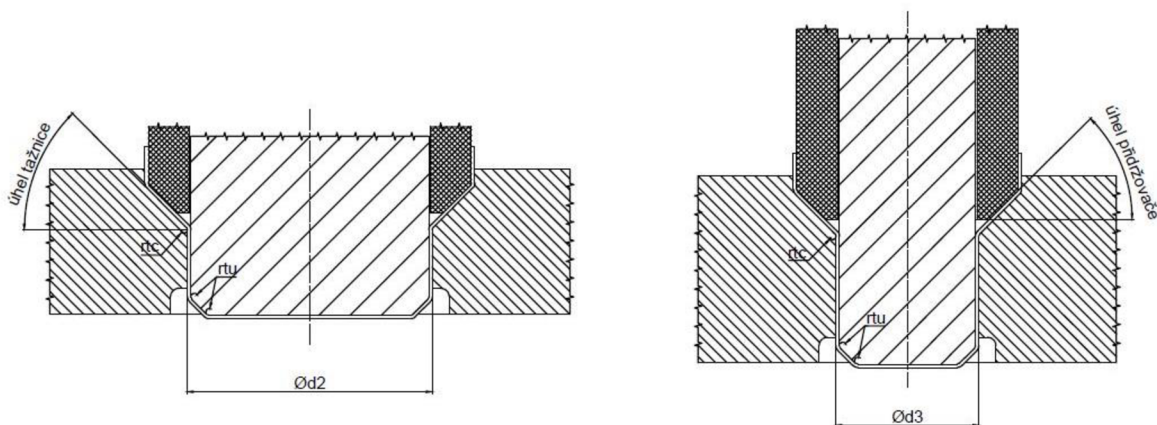
Pro 1. tah má nástroj tvar dle obr. 2.8. Probíhá-li tažení na více operací, je v 1. operaci hrana tažníku zkosená. Přidržovač má plochou dosedací plochu. Tažnice má pro jednoduché

válcové výtažky prstencový tvar a její tažná hrana výrazně ovlivňuje proces tažení, především tedy tažnou sílu a výskyt zvlnění. Větší poloměry tažné hrany tažnice snižují tažnou sílu, což umožňuje táhnout hlubší výtažky. Nevýhodou však je menší plocha styku polotovaru s přidržovačem [1, 9].



Obr 2.8: Nástroj pro 1. tah [10].

Pro další tahy se používají přidržovače se zkosenou hranou, dle obr. 2.9. Přidržovač se zároveň s tažníkem vsouvá do kalíšku, takže vnější průměr přidržovače se rovná vnitřnímu průměru výtažku. Velikost úhlu zkosení α se pohybuje v rozmezí 30 až 45°, čemuž odpovídá i úhel zkosení tažnice. Největší poloměr tažné hrany tažnice bývá u prvního tahu, v dalších operacích se poloměr zmenšuje. V poslední operaci má pak tažník stejný tvar jako samotný výtažek [10].



Obr 2.9: Nástroj pro 2. tah (a) a předposlední tah (b) [10].

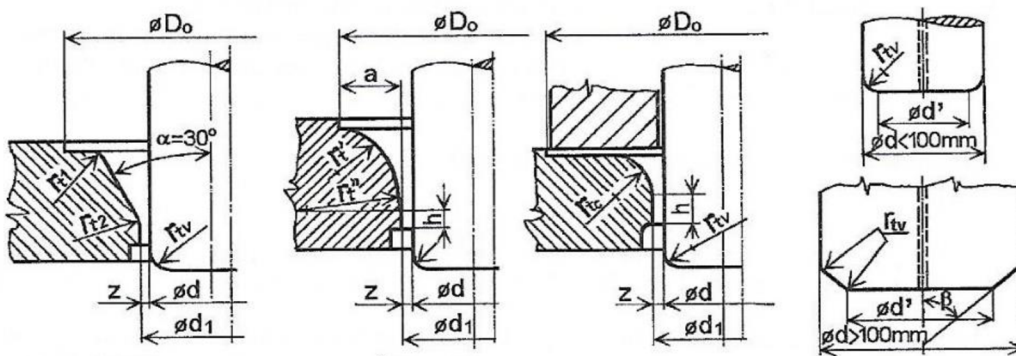
2.5.1 Geometrie funkčních částí nástroje

Na kvalitu tažení a celkový úspěch operace má největší vliv tvar a zaoblení tažné hrany tažníku a tažnice a velikost tažné mezery, proto je třeba vhodně tyto parametry zvolit.

Na rozměrovou přesnost a kvalitu výtažku má rozhodující vliv poloměr tažné hrany tažnice. Pro tažení v jedné operaci je doporučen poloměr tažné hrany tažnice v rozmezí $r_{tc} = (6 \div 10) \cdot s_0$. Pro 1. tah je výpočet poloměru tažné hrany tažnice dle ČSN 22 7301 následující:

$$r_{tc} = 0,8 \cdot \sqrt{s_0 \cdot (D_0 - d)} \quad (2.20)$$

Pokud se zvětší poloměr tažnice r_{tc} , dojde k usnadnění procesu tažení, tím pádem lze zvětšit jak hloubku, tak i stupeň tažení. Zároveň se tím však zmenšuje plocha pod přídržovačem, což může mít za následek porušení podmínky stability, tudíž i nebezpečí vzniku defektů (zvlnění).



Obr. 2.10: Základní geometrie tažné hrany tažnice a tažníku. První a druhá geometrie zleva se používá bez přídržovače. Geometrie vpravo popisují tvar tažníku pro různé průměry [1].

V prvním a předposledním tahu je poloměr zaoblení funkční hrany tažníku stejný jako poloměr zaoblení tažnice, tedy $r_{tv} = r_{tc}$. V mezitazích se tažníky obvykle upravují skosením pod úhlem 35° až 45° . Základní rozměry funkčních částí nástroje jsou patrné na obr. 2.10. Poloměr zaoblení funkční hrany tažníku v poslední operaci uvádí následující tabulka:

Tabulka 2.2: Minimální hodnoty r_{tv} [2].

Průměr výtažku [mm]	r_{tv} [mm]
10÷100	$(3 \div 4) \cdot s_0$
100÷200	$(4 \div 5) \cdot s_0$
200 a více	$(5 \div 7) \cdot s_0$

Při tažení bez ztenčení stěny se používá tažná mezera větší, než je tloušťka plechu. Dle ČSN 22 7301 je pro první operaci tažná mezera určena jako $z = (1,2 \div 1,3) \cdot s_0$, pro další operace je pak určena vztahem $z = (1,1 \div 1,2) \cdot s_0$. Pokud by byla tažná mezera příliš malá, došlo by k nárůstu tažné síly a mohlo by dojít k utržení dna výtažku. Na druhé straně v případě příliš velké tažné mezery by hrozilo zvlnění stěn výtažku [1, 2].

2.5.2 Použití přídržovače

Vyhodnocení použití přídržovače se provádí z empirických vztahů, jak už bylo zmíněno v kapitole 1.1. Například dle Freidlinga se určuje z poměrné tloušťky Δs , viz. Rovnice (2.21). Pokud je $\Delta s < 1,5$, je nutné přídržovač použít, naopak pokud $\Delta s > 2$, přídržovač se nepoužívá. Je-li Δs v rozmezí od 1,5 do 2, je nutné použití přídržovače ověřit.

$$\Delta s = \frac{s_0}{D_0} \cdot 100 \quad (2.21)$$

Dle Šofmana se použití přídržovače určuje z rovnice 2.22. Pokud je tato podmínka plněna, provádí se tažení bez přídržovače.

$$D_0 - d \leq 18 \cdot s_0 \quad (2.22)$$

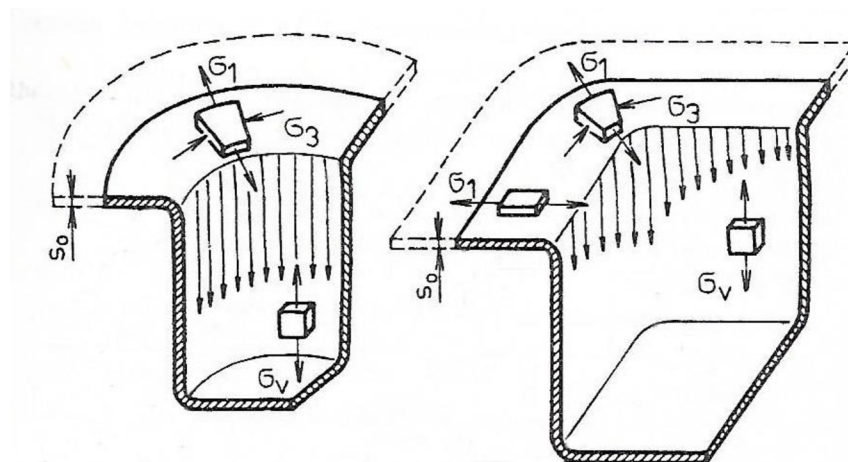
Norma ČSN 22 7301 pak uvádí součinitel u (rovnice 2.23), kde „ z “ je materiálová konstanta (pro hliník $z=2$, pro mosaz $z=1,95$, pro hlubokotažnou ocel $z=1,9$). Pokud pak $u \geq \frac{100 \cdot d}{D_0}$, je nutno použít přídržovač; v ostatních případech nutnost přídržovače pomíjí.

$$u = 50 \cdot \left(z - \frac{\sqrt{s_0}}{\sqrt[3]{D_0}} \right) \quad (2.23)$$

V praxi se přídržovací tlak určuje experimentálně v závislosti na tom, aby nevznikalo zvlnění příruby či aby nedocházelo k trhlinám. Například pro hlubokotažné oceli se měrný přídržovací tlak pohybuje v rozmezí od 2 do 3 MPa, u nerezových ocelí pak od 2 do 5 MPa [2, 3].

2.6 Tažné nástroje pro nerotační součásti

Hlavním rozdílem při tažení nerotačních (pravoúhlých) výtažků oproti válcovým, je rozdílný stav napjatosti v rovných částech výtažku a jeho rohovém zaoblení, jak ukazuje obr. 2.11. V obou případech je v přírubě plošný stav napjatosti. V případě válcového výtažku napětí nemění svou velikost ani směr a jejich rozložení je rovnoměrné, kdežto u pravoúhlého výtažku se v oblasti rohu mění směr i velikost napětí [2, 10].



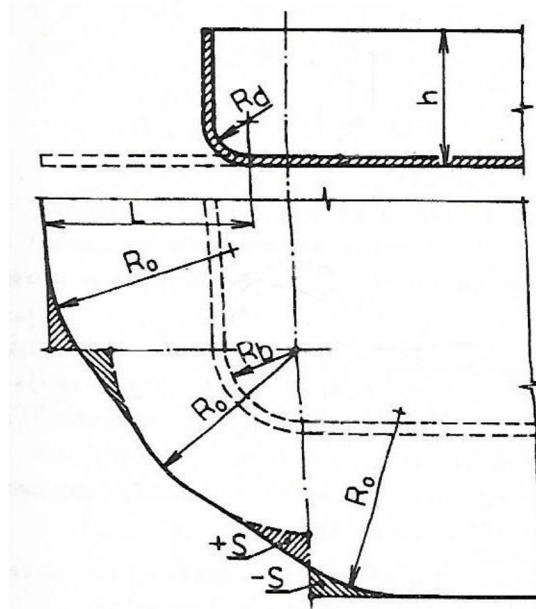
Obr 2.11: Rozložení napětí ve válcovém a pravoúhlém výtažku [10].

V oblasti pláště je v obou případech jednoosá – tahová napjatost. U rotačního výtažku je rozložená rovnoměrně. V případě rohového výtažku má maximální velikost v rohové části a směrem do středu boční stěny postupně klesá. Od středu k dalšímu rohu velikost napjatosti opět postupně roste. V rohu stěny pravoúhlého výtažku je však maximum napjatosti menší, než maximum napjatosti ve stěně válcového výtažku [10].

2.6.1 Určení výchozího polotovaru

Stanovení tvaru přístřihu pro pravoúhlý výtažek se v praxi provádí početně, nebo pomocí různých grafických metod. Jeden ze způsobů určení polotovaru pro jednoduchý, mělký

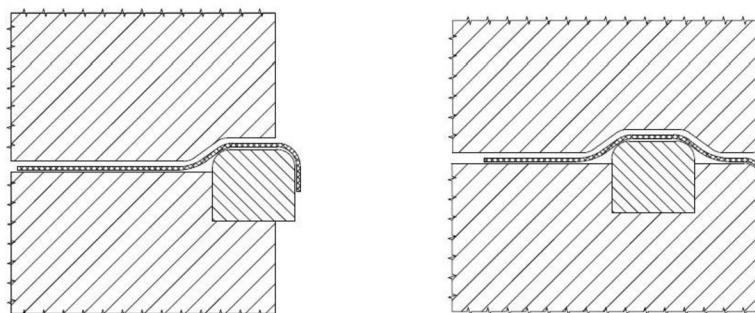
výtažek krabicovitého typu je uveden na obr. 2.12. U vysokých výtažků je přemístování materiálu z rohových oblastí do svislých stěn daleko intenzivnější. Pro čtvercové výtažky je pak výchozí polotovár určen kruhovým přístřihem a pro obdélníkové výtažky přístřihem eliptického tvaru. Je-li poměr výšky ku šířce výtažku $H/B = 0,6$ až $0,8$, pak se výtažek zhotovuje na více tažných operací a to tak, že se z kruhového přístřihu vytáhne válcová součást. V předposledním tahu se vytvoří válec s pravouhlejším dnem, ze kterého se pak v poslední operaci vytvoří pravouhlá součást [2, 10].



Obr 2.12: Výchozí přístřih pro pravouhlý výtažek [10].

2.6.2 Tažení velkých nepravidelných výtažků

Při výrobě velkých plechových výlisků, jako jsou například dílce karoserií v automobilovém průmyslu, dochází ke ztrátě stability těchto dílců a jejich zvlnění kvůli nerovnoměrným deformacím. Aby se zamezilo vzniku těchto defektů, provádí se na nástrojích různé konstrukční úpravy, které vedou k přibrzdění či urychlení toku materiálu. Mezi tyto úpravy patří celkové nebo místní zvětšení tlaku přidržovače, kdy při místním zvětšení tlaku je třeba mít dělený přidržovač, kdy jednotlivé segmenty vyvozují jiný tlak, dále zvětšením plochy taženého materiálu pod přidržovačem, či vestavěním brzdících či vtažovacích žebor, jak je znázorněno na obr. 2.13. Tato žebra jsou vložena do drážky v tažnici. V přidržovači je pak vyrobena drážka, která kopíruje tvar brzdícího žebra a plechu, který přechází přes toto žebro. Plech je zde brzděn ohybem přes žebro, což má příznivý vliv na tok materiálu [2, 4].



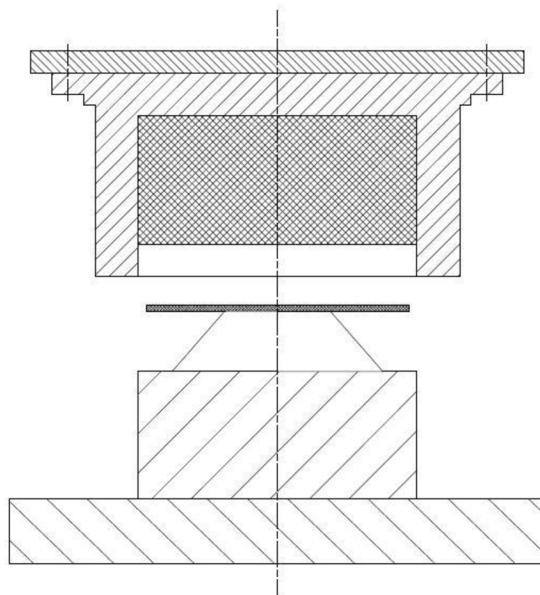
Obr 2.13: Detail tzv. vtažovacího žebra (vlevo) a brzdícího žebra (vpravo) [4].

