TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Disertační práce

Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení

2005 **Ing. Michaela Kolnerová**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření
Tváření kovů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení

Influence of technological parameters on galling of galvanized sheets during deep drawing

Ing. Michaela Kolnerová

Školitel: doc. Ing. Mirko Král, CSc.
Vedoucí katedry: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	202
Počet obrázků:	123
Počet tabulek:	20
Počet grafů	76
Počet příloh:	6

Anotace

Téma práce:

Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení

Práce se zabývá zadíráním výlisků při tažení karosářských dílů. Materiály byly omezeny na karosářské plechy s povlakem na bázi Zn, které dnes tvoří převážnou většinu materiálů používaných na automobilové karoserie. Zadírání tvoří vážný problém v sériové výrobě, požadující vysokou kvalitu povrchu.

V práci jsou analyzovány jednak teoreticky, jednak experimentálně faktory ovlivňující hluboké tažení a poškození povrchu: drsnost a geometrie povrchu, tlaky, rychlosti, mazání a s nimi související koeficient tření.

Nově vyvinuté experimentální zařízení umožnilo zkoušky při rychlostech odpovídajících provozním podmínkám mechanických lisů pro tažení v automobilovém průmyslu. Výsledky jsou dokumentovány v grafech a tabulkách. Ukazuje se, že k zadírání dochází zejména při vysokých měrných tlacích a nedostatečném mazání. Další příčinou může v provozu být nedodržení přísných technologických podmínek, zejména čistoty v systému plech – nástroj.

Klíčová slova: hluboké tažení, tribologie, tření, zadírání, mazivo, rychlost posuvu, kontaktní tlak, zinkový povlak

Summary

Thesis contents:

Influence of technological parameters on galling of galvanized sheets during deep drawing

The thesis deals with problems caused by galling of metal sheets during deep drawing of auto body parts. Experimental materials were restricted to auto body sheets, protected by coating based on Zn. At present these materials are most widely used in the automotive industry for body panels. Galling means a serious problem in mass production where quality surface is required.

The thesis analyses both theoretically and experimentally factors affecting deep drawing and surface damage. Among these are surface roughness and geometry, pressures, sliding velocity and character of lubrication.

Thanks to newly developed experimental equipment it was possible to carry out the experiments at velocities corresponding to working velocities of mechanical presses used for deep drawing in the automotive industry. Results are presented in diagrams and tables. The results show that mainly high specific pressures are responsible for galling as well as insufficient lubrication. Another reason may be conditions in the production environment, dirt in the system of the die and sheet material.

Keywords: deep drawing, tribology, friction, galling, lubrication, sliding velocity, pressure, zinc coating

Poděkování:

Ráda bych v úvodu mé práce vyjádřila svou vzpomínku na již zesnulého prof. Ing. Viktora Mikeše, CSc., kterého jsem si velmi vážila, nejen jako odborníka v oboru tváření, ale i jako charakterního a zásadového člověka. Byl mým prvním školitelem v doktorském studiu a též prvním vedoucím v zaměstnání na Technické univerzitě v Liberci, původní katedře tváření a plastů.

Poděkování bych zde chtěla věnovat především školiteli doc. Ing. Mirkovi Královi, CSc., který převzal vedení nad mým započatým studiem. Poskytl mi nejen cenné odborné rady a připomínky, ale též jeho trpělivost a shovívavost mi velmi pomohly ke zvládnutí dokončení celého doktorského studia a vypracování doktorské práce.

Dále bych chtěla poděkovat Ing. Lubomíru Rolečkovi, ze ŠKODA AUTO Mladá Boleslav, a.s., za jeho cenné rady při konzultacích problémů spojených s řešením práce, za poskytnutí pomoci při získávání materiálů a též za cenné informace, které jsou spojeny s jeho dlouholetou praxí v oboru tváření karosářských plechů.

Mé poděkování patří též celé katedře strojírenské technologie, počínaje vedením katedry za umožnění pracování na disertační práci a kolegům za jejich podporu a pomoc. Konkrétně bych chtěla jmenovat kolegy: Ing. Pavla Solfronka, Ph.D., Ing. Pavla Doubka, Ing. Pavla Hisema, Ph.D., Ing. Lukáše Kovárníka, Ing. Jiřího Sobotku, Ing. Luboše Běhálka, Ing.Tomáše Poupu.

Děkuji též své kolegyni prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za poskytnuté odborné rady a doporučení při psaní disertační práce.

Tuto práci bych chtěla věnovat své mamince, které si nesmírně vážím a jsem jí vděčná, že mi umožnila studium na vysoké škole a tím tedy i následné vzdělání v podobě mého doktorského studia.

Poděkování patří též mé rodině za jejich ohleduplnost, trpělivost a podporu v průběhu celého studia.

Ráda bych zde ještě připomněla pietní vzpomínkou prof. Ing. Jaroslava Exnera, CSc., který byl nejen mým vedoucím na nově vzniklé katedře strojírenské technologie, ale též předseda oborové rady doktorského studia a který se bohužel již ukončení mého studia nedožil.

Všem jmenovaným i ostatním kolegům mnohokrát děkuji a vážím si jejich podpory, pomoci, rad a připomínek při vypracování této disertační práce.

S poděkováním Michaela Kolnerová

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 10
1 ÚVOD 13
1.1 Současný výzkum problematiky zadírání plechů při tažení 15
1.2 Cíle disertační práce 18
1.3 Přehled vlastních publikací k problematice tribologie a zadírání pozinkovaných plechů při tažení 19
2 CHARAKTERISTIKA HLUBOKÉHO TAŽENÍ 20
2.1 Analýza hlubokého tažení z hlediska napětí a deformace 21
2.2 Vliv technologické parametrů na proces hlubokého tažení 27
2.2.1 Vliv přidržovacího tlaku 27
2.2.2 Vliv rychlosti tažení 27
2.2.3 Vliv mazání 27
2.3 Vliv tření na proces hlubokého tažení 28
2.4 Problematika tažení výlisků nepravidelných tvarů karosářského typu 31
3 CHARAKTERISTIKA PLECHŮ KAROSÁŘSKÉHO TYPU 32
3.1 Požadavky na plechy pro karosářské výlisky 32
3.2 Materiály používané na výrobu karosářských výlisků 32
3.2.1 Výroba tenkých ocelových plechů válcováním za studena 33
3.3 Ocelové plechy s povlaky 34
3.3.1 Ocelové plechy s povlaky na bázi zinku 35
3.3.1.1 Ochranná funkce povlaku 35
3.3.1.2 Technologie žárového zinkování 35
3.3.1.3 Technologie galvanického (elektrolytického) zinkování 38
3.3.1.4 Vytváření nosných povlaků pro mazivo fosfátováním 39
3.3.2 Hodnocení plechů s povlaky 40
3.3.2.1 Hodnocení elektrolyticky pozinkovaných plechů (plechy EG) 41
3.3.2.2 Srovnání elektrolytického a žárového pozinkování plechů 42
3.3.2.3 Hodnocení žárově pozinkovaných plechů (plechy HDG) 43
3.4 Povrchy povlaků 44
3.4.1 Požadavky na povrchy povlaků 44
3.4.2 Geometrické vlastnosti povrchů 45
3.4.2.1 Hodnocení geometrie povrchu ve 2D 46
3.4.2.2 Hodnocení geometrie povrchu ve 3D 51
3.5 Morfologie povrchu plechů používaných pro karosářské výlisky 53
3.5.1 Metody vytváření povrchů pracovního válce 53
3.5.2 Vytváření povrchů 54
3.5.2.1 Texturování pracovního válce metodou SBT 55
3.5.2.2 Texturování pracovního válce metodou EDT 56

3.5.2.3 Texturování pracovního válce metodou LT ... 56
3.5.2.4 Texturování pracovního válce metodou EBT ... 57
3.5.2.5 Texturování pracovního válce metodou PRETEX ... 58
3.5.3 Morfologie povrchu z hlediska vyplnění struktury mazadlem ... 59
3.5.4 Hodnocení povrchů z hlediska lisování a kvality laku ... 61
4 VLIV TRIBOLOGIE NA PROCES HLUBOKÉHO TAŽENÍ ... 62
4.1 Kontaktní procesy ... 63
4.2 Procesy tření ... 64
4.2.1 Suché tření ... 66
4.2.2 Mezné tření ... 67
4.2.3 Kapalinové tření ... 68
4.2.4 Smíšené tření ... 69
4.2.5 Tření v závislosti na rychlosti pohybu a době styku povrchů ... 71
4.2.5.1 Tření a „Stick – Slip“ efekt ... 71
4.3 Tribotechnika [44] ... 72
4.3.1 Procesy mazání ... 73
4.3.1.1 Maziva a jejich úloha ... 73
4.3.1.2 Mazání při tažení ... 73
4.3.1.3 Požadavky na maziva ... 74
4.3.1.4 Druhy maziv a jejich použití ... 75
4.3.1.5 Nanášení maziv ... 75
4.3.2 Procesy opotřebení povrchu materiálu ... 76
4.3.2.1 Definice opotřebení ... 76
4.3.2.2 Studium povrchů opotřebení ... 76
4.3.2.3 Určení opotřebení ... 76
4.3.2.4 Druhy opotřebení ... 77
4.3.2.5 Základní fyzikální mechanismy opotřebení ... 78
4.3.2.6 Adhezivní opotřebení v procesu tváření ... 79
4.4 Tribologické zkoušky ... 82
4.4.1 Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí ... 83
4.4.2 Modelování tření na tažné hraně ... 83
4.4.3 Modelování vypínání přes tažnou hranu ... 84
4.4.4 Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hanou ... 84
4.4.5 Další způsoby tribologických zkoušek plechů ... 85
5 PROCESY ZADÍRÁNÍ PŘI TAŽENÍ ... 86
5.1 Definice zadírání ... 86
5.2 Vliv materiálu na zadírání ... 86
5.2.1 Povrch materiálu jako třecí veličina při tažení ... 86
5.2.2 Svařovací vlna v dotykovém místě povrchů materiálů ... 88

5.3 Zadírání v závislosti na kontaktu nástroje a povrchu materiálu ... 92
5.4 Projevy zadírání při tažení v praxi ... 94
5.4.1 Používané materiály na výrobu výlisků a tažných nástrojů ... 97
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DISERTAČNÍ PRÁCE ... 101
6.1 Stávající zkušební zařízení ... 102
6.2 Nové tribologické zařízení SOKOL 400 ... 104
6.2.1 Konstrukční návrh zařízení ... 104
6.2.2 Technický popis zařízení ... 105
6.2.3 Technické parametry zařízení ... 107
6.2.4 Technický popis zkušebního přípravku ... 108
6.3 Volba materiálu pro experimentální měření ... 110
6.4 Charakteristika materiálu použitého pro experiment ... 111
6.4.1 Mechanické vlastnosti testovaného materiálu ... 111
6.4.1.1 Statická zkouška tahem ... 111
6.4.2 Morfologie povrchu testovaného substrátu ... 113
6.4.2.1 Drsnost povrchu ... 113
6.4.2.2 Snímky povrchu substrátu EBT-SIBETEX ... 117
6.4.2.3 Výroba morfologie povrchu EBT -SIBETEX ... 117
7 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ KOEFICIENTU TŘENÍ S OHLEDEM NA VZNIK ZADÍRÁNÍ ... 118
7.1 Hodnocení tribologických vlastností za vysokých rychlostí ... 118
7.2 Metodika měření ... 119
7.3 Podmínky zkoušky ... 121
7.3.1 Rozměry vzorků testovaného materiálu ... 121
7.3.2 Materiál nástroje na tažení ... 122
7.3.2.1 Metalografické hodnocení materiálu čelistí ... 122
7.3.2.2 Měření mikrogeometrie nástroje ... 124
7.3.3 Rychlost posuvu ... 124
7.3.4 Kontaktní tlak ... 126
7.3.5 Použité mazivo ... 126
7.3.5.1 Zařízení na měření množství maziva ... 128
7.3.5.2 Nanášené množství maziva ... 129
7.3.6 Teplota nástroje ... 129
7.4 Tribologická zkouška protahováním pásku ... 131
7.4.1 Zpracování naměřených hodnot ... 131
8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ... 133
8.1 Výsledky experimentu – tabulky naměřených dat ... 133
8.2 Grafy průběhů měřených sil při protahování pásku ... 144
8.2.1 Rychlost posuvu: $v=1 mms^{-1}$ ... 144

8.2.2 Rychlost posuvu: v=5mms^{-1} ... 146
8.2.3 Rychlost posuvu: v=10mms^{-1} ... 148
8.2.4 Rychlost posuvu: v=25mms^{-1} ... 150
8.2.5 Rychlost posuvu: v=50mms^{-1} ... 152
8.2.6 Rychlost posuvu: v=100mms^{-1} ... 155
8.2.7 Rychlost posuvu: v=200mms^{-1} ... 156
8.2.8 Rychlost posuvu: v=300mms^{-1} ... 158
8.2.9 Rychlost posuvu: v=400mms^{-1} ... 160
8.3 Dílčí hodnocení charakteristik grafů dle průběhů naměřených sil pro zvolené rychlosti ... 161
8.3.1 Hodnocení rychlosti posuvu: v= 1mms^{-1} ... 163
8.3.2 Hodnocení rychlosti posuvu: v=5mms^{-1} ... 164
8.3.3 Hodnocení rychlosti posuvu: v=10mms^{-1} ... 164
8.3.4 Hodnocení rychlosti posuvu: v=25mms^{-1} ... 165
8.3.5 Hodnocení rychlosti posuvu: v=50mms^{-1} ... 165
8.3.6 Hodnocení rychlosti posuvu: v=100mms^{-1} ... 166
8.3.7 Hodnocení rychlosti posuvu: v=200mms^{-1} ... 166
8.3.8 Hodnocení rychlosti posuvu: v=300mms^{-1} ... 166
8.3.9 Hodnocení rychlosti posuvu: v= 400mms^{-1} ... 167
8.4 Grafy koeficientu tření sestrojené v závislosti na kontaktním tlaku při konstantní rychlosti posuvu ... 167
8.5 Grafy koeficientu tření sestrojené v závislosti na rychlosti posuvu při konstantním kontaktním tlaku ... 172
9 DISKUSE DÍLČÍCH VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU ... 178
9.1 Vliv rychlosti posuvu ... 181
9.1.1 Vliv rychlosti posuvu: v=1;5;10mms^{-1} ... 182
9.1.2 Vliv rychlosti posuvu: v=25mms^{-1} ... 182
9.1.3 Vliv rychlosti posuvu: v= 50mms^{-1} ... 182
9.1.4 Vliv rychlosti posuvu: v= 100mms^{-1} ... 183
9.1.5 Vliv rychlosti posuvu: v= 200mms^{-1} ... 183
9.1.6 Vliv rychlosti posuvu: v= 300mms^{-1} ... 183
9.1.7 Vliv rychlosti posuvu: v= 400mms^{-1} ... 183
9.2 Vliv kontaktního tlaku ... 184
9.2.1 Vliv kontaktního tlaku: p=2MPa ... 184
9.2.2 Vliv kontaktního tlaku: p=3MPa ... 184
9.2.3 Vliv kontaktního tlaku: p=4MPa ... 184
9.2.4 Vliv kontaktního tlaku: p=5MPa ... 185
9.2.5 Vliv kontaktního tlaku: p=6 a 8MPa ... 185
9.2.6 Vliv kontaktního tlaku: p=10MPa ... 185

9.2.7 Vliv kontaktního tlaku: p=12MPa 186
9.3 Vliv množství naneseného maziva 186
10 DISKUSE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE 191
11 ZÁVĚR 194
12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 198
13 SEZNAM PŘÍLOH 202

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Rozměr	Význam
A_{80}	%	celková tažnost materiálu
A_g	%	homogenní tažnost materiálu
a	mm	poloměr otvoru tažnice
a_H	mm	poloměr kruhového vtisku
ak		adhezní koeficient
b	nm	šířka svařované vlny
b	mm	okamžitý poloměr okraje příruby výtažku
b_0	mm	poloměr okraje příruby výtažku
b_p	mm	šířka testovaného pásku
C	MPa	míra přetvárné pevnosti
d	nm	meziatomová vzdálenost
EG		elektrolyticky pozinkovaný plech
E'	MPa	redukovaný modul pružnosti materiálu
E_1,E_2	MPa	Youngův modul pružnosti
EBT		Electron Beam Texturing
EDT		Electric Discharge Texturing
F_d	N	deformační síla na plastické přetvoření
F_h	N	velikost maximální síly v ustálené části
F_{max}	N	maximální síla
F_{min}	N	minimální síla
F_N	N	normálová síla
F_S	N	střední síla
F_t	N	celková třecí síla
F_T	N	tažná síla
ΔF	N	velikost rozkmitu sil
F_p	N	přidržovací síla
F_o	N	síla na plastický ohyb
f	Hz	frekvence snímání dat
H	MPa	tvrdost materiálu
HDG		žárově pozinkovaný plech
h	mm	tloušťka vrstvy maziva
h	mm	tloušťka příruby materiálu
K	Nm^{-2}	stlačitelnost
L_{mez}	mm	mezní délka pásku pro určení sil
LT		Laser Texturing
l	nm	velikost buňky sítě
lc	mm	mezní vlnová délka
lp	mm	délka měřeného úseku protahovaného pásku
lr	mm	základní délka
lt	mm	délka měřeného úseku
M	Nm	vnější ohybový moment
Mr1	%	podíl materiálu nad profilem jádra
Mr2	%	podíl materiálu nad profilem jádra
n		exponent deformačního zpevnění
OFP		ochranná funkce povlaku
p	Pa	přidržovací tlak

p_m	Pa	střední kontaktní tlak
p_{max}	Pa	Hertzův tlak
p_1,p_2	Pa	tlak v místě pro rychlost svařovací vlny
Pretex		Preussag Texturing
Pt	µm	hloubka profilu
Q	N	normálová přítlačná síla
R	N	radiální síla
Ra	µm	střední aritmetická hodnota drsnosti
Rk	µm	základní hloubka profilu jádra drsnosti
Rm	MPa	smluvní mez pevnosti materiálu
Rmax	µm	maximální výška profilu
Rp0,2	MPa	smluvní mez kluzu materiálu
RPc	cm^{-1}	počet výstupků
Rpk	µm	redukovaná výška špiček
Rq	µm	střední kvadratická hodnota drsnosti
Rs	mm	poloměr křivosti střední vrstvy
R_T	mm	poloměr tažné hrany
Rt	µm	největší hloubka drsnost
Rvk	µm	redukovaná hloubka rýh
Rz	µm	výška nerovností
r		součinitel normálové anizotropie
r	mm	okamžitý poloměr
r_0	mm	počáteční hodnota poloměru
r_1, r_2	mm	poloměr koule
SBT		Shot Blast Texturing
S	mm^2	činná plocha styku
S_c	mm^2	obrysová plocha styku
S_H	mm^2	plocha kruhového vtisku
S_K	mm^2	činná plocha styku
S_r	mm^2	skutečná plocha styku
s		směrodatná odchylka výběru
$\bar{s}$		směrodatná odchylka střední hodnoty
s_p	mm	tloušťka pásku
T	°C	teplota
T	N	tangenciální síla
t_w	s	čas potřebný ke svaření materiálů
Uww	μms^{-1}	rychlost čela vlny
u_1, u_2	μms^{-1}	složky rychlosti čela vlny
v	ms^{-1}	rychlost pohybu
vt	ms^{-1}	rychlost posuvu
v	ms^{-1}	lineární rychlost pohybu třecích povrchů
Wt	µm	hloubka vln
$\bar{x}$		aritmetický průměr hodnoty
α	°	úhel ohybu
β		koeficient podmínky plasticity
β	mm	část plochy kovového styku
ε		poměrná deformace
ϵ'_{ww}		rychlost deformace
η	Pa.s	dynamická viskozita
µ		koeficient tření

μ_{sm}		smykový koeficient tření
ρ_0, ρ_1	gcm^{-3}	hustota materiálu
σ_e	MPa	mez pružnosti měkčího povrchu
σ_i	MPa	intenzita napětí
σ_k	MPa	mez kluzu
σ_r	MPa	radiální napětí
σ_θ	MPa	tangenciální napětí
σ_z	MPa	normálné napětí
σ_c	MPa	mez pružnosti měkčího povrchu
γ	°	úhel ohybu
γ	Jm^{-2}	povrchová energie čela vlny
τ	MPa	smykové napětí
τ_m	MPa	smykové napětí mezného filmu
τ_s	MPa	smykové napětí styku povrchu s povrchem
τ_{pM}	MPa	napětí k usmýknutí nerovnosti měkčího členu dvojice
τ_{pS}	MPa	napětí k rozpojení mikrosvaru
τ_{pT}	MPa	napětí k usmýknutí nerovnosti tvrdšího členu dvojice
τ_{pV}	MPa	smykové napětí povrchových vrstev
φ		logaritmická deformace
φ_i		intenzita logaritmická deformace
φ_r		radiální logaritmická deformace
φ_θ		tangenciální logaritmická deformace
φ_z		normálová logaritmická deformace
χ		objem relativního skoku na čele svařovací vlny
ψ		index plasticity
Al		hliník
Be		berilium
C		uhlík
Cl		chlor
Cr		chrom
Cu		měď
Fe		železo
Mg		hořčík
Mn		mangan
Mo		molybden
N		dusík
Ni		nikl
P		fosfor
Pb		olovo
S		síra
Si		křemík
Ti		titan
V		vanad
Zn		zinek

1 ÚVOD

Největší podíl na zpracování ocelí má dnes v celosvětovém měřítku automobilový průmysl, kde se ve značné míře uplatňují technologie zpracování plechů. Zvláštní oblastí zpracování tenkých plechů je lisování součástí karosářského typu, na které jsou kladeny vysoké požadavky v oblasti jakosti povrchu, rozměrové přesnosti, tuhosti výtažku a v neposlední řadě i estetické úrovni pohledových dílů karoserie.

