



VLIV RYCHLOSTI POSUVU A VELIKOSTI KONTAKTNÍHO TLAKU NA TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI HLUBOKOTAŽNÉHO MATERIÁLU

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jan Krejčí**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B 2301 – Strojní inženýrství

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv Rychlosti Posuvu a Velikosti Kontaktního Tlaku na Tribologické Vlastnosti Hlubokotažného Materiálu

The Influence of a Feed Velocity and Intensity of the Contact Pressure to Tribological Properties of the Deep-drawing Material

Jan Krejčí

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D. - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	56
Počet tabulek	10
Počet příloh	5
Počet obrázků	29
Počet grafů	25

Datum: 9. 7. 2014

ORIGINÁL ZADÁNÍ

ORIGINÁL ZADÁNÍ

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Vliv rychlosti posuvu a velikosti kontaktního tlaku na tribologické vlastnosti hlubokotažného materiálu

The influence of a feed velocity and intensity of the contact pressure to tribological properties of the deep-drawing material

Anotace

Tato bakalářská práce pojednává o testování tribologických vlastností při změně kontaktního tlaku a rychlosti posuvu. Výsledkem této práce je 3D graf, znázorňující závislost koeficientu tření na kontaktním tlaku a rychlosti posuvu pásku mezi dvěma kontaktními plochami. Testování je prováděno na zařízení SOKOL 400, které je umístěno v tribologické laboratoři na KSP. Pro tuto práci byl použit hlubokotažný galvanicky pozinkovaný plech s fosfátovým nánosem.

Klíčová slova: hluboké tažení, tribologie, tření, rychlost posuvu, kontaktní tlak, koeficient tření

Annotation

The bachelor thesis deals with the testing of tribological properties at the change of contact pressure and feed velocity. As a result there is 3D graph which shows the dependence of friction coefficient on the contact pressure and feed velocity of the strip between two contact surfaces. Testing was carried out on the device SOKOL 400 which is placed in the tribological laboratory of KSP. For this thesis was as a testing material used deep-drawing zinc galvanized sheet with phosphate surface layer.

Keywords: deep-drawing, tribology, friction, feed velocity, contact pressure, friction coefficient

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval zejména vedoucímu mé bakalářské práce Doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D., konzultantovi diplomové práce Ing. Michaele Kolnerové, Ph.D., Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D a celé Katedře strojírenské technologie za poskytnuté rady a pomůcky pro zpracování této bakalářské práce.

V Liberci dne 9.7. 2014

Jan Krejčí

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod	11
2 Materiály na výrobu karosářských dílů.....	13
2.1 Hlubokotažné materiály	14
2.1.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem.....	14
2.1.2 IF oceli	14
2.1.3 IF oceli s BH efektem	15
2.2 Plechy s povlaky.....	16
2.2.1 Povlaky na bázi zinku	16
2.2.2 Vytváření nosných povlaků pro mazivo fosfátováním	19
3 Tribologie.....	20
3.1 Měření povrchu	20
3.2 Tření – rozdělení	22
3.3 Procesy opotřebení	25
3.4 Maziva – vlastnosti a druhy	28
3.5 Tribologické zkoušky.....	31
4 Experimentální část.....	34
4.1 Charakteristika testovaného materiálu	35
4.2 Příprava vzorku	36
4.3 SOKOL 400.....	37
4.4 Vlastní měření	39
4.4.1 Vlastní měření $v=1\text{ mm/s}$	42
4.4.2 Vlastní měření $v=10\text{ mm/s}$	44
4.4.3 Vlastní měření $v=100\text{ mm/s}$	46
4.4.4 Vlastní měření $v=200\text{ mm/s}$	48
4.4.5 Vlastní měření $v=400\text{ mm/s}$	50
5 Doporučení a shrnutí výsledků	52
6 Závěry.....	54
Seznam literatury.....	55
Seznam příloh.....	56



Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
$A_{80\text{mm}}$	[%]	celková tažnost materiálu
C_i	[-]	hladina řezu
ČSN	[-]	česká technická norma
ΔF	[N]	rozkmit sil $\Delta F = F_h - F_l$
DIN	[-]	německá technická norma
DDQ	[-]	Deep Drawing Quality
ε	[-]	poměrné prodloužení
EG	[-]	elektrolytické nanášení povlaků na bázi zinku
EG + PH	[-]	galvanicky pozinkovaný plech s fosfát. nánosem
EN	[-]	evropská norma
FEA	[-]	finite element analysis
F_h	[N]	horní síla, která byla naměřena v ustáleném úseku měření
f	[Hz]	frekvence snímání dat
F_l	[N]	minimální síla, která byla naměřena v ustáleném úseku měření
F_{max}	[N]	maximální síla, která byla naměřena během testu
F_N	[N]	normálová síla
F_P	[N]	přidržovací síla
F_s	[N]	střední síla, která byla naměřena v ustáleném úseku měření
F_t	[N]	třecí síla
$F_{\text{Tažná}}$	[N]	tažná síla
IF	[-]	Interstitials Free Steel
ISO	[-]	mezinárodní norma
KSP	[-]	katedra strojírenské technologie
l	[mm]	délka měření
l_t	[mm]	délka měřeného úseku
l_r	[mm]	základní délka
MKP	[-]	metoda konečných prvků
p	[MPa]	kontaktní tlak
P_i	[-]	výstupek
Q	[N]	normálová přitlačná síla
R	[mm]	poloměr
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti





R_e	[MPa]	výrazná mez kluzu
R_m	[MPa]	smluvní mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
RP_c	[cm^{-1}]	počet výstupků
Rz	[μm]	výška nerovností
S	[mm^2]	kontaktní plocha třecích povrchů
T	[$^{\circ}\text{C}$]	teplota
v	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	rychlost posuvu
η	[Pa.s]	koeficient dynamické viskozity
μ	[-]	koeficient tření
Al	[-]	hliník
C	[-]	uhlík
Ca	[-]	vápník
Cu	[-]	měď
F	[-]	fosfor
Fe	[-]	železo
Mn	[-]	mangan
Mo	[-]	molybden
Ni	[-]	nikl
O	[-]	kyslík
P	[-]	fosfor
Pb	[-]	olovo
PTFE	[-]	polytetrafluorethylen – teflon
S	[-]	síra
Si	[-]	křemík
Ti	[-]	titan
V	[-]	vanad
Zn	[-]	zinek





1 Úvod

V současnosti je automobilový průmysl největším zpracovatelem hlubokotažných ocelí. Tyto oceli jsou zpracovávány formou karosářských dílů, což jsou tvarově složité výlisky nepravidelných tvarů.

Při výrobě karosářských dílů nestačí, aby výrobce zajistil dostatečné hodnoty mechanických vlastností. Musí řešit i otázku tribologie. V dnešní době je na tribologii kladen velký důraz a popsání tribologických podmínek se stává neodmyslitelnou součástí při tažení.

Pro docílení zdravého výtažku se musí hledět na tyto technologické podmínky, které velice ovlivňují proces tažení: přidržovací tlak, rychlost tažení a mazání.

Velice důležitým faktorem mimo tyto technologické podmínky je také tření mezi výtažkem a nástrojem. Při počátku tváření je síla tažníku malá a tření nemá velký vliv na průběh deformace. Postupně se ale zvyšováním síly tažení projevuje větší a větší vliv tření a narušuje tak proces hlubokého tažení. V některých místech díky tomu může dojít i k porušení výtažku. K zabezpečení tohoto problému byla zavedena bezrozměrná veličina s názvem koeficient tření, která tření definuje a lze ji experimentálně zjistit.

Koeficient tření určuje vztah mezi velikostí složek normálové a třecí síly (2). Stěžejní parametr pro zjištění koeficientu tření je tedy velikost třecí síly. Tento parametr je při lisování složitějších tvarů na mnohých místech výlisku rozdílný. Abychom docílili reálnějších výsledků, je třeba zaznamenávat celý průběh tažení a hodnoty koeficientu tření.

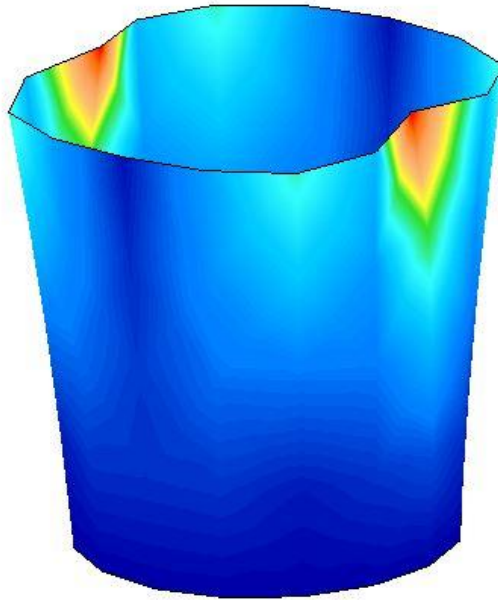
Hlavním cílem této práce je zaznamenání těchto hodnot a zpracování do přehledné podoby 3D grafu, který představuje závislost koeficientu tření na kontaktním tlaku a rychlosti posuvu pásku. K pořízení těchto záznamů bylo použito vysokorychlostní zařízení SOKOL 400 (viz kapitolu 4.3). Protahováním pásků plechu tímto zařízením simulujeme tribologickou zkoušku „Modelování mezi přidržovačem a tažnicí“ (viz kapitolu 3.5).

Na zařízení SOKOL 400 byl testován hlubokotažný galvanicky pozinkovaný plech s fosfátovým nánosem o jmenovité tloušťce 0,8 mm. V této práci je dále označován jako EG+PH (galvanized + phosphate).





Tato práce je první práce zadaná katedrou KSP, která je zaměřena přímo na sestavení již zmíněného 3D grafu. Bude sloužit k řešení problematiky tření při lisování hlubokotažných materiálů. Také při tvorbě modelové simulace u metody konečných prvků, která využívá proces známý jako FEA (finite element analysis), je koeficient tření velice důležitou informací.



Obr.1.1: Vykreslení deformace modelu postprocesorem využívajícím FEA



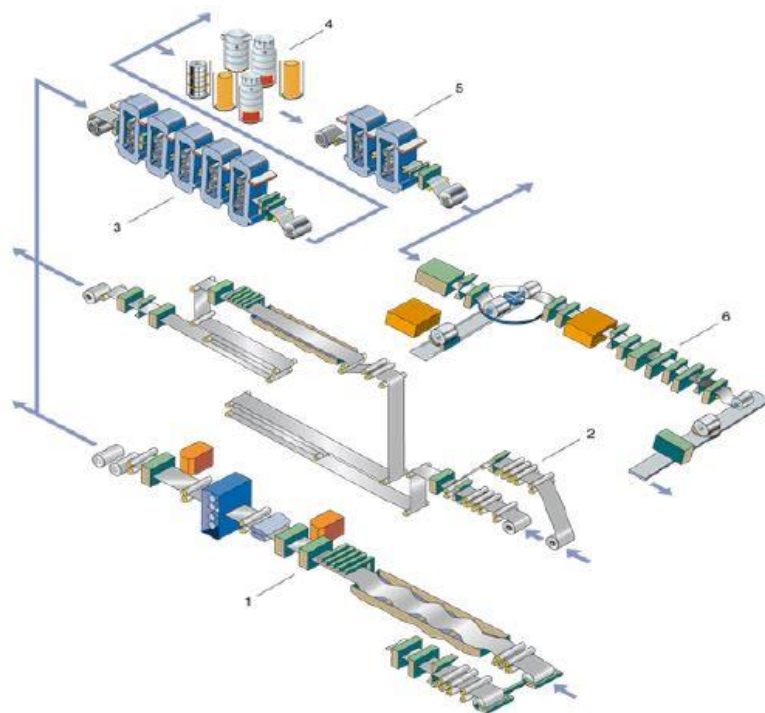
2 Materiály na výrobu karosářských dílů

Materiály na výrobu karosářských dílů jsou nedílnou součástí automobilového průmyslu. Pro tento účel používáme nejčastěji tenké ocelové plechy.

Pro výrobu těchto dílů se používá technologie válcování, která se dělí na:

- válcování za studena
- válcování za tepla

Při válcování plechů za tepla se dosahuje minimálně tloušťky plechu 4mm a slouží jako polotovary pro studené válcovací linky. Válcováním za studena se dosahuje vysoké kvality povrchu, přesnosti a výborné svařitelnosti. [1]



1) rovnací linka, 2) kontinuální mořící a odrezovací linka, 3) tandemová válcovací stolice s pěti válci, 4) žihací pece, 5) hladící válcovací stolice, 6) kontrolní linka

Obr.2.2: Schéma studené válcovací linky [2]



Pro tuto bakalářskou práci je stěžejní rozdělení plechů podle pevnosti:

- běžné hlubokotažné plechy – R_e do 220 MPa (substráty používané v této práci)
- standardní pevnostní plechy (tepelně zušlechtěné) – $R_e \div 220-300$ MPa
- vysokopevnostní plechy – $R_e \div 300-550$ MPa
- ultrapevnostní plechy – $R_e \div 550-1400$ MPa [3]

2.1 Hlubokotažné materiály

2.1.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

„Tyto materiály mají ve struktuře velmi nízký obsah intersticiálně rozpuštěného uhlíku, řádově stovky ppm. Chemická čistota jim zaručuje konzistentní mechanické vlastnosti a v kombinaci s jejich výbornou tvářitelností jsou předurčeny pro tvarově složité výlisky, na které jsou kladeny vysoké nároky i z hlediska povrchových vlastností. Pro zvýšení pevnosti se tyto ocele legují fosforem (tzv. refofosforizované ocele), nebo mikrolegují Mn, Si, Al, V, Ti apod. (mikrolegované ocele). Z hlediska svého chemického složení a čistoty není tento typ ocelí pro hluboké tažení vhodný pro nanášení ochranných zinkových vrstev metodou žárového pozinkování. Při průchodu pozinkovací lázní dochází vlivem složitých teplotních procesů k degradaci materiálu důsledkem stárnutí materiálu, které je doprovázeno změnou mechanických vlastností a tyto materiály tak nejsou schopny dosáhnout vyššího stupně tvářitelnosti než zaručuje skupina označovaná jako DDQ (Deep Drawing Quality). Hlubokotažné materiály uklidněné hliníkem jsou svými mechanickými vlastnostmi vhodné pro výrobu tvarově méně náročných výlisků.“ [4]

2.1.2 IF oceli

„Pro výrobu extrémně tvarově a rozměrově náročných výlisků byly vyvinuty oceli bez intersticií, tzv. IF ocele.“ [4] „Základní charakteristikou IF ocelí (Interstitials Free Steel), od kterého pochází i dnes již běžně používaný název, je velmi nízký obsah intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku (řádově desítky ppm) v základní feritické struktuře. Absence výrazného množství intersticiálních vad propůjčuje těmto ocelím



výbornou tvářitelnost při poměrně nízkých mechanických hodnotách. Zamezení přítomnosti intersticiálně rozpuštěných prvků uhlíku a dusíku je dosaženo pomocí mikrolegování niobem či titanem, popř. kombinací obou prvků.“ [4]

2.1.3 IF oceli s BH efektem

„Hlubokotažné materiály s BH efektem byly vyvinuty tak, aby mez kluzu byla co nejnižší a při teplotách vypalování laku karoserie došlo k navýšení meze kluzu pro zajištění dostatečné tuhosti především povrchových panelů, u kterých se tak zvyšuje odolnost proti vtlačení tzv. dent resistant. Během zpracování laku karoserie dojde k opětovnému blokování pohybu dislokací uvolněných z intersticiálních atmosfér během plastické deformace mechanismem zpětné difúze především atomů uhlíku nebo dusíku. Velikost BH efektu je z hlediska chemického složení závislá na obsahu uhlíku, manganu a síry. Dále závisí na historii tváření (válcování) za studena a na parametrech rekrytalizačního žihání. Podle výše uvedených vlivů může dojít ke zvýšení meze kluzu o 30 až 80 MPa. Z hlediska BH efektu rozlišujeme dva základní typy ocelí pro výrobu plechů.“ [4]

- ultra nízko-uhlíkové oceli s mírným přebytkem uhlíku
- celková stabilizace uhlíku niobem nebo titanem a to i po válcování za studena

V automobilovém průmyslu nejběžněji používané materiály pro stavbu karoserie (nízkouhlíkové, žárově pokovené ocele) se dělí dle normy DIN EN 10327 na 7 kvalitativních skupin označovaných jako:

DX51D Materiály pro ohýbání

DX52D Materiály pro tažení

DX53D Materiály pro hluboké tažení

DX54D Materiály pro speciální hluboké tažení

DX55D Materiály pro speciální hluboké tažení (oceli s ochrannou vrstvou Al-Si)

DX56D Materiály pro extra hluboké tažení

DX57D Materiály pro super hluboké tažení



2.2 Plechy s povlaky

Jelikož životnost novodobých automobilů je ovlivněna zejména životností karoserie, je kladen veliký důraz na korozní odolnost těchto dílů. Jednou z možností jsou povlakované plechy. Je pro ně důležitá silná vazba mezi plechem a samotnými povlaky. Povrch materiálu musí být čistý (bez okují) a vhodně upravený. Nevýhodou je ovšem problém při vytváření těchto dílů - lisování. Dochází k adhezi nástroje s povlakem a to způsobuje zadírání a porušení povlaku. [5]

2.2.1 Povlaky na bázi zinku

V automobilovém průmyslu se plechy s těmito povlaky uplatňují nejvíce. Zinek je levný, má výbornou korozní ochranu a poskytuje svými elektrochemickými vlastnostmi ocelovému podkladu katodickou ochranu. V kontaktu s ocelí totiž vystupuje jako anoda a převádí tím ocel do imunního stavu. Nevýhodou zinkových povlaků je však to, že při tažení mají sklony k zadírání. Pro zamezení této nevýhody jsou zinkované plechy opatřovány fosfátovým povrchem. [5]

Příklady některých metod vytváření ochranných povlaků:

1. Žárové pokovení - ponoření do roztaveného kovu nebo slitin kovů
Fe-Zn nebo Al-Zn
2. Elektrolytické nanášení povlaku na bázi zinku
Zn-Fe nebo Zn-Ni
3. Nanášení organických povlaků s obsahem zinku

Žárové zinkování – HDG

Tato metoda je založena na metalické reakci mezi Fe a Zn. Dosáhneme jej namočením ocelových plechů do roztaveného zinku o teplotě okolo 450°C. Vzniklý povlak je tlustý zhruba 7-200 μm.