2.7 Nekonvenční nástroje

Při tažení součástí je snahou odstranit některé nedostatky klasických metod, jako jsou například negativní účinky tření, či nepříznivý stav napjatosti. Hlavním důvodem vzniku nekonvenčních metod tažení pak bylo zvýšení stupně tažení a v některých případech i snížení ceny nástroje. Mezi nekonvenční metody tažení patří tažení nepevným prostředím, termální tažení (využívá tepelnou energii) a tažení využívající netradiční zdroje energie (výbuchem, elektrickým výbojem, elektromagnetickým polem, atd.). V mé práci zmíním pouze metody využívající nepevné prostředí [8].

2.7.1 Metoda Guerin

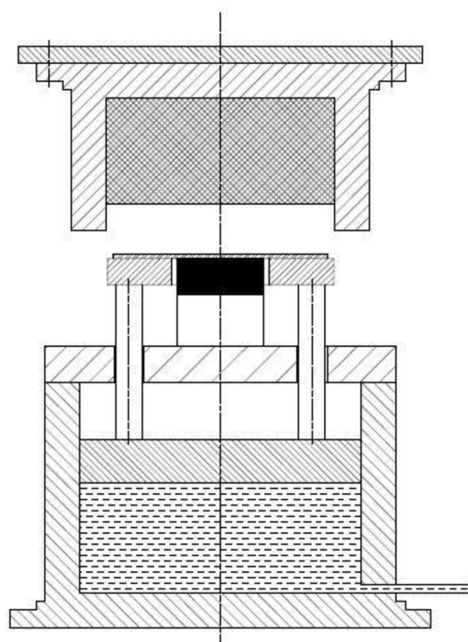
Princip metody Guerin je založen na elasticitě pryže, která je upevněna v polouzavřené ocelové skříni, která nahrazuje tažnici. V dolní části nástroje je pak ocelový tažník, na který se přiloží polotovar, a pohybem obou částí nástroje proti sobě vniká tažník s polotovarem do pryže. Schéma tohoto nástroje je uvedeno na obr. 2.14. Univerzálnost této metody spočívá v tom, že tažnice, složená z pryže, zůstává stejná, mění se pouze tažník. Mezi hlavní výhody této metody patří právě univerzálnost zařízení a fakt, že pryž nezanechává stopy na výtažku. Nevýhodami jsou pak nízká životnost pryže, potřeba velkých sil (je třeba překonat tažnou sílu a odpor pryže) a tažení pouze mělkých výtažků. Při této metodě není použit přidržovač, tudíž by docházelo ke zvlnění příruby [4, 8, 11].



Obr. 2.14: Metoda Guerin [8].

2.7.2 Metoda Marform

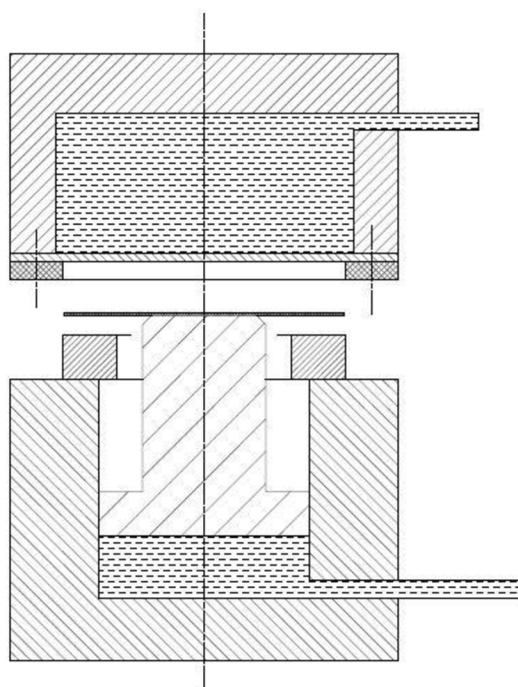
Metoda Marform pracuje téměř na stejném principu jako metoda Guerin. Rozdílem mezi těmito metodami je však to, že při metodě Marform je používán navíc hydraulicky ovládaný přidržovač (znázorněno na obr. 2.15), tudíž lze tuto metodu použít pro hluboké tažení plechů. Nevýhodou této metody je stále nízká životnost pryže a rozměrová náročnost, protože výška pryže musí být minimálně trojnásobkem výšky výtažku, aby nedocházelo k rychlému opotřebení pryže [8, 12].



Obr. 2.15: Metoda Marform [4].

2.7.3 Metoda Hydroform

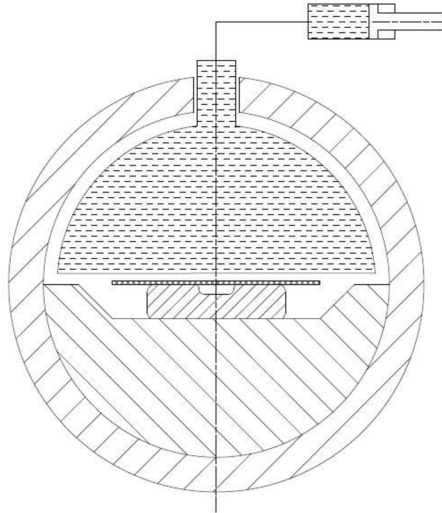
Základním znakem metody Hydroform je nahrazení tažnice kapalinou, která je uzavřena ve skříni a utěsněna membránou. Na tažníku je položený polotovár, který je následně sevřen mezi tažníkem a kapalinou s membránou. Následně se tažník začne pohybovat směrem do kapalinového média, čímž vzniká požadovaný tvar výlisku. Protitlak kapaliny ve skříni je regulovaný přepouštěcím ventilem, aby nedošlo k poškození skříně. Hlavní výhodou je jednoduchost nástroje a vysoká životnost membrány. Lze také táhnout hluboké výtažky, včetně složitějších tvarů. Schéma této metody je zřejmé z obr. 2.16 [4, 8].



Obr. 2.16: Metoda Hydroform [8].

2.7.4 Metoda Wheelon

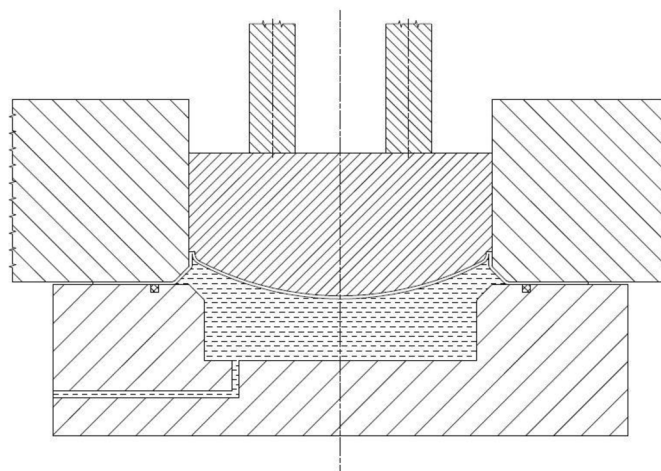
Při této metodě je tažnice nahrazena kapalným médiem, které je uzavřené v gumovém vaku. Spolu s pevným tažníkem je pak tato soustava uložena v tělese nástroje, jak je zřejmé z obr. 2.17. Hlavní výhodou této metody jsou poměrně malé rozměry zařízení, avšak ji lze použít pouze pro tažení mělkých výtažků [8].



Obr. 2.17: Metoda Wheelon [8].

2.7.5 Hydromechanické tažení

Hlavním rozdílem oproti ostatním metodám tváření kapalinou je ten, že kapalina působí přímo na povrch polotovaru. Z obr. 2.18 je zřejmé, že polotovár je pevně sevřen a utěsněn mezi přídržovačem a tažnicí. Tažník působí na plech směrem do tažné komory s kapalinou, kde kapalina působí na celou plochu polotovaru, tudíž tlačí polotovár celou plochou na tažník. Tlak kapaliny je řízen ventilem. Tím, že nejprve dojde ke tváření plechu kapalinou a posléze tažníkem lze docílit nepatrného ztenčení stěny výtažku. Mezi hlavní výhody této metody patří vysoká kvalita povrchu výtažku (nejsou stopy po nástroji), vysoké stupně tažení, možnost tažení tvarově složitých výtažků a relativně nízká cena nástroje. Mezi nevýhody pak patří vysoká tvářecí síla, vysoká síla přídržovače, vysoké nároky na těsnost soustavy, nutnost táhnout s přídržovačem a nutnost použití vysokotlakých systémů [4, 8].



Obr. 2.18: Metoda hydromechanického tažení [4].

3 TRIBOLOGIE

Tribologie je definována jako nauka o interakci povrchů při jejich pohybu a vzájemném působení na sebe a uvažuje aspekty tření, mazání a opotřebením. Jinak řečeno, tribologie uvažuje složený pohyb dvou těles, mezilátky mezi nimi a okolím. Přitom se za pohyb těchto těles dá uvažovat jako valivý, kluzný, kmitavý a nárazový. Ve skutečnosti však tělesa nevykonávají pouze jeden druh pohybu, ale pohyb složený ze dvou, či více těchto druhů. Bylo zjištěno, že až jedna třetina energie, spotřebované ve strojírenství, se využije na překonání třecích sil, což má také adekvátní dopad a celkovou cenu výrobku. Třením současně vzniká teplo a dochází k opotřebením materiálů. Právě kvůli opotřebením funkčních součástí strojů je pak nutné tyto součásti opravovat či vyměňovat, což způsobuje prostoje ve výrobě a potřebu investice do opravy či výměny. Volbou vhodného maziva pak lze tyto negativní vlivy minimalizovat a prodloužit tak životnost strojních zařízení [13, 14, 15].

3.1 Tření

Průvodními jevy tření jsou ztráty mechanické energie v průběhu vzájemného pohybu dvou dotýkajících se ploch. Existují procesy, při kterých je tření žádoucí, a to zejména procesy přenářející sílu a energii (lanové či řemenové převody, třecí spojky atd.) a procesy k zamezení pohybu (například brzdy). Na druhé straně jsou pak procesy, kdy je tření nežádoucí. V těchto případech se pak snižuje účinnost konstrukčních celků (například v ozubených převodech, kluzných a valivých ložiskách, soustavě válec – píst atd.). Toto tření je vždy nežádoucí, pokud ho nepoužíváme k přenosu sil, a proto je snahou ho omezit na co nejmenší míru.

Existují dva základní druhy tření, a to tření suché a kapalinné. V praxi se však tyto jednotlivé druhy vyskytují jen ojediněle, proto se při reálných podmínkách uplatňují různé kombinace těchto druhů. Tyto druhy budou následně popsány. [13, 15].

3.1.1 Suché tření

Suché tření je takový druh tření, kdy se dvě tělesa bezprostředně stýkají svými plochami. Třecí síla v této situaci vzniká zaklesáváním mikroskopických výčnělků jednotlivých ploch. Přetváření těchto ploch vzniká vylamováním jednotlivých částí povrchu, stříháním, nebo deformací. Tato skutečnost závisí na drsnosti povrchu – čím větší je drsnost povrchu, tím větší je třecí síla. Druhý mechanismus vzniku vázání dvou ploch je založen na vzájemných přitažlivých silách. Jednotlivé výčnělky povrchu se dostanou tak blízko k sobě, že se uplatní vliv volných molekulárních sil. Tento mechanismus, oproti prvnímu, závisí na drsnosti povrchu zcela opačně: čím menší je drsnost povrchu, tím blíže se dvě plochy k sobě přiblíží, tudíž jsou tím větší i molekulární síly. Jelikož dokonale hladkého povrchu nelze nikdy prakticky dosáhnout, není vliv těchto sil příliš významný. Projevují se však v tvorbě svarových můstků, což má za následek vznik studených svarů jednotlivých výčnělků. Odpor proti odtržení těchto výčnělků má pak výrazný vliv na výslednou třecí sílu. Znárodnění suchého tření je na obr. 3.1 [13].

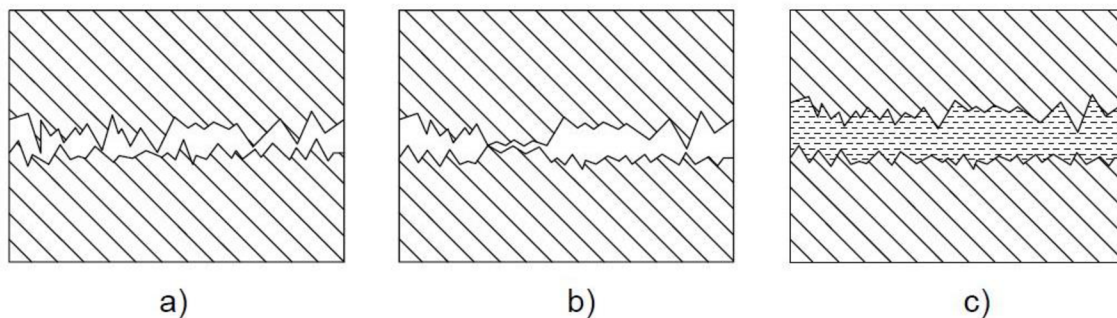
3.1.2 Kapalinné tření

Kapalinné tření nastává tehdy, je-li mezi jednotlivými plochami dvou těles přítomna kapalina – mazivo v takové míře, že se tyto dvě plochy nedotýkají. Velikost třecí síly je pak dána třením molekul uvnitř této kapaliny, takže není závislá na druhu materiálu, ani na jeho drsnosti povrchu. Při tomto stavu nedochází k opotřebením jednotlivých ploch.

Vyvozuji-li plochy oddělené kapalinou zatížení, musí být kapalina schopna toto zatížení přenášet. Samotná soudržnost kapaliny však nestačí k tomu, aby dělila dvě plochy od sebe, proto se v ní musí potřebný tlak vyvodit, což lze provést buď hydrostaticky, či hydrodynamicky. Při hydrostatickém způsobu se kapalina zavede pod specifickým tlakem mezi dvě plochy, což je velmi obtížné na provedení, proto se této metody používá jen tehdy, nejde-li dosáhnout hydrodynamického plnění. Podstatou hydrodynamického plnění je unášení kapaliny do zužujícího se prostoru. Tím vzniká klínová vrstva maziva, kdy se vlivem rychlostních rozdílů vytváří potřebný tlak. Znázornění kapalinného tření je na obr. 3.1 [13].

3.1.3 Mezné tření

Mezní tření je kombinací předchozích dvou způsobů. Nastává tehdy, kdy nelze dosáhnout vytvoření kapalinné vrstvy. V této situaci je mezi oběma plochami pouze mezní vrstva maziva, která brání vzájemnému styku. Tato vrstva je v drtivé většině menší než $1\ \mu\text{m}$, tudíž není schopna oddělit všechny nerovnosti, na druhou stranu je však schopna zamezit vzniku studených svarů. Z tohoto poznatku vyplývá, že mezní vrstva není schopna eliminovat opotřebení. Velikost třecí síly je pak závislá na vlastnostech maziva, druhu materiálu a drsnosti povrchu v místě tření. Znázornění mezního tření je na obr. 3.1 [13].

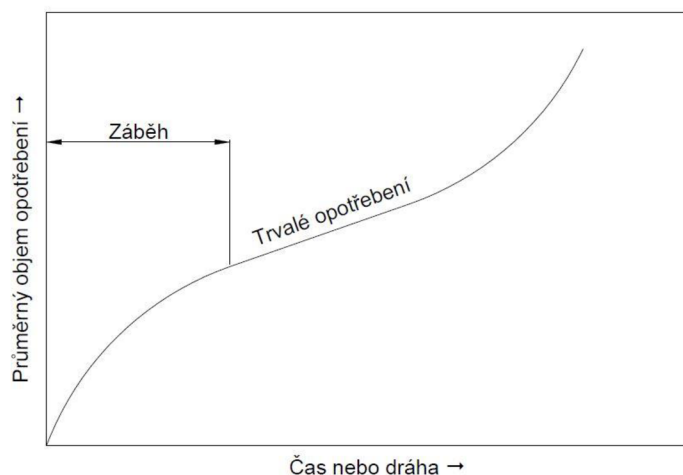


Obr. 3.1: a) suché, b) mezní a c) kapalinné tření [13].