Specifické zvláštnosti technologie tažení výlisků nepravidelných tvarů jsou dány tím, že se jedná o proces tažení mnohem složitější oproti hlubokému tažení výlisků pravidelného tvaru. Ve většině případů se jedná o nepravidelné velkoplošné výlisky, které se vyznačují členitým povrchem s nerovnoměrnou hloubkou tažení. V důsledku toho dochází při tažení těchto výlisků k nerovnoměrným stavům napjatosti a přetvoření v různých oblastech výtažku. Nerovnoměrnost tažení plechu v různých místech výtažku je závislá na horizontální a vertikální členitosti taženého dílu. Lisovatelnost těchto dílů nelze v současné době hodnotit dle obecně platných a odbornou veřejností přijímaných, známých koeficientů tažení určených pro symetrické výtažky. Lisovatelnost těchto dílů se tak posuzuje odděleně pro daný konkrétní výtažek. O tvaru budoucího výlisku rozhoduje na jedné straně konstruktér (návrhář karoserie), na druhé straně technolog a konstruktér lisovacího nástroje. Řešením rozporu, který obvykle mezi těmito dvěma skupinami vzniká, by měl být takový návrh tvaru výlisku a výrobního nástroje, jež vyžaduje jen minimální technologické změny při sériové výrobě.

Tvarová složitost lisovaných automobilových dílů a požadavky na jejich ostatní užitné vlastnosti, jako je tuhost, odolnost proti vibracím apod. nutí zpracovatele plechu využívat v maximální míře plastických přetvoření tvářeného materiálu. Z hlediska plastických možností materiálu se při výrobě výlisků nepravidelných tvarů často pohybujeme daleko za mezí pevnosti (oblastí homogenního přetvoření). Z tohoto důvodu jsou kritická místa přetvoření nedílnou součástí karosářských výlisků a jejich eliminace změnou tvaru výlisku, popř. technologií výroby je vždy obtížně proveditelná. V kritických místech na výliscích dochází k vyčerpání plasticity materiálu a tím roste nebezpečí vzniku vad, které znemožňují vyrobit bezvadný díl.

Stav trhu, konkurence a nároky uživatelů nutí výrobce zvyšovat nejen kvalitu, ale též ergonomii a design při současném snižování nákladů na výrobu. Neodmyslitelným požadavkem je též dosažení maximální bezpečnosti celého automobilu. Z tohoto důvodu se dříve běžně používané plechy pro lisování dílů karoserie, které ale již dnes zdaleka nevyhovují svými užitnými vlastnostmi, nahrazují v celosvětovém měřítku plechy z ocelí vyvinutých specielně pro díly karoserie. Do popředí zájmu zpracovatelů plechů se tak dostávají především pevnostní materiály a slitiny na bázi hliníku, které svým použitím umožňují snížit hmotnost karoserie automobilu a jejich aplikace vede v mnoha případech i ke zvýšení bezpečnosti posádky automobilu. Technologie zpracování těchto „nových“ materiálů

je do značné míry odlišná od již zavedených zpracovatelských technologií a výrobci i zpracovatelé ocelových plechů se proto snaží hledat nové výrobní postupy i možnosti jejich následného zpracování doplňkovými technologiemi, které zvyšují na maximální možnou míru užitné vlastnosti těchto materiálů. To otevírá další cesty vývoje a výzkumu v oblasti zpracování karosářských plechů. Nutno říci, že ani použitím nových materiálů se kritických míst na výliscích z plechu nelze úplně vyvarovat.

Podstatným omezením ve vztahu k vlastnímu tvářecímu procesu je mimo stupeň dosahované deformace rovněž konkrétní mechanizmus přetvoření. Překročení jistých limitních hodnot vede totiž následně nejen ke zvýšení nároků na technologické podmínky, jedná se např. o uplatnění způsobu mazání, změny parametrů a podmínek tváření, úpravy činných částí nástrojů apod. Správný návrh tvaru výlisku a nástroje tyto nestabilní stavy může minimalizovat. Pro složité prostorové výlisky, kterými karosářské výtažky bezesporu jsou, lze ovšem některé požadavky velmi těžko splnit. Řešením a zároveň i otázkou pak zůstávají možnosti eliminace kritických míst na výliscích pomocí tzv. doplňkových technologických zásahů, kdy se nejčastěji provádí změna velikosti a tvaru přístřihu tvářeného plechu (např. vystřižení technologických otvorů) či změna tvaru a umístění brzdících lišt v tažném nástroji. Snaha je též o lokální snížení koeficientu tření pomocí přimazávaní, neboť jak již bylo prokázáno, koeficient tření přímo souvisí se zadíráním plechů, zejména jsou-li opatřeny povlakem.

Zadírání se projevuje při provozu strojních dílů i při výrobě tvářených součástí. Většina pozornosti se doposud věnovala strojním součástem. Zadírání je problémem při vzájemném pohybu součástí, rotujících čepů v ložiskách i posuvu tyčí ve vedení, pístů ve válcích atd.

Při výrobě tvářených dílů je zadírání letitým problémem zejména při tváření za studena, tam, kde existují vysoké kontaktní tlaky. Je to zejména u protlačování, tažení drátu, hlubokého tažení se ztenčením stěny. V procesech hlubokého tažení bez ztenčení stěny se zadírání projevovalo u některých kombinací materiálů tažnic a taženého plechu, zejména poškozováním činných částí nástroje a tím snižování jeho životnosti. Řešení problému se většinou omezovalo na změnu materiálu nástroje, úpravu stavu jeho povrchu a ne změnou mazání.

Závažným problémem je zadírání při výrobě plechových dílů v sériové výrobě. Platí to zejména v automobilovém průmyslu, kdy zadírání snižuje životnost nástroje, ale zejména poškozuje povrch výlisku natolik, že ani další povrchové opravy neumožní dosáhnout potřebnou kvalitu vyráběného dílu.

V provozu lisoven automobilového průmyslu se zatím nedaří spolehlivě tento nepříznivý jev odstranit. Je zřejmé, že zadírání souvisí se stavem povrchu plechu, třením mezi materiálem a nástrojem, mazáním, kontaktními tlaky, rychlostí posuvu plechu v nástroji a čistotou prostředí, které též má na zadírání nemalý vliv.

1.1 Současný výzkum problematiky zadírání plechů při tažení

Výzkum vzniku a následných projevů zadírání u plechů s povlaky je orientován na hodnocení tribologických vlastností plechů v návaznosti na technologické podmínky tažení. Problematice tribologických podmínek a jejich optimalizaci při tažení je v posledních letech věnována velká pozornost. Jedná se o studium dějů, které výrazně ovlivňují vlastní proces tažení plechů a do značné míry určují konečnou kvalitu výlisku zejména po lakování

Poměrně značný podíl výzkumu je orientován na automobilový průmysl a to zejména ve vztahu k výliskům karosářského typu. Tento fakt je dán tím, že z hlediska výrobců plechů, mazadel i konzervačních olejů jde o komerčně velmi zajímavý podíl na trhu. Je ovšem nutno také konstatovat, že požadavky automobilového průmyslu jsou do značné míry specifické a ve vztahu k výrobcům plechů zpravidla i velmi náročné.

V návaznosti na řešení problémů spojených s lisováním karosářských výlisků, kdy nestačí pouze, aby výrobce plechu zajistil dostatečné hodnoty mechanických vlastností pro bezporuchové lisování, ale je třeba řešit i otázku tribologie, je v současné době popsání tribologických podmínek neodmyslitelnou součástí procesu tažení.

V oblasti výzkumu tribologických jevů jsou neustále hledány nové metodiky měření a zdokonalovány simulační software výpočtů tak, aby se tyto hodnoty co nejvíce přiblížily k reálným hodnotám vyskytujícím se v procesu tváření. Převážná část výzkumu se však orientuje pouze na zjišťování koeficientu tření. Je prokázáno, že zadírání a opotřebení se třením úzce souvisí a jejich vzájemná závislost se velmi často projevuje a komplikuje tak vlastní proces lisování. Zatím bohužel v současné době neexistuje žádná zaručená metoda, která by přesně charakterizovala a specifikovala proces zadírání materiálů v oblasti tváření plechů.

Koeficient tření je však jedním, z rozhodujících technologických parametrů při lisování a významně ovlivňuje vzájemnou interakci soustavy „nástroj – plech“. Tato veličina se při tažení tenkých plechů pohybuje v širokém rozsahu, přičemž jeho hodnota závisí na kvalitě povrchu plechu a nástroje a na vlastnostech maziva. Výskyt tření souvisí s vzájemným relativním pohybem dvou povrchů, proto při tažení výlisku dochází k tomuto jevu mezi tažníkem a plechem, tažnicí a plechem, přidržovačem a plechem (viz.kapitola 2.3.).

Koeficient tření je poměrnou veličinou a určuje vztah mezi velikostí složek normálové a třecí síly. K odvození tohoto náročnějšího parametru tedy slouží zjišťování velikosti třecí síly jako základního parametru třecího procesu, který je východiskem pro výpočet koeficientu tření. V současné době existuje celá řada třecích zkoušek (viz kapitola 4.4.), sledujících tribologické poměry ve sledované soustavě. S použitím rozličné konstrukce přípravků u těchto zkoušek, lze naměřit a zjistit příslušné hodnoty koeficientu tření v hodnocené soustavě testovaný substrát – mazadlo – zkušební nástroj.

Na velikost součinitele tření má vliv mnoho konstrukčních a technologických faktorů, mezi nejvýznamnější patří (materiál nástroje, způsob jeho opracování v souvislosti s

mikrogeometrií, tvářený materiál, jeho morfologie, vlastnosti a typ případné povrchové vrstvy, rychlost tažení, kontaktní tlak, mazivo atd.).

Nerovnoměrnost tření určuje vznik přídavných napětí v různých místech výlisku, která způsobují místní deformaci (místní ztenčení) a tím zapříčiňují náchylnost na vznik trhlin v tvářeném materiálu. Vzniku přídavných napětí lze také využít k odstraňování vln na rovinných plochách výtažku. Velikost tahových napětí je ovlivňována tribologickými poměry v tažném nástroji.

Snížením hodnoty koeficientu tření mezi povrchem nástroje a tvářeným plechem je možné využít k:

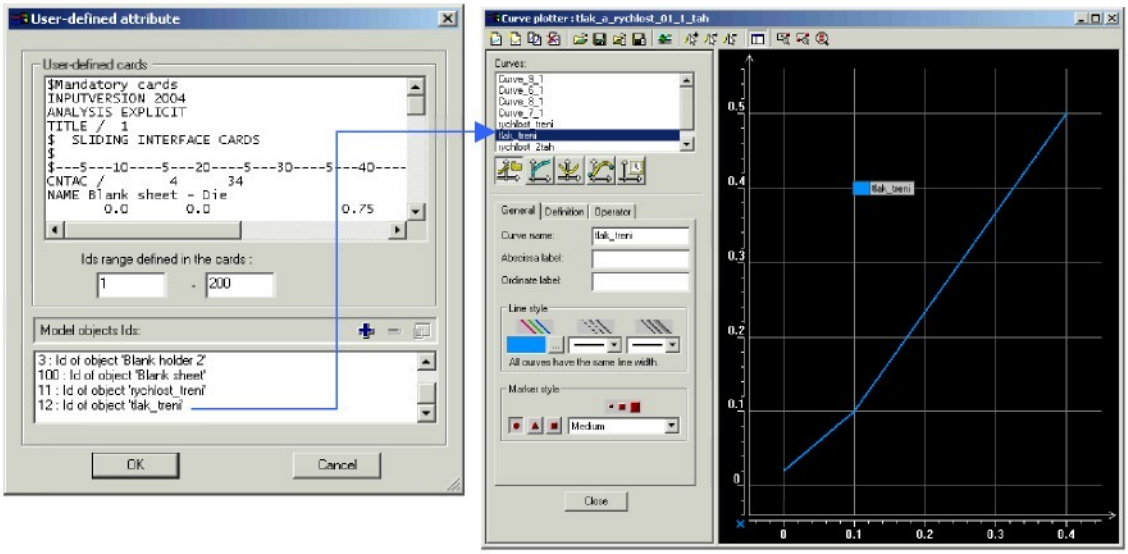
- rovnoměrnější rozložení napjatosti a deformace, zejména ve směru tloušťky plechu
- snížení a minimalizaci výskytu zadírání při tažení
- snížení opotřebení nástroje
- zvýšení jakosti povrchu zhotovovaného dílu

Sledováním vlivu tření, zadírání a tím i opotřebení povrchu se zabývá mnoho firem a vědeckých pracovišť v zahraničí. Výzkumu této problematiky se věnují nejen firmy pro výrobu plechů: Voest Alpine Stahl, Renault, Sollac, Cockerill-Sambre, Arcelor Group, Kawasaki Steel Corporation, ale i výzkumná pracoviště: Výskumný skúšobný ústav Košice, automobilové výzkumné centrum ARSA firmy Arcelor Group a mnohé univerzity v Darmstadtu, Košicích, Ljubljani, Magdeburgu, Moskvě. Výzkumem v oblasti tribologie a hodnocením tribologických vlastností se též zabývá Technická univerzita v Liberci, katedra strojírenské technologie ve spolupráci s předním českým výrobcem automobilů a tedy zpracovatelem plechů ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav.

Přední zpracovatelé plechů dnes již proces tažení většiny problémových výlisků simulují pomocí specielních software, které však nedostatečně popisují tribologické podmínky. Při těchto simulacích se zadává koeficient tření jako konstanta. Je třeba však brát v úvahu, s jakou chybou se při tomto zjednodušení pracuje, neboť při lisování složitých tvarů jsou v místě styku nástroje s plechem tribologické poměry různé. Aby bylo dosaženo reálných výsledků, je u těchto simulací třeba podrobně popsat podmínky tažení a proto je nutné znát konkrétní hodnoty koeficientu tření, které se během tažení mění a jejichž zjišťování je cílem této disertační práce.

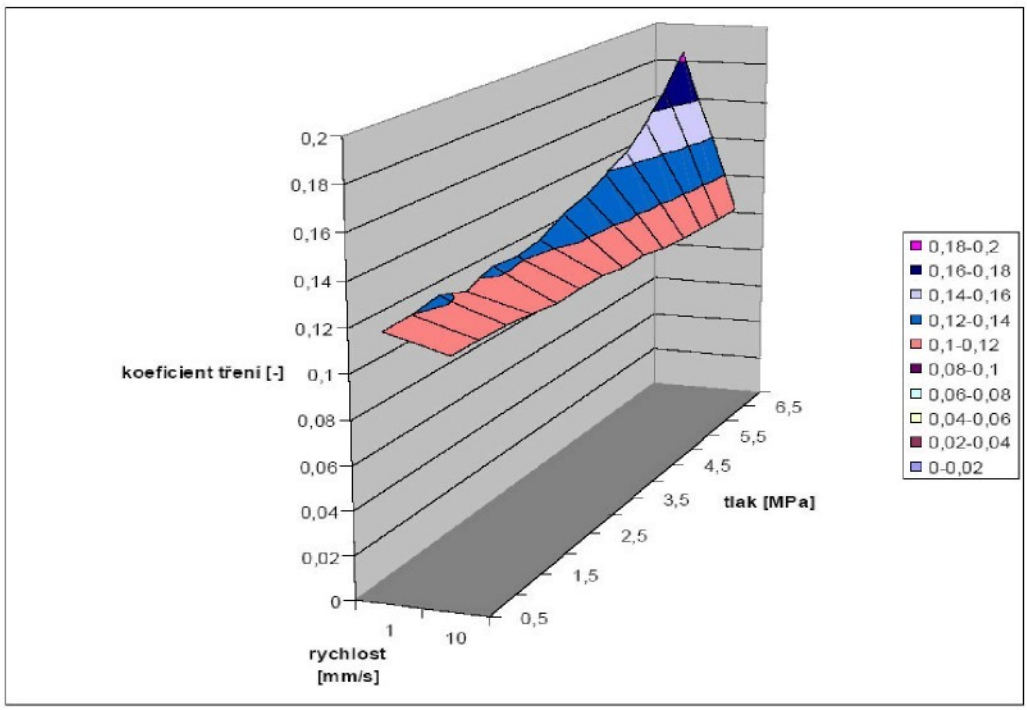
V oblasti simulací, při velmi přesné analýze procesu tažení a řešení otázek souvisejících se způsobem mazání (přimazáváním) tvářeného plechu je možno využít pomocí tzv. **user-defined attribute** proměnnou velikost koeficientu tření. Koeficient tření lze definovat křivkou v závislosti na velikosti kontaktního tlaku, rychlosti posuvu materiálu, případně

obojím. Příklad zadávání koeficientu tření v závislosti na technologických parametrech je vidět na obr.1.1..



Obr.1.1.: *Příklad zadávání koeficientu tření v závislosti na technologických parametrech*

Na základě získaných hodnot z experimentálního měření lze sestrojit 3D graf závislosti koeficientu tření na technologických parametrech (např. rychlosti tažení a kontaktním tlaku), jak je patrné z obr.1.2.. Tento graf pak lze použít při zadávání hodnot koeficientu tření jako proměnné hodnoty při simulacích procesu tažení, čímž bude zpřesněn výpočet.