Využívají se dva způsoby žárového zinkování, a to mokrý a suchý, ale také další speciální způsoby.



Mokrý způsob:

Výrobek je ponořen do pozinkovací vany, která je částečně vyplněna tekutým tavidlem a předměty vstupují skrz tuto vrstvu tavidla do roztaveného Zn a po odtavení tavidla dochází ke smáčení dílů v lázni. Výhoda je v tom, že není potřeba ponoru do tavidla a následného sušení, protože proces zinkování probíhá ihned a tím je vyšší účinnost tavidla, která má také kvalitní čistící účinek.[5]

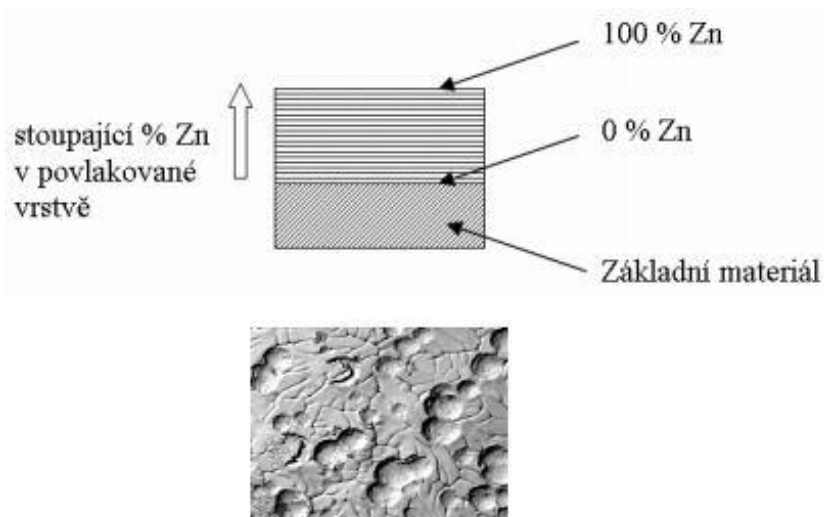
Suchý způsob:

Výrobek je namočen do roztoku tavidla, po vyjmutí usušen a následně ponořen do zinkové lázně.[5]

Speciální způsoby

-Metoda dle Senzimira

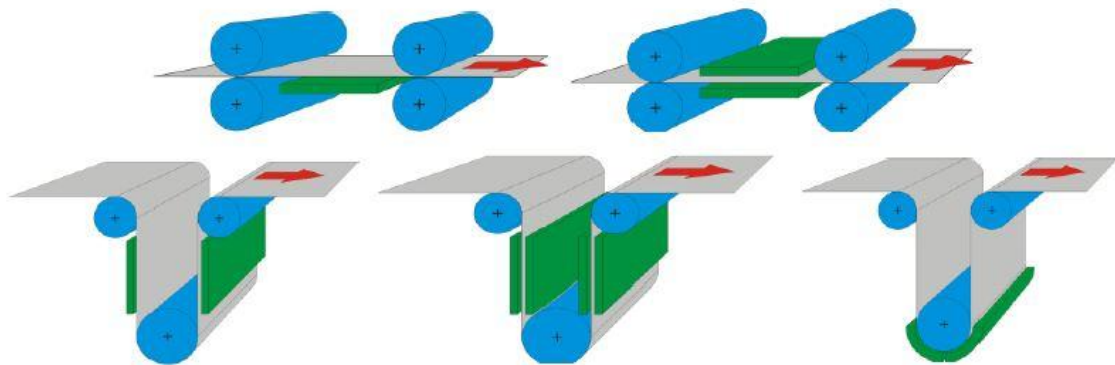
Používá se pro kontinuální pozinkování. Za studena válcovaný plech prochází oxidační zónou a plech se ohřeje ve spalínách na teplotu 350°C. Je spalována válcovací emulze a na povrchu plechu se vytváří oxid. Poté plech vchází do žhací pece, kde dojde k redukci oxidu s vodíkem na železo. Poté, co se pás plechu ochladí na 450°C, projde zinkovou lázní.[5]



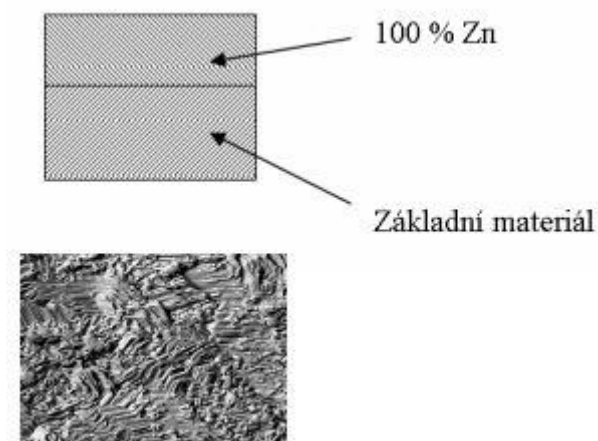
Obr.2.2.1.1: Rozložení zinku při žárovém pokovení a jeho morfologie [5]

Elektrolytické nanášení povlaků na bázi zinku – EG

Tímto způsobem povlakování lze dosahovat velice malých tloušťek (až $7\mu\text{m}$) a navíc je zaručena bezproblémová přilnavost povlaku s plechem. Lze také zinkovat jen jednu stranu plechu. Podle polohy pozinkovací komory je elektrolyt vstřikován buď středově mezi anodu a pás plechu (horizontální) nebo mezi nerozpustné anody a pás (vertikální).[5]



Obr.2.2.1.2: Uspořádání anod při galvanickém pozinkování [5]



Obr.2.2.1.3: Rozložení zinku při elektrolytickém pokovení a jeho morfologie [5]



2.2.2 Vytváření nosných povlaků pro mazivo fosfátováním

Mazivo se používá proto, aby se snížilo tření, tudíž i opotřebení nástrojů a téměř úplně se eliminovalo zadírání materiálu. Fosfátované povlaky slouží k tomu, aby lépe „nasáli“ mazadlo a oddělili tím stykovou plochu od nástroje. Všechny fosfatizační metody jsou založeny na působení kyselého vodního roztoku na povrch plechu. Povrch plechu se krystalickou vrstvou fosforečnanu nepokryje dokonale, vznikají póry a mezery, tudíž se na povrch plechu lépe „nasaje“ mazadlo. Tyto plechy vsakují mazací film až 10x lépe, než plechy bez tohoto povlaku.[6]

Jednou z, pro nás, nejdůležitějších výhod je zlepšení kluzných vlastností při tváření oceli za studena. Dále chrání proti korozi ocel, která má být na omezenou dobu uskladněna před dalším zpracováním, pokud jsou dodatečně ošetřeny olejem, voskem nebo pasivací. Důležitou výhodou je také vytvoření dobré adhezní vrstvy pro následný barevný povlak a také slouží jako elektrická izolace.[6]

Technologický proces fosfátování

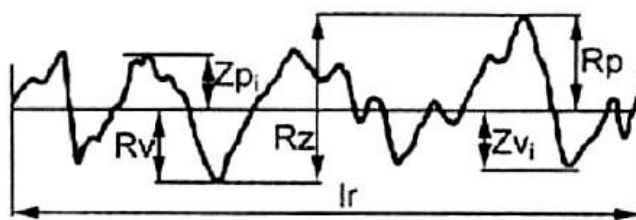
„Běžný fosfátovací proces se obecně skládá z devíti operací – odmaštění → oplach → moření → oplach → aktivace → fosfátování → oplach → pasivace → sušení. Podle stavu povrchu podkladového kovu, požadované technologie a aplikace fosfátování jsou některé kroky vynechány, popřípadě doplněny. Samotná technologie nanesení fosfatizačního roztoku se provádí prostým ponorem kovového vzorku nebo méně často postřikovou technikou.” [6]

Fosfátové povlaky

Fosfátové povlaky rozděluje norma DIN EN 12476 na základě kovového kationtu fosfatizačního roztoku na:

- Fosfátování železnaté
- Fosfátování zinečnaté
- Fosfátování zinečnato-vápenaté
- Fosfátování manganaté [7]



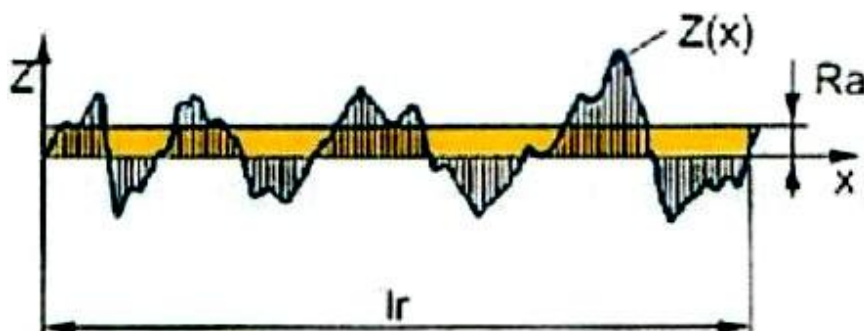


Obr.3.1.2: Schematické vyjádření maximální výšky profilu R_z [5]

Střední aritmetická hodnota drsnosti R_a :

- K posouzení struktury povrchu se v ČR přednostně používá průměrná aritmetická odchylka filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky l_r .

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (1)$$

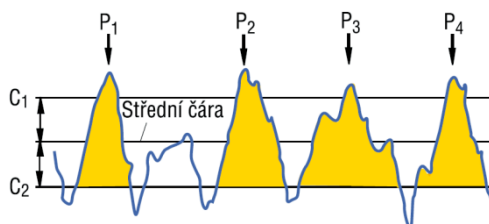


Obr.3.1.3: Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a [5]

pozn.: Střední aritmetická hodnota drsnosti R_a lze vypočítat dle vztahu (1).

Počet výstupků RP_C :

-Je to počet výstupků P_i na 10mm vztažené délky. Pro vyhodnocení je třeba zadat hladiny řezu C_1 a C_2 .



Obr.3.1.4: Schematické vyjádření počtu výstupků RP_C [5]





Měřicí přístroj:



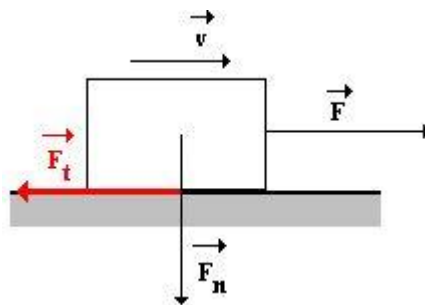
Obr.3.1.5: Přístroj na měření drsnosti MarSurf PSI

3.2 Tření – rozdělení

Zkoumání třecího procesu lze rozdělit na zkoumání na úrovni mikromolekul, kde se nahlíží na třecí proces jako na základní proces tření, nebo makromolekul, kde je sledován celý proces tváření.

Smykové tření

„Je to fyzikální jev, který vzniká při posouvání (smýkání) jednoho tělesa po povrchu jiného tělesa. Jeho původ je především v nerovnosti obou styčných ploch, kterými se tělesa vzájemně dotýkají. Nerovnosti povrchů při posouvání těles na sebe vzájemně narážejí, deformují se a obrušují. Tak vzniká třecí síla F_t , jejíž působíště je na stykové ploše obou těles a jejíž směr míří vždy proti směru rychlosti tělesa.“ [8] (viz Obr.3.2.1)



Obr.3.2.1: Vektory sil při vzájemném pohybu dvou těles [8]





$$F_t = \mu \cdot F_n \quad (2)$$

Velikost třecí síly F_t je přímo úměrná velikosti tlakové (normálové) síly F_N kolmé k podložce, po níž se těleso pohybuje (2), kde μ je součinitel smykového tření.

Tření lze rozdělit podle

- tloušťky vrstvy mazadla
- kluzné rychlosti
- koeficientu dynamické viskozity

Procesy tření

“Tření je odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru.” [5], říká jedna z nejznámějších definic. Avšak tato definice platí pouze pro vnější tření a nevystihuje přesně vnitřní tření. Proto platí: “Tření je ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo při ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí.” [5]

Nelze nikdy dosáhnout ideálních rovinností stykových ploch „nástroj-výlisek”. Ve skutečnosti se plochy stýkají jen ve vrcholcích materiálů, které jsou během procesu deformovány.