3.2 Opotřebení

Opotřebení je postupná, trvale nežádoucí změna povrchu těles v přímém styku a vzájemném pohybu. Projevuje se mechanickým odstraňováním nebo přemísťováním jednotlivých částic materiálu z funkčních ploch. Tento proces může být doprovázen i jinými vlivy, jako například chemickým, či elektrochemickým působením [16].

Časový průběh opotřebení lze vidět na obr. 3.2. Tento průběh se dělí na tři fáze, a to na záběh, konstantní opotřebení a konečný nárůst opotřebení. Po tomto nárůstu dochází ke konci životnosti součástí. Z obrázku je zřejmé, že v každé fázi procesu je jiná rychlost opotřebení. V části záběhu je po krátký časový úsek značně velké opotřebení. To má za následek počáteční relativně velká drsnost povrchu. Ve druhé fázi je křivka lineární a opotřebení poměrně stabilní. To lze vysvětlit tím, že jsou strhnuty či otupeny velké výstupky na povrchu, což znamená, že je zde menší drsnost povrchu než v první části. V poslední fázi je pak velký nárůst opotřebení a dochází ke zničení součástí. Intenzita opotřebení je závislá především na zatěžující síle, druhu opotřebení, tvaru a drsnosti kontaktních ploch, mazivu atd. [14].



Obr. 3.2: Závislost opotřebení na času/dráze [14].

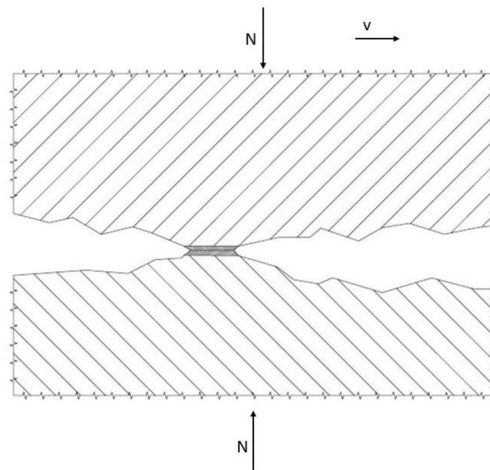
Jak již bylo zmíněno, opotřebení je mimo jiné závislé i na jeho druhu. Mezi základní druhy opotřebení pak patří:

- Adhezivní opotřebení (vliv meziatomových sil)
- Abrazivní opotřebení (rýhování, řezání)
- Erozivní opotřebení (vlivem proudění částic v kapalině)
- Kavitační opotřebení (vlivem kavitačních dutin)
- Únavové opotřebení (vlivem kumulací poruch)
- Vibrační opotřebení (vlivem kmitavých tangenciálních posunů funkčních povrchů).

V praxi se však nevyskytují pouze tyto druhy, nejčastější způsoby opotřebení vznikají právě kombinací těchto druhů, takže v reálných podmínkách můžeme najít řadu variant. Při procesech tváření jsou nejčastějšími druhy právě adhezivní a abrazivní opotřebení, proto bude v následujících kapitolách věnována pozornost pouze těmto dvěma druhům opotřebení [16].

3.2.1 Adhezivní opotřebení

Příčinou adhezivního opotřebení jsou velké adhezivní síly, které se vytváří mezi plochami, které jsou ve vzájemném kontaktu. Tím, že tyto plochy nejsou dokonale hladké, se tyto kontakty realizují v místech styku výčnělků, kde pak dochází k elastické a plastické deformaci. V první fázi dotyku vzniká elastická deformace, po překročení meze kluzu materiálu však postupně dochází k plastické deformaci částí s nižšími hodnotami mechanických vlastností. Při tomto ději dochází k porušení povrchové vrstvy a v místě dotyku nerovností vznikají mikrospoje. Při relativním pohybu obou ploch se pak působením buď tangenciálních, nebo normálních sil tyto mikrospoje porušují a dochází k plastickým mikrodeformacím, obvykle pod povrchem měkčího materiálu. Při porušení mikrospojů se lokálně zvýší teplota, takže se zvýší i difuze a měkčí materiál se přenáší na povrch materiálu tvrdšího. Měkčí materiál tak tvoří nespojitý povlak na povrchu tvrdšího materiálu, takže se začínají tvořit jemné částice otěru. Celý princip adhezivního opotřebení je patrný na obr. 3.3 [17].

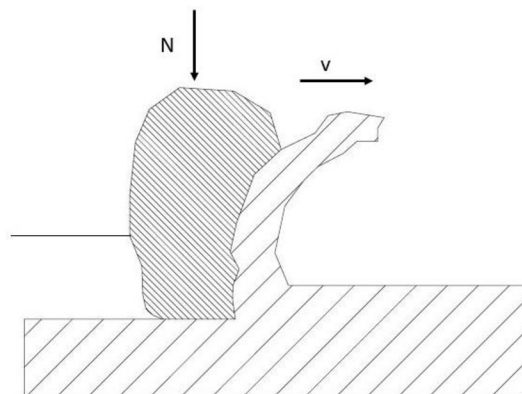


Obr. 3.3: Princip adhezivního opotřebení [18].

Příkladem adhezivního opotřebení je například styk vlakového kola s kolejnicí, kluzných ložisek a čepů.

3.2.2 Abrazivní opotřebení

Při vzájemném silovém působení velmi tvrdých, ve většině případů minerálních, částic a funkčních ploch součástí, vzniká abrazivní opotřebení. Při tomto procesu se oddělují a přemisťují drobné části materiálů. Podobným případem abrazivního opotřebení je přítomnost velmi tvrdých částic mezi navzájem se pohybujícími funkčními plochami. Tento případ nastává tehdy, kdy dochází v důsledku špatného utěsnění soustavy k vniku nečistot mezi funkční plochy. Na intenzitu abrazivního opotřebení má pak vliv tvar abrazivních částic, jejich pevnost a tvrdost.



Obr. 3.4: Princip abrazivního opotřebení [18].

Nejjednodušším modelem abrazivního opotřebení je případ dvou těles při relativním pohybu, kdy velmi tvrdé částice, které jsou vázané, či nerovnosti povrchu vnikají do měkčího opotřebovaného povrchu, na kterém způsobují rýhy. Při tomto procesu může, ale i nemusí docházet k oddělování třísek. Pro tento model existují dva extrémní případy, kdy v prvním případě vzniká plastická deformace, kterou doprovází rýhování povrchu. Před abrazivní částicí se vytváří nárůstek a vlivem relativního pohybu je materiál vytlačován do boků, kde vytváří spojitý val kolem vzniklé rýhy. Druhým případem je pak mikrořezání. V tomto případě dochází k tvorbě rýhy odstraněním celého objemu materiálu rýhy. Vzniká tak tříska, valy kolem rýhy se netvoří. Tato tříska pak může být brána jako další částice způsobující abrazivní opotřebení. Princip mechanismu tohoto opotřebení je znázorněn na obr. 3.4. Vliv

abrazivního opotřebení na funkční plochy součástí je velmi intenzivní. Právě abrazi je opotřebovááno přes 50 % strojů a strojních součástí [19].

Typickým příkladem abrazivního opotřebení je opotřebení pístu motoru.

3.3 Mazání

Správnou volbou mazání lze docílit snížení tření a jeho následků, zejména opotřebení. Volbou dokonalých mazacích podmínek jsme tedy schopni minimalizovat ztráty vzniklé v důsledku tření a opotřebení. Dosažením těchto podmínek v celém průběhu života stroje a jeho součástí (tzn. od konstrukce, přes jeho provoz, včetně údržby, lze docílit významného snížení nákladů na provoz a opravy strojů a zařízení. Věda, která se zabývá podmínkami a zásadami správného mazání se nazývá tribotechnika.

Názorný příklad důležitosti mazání si lze ukázat při suchém tření kluzných částí. Dochází k velkým energetickým ztrátám a je zde i velké riziko zadíráání těchto třecích ploch. Z tohoto důvodu je nutné dosáhnout alespoň mezného tření, ideálně pak tření kapalinného. Tohoto stavu je možné dosáhnout však jen při určité minimální kluzné rychlosti. Další podmínkou je dokonalý způsob mazání, což obnáší vhodnou konstrukci kluzných částí a vhodnou volbu maziva (jeho viskozita a množství). Mezné tření vždy doprovází větší ztráty energie a opotřebení než tření kapalinné. Tato míra opotřebení je závislá na charakteru stykových ploch (rozměry, druh materiálu, drsnost povrchu), způsobu mazání a vlastnostech maziva. Právě mezné tření se v procesech objevuje nejčastěji. Je to způsobeno i tím, že součásti, které za normálních podmínek pracují při kapalinném tření, při jejich rozběhu, doběhu, či v úvratích pohybu pracují při mezném tření [13].

4 MAZIVA

Maziva jsou látky, které se vnášejí mezi kluzné plochy s cílem snížit, či úplně eliminovat tření a opotřebení těchto ploch. Správným mazáním tak lze zaručit bezpečnost chodu stroje, spolehlivost, ekonomickou nenáročnost a požadovanou životnost třecích ploch. Základním požadavkem, kladeným na maziva, je jejich mazací schopnost. To znamená, že je mazivo schopné přenášet síly třením molekul uvnitř maziva, při současném vytvoření souvislé mazací vrstvy na povrchu třecích těles. Mezi další požadavky pak patří snížení energetických ztrát a zvýšení mechanické účinnosti, snížení či potlačení opotřebení, dostatečné chlazení a odvod tepla, ochrana třecích povrchů proti korozi a nečistotám a těsnicí schopnosti [15, 20].

V technické praxi lze maziva rozdělit do několika skupin podle určitých kritérií.

Podle skupenství se maziva dělí na:

- Plyná (pro aerostatické či aerodynamické mazání kluzných ložisek či uložení)
- Kapalná (nejširší oblast použití; hydrostatické, hydrodynamické a elasto-hydrodynamické mazání)
- Plastická (pro mazání v místech, kam nelze dopravit ostatní maziva; jsou semi-permanentní)
- Tuhá (pro případy smíšeného tření)

Podle původu se maziva dělí na:

- Ropné (minerální)
- Syntetické
- Přírodní (biologické – rostlinného či živočišného původu)
- Směsné

Podle převažujícího typu uhlovodíků se maziva dělí na:

- Alkalické
- Cyklické
- Aromatické
- Smíšené [21].

V procesech tváření jsou nejčastěji používané ropné (minerální) a syntetické oleje, proto budou v rámci této diplomové práce popsány právě tyto skupiny maziv.

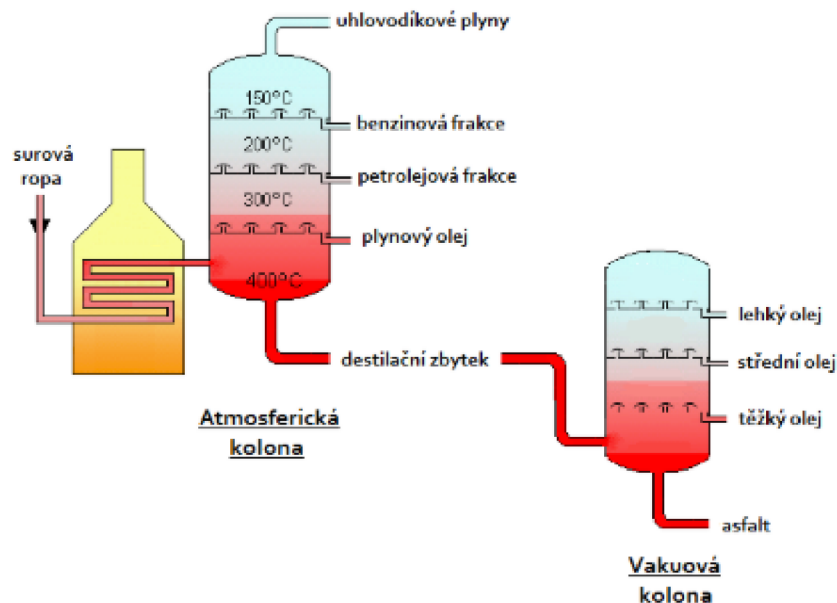
4.1 Ropné oleje

Ropné (či minerální) oleje jsou nejběžnější a nejpoužívanější mazací oleje. S rozmachem těžby ropy v druhé polovině 19. století také přišel rozmach těchto maziv. V dnešní době existuje na trhu široké spektrum maziv na této bázi. Mezi jejich hlavní výhodu tedy patří široká oblast použití, dobrá dostupnost a nízká pořizovací cena [15, 20].

4.1.1 Výroba ropných olejů

Ropné oleje se získávají destilací ze surové ropy, čili rektifikací. Samotná výroba pak probíhá destilací, kdy se z ropy oddělí lehké podíly, jako je benzín, nafta a petrolej. Výsledné oleje se pak rozdělí podle viskozitních stupňů a zbytek je používán jako válcový olej. Výsledné oleje se však k mazání nepoužívají, protože mají malou chemickou stálost. Tyto oleje se proto ještě musí zpracovávat rafinačním postupem, kdy dojde k odstranění nenasycených a polárních sloučenin. Poslední fází úpravy oleje je pak odparafinování, což má za následek odstranění

uhlovodíků, které se uvolňují při nižších teplotách – tímto procesem se u olejů snižuje bod tuhnutí. Celý proces výroby oleje z ropy je znázorněn na obr. 4.1 [13, 22].



Obr. 4.1: Schéma destilace ropy [23].

4.1.2 Rozdělení minerálních olejů

Rozdělení minerálních olejů je prováděno do několika skupin, a to podle jejich hlavních uhlovodíkových složek. Tyto složky nejvíce ovlivňuje zdroj ropy. V drtivé většině jsou minerální oleje složeny z uhlovodíků, které obsahují v každé molekule přibližně třicet atomů uhlíku. Tyto uhlovodíky pak tvoří přímé nebo cyklické řetězce. Mezi tři hlavní skupiny minerálních olejů tedy patří parafínové minerální oleje, naftalénové minerální oleje a aromatické minerální oleje [14].

U parafínových minerálních olejů tvoří atomy uhlíku dlouhé řetězce, které mohou obsahovat i několik větví, avšak se neopakují (nejsou cyklické). Každý olej obsahuje stovky různých řetězců, tyto řetězce je možné popsat vzorcem C_nH_{2n+2} , kde n je velmi vysoké číslo [14, 15].

Struktura **naftalénových minerálních olejů** má vždy alespoň jeden cyklický uhlovodík. Pokud se tyto cyklické struktury spojí dohromady, vzniká polynaftalénová struktura. Tyto oleje oproti parafínovým minerálním olejům nepotřebují mnoho fází rafinace, proto je lze snadněji vyrobit [15].

Aromatické minerální oleje tvoří cyklické struktury s jednoduchou, ale i dvojnou vazbou mezi atomy uhlíku. Je to způsobeno tím, že tyto oleje nejsou plně nasyceny. V přírodě se vyskytují v daleko menším množství než zmíněné dvě skupiny minerálních olejů [14, 24].

4.2 Syntetické oleje

Syntetické oleje jsou vyráběny krakováním ropy. Během tohoto procesu se osamostatní uhlovodíky s malým počtem molekul. Právě tyto uhlovodíky mají vhodné mazací vlastnosti.