Obr.1.2.: *Příklad 3D grafu koeficientu tření v závislosti na technologických parametrech*

1.2 Cíle disertační práce

Cílem této práce je pro zadané technologické podmínky, jako vstupující parametry při tažení výlisků karosářského typu, prozkoumat vliv jednotlivých faktorů a jejich vzájemné závislosti způsobující vznik zadírání během procesu tažení s ohledem na velikost koeficientu tření, zejména při vysokých rychlostech tváření. Tyto rychlosti a jejich vliv na kvalitu výlisku, ale také na povrch nástroje zajímají odborníky v oblasti výroby i zpracování plechů především, neboť laboratorní testy provozované za podmínek vysokých rychlostí nejsou doposud dostatečně zmapovány a vyhodnoceny, jelikož jejich provedení vyžaduje specielní typ zkušebního zařízení. Toto zařízení vlastní katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci a experimentální měření tažení za vysokých rychlostí jsou na něm provedena v rámci řešení této disertační práce.

V rámci zjišťování vlivu technologických parametrů na vznik zadírání při tažení karosářských výlisků z plechů s povlaky na bázi zinku je předkládaná disertační práce zaměřena na tyto oblasti:

- problematika tažení a charakteristika výlisků nepravidelného tvaru
- výroba zinkového povlaku a typů morfologií na povrchu plechu používaných v automobilovém průmyslu
- hodnocení tribologických vlastností při tažení pro vybrané jednotlivé parametry (rychlost posuvu, kontaktní tlak, typ maziva a jeho nanášené množství)
- experimentální měření zjišťování koeficientu tření na novém vysokorychlostním zařízení „**SOKOL 400**“ pro vybrané parametry.
- zjišťování vlivu jednotlivých parametrů na koeficient tření s ohledem na vznik zadírání při tažení

Analýza těchto jevů a experimenty uvedené v této práci by měly být příspěvkem k nalezení odpovědí na tak složitý problém, jakým bez pochyby zadírání při tažení pozinkovaných plechů je. Neboť právě výskyt zadírání způsobuje problémy při tažení karosářských výlisků zejména u plechů s povlaky na bázi zinku. Jeho důsledky mají vliv na konečnou kvalitu povrchu výlisku a též opotřebení, případně poškození nástrojů.

Díky skutečnosti, že výlisky karosářského typu zaujímají velký podíl na trhu, je výzkum v oblasti tribologických jevů a jejich hodnocení velice podporován a to nejen samotnými výrobci plechů a maziv, ale též podniky plechy zpracovávající. Jejich vzájemná spolupráce umožňuje hledat nové cesty řešení v oblasti výroby a zpracování plechů pro automobilový průmysl. Na základě této spolupráce lze vyvíjet stále nové a lepší typy maziv, jak z hlediska technologie, tak i z hlediska ekologické nezávadnosti a ekonomické výhodnosti a zároveň současně vyrábět a testovat nové materiály s upravenými parametry, které lépe vyhovují náročným požadavkům pro výrobu dílů karoserií automobilu.

1.3 Přehled vlastních publikací k problematice tribologie a zadírání pozinkovaných plechů při tažení

[1] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P. - SOBOTKA,J. - DOUBEK,P: Vliv technologických parametrů na koeficient tření při tažení. In.: Mezinárodní konference „Technológia 2005“, Bratislava 2005, SR,s 100. ISBN 80-227-2264-2

[2] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P. - SOBOTKA,J. - DOUBEK, P: Vliv morfologie typu EBT na tribologické podmínky tažení. In.: XII. Mezinárodní vědecká konference “FORMING 2005“, Lednice 2005, ČR, s.123-128. ISBN 80-248-0888-9

[3] KOLNEROVÁ,M. - KOVÁRNÍK,L. - DOUBEK,P. - SOLFRONK, P.: Morphology forming methods on the surface of sheets determined for the automobile industry. In: NSVT 2004, Prešov 2004, SK, s.304 – 308, ISBN 80-8073-136-5

[4] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P. - DOUBEK,P. - KOVÁRNÍK,L.:Vliv technologických parametrů na výskyt zadírání při tažení plechu.In:7.mezinárodní konference „FORM 2004“, Brno 2004, ČR, s.63-68, ISBN 80-86607-11-9

[5] KOLNEROVÁ,M.:Hodnocení tribologických vlastností plechů v závislosti na změně technologických parametrů s ohledem na výskyt zadírání v procesu tažení. In: Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25.výročí ustavení katedry tváření a plastů, TU v Liberci 2004, ČR, s.53-60, ISBN 80-7083-856-6

[6] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P. - DOUBEK,P.:Hodnocení tribologických vlastností plechu v závislosti na jeho mikrogeometrii povrchu. In: 8.mezinárodní konference ”TECHNOLÓgia 2003”, Bratislava,SR, s.124. ISBN 80-227-1935-8

[7] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P. - DOUBEK,P.: Vliv změny technologických podmínek na velikosti tažné síly. In: “IVX Mezinárodní vědecké sympozium TU Dresden – TU Liberec“, Drážďany 2003,SRN, s.115-121. ISBN 3 – 8600-371-X

[8] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P.: Porovnání tribologických vlastností hliníkových a ocelových plechů používaných při stavbě karoserie. In: 6.mezinárodní konference „FORM 2002“,Brno 2002, ČR, s.207-212.ISBN 80-214-2162-2

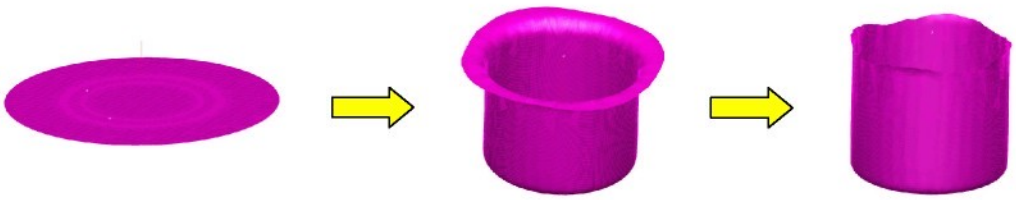
[9] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P.: Morfologie plechů se zinkovým povlakem používaných v automobilovém průmyslu. In:10. Mezinárodní konference “Metal 2001“,Ostrava 2001,ČR, s.73-79.ISBN 80-85988-56-9

[10] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P.: Vliv povrchové úpravy plechu na jeho lisovatelnost. In“:XIII.Mezinárodní vědecké sympozium TU Liberec - TU Dresden“, Liberec 2001,ČR, s.22 -27.ISBN 80 -7083- 469 –2

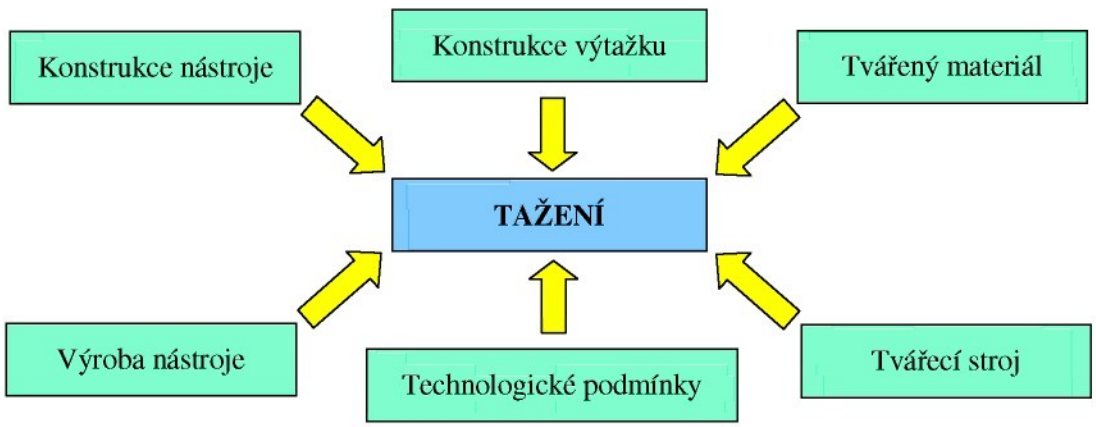
2 CHARAKTERISTIKA HLUBOKÉHO TAŽENÍ [1, 2, 3, 4]

Tažení obecně je technologická operace plošného tváření plechu za studena, kdy z rovinných přístřihů vzniknou prostorové součástky nerozvinutelných tvarů, princip výroby je znázorněn na obr 2.1.. Je to velmi rozšířený způsob zpracování plechu, který nám umožňuje získat součástky přesných tvarů s mnohými přednostmi před jinými technologiemi výroby. Základní faktory mající vliv na konečnou kvalitu finálního výlisku jsou znázorněny na obr.2.2..

Technologie plošného tváření kovů patří mezi jedny z nejproduktivnějších tvářecích technologií lisování plechů. Jejich stoupající význam v moderní průmyslové výrobě souvisí s tím, že umožňují zhotovení součástí nejrůznějších tvarů, rovinných nebo prostorových, jakož i součástí nejrůznějších velikostí. Výhodou těchto součástí je kvalitní povrch zhotovovaného dílu, vysoká přesnost předepsaných rozměrů a poměrně vysoká tuhost při minimální váze součásti. Vzhledem k tomu, že tváření plechu probíhá většinou bez předchozího ohřevu, je kvalita povrchu finálního výrobku prakticky stejná jako kvalita povrchu výchozího materiálu. Důsledkem tváření za studena je také zvýšení meze kluzu a meze pevnosti v závislosti na stupni přetvoření.



Obr. 2.1.: *Princip tažení výlisku rotačního tvaru*



Obr.2.2.: *Faktory ovlivňující proces tažení*

2.1 Analýza hlubokého tažení z hlediska napětí a deformace [5]

Metoda řešení úloh pomocí diferenciálních rovnic rovnováhy s použitím podmínek plasticity je v teorii tváření, z důvodu poměrné jednoduchosti a názornosti, jednou z nejrozšířenějších. Jako příklad výpočtu je zde uveden výpočet napětí a deformace při tažení cylindrických výtažků z kruhového přístřihu při použití přidržovače s konstantní přítlačnou silou.

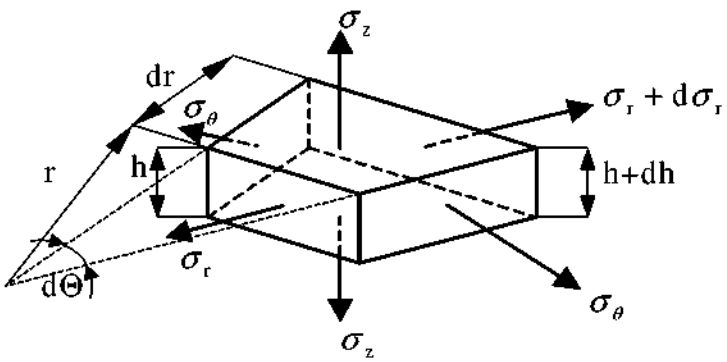
Při radiálním tažení výstřižku z dokonale plastického materiálu vypočítáme napjatost příruby za předpokladu, že třecí síly ve stykových plochách s tažnicí a přidržovačem neovlivní celkové rozložení napětí. Radiální napětí σ_r, napětí ve směru normály σ_z a tangenciální napětí σ_θ můžeme pak považovat za napětí hlavní. Kontaktní tlakové napětí σ_z, vyvozené přítlačnou silou F_p, je zpravidla malé ve srovnání s tahovým radiálním napětím σ_r a tlakovým tangenciálním napětím σ_θ. Největší tangenciální napětí vznikne na okraji příruby, kde také vznikne největší přírůstek tloušťky. Celá přítlačná síla pak působí na úzkém mezikruží na okraji příruby. Přítlačné síle F_p přísluší třecí síla 2 μ F_p, směřující proti směru posuvu okraje příruby. Tato třecí síla vyvodí na okraji příruby radiální napětí

$$(\sigma_r)_{r=b} = \frac{\mu F_p}{\pi b h} \qquad (1)$$

Během tažení se zmenšuje poloměr každého objemového elementu z počáteční hodnoty $r = r_0$ na konečnou hodnotu $r = a$, rovnou poloměru otvoru tažnice. Při zmenšení počátečního poloměru okraje příruby b_0 na okamžitý poloměr b se zmenší počáteční poloměr daného objemového elementu r_0 na okamžitý poloměr r. Z podmínky stálosti objemu prstence mezi počátečním poloměrem okraje příruby b_0 a počátečním poloměrem daného objemového elementu r_0 vyplývá vztah

$$r = \sqrt{r_0^2 + b^2 - b_0^2} \qquad (2)$$

Napjatost v přírubě můžeme vypočítat za předpokladu konstantní tloušťky a předpokladu, že tření je tak malé, že můžeme zanedbat kontaktní smykové napětí ve stykových plochách příruby s tažnicí a přidržovačem. Na daný objemový element na poloměru r pak působí napětí znázorněná na obr.2.3.



Obr.2.3.: Napětí v objemovém elementu příruby při radiálním tažení

Ze složkové podmínky rovnováhy vnitřních sil v radiálním směru vyplývá diferenciální rovnice rovnováhy

$$dR - Td\Theta = 0 \tag{3}$$

kde $R = \sigma_r h r d\Theta$ je radiální síla, $T = \sigma_\theta h dr$ je tangenciální síla $dR = d(\sigma_r h r)d\Theta = \sigma_r h r\left(\frac{d\sigma_r}{\sigma_r} + \frac{dh}{h} + \frac{dr}{r}\right)d\Theta$ je přírůstek radiální síly na dráze. Dosazením do vztahu (6) dostáváme diferenciální rovnici rovnováhy

$$0 = hrd\sigma_r + \sigma_r rdh + \sigma_r hdr - \sigma_\theta hdr = \frac{d}{dr}(h\sigma_r) + \frac{h(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} \tag{4}$$

rovnici dále upravíme na tvar

$$r\frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r \frac{r}{h}\frac{dh}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \tag{5}$$

Vztah mezi radiálním napětím σ_r a tangenciálním napětím σ_θ je určen Huberovou-Misesovou-Henckyho podmínkou plastičnosti

$$\sigma_r^2 - \sigma_r\sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_i^2 = \sigma_k^2 \tag{6}$$

Přírůstky hlavních deformací $d\varphi_r = d(\frac{dr}{dr_0})$, $d\varphi_\theta = \frac{dr}{dr_0}$, $d\varphi_z = \frac{dh}{h}$ určíme z Lévyho-Misesových rovnic

$$\frac{d\varphi_r}{\sigma_r - \sigma_s} = \frac{d\varphi_\theta}{\sigma_\theta - \sigma_s} = \frac{d\varphi_z}{\sigma_z - \sigma_s} = d\omega \tag{7}$$

a z podmínky zachování objemu

$$d\varphi_r + d\varphi_\theta + d\varphi_z = 0, \tag{8}$$

kde $d\varphi_r, d\varphi_\theta, d\varphi_z$ jsou přírůstky hlavních deformací, $\sigma_1' = \sigma_r - \sigma_s$, $\sigma_2' = \sigma_\theta - \sigma_s$, $\sigma_3' = \sigma_z - \sigma_s$ jsou deviátorové složky napětí, $\sigma_s = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)$ je normálné oktaedrické napětí. Po dosazení přejdou Lévyho-Misesovy rovnice na tvar

$$d\varphi_r = \frac{2}{3}d\omega\left[\sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z)\right] \quad d\varphi_\theta = \frac{2}{3}d\omega\left[\sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_r)\right]$$

$$d\varphi_z = \frac{2}{3}d\omega\left[\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta)\right] \tag{9}$$

Sečtením kvadrátů pravých a levých stran obdržíme

$$d\varphi_i = \frac{2}{3}\sigma_i d\omega \tag{10}$$

kde σ_i je intenzita napětí a $d\varphi_i$ je přírůstek intenzity deformace. Odtud vyplývá materiálový koeficient

$$d\omega = \frac{3}{2}\frac{d\varphi_i}{\sigma_i}. \tag{11}$$

Pro rovinnou napjatost $\sigma_z = 0$ z druhé a třetí rovnice (9) vypočítáme poměr

$$\frac{d\varphi_z}{d\varphi_\theta} = \frac{dh/h}{dr/r} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta} \tag{12}$$

z rovnice (12) vyplývá diferenciální rovnice

$$\frac{dh}{h} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta}\frac{dr}{r} \tag{13}$$

Dosazením za dh/h z rovnice (13) do diferenciální rovnice (5) obdržíme

$$0 = r\frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r(1 + \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta}) - \sigma_\theta = r\frac{d\sigma_r}{dr} + 2\frac{\sigma_r^2 - \sigma_r\sigma_\theta + \sigma_\theta^2}{\sigma_r - 2\sigma_\theta} = r\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\sigma_i^2}{\sigma_r - 2\sigma_\theta} \tag{14}$$

Z rovnice (6) určíme $4\sigma_i - 3\sigma_r^2 = \sigma_r^2 - 4\sigma_r\sigma_\theta^2 + 4\sigma_\theta^2 = (\sigma_r - 2\sigma_\theta)^2$ a po dosazení do rovnice (14) se tato rovnice zjednoduší na tvar

$$r\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\sigma_i^2}{\pm\sqrt{4\sigma_i^2 - 3\sigma_r^2}} = 0 \tag{15}$$

Pro dokonale plastický materiál, tj. pro $\sigma_i = \sigma_k$ = konst., obdržíme integrací vztah

$$\frac{\sigma_r}{2}\sqrt{1 - \frac{3\sigma_r^2}{4\sigma_k^2}} + \frac{\sigma_k}{\sqrt{3}}\arcsin(\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\sigma_r}{\sigma_k}) = -\sigma_k \ln r + C \tag{16}$$

Integrační konstantu C vypočítáme z okrajových podmínek. Při radiálním tažení bez tření bude $\sigma_r = 0$ pro r = b. Odtud vyplývá integrační konstanta a po jejím dosazení do (16) dostáváme

$$\frac{\sigma_r}{2}\sqrt{1 - \frac{3\sigma_r^2}{4\sigma_k^2}} + \frac{\sigma_k}{\sqrt{3}}\arcsin(\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\sigma_r}{\sigma_k}) = \sigma_k \ln\frac{b}{r} \tag{17}$$

Při tažení se třením vypočítáme integrační konstantu z okrajové podmínky $\sigma_r = \frac{\mu F_p}{\pi bh}$ pro r =b.

Z rovnice (17) můžeme vypočítat radiální napětí σ_r daného objemového elementu s počátečním poloměrem r_0, známe-li jeho okamžitý poloměr r a okamžitý poloměr příruby. Příslušné tangenciální napětí σ_θ vypočítáme z rovnice (6). Tloušťku h na poloměru r určíme dosazením vypočítaných napětí σ_r, σ_θ do rovnice (13). Integrací obdržíme

$$\ln\frac{h}{h_0} = \int_{r_0}^{r}\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta}\frac{dr}{r} = (\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta})_s \ln\frac{r}{r_0}$$

$$h = h_0\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\left(\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta}\right)_S} \tag{18}$$

Střední hodnota zlomku $(\frac{\sigma_r+\sigma_\theta}{\sigma_r-2\sigma_\theta})_s$ je určena hodnotami napětí σ_r, σ_θ v daném objemovém elementu během jeho posuvu z počátečního poloměru r_0 na okamžitý poloměr r.