Mohou nastat čtyři základní stavy tření:

- tření tuhých těles (suché) – oba stykové materiály jsou tuhé
- tření kapalinové – vrstva mezi stykovými materiály je kapalina
- tření plyné – charakteristická vrstva má vlastnosti plynu
- tření plazmatické – charakteristická vrstva má vlastnosti plazmy

pozn.: ve skutečnosti nastává pouze kombinace těchto stavů



Suché tření

Toto tření vzniká u stykových povrchů bez jakéhokoliv maziva. Třecí součinitel dosahuje 0,5 až 1. Při tváření se téměř nevyskytuje, protože plochy jsou obvykle znečištěny. [5]

Mezní tření

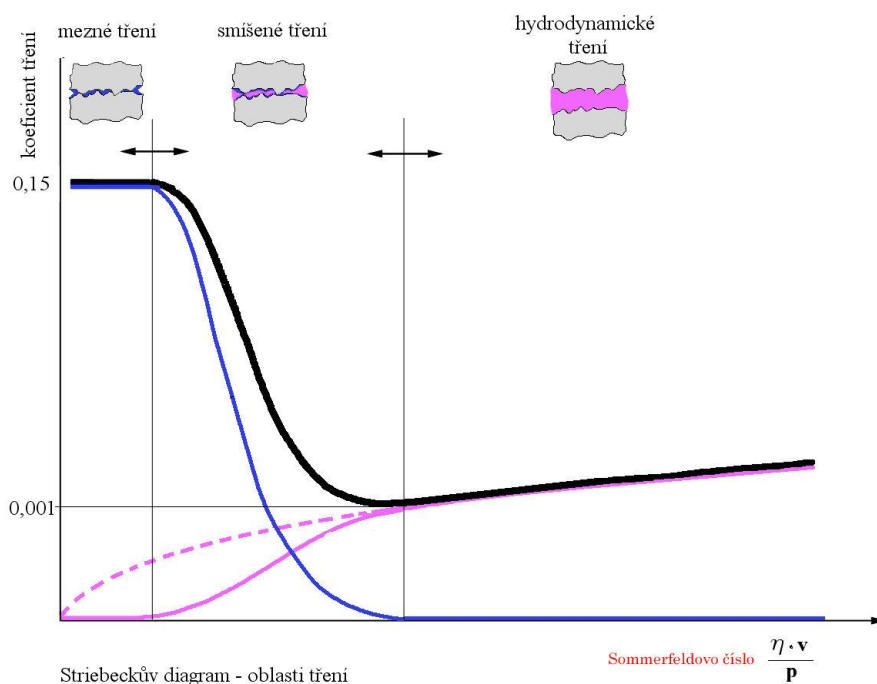
Je charakterizováno velmi tenkou vrstvou maziva ($\sim 1 \mu\text{m}$) mezi stýkajícími se povrchovými nerovnostmi. Dochází i ke styku hrotů nerovností a tím i k porušení tenkého mazacího filmu. Tenký film se neřídí zákony hydrodynamiky, ale snižuje tření a omezuje vznik svarů. [5]

Hydrodynamické tření

Obě plochy jsou dokonale odděleny vrstvou maziva, které se řídí zákony hydrodynamiky. Třecí součinitel se pohybuje okolo $\mu \sim 0,005$. [5]

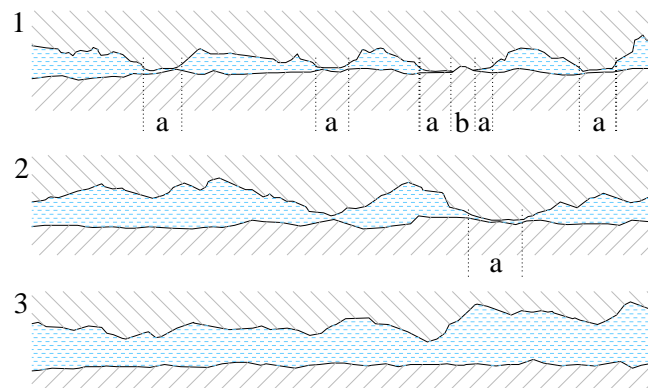
Smišené tření

Je to kombinace mezi hydrodynamického a mezního tření. Tento druh tření se při tvářecích procesech vyskytuje nejvíce. Ze Striebeckova diagramu na obr.:3.2.2 lze vyčíst, že se koeficient tření pohybuje v široké škále $\mu \sim 0,2-0,4$. [5]



Obr.3.2.2: Striebeckův diagram [9]

Jednotlivé povrchy jsou téměř dokonale odděleny mazivem, ale přesto dochází k nepatrným kontaktům mezi nerovnostmi.



1 - mezné tření, 2 - smíšené tření, 3 – hydrodynamické tření

Obr.3.2.3: Stavy tření při procesu tváření [5]

3.3 Procesy opotřebení

Definice: Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením stykových ploch, nebo ploch a média, které opotřebení vyvolává při jejich vzájemném relativním pohybu. [10]

-opotřebení můžeme z hlediska pohledu rozdělit do dvou skupin:

1. Makroskopické opotřebení – to zachycuje výrazné změny v materiálových a tvarových dvojicích
2. Mikroskopické opotřebení – zde pozorujeme základní proces lokální plastické deformace, které se koncentrují, nastává dislokace a ta vede ke vzniku trhlin

K určení velikosti opotřebení profilováním slouží Profilograf. Při této metodě se zhotoví profilogram povrchu před a po zkoušce. Při porovnání těchto záznamů se analyzuje rozdíl mezi nimi.[10]



Obr.3.3.1: Měřicí zařízení Profilograf s příslušenstvím [5]

Druhy opotřebení:

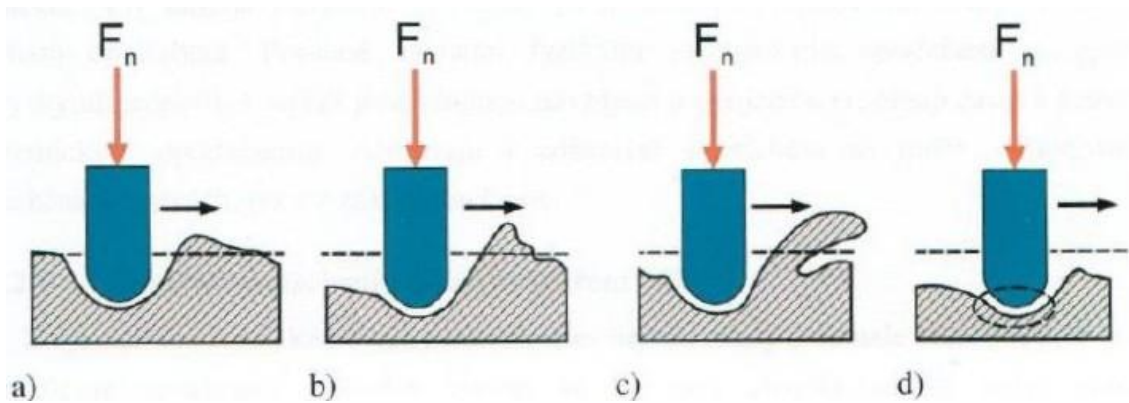
- odnosem – úbytek materiálu
- změna tvaru – vznik vtisků rýh
- zadíráním – vznik lokálních svarků

Na průběh tření má vnější třecí síla veliký vliv. Měla by mít regenerační schopnost a menší pevnost ve smyku oproti základnímu materiálu z důvodu zmenšení třecí síly. Vnější třecí vrstva by také měla mít velkou skutečnou kontaktní plochu proto, že snižuje zatížení povrchu a tím i opotřebení.[5]

Základní mechanismy opotřebení:

- a) únava elastickou deformací
- b) únava plastickou deformací
- c) opotřebení abrazí
- d) opotřebení adhezí





Obr.3.3.2: Základní mechanismy opotřebení [11]

Zadírání

Je to mezní stav tření, kdy při styku dvou ploch dochází ke vzniku mikrosvarů. Na povrchu materiálu se objevují úzké rýhy ve směru posuvu, které jsou viditelné pouhým okem. [5]



3.4 Maziva – vlastnosti a druhy

Vlastnosti:

- mazivo by mělo mít schopnost vytvářet únosné mazací filmy s optimálním koeficientem tření, který zamezí vzniku velkých třecích sil
- nemělo by být korozivní
- nevyvolávat barevné změny povrchu
- nevytvářet lepivý povrch
- zaručené a snadné odstranění z povrchů
- tepelně stálé
- nezávadné

Druhy maziv:

Podle konzistence dělíme maziva na tři druhy:

1. Kapalná maziva – V současné době nejrozšířenější druh maziv. Skládají se z 90% ze základového oleje (ropný, rostlinný, živočišný, syntetický) a z 10% z aditiv. Aditiva snižují otěr, tření a zvyšují viskozitu, odolnost proti korozi, stárnutí a oxidaci. Kapalná maziva mohou být složená i bez přísad, s přísadami nebo s tuhým mazivem. Například emulze nebo vodné roztoky sodných mýdel.[12]



Obr.3.4.1: Příklad kapalného maziva



2. Plastická maziva – Tečou jen pod vlivem síly. Oproti kapalným mají nižší součinitel tření, lepší přilnavost k povrchům a jsou odolnější proti vodě. Jsou charakterizovány velikou škálou provozních teplot a ochranou proti nečistotám. Výhodou jsou provozní náklady, jednodušší těsnění, menší nebezpečí úniku do okolí. Nevýhodou je velice nízký odvod tepla. Při tváření se používají měkká maziva. Příklady těchto maziv jsou vápenatá, sodná nebo lithná mýdla emulgovaná s minerálním nebo rostlinným olejem.[12]



Obr.3.4.2: Příklad plastického maziva [13]

3. Tuhá maziva – Nereagují při kluzném kontaktu chemicky. Třecí povrchy se od sebe oddělují fyzikálně. Fungují jako “udržovatel odstupu” (distanční tělíska). Používají se, pokud je žádoucí velmi únosný mazací film. Tyto nejvýznamnější maziva jsou například grafit nebo sirič molybdeničitý.[12]

Tabulka 1.: Přehled nejdůležitějších tuhých maziv

ČERNÁ		BÍLÁ	
Sirič molybdeničitý	MoS ₂	Hydroxid vápenatý	Ca(OH) ₂
Grafit	C	Sirič zinečnatý	ZnS
Sirič wolframičitý	WS ₂	Polytetrafluorethylen	PTFE
Fluorid grafitu	(CF _x) _n	Fluorid vápenatý	CaF ₂
		Calciumfosfát	Ca ₃ (PO ₄) ₂
		Pyrofosforečnan zinečnatý	Zn ₂ P ₂ O ₇
		Oxid olovnatý	PbO



Maziva používaná při hlubokotažném tváření:

Úlohou maziva je zmenšit třecí sílu, zamezit studeným svarům, prodloužit trvanlivost nástrojů a zajistit požadované tolerance výtažku. S ohledem na velké tlaky jde o smíšené a mezné tření. Jako maziva vhodná pro toto tváření se používají ropné cyklické oleje středně viskózní nebo méně viskózní. Například s chlorovaným tuhým parafinem nebo s přísadou tuhého maziva, rostlinné oleje, živočišné tuky nebo olejové emulze.[12]

Nanášení maziv

Každé mazivo je vyznačováno jinými vlastnostmi a proto lze rozdělit na tři druhy:

1. Konzervační mazadla (dvoufunkční) – Jsou nanášena už v hutích. Jejich hlavní funkce je konzervační schopnost. Mazací schopnost je až sekundární
2. Technologická mazadla (jednofunkční) – jsou nanášena až před vlastním tažením. Lze také přimazávat na kritická místa.
3. Prací oleje – Používají se u složitých výtažků, u kterých se požaduje vysoká kvalita povrchu.

Způsoby nanášení:

- nástřikem (trysky)
- válečkem
- praním (prací stroje – prací oleje odstraní nečistoty a konzervační olej z hutí, dále ošetří plechy pracím olejem) [7]



3.5 Tribologické zkoušky

Modelování mezi přidržovačem a tažnicí (Wojtowicz)

Je to jeden z nejrozšířenějších testů a zároveň také test používaný v této práci. Tato zkouška spočívá v protahování pásků plechu mezi dvěma čelistmi. Výhodou tohoto testu je snadné nastavení podmínek (rychlost protahování a velikost zatěžující síly F_N) a snadné měření síly F_t (třecí síla). Pro tento test KSP používá interní označení varianta 1B (viz obr 4.4.1). [5]

$$\mu = \frac{F_s}{2.Q} \quad (3)$$

F_s ...střední síla [N]

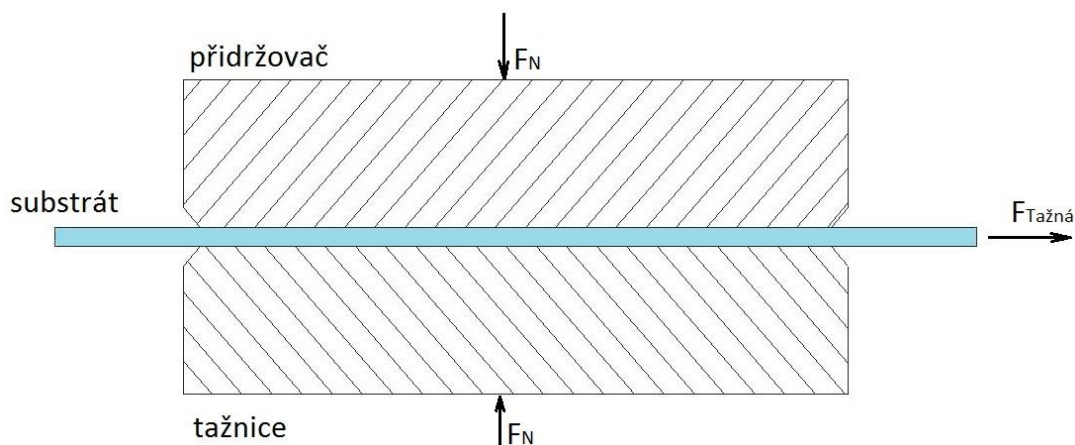
Q ...normálová přitlačná síla [N]

$$Q = p.S \quad (4)$$

p ...přítlačný tlak [Pa]

S ...kontaktní plocha čelistí [m²]

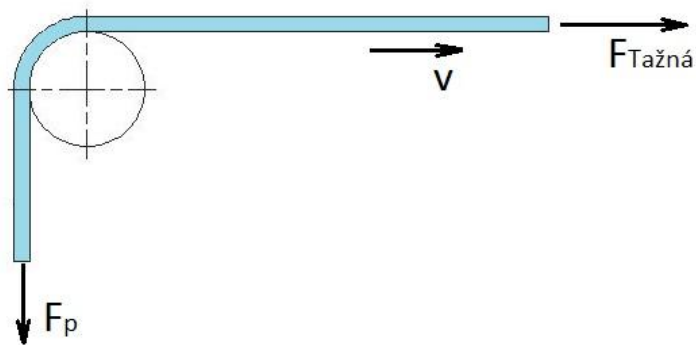
pozn.: Koeficient tření se určí dle vztahu (3).



Obr.3.5.1: Modelování mezi přidržovačem a tažnicí

Modelování tření na tažné hraně

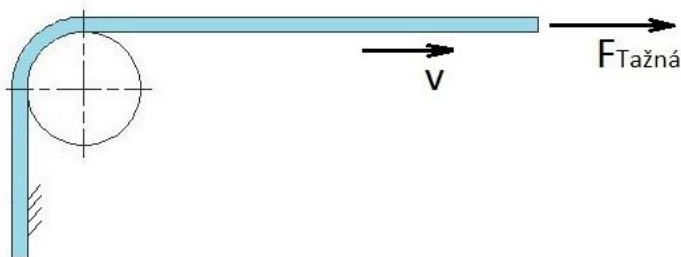
Zkušební vzorek je tažen přes tažnou hranu tažnice o poloměru R . Vzorek má rychlost $v = \text{konst.}$ Tribologické poměry se potom posuzují podle velikosti tažné síly, brzdící síly F_p , která tahá proti ní, dále podle úhlu opásání a koeficientem tření. Výhodou je snadné nastavení rychlosti protahování vzorku. Nevýhodou potom špatná kontrola kontaktního tlaku mezi tažnou hranou a vzorkem. [5]



Obr.3.5.2: Modelování tření na tažné hraně

Modelování vypínání přes tažnou hranu

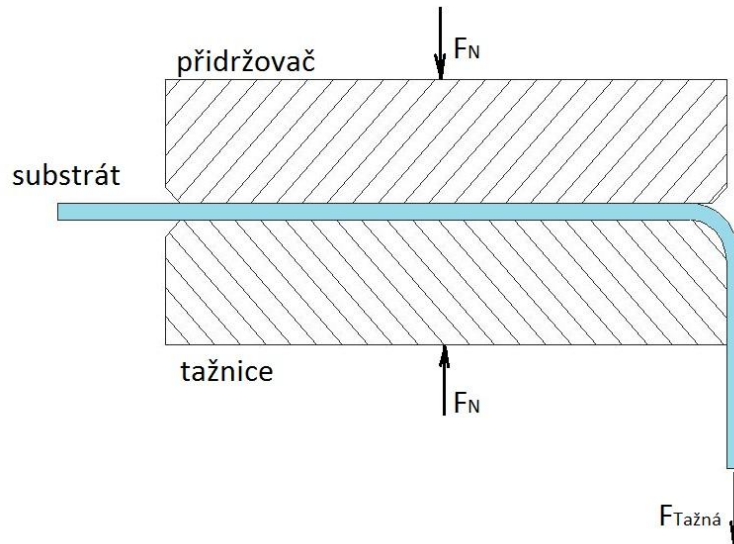
Je zde podobný princip jako u modelování tření na tažné hraně s tím rozdílem, že na jedné straně je plech pevně uchycen. Na druhé straně působí síla $F_{\text{Tažná}}$ a pohybuje se konstantní rychlostí v . Síla $F_{\text{Tažná}}$ je potřebná pro vytváření předem zvolené deformace pásku plechu. Nevýhodou je špatná nastavitelnost kontaktního tlaku a kluzné rychlosti na tažné hraně. [5]