4.2.1 Rozdělení syntetických olejů

Esterové oleje jsou organické sloučeniny, které vynikají především vysokou tepelnou odolností. Jsou chemicky odolné, ve srovnání s minerálními oleji však nemají tak dobrou odolnost proti hydrolyze a nepříznivě reagují s elastomery.

Polyalphaolefin (PAO) oleje jsou tvořeny syntetickými uhlovodíky. Oproti minerálním olejům vynikají vysokou tepelnou a chemickou odolností. Jsou ekologicky nezávadné, tudíž nacházejí uplatnění i v potravinářském průmyslu.

Sloučeniny **Perfluorinated polyether (PFPE) olejů** tvoří pouze atomy uhlíku, kyslíku a fluoru. Tyto oleje jsou právě díky silným C-O a C-F vazbám vysoce tepelně stabilní a jsou téměř inertní vůči oxidaci a chemické degradaci. Využití nachází v těžkých provozních podmínkách. Při hoření vylučují vysoce toxické plyny, proto je nutné zabránit požárům těchto olejů.

Polyglycol je využívám hlavně jako nosič aditiv. Využití nachází v procesech, kdy je zapotřebí využít jeho protioděrových vlastností. Vyniká také vysokou teplotní a mechanickou stálostí [25].

4.3 Aditiva

S ohledem na značnou odlišnost podmínek jednotlivých tvářecích procesů, nejsou „čisté“ minerální a syntetické oleje schopné svými vlastnostmi zajistit široké spektrum použití. Aby bylo zaručeno dokonalé mazání v různých procesech, používají se různé přísady pro zušlechtění těchto maziv – tzv. aditiva. Úlohou těchto aditiv je omezit nežádoucí účinky maziv v daných operacích, zvýraznit a zabezpečit požadované vlastnosti na maziva, či dodat mazivu nové vlastnosti. Mezi vlastnosti, které lze ovlivnit, patří například viskozita, viskózně-tepelná charakteristika, teplota tuhnutí, tepelná stabilita, oxidační stabilita, fyziologické účinky (zdravotní nezávadnost) atd. Tyto přísady působí buď fyzikálním či chemickým účinkem na zušlechtěvané mazivo, přičemž ve většině případů mají aditiva multifunkční účinky. Jednotlivé typy aditiv budou následně popsány [15, 27].

4.3.1 Detergenty

Tato aditiva zabraňují usazování nečistot na třecím povrchu. Pokud jsou již nečistoty vytvořené, pak je rozpouštějí. Hlavní výhodou detergentů je fakt, že mazivo díky nim lépe přilne k povrchu.

4.3.2 Disperzanty

Tato aditiva zabraňují vzniku usazenin při nižších teplotách. Disperzanty fungují tak, že obalují mechanické nebo kapalné nečistoty, čímž zamezí jejich shlukování a usazování. Nečistoty jsou pak rovnoměrně rozmístěny v celém objemu maziva.

4.3.3 Aditiva zlepšující viskozitu

Tato aditiva fungují tak, že stabilizují viskozitu maziva. Viskozita pak není díky těmto přísadám tolik závislá na teplotě, takže se rozšiřuje oblast teplot vhodná pro použití těchto maziv. Čím vyšší je teplota maziva, tím více klesá jeho viskozita. Na viskozitě také závisí tloušťka mazacího filmu a ztráty energie vzniklé překonáním odporu maziva.

4.3.4 Aditiva snižující pěnovost

Díky těmto aditivům je zabráněno vzniku olejové pěny, která nepříznivě ovlivňuje kvalitu oleje, a to tak, že urychluje stárnutí oleje či zvyšuje jeho stlačitelnost.

Mezi další funkce aditiv pak patří ochrana proti vysokému tlaku a opotřebením, ochrana proti korozi, úprava tření, snížení bodu tuhnutí, zpomalování stárnutí atd. [27]

4.4 Maziva pro tažení plechů

Typickým znakem maziv pro tvářecí operace je jejich malá univerzálnost. Hlavními požadavky na tato maziva jsou schopnost vytvářet únosné, ale zároveň i lehko odstranitelné filmy, dosáhnout optimálních koeficientů tření, minimalizovat opotřebením a zabránit korozi. Nejdůležitějším požadavkem však je mazací schopnost a schopnost odvádět teplo [15].

Pro tažení za nižších teplot lze použít minerálních olejů s různými přísadami. Uplatnění zde pak nachází i měkká plastická a tuhá maziva, která vytváří únosný mazací film. Problémem je však jejich obtížné odstranění z povrchů součástí. Jako nejvhodnější mazací médium pro hluboké tažení je pak směs mýdla a tukové pasty, a to v poměru 5 % mýdla, 25 % oleje, 25 % vody a 45 % pevných látek. Směs oleje s mýdlem zde zajišťuje tvorbu souvislého mazacího filmu. Společně s vodou pak vytváří emulzi, což zabraňuje separaci směsi. V závislosti na obtížnosti operace se pak volí vhodná koncentrace této mazací směsi [26].

4.5 Bezpečnostní a zdravotní opatření

Ropné výrobky jsou snadno vznětlivé látky. Nebezpečí jejich vzplanutí vzniká i při nepatrném plamenu, při přeskočení jiskry, či i při pouhém zahřátí látky na teplotu vzplanutí. Tyto okolnosti tedy vyžadují, aby byla při práci s ropnými látkami zachována přísná bezpečnostní pravidla při jejich skladování a používání. Mezi tato pravidla pak patří zákaz kouření, zákaz otevřeného ohně, zachování předpisů pro elektroinstalaci, požadavky na nepropustnost nádrží, protipožární zajištění budov a další požadavky.

Ropné výrobky jsou také látky, které mají biologický účinek nejen na člověka, ale i na životní prostředí. Tyto látky mohou dráždit či poškodit pokožku i sliznici, způsobit otravu, v krajním případě i smrt. Přímé požití látek má dráždivý účinek, ve vyšším množství může být i smrtelné. Olejová mlha může vést k zánětu dýchacích cest, či k poruše nervové soustavy. Styk čistého minerálního oleje s pokožkou nevyvolává žádné problémy, mimo přecitlivění pokožky. Reakce na styk pokožky se zušlechťenými oleji se pak liší podle obsahu chemických sloučenin, které jsou použity jako přísady. Podle toho, jaký mají ropné výrobky účinek na zdraví člověka, se rozdělují do tří skupin. Zaměstnanci, kteří pracují s těmito látkami, pak musí být proškoleni o hygieně práce a způsobu první pomoci [13].

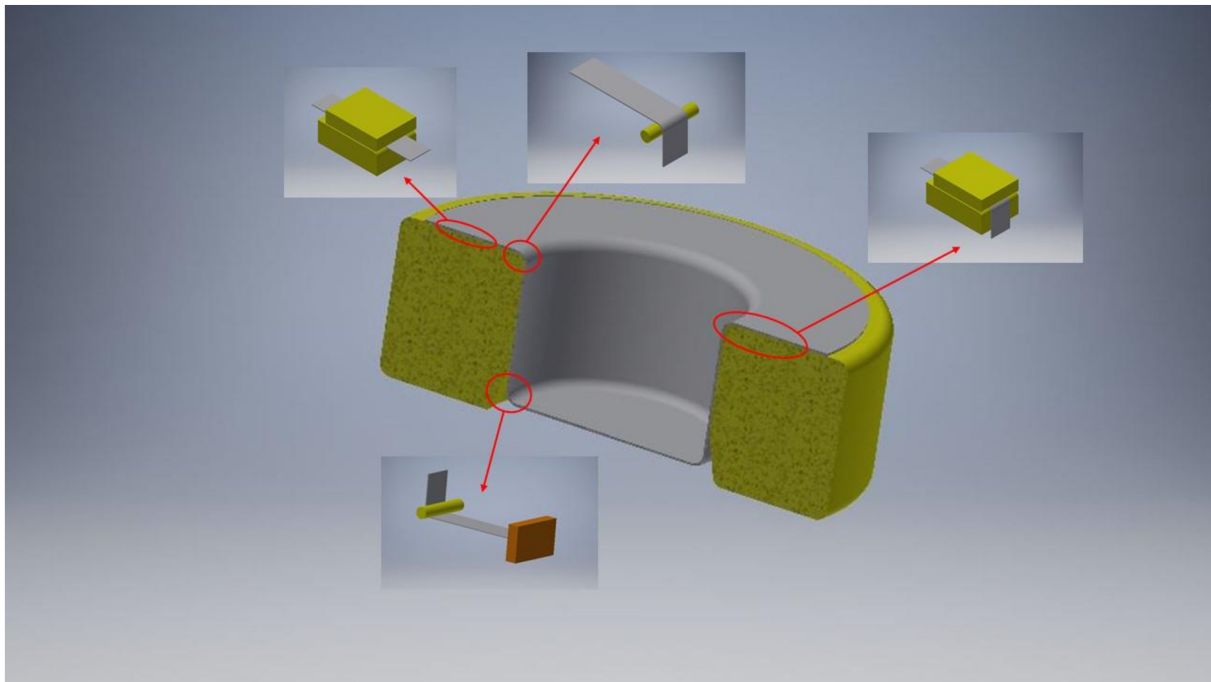
4.6 Ekologická nezávadnost

Ekologická nezávadnost maziv znamená, že maziva nemají negativní účinky nejen na savce, ale i na rostliny, mikroorganismy a zvířata žijící ve vodě. Obsah toxických látek, přítomných v mazivech, má devastující účinky. Při styku mikroorganismů, či drobných zvířat s těmito látkami dojde k jejich otravě. I netoxické látky však mohou být nebezpečné, a to tak, dojde-li

k zablokování dýchacích cest živočichů těmito látkami. Měřítkem ekologické nezávadnosti maziv je pak jejich rozložitelnost. Pokud se tato maziva dostanou do biosféry, je nutný jejich rychlý rozklad, aby nedošlo k zatížení ekosystému. Nejlépe je toho dosaženo u takových produktů, které mikroorganismy dokážou rozložit na nejedovaté produkty, jako je oxid uhličitý a voda. V tomto případě je mazivo zcela odstraněno z prostředí. Použitím těchto maziv se tedy minimalizují nežádoucí dopady na životní prostředí a také náklady na náročnou likvidaci [28].

5 ZKOUŠENÍ MAZIV

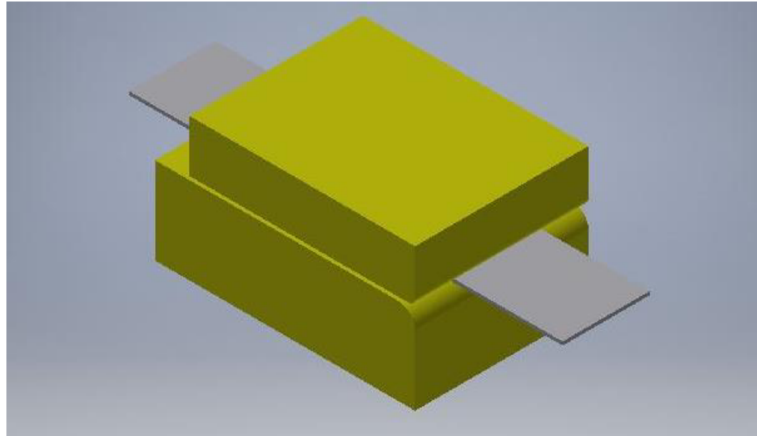
Proces hlubokého tažení plechů je z tribologického hlediska považován za jeden z nejsložitějších procesů, obzvláště pak při tažení korozivzdorných ocelí, hliníkových, či titanových slitin. Třecí sílu při tažení nejvíce ovlivňují materiál polotovaru, struktura povrchu taženého polotovaru, materiál a povrchová úprava tažného nástroje, rychlost deformace, velikost přidržovacích sil, druh maziva, teplota procesu atd. Vytvořit přípravek pro testování maziv, který by zahrnoval veškeré vlivy při reálném procesu je však velmi obtížné. Právě z tohoto důvodu byly vyvinuty tribologické testy, které uvažují pouze jednotlivé oblasti celého procesu tažení. Tyto testy jsou znázorněny na obr. 5.1. První metodou je modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem, dále pak modelování tření mezi přidržovačem a tažnou hranou, modelování tření na tažné hraně, modelování tření při redukcí tloušťky stěny a konečně modelování vypínání přes tažnou hranu [29].



Obr. 5.1: Metody modelování zkoušek [29].

5.1 Modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem

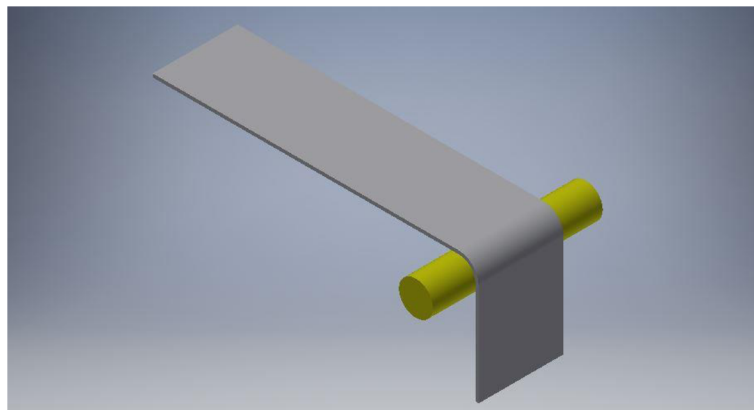
Modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem patří k nejčastější zkoušce při určení součinitele tření. Je to jedna z nejjednodušších metod. Jejím principem je protažení pásku plechu s konkrétními rozměry čelistmi, které mají přesně daný tvar a rozměry. Tyto čelisti jsou sevřeny určitou silou, jak je znázorněno na obr. 5.2. Hlavní výhodou této zkoušky je právě její jednoduchost. Nevýhodou pak fakt, že při této zkoušce není dosaženo reálných podmínek.



Obr. 5.2: Modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem [29].

5.2 Modelování tření na tažné hraně

Modelování tření na tažné hraně je procesem, který už blíže napodobuje podmínky hlubokého tažení a mazání při tomto procesu. Podstatou této metody je vyhodnocení dvou po sobě jdoucích procesů, a to tažení pásku plechu přes váleček, kdy je váleček pevně uchycený, tudíž se nemůže otáčet. V druhém případě je pak váleček volný a otáčet se může. Váleček v těchto procesech simuluje tažnou hranu. Hlavními parametry procesu jsou úhel opásání plechu přes váleček, poloměr válečku, rychlost pohybu plechu a přidržovací síla. Celý princip metody je zřejmý ze schématu na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Modelování tření na tažné hraně [29].

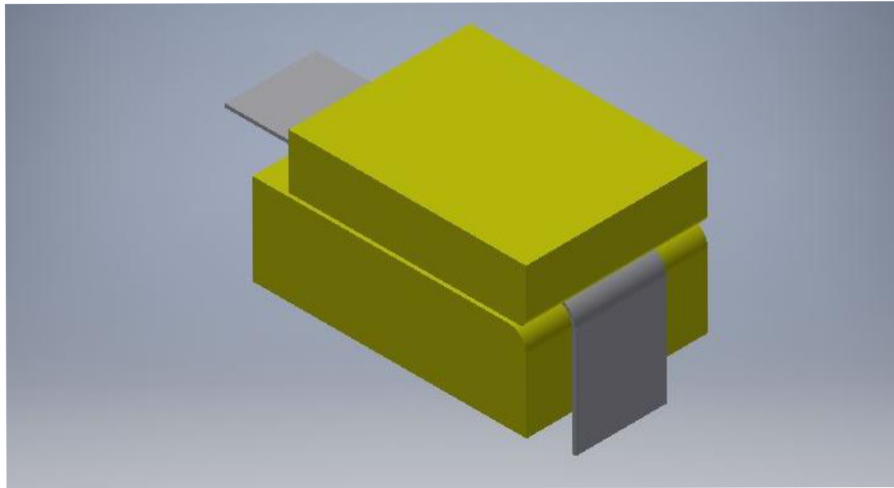
5.3 Modelování tření při redukci tloušťky stěny

Modelování tření při redukci tloušťky stěny patří též mezi rozšířené zkoušky, protože simuluje proces tažení plechu se ztenčením stěny. Pásek plechu je v tomto případě protahován mezi dvěma čelistmi, kdy jedna z nich je opatřena zkosením, díky kterému dochází k redukci tloušťky stěny. Cílem této zkoušky je posouzení vhodnosti materiálu a maziva pro tažení se ztenčením stěny. Nevýhodou však je poměrně velké opotřebení nástroje.