Rovnice (17), určující radiální napětí příruby při daném stupni přetvoření, platí jen pro dokonale plastický materiál a je poměrně složitá. Její další nevýhoda je, že napětí σ_r zde není vyjádřeno explicitní funkcí parametru b/r, případně parametru r_0/r. Vztahy pro napětí σ_r, σ_θ vyjádřené parametrem r_0/r, lze odvodit pomocí přibližné Huberovy-Misesovy-Henckyho podmínky plastičnosti pro rovinnou napjatost

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \beta\sigma_k \tag{19}$$

kde koeficient β je určen sečnou Misesovy elipsy, nahrazující její oblouk. Střední hodnota tohoto koeficientu je $\beta \approx 1{,}1$.

Při zhotovování výtažku z nedokonale plastického materiálu vyjádříme křivku zpevnění funkcí $\sigma_i = H(\varphi_i)$. Radiální deformace φ_r je malá ve srovnání s tangenciální deformací φ_θ. Intenzitu deformace φ_i pak můžeme nahradit tangenciální deformací

$$\varphi_\theta = -\ln\frac{r}{r_0} = \ln\frac{r_0}{r} \tag{20}$$

Křivka zpevnění je pak určena funkcí

$$\sigma_i = H(\ln\frac{r_0}{r}) = \sigma_k \tag{21}$$

Rovnice (19) pak přejde na tvar

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \beta H(\ln\frac{r_0}{r}) \tag{22}$$

Dosazením za $(\sigma_r - \sigma_\theta)$ do rovnice (4) obdržíme diferenciální rovnici rovnováhy

$$\frac{d}{dr}(h\sigma_r) = -\frac{h}{r}\beta H(\ln\frac{r_0}{r}) \tag{23}$$

Pro řešení této rovnice je třeba vyjádřit proměnnou tloušťku příruby h jako funkci parametru r_0/r. Tuto funkci lze s použitím Lévyho-Misesovy rovnice pro deformační rychlost odvodit z radiální rychlosti posuvu daného objemového elementu a po vyjádření má tvar [5]

$$\frac{dh}{h} = \frac{2\sigma_r - \beta H(\ln\frac{r_0}{r})}{2\beta H(\ln\frac{r_0}{r}) - \sigma_r}\frac{dr}{r} \qquad \ln\frac{h}{h_0} = \int_{r_0}^{r}\frac{2\sigma_r - \beta H(\ln\frac{r_0}{r})}{2\beta H(\ln\frac{r_0}{r}) - \sigma_r}\frac{dr}{r} \tag{24}$$

Známe-li funkci $\sigma_k = H(\ln\frac{r_0}{r})$, můžeme vypočítat numerickou integrací rovnic (23) a (24), pro libovolný stupeň přetvoření b/b_0, tloušťku h a napětí σ_r v libovolném místě příruby. Napětí σ_θ vypočítáme z rovnice (19).

Přibližné hodnoty napětí σ_r, σ_θ při tažení výstřižku z dokonale plastického materiálu lze vypočítat za předpokladu, že změna tloušťky příruby neovlivní její celkovou napjatost. Rovnice (23) se pak zjednoduší na tvar

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{1}{r}\beta H(\ln\frac{r_0}{r}) \tag{25}$$

Pro dokonale plastický materiál, tj.pro σ_k= konst., určíme integrací rovnice (25) radiální napětí σ_r

$$\sigma_r = -\beta\sigma_k \ln r + C \tag{26}$$

Integrační konstantu C vypočítáme z okrajové podmínky $\sigma_r = \frac{\mu F_p}{\pi bh}$ pro r=b. Po dosazení do rovnice (26) a z podmínky plasticity (19) dostáváme vztahy pro výpočet σ_r, σ_θ

$$\sigma_r = \beta\sigma_k \ln\frac{b}{r} + \frac{\mu F_p}{\pi bh} \qquad \sigma_\theta = -\beta\sigma_k(1-\ln\frac{b}{r}) + \frac{\mu F_p}{\pi bh} \tag{27}$$

Při zhotovování výrobku nelze zanedbávat přídavná napětí $\Delta\sigma_r$, příslušná plastickému ohybu a plastickému narovnání na okraji tažné hrany a přídavná napětí příslušná tření podél tažné hrany. V každém objemovém elementu příruby, který se posouvá podél tažné hrany, změní se meridiánový poloměr křivosti střední vrstvy z původní hodnoty $R_S=\infty$ na hodnotu $R_S = R_T + \frac{h}{2}$, kde R_T je poloměr tažné hrany. Okraj příruby se tedy ohýbá vlivem ohybového momentu M, při současném působení tahových napětí. Zanedbáme-li vliv deformačního zpevnění a účinek tahových napětí, bude vnější ohybový moment M, vztažený na jednotku délky, rovný

$$M_1 = \sigma_k \frac{h^2}{4} \tag{28}$$

Ohyb rovinného pásku o úhel $d\gamma$ vyžaduje přídavnou deformační práci

$M_1 d\gamma = \sigma_k \frac{h^2}{4} d\gamma$, kterou můžeme vyjádřit také pomocí přídavného radiálního napětí $\Delta\sigma_r$.

Účinkem tohoto přídavného napětí se posune objemový element z počáteční polohy 1 do polohy 2, viz. obr.2.4.. Z rovnosti práce vnitřního a vnějšího ohybového momentu dostaneme vztah

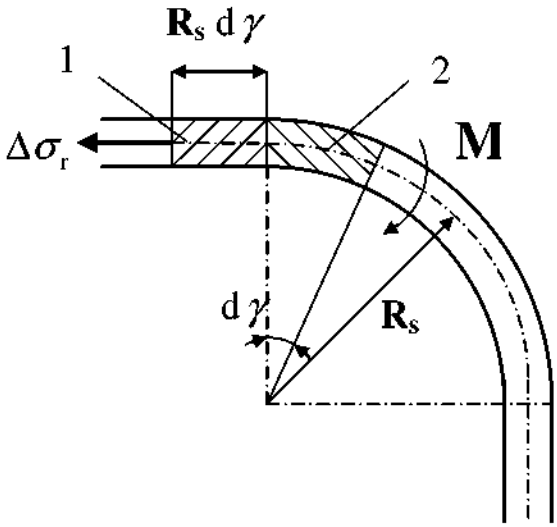
$$\Delta\sigma_r h R_s d\gamma = \sigma_k \frac{h^2}{4} d\gamma \tag{29}$$

Vztah pro výpočet přídavného napětí $\Delta\sigma_r$ potřebné k ohybu a narovnání kolem tažné hrany se středním poloměrem R_s se vypočítá dle vztahu

$$\Delta\sigma_r = \frac{\sigma_k}{2}\frac{h}{R_T + \frac{h}{2}} \tag{30}$$

Vliv tření podél tažné hrany vyjádříme koeficientem $e^{\alpha\mu}$, kde α je úhel ohybu. Pro zaoblenou tažnou hranu s kruhovým obrysem platí $\alpha = 90°$. Celkové tahové napětí na okraji cylindrické stěny výtažku je tedy rovné celkovému radiálnímu napětí na poloměru r = a, kde a je poloměr otvoru tažnice. Vztah pro výpočet tohoto napětí má tvar

$$(\sigma_r)_{r=a} = \left[\beta\sigma_k \ln\frac{b}{a} + \frac{\mu F_p}{\pi b h} + \frac{\sigma_k}{2}\frac{h}{R_T + \frac{h}{2}}\right] e^{\alpha\mu} \tag{31}$$



Obr.2.4.: *Ohyb materiálu v oblasti tažné hrany*

Z výše uvedených vztahů je vidět, že použití výpočtu napětí a deformace materiálu pomocí metody diferenciálních rovnic rovnováhy s použitím podmínek plasticity je poměrně složité a při výpočtu se často používá zjednodušujících předpokladů, které více či méně ovlivňují přesnost výpočtu.

S rozvojem výpočetní techniky a současně s její cenovou dostupností se v současné době používají ve strojírenství numerické metody výpočtu založené na metodě konečných prvků. Nespornou výhodou těchto metod je možnost řešení značně složitých nelineárních úloh, mezi které patří i úlohy z oblasti plošného tváření.

2.2 Vliv technologické parametrů na proces hlubokého tažení [4]

Tažení rovinného přístřihu plechu na tvarově a prostorově složitý výtažek probíhá v konkrétním nástroji, na konkrétním lise a při určených technologických podmínkách. Kromě vlivu taženého materiálu na úspěšný výsledek operace je nezbytné brát v úvahu také vliv konkrétních podmínek tažení. Podmínky, v kterých probíhá proces tažení na lise, mají značný vliv na výsledek konečné kvality hotového výlisku, podle doposud získaných poznatků ovlivňují vlastní tažení a mezní přetvoření při tažení zejména tyto faktory:

- přidržovací tlak
- rychlost tažení
- mazání

2.2.1 Vliv přidržovacího tlaku

Přidržovací tlak je vyvozen v přidržovači, jehož úkolem je během tažení zabránit tvorbě vln v oblasti příruby. Aby mohl přidržovač tuto funkci plnit, musí vyvinout na materiál takový tlak, aby k tomuto zvlnění příruby nedocházelo. Tlak však nesmí být příliš velký, aby nedošlo ke značnému zvýšení třecích sil, které by způsobily porušení výtažku. Problém nastává zejména při určení správného přidržovacího tlaku u složitých výtažků, neboť tlak je rozdílný v rohu výtažku, přechodové části a i v rovné části výtažku.

2.2.2 Vliv rychlosti tažení

Tato problematika je neustále mnohými vědeckými pracovišti řešena, neboť v současné době jsou v lisovnách používány již moderní lisy s vysokým počtem zdvihů. Na základě mnohých výsledků bylo zjištěno, že zvýšení rychlosti tažení velkorozměrných výtažků složitých tvarů má nepříznivý vliv na proces plastické deformace v důsledku vzniku plastických vln, způsobujících lokalizaci deformace a tím i možné porušení výtažku při tažení.

Rychlost tažení ovlivňuje třecí poměry, přestože součinitel tření závisí od smykové rychlosti, proto může rychlost tažení podstatně ovlivnit stupeň tažení. Tato závislost je tím větší, čím větší podíl z celkové tažné síly náleží třecím silám.

2.2.3 Vliv mazání

Při tažení vznikají třecí síly v oblastech (popsány v kapitole 2.3.,obr.2.5) a tření samotné pak zvyšuje tažnou sílu o 20-30% , způsobuje otěr, opotřebení činných částí tažného nástroje a ovlivňuje též mezní hodnoty stupně tažení. Pro snížení tření se používají maziva, která dokáží snížit nežádoucí tření při tažení.

S mazáním je spolu v součinnosti i problematika zadírání, což je důležitý faktor vyskytující se během tažení. Zadírání podstatnou měrou ovlivňuje konečnou kvalitu zejména pohledových výlisků karosérie automobilu

2.3 Vliv tření na proces hlubokého tažení [6]

Proces hlubokého tažení z hlediska stavu napjatosti a deformací patří mezi nejnáročnější operace plošného tváření. O průběhu deformace při hlubokém tažení rozhodují kromě již zmiňovaných technologických podmínek dalších faktory:

1. materiál a jeho vlastnosti
2. tření tvářeného materiálu s povrchem tažného nástroje

O uplatnění uvedených faktorů rozhoduje metoda tažení, neboť napětí i tloušťka se během procesu tažení mění, stejně tak i vlastní tření ve styku dvou povrchů. Při tažení v pevném nástroji působí oba tyto faktory, přičemž v počáteční fázi tažení při tvarování dna výtažku, kdy je síla na tažníku malá má tření materiálu v nástroji malý vliv na průběh deformace. Postupně se zvyšováním síly tažení se projevuje stále větší vliv tření a ztěžuje proces přetvoření, kdy může dojít i za jistých podmínek k místnímu porušení výtažku.

Obecně můžeme konstatovat, že tření ovlivňuje průběh deformace během tažení a je jedním z nejdůležitějších parametrů, který má vliv na maximální přetvoření při hlubokém tažení zejména tím, že ovlivňuje velikost mezní tažné síly. Tření tak zároveň ovlivňuje i kvalitu konečného výlisku (kvalita povrchu, přesnost výtažku ve smyslu rovnoměrné tloušťky).

Sílu na tažení F_T je možno v obecném tvaru vyjádřit dle vztahu

$$\overleftarrow{F_T} = \overleftarrow{F_d} + \overleftarrow{F_o} + \overleftarrow{F_t} \qquad (32)$$

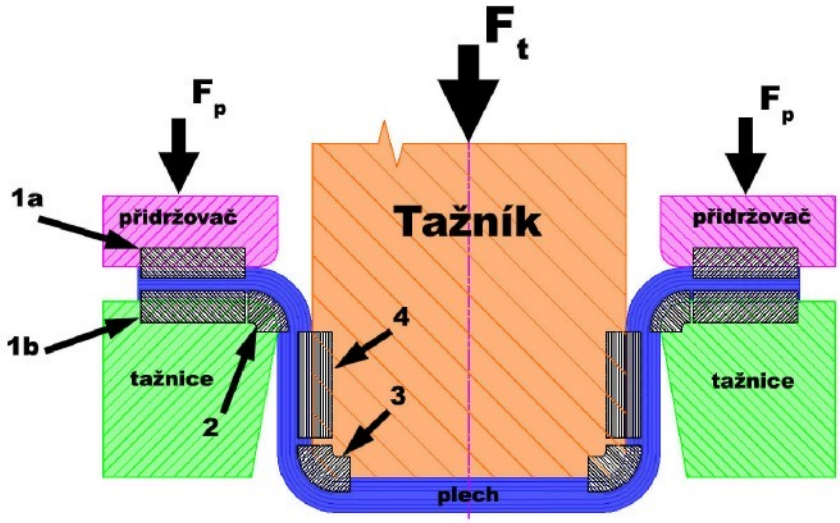
kde $\overleftarrow{F_d}$ je deformační síla na plastické přetvoření
$\overleftarrow{F_o}$ je deformační síla na plastický ohyb přes poloměr tažnice
$\overleftarrow{F_t}$ je celková třecí síla

Z uvedené rovnice (32) vyplývá, že při konstantních konstrukčně-technologických parametrech nástroje a podmínkách procesu tažení, velikost tažné síly je ovlivněna třecí složkou síly F_t, tedy tribologickými podmínkami. Do těchto můžeme zařadit druh a nanášené množství použitého maziva, což ovlivňuje do značné míry podmínky tření, při kterých se vlastní tažení uskutečňuje. Tažení obecně probíhá za podmínek mezního tření a další faktory do procesu vstupující tento stav ovlivňují a značnou měrou se tak podílí na kvalitě konečného výsledku tažení. Z mnohých lze jmenovat: kontakt nástroj-materiál, mikrogeometrii nástroje a tvářeného materiálu, morfologii povrchu substrátu a další parametry, o kterých bude podrobně zmiňováno v následujícím textu práce.

Složka třecí síly se skládá z dílčích třecích sil v jednotlivých oblastech stykových povrchů systému nástroj-výtažek.

Výskyt tření souvisí se vzájemný relativním pohybem dvou povrchů, proto při tažení výlisku dochází k tomuto jevu v oblastech jež jsou znázorněny na obr.2.5.

- mezi přidržovačem a plechem (**1a**)
- mezi tažnicí a plechem (**1b a 2**)
- mezi tažníkem a plechem (**3 a 4**)



Obr.2.5.: *Schématické znázornění dílčích třecích složek v kontaktu tažný nástroj-materiál*

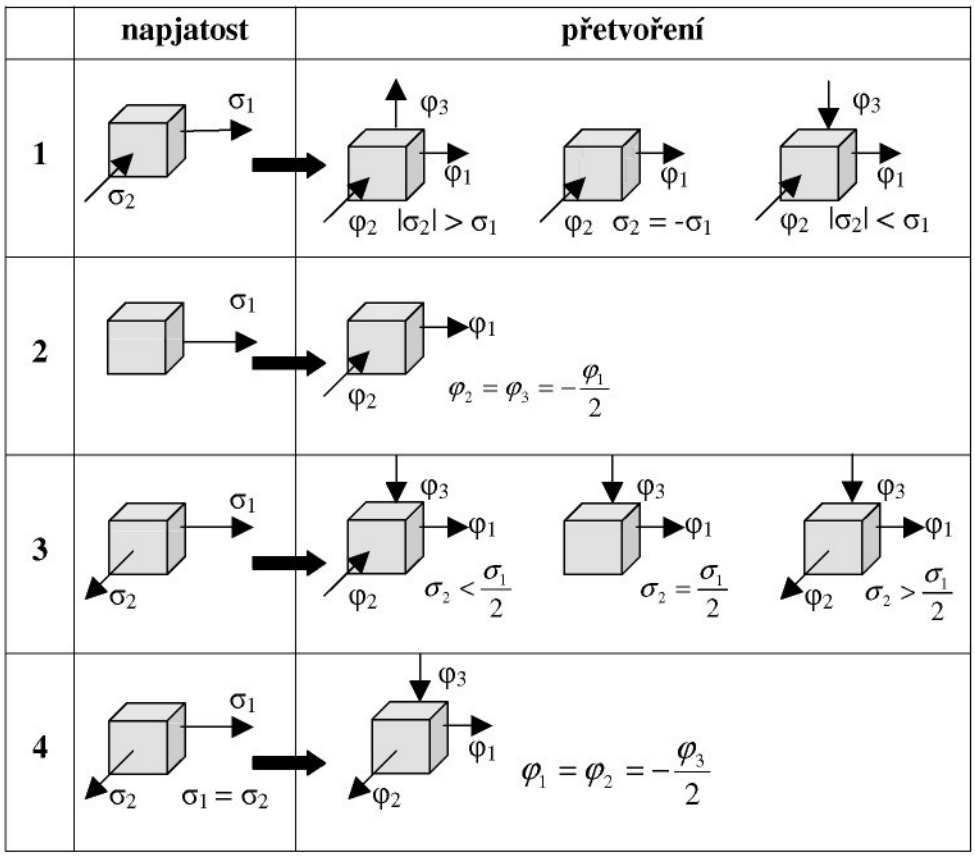
Zvláštní oblastí zpracování tenkých plechů je tažení výlisků nepravidelných tvarů v automobilovém průmyslu. S ohledem na tvarovou složitost výlisku je problematika tažení značně odlišná od tažení jednoduché válcové nádoby. Výtažek je tvořen ve většině případů křivočarými plochami a jeho obrys je nepravidelný a složitý. Příklad výlisku nepravidelného tvaru tzv.“karosářského výlisku“ pátých dveří automobilu Škoda Fabia combi je vidět na obr. 2.6..

Obr.2.6.: *Karosářský výlisek pátých dveří automobilu Škoda Fabia combi*

Při tažení se obecně uplatňují rovinné stavy napjatosti a přetvoření. Schémata stavů napjatosti a přetvoření uplatňující při tažení výlisků nepravidelných tvarů jsou na obr.2.7..

Jednotlivé případy na obr.2.7. se postupně vyskytují:

- v oblasti přidržovače **(1)**
- v okrajových oblastech plechu výlisku se mohou vyskytovat i stavy blízkém jednoosému tahu **(2)**
- v převážné části povrchu je dvojosá tahová napjatost **(3)**
- vypínání **(4)** - lze považovat za hraniční případ stavu **(3)**



***Obr.2.7.:** Schémata stavů napjatosti a přetvoření uplatňující se při tažení výlisků*

2.4 Problematika tažení výlisků nepravidelných tvarů karosářského typu [1, 3, 4, 7]

Tváření plechu hlubokým tažením součástí nepravidelného tvaru, tzv. „karosářských výlisků", je jednou z nejsložitějších operací. Jedná se především o nepravidelné velkoplošné výtažky, které se vyznačují členitým povrchem a nerovnoměrnou hloubkou tažení. U výlisků karosářského typu se mění tvar v závislosti na konstrukci a tvaru karoserie, je nutno vždy znovu řešit základní otázky technologie taženého dílu. Společně s použitím pozinkovaných plechů vyvstávají další otázky, které jsou spojeny nejen s tribologickými vlastnostmi povrchové vrstvy plechů, ale také s její stabilitou při lisování (otěr, drobení, odlupování), což má zásadní vliv na výskyt zadíraní při tažení.