Obr.3.5.3: Modelování vypínání přes tažnou hranu

Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou

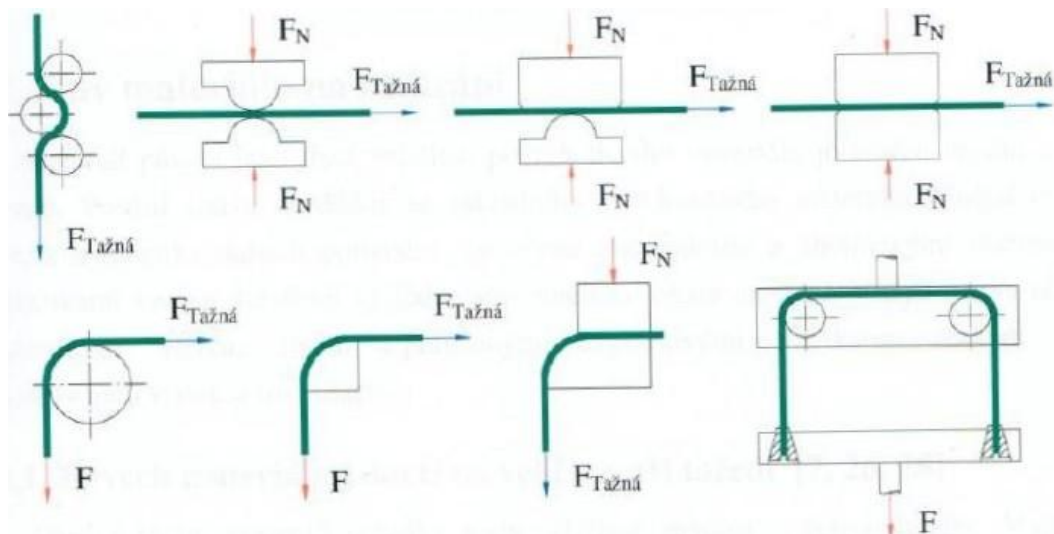
Tento test je kombinací *modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí* a *modelováním tření na tažné hraně*. Kritériem tribologických vlastností je opět velikost síly $F_{\text{Tažná}}$. KSP označuje tento test jako variantu 1A (viz obr 4.4.1). [5]



Obr.3.5.4: Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou

Další způsoby tribologických zkoušek plechů

Těchto zkoušek pro měření tribologických vlastností byla vyvinuta celá řada. Na obr.3.5.5 můžete vidět některá z nich.



Obr.3.5.5: Příklady dalších tribologických zkoušek plechů [5]



4 Experimentální část

Stanovení vlivu rychlosti posuvu a velikosti kontaktního tlaku na tribologické vlastnosti hlubokotažného materiálu při tribologickém testu je v mnohých automobilových firmách jednou velkou neznámou. Experimentální výsledky v této práci napodobují skutečnou situaci během procesu tažení karosářských výlisků.

Cíle experimentální části bakalářské práce:

- příprava vzorku pro měření
- naměření sil potřebných pro tažení fosfátovaných plechů
- výpočet koeficientů tření při tažení testovaných plechů
- doporučení do praxe a shrnutí všech výsledků

Cílem experimentální části bakalářské práce je zjištění koeficientu tření v závislosti na dvou proměnných – rychlosti posuvu a velikosti kontaktního tlaku. V obou případech se jedná o technologické parametry tváření, které se mění v průběhu tažení výlisků z plechu. Teplota při tribologickém testu byla volena jako konstanta o velikosti 40°C. Rozmezí použitých rychlostí posuvu a velikosti kontaktního tlaku při tribologickém testu odpovídá reálně dosahovaným rychlostem a nastavovaným přidržovacím tlakům při výrobě výlisků. Rychlost tak byla volena v rozsahu 1 až 400 mm/s (testováno 5 rychlostí posuvu) a kontaktní tlak v rozmezí 2 až 10 MPa (testováno 5 kontaktních tlaků). Pro testy bylo zvoleno běžně používané mazivo Anticorit PL 3802-39S v množství $1,5 \pm 0,1 \text{ gm}^{-2}$. Množství maziva odpovídá reálně dosahované tloušťce vrstvy maziva v praxi. Zkoušky byly prováděny na vysokorychlostním zařízení SOKOL 400, které se používá na KSP pro tribologické zkoušky modelování mezi přidržovačem a tažnicí. Pro testy je používán hlubokotažný, galvanicky pozinkovaný plech s fosfátovou vrstvou. Označení materiálu je podrobněji popsáno v následující podkapitole. Pro každou kombinaci zkoušek je z provedených testů následně vyhodnocován koeficient tření. Výsledné hodnoty jsou stanoveny jako hlavní kritérium při posuzování vlivu zadaných technologických podmínek (rychlost posuvu, kontaktní tlak) na tribologické vlastnosti hlubokotažného materiálu.





4.1 Charakteristika testovaného materiálu

Pro tuto bakalářskou práci byl zvolen hlubokotažný galvanicky pozinkovaný plech s fosfátovým nánosem DC 05 ZE 75/75 BPO (označení dle EN 10152) o jmenovité tloušťce 0,8 mm (tolerance rozměrů dle EN 10 143). V této bakalářské práci je dále označován jako EG+PH.

Vysvětlení označení:

- D ploché ocelové výrobky k tváření,
- C způsob válcování (za studena),
- 05 jakost oceli,
- ZE povrchová úprava (elektrolyticky pozinkováno)
- 75/75 tloušťka pozinkované vrstvy (g/m^2)
- B jakost povrchu,
- P dodatečná povrchová úprava (fosfátováno)
- O olejováno

Plech s fosfátovým povlakem mají tu výhodu, že vlivem dobrých kluzných vlastností při tváření za studena nemají sklon k zadírání (viz kapitolu 2.2.2). Pomocí tahové zkoušky byly tomuto plechu naměřeny tyto mechanické vlastnosti ve směru 0°:

$$R_{p0,2}=166,8 \text{ MPa}$$

$$R_m=283,7 \text{ MPa}$$

$$A_{80\text{mm}}=44,83\%$$

pozn.: Statická zkouška tahem je uvedena v příloze.



4.2 Příprava vzorku

1. Stříhání
2. Odmašťování vzorku
3. Měření drsnosti vzorku
4. Mazání vzorku

Tabule plechu byly nastříhány na tabulových nůžkách. Bylo nastříháno 85 pásků o rozměrech 44,5 x 1000 mm pro pět různých tlaků a pět různých rychlostí protahování. Rozměr 44,5 mm musel být přesný, aby se pásek vešel do vedení stroje SOKOL 400.

Při skladování svitků a tabulí plechu se k ošetření používají konzervační oleje. Před zkouškou je tedy nutné nastříhané vzorky odmastit. Pro odmašťování vzorků byl použit odmašťovací stroj v tribologické laboratoři.

K měření drsnosti byl použit přenosný drsnoměr MarSurf PS1 (viz kapitolu 3.1). Naměřené hodnoty drsnosti jsou uvedeny v Tabulce 2. Geometrie povrchu byla posuzována dle dvou parametrů:

- R_a – střední aritmetická hodnota drsnosti
- RP_C – počet výstupků (viz kapitolu 3.1)

Tabulka 2.: Drsnost zkoušeného vzorku

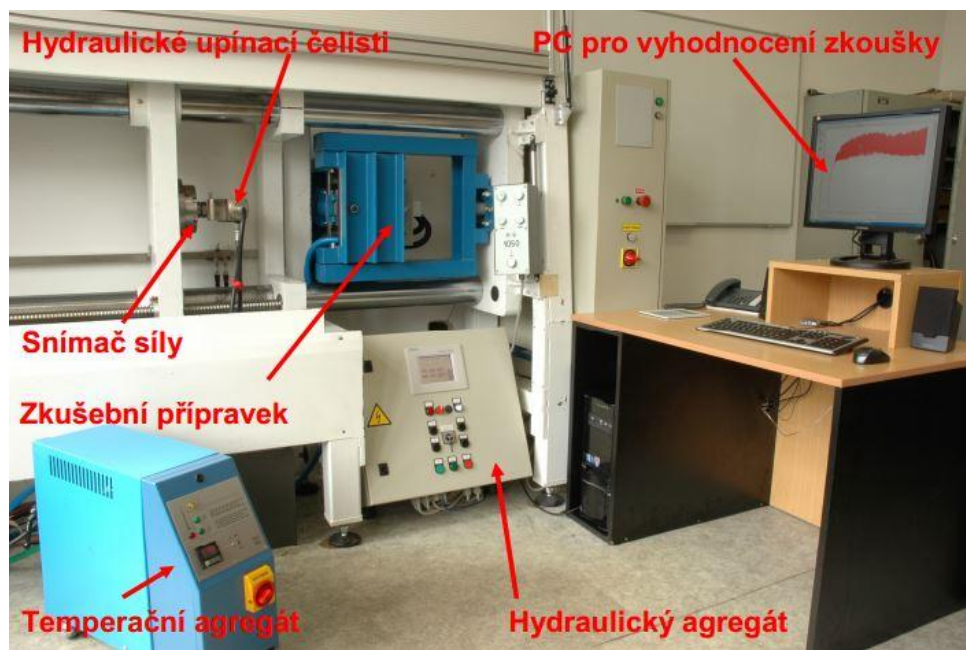
	1. strana		2. strana	
	R_a [μm]	RP_C [1/cm]	R_a [μm]	RP_C [1/cm]
1.měření	1,247	104	1,435	110
2.měření	1,427	109	1,308	103
3.měření	1,352	111	1,484	112
Průměr	1,342	108	1,409	108

Dále bylo potřeba pásky namazat tzv. Prelube mazadlem Anticorit PL 3802-39S (kombinace tažného a konzervačního oleje) kvůli snížení tření a tak napodobení reálné situace lisování. Mazadlo se nanáší potíráním pomocí textilie jím nasáklé.



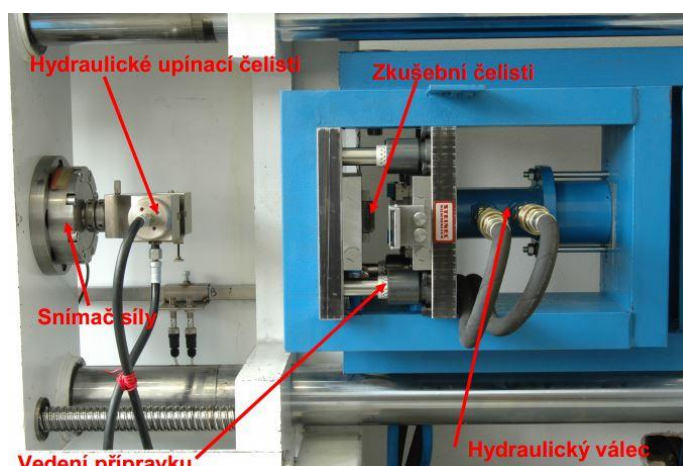
4.3 SOKOL 400

Protahováním pásků plechu tímto zařízením simulujeme tribologickou zkoušku „Modelování mezi přidržovačem a tažnicí“. Tímto zařízením je vybavena tribologická laboratoř Katedry strojírenské technologie.



Obr.4.3.1: Pracoviště zařízení SOKOL 400

Základem funkční části stroje jsou zkušební čelisti. Teplota čelistí je udržována pomocí temperančního agregátu. Tlak vyvozený čelistmi je ovládán hydraulickým agregátem.



Obr.4.3.2: Přípravek zkušebního zařízení SOKOL 400





Tabulka 3.: Technické parametry zařízení SOKOL 400

Technické parametry zařízení SOKOL 400	
Rychlost posuvu	$v = 1 - 400 \text{ mm/s}$
Maximální síla	$F_{\text{Tažná}} = 20 \text{ kN}$
Maximální kontaktní tlak	$p = 80 \text{ MPa}$
Teplota	$T = 5 - 98^\circ\text{C}$
Kontaktní plocha	$S = 3120 \text{ mm}^2 (40 \times 78)$ $S = 400 \text{ mm}^2 (20 \times 20)$
Frekvence snímání dat	$f = 10 \text{ kHz}$
Maximální měřená délka	$l = 1200 \text{ mm}$

Použité čelisti

Při tribologickém testu byly použity zkušební čelisti z tvárné litiny GGG70L bez tepelného zpracování. Pro přesnost měření byli čelisti před měřením přešetřeny.

Drsnost: 1.čelist: $R_a=0,22$, $RP_C=3$, $R_z=3,5$

2.čelist: $R_a=0,22$, $RP_C=1$, $R_z=3,95$

(viz Tabulka 4.)

Tabulka 4.: Drsnost čelistí

	1. čelist			2. čelist		
	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$RP_C [1/\text{cm}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$RP_C [1/\text{cm}]$
1.měření	0,213	2,65	1,6	0,23	4,12	1,6
2.měření	0,236	3,85	4,0	0,206	4,15	0,8
3.měření	0,206	4,00	2,4	0,214	3,57	1,6
Průměr	0,218	3,50	2,7	0,217	3,95	1,3

Kontaktní plocha: $S=3120 \text{ mm}^2 (40\text{mm} \times 78\text{mm})$



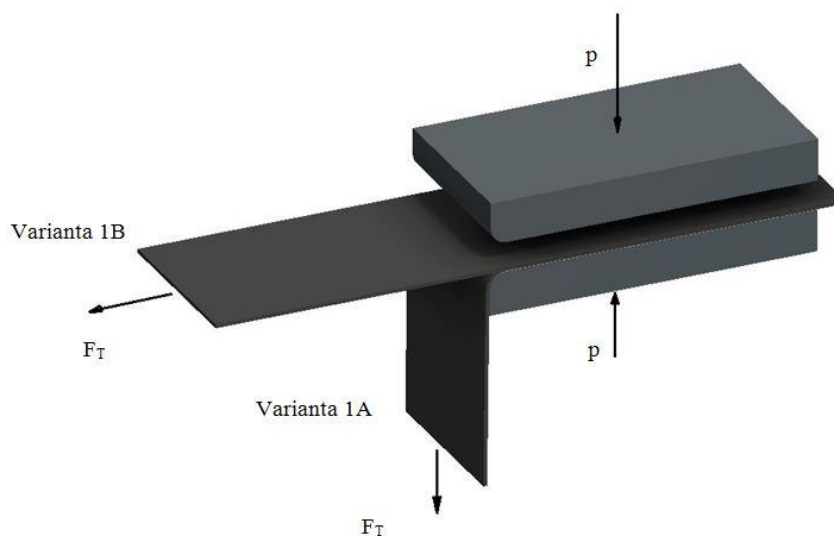
4.4 Vlastní měření

Před začátkem vlastního měření a zaznamenávání sil, bylo třeba vyleštit a ošetřit testovacím olejem čelisti stroje SOKOL 400. Dalším krokem bylo zapnutí temperančního systému, který zajišťoval ohřev čelistí na požadovanou teplotu 40°C. Při každé uvedené rychlosti posuvu bylo změněno pět různých kontaktních tlaků uvedených v Tabulce 5.