5.4 Modelování tření mezi přidržovačem a tažnou hranou

Na rozdíl od výše zmíněných metod není tato metoda simulací pouze jednoho procesu, ale je složena z modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem a modelování tření na tažné hraně. Princip metody znázorňuje schéma na obr. 5.4. Pásek je upnut v čelistech s přesně definovanými rozměry, dle modelování tření mezi tažnicí a přidržovačem. Jedna z čelistí je

pak opatřena právě zaoblením, které nahrazuje váleček při modelování tření na tažné hraně. Pásek je posléze tažen silou. Výsledkem je pak síla potřebná na protažení pásku čelistmi. Hlavní výhodou této metody je fakt, že i při své nenáročnosti relativně přesně popisuje tribologické podmínky při hlubokém tažení.



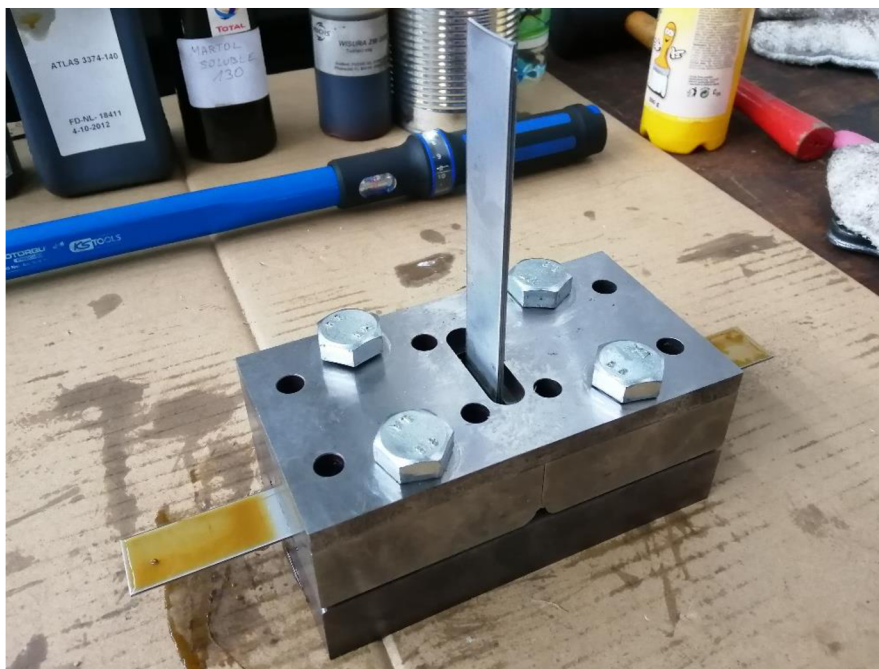
Obr. 5.4: Modelování tření mezi přidržovačem a tažnou hranou [29].

6 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ MAZIV

Pro zkoušky maziv bylo nejprve nutné zvolit vhodnou metodu a správný zkušební přípravek tak, aby došlo k co nejpřesnějšímu napodobení reálného procesu. Dále bylo třeba vybrat maziva, která jsou doporučována výrobcem pro náročné operace tažení plechu a pro experiment připravit vzorky z plechu používaného v praxi.

6.1 Zkušební přípravek

Konstrukce zkušebního přípravku vychází z modelování tření mezi přidržovačem a tažnou hranou, jak je popsáno v kapitole 5.4. Důraz byl kladen na to, aby byl přípravek schopen simulovat co nejpřesněji proces výroby součástí ve firmě ACO. Samotný přípravek je složen ze čtyř hlavních částí – spodní čelisti a dvou horních čelistí, které jsou totožné, a vrchní desky. Součástí přípravku je ještě pomocná skříň, kterou se zkušební přípravek upíná do zkušebního stroje. Sestava přípravku s pásky plechu je zobrazena na fotografii, viz. obr. 6.1.



Obr. 6.1: Sestava přípravku.

Hlavní výhodou tohoto přípravku je snadné a rychlé nastavení pracovních podmínek a zároveň postačující objektivní zhodnocení výsledků testů jednotlivých druhů maziv. Podstatou procesu simulace v přípravku bylo tažení ohnutých pásek plechu přes zaoblení na horních čelistech přípravku, přičemž na pásky i na horní a spodní čelisti bylo nanášeno zkoušené mazivo. Na základě předem nastavené přidržovací síly, která byla vyvinuta pomocí čtyř šroubů M16, byla na zkušebním stroji vyvinuta a zaznamenána potřebná tažná síla na protažení pásek přípravkem [30].

6.1.1 Dolní čelist

První částí přípravku je dolní čelist, obr. 6.2, která představuje přidržovač tažného nástroje. Je vyrobena z nástrojové oceli 1.2379 (ČSN 19 573) a zušlechtěna na minimální tvrdost odpovídající 60 HRC. Délka spodní čelisti je 170 mm, šířka 92 mm a tloušťka 30 mm, aby byla zaručena dostatečná tuhost této čelisti. Středem dolní čelisti prochází funkční část nástroje, která je leštěna na drsnost Ra 0,2, což odpovídá drsnosti povrchu přidržovače při reálném procesu. Tato funkční plocha je široká 32 mm a je z každé strany ohraničena

dvoumilimetrovými drážkami. Tyto drážky přesně definují její velikost, která je zásadní pro výpočet potřebného utahovacího momentu. Vnitřní hrany těchto drážek jsou pak opatřeny zaoblením R1, aby nebylo případnou ostrou hranou zařezáváno do pásku protahovaného plechu. Na obou koncích funkční části dolní čelisti je pak náběhové zaoblení R2, které slouží k bezproblémovému zavádění pásku plechu do přípravku a stírá přebytečné mazivo z těchto pásků. Dále se pak v dolní čelisti nachází osm průchozích děr o průměru 10 mm, v nichž jsou zalisovány kolíky s vnitřním závitem ISO 8735 s délkou 70 mm. Velikost i pozice děr musí být tolerovány, aby byla zaručena bezproblémová montáž přípravku. Nakonec jsou v dolní čelisti symetricky rozmístěné čtyři průchozí díry se závitem M16 pro šroub, které slouží k vyvození přidržovací síly.



Obr. 6.2: Dolní čelist.

6.1.2 Horní čelist

Další částí přípravku jsou dvě horní čelisti, obr. 6.3, které jsou identické. Tyto dva díly představují tažnici přípravku, proto jsou také vyrobeny z nástrojové oceli 1.2379 a zušlechtěny na minimální tvrdost 60 HRC. Tloušťka horních čelistí je opět 30 mm. Ve střední části každé z čelistí je opět vytvořena funkční leštěná plocha s drsností Ra 0,2, ohraničená drážkami stejného tvaru a rozměrů jako na dolní čelisti, popsané v kapitole 6.1.1. Funkční plocha horní čelisti je směrem z přípravku opatřena opět náběhovým zaoblením R2, směrem dovnitř přípravku jsou horní čelisti opatřeny zaoblením R6, které odpovídá zaoblení tažnice v reálném procesu. Horní čelist je také na této straně opatřena drážkou o hloubce 2 mm a šířce 40 mm, kterou prochází ohnutý pásek plechu k upínacím čelistem zkušebního stroje. Poloha každé horní čelisti je zajištěna pomocí kolíků, které jsou zalisovány v dolní čelisti a čtyřech průchozích děr o průměru 10 mm. V obou čelistech jsou rovněž zhotoveny průchozí díry o průměru 17 mm pro průchod šroubu M16.



Obr. 6.3: Horní čelist.

6.1.3 Horní deska

Horní deska, obr. 6.4, je poslední částí zkušebního přípravku. Je vyrobena opět z nástrojové oceli 1.2379. Její délka je 170 mm, šířka 92 mm a tloušťka 10 mm. Její funkcí je rovnoměrné rozložení sil od šroubů M16 na oba díly horních čelistí. Protože je deska namáhána od těchto šroubů, je kalena na minimální tvrdost 60 HRC, aby nedocházelo k jejich otlaku. Uprostřed desky je otvor o délce 48 mm a šířce 14 mm pro průchod pásků plechu. V horní desce je osm děr o průměru 10,2 mm, které mají stejnou polohu, jako kolíky. Tyto díry slouží pouze k tomu, aby se deska neopírala o tyto kolíky, a tudíž mohla přenášet sílu od šroubů. Nakonec jsou v horní desce zhotoveny čtyři díry o průměru 17 mm pro průchod šroubů.



Obr. 6.4: Horní deska.

Sestava přípravku je uchycena do zkušebního stroje pomocí skříně, viz fotografie na obr. 6.5. Její vnitřní rozměry jsou 124 x 125 mm, její délka je 160 mm. Skříně je uchycena svou spodní

částí na pracovní stůl zkušebního stroje pomocí závitové tyče. Ve skříni je pak vložena žíhací dečka, která slouží k udržení požadované pracovní teploty. Po vložení a zapojení žíhací dečky je pak do skříně vložena sestava přípravku s namazanými pásky plechu. Skříň je uzavřena horním dílem a připevněna šesti šrouby M10. V horním dílu skříně jsou zhotoveny čtyři díry pro hlavy šroubů M16, aby nedocházelo k namáhání šroubů ani k otlaku šroubů do horního dílu skříně, a aby se tažná síla rozložila na plochu horní desky. Dále je také v horním dílu skříně zhotoven otvor pro průchod pásků plechu.



Obr. 6.5: Sestava přípravku.

6.2 Zkušební stroj

Pro zkoušení maziv byl zvolen hydraulický zkušební stroj ZD40, obr. 6.6. Tento stroj umožňuje vykonávat tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů. Rozsah síly stroje je od 8 do 400 kN, což je dostačující pro provádění zkoušek maziv. Stroj je vybaven inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a řídicí jednotkou EDC 60 s maximální odchylkou 1 %. Snímače stroje jsou propojeny s počítačem, kde lze v programu M-TEST v.1.7 vyhodnocovat závislost síly na dráze či čase [31].



Obr. 6.6: Zkušební stroj.

6.3 Plechy používané pro experiment

Ve společnosti ACO Industries jsou používány právě korozivzdorné austenitické oceli, proto bude následující kapitola zaměřena pouze na tento druh oceli.

Korozivzdorná ocel je specifická svou odolností vůči chemické i elektrochemické korozi. Je vysoce legovaná. Korozní odolnost této oceli je založena na pasivaci povrchu železa. Tyto oceli se pak dále dělí podle chemického složení a struktury na feritické oceli, martenzitické oceli, austenitické oceli, feriticko-austenitické, martenziticko-austenitické oceli a poloferitické oceli.

Austenitické korozivzdorné oceli se v průmyslových procesech vyskytují nejčastěji. Jak už vyplývá z názvu, obsahují austenitickou strukturu, kterou mají za normálních teplot a teplot pod bodem mrazu. Obsahují minimální množství uhlíku (méně než 0,10 %), 16-22 % chromu, 8-40 % niklu a 0-5 % molybdenu. Dále mohou obsahovat dusík, niob, titan, či křemík. S narůstajícím množstvím těchto legur se zvyšuje korozní odolnost těchto ocelí. Mez kluzu těchto ocelí je nízká, pohybuje se od 230 do 300 MPa, na druhou stranu hodnoty houževnatosti jsou poměrně vysoké – až 240 J.cm² při -196 °C. Hodnoty tažnosti jsou pak od 45 do 65 %. Bývají též velice dobře svařitelné. Austenitické korozivzdorné oceli jsou nemagnetické, zbytkový obsah feritu však může způsobit jejich slabý magnetismus, který se může výrazněji projevit pouze na rozích součástí, opracovaných plochách či v okolí vyvrtaných děr. Široké uplatnění nachází v potravinářském průmyslu, či domácnostech,

obecně tedy tam, kde je třeba dbát na hygienu a čistotu prostředí. Austenitická korozivzdorná ocel se vyrábí v různých jakostech, a to AISI 304, AISI 304L, AISI 303, AISI 321, AISI 316L, AISI 316Ti, AISI 309 a 309 S a AISI 310 a 310 S. Firma ACO nejvíce používá oceli AISI 304 a AISI 316L, proto budou v následujících kapitolách popsány pouze tyto dvě jakosti [32, 33, 34].

6.3.1 AISI 304 (1.4301)

Ocel 1.4301 je základní korozivzdorná chrom – niklová austenitická ocel. Vyznačuje se vysokou korozní odolností v běžných podmínkách, tzn. Je odolná proti vodě a slabým kyselinám. Je lešitelná, čímž lze její korozní odolnost ještě zvýšit. Je snadno svařitelná, což je důležité při kompletaci sestav odvodnění. Svařuje se bez přídavného materiálu. Pokud je průvar větší než 5 mm, je nutné svařenec žíhat. V oblasti svaru je náchylná k mezikrystalické korozi. Její použití je vhodné maximálně do teplot kolem 450 °C, svoje mechanické vlastnosti si zachovává i při snížených teplotách. Je nekalitelná i nemagnetická. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 1.4301 jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Ocel 1.4301 lze zpracovávat stříháním, ohýbáním i tažením, lze ji i třískově obrábět. Využití nachází v potravinářském, farmaceutickém, či kosmetickém průmyslu. Lze ji také použít jako konstrukční prvek ve vodárnách nebo čističkách odpadních vod [35, 36].

Tab. 6.2: Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 1.4301 [37, 38].

Označení oceli	Chemické složení						Mechanické vlastnosti		
	C \geq [%]	Si \geq [%]	Mn \geq [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
1.4301	0,07	1,00	2,00	17,00 ÷ 19,50		8,00 ÷ 10,00	min. 210	520 ÷ 750	45

6.3.2 AISI 316L (1.4404)

Ocel 1.4404 je nestabilizovaná korozivzdorná chrom – nikl – molybdenová austenitická ocel. Je charakteristická svou vysokou odolností nejen v běžných podmínkách, ale i v chemických prostředích, jako je slaná voda, chemicky ošetřená voda v bazénech, či kyseliny (octová, mravenčí, sírová). Je svařitelná bez rizika vzniku mezikrystalické koroze, po svaření není nutné ji tepelně upravovat. Tato ocel je nekalitelná a nemagnetická, vykazuje sklon k zpevňování při tváření za studena. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli jsou uvedeny v Tab. 6.2.

Ocel 1.4404 je vhodná k tváření za studena. Používá se v chemicky náročných prostředí, jako jsou přímořská prostředí, chemický či papírenský průmysl, nebo jako konstrukční materiál (komíny) či šperky (chirurgická nerez) [39, 40].

Tab. 6.2: Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 1.4404 [37, 38].

Označení oceli	Chemické složení						Mechanické vlastnosti		
	C \geq [%]	Si \geq [%]	Mn \geq [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
1.4404	0,03	1,00	2,00	16,50 ÷ 18,50	2,00 ÷ 2,50	10,00 ÷ 12,00	min. 220	520 ÷ 680	40

Pro experimentální zkoušení maziv byla vybrána ocel 1.4301. Plech o tloušťce stěny 1 mm byl následně nastříhán na pásy o rozměru 300x25 mm. Aby nedocházelo k nadměrnému poškození zkušebního přípravku od ostré hrany plechu, způsobené stříháním, bylo provedeno její sražení. Nakonec byly tyto pásy zhruba v polovině jejich délky ohnuty na úhel 90°.