Požadavky automobilového průmyslu, a to zejména ve vztahu k výliskům karosářského typu jsou do značné míry specifické a náročné. Vysoké požadavky jsou kladeny na jakost povrchu, rozměrovou přesnost, tuhost výtažků i estetickou úroveň povrchových dílů. U výtažků karosářského typu dochází v důsledku nepravidelnosti tvaru a členitosti povrchu k nerovnoměrným stavům napjatosti a přetvoření v různých místech výtažku. S ohledem na tvar výlisku a podmínky tažení se kombinují procesy posuvů a vypínání. Vypínání lze dosáhnout pomocí zabrždění plechu, kdy je zcela znemožněn posuv plechu mezi tažnicí a přidržovačem. Při tažení výlisků je také snaha o místní brždění plechu v oblasti přidržovače a tažné hrany. Regulace brždění plechu se dociluje pomocí různých technologických zásahů,jak je obecně známo (např. brzdící lišty, regulovaná síla přidržovače,úprava tažné hrany), které umožňují změnu podmínek vtahování tvářeného plechu do prostoru tažnice. Tím se vytváří příznivější stavy napjatosti a stupně přetvoření v kritických místech výtažku, čímž se dociluje vyššího využití tvárnosti daného materiálu a celkové zvýšení efektivnosti tažení.

Hlavní aspekty tažení nepravidelných výlisků:

- na počátku tažného procesu je plocha nástřihu sevřená pod přidržovačem mnohem menší než celková plocha přístřihu
- funkční části tažníku, tažnice a přidržovače jsou obvykle tvořeny složitými zborcenými plochami
- vnitřní obrys hrany tažnice je ve většině případů tvořen prostorovou křivkou
- stavy napjatosti a podmínky přetvoření u nepravidelných výlisků jsou obecně rozdílné a musí se zjišťovat individuálně v závislosti na tvaru výtažku a na zvolených technologických parametrech
- na rozdíl od hlubokého tažení válcových výtažků je zde nutné nerovnoměrně ovlivňovat tok materiálu z oblasti přidržovače s ohledem na tvar výtažku a podmínky tažení

3 CHARAKTERISTIKA PLECHŮ KAROSÁŘSKÉHO TYPU

3.1 Požadavky na plechy pro karosářské výlisky [9, 10]

Podstatným faktorem pro volbu vhodného materiálu pro lisování tak složitých výtažků z tenkého plechu jako jsou díly na karosérie automobilu je tvařitelnost. Automobilový průmysl dnes patří k nejdynamičtěji se rozvíjejícím oblastem průmyslové výroby. Jsou zde kladeny ty nejvyšší nároky na cenu, bezpečnost, vzhled a v neposlední řadě na hmotnost.

Aby mohl výrobce tenkých plechů vůbec uspět v dnešní těžké konkurenci mezi ostatními výrobci, musí sledovat vyráběný sortiment a zapojovat se do řešení problémů spojených se zpracováním materiálu tj. tažením složitých výlisků, jako jsou právě již zmíněné karosářské výlisky. Právě automobilový průmysl v současné době patří mezi největší odběratele a zpracovatele tenkých plechů a jeho požadavky na dodávaný a zpracovávaný materiál se neustále zvyšují.

Výběr vhodného materiálu splňujícího kladené podmínky na tažený díl jsou prvním a zásadním krokem k vylisování dobrého výlisku. Ovšem odpovědět na tak zdánlivě jednoduchou otázku jakou je *„Jaký vybrat vhodný materiál?“* již tak jednoduché není...

V době, kdy je trh nasycen nejrůznějšími nabídkami mnohých výrobců tenkých plechů mající různé kvalitativní a mechanické vlastnosti, je potřeba znát obecně známé parametry určující chování výtažku při zatížení, ale také hlavně co nejpřesněji zhodnotit chování materiálu při vlastní operaci tažení. Při výběru vhodného materiálu se vychází z již zmiňované tvařitelnosti plechů.

Na plech jako konstrukční materiál jsou kladeny neustále nové požadavky. Standardní nízkouhlíkové ocelové plechy na stavbu karoserie se dnes používají jen v malé míře. Tento typ materiálu byl nahrazen převážně povlakovanými ocelovými plechy. Tenkým ocelovým plechům s povlakem se v současné době věnuje značná pozornost a význam materiálů, jejichž povrch je upraven, neustále narůstá. Tyto plechy musí splňovat požadavky na dobrou lisovatelnost a zároveň povrchová vrstva musí poskytovat účinnou ochranu proti korozi. Na povrchu plechů se vytváří morfologie s požadovanou mikrogeometrií. Parametry takto získaných povrchových mikrogeometrií lépe odpovídají náročným požadavkům výrobců automobilů na dobrou lisovatelnost a vzhledové vlastnosti plechu. Estetický vzhled rozhodující mírou ovlivňuje subjektivní dojem zákazníka z finální kvality výrobku.

3.2 Materiály používané na výrobu karosářských výlisků [8,11]

Přestože se v posledních letech někteří výrobci automobilů pokoušejí do výroby prosadit co nejvyšší podíl plechů hliníkových, úspora hmotnosti na jednotlivých dílech a potažmo na celé karoserii stále není v porovnání s ekonomickou nákladností v poměru umožňujícímu výhodnou sériovou produkci. I proto ocelové plechy dosud zůstávají nejpoužívanějším

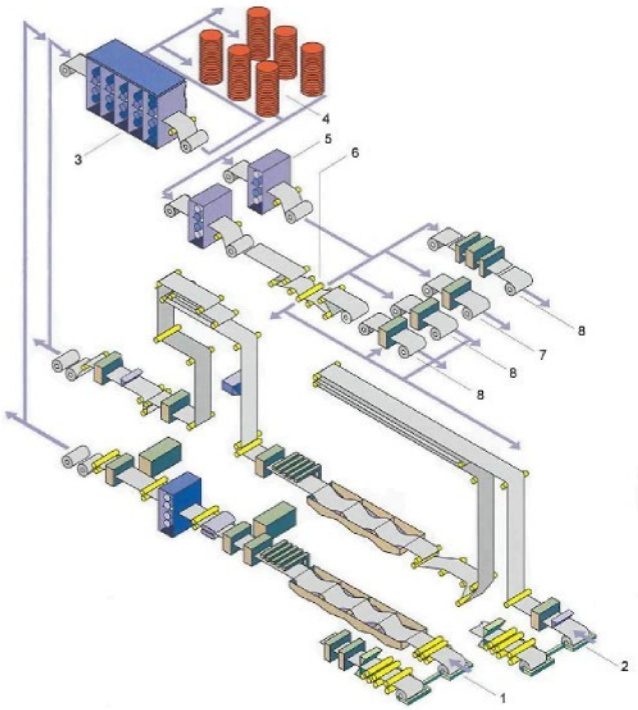
materiálem pro výrobu karoserií, avšak standardní nízkouhlíkové ocelové plechy se na stavbu karosérie dnes používají jen v malé míře.

Zejména z hlediska korozní ochrany vzrůstá objem spotřeby povrchově upravovaných plechů používaných k přímé výrobě finálních dílů karosérie automobilu. Různý druh, tloušťka používaných plechů a rovněž typ jejich povrchové úpravy vytvářejí samozřejmě hlavní omezení použitelnosti těchto materiálů, ale z pohledu výrobního, uvedené faktory spolu s dalšími ovlivňují především jejich zpracovatelnost.

3.2.1 Výroba tenkých ocelových plechů válcováním za studena [8, 12]

Tato technologie je v podstatě nejznámější a její produkty nejvíce využívané. V praxi to znamená udržování teploty ve válcovacích stolicích řádově v desítkách stupňů Celsia. Příklad zařízení na válcování plechu za studena skládajícího se z různých válcovacích stolic a linek znázorňuje schéma na obr. 3.1.. Ocelové plechy takto zhotovené se vyznačují výbornou tvařitelností za studena, vysokou kvalitou povrchu a rovností pásu, velmi dobrými předpoklady ke svařování a také malými výkyvy v rozměrech.

(1) rovnačka pásu a mořící linka
(2) kontinuální mořící odrezovací linka
(3) tandemová válcovací stolice
(4) žíhací pece
(5) paralelní drezírovací stolice
(6) rovnačka pásu (zařízení k vyrovnání vnitřních napětí)
(7) nástřihová linka
(8) kontrolní linky



Obr.3.1.: *Schéma válcovací stolice pro válcování za studena*

Při válcování prochází materiál postupně celou válcovací soustavou opatřenou všemi zařízeními jak je znázorněno na obr.3.1..

Kontinuální mořící a rovnací linka zbavuje pás okují průchodem materiálu kyselou lázní. Na čele sekce chemického čištění je instalován natahovací stroj, který napomáhá mechanickým porušením okujové vrstvy. Obě linky jsou opatřeny elektrostatickými stroji dodávajícími po odmoření olej na povrch pásu.

Centrální sekci soustavy pro válcování za studena tvoří pětistupňová tandemová stolice. Odmořený pás je v ní válcován na tloušťky 0,3mm až 3,5mm. V této sekci se dosahuje rychlosti pásu na výstupu až 90km/h. První čtyři stupně této stolice jsou ve čtyřposchoďovém konstrukčním provedení (kvarto), pátý je šestiposchoďový (šestiválec). Toto provedení, ve spojení s řídícím programem tloušťky a plochosti pásu (pracuje v uzavřené smyčce), značně napomáhá ke zlepšení rovnosti plechu a konzistenci profilu při dodržení nejužší možné tolerance tloušťky. Profil pásu je monitorován měřícím válečkem. K tomuto zajištění dobré plochosti je také průběžně vylepšována čistota povrchu a to odděleným okruhem emulze pro pátý stupeň.

Při další operaci je svitek v žíhací peci rekrystalizačně žíhán, aby se odstranilo deformační zpevnění způsobené válcováním a navinováním.

Vyžíhané svitky jsou dále přesunuty na drezírovací tratě, kde jsou protahovány zdrsněnými válci a to s malým stupněm redukce, cca 0,5 až 2,0%, který vytváří požadovanou drsnost povrchu. Touto operací se materiál připravuje na pozdější tvarovou úpravu či aplikaci elektrolyticky nanášených povlaků. Drezírovací stolici ovládá hydraulický šroubový mechanismus s automatickým řízením prodloužení. To se měří deflektory umístěnými před a za sestavou. Spojením s automatickým řízením tlaku a přítlačné síly se dociluje konstantního prodloužení po celé délce svitku. Přímo k drezírovací stolici je připojena i vyrovnávačka napětí, takže pokud se vyžaduje zvýšení rovinnosti plechu, drezírování a rovnání lze provést v jednom procesu.

Poslední stupeň tvoří nástřihová a inspekční linka. Zde jsou ostříhávány kraje svitku nebo je svitek rozřezáván na požadované délky, značí se a elektrostaticky olejuje k prevenci před korozí.

3.3 Ocelové plechy s povlaky [13]

V posledních letech značně vzrostly požadavky spotřebitelů na jakost protikorozní ochrany automobilových karoserií, neboť je známo, že životnost moderního automobilu je do značné míry ovlivněna životností ocelové karoserie. Pro splnění požadavků, které jsou na ochranné povlaky kladeny je třeba, aby byly povlaky nanášeny na kovově čistý a vhodně upravený materiál.

Životnost povlaku a jeho ochranná účinnost je v prvé řadě závislá na dokonalé vazbě systému: povlak – základní materiál a na tvařitelnosti povrchové vrstvy.

Trvalá je snaha zlepšovat vlastnosti povlaků i metody jejich přípravy. Problémem při použití povlakovaných plechů je zhoršení kvality povlakových vrstev při samotném lisování, kdy dochází k adhezi mezi povlakem plechu a nástrojem, což způsobuje zadírání nebo stírání povlaku. Velká pozornost se proto věnuje zjišťování ztráty vlastností povlaků a jejich poškozování při vlastním tváření plechů.

3.3.1 Ocelové plechy s povlaky na bázi zinku [14, 15, 16, 17]

3.3.1.1 Ochranná funkce povlaku

V automobilovém průmyslu se nejvíce uplatňují plechy s povlaky na bázi zinku. Zinek je vhodný především svou relativně nízkou cenou, výbornou korozní ochranou, svými elektrochemickými vlastnostmi poskytuje ocelovému podkladu katodickou ochranu.

Ochrana ocelí zinkem se realizuje převážně formou povlaků zinku, ze kterých je více jak 50% aplikovaných na ocelové pásy, asi 15% na trubky a dráty, zbytek na konstrukce a strojní součásti. Zinek patří do skupiny neušlechtilých kovů, s tendencí pasivace. V kontaktu s ocelí vystupuje jako anoda a převádí ocel do imunního stavu. Tento elektrochemický článek je podstatou ochrany ocele a jiných kovových materiálů proti korozi.

Ochranné působení vrstvy zinku na plechu použitého při výrobě automobilové karoserie má podstatně zvýšit odolnost úplného ochranného systému proti podkorodování a výrazně oddálit korozi ve spárách a dutinách, kde vlastní nátěrový systém není úplný nebo je méně kvalitní.

Pro výrobu karoserií se velmi často používají plechy žárově i elektrolyticky pozinkované s ochrannou vrstvou na jedné či obou stranách. Pozinkované plechy se vyznačují vysokou odolností proti korozi, při tažení však mají sklony k zadírání, porušování soudržnosti ochranného povlaku a podkladového materiálu, obnažování základního povrchu apod. Pro zamezení zadírání jsou zinkované plechy opatřovány fosfátovým povrchem.

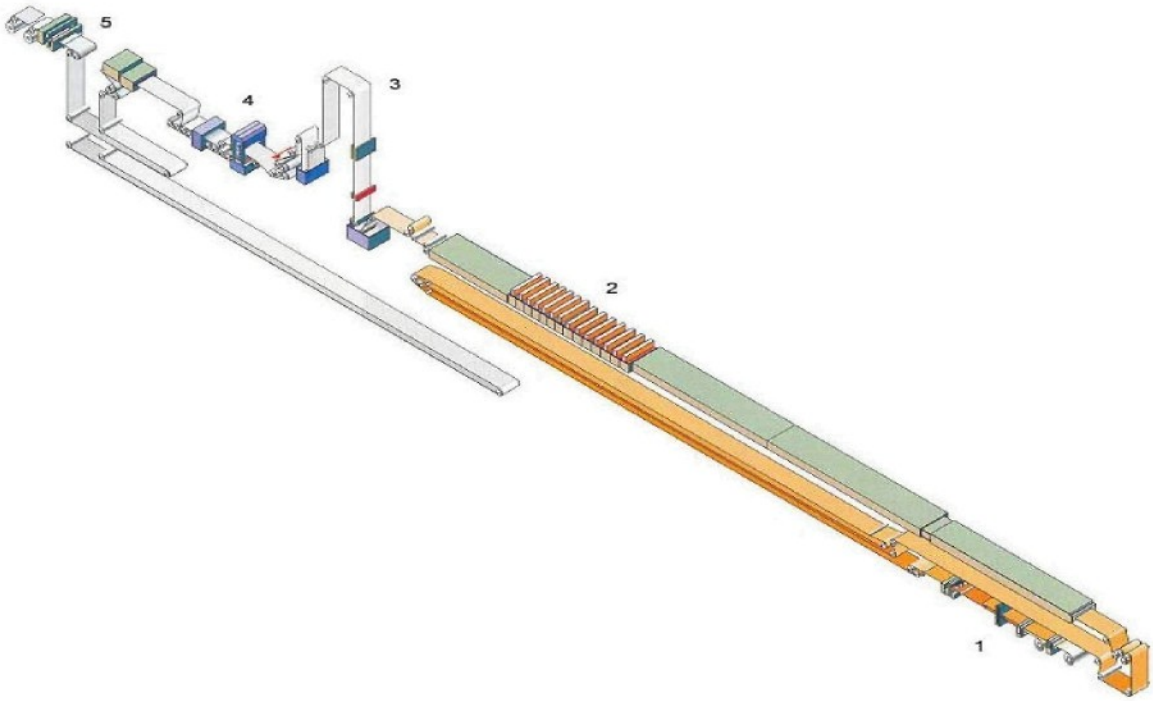
V praxi jsou používány tři hlavní metody vytváření ochranných povlaků:

- žárové pokovení, ponořením do roztaveného kovu nebo slitin kovů (Fe-Zn,Al-Zn)
- elektrolytické nanášení povlaku na bázi zinku (Zn-Fe,Zn-Ni)
- nanášení organických povlaků s obsahem zinku

3.3.1.2 Technologie žárového zinkování [8, 17, 18, 19, 20, 21, 22]

Technologie žárového zinkování patří mezi základní způsoby vytváření protikorozní ochrany, povlaky zhotovené žárovým zinkováním jsou velmi rozšířené, princip je znázorněn na obr.3.2..

Proces žárového pozinkování spočívá v namáčení ocelových plechů do tekutého zinku o teplotě cca 450°C, kdy dochází mezi železem a zinkem k metalické reakci. Vzniká tak metalický zinkový povlak o tloušťkách 7 až 200 μm (dle požadavků použití, jakosti materiálu apod.). Metoda je vhodná k vytváření povlaků, jak na jednotlivých výrobcích, tak i pro kontinuální zinkování ocelových plechů v tabulích nebo ve svitcích. Pro pozinkování se používá mokrý i suchý způsob zinkování, kdy maximální velikost pozinkovaného výrobku je omezena rozměry pozinkovací vany.



(1) vstupní prostor s rozbalovacími kotouči a svařovacím strojem, (2) tavná sekce, (3) Zn lázeň s měřicím zařízením a chlazením, (4) Dodatečné opracování s drezírovací válcovací stolicí, povrchová pasivace a vyrovnávání natažením (5) Navíjení s přidáním oleje a kontrola

Obr.3.2.: *Linka žárového zinkování*

Rozlišujeme několik základních způsobů žárového zinkování:

Mokrý způsob

Tento způsob zinkování spočívá v ponořování výrobku do pozinkovací vany, ve které je lázeň z jedné poloviny vyplněna tekutým tavidlem a pokovující předměty vstupují do zinku přes tuto vrstvu tavidla a po odtavení tavidla dochází ke smáčení dílů v lázni. Tato metoda je výhodná v tom, že není potřeba ponoru do tavidla a následného sušení, protože proces zinkování probíhá ihned a tím se i zvyšuje účinnost tavidla, které má kvalitní čistící účinek. Polotovary procházejí touto vrstvou do samotné zinkové lázně. Pokovené předměty se vynořují z čisté hladiny zinkové taveniny.