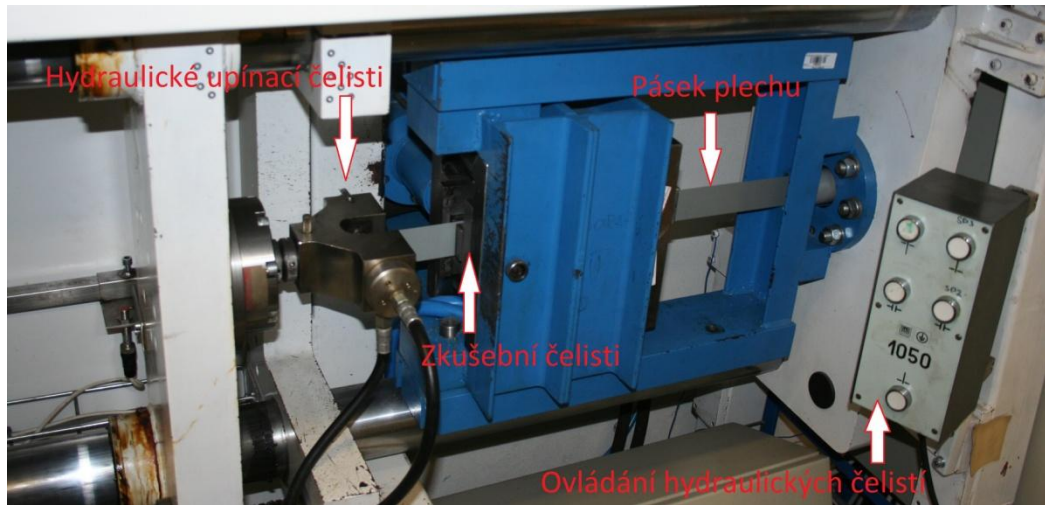
Tabulka 5.: Zadané podmínky tribologického testu

Varianta měření	1B				
Rychlost v	1 mm/s	10 mm/s	100 mm/s	200 mm/s	400 mm/s
Tlak p	2 MPa	2 MPa	2 MPa	2 MPa	2 MPa
	4 MPa	4 MPa	4 MPa	4 MPa	4 MPa
	6 MPa	6 MPa	6 MPa	6 MPa	6 MPa
	8 MPa	8 MPa	8 MPa	8 MPa	8 MPa
	10 MPa	10 MPa	10 MPa	10 MPa	10 MPa
Teplota T	40°C				
Množství maziva	1,5±0,1 gm ⁻²				

Po nastavení parametrů (rychlosti posuvů, kontaktní tlaky, teplota, se pásky s naneseným mazivem zakládaly mezi zkušební čelisti podle varianty 1B (viz Obr.4.4.1.) a konec pásku se upnul v hydraulických upínacích čelistech (viz Obr.4.4.2.).



Obr.4.4.1.: Princip zkušebního zařízení-varianta 1A a varianta 1B (viz kapitolu 3.5.)

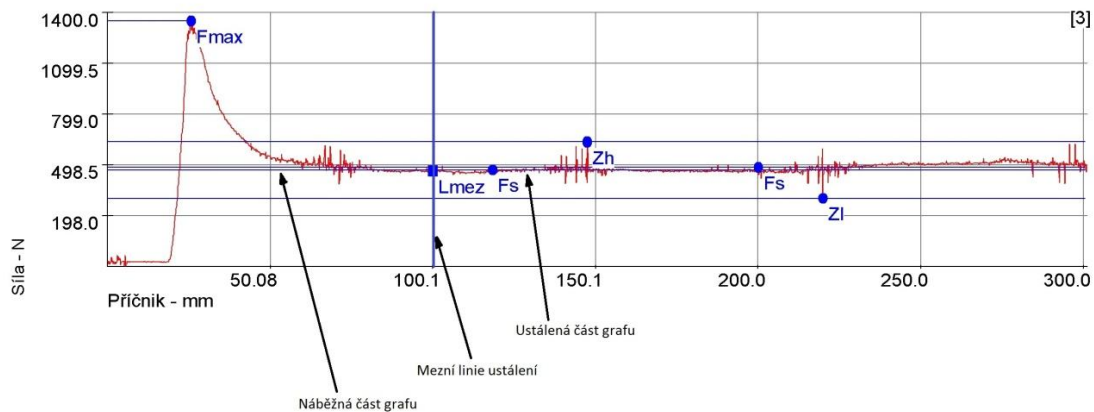


Obr.4.4.2.: Detail zařízení SOKOL 400 se zkoušeným páskem plechu

Vlastní experimentální měření probíhalo v podobě protahování pásků a zaznamenávání naměřených sil pomocí softwaru LabTest v.3.

Vyhodnocování naměřených sil - ukázka grafu

Při vyhodnocování sil pomocí programu LabTest v.3 jsou mimo hodnot v tabulkách naměřené hodnoty znázorňovány také pomocí grafu závislosti $F=f(l)$. Ukázka jednoho z těchto vykreslených grafů je znázorněna na obr.4.4.3.



Obr.4.4.3: Ukázka naměřených sil při rychlosti $v=200\text{mm/s}$ a tlaku $p=6\text{MPa}$

F_{\max} ...maximální síla

F_h ...maximální síla v ustálené části

F_1 ...minimální síla v ustálené části

F_s ...střední síla v ustálené části

V závislosti na materiálu, typu povrchové úpravy, velikosti kontaktního tlaku a rychlosti posuvu může program LabTest v.3 vykreslit čtyři různé druhy těchto grafů.

$F_{\max} > F_h$ - se Stick-slip (dochází při zadírání)

- bez Stick-slip

$F_{\max} = F_h$ - se Stick-slip (dochází při zadírání)

- bez Stick-slip

Vzhledem k použitému materiálu a na něm naneseném fosfátovém povlaku nedochází k zadírání, tudíž ani ke Stick-slip efektu. V této práci se tedy objevují jen grafy bez Stick-slip efektu.

Síla F_{\max} je největší síla v celé oblasti grafu. Při stavu, kdy dojde k adhezi v náběžné části grafu, síla F_{\max} vyznačuje maximální bod tohoto píku. Pokud nedojde k adhezi v této části grafu, síla F_{\max} se shoduje se silou F_h .

4.4.1 Vlastní měření $v=1\text{mm/s}$

Nejprve bylo na jednom kusu ocelového fosfátovaného pásku testováno pět různých přídržných tlaků (2, 4, 6, 8, 10 MPa) při rychlosti posuvu $v = 1 \text{ mm/s}$. Při takto malé rychlosti posuvu lze pro měření všech pěti tlaků použít jen jeden pásek, pokud je měřená délka pro každý tlak 100 mm z tohoto pásku. Opakovaným měřením a následným zprůměrováním těchto hodnot je dosaženo přesnějšího výsledku, tak byla tato zkouška provedena ještě na dalších čtyřech kusech při stejné rychlosti posuvu a tlaků.

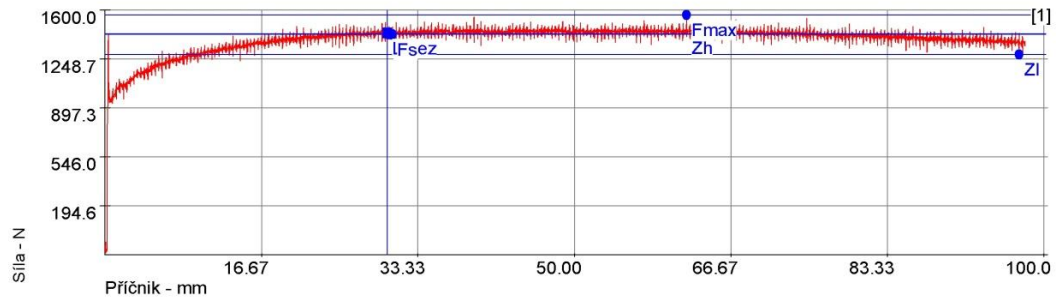
V Tabulce 6. jsou vidět naměřené hodnoty F_{\max} , F_h , F_s , ΔF a vypočtené koeficienty tření μ dle vztahu (3) a (4) pro rychlost posuvu $v=1\text{mm/s}$ při změně tlaků. V této tabulce lze vidět, že rozkmit síly není příliš velký a tudíž nedochází k zadírání. Jde jen o rozkmit vlivem nedokonalého ustálení hodnoty a také o lehké výchytky tenzometrické měřicí hlavy. Dále lze usoudit, že se zvyšujícím se kontaktním tlakem, klesá koeficient tření.

Tabulka 6.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro $\mu=f(p,v)$ $v=1\text{mm/s}$

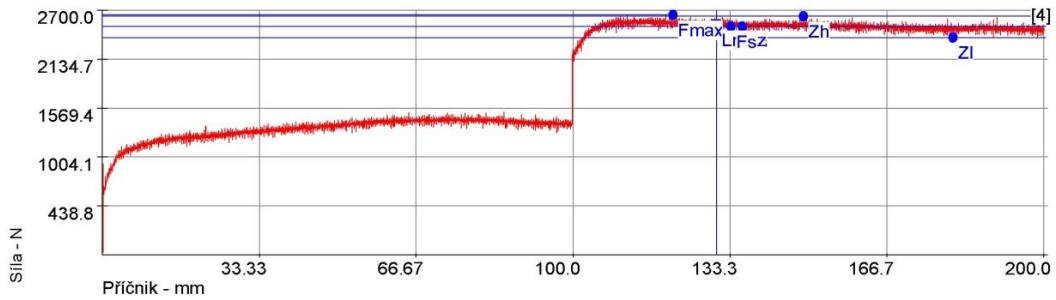
Rychlost posuvu 1 mm/s					
Kontaktní tlak p [MPa]	Maximální síla F_{\max} [N]	Maximální síla F_h [N] ustálená	Střední síla F_s [N] ustálená	Rozkmit síly ΔF [N]	Koeficient tření μ [-]
2	1538,4	1518,6	1392,4	305,8	0,11157
4	2683,8	2656,4	2531,4	256,4	0,10142
6	3693,2	3657,0	3518,8	287,8	0,09399
8	4600,0	4575,4	4424,4	289,2	0,08863
10	5420,6	5369,6	5240,4	259,0	0,08398

V následujících grafech je znázorněn vždy jeden záznam z každé kombinace vstupních parametrů (kontaktní tlak a rychlost posuvu). Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze. Grafy uvádí závislost naměřené síly [N] na délce měření [mm]. Modrá svíslá čára ohraničuje ustálenou část grafu. Při takto malé rychlosti posuvu protahovaného pásku náběžná síla nepřevyšuje výrazně maximální sílu v ustálené části F_h , tzn. neprojevuje se výrazně adhezní síla (viz GRAF 1-5).

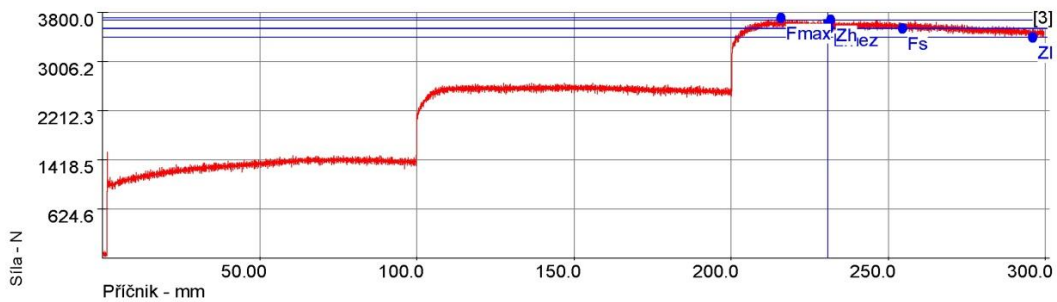




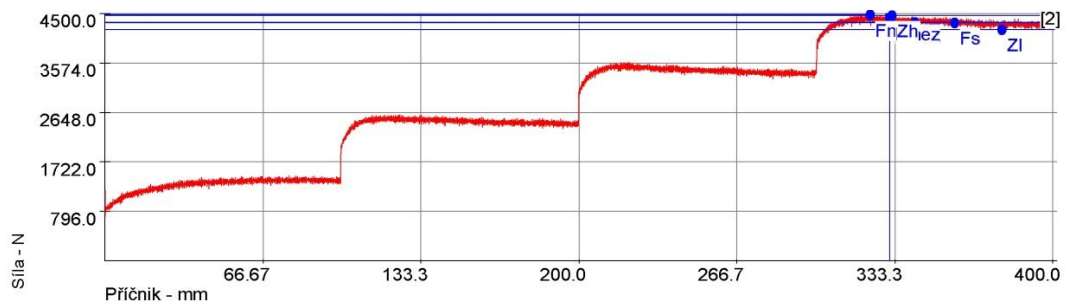
GRAF 1.: $v=1\text{ mm/s}$, $p=2\text{ MPa}$



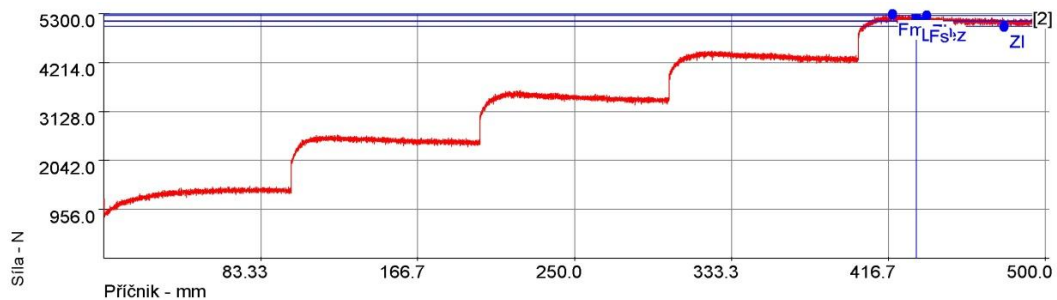
GRAF 2.: $v=1\text{ mm/s}$, $p=4\text{ MPa}$



GRAF 3.: $v=1\text{ mm/s}$, $p=6\text{ MPa}$



GRAF 4.: $v=1\text{ mm/s}$, $p=8\text{ MPa}$



GRAF 5.: $v=1\text{ mm/s}$, $p=10\text{ MPa}$





4.4.2 Vlastní měření $v=10\text{mm/s}$

Stejným způsobem jako u předchozí rychlosti bylo testováno dalších pět ocelových fosfátovaných pásků s rozdílem rychlosti posuvu, která byla změněna na hodnotu $v = 10 \text{ mm/s}$.

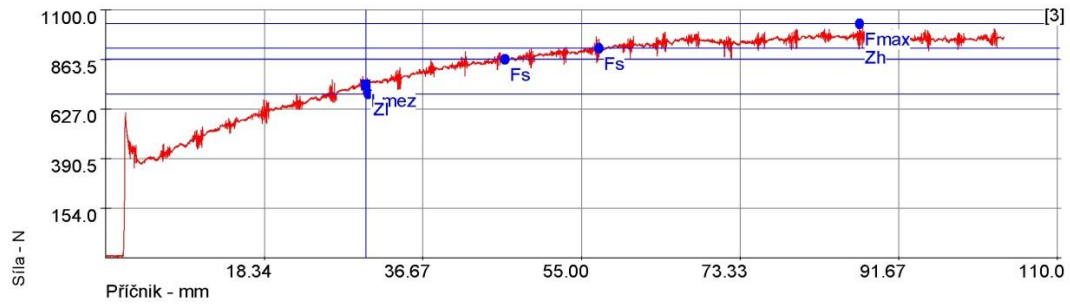
V Tabulce 7. jsou vidět naměřené hodnoty F_{\max} , F_h , F_s , ΔF a vypočtené koeficienty tření μ dle vztahu (3) a (4) pro rychlost posuvu $v=10\text{mm/s}$ při změně tlaků. V této tabulce lze vidět, že rozkmit síly není příliš velký a tudíž nedochází k zadírání. Jde jen o rozkmit vlivem nedokonalého ustálení hodnoty a také o lehké výchylykly tenzometrické měřicí hlavy. Dále lze usoudit, že se zvyšujícím se kontaktním tlakem, klesá koeficient tření.