6.4 Zkoušená maziva

Pro testování maziv vhodných pro tažení korozivzdorné oceli byla, v minulých letech, shromážděna široká škála maziv, s nimiž pak byly uskutečněny experimenty při pokojových teplotách [30], [47]. Na základě výsledků těchto experimentů byla nyní, pro zkoušky za zvýšené teploty, zvolena maziva, která vykazovala nejlepší výsledky. Jedná se o maziva, která budou popsána v následujících podkapitolách.

6.4.1 Prolong 50-12

Produkt Prolong 50-12 v současné době používá společnost ACO Industries k hlubokému tažení svých výrobků. Toto mazivo vyrábí firma Triga se sídlem v České republice. Výrobce doporučuje použití maziva pro náročné operace tažení, lisování a stříhání materiálů z konstrukčních i korozivzdorných ocelí.

Prolong 50-12 je speciální, vysokotlaké parafinické mazivo, má olejovou konzistenci, a obsahuje aditiva na bázi vázaného chlóru. Jako hlavní výhody maziva dodavatel uvádí jeho vysokou trvanlivost a stabilitu, maximální pevnost olejového filmu a vysokou kvalitu povrchu. Mazivo též obsahuje vysoce produktivní EP/AW přísady [41].

6.4.2 Prolong O 3500

Produkt Prolong O 3500 vyrábí také společnost Triga. Toto mazivo je vhodné pro operace tažení, lisování a stříhání konstrukčních i korozivzdorných ocelí, stejně jako Prolong 50-12.

Mazivo Prolong O 3500 je také vysokotlaké parafinické mazivo s obsahem aditiv na bázi chlóru a EXTRA EP/AW. Výhody tohoto maziva jsou obdobné, jako u produktu Prolong 50-12, navíc toto mazivo vykazuje stálost za vyšších teplot [42].

6.4.3 AT Kalorex 650 S

Produkty AT Kalorex vyrábí česká společnost AT OIL. Toto mazivo lze použít pro obráběcí i tvářecí aplikace za snížených i vyšších teplot. Je vhodné pro zpracování těžko obrobitelných a korozivzdorných ocelí.

AT Kalorex 650 S je aditivované, polosyntetické mazivo. Obsahuje protioděrová a vysokotlaká aditiva. Navíc obsahuje vázaný chlór. Mezi jeho výhody patří vysoká kvalita

povrchu při zpracování ocelí, příznivá energetická bilance a schopnost prodloužení životnosti nástrojů.

6.4.4 AT Kalorex 1000 EP

AT Kalorex 1000 EP má shodnou oblast použití, jako mazivo AT Kalorex 650 S.

Toto mazivo obsahuje vysoce účinná EP/AW aditiva, aditiva na bázi chlóru, estery a přísady proti korozi. Hlavními výhodami tohoto maziva jsou vysoká kvalita tvářených dílů, vysoká pevnost mazacího filmu, rozměrová přesnost a vysoká trvanlivost maziva.

6.4.5 AT Editol D 140 EPS

Produkty AT Editol vyrábí také společnost AT OIL se sídlem v České republice.

Produkt AT Editol D140 EPS je specializované, vysoce aditivované mazivo určené pro objemové i plošné tváření, stříhání a ohýbání legovaných a korozivzdorných ocelí.

6.4.6 AT Editol D 040 EPS

Produkt AT Editol E 040 EPS je mazivo na bázi esteru, které je určeno pro tažení, ohýbání a stříhání ocelí vhodných ke tváření a barevných kovů. Obsahuje vysokotlaká a protioděrová aditiva a inhibitory koroze, z čehož vyplývají jeho hlavní výhody, a to ochrana proti opotřeбенí nástroje a korozní odolnost. Toto mazivo neobsahuje aditiva na bázi chlóru.

6.4.7 AT Editol D 050 EPS

AT Editol D050 EPS je též na esterové bázi a má stejné použití jako AT Editol D 040 EPS, navíc ho lze použít i pro obrábění legovaných ocelí. Vlastnosti a výhody maziva jsou stejné jako u maziva AT Editol D 040 EPS.

6.4.8 Martol EP 405 CF

Maziva značky Martol vyrábí francouzská společnost TOTAL. Jsou určena pro tvářecí operace ocelí i slitin hliníku.

Mazivo Martol EP 405 CF je vyrobeno z minerálních olejů s nízkým obsahem polyaromatických uhlovodíků. Obsahuje mazivostní, antioděrová a vysokotlaká aditiva, neobsahuje aditiva na bázi chlóru. Jako hlavní výhodu výrobce uvádí nezávadnost k životnímu prostředí a vysokou stabilitu za provozu [43].

6.4.9 Martol Soluble 130

Mazivo Martol Soluble 130 je také vyráběno společností TOTAL. Jeho využití je shodné s předcházejícím mazivem značky Martol.

Toto mazivo je vodou ředitelné, obsahuje chlorované parafíny a aditiva pro zlepšení mazacích podmínek za použití s vodou [44].

6.4.10 Atlas 3374-140

Produkt Atlas vyrábí americká společnost Quaker Chemical. Toto mazivo je vhodné pro těžké tvářecí operace za studena a protahování. Je určené pro tváření různých druhů ocelí.

Mazivo Atlas 3374-140 je syntetické mazivo bez sloučenin na bázi chlóru. Obsahuje vysokotlaká aditiva aditiva, což zajišťuje vysokou mazací schopnost i při extrémně vysokých tlacích. Dále obsahuje aditiva proti opotřebení. Dalšími výhodami tohoto maziva pak je jeho stálost i za vyšších teplot [45].

6.4.11 Wisura ZW 3356

Produkt Wisura ZW 3356 vyrábí a dodává francouzská firma FUCHS. Je určeno pro náročné tvářecí operace, speciálně pro zpracování austenitických korozivzdorných ocelí.

Toto mazivo je vysoce výkonná kapalina s obsahem vysokotlakých aditiv. Neobsahuje těžké kovy ani žádná aditiva na bázi chlóru, takže není nebezpečné pro životní prostředí [46].

Tab. 6.3: Základní vlastnosti vybraných maziv [41, 42, 43, 44, 45, 46].

Název maziva	Hustota při 20 °C [g/cm ³]	Viskozita při 40 °C [mm ² /s]	Bod vzplanutí [°C]	Nebezpečná látka
Prolong 50-12	1,05-1,25	400-100	180	chlór
Prolong O 3500	1,00-1,10	45,5-61,5	>200	chlór
AT Kalorex 650 S	0,95-1,1	22-35	150	chlór
AT Kalorex 1000 EP	0,95-1,1	20-120	150	chlór
AT Editol D 140 EPS	0,89-0,97	120-160	200	-
AT Editol D 040 EPS	0,88-0,94	30-48	200	-
AT Editol D 050 EPS	0,92-0,94	50-65,5	200	-
Martol EP 405 CF	0,96	400	250	-
Martol Soluble 130	1,3	120-140	100	chlórové parafíny
Atlas 3374-140	1,05	143	160	-
Wisura ZW 3356	0,92	370	180	chlór

6.5 Provedení experimentu

Experimentální zkoušky jednotlivých druhů maziv probíhaly v laboratoři mechanických vlastností materiálů, ÚST v areálu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Zkouška s každým mazivem se prováděla pětkrát, s výjimkou maziv, která vykazala již při prvních experimentech zcela nevyhovující výsledky.

6.5.1 Přidržovací síla

Správné nastavení přidržovací síly má zásadní vliv na průběh a velikost síly tažné. Přidržovací tlak pro tažení vpustí ve firmě ACO Industries je $p_p = 7 \text{ MPa}$.

Rozměry zkušební plochy přípravku jsou $75 \times 30 \text{ mm}$. Aby však nedocházelo k otěru hran zkušebních pásků o kolíky přípravku, byly pásky plechu nastříhány na šířku 25 mm . Rozměry kontaktní plochy přípravku a pásů plechu jsou tedy $75 \times 25 \text{ mm}$.

$$S_z = 75 \cdot 25 = 1875 \text{ mm}^2 \quad (6.1)$$

Potřebná síla pro vyvození stejného přidržovacího tlaku je pak vypočítána následovně:

$$F_{př} = p \cdot S_z = 7 \cdot 1875 = 13125 \text{ N} \quad (6.2)$$

Přidržovací síla je u zkušebního přípravku pro svou jednoduchost dosažena pomocí šroubového spojení. Byly použity šrouby M16 o pevnostní třídě 10.9, aby byly schopné přenášet tak velké zatížení. Pro jednoduchost a dostačující přesnost byly šrouby utahovány momentovým klíčem. Velikost utahovacího momentu je pak možné zjistit, známe-li velikost předpětí a průměr šroubu:

$$M = k_m \cdot F_{př} \cdot d_{šroub} = 0,2 \cdot 13125 \cdot 16 = 42000 \text{ Nmm} = 42 \text{ Nm} \quad (6.3)$$

kde: k_m ... součinitel utahovacího momentu¹ [-]

$d_{šroub}$... průměr šroubu [mm]

Jelikož každou horní čelist přípravku utahujeme čtyřmi šrouby M16, je třeba ještě celkový utahovací moment podělit právě počtem šroubů. Výsledný utahovací moment jednoho šroubu je pak:

$$M_u = \frac{M}{n} = \frac{42}{4} = 10,5 \text{ Nm} \quad (6.4)$$

6.5.2 Testování maziv

Utahování šroubů bylo prováděno momentovým klíčem. Tento momentový klíč má však minimální utahovací moment $M_{umin} = 20 \text{ Nm}$, proto byla hodnota utahovacího momentu šroubů navýšena právě na tuto hodnotu. Tomuto momentu pak odpovídá přidržovací síla:

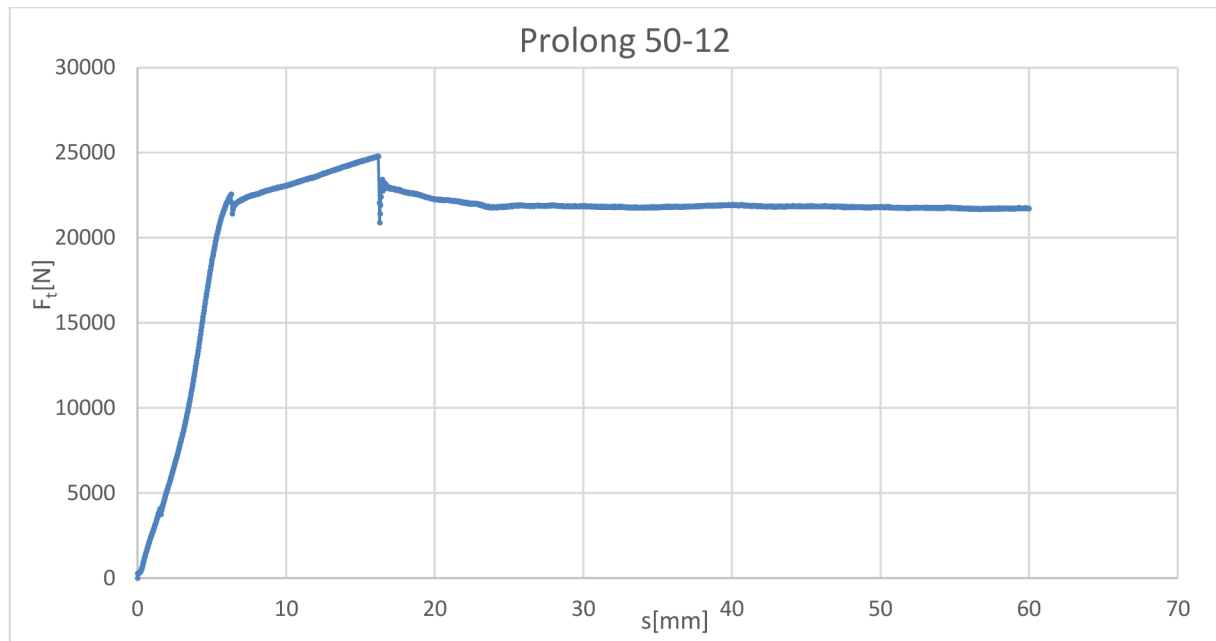
$$F_{př} = \frac{M_{umin}}{k_m \cdot d_{šroub}} = \frac{20000}{0,2 \cdot 16} = 6250 \text{ N} \quad (6.4)$$

Dalším parametrem při testování maziv byla rychlost tažení, která byla stanovena na hodnotu 100 mm/min . Tato rychlost je dostatečně nízká na to, aby bylo možné v případě zadírání či vybočení pásků okamžité zastavení průběhu tažení.

Jako poslední parametr byla teplota tažení. Měřením teploty v běžném procesu bylo zjištěno, že teplota během procesu tažení dosahuje hodnot až 150 °C . Proto byl přípravek po sestavení (včetně namazaného pásku) vložen do žihací pece na dobu přibližně 10 minut, aby byl důkladně ohřát na tuto teplotu. Aby nedocházelo k rychlému chladnutí přípravku během procesu tažení, byla pak ve skříni přípravku ještě umístěna žihací dečka, která sloužila k udržení teploty, jak bylo již uvedeno v kapitole 6.1.

¹ Pro šrouby bez definované úpravy povrchu $k = (0,18 \div 0,20)$

Jako referenční mazivo pro celou zkoušku bylo vybráno mazivo Prolong 50-12, které se v současné době používá ve firmě ACO Industries pro tažení výtahů z oceli 1.4301. Právě proto je toto mazivo bráno jako referenční oproti ostatním mazivům. V grafu 6.1 je znázorněn průběh tažné síly F_t na dráze tažení.

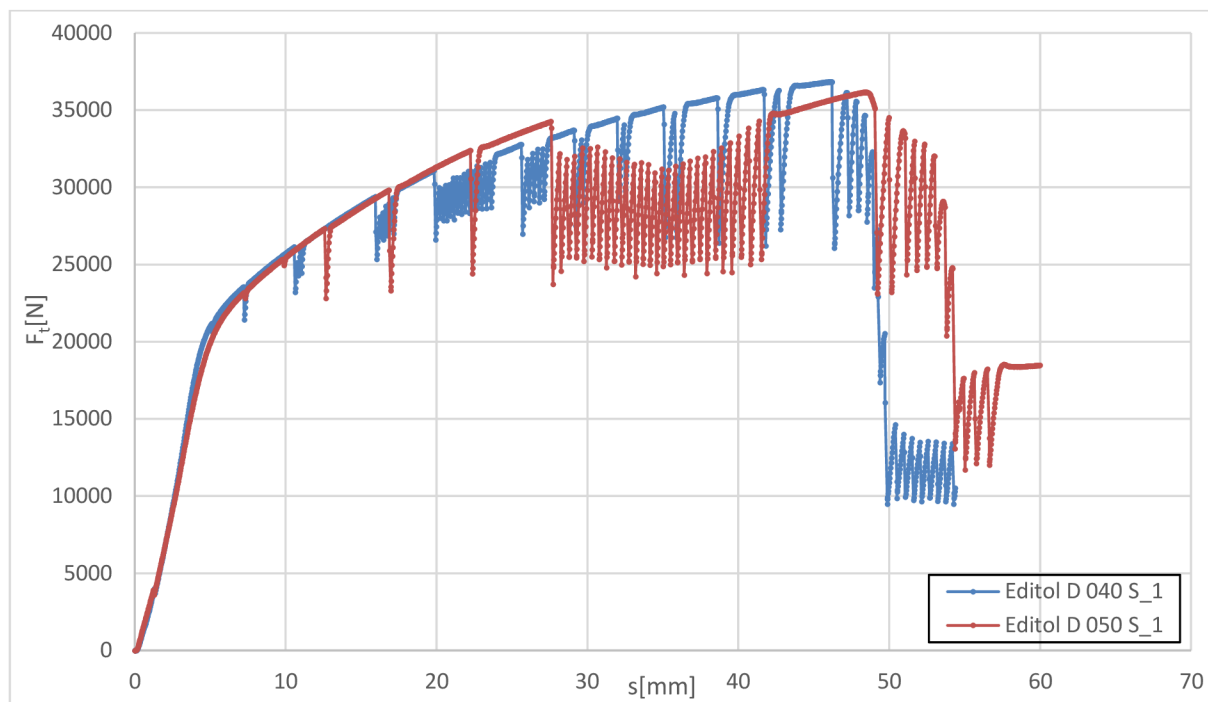


Graf 6.1: Výsledek průběhu síly maziva Prolong 50-12.