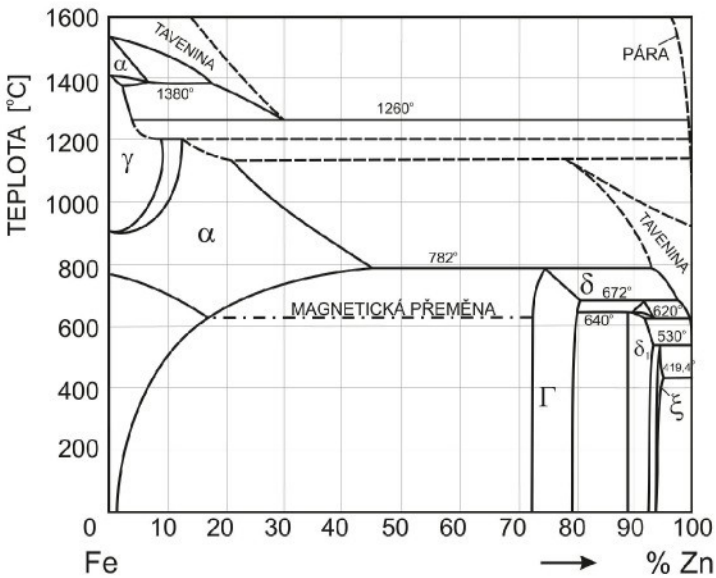
Suchý způsob

Při tomto způsobu zinkování jsou pokovující se předměty nejprve namočeny do roztoku tavidla, po vyjmutí sušeny a poté jsou následně ponořovány do pozinkovací lázně.

Speciální způsoby

Pro kontinuální pozinkování ocelových plechů se používá metody dle Senzímíra. Postup pokovení je následující: za studena válcovaný plech prochází „oxidační zónou“, zde se plech ohřeje ve spalinách na teplotu asi 350°C a dochází ke spálení válcovací emulze a současně se na povrchu vytvoří oxid. Poté pás prochází žíhací pecí, kde dochází k redukci oxidu vodíkem na železo. Po ochlazení na 450°C pás prochází zinkovou lázní. Tloušťka a rovnoměrnost povlaku je regulována pomocí otáčejících se válců umístěných na hladině lázně nebo pomocí vzduchové trysky nad hladinou lázně.

Žárové zinkování se provádí v intervalu teplot 430 až 740°C, dochází zde k reakci mezi ocelí a zinkovou lázní. Rostou intermetalické fáze v pořadí odpovídajícím stavovému binárnímu diagramu Fe-Zn, jež je znázorněn na obr.3.3. a na obr.3.4. je znázorněn sled fází vytvářejících se v zinkovém povlaku.



Obr.3.3.: *Binární diagram Fe –Zn*

Na obr.3.3. v binárnímu diagramu Fe-Zn se vyskytující následující jednotlivé intermetalické fáze:

Fáze α – rozpustnost zinku v železe α může dosáhnout až 45% hmotnosti zinku s maximem rozpustnosti při teplotě 782°C

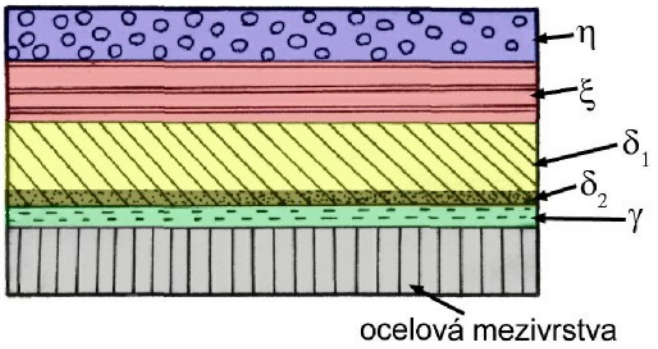
Fáze Γ – intermetalická fáze, která vzniká peritektickou reakcí, obsahuje 72 až 79,4% Zn , základ mezivrstvy Fe-Zn

Fázeδ_1 – intermetalická fáze s hexagonální mřížkou, obsahující 88,5 až 93% Zn, její složení je $FeZn_7$, tvoří sloupcové krystaly kolmé na povrch materiálu.

Fáze ξ – intermetalická fáze s hexagonální mřížkou, obsahující 93,8 až 94% Zn, její složení je $FeZn_{13}$, tvoří hrubé sloupcové krystaly přednostně orientované kolmo na povrch materiálu.

Fáze η – téměř čistý zinek, obsahující v tuhém stavu max.0,003% Fe.

Při zinkování se běžně vytváří všechny tyto fáze a narůstají se zvyšující se teplotou a rostoucím časem zinkování. Většinou povlak získaný touto metodou je tvořen převážně fází δ_1, pod kterou je tenká vrstva Fáze Γ. V důsledku kolmého růstu krystalů fáze δ_1 je povrch vytvořeného povlaku mikroporézní. Plechy povrchově upravené touto metodou mohou být tepelně ovlivněny v důsledku průchodu zinkovou lázní, povrchová vrstva bývá tvrdší než u galvanického pokovování a je hrubší struktury. Z tohoto důvodu je vhodné před tvářením zarovnat povrchovou vrstvu převálcováním.



Obr.3.4.: *Schéma sledu fází v zinkovém povlaku*

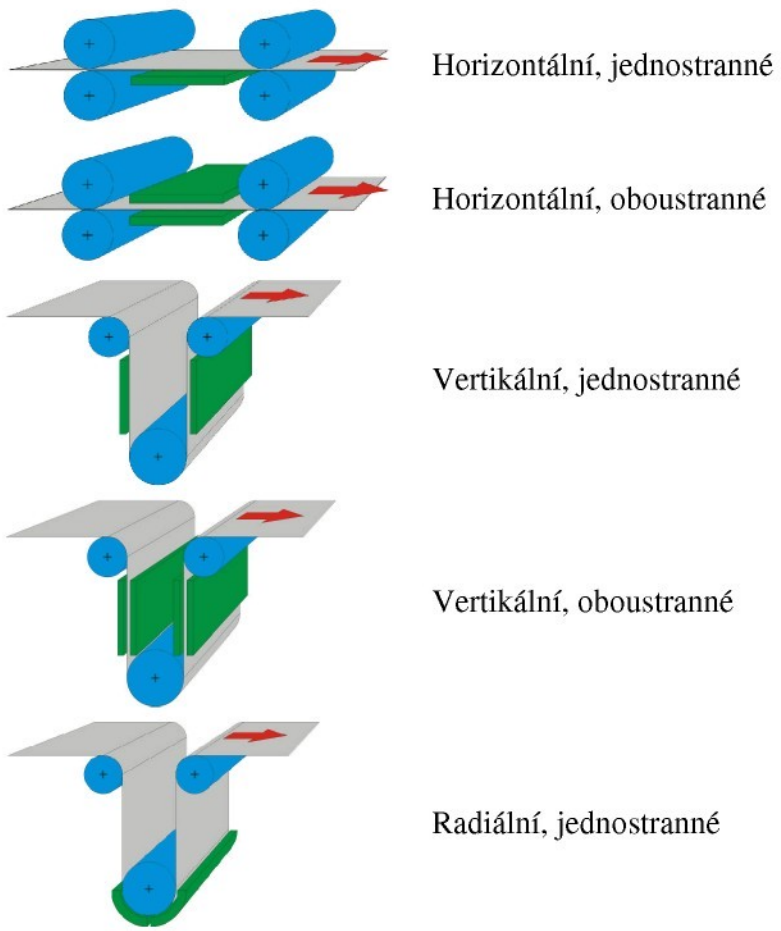
3.3.1.3 Technologie galvanického (elektrolytického) zinkování

Při elektrolytickém způsobu pozinkování mívá dosažená vrstva zinkového povlaku běžně tloušťku 7až10 μm. Na rozdíl od žárového zinkování nedochází při galvanickém procesu ke změnám mechanických vlastností (např. hlubokotažnosti), zinkový povlak spolu s konverzní vrstvou zaručuje bezproblémovou přilnavost organického povlaku. Takto lze připravit i velmi tenké vrstvy (až 3 μm) a galvanický způsob nabízí možnost přípravy i pouze jednostranně zinkovaných plechů.

Samotný povlak je tvořen v pozinkovací komoře, jež může mít dle konstrukce jednostranné nebo oboustranné uspořádání elektrod a zinkování se uskutečňuje v pozici horizontální, vertikální nebo radiální, jak je znázorněno na obr. 3.5..

Dle polohy pozinkovací komory je elektrolyt vstřikován buďto středově mezi anodu a pás plechu (horizontální uspořádání) nebo mezi nerozpustné anody a pás s pohybem elektrolytu proti pohybu pásu (vertikální uspořádání).

Plechy určené k hlubokému tažení jsou po nanesení zinku např. následně fosfátovány pro eliminaci zadírání a zlepšení mazání.



Obr.3.5.: *Schémata základního uspořádání anod při galvanickém pozinkování*

3.3.1.4 Vytváření nosných povlaků pro mazivo fosfátováním

Použití vhodného maziva je jedním ze základních předpokladů pro hospodárné a bezproblémové lisování. Pouze vytvořením odpovídajícího mazacího filmu mezi materiálem a nástrojem můžeme snížit tření natolik, aby se eliminovalo opotřebení nástrojů a zadírání materiálu.

Fosfátovaných povlaků jako oddělující vrstvy se používá od roku 1934. Všechny fosfatizační metody jsou založeny na působení určitého kyselého vodního roztoku kyseliny fosforečné, který obsahuje především primární fosforečnany zinku, manganu nebo železa, na povrch očištěného plechu. Fosfatizačním procesem se povrch materiálu nepokryje krystalickou vrstvou fosforečnanů dokonale, mezi jednotlivými krystaly jsou póry a mezery. Pórovitost fosfatizační vrstvy činí cca 0,1 až 0,5 % celkového povrchu. Tato pórovitost způsobuje, že na kovu velmi dobře ulpí mazadlo. Fosfátovaný povrch je potom schopný zhruba desetkrát lépe vsakovat mazací film, než materiál bez tohoto povlaku.

3.3.2 Hodnocení plechů s povlaky [13, 23]

Hodnocení povlakovaných plechů musí být komplexní a k určování vlastností základního materiálu přistupuje ještě hodnocení vlastností povlaku v závislosti na jeho typu, historii zpracování a konečném použití.

Obecným kritériem hodnocení lisovatelnosti daného dílu je dodržení požadavků kladených na výlisek ve vztahu k jeho dalšímu technologickému zpracování (např. realizovatelnost následných operací tváření, povrchové úpravy) a funkční uplatnění (tvarová a rozměrová přesnost, tuhost, stabilita). Za samozřejmé se považují požadavky na dobrou lisovatelnost na základě plastických vlastností základního materiálu včetně povlaku.

Lisovatelnost chápeme jako vlastnost umožňující požadovanou změnu tvaru, při zachování užitkových vlastností zpracovávaného plechu. V případě pozinkovaných plechů jde o zachování korozní odolnosti. Hodnocení lisovatelnosti těchto materiálů znamená stanovit mezní stavy základního materiálu a mezní stavy povrchové vrstvy.

Lisovatelnost povlakovaných plechů lze hodnotit:

- z hlediska maximální dosažené deformace (hodnocení např. mezním stupněm tažením)
- z hlediska přípustné deformace povrchové vrstvy při zachování její funkčnosti tj.ochrany proti korozi

Výzkum pozinkovaných plechů vyžaduje sledovaní změn integrity povrchu za podmínek všech vyskytujících se stavů napjatosti při různých intenzitách deformace.

V případě tažení výlisků z plechů s kovovými povlaky je navíc nutno zajistit zachování potřebné míry *ochranné funkce povlaku* (OFP), ovlivňující též výslednou korozní odolnost po následné povrchové úpravě. Příčinou snížené OFP, v porovnání s výchozím stavem u netvářeného plechu, mohou být následující průvodní jevy procesu tváření:

- zmenšení tloušťky povlaku s dostatečnou plastičností v důsledku plastické deformace a kontaktního působení nástroje, to může vést případně i k místnímu porušení jeho celistvosti
- vznik trhlin v povlaku při jeho nedostatečné plastičnosti a případně jeho odlupování při nedokonalém spojení se základním materiálem, včetně vlivu přechodové vrstvy.

Ve vztahu k tažení výlisků např. v automobilovém průmyslu je míra ztráty OFP aktuální v souvislosti s plastickou deformací plechu, kdy k těmto nežádoucím jevům dochází především při uplatnění tahových stavů napjatosti, za podmínek vypínání. Je zřejmé, že s nárůstem tahových napětí OFP výrazně klesá.

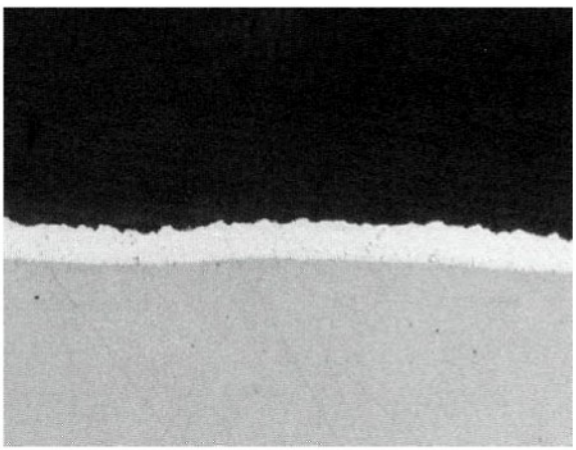
3.3.2.1 Hodnocení elektrolyticky pozinkovaných plechů (plechy EG) [8]

Konkrétní provedení elektrolyticky pozinkovaných produktů závisí na výběru nosného materiálu a na určení výrobního procesu. Způsob elektrolytického pozinkování zajišťuje vysokou chemickou čistotu povlakové vrstvy a rovnoměrnou kontrolovatelnou tloušťku povlaku (odchylka ± 0,1 μm).

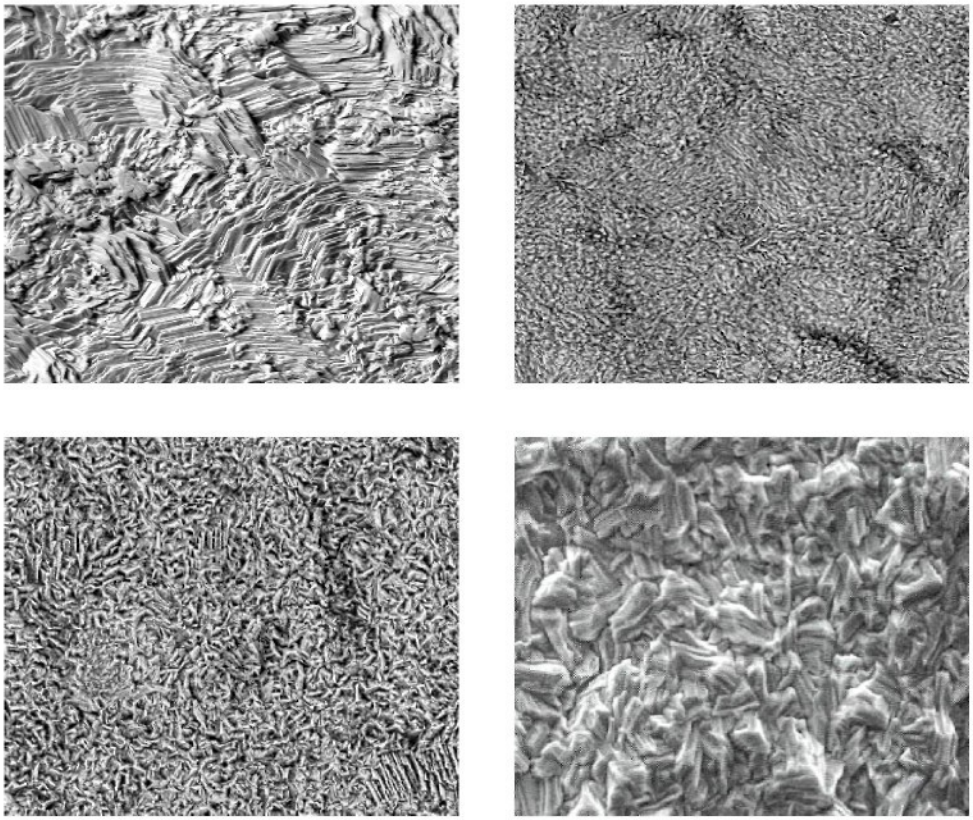
Jakost povrchu, kontrolovatelná textura, určuje v průmyslovém použití vhodnost k lakování viditelných dílů, které v automobilovém průmyslu odpovídají nejvyšším nárokům. U jednostranně povlakovaných provedeních může být lak v případě viditelných dílů nanášen pouze na nepovlakovanou stranu, zatímco pozinkovaná vnitřní strana nabízí vynikající protikorozní ochranu především v dutinách. Detail podélného řezu plechu s vrstvou zinkového povlaku je vidět na obr.3.6. a různé typy zhotovení EG povrchu jsou znázorněny na obr.3.7..

Při elektrolytickém pozinkování se dosahuje velmi čisté a tudíž tvárné (houževnaté) Zn vrstvy, která odolává i značným přetvořením. Použití elektrolyticky pozinkovaných materiálů souvisí s jejich odolností proti korozi. Na základě elektrochemických zákonitostí dvojice železo-zinek (efekt obětované anody) nabízí povlak výbornou korozní ochranu, dokonce i když je poškozena (např. poškrábání).

Při zpracování ocelí s povlaky, nanášenými elektrolytickým zinkováním se Zn povlak vyznačuje velmi dobrou tvařitelností a je proto vhodný k hlubokému tažení. Morfologie povrchu plechu u elektrolyticky zpracovaných materiálů není tak výrazná z toho důvodu, že zinková vrstva kopíruje morfologii základního materiálu, který je již po finálním hlazení. Na základě nepříznivých tribologických vlastností (v porovnání s povlaky nanášenými ponořováním do lázně) je vhodná jistá chemická úprava tohoto povlaku a to zejména u obzvláště náročných výlisků.



Obr.3.6.: *Podélný řez elektrolyticky pozinkovaného povrchu, zvětšeno 1000x*



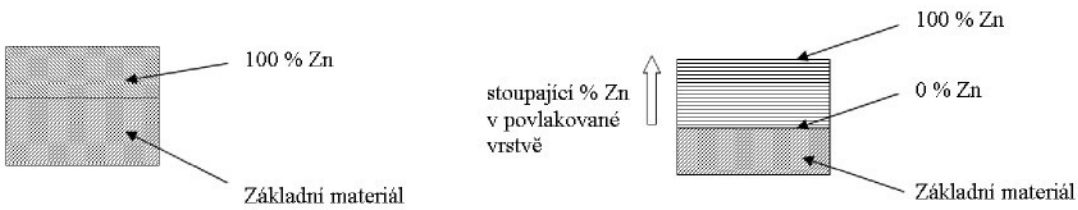
Obr.3.7.:*Typy morfologií elektrolyticky pozinkovaného povrchu, zvětšeno 500x*

3.3.2.2 Srovnání elektrolytického a žárového pozinkování plechů [24]

Na obr.3.8. je znázorněn rozdíl v rozložení zinku pro jednotlivé technologie výroby zinkového povlaku.

Výhody elektrolytického zinkování lze shrnout do tří základních bodů:

- proces neovlivňuje původní mechanické vlastnosti materiálu, zejména jeho hlubokotažnost
- proces umožňuje přípravu velni tenkých zinkových povlaků
- proces umožňuje výrobu diferencovaných a jednostranných zinkových povlaků



a) elektrolytické zinkování

b) žárové zinkovaní

Obr.3.8.: *Porovnání rozložení zinku při žárovém a elektrolytickém pokovení*

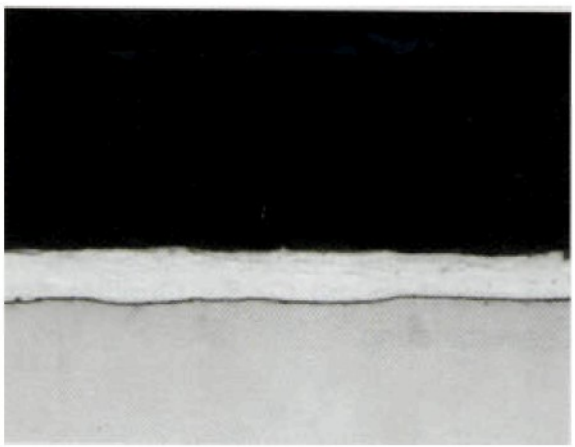
3.3.2.3 Hodnocení žárově pozinkovaných plechů (plechy HDG)

Této technologie a plechů HDG se v poslední době začíná čím dál tím více využívat. Mezi velké problémy bránící dřívějšímu využití patřil fakt, že při ponoření plechu do zinkové lázně se změnila normálová anizotropie. Žárově upravené materiály nedosahují tak dobré normálové anizotropie, jako materiály elektrolyticky pokovené. V poslední době již tato nevýhoda byla odstraněna.