Tabulka 7.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro $\mu=f(p,v)$ $v=10\text{mm/s}$

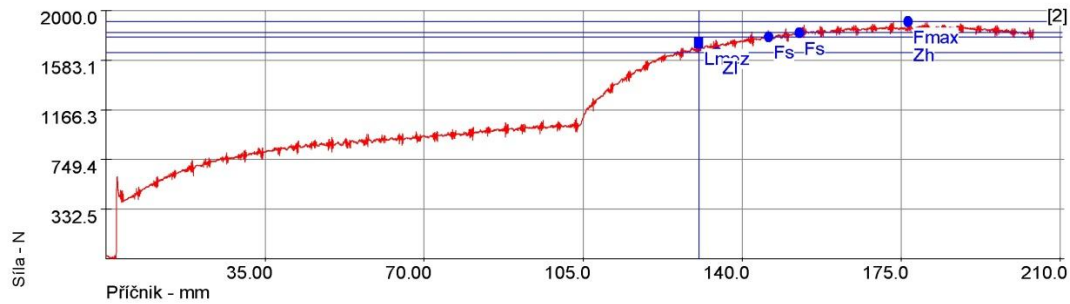
Rychlost posuvu 10 mm/s					
Kontaktní tlak p [MPa]	Maximální síla F_{\max} [N]	Maximální síla F_h [N] ustálená	Střední síla F_s [N] ustálená	Rozkmit síly ΔF [N]	Koeficient tření μ [-]
2	1015,2	1015,2	872,4	353,0	0,06990
4	1830,6	1830,6	1728,0	239,6	0,06923
6	2402,2	2402,2	2287,0	246,6	0,06108
8	2856,2	2850,2	2738,6	236,6	0,05486
10	3307,0	3280,2	3132,0	265,8	0,05019

V následujících grafech je znázorněn vždy jeden záznam z každé kombinace vstupních parametrů (kontaktní tlak a rychlost posuvu). Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze. Grafy uvádí závislost naměřené síly [N] na délce měření [mm]. Modrá svíslá čára ohraničuje ustálenou část grafu. Rychlost posuvu $v=10\text{mm/s}$ již vykazuje známky adheze. Ovšem déle trvá, než se ustálí hodnota síly F_s (viz GRAF 6-10).

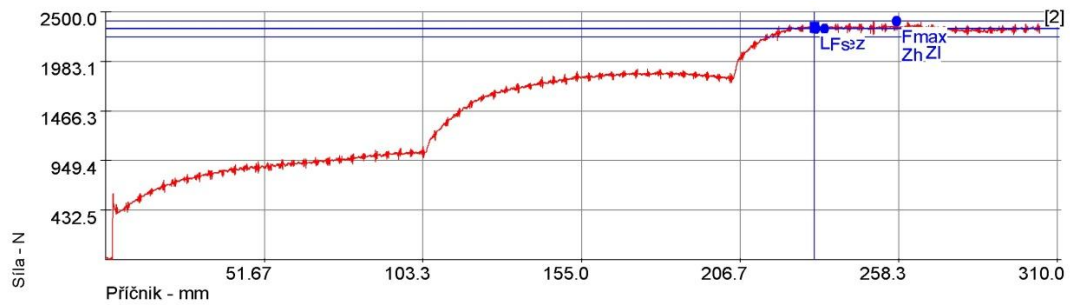




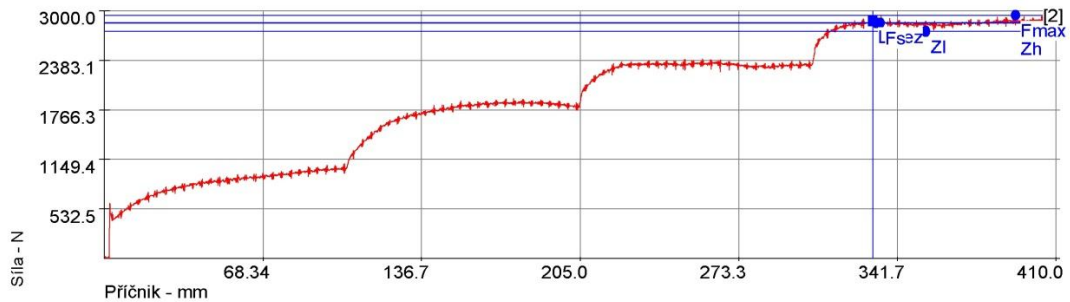
GRAF 6.: $v=10\text{mm/s}$, $p=2\text{MPa}$



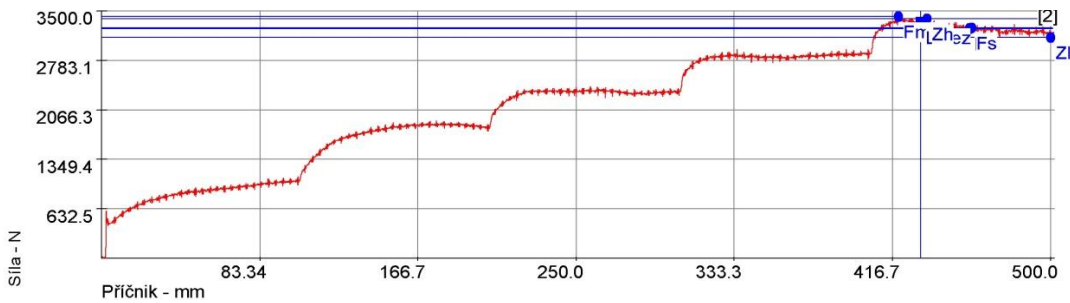
GRAF 7.: $v=10\text{mm/s}$, $p=4\text{MPa}$



GRAF 8.: $v=10\text{mm/s}$, $p=6\text{MPa}$



GRAF 9.: $v=10\text{mm/s}$, $p=8\text{MPa}$



GRAF 10.: $v=10\text{mm/s}$, $p=10\text{MPa}$





4.4.3 Vlastní měření $v=100\text{mm/s}$

Následující testování bylo provedeno jiným způsobem, než u předchozích měření. Posuvová rychlost byla změněna na $v=100\text{ mm/s}$ a bylo testováno celkem 25 kusů ocelových fosfátovaných pásků, přičemž byla vždy provedena změna přídržného tlaku po každých pěti kusech. Tzn. prvních pět kusů vzorků bylo testováno přídržným tlakem 2 MPa, dalších pět kusů přídržným tlakem 4 MPa, poté 6, 8 a 10 MPa.

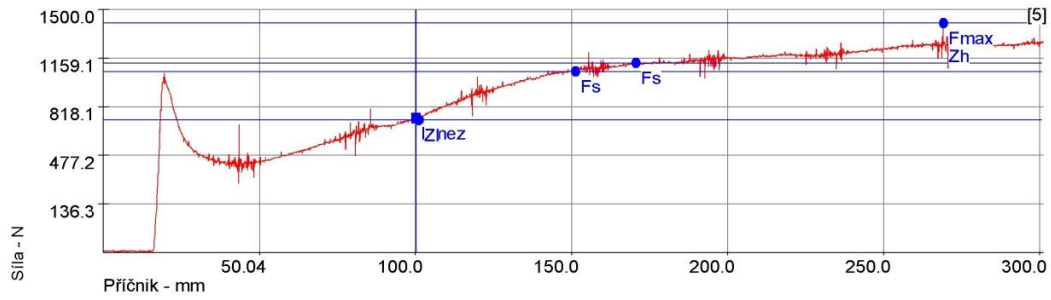
V Tabulce 8. jsou vidět naměřené hodnoty F_{\max} , F_h , F_s , ΔF a vypočtené koeficienty tření μ dle vztahu (3) a (4) pro rychlost posuvu $v=100\text{mm/s}$ při změně tlaků. V této tabulce lze vidět, že rozkmit síly není příliš velký a tudíž nedochází k zadírání. Jde jen o rozkmit vlivem nedokonalého ustálení hodnoty a také o lehké výchylykly tenzometrické měřicí hlavy. Dále lze z tabulky vyvodit, že při zvyšujícím se tlaku se snižuje koeficient tření až k dosažení hodnoty 6 MPa. Při vyšším kontaktním tlaku tj. 8 a 10 MPa se zase koeficient tření lehce zvyšuje.

Tabulka 8.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro $\mu=f(p,v)$ $v=100\text{mm/s}$

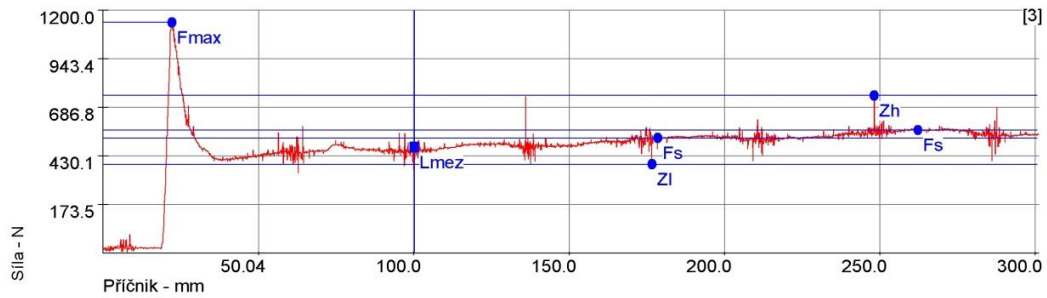
Rychlost posuvu 100 mm/s					
Kontaktní tlak p [MPa]	Maximální síla F_{\max} [N]	Maximální síla F_h [N] ustálená	Střední síla F_s [N] ustálená	Rozkmit síly ΔF [N]	Koeficient tření μ [-]
2	1031,4	1031,4	786,8	584,0	0,06304
4	1322,2	1073,0	815,0	516,6	0,03325
6	1868,0	1094,6	880,2	591,4	0,02351
8	2955,2	1666,4	1295,2	825,8	0,02595
10	4529,8	2833,4	2263,8	1117,8	0,03628

V následujících grafech je znázorněn vždy jeden záznam z každé kombinace vstupních parametrů (kontaktní tlak a rychlost posuvu). Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze. Grafy uvádí závislost naměřené síly [N] na délce měření [mm]. Modrá svislá čára ohraničuje ustálenou část grafu. Při rychlosti posuvu $v=100\text{mm/s}$ náběžná síla výrazně převyšuje maximální sílu v ustálené části F_h , tzn. adhezní síla je velice znatelná. Náběžnou sílu nyní můžeme označit jako F_{\max} (viz GRAF 11-15).

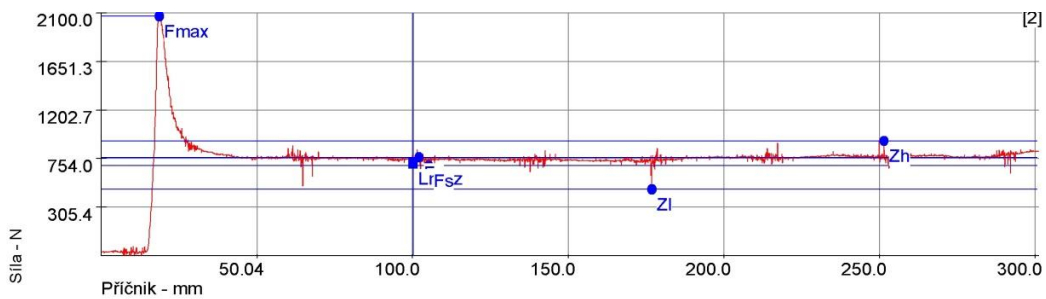




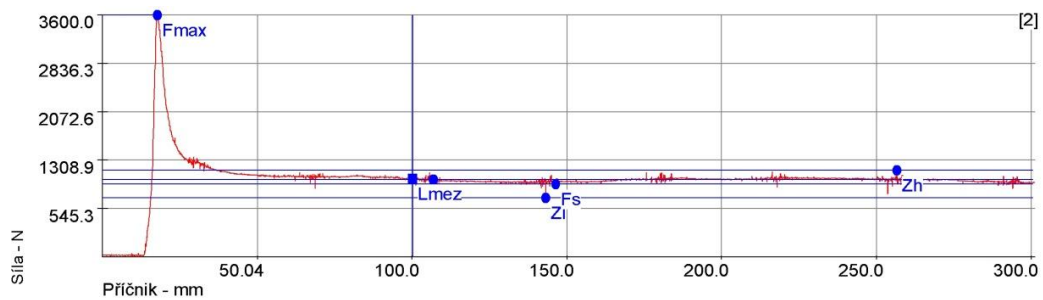
GRAF 11.: v=100mm/s, p=2MPa



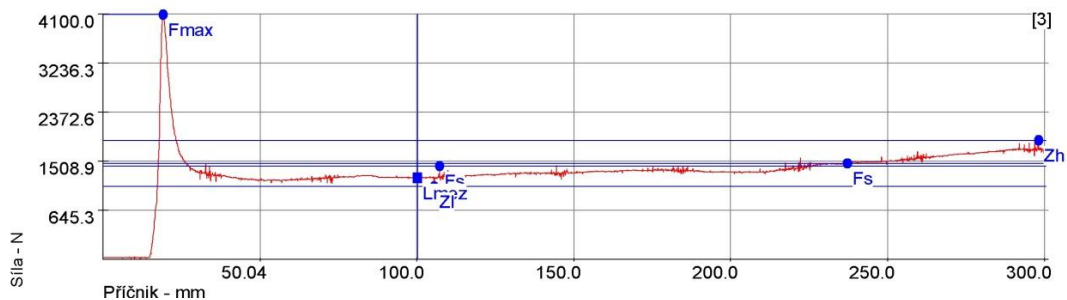
GRAF 12.: v=100mm/s, p=4MPa



GRAF 13.: v=100mm/s, p=6MPa



GRAF 14.: v=100mm/s, p=8MPa



GRAF 15.: v=100mm/s, p=10MPa





4.4.4 Vlastní měření $v=200\text{mm/s}$

Další nastavení posuvové rychlosti bylo $v=200\text{mm/s}$. Opět bylo testováno celkem 25 kusů ocelových fosfátovaných pásků. Po každých pěti kusech byl navýšen přídržný tlak (2, 4, 6, 8, 10 MPa).

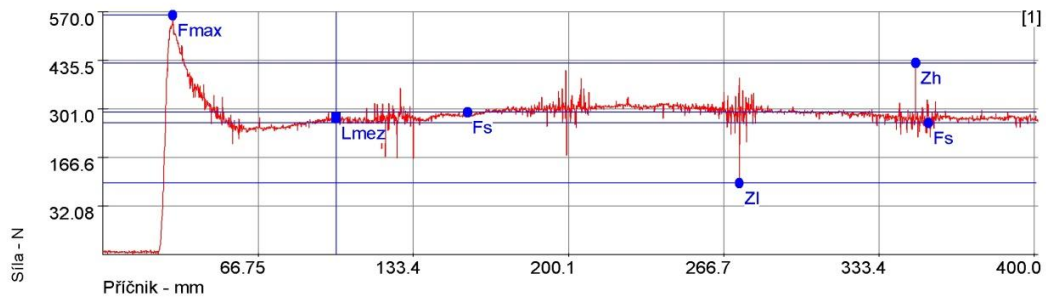
V Tabulce 9. jsou vidět naměřené hodnoty F_{\max} , F_h , F_s , ΔF a vypočtené koeficienty tření μ dle vztahu (3) a (4) pro rychlost posuvu $v=200\text{mm/s}$ při změně tlaků. V této tabulce lze vidět, že rozkmit síly není příliš velký a tudíž nedochází k zadírání. Jde jen o rozkmit vlivem nedokonalého ustálení hodnoty a také o lehké výchyly tenzometrické měřicí hlavy. S každým navýšením přídržného kontaktního tlaku byl naměřen nižší koeficient tření s rozdílem tlaku 8 MPa, který nepatrně převyšuje hodnotu při předchozím nižším tlaku 6 MPa.