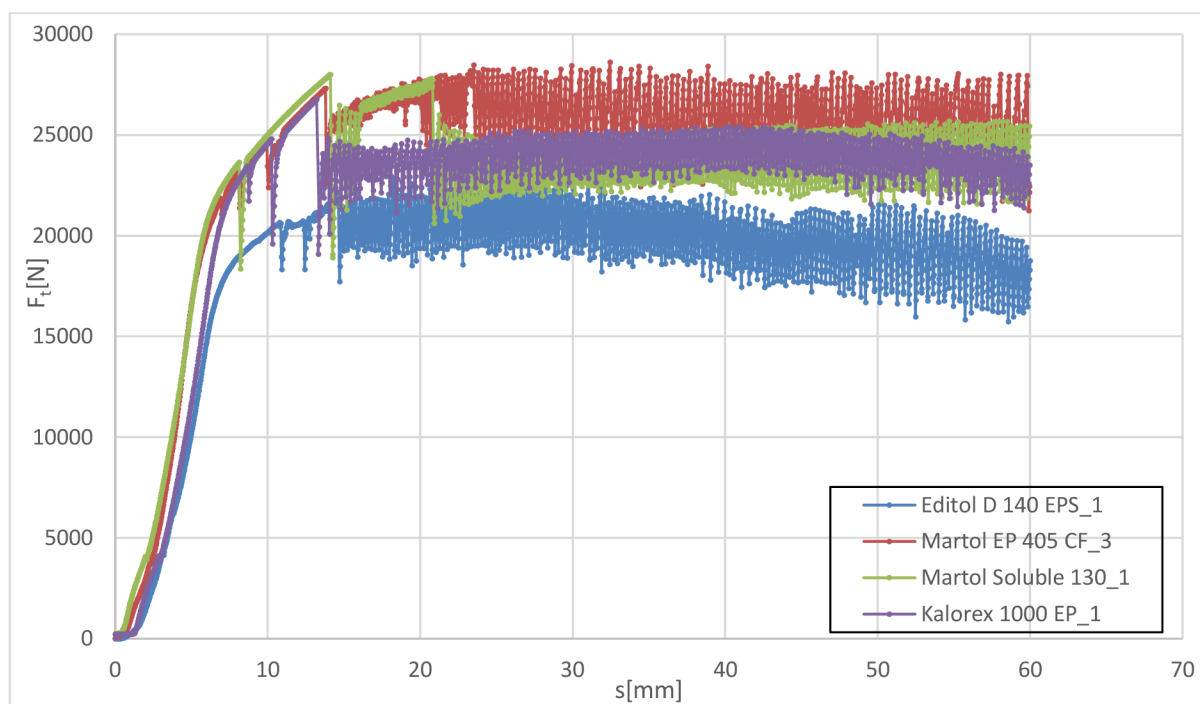
Jak je z grafu 6.1 patrné, byla síla potřebná pro protahování pásku plechu po celou dobu experimentu konstantní, kde je její velikost cca 22000 N. Z prakticky plynulého průběhu síly je zřejmé, že nedocházelo k zadírání plechu. Nespojitosti průběhu křivky, které se vyskytují v počáteční fázi zkoušky, jsou důsledkem kalibrace rádiusu ohnutého plechu na tažné hraně a nejsou projevem zadírání plechu.

Jako zcela nevhodná maziva pro tažení oceli 1.4301 byla vyhodnocena maziva AT Editol D 040 S a AT Editol D 050 S, která neobsahují přísady na bázi chlóru. Z grafu 6.2 je zřejmé, že tažná síla dosahovala maximální hodnoty kolem 36500 N, kdy také došlo k přetržení zkoušeného pásku plechu. Dále je v grafu zřejmý také značný rozkmit, což způsobovalo právě značné zadírání pásku plechu.

Jako další nevhodná maziva pro tažení oceli 1.4301 byla vyhodnocena maziva AT Editol 140 EPS, Martol EP 405 CF, Martol Soluble 130 a Kalorex 1000 EP, kde maziva AT Editol a Martol EP jsou maziva bez přísad na bázi chlóru. V grafu 6.3 je vidět, že všechna čtyři maziva vykazují značný rozkmit, tedy zadírání. Z grafu je také zřejmé, že tažná síla s použitím maziva AT Editol D 140 EPS je menší než při použití referenčního maziva Prolong 50-12. Z důvodu zadírání však bylo mazivo vyhodnoceno jako nevhodné.



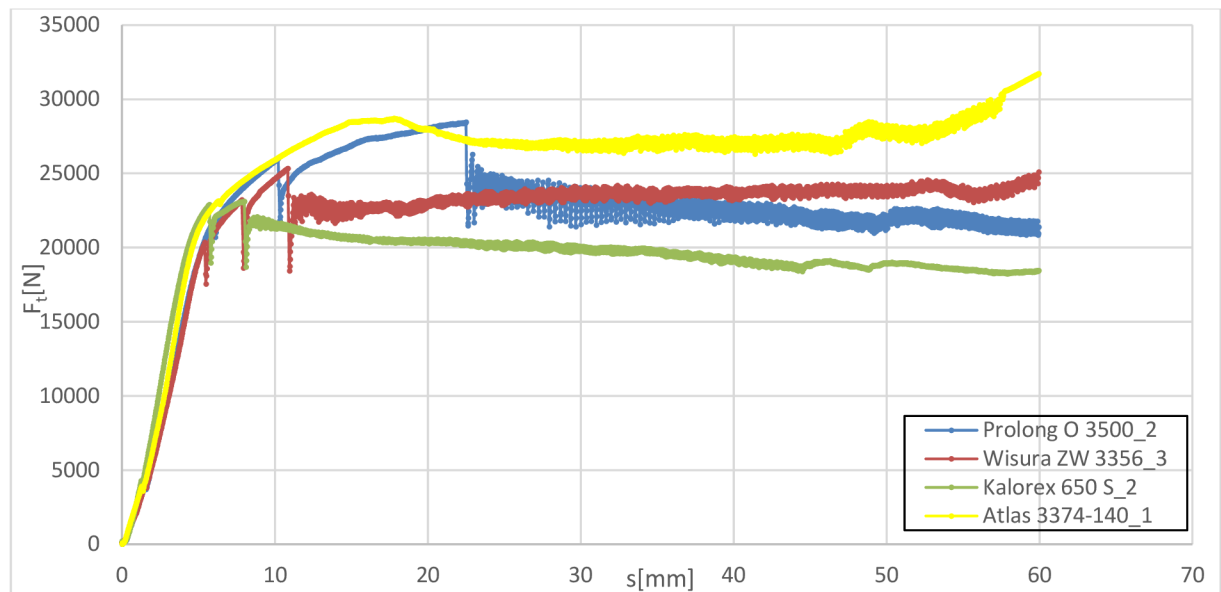
Graf 6.2: Zcela nevhodná maziva pro tažení oceli 1.4301.



Graf 6.3: Další nevhodná maziva pro tažení oceli 1.4301.

Jako maziva vhodná pro tažení oceli 1.4301 byla vyhodnocena maziva Prolong O 3500, Wisura ZW 3356, AT Kalorex 650 S a Atlas 3374-140, viz graf 6.4. U těchto maziv byl zaznamenána nejmenší míra rozkmitu, z čehož je zřejmé, že se tato maziva nezadírala. Maziva s nejmenším rozkmitem pak jsou Wisura ZW 3356 a AT Kalorex 650 S, kdy u maziva AT Kalorex byla zaznamenána i nejmenší tažná síla, tudíž se toto mazivo hodnotí jako

nejlepší varianta. Jako nejlepší mazivo bez přísad na bázi chlóru je pak vyhodnoceno pouze mazivo Atlas 3374-140. Z grafu 6.4 je však zřejmé, že u maziva Atlas byla naměřena větší tažná síla než u maziv s přísadami na bázi chlóru.



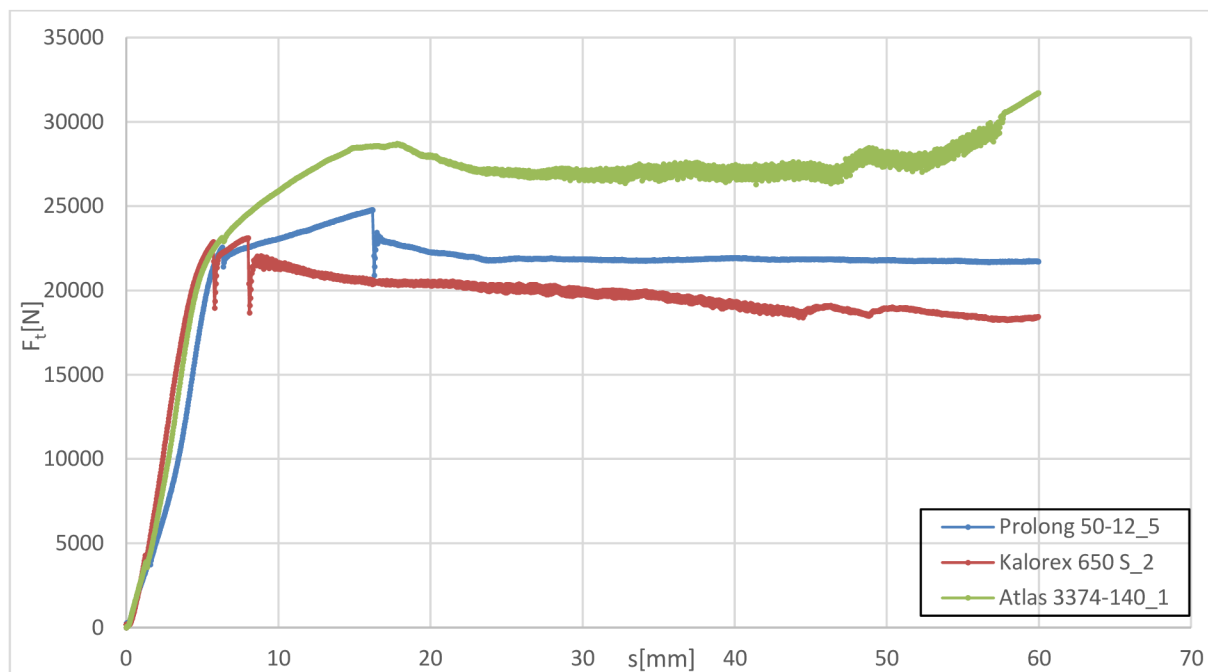
Graf 6.4: Maziva vhodná pro tažení oceli 1.4301.

6.6 Zhodnocení výsledků

Graf 6.5 představuje srovnání referenčního maziva Prolong 50-12 s nejlépe vyhodnocenými mazivy. Při tažení pásků plechu s mazivem Prolong 50-12 nedocházelo k téměř žádnému zadírání a tažná síla dosahovala maximální hodnoty téměř 25000 N. U maziva AT Kalorex 650 S byla zjištěna menší maximální tažná síla než u maziva Prolong 50-12, naproti tomu alejevilo větší náchylnost k zadírání. Z ekologických maziv dosáhlo nejlepších výsledků mazivo Atlas 3374-140, kde byla naměřena maximální tažná síla téměř 32000 N. Toto mazivo bylo také mírně náchylné k zadírání. Maximální hodnoty tažné síly a míra zadírání jsou shrnuty v tab. 6.4.

Tab. 6.4: Porovnání nejlépe vyhodnocených maziv.

Název maziva	Tažná síla [N]	Míra zadírání
Prolong 50-12	24801	téměř žádné
AT Kalorex 650 S	23118	téměř žádné
Atlas 3374-140	31714	mírné



Graf 6.5: Nejlépe vyhodnocená maziva.

Obr. 6.7 znázorňuje poškození pásku plechu od tažné hrany, kde je toto poškození nejvýraznější. Příčinou tohoto poškození je způsob mazání pásků plechu, kdy vzniká na tažné hraně pouze mezní mazání, tudíž dochází ke styku třecích povrchů a následně k jejich poškrábání. V některých případech nachází korozivzdorné oceli své využití i pro svůj lesklý vzhled, proto je toto poškrábání nežádoucí a je třeba zavést proti těmto vlivům opatření.

Obr. 6.8 pak znázorňuje plastickou deformaci pásků plechu, a to jejich mírné protažení a odpružení. Tyto deformace však nemají žádný vliv na průběh a výsledky zkoušení maziv, proto jim není věnována pozornost.



Obr. 6.7: Poškození pásku plechu.



Obr. 6.8: Plastická deformace pásku plechu.

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro ekonomické zhodnocení maziv je zapotřebí nejprve určit vstupní parametry, které ovlivňují celkové náklady provozu stroje. Mezi tyto parametry se tedy řadí roční spotřeba maziv, jednotková cena jednotlivých maziv, náklady na provoz stroje a náklady na údržbu stroje. Další známé údaje jsou údaje o strojích, kde počet strojů $n_p = 3$, instalovaný příkon jednoho lisu P je 125 kVA a maximální tažná síla jednoho lisu F_L je 250 kN. Roční časový efektivní fond, kdy je délka směny 7,5 hodin, pracuje se na 2 směny, počet pracovních dní v roce je 252 a koeficient plnění norem je 0,85, je vypočítán v rovnici 7.1. Roční spotřeba maziva je pak 1175 l. V tab. 7.1 jsou uvedeny ceny vybraných maziv.

$$F_{ef} = h \cdot S \cdot d \cdot k_{pn} = 7,5 \cdot 2 \cdot 252 \cdot 0,85 = 3213 \text{ hod.} \quad (7.1)$$

Tab. 7.1: Cena jednotlivých maziv

	Prolong 50-12	AT Kalorex 650 S	Atlas 3374-140
Cena maziva [Kč/l]	132	158	90

V následujících podkapitolách budou vypočítány roční náklady pro vybraná maziva.