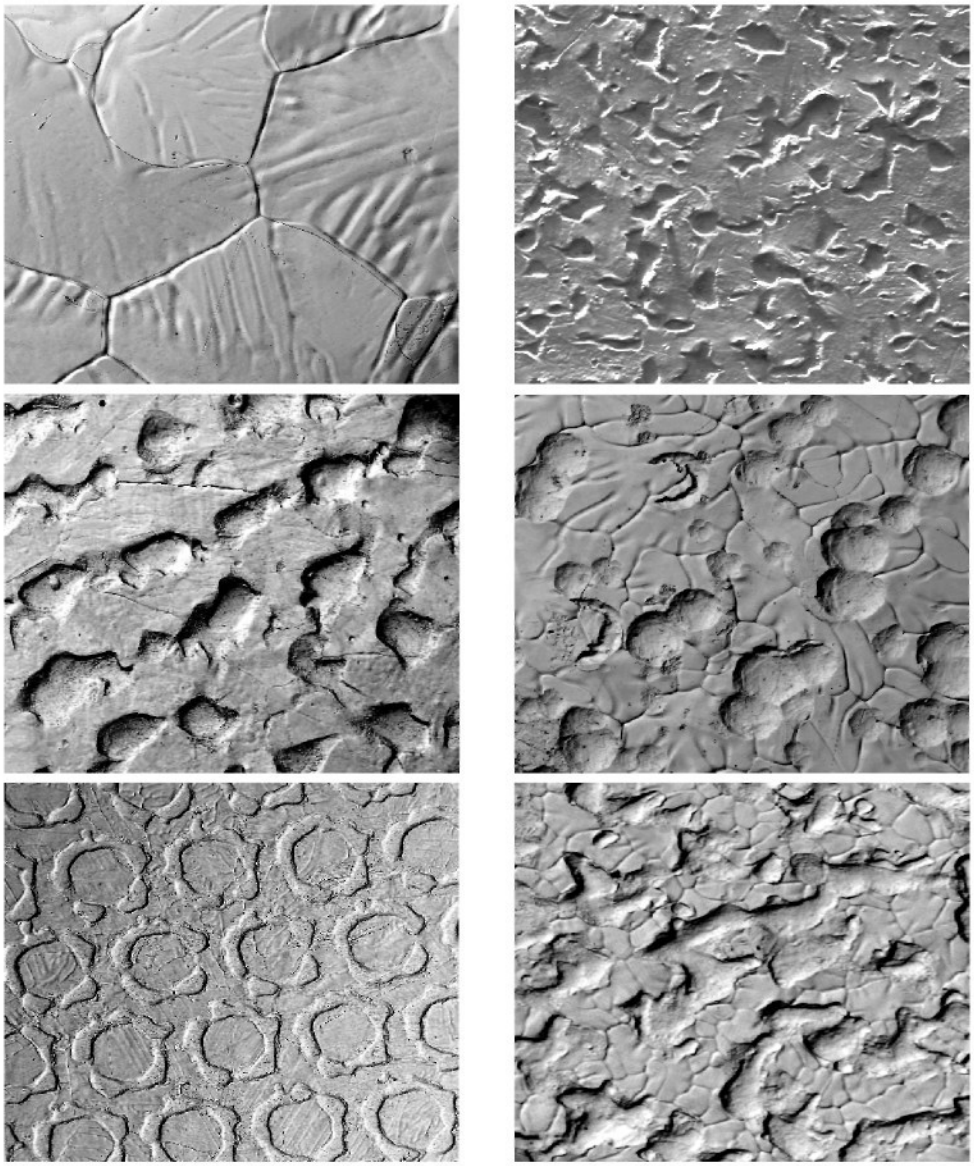
Použití žárově pozinkovaných materiálů souvisí s jejich odolností proti korozi povlak má velmi dobrou korozní ochranu, dokonce i když je poškozena, stejně jako u plechů elektrolyticky pozinkovaných.

Plechy s tímto typem povlaku jsou vhodné pro hluboké tažení i tak náročných dílů jako jsou karosářské výlisky. Nejdůležitějším technickým parametrem ocelí pro povrchové díly karoserie je jakost povrchu. Velice dobrá jakost povrchu (homogenní, řízená textura) vzniklá žárovým pozinkováním umožňuje použití na viditelné lakované díly, na které se v automobilovém průmyslu kladou nejvyšší nároky. Díky elasticitě čisté zinkové vrstvy je vyloučeno riziko jejího popraskání.

Objektivní posouzení jednotlivých povlaků zhotovených žárovým zinkováním není možné vzhledem k různému sortimentu dodávaných typů povlaků. S ohledem např. na vytvářenou texturu, právě ta hraje důležitou roli v tribologických podmínkách mazání (množství a způsob dodávání mazacího média) při kontaktu mezi plechem a nástrojem. Podélný řez plechu s vrstvou zinkového povlaku je znázorněn na obr.3.9. a příklady jednotlivých typů morfologií povlaku jsou znázorněny na obr.3.10., podrobnější popis výroby, výhod a nevýhod specifických typů je uveden v následující kapitole 3.5..



Obr.3.9.: *Podélný řez vrstvou žárově pozinkovaného povrchu, zvětšeno 1000x;*



Obr.3.10.: *Typy morfologií žárově pozinkovaného povrchu, zvětšeno 500x*

3.4 Povrchy povlaků

3.4.1 Požadavky na povrchy povlaků [24]

V případě ocelových plechů je kvalita povrchu povlaku určována zejména stavem povrchu hladících válců při finálních úpravách v hutích.

Povrch plechu musí být vytvářen tak, aby splňoval tyto požadavky:

- schopnost přijímat mazivo
- morfologie povrchu nesmí umožňovat odtékání maziva
- během tváření nesmí dojít k nárůstu oblastí , kde jsou třecí plochy v přímém styku
- nesmí docházet k odtržení filmu vytvořeného na povrchu mazivem

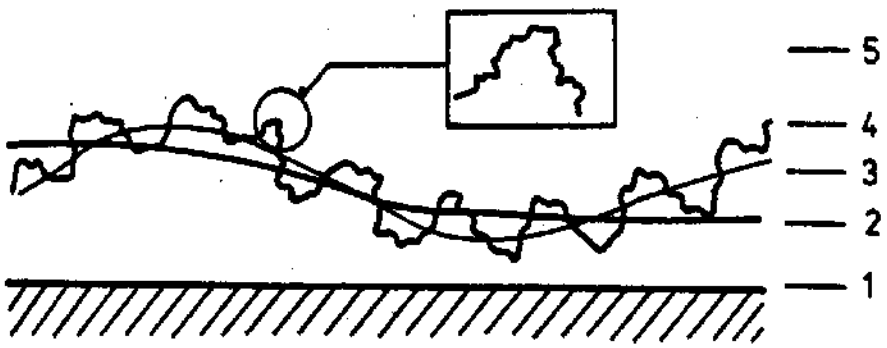
Specifické vlastnosti bude mít povrchová vrstva u plechů s ochrannými povlaky na bázi zinku nebo jeho slitin. Zde bude totiž o kvalitě stavu povrchu rozhodovat také druh a způsob nanášení povlaku. U těchto plechů musíme počítat s výraznou změnou řady vlastností, což se do značné míry projeví např. na morfologii povrchu, mikrotvrdosti povrchové vrstvy. Tyto změny ovlivní především třecí poměry v tribologických systémech a tím i vlastní tvářecí proces.

3.4.2 Geometrické vlastnosti povrchů [25, 26, 27, 28]

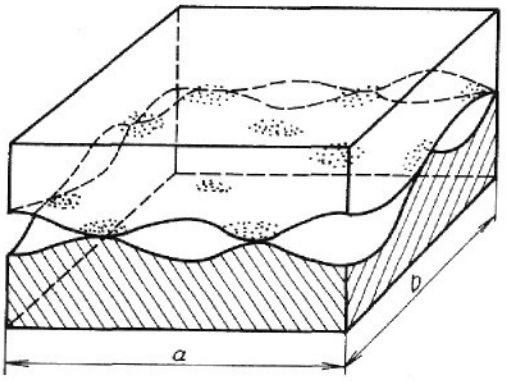
Z důvodu kvalitní operace tažení je důležité, aby ochranný povlak měl potřebnou geometrii a rozměrové parametry. Nároky na kvalitu povrchu plechů určených pro další zpracování stoupají, geometrické a rozměrové parametry se zpřísňují. Jedním z důležitých parametrů povrchu plechu je jeho mikrogeometrie, tu můžeme ovlivnit vytvořením zvláštního typu morfologie na povrchu plechů. Mikrogeometrie povrchu na jedné straně prostřednictvím tribologických podmínek ovlivňuje proces lisování, na druhé straně určuje vzhled povrchu karosérie automobilu po lakování. Pro výrobce automobilů jsou charakteristické stále se zvyšující nároky na mikrogeometrii povrchu.

V současnosti není technologicky možné a často ani žádoucí vyrobit ideálně rovné a hladké povrchy, vyrobené technické povrchy mají odchylky tvaru, polohy a drsnosti. Na obr.3.11. je znázorněno schéma geometrických odchylek od ideálně hladkého povrchu v řezu, kde **1**-ideálně rovný povrch, **2**-odchylky tvaru a polohy, **3**-vlnitost povrchu,**4**-mikroskopické drsnosti, **5**-submikroskopické nerovnosti. Na obr.3.12. je znázorněn plošný rozdíl mezi obrysovou plochou styku S_c ($S_c=a \cdot b$) a skutečnou plochou styku S_r (viz.kapitola 4.1., rovnice 41), kde se setkávají výčnělky povrchů dvou dotýkajících se těles.

Jak je z výše uvedeného patrné, geometrie povrchu je pro zpracování plechů velmi důležitým parametrem, z toho důvodu má svůj význam v oblasti hodnocení povrchů následující kapitola.



Obr.3.11.: *Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu* [27]



Obr.3.12.: *Znázornění rozdílu styku skutečné plochy a obrysové plochy povrchu* [28]

3.4.2.1 Hodnocení geometrie povrchu ve 2D [29]

Tribologické procesy tření probíhají ve vrstvách, které vytvářejí povrch dotýkajících se těles.

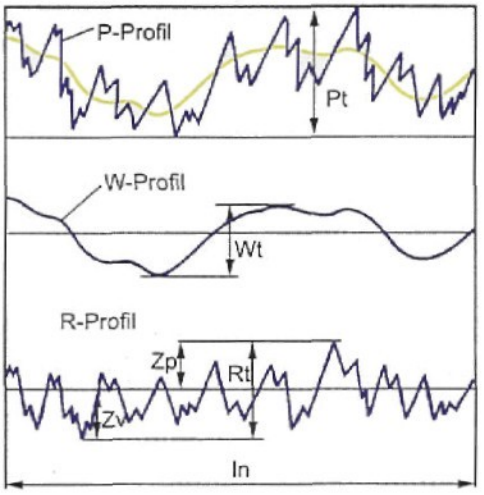
Povrch třecích těles, jako prvků tribologického systému, musí mít určité geometrické, fyzikální, chemické a další vlastnosti, které jsou souhrnně vyjádřeny jako *kvalita povrchu.*

Jedním ze základních způsobů hodnocení kvality povrchu je měření drsnosti povrchu. Drsnost povrchu je určována ze sledované plochy povrchu a je pak většinou charakterizována pomocí normou daných veličin (DIN EN ISO 4287). Základní parametry drsnosti sloužící pro hodnocení povrchu jsou popsány v následujícím textu:

1 - Profil povrchu

Dvoudimenzionální profil povrchu získaný drsnoměrem je vidět na obr.3.13., kde jsou vyjádřeny hodnoty měřených veličin:

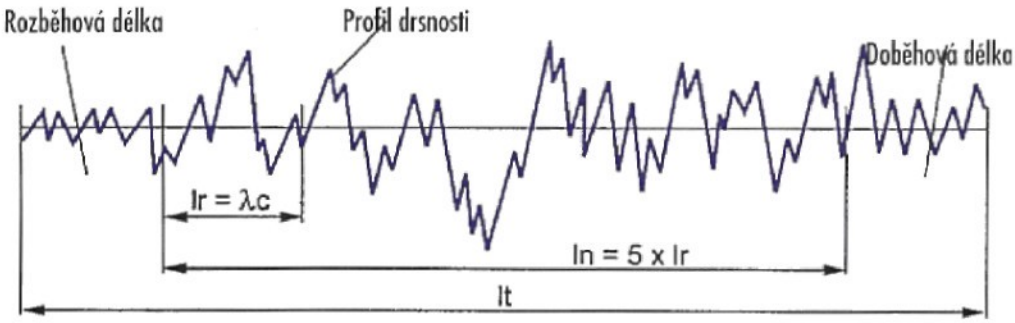
- **Pt**-hloubka profilu
- **Wt**-hloubka vln
- **Rt**-nejvyšší hloubka drsnosti



Obr.3.13.: *Profil povrchu*

2 - Měřené délky - mezní vlnové délky

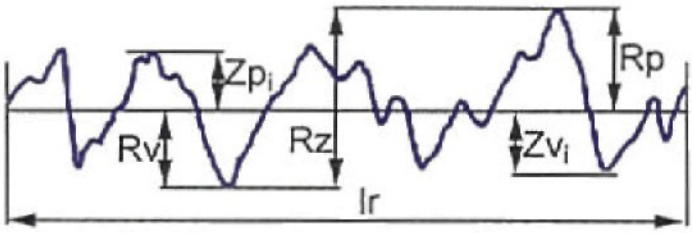
Schematické vyjádření měřených délek je na obr. 3.14..



Obr.3.14.: *Schematické vyjádření měřených délek*

3 - Maximální výška profilu Rz

Schematické vyjádření maximální výšky profilu Rz je vidět na obr.3.15..



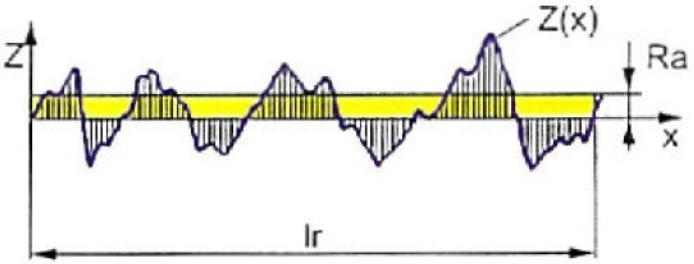
Obr.3.15.:*Schematické vyjádření maximální výšky profilu Rz*

4 - Střední aritmetická hodnota drsnosti Ra

Střední aritmetická hodnota drsnosti Ra je definována vztahem

$$Ra = \frac{1}{lr}\int_0^{lr} |Z(x)|dx \qquad (33)$$

Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti je vidět na obr.3.16..



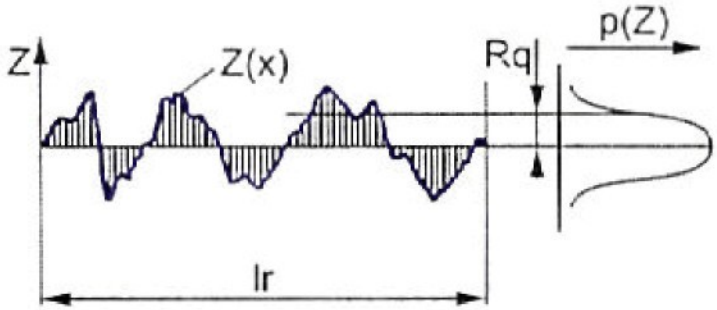
Obr.3.16.:*Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra*

5 - Střední kvadratická hodnota drsnosti Rq

Střední kvadratická hodnota drsnosti Rq je dána vztahem

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr}\int_0^{lr} Z^2(x)dx} \qquad (34)$$

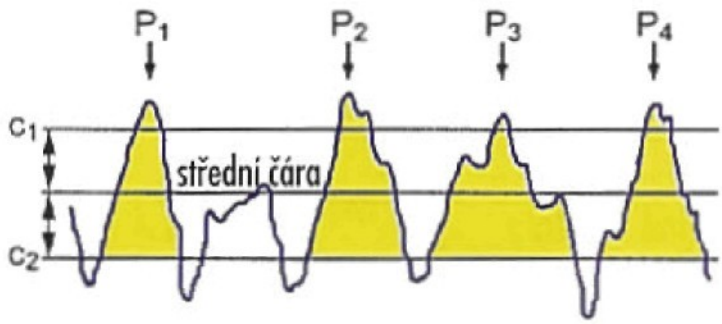
Schematické znázornění střední kvadratické hodnoty drsnosti Rq je vidět na obr.3.17..



Obr.3.17.: *Schematické znázornění střední kvadratické hodnoty drsnosti Rq*

6 - Počet výstupků RPc

Počet výstupků RPc dle zkušebního listu STAHL-EISEN SEP 1940 je počet výstupků P na 10mm vztažené délky. Pro vyhodnocení je třeba zadat hladiny řezu C_1, C_2. Schematické znázornění počtu výstupků RPc je vidět na obr. 3.18..

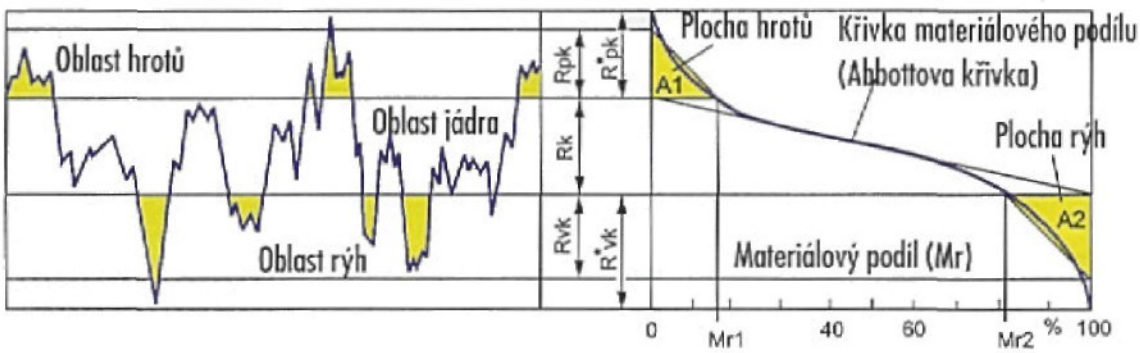


Obr.3.18.: *Schematické znázornění počtu výstupků RPc.*

7 - Veličiny nosného podílu

Veličiny nosného podílu se určují dle DIN EN ISO 13565 a význam jednotlivých určovaných veličin je zřejmý z obr. 3.19., kde

- Rk - základní hloubka, hloubka profilu jádra drsnosti (zóna s největším nárůstem podílu materiálu nad určitou hodnotu),
- Rpk – redukovaná výška špiček,
- Rvk – redukovaná hloubka rýh,
- Mr1 – podíl materiálu nad profilem jádra,
- Mr2 – podíl materiálu pod profilem drsnosti.