Tabulka 9.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro $\mu=f(p,v)$ $v=200\text{mm/s}$

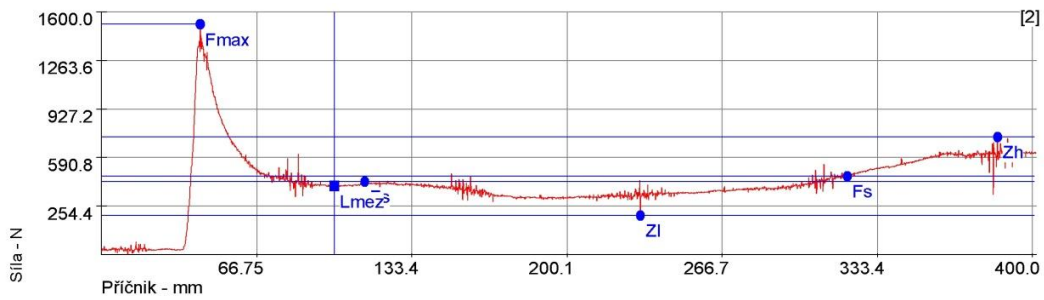
Rychlost posuvu 200 mm/s					
Kontaktní tlak p [MPa]	Maximální síla F_{\max} [N]	Maximální síla F_h [N] ustálená	Střední síla F_s [N] ustálená	Rozkmit síly ΔF [N]	Koeficient tření μ [-]
2	867,4	824,0	580,2	545,0	0,04649
4	1629,0	1472,4	815,2	1118,8	0,03266
6	1577,2	808,2	560,0	434,0	0,01496
8	2529,8	1023,4	827,0	416,8	0,01657
10	3328,4	980,0	814,6	389,2	0,01305

V následujících grafech je znázorněn vždy jeden záznam z každé kombinace vstupních parametrů (kontaktní tlak a rychlost posuvu). Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze. Grafy uvádí závislost naměřené síly [N] na délce měření [mm]. Modrá svíslá čára ohraničuje ustálenou část grafu. Při rychlosti posuvu $v=200\text{mm/s}$ náběžná síla výrazně převyšuje maximální sílu v ustálené části F_h , tzn. adhezní síla je velice znatelná. Náběžnou sílu nyní můžeme označit jako F_{\max} (viz GRAF 16-20).

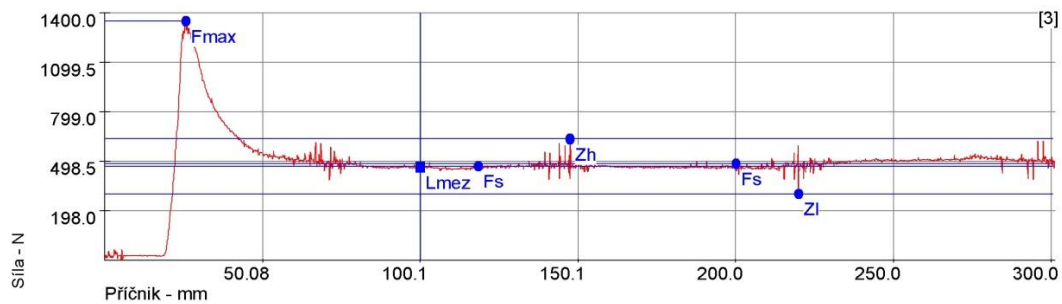




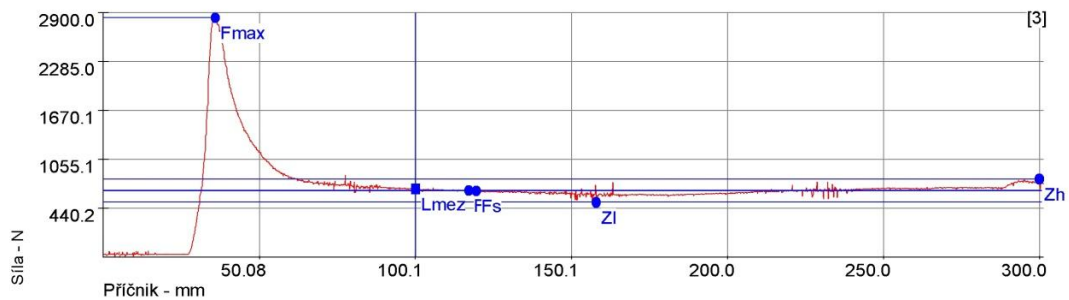
GRAF 16.: v=200mm/s, p=2MPa



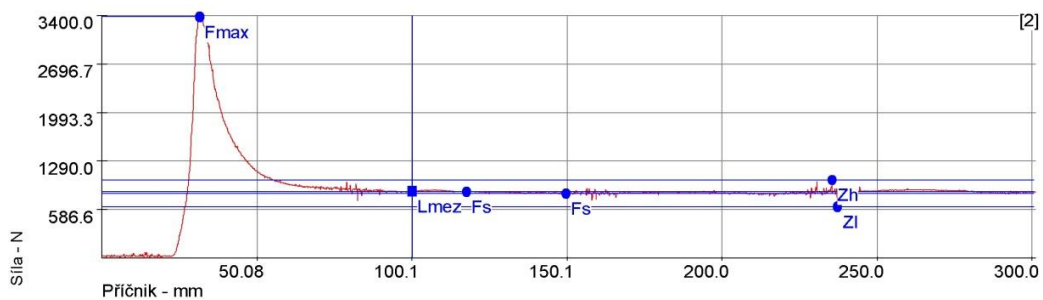
GRAF 17.: v=200mm/s, p=4MPa



GRAF 18.: v=200mm/s, p=6MPa



GRAF 19.: v=200mm/s, p=8MPa



GRAF 20.: v=200mm/s, p=10MPa





4.4.5 Vlastní měření $v=400\text{mm/s}$

Poslední testování bylo prováděno při rychlosti $v = 400\text{mm/s}$ opět na 25 kusech vzorků. Stejným způsobem bylo použito pět kusů vzorků na každý z kontaktních tlaků, tj. 2, 4, 6, 8 a 10 MPa.

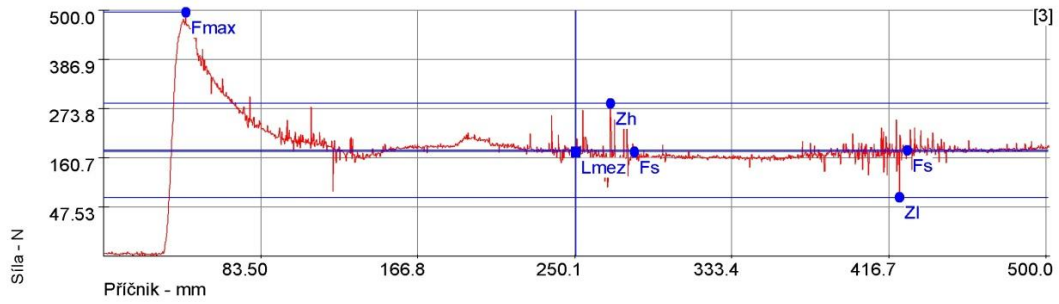
V Tabulce 10. jsou vidět naměřené hodnoty F_{\max} , F_h , F_s , ΔF a vypočtené koeficienty tření μ dle vztahu (3) a (4) pro rychlost posuvu $v=400\text{mm/s}$ při změně tlaků. V této tabulce lze vidět, že rozkmit síly není příliš velký a tudíž nedochází k zadírání. Jde jen o rozkmit vlivem nedokonalého ustálení hodnoty a také o lehké výchyly tenzometrické měřicí hlavy. Při navyšujícím se přídržném tlaku zpočátku klesají hodnoty koeficientu tření. Při tlaku převyšujícím 6 MPa hodnoty koeficientu tření opět nepatrně stoupily.

Tabulka 10.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro $\mu=f(p,v)$ $v=400\text{mm/s}$

Rychlost posuvu 400 mm/s					
Kontaktní tlak p [MPa]	Maximální síla F_{\max} [N]	Maximální síla F_h [N] ustálená	Střední síla F_s [N] ustálená	Rozkmit síly ΔF [N]	Koeficient tření μ [-]
2	511,6	328,0	222,2	213,0	0,01780
4	891,4	319,4	221,6	251,8	0,00888
6	1393,8	391,4	259,0	245,8	0,00692
8	2227,8	502,0	373,6	255,0	0,00748
10	2800,0	643,2	527,2	237,6	0,00845

V následujících grafech je znázorněn vždy jeden záznam z každé kombinace vstupních parametrů (kontaktní tlak a rychlost posuvu). Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze. Grafy uvádí závislost naměřené síly [N] na délce měření [mm]. Modrá svíslá čára ohraničuje ustálenou část grafu. Při rychlosti posuvu $v=400\text{mm/s}$ náběžná síla až několikanásobně převyšuje maximální sílu v ustálené části F_h , tzn. adhezni síla je velice znatelná. Náběžnou sílu nyní můžeme označit jako F_{\max} (viz GRAF 21-25).

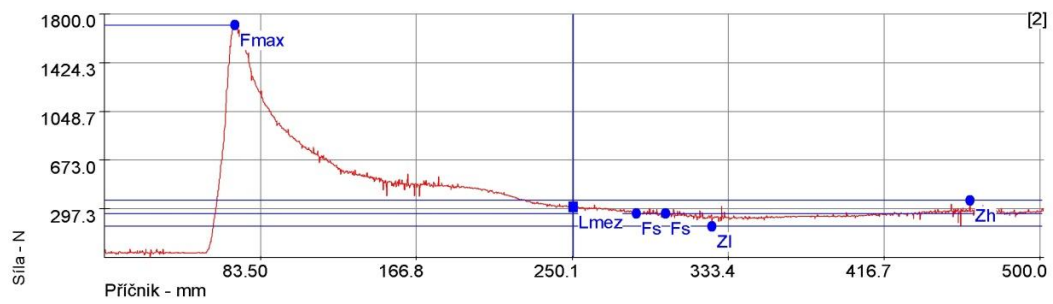




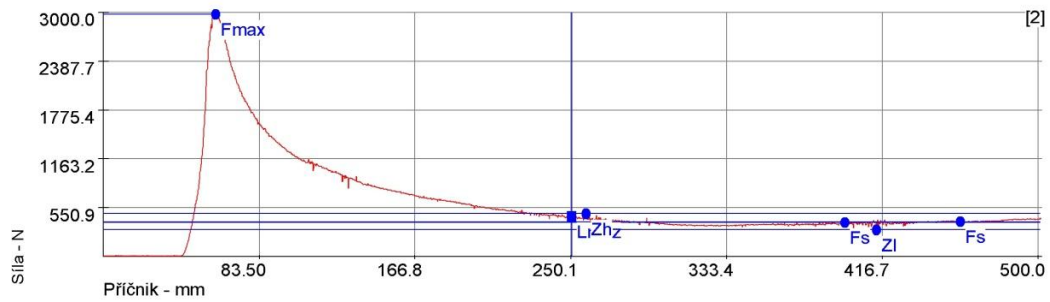
GRAF 21.: v=400mm/s, p=2MPa



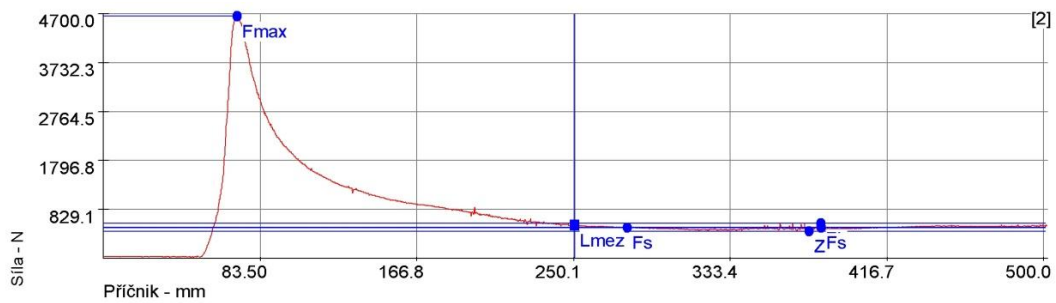
GRAF 22.: v=400mm/s, p=4MPa



GRAF 23.: v=400mm/s, p=6MPa



GRAF 24.: v=400mm/s, p=8MPa



GRAF 25.: v=400mm/s, p=10MPa





5 Doporučení a shrnutí výsledků

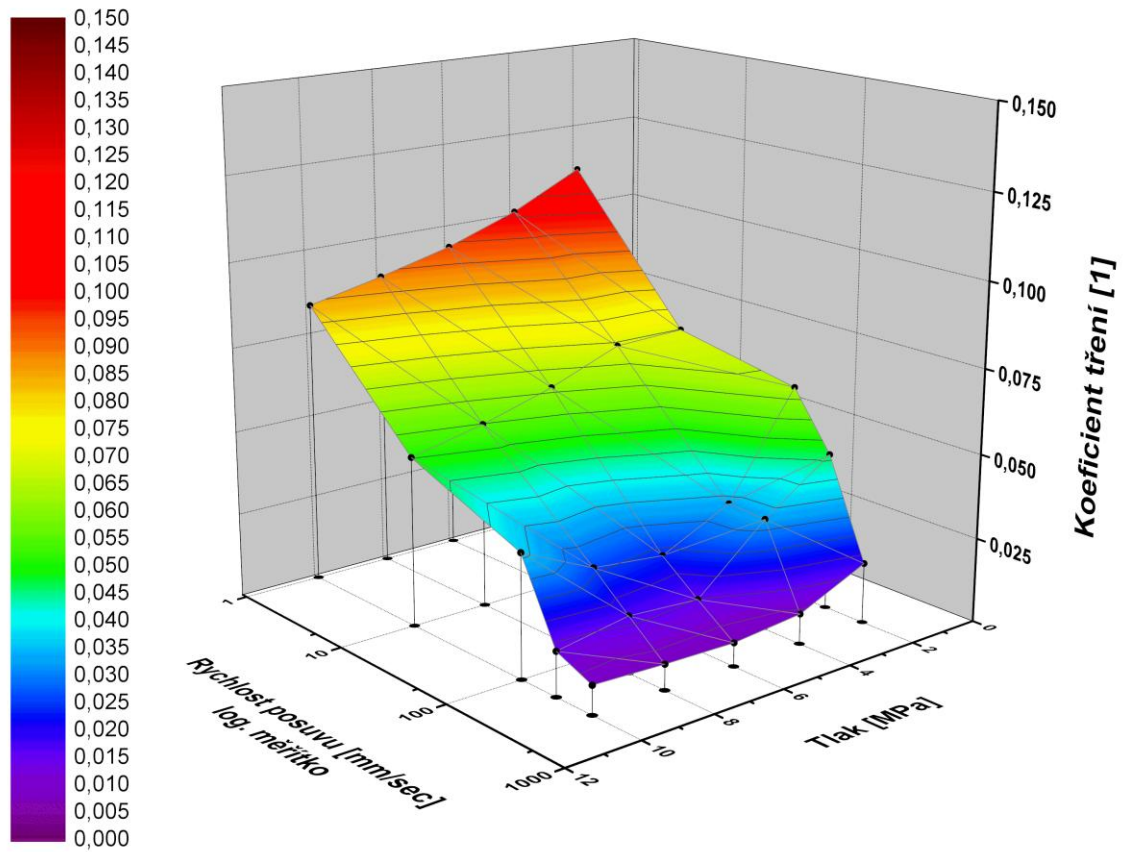
Hlavním cílem této bakalářské práce je srovnání naměřených hodnot a vytvoření trojrozměrné závislosti koeficientu tření na rychlosti posuvu protahovaného pásku a také na kontaktním přidržovacím tlaku. Tento 3D graf vytvořený v programu OriginPro 9.0 utváří plochu, kde je funkční hodnotou již zmiňovaný koeficient tření.

Tato práce se stává výjimečnou tím, že je první zpracovávaná na katedře strojírenské technologie s takovýmto cílem. Výsledky vyznačují jasně a jednoznačně koeficient tření znázorněný na obr.5.1 Tato výstupní hodnota hraje velice důležitou roli ve strojírenském průmyslu.

Koeficient tření se používá při procesech tváření kovů a jiných materiálů, a to hlavně při lisování například hlubokotažných materiálů. Také při tvorbě modelové simulace u metody konečných prvků, která využívá proces známý jako FEA (finite element analysis), je koeficient tření (jakožto hlavní výstupní veličina této práce) velice důležitou informací.

Pro další tvorbu této závislosti, by se rozhodně dalo zvážit rozšíření grafu ve směru vyšších tlaků a také vyšších rychlostí. Dále by se dalo navrhnout zjemnění tohoto grafu, a to proměřením více tlaků a rychlostí posuvu mezi dosud naměřenými hodnotami. Výsledkem tohoto vylepšení by bylo zpřesnění hodnot koeficientu tření, které se dále zadávají do výpočtů MKP nebo k určování sil a rychlostí při lisování. Při uvažování ve větším měřítku z pohledu tribologie by bylo dobré naměřit i další druhy materiálů v kombinaci s různými použitými mazivy a vůbec všemi možnými měnitelnými parametry a vybudovat tak rozšířenou databázi grafů se stejnou závislostí.