7.1 Prolong 50-12

Roční nakupované množství oleje Q je 1175 l. Cena C_P za jeden litr maziva Prolong 50-12 pak je 132 Kč/l. Náklady na nákup maziva Prolong pak jsou:

$$N_{C1} = C_{P1} \cdot Q = 132 \cdot 1175 = 155100 \text{ Kč} \quad (7.2)$$

Maximální tažná síla maziva Prolong 50-12, z tab. 6.4, je 24801 N. Procentuální využití síly lisu pak je:

$$\mu_{F1} = \frac{F_{TAžmax1}}{F_L} \cdot 100 = \frac{24801}{250000} \cdot 100 = 9,92 \% \quad (7.3)$$

Z instalovaného příkonu stroje P , využití síly lisu a ceny elektrické energie C_E , kdy jedna kWh provozu stroje stojí 1,97 Kč a koeficient energetických ztrát je $k_z = 1,1$, lze vypočítat náklady na provoz strojů:

$$N_{P1} = P \cdot \mu_{F1} \cdot k_z \cdot F_{ef} \cdot C_E \cdot n_p = 125 \cdot 0,0992 \cdot 1,1 \cdot 3213 \cdot 1,97 \cdot 3 = 259007,6 \text{ Kč} \quad (7.4)$$

Roční náklady na údržbu nástrojů byly zjištěny z oddělení údržby nástrojů společnosti ACO Industries.

$$N_{U1} = 166667 \text{ Kč}$$

Po součtu jednotlivých nákladových položek jsou pak získány roční náklady při provozu strojů, za použití maziva Prolong 50-12.

$$N_1 = N_{C1} + N_{P1} + N_{U1} = 155100 + 259007,6 + 166667 = 580774,6 \text{ Kč} \quad (7.5)$$

7.2 AT Kalorex 650 S

Výpočet celkových ročních nákladů pro mazivo AT Kalorex 650 S je stejné jako pro mazivo Prolong 50-12. Cena maziva AT Kalorex, dle tab. 7.1, je 158 Kč/l.

$$N_{C2} = C_{P2} \cdot Q = 158 \cdot 1175 = 185650 \text{ Kč} \quad (7.6)$$

Dle tab. 6.4 je maximální tažná síla lisu 23118 N, procentuální využití síly lisu je pak:

$$\mu_{F2} = \frac{F_{TA\check{z}max2}}{F_L} \cdot 100 = \frac{23118}{250000} \cdot 100 = 9,25 \% \quad (7.7)$$

Náklady na provoz strojů tedy odpovídají:

$$\begin{aligned} N_{P2} &= P \cdot \mu_{F2} \cdot k_z \cdot F_{ef} \cdot C_E \cdot n_p = 125 \cdot 0,0925 \cdot 1,1 \cdot 3213 \cdot 1,97 \cdot 3 \\ &= 241514,2 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (7.8)$$

Roční náklady na údržbu nástrojů vychází z referenčního maziva Prolong 50-12, kdy odpovídaly hodnotě $N_{U1} = 166667 \text{ Kč}$. Za předpokladu, že tažná síla při použití maziva AT Kalorex je 0,93krát nižší než při použití maziva Prolong, lze říci, že mazivo s nástroji nebude tolik namáháno. Náklady na údržbu nástrojů se tedy sníží.

$$N_{U2} = 0,93 \cdot 166667 = 155000,3 \text{ Kč}$$

Po sečtení jednotlivých nákladových položek je jsou pak celkové náklady:

$$N_2 = N_{C2} + N_{P2} + N_{U2} = 185650 + 241514,2 + 155000,3 = 582164,5 \text{ Kč} \quad (7.9)$$

7.3 Atlas 3374-140

Celkové náklady pro mazivo Atlas 3374-140 jsou vypočítány analogicky s předchozími mazivy. Dle tab. 7.1 je cena maziva Atlas 90 Kč/l.

$$N_{C3} = C_{P3} \cdot Q = 90 \cdot 1175 = 105750 \text{ Kč} \quad (7.10)$$

Z tab.6.4 je maximální tažná síla lisu 31714 N. Procentuální využití síly lisu je tedy:

$$\mu_{F3} = \frac{F_{TA\check{z}max2}}{F_L} \cdot 100 = \frac{31714}{250000} \cdot 100 = 12,69 \% \quad (7.11)$$

Náklady na provoz strojů jsou tedy:

$$\begin{aligned} N_{P3} &= P \cdot \mu_{F3} \cdot k_z \cdot F_{ef} \cdot C_E \cdot n_p = 125 \cdot 0,1269 \cdot 1,1 \cdot 3213 \cdot 1,97 \cdot 3 \\ &= 331331,3 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (7.12)$$

Roční náklady na údržbu nástrojů vychází opět z referenčního maziva Prolong 50-12. Při použití maziva Atlas je maximální tažná síla 1,28krát vyšší než při použití maziva Prolong, tudíž budou tažné nástroje více opotřebovávány. Náklady na údržbu nástrojů budou tedy vyšší.

$$N_{U3} = 1,28 \cdot 166667 = 213333,8 \text{ Kč}$$

Celkové náklady při provozu strojů s mazivem Atlas 3374-140 pak tedy budou:

$$N_3 = N_{C3} + N_{P3} + N_{U3} = 105750 + 331331,3 + 213333,8 = 650415,1 \text{ Kč} \quad (7.13)$$

7.4 Zhodnocení maziv

Z uvedených výpočtů je zřejmé, že celkové roční náklady jsou nejnižší při použití maziva Prolong 50-12, nejvyšší pak při použití maziva Atlas 3374-140. Celkové roční náklady pro mazivo AT Kalorex 650 S jsou pouze o cca 1400 Kč vyšší, než u maziva Prolong 50-12. Je tedy zřejmé, že ekonomicky nejvýhodnější varianta je s použitím maziva Prolong 50-12. Výše celkových nákladů shrnuje tab. 7.2.

Tab. 7.2: Výše celkových nákladů

	Prolong 50-12	AT Kalorex 650 S	Atlas 3374-140
Celkové náklady	580774,6 Kč	582164,5 Kč	650415,1 Kč

8 ZÁVĚR

Pro zpracování experimentu byl použit přípravek navržený podle modelování tření mezi tažnou hranou a přidržovačem. Byly použity vzorky různých typů olejů od českých i zahraničních výrobců, které jsou vhodné pro tažení korozivzdorné oceli 1.4301. Kritérii hodnocení pak byla míra zadírání, velikost tažné síly a ekologická nezávadnost jednotlivých olejů.

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno na základě porovnání průběhu síly na dráze tažení pásku plechu s referenčním mazivem Prolong 50-12, za teploty kolem 150 °C. Lepších výsledků, než u referenčního maziva bylo dosaženo pouze u maziva AT Kalorex 650 S, které lze doporučit jako nejvhodnější variantu pro hluboké tažení. Toto mazivo je však ekologicky závadné. Z ekologicky nezávadných maziv dosáhlo nejlepších výsledků mazivo Atlas 3374-140. Při porovnání s referenčním mazivem však vykazuje mírné zadírání a zvýšenou tažnou sílu.

Na základě provedených experimentů lze tedy říci, že maziva obsahující přísady na bázi chlóru mají vyšší mazací schopnosti při hlubokém tažení než ekologicky nezávadná maziva.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. DVOŘÁK, Milan. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
3. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004, 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
4. Technologie II [online]. 2015 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm
5. MARCINIAK, Z. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2002, 211 s. ISBN 0 7506 5300 0.
6. MM průmyslové spektrum. TATÍČEK František, Tomáš PILVOUSEK a Martin KUBELKA. Akademie tváření: Hluboké tažení [online]. 2011. [cit. 2019-02-01]. <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hluboke-tazeni.html>
7. ŘIHÁČEK, Jan, Kamil PODANÝ a Eva PETERKOVÁ. Kapalina jako tvářecí médium. *MM průmyslové spektrum*. Praha, 2019, 2019(1, 2), 38-41. ISSN 1212-2572.
8. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
9. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01003-1.
10. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I*. Vyd. 2. Brno: VUT, 1992. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0404-3.
11. Zvláštní způsoby tváření – Strojírnoství. Strojírnoství – Vše co student potřebuje vědět [online]. 2019. [cit. 05.03.2019]. Dostupné z: <http://strojirnostvi.studentske.cz/2008/10/zvltzn-zpsoby-tven.html>.
12. Metoda Marform – Strojírnoství. Strojírnoství – Vše co student potřebuje vědět [online]. 2019. [cit. 05.03.2019]. Dostupné z: <http://strojirnostvi.studentske.cz/2008/10/metoda-marform.html>.
13. ŠAFR, Emil. *Technika mazání*. 2. doplněné vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1970, 384 s.
14. WILLIAMS, J.A. *Engineering Tribology*, New York: Oxford University Press, 1994, 488 s. ISBN 0-19-856503-8.
15. BLÁŠKOVITŠ, Pavel. *Tribológia*. Bratislava: Alfa, 1990. Edícia strojárскеj literatúry. ISBN 80-05-00633-0.
16. VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. Řada strojírnské literatury.
17. TRIBOLÓGIA: Adhezivní opotřebení: TRIBOLÓGIA: [online]. 2008. [cit. 12.03.2019]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/adhezivni-opotrebeni.html>
18. Opotřebení. POŠTA Josef. Adhezivní opotřebení. [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>
19. TRIBOLÓGIA: Abrasivní opotřebení kovových materiálů: TRIBOLÓGIA: [online]. 2008 [cit. 12.03.2019]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrasivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
20. NÁHLOVSKÝ, Ctirad. *Mazadlá a správne mazanie*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1975.

21. TRIBOLÓGIA: Výroba a druhy mazív.: *TRIBOLÓGIA*: [online]. 2008 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22014/vyroba-a-druhy-maziv.html>
22. Využití a zpracování ropy | Ropa.cz. *Ropa: Vše o těžbě, zpracování a cenách ropy* | Ropa.cz [online]. [cit. 21.03.2019]. Dostupné z: <https://www.ropa.cz/vyuziti-a-zpracovani-ropy/>
23. Ropa – Webchemie. *Úvod – Webchemie* [online]. 2005 [cit. 21.03.2019]. Dostupné z: <https://www.webchemie.cz/ropa.html>
24. STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-7836-4.
25. SLOŽENÍ OLEJŮ | DBO. *DBO* | *Úvodní strana* [online]. Dostupné z: <http://www.dbo.cz/slozeni-oleju/>
26. Choosing a lubricant for deep drawing. *The Fabricator - Metal Fabricating News, Products, Articles, and More* [online]. 2019. FMA Communications, Inc. All rights reserved. [cit. 25-03-2019]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/stamping/choosing-a-lubricant-for-deep-drawing>
27. Aditiva do maziv - Oleje.cz. *Oleje.cz - Svět maziv - motorové oleje, přísady, průmyslová maziva, eshop* [online]. 2019 Ekolube, s. r. o. [cit. 26-03-2019]. Dostupné z: https://www.oleje.cz/clanek/Aditiva_do_maziv
28. TRIBOLÓGIA. *Ekologické maziva na bázi esteru splňují vysoké technologické a ekologické požadavky*. [online]. 2008 [cit. 01.05.2019]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32012/ekologicke-maziva-na-bazi-esteru-splnuji-vysoke-technologicke-a-ekologicke-pozadavky.html>
29. BAY, N., D.d. OLSSON a J.I. ANDREASEN. Lubricant test methods for sheet metal forming. *Tribology International* [online]. Elsevier, 2008, **41**(9), 844-853 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.11.017. ISSN 0301-679X.
30. DOLEŽAL, Jan. *Maziva vhodná pro tažení nerezavějící oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63 s. 4 výkresů. CD. Vedoucí diplomové práce doc. In. Zdeněk Lidmila, CSc.
31. Odbor technologie tváření ÚST FSI VUT Brno. *ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. 2019. [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/index.php?stranka=pracoviste>
32. CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI | Italinnox. *Italinnox* [online]. 2015. Italinnox [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-1>
33. Nerezové materiály, Nerez ocel, Nerez trubky – TERAPOL s.r.o. *Nerezové materiály, Nerez ocel, Nerez trubky – TERAPOL s.r.o.* [online]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>
34. Bolzano | Charakteristika skupin korozivzdorných ocelí. *Bolzano | Úvod* [online]. 2019. [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/charakteristika-skupin-korozivzdornych-oceli>
35. Jakosti nerezových materiálů. *Nerezový materiál* | *inerez.cz* [online]. 2019. [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/>
36. NEREZOVÁ OCEL 1.4301 - INOX, spol. s r. o. *Prodej nerezového hutního materiálu - trubek, jablek, tyčí, plechů, příslušenství - INOX, spol. s r. o.* [online]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>

37. CHEMICKÉ SLOŽENÍ KOROZIVDZORNÝCH OCELÍ | Italinex. *Italinex* [online]. 2015. [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/prehled-rozmeru-a-povrchu/chemicke-slozeni>
38. MECHANICKÉ VLASTNOSTI | Italinex. *Italinex* [online]. 2015. [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/prehled-rozmeru-a-povrchu/mechanicke-vlastnosti>
39. Jakosti nerezových materiálů. *Nerezový materiál* | *inerez.cz* [online]. 2019. [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/>
40. NEREZOVÁ OCEL 1.4404 - INOX, spol. s r. o. *Prodej nerezového hutního materiálu – trubek, jablek, tyčí, plechů, příslušenství – INOX, spol. s r. o.* [online]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>
41. TRIGA. *PROLONG 50-12*. Praha, 2013.
42. CHARVÁT OIL. *PROLONG O 3500*. Zbraslavice. 2017.
43. TOTAL LUBRIFIANTS. *MARTOL EP 405 CF*. Paris, 2005.
44. TOTAL LUBRIFIANTS. *MARTOL SOLUBLE 130*. Paris, 2011.
45. QUAKER CHEMICAL. *Quaker Atlas 3374-140*. 2010.
46. FUCHS OIL CORPORATION. *WISURA ZW 3356*. Stránčice, 2006.
47. MÜCK, 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.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
A	%	tažnost
AW	-	Antiwear (protioděrové přísady)
B	mm	šířka výtažku
C	-	součinitel zohledňující vliv součinitele tažení
C	-	uhlík
C _E	Kč	cena za jednotku energie
C _p	Kč/l	cena za litr
Cr	-	chrom
d	mm	aktuální vnitřní průměr dílce
d	-	počet pracovních dní v roce
D ₀	mm	počáteční průměr dílce
d _p	mm	průměr příruby výtažku po tažení
d _{šroub}	mm	průměr šroubu
d _p	mm	elementární šířka deskového elementu
dφ	mm	elementární úhel deskového elementu
EP	-	Extreme Pressure (vysokotlaké přísady)
f	-	koeficient tření
F	-	fluor
F _{ef}	hod.	roční časový efektivní fond
F _f	N	třecí síla
F _L	N	maximální síla lisu
F _p	N	síla od přidržovače
F _{př}	N	přidržovací síla
F _{PŘETRŽENÍ}	N	síla, kdy dojde k přetržení dílce
F _T	N	tažná síla
F _{TAŽmax}	N	maximální tažná síla
h	mm	minimální výška výtažku
H	mm	výška výtažku
h	hod.	počet hodin za směnu
k _m	-	součinitel utahovacího momentu
k _{pn}	-	koeficient plnění norem
k _z	-	koeficient energetických ztrát
m	-	součinitel tažení
M	Nm	moment
Mn	-	mangan
M _o	Nm	ohybový moment
Mo	-	molybden
M _u	Nm	utahovací moment
M _{umin}	Nm	minimální utahovací moment
n	-	počet
N	Kč	náklady

N_C	Kč	náklady na množství nakoupeného oleje
N_i	-	nikl
N_P	Kč	náklady na množství spotřebované energie
N_U	Kč	náklady na údržbu
O	-	kyslík
P	VA	příkon
p_p	MPa	tlak od přidržovače
Q	l	množství
R	mm	aktuální poloměr výtažku
r	mm	poloměr zaoblení dna výtažku
R_0	mm	poloměr přístřihu
R_m	MPa	mez pevnosti materiálu
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
r_{tc}	mm	poloměr tažné hrany tažnice
r_{tv}	mm	poloměr funkční hrany tažníku
R_p	mm	poloměr neutrální plochy
S	-	směnnost
s_0	mm	počáteční tloušťka stěny
Si	-	křemík
S_T	mm ²	styčná plocha přidržovače a příruby
S_z	mm ²	zkušební plocha
u	-	součinitel pro použití přidržovače
z	mm	tažná vůle
Z	-	materiálová konstanta pro určení použitelnosti přidržovače
α	°	úhel opásání
β	-	Lodeho součinitel pro tažení
Δs	-	poměrná tloušťka
μ_F	%	procentuální využití síly lisu
ρ	mm	poloměr dílce
σ_1	MPa	hlavní tahové napětí
σ_3	MPa	hlavní tlakové napětí
σ_d	MPa	celkové deformační napětí
σ_f	MPa	napětí od tření
σ_o	MPa	napětí při ohybu
σ_p	MPa	přirozený přetvárný odpor
σ_{ps}	MPa	střední přirozený přetvárný odpor
σ_t	MPa	napětí v tečném směru
σ_p	MPa	napětí v radiálním směru