Obr.5.1: Grafické znázornění závislosti $\mu=f(v,p)$



6 Závěr

Koeficient tření je důležitou veličinou ovlivňující proces tažení plechů a mnohdy má rozhodující vliv na lisovatelnost daného výlisku. V praktické výrobě se pomocí změny velikosti koeficientu tření ovlivňují deformační poměry v tažném nástroji. Změna velikosti koeficientu tření je dosahována aplikací různých typů mazadel na celém, nebo částečném povrchu tvářeného dílu. V průběhu tváření se mění jak vzájemná rychlost posuvu plechu, tak i velikost kontaktního tlaku. S ohledem na tento fakt je důležitá znalost závislosti velikosti koeficientu tření na těchto technologických podmínkách. Cílem předkládané bakalářské práce bylo zjištění této závislosti pro hlubokotažný pozinkovaný a následně fosfátovaný plech DC 05 ZE 75/75 BPO (označení dle EN 10152) o tl. 0,8 mm. Testy byly prováděny v laboratorních podmínkách při vzájemných kombinacích rychlostí 1, 10, 100, 200, 400 mm/s a kontaktních tlaků 2, 4, 6, 8, 10 MPa. Tyto hodnoty technologických parametrů byly voleny s ohledem na reálné podmínky lisování karosářských dílů.

Testováním bylo zjištěno, že koeficient tření není v průběhu procesu tažení pásků konstantní a vlivem kontaktního tlaku a rychlosti posuvu se výrazně mění. Tento fakt je zřejmý z prostorového grafu znázorněném na obr.5.1, kde je vidět, že s rostoucí velikostí kontaktního tlaku se snižuje koeficient tření a zvyšující se rychlostí posuvu se koeficient tření také snižuje. Přičemž ve směru rychlosti posuvu se koeficient tření snižuje rychleji, tzn. rychlost posuvu má větší vliv na velikost tohoto koeficientu. Z tabulek a grafů naměřených hodnot je dále patrné, že výraznější pokles velikosti koeficientu tření nastává v oblastech nízkých rychlostí posuvu plechu. Tento fakt je důležitý pro vlastní lisování, kdy v dolní úvrati nástroje dochází k poklesu rychlosti posuvu až na nulovou hodnotu a velikost koeficientu tření vzrůstá na maximální hodnotu. Praktické zkušenosti tento fakt potvrzují a oblast lisování těsně před dolní úvrati nástroje je z hlediska nebezpečí vzniku trhliny kritická.

Výsledky předkládané bakalářské práce lze využít v praxi jako vstupní veličiny pro numerické simulace a zvyšují znalosti o změně tribologických poměrech v tažném nástroji při tažení výlisků.





Seznam literatury

- [1] MACHEK, V.: Tenké ocelové pásy a plechy válcované za studena. SNTL, Praha, 1987
- [2] SALZGITER FACHSTAHL [online]. [cit. duben 2011]. Dostupné z http://www.salzgitter-flachstahl.de/en/Ueber_uns/Produktionsanlagen/Kaltbreitbandwalzwerk
- [3] SCHWARZ, J.: Automobily Škoda Octavia II: Druhé, přepracované a rozšířené vydání. Grada Publishing a.s., Praha, 2010
- [4] SOLFRONK, P.: Numerická podpora výroby výlisků z plechu. Habilitační práce, Liberec: TU v Liberci, 2013
- [5] KOLNEROVÁ, M.: Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení. Disertační práce, Liberec: TU v Liberci, 2001. 202 s.
- [6] NOVÁKOVÁ, B.: Fosfátové konverzní povlaky. Diplomová práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012
- [7] *Tribotechnika*, Časopis o tření, opotřebování a mazání [online]. [cit. 16.4.2014]. Dostupné z <http://www.tribotechnika.sk>
- [8] Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 16.4.2014]. Dostupné z <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/36-smykove-treni>
- [9] Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů, Striebeckův diagram [online]. [cit. 16.4.2014]. Dostupné z www.ksp.tul.cz
- [10] VOCEL, M. Tření a opotřebenění strojních součástí. Praha: SNTL, 1976, 374 s.
- [11] MANG, T. Die Schmierung in der Metallbearbeitung. 1. Aufl. Würzburg: Vogel, 1983. ISBN 978-380-2306-822
- [12] TOLLRIAN, Z. Maziva využívaná v technologii tváření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Šlais.
- [13] *Techmagazín*, Mazání ložisek plastickými mazivy [online]. [cit. 27.6.2014]. Dostupné z <http://www.techmagazin.cz/231>





Seznam příloh

- Příloha č. 1. Statická zkouška tahem pro testovaný substrát ve směru 0°
- Příloha č. 2. část 1 Ilustrativní protokol - 1 mm/s, 2 MPa – Tabulka hodnot
- Příloha č. 2. část 2 Ilustrativní protokol - 1 mm/s, 2 MPa – Graf
- Příloha č. 2. část 3 Ilustrativní protokol - 400 mm/s, 10 MPa – Tabulka hodnot
- Příloha č. 2. část 4 Ilustrativní protokol - 400 mm/s, 10 MPa – Graf



Příloha č. 1

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

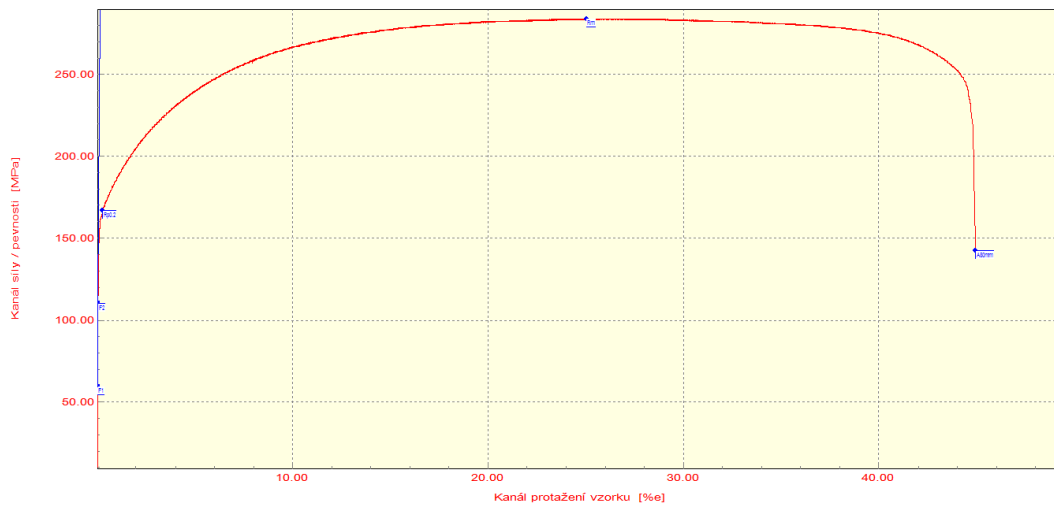
EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DC 05 ZE 75/75 BPO
Norma: : EN 10152
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Rozměr vzorku: : 20 x 0,8 [mm]
Vypracoval: : Jan Krejčí
Datum zkoušky: : 12.3. 2014
Směr odebrání vzorku: : 0°
Podmínky měření : teplota RT, L0=80mm, KAF 10kN

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	167.0	284.0	24.87	44.87
2	165.8	282.1	25.18	45.44
3	168.1	285.9	24.56	44.31
4	166.6	283.2	24.92	44.95
5	166.7	283.6	24.71	44.59

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	166.8	283.7	24.85	44.83
Směrodatná odchylka	0.8	1.4	0.23	0.42



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Technická univerzita v Liberci
Katedra strojírenské technologie

Zkouška protahováním pásku

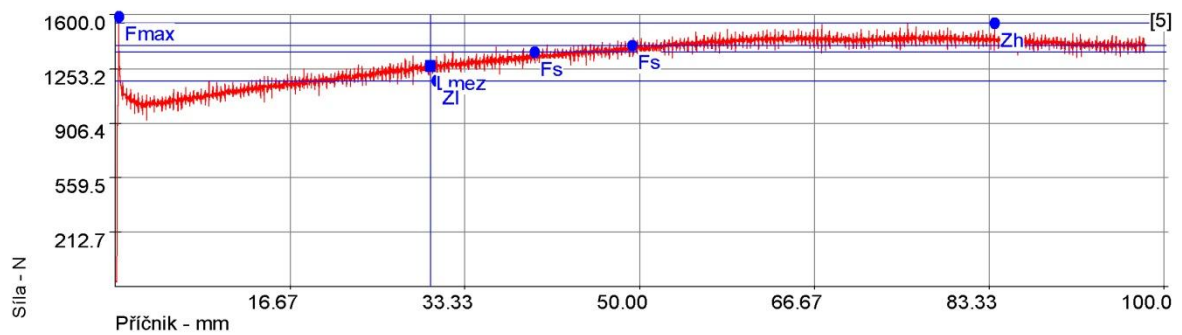
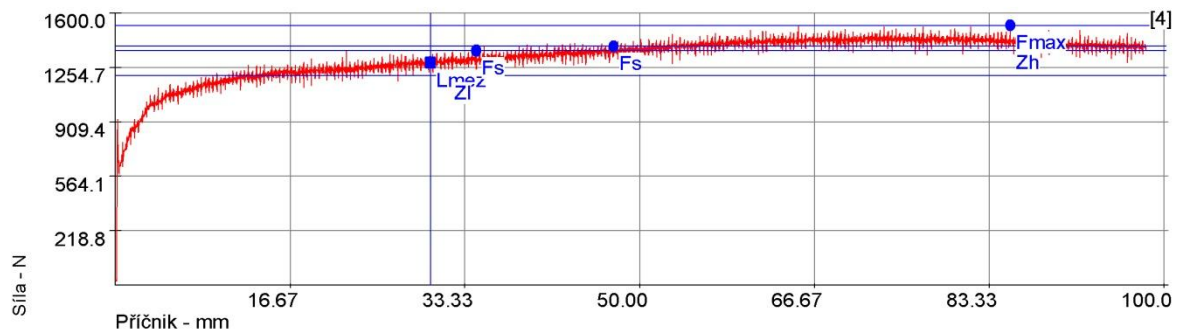
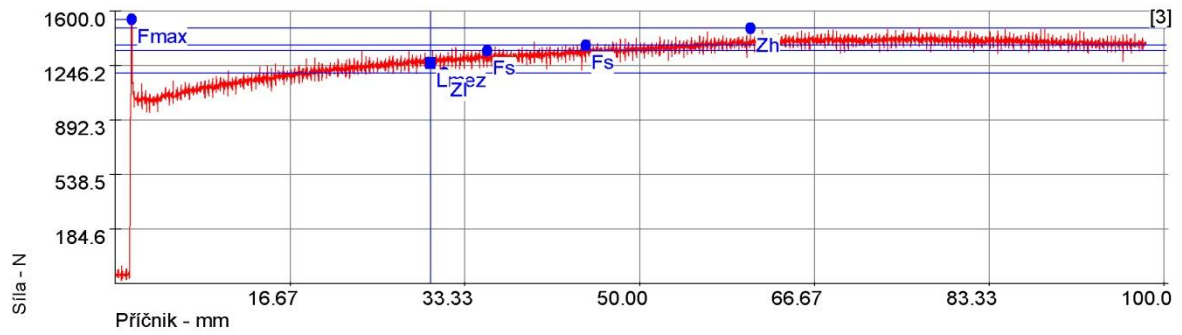
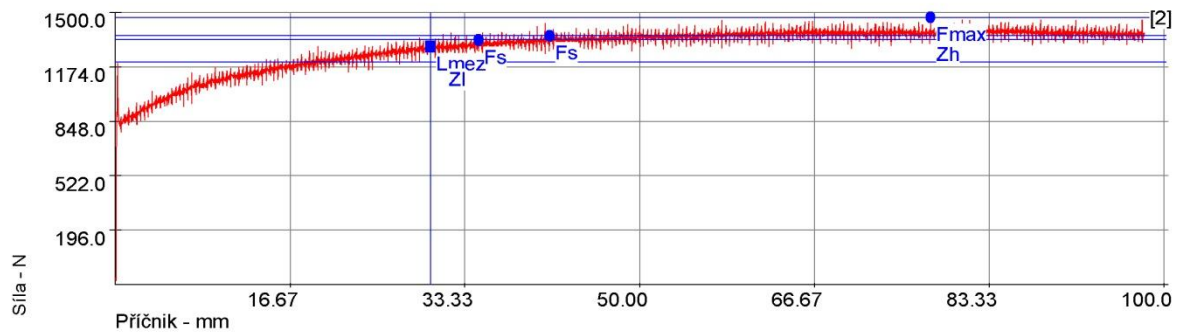
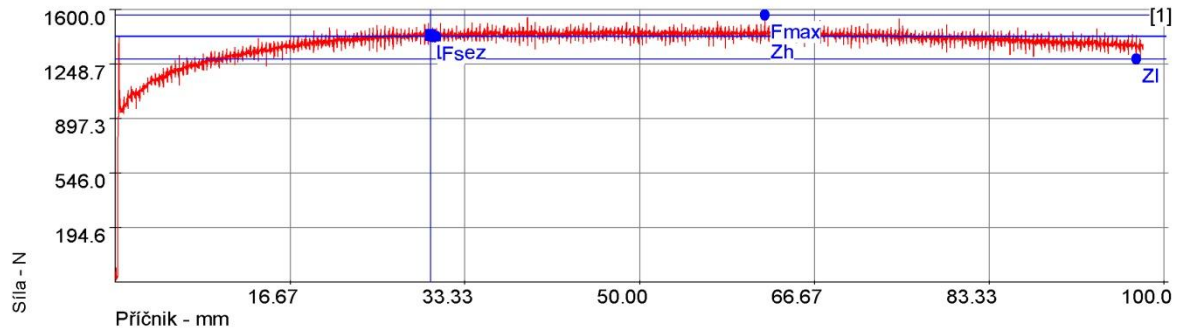
Vstupní hodnoty

Testované mazivo :	Anticorit PL 3802-39S	Kontaktní plocha :	40 mm x 78 mm
Množství maziva :	1,5 ± 0,1 g/m ²	Rychlost posuvu :	1 mm/s
Testovaný substrát :	EG+PH	Varianta :	1B
Drsnost substrátu Ra=1,342/1,409 μm PC=108/108,33 1/cm		Teplota :	40 °C
Materiál nástroje :	GGG 70L - gehärtet	Rychlost snímání dat :	2 kHz
Kontaktní tlak :	2 MPa	Měřená délka :	100 mm

Výstupní hodnoty

Zkouška	F _{max} N	F _s N	F _l N	F _h N	delta F=F _h -F _l N
1	1566	1425	1284	1566	283
2	1470	1337	1203	1470	268
3	1547	1344	1199	1490	291
4	1522	1362	1202	1522	321
5	1587	1362	1179	1545	366
x	1539	1366	1213	1519	306
s	44.96	34.88	40.61	39.25	38.89

Příloha č. 2. část 2



Technická univerzita v Liberci
Katedra strojírenské technologie

Zkouška protahováním pásku

Vstupní hodnoty

Testované mazivo :	Anticorit PL 3802-39S	Kontaktní plocha :	40 mm x 78 mm
Množství maziva :	1,5 ± 0,1 g/m ²	Rychlost posuvu :	400 mm/s
Testovaný substrát :	EG+PH	Varianta :	1B
Drsnost substrátu :	Ra=1,342/1,409 μm PC=108/108,33	Teplota :	40 °C
Materiál nástroje :	GGG 70L - gehärtet	Rychlost snímání dat :	2 kHz
Kontaktní tlak :	10 MPa	Měřená délka :	500 mm

Výstupní hodnoty

Zkouška	Fmax N	Fs N	Fl N	Fh N	deltaF=Fh-Fl N
1	2279	539	377	701	325
2	4654	476	396	556	160
3	2139	533	367	699	332
4	2613	485	400	571	171
5	2315	589	489	689	200
x	2800	524	406	643	238
s	1050.61	45.76	48.56	73.29	84.16

Příloha č. 2. část 4