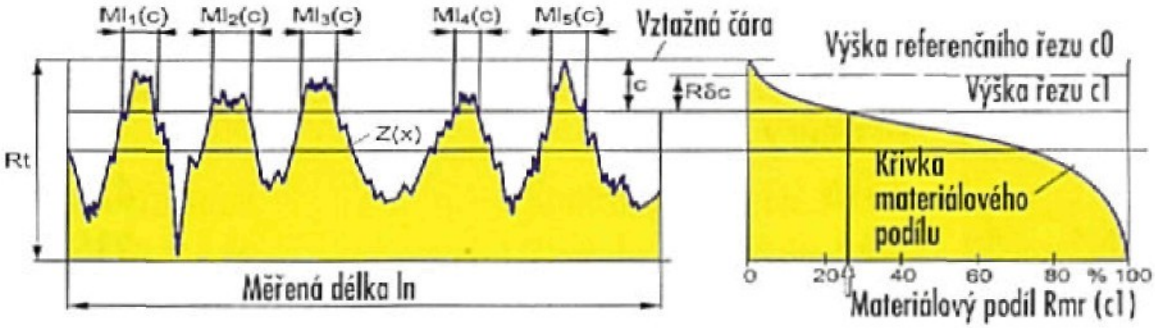
Obr.3.19.: Veličiny nosného podílu

8 - Materiálový podíl drsnosti profilu Rmr(c)

Materiálový podíl drsnosti profilu Rmr(c) se určuje dle DIN EN ISO 4287 a vyjadřuje percentuální podíl součtu délek materiálových přímek Ml(c) v dané výšce profilu k měřené délce ln a je dán vztahem

$$\mathrm{Rmr(c)} = \frac{100}{\mathrm{ln}} \sum_{i=1}^{n} \mathrm{Ml}_i(\mathrm{c}) = \frac{\mathrm{Ml(c)}}{\mathrm{ln}} \qquad (35)$$

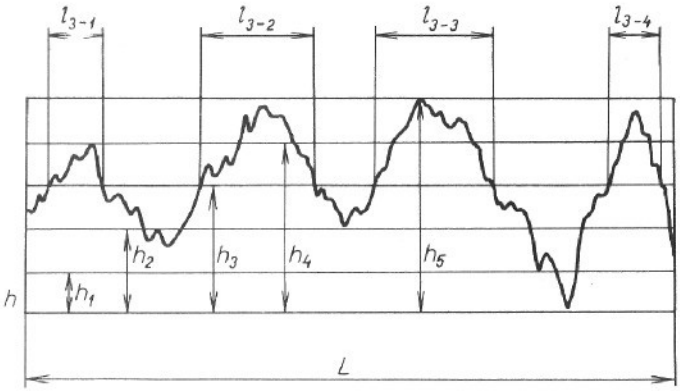
Křivka podílu materiálu udává pak podíl materiálu jako funkci hladiny (výšky) řezu a je vidět na obr.3.20..



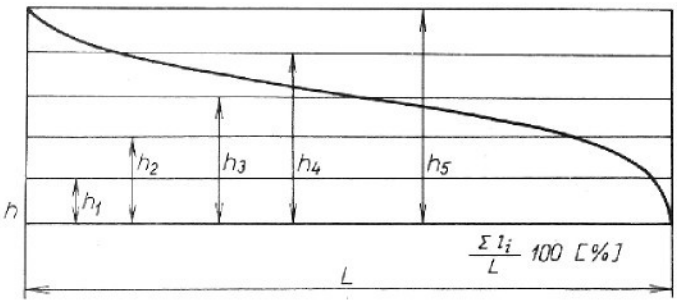
Obr.3.20.: Křivka materiálového podílu drsnosti povrchu

9 - Abbottova křivka

Pro sestrojení Abbottovy křivky je pak možné použít percentuálního podíl součtu materiálových ploch v dané výšce profilu k celkové měřené ploše. Tvar profilu se dá popsat pomocí nosného podílu trigonometrického bodu dle DIN 4762, popř. dle průběhu v závislosti na hloubce řezu. Z profilogramu získanou křivku položíme sítí rovnoběžek obr.3.21a a získáme údaje pro sestrojení Abbottovy nosné křivky, jak je znázorněno na obr.3.21b. Tato křivka poskytuje všechny ostatní hodnoty drsnosti, ale jen pro uvažovaný tvar řezu. Pro povrchy s orientovanou drsností jsou takto vytvořeny pouze reprezentativní výpovědi jednotlivých tvarů řezů. Nemožnost popsání jednotlivých tvarových reliéfů povrchu je nevýhoda použití této Abbottovy křivky.



a) *Položené sítě rovnoběžek na profilogram*



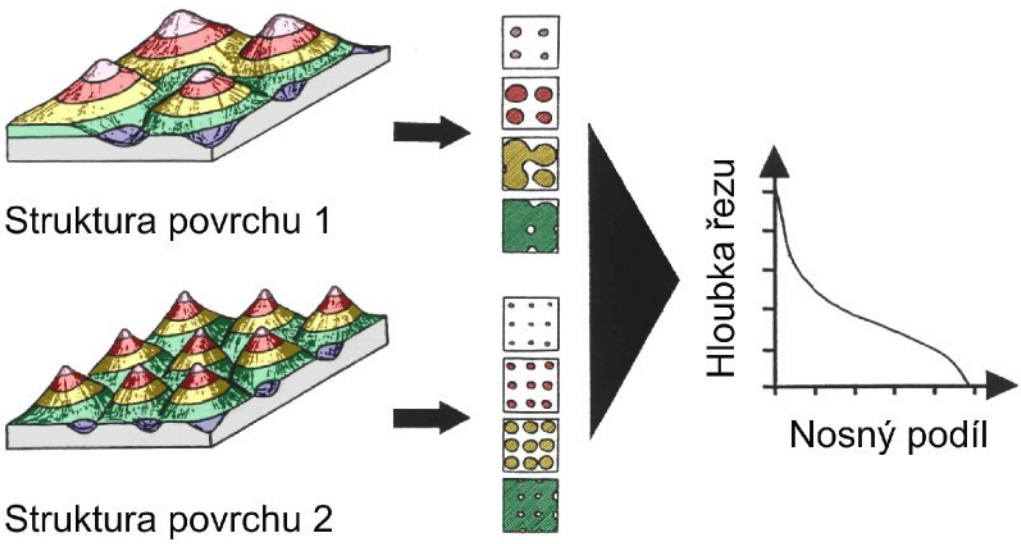
b) *Grafické sestrojení nosné Abbottovy křivky*

Obr.3.21.: *Sestrojení Abbottovy křivky* [28]

9.1 - Prostorová Abbottova křivka [30]

Tato křivka vzniká na základě řezů pro popis parametrů povrchu plechů ve 3D a je určena z řezných povrchových podílů topografie a vypočítána z prostorových souřadnic reliéfu. Důležité jsou ekvidistantní řezy, to jsou povrchové řezy rovinami, které leží k nějakému nerovnostnímu reliéfu plochy dotýkající se roviny. Prostřednictvím takovýchto řezů je z povrchu sečnou oddělen řeznou plochou ohraničený kus materiálu. Prostorová Abbottova křivka se získá jako podíl ploch na celkovou plochu řezné roviny, což je podíl řezné plochy.

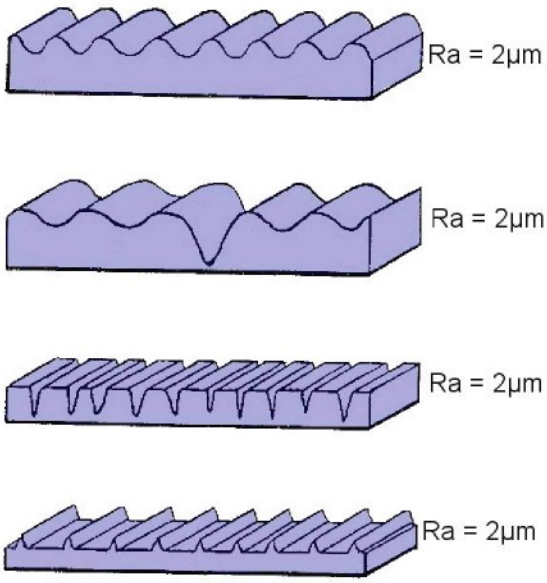
Ani samotná prostorová Abbottova křivka bohužel nepostačuje k jednoznačné charakteristice povrchové topografie, jak zřejmé z obr.3.22.. Zde je pro dva různé typy povrchové topografie provedeno několik rovnoběžných řezů, součet všech povrchových podílů je pro oba povrchy každé řezné roviny stejný. Předpokládaným výsledkem pro tyto obě zcela odlišné povrchové struktury jsou stejné průběhy Abbottovy křivky, jak je parné z obr.3.22..



Obr.3.22.: *Dvě odlišné struktury povrchu se stejnou Abbottovou křivkou*

Povrchová topografie musí být na základě dalších veličin přesně specifikována, neboť Abbottova křivka poskytuje ostatní hodnoty charakteristiky povrchu pouze pro uvažovaný tvar řezu.

Na obr.3.23. jsou pro názornost uvedeny čtyři viditelně odlišné typy topografie povrchu, avšak jejich výsledná drsnost je shodná a odpovídá hodnotě Ra = 2μm.



Obr.3.23.: *Čtyři typy rozdílné topografie se stejnou hodnotou drsnosti povrchu*

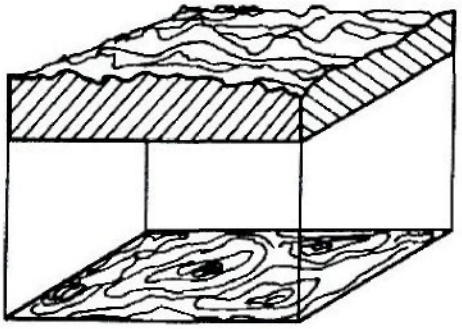
3.4.2.2 Hodnocení geometrie povrchu ve 3D [27, 31, 32, 33]

Problém hodnocení povrchů je tak velmi rozsáhlý, požadavky na povrchovou strukturu plechů, které jsou charakterizovány obvyklými parametry (viz. předchozí kapitola 3.4.2.1.),

nejsou již postačující. V současnosti se ukazuje, že momentálně používaná kriteria hodnocení kvality povrchu podle příslušných norem na komplexní hodnocení povrchu z tribologického hlediska nestačí. Podle těchto norem nelze hodnotit velikost styčné plochy, její změnu při zatížení, vliv technologických parametrů atd..

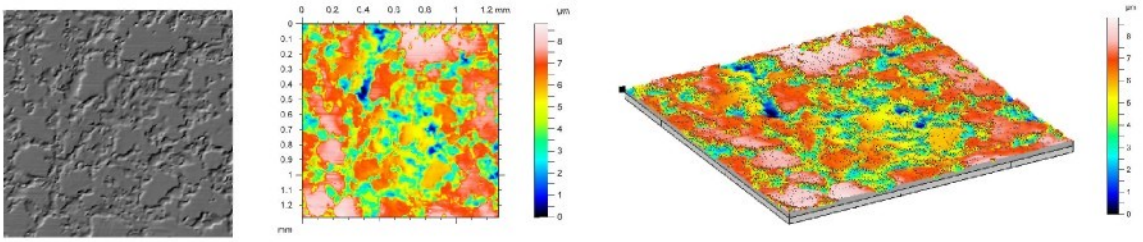
Na základě nových moderních metod určíme další charakteristické parametry, kterými dostatečně přesně můžeme popsat povrchové struktury plechů. Tento nový způsob umožňuje zlepšit popis tribologického chování tenkých plechů při jejich lisování a tak sledování tření a adheze.

Nejdokonalejší představu o reálném povrchu s jeho plošným tvarem a výškovou nerovnoměrností je možné získat pomocí vrstevnicových map a případným axonometrickým zobrazením naměřených hodnot viz obr.3.24..

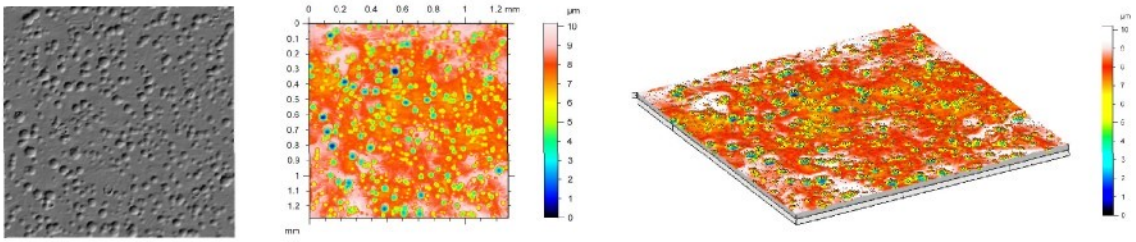


Obr.3.24.: *Axonometrické zobrazení a vrstevnicová mapa povrchu* [27]

Příklady takovýchto vrstevnicových map topografií pro jednotlivé typy povrchů jsou znázorněny na. obr.3.25. a 3.26..



Obr.3.25.: *Příklad povrchu plechu s texturou* ***EDT*** *ve 2D a 3D*



Obr.3.26.: *Příklad povrchu plechu s texturou* ***PRETEX*** *ve 2D a 3D*

Výhodou optické metody je, že lze měřit topografii povrchu plechů ve 3D bezdotykově. Vytvoření takového trojrozměrného modelu je však časově náročné a podmiňuje nevyhnutelnost uskutečnit větší počet měření, u kterých zpracování a vyhodnocování výsledků se váže na použití počítačové techniky s nároky na drahé přístrojové vybavení.

Stanovené řezy povrchové topografie jsou určující pro přesný popis povrchové struktury a vyplývají z následujících parametrů:

- podíl povrchů
- množství a velikost nosných bodů a mazacích filmů
- popis tvaru nosných bodů a mazacích filmů
- anizotropie drsnosti

3.5 Morfologie povrchu plechů používaných pro karosářské výlisky

Ukazuje se, že v podmínkách moderního automobilového průmyslu vytváří vzhled a kvalita laku první a hlavní dojem, kterým automobil působí na zákazníka. Praktické zkušenosti dokázaly, že výsledný efekt lakování do značné míry ovlivňuje morfologie povrchu použitého plechu. Vzhledem k tomu, že morfologie povrchu výrazně ovlivňuje i tribologické podmínky, které mají vliv na rozvoj deformace plechu při tažení a následný vznik případného výskytu zadírání, je třeba vliv morfologie dále prozkoumávat.

Problematikou vytváření morfologie povrchu plechu určeného na pohledové části karoserie automobilu se zabývají všichni přední světoví výrobci plechů. Vedle dnes již klasického opracování povrchu pracovních válců metodou mechanického otryskávání jemnozrnným granulátem (metoda označovaná jako SBT-Shot Blast Texturing) a opracování pomocí elektrojiskrového výboje (metoda označovaná jako EDT-Electric Discharge Texturing) se také používají nové moderní způsoby texturování povrchu pracovních válců. K těmto novým metodám patří opracování povrchu pracovního válce pomocí laserového paprsku (metoda označovaná jako LT-Laser Texturing), elektronového paprsku (metoda označovaná jako EBT-Electron Beam Texturing) a opracování prostřednictvím chromování pracovního válce (metoda označovaná jako PRETEX proces). Principy texturování povrchu pracovního válce pro výrobu plechů jsou uvedeny dále.

3.5.1 Metody vytváření povrchů pracovního válce [35, 36, 37]

- Metoda **SBT**: Mechanické otryskávání jemnozrnným granulátem (*Shot Blast Texturing*)
- Metoda **EDT**: Matování prostřednictvím elektrojiskrového výboje (*Elektric Discharge Texturing*)
- Metoda **LT**: Matování prostřednictvím laserového paprsku

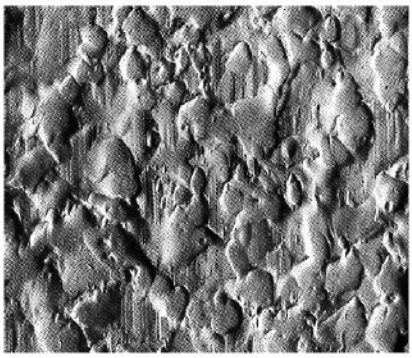
(*Laser Texturing*)

- Metoda **EBT**: Matování prostřednictvím elektronového paprsku (*Electron Beam Texturing*)
- Metoda **PRETEX:** Matování prostřednictvím chromování válců (*Preussag Texturing*)

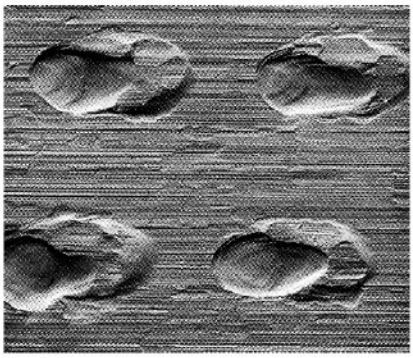
3.5.2 Vytváření povrchů [9, 33, 34]

Snaha výrobců plechů se orientuje na hledání optimální morfologie povrchu plechů. Požadovanou morfologii plechů docílíme specielním typem opracování povrchu hladících válců, tzn. vytvořením určitého reliéfu na povrchu plechů při finálním válcování.

Všechny metody mají společný cíl, hledání druhu povrchu, který je optimální jak pro lisovatelnost, tak pro kvalitu laku. Na obr.3.27. jsou znázorněny možné typy vyráběných morfologií a na obr.3.28. jsou příklady morfologií povrchů pracovních hladících válců vytvořených metodami EDT a EBT.

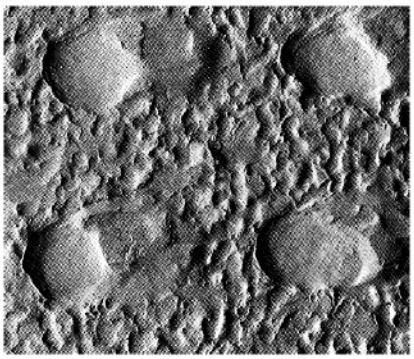


a) *stochastická morfologie*



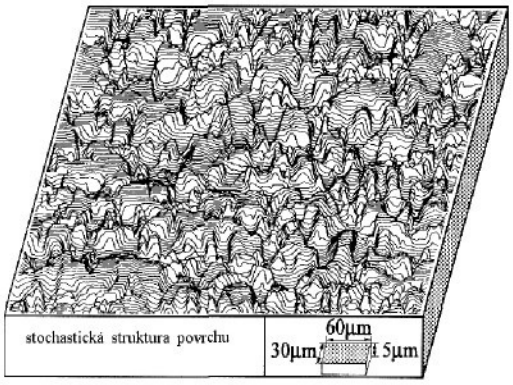
b) *deterministická morfologie*

c) *multideterministická morfologie*

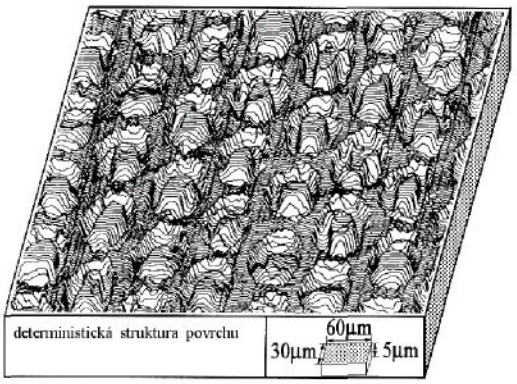


d) *deterministicko-stochastická morfologie*

Obr.3.27.: *Příklady různých typů morfologií vytvářených na povrchu plechů* [33]



a) EDT-stochastická struktura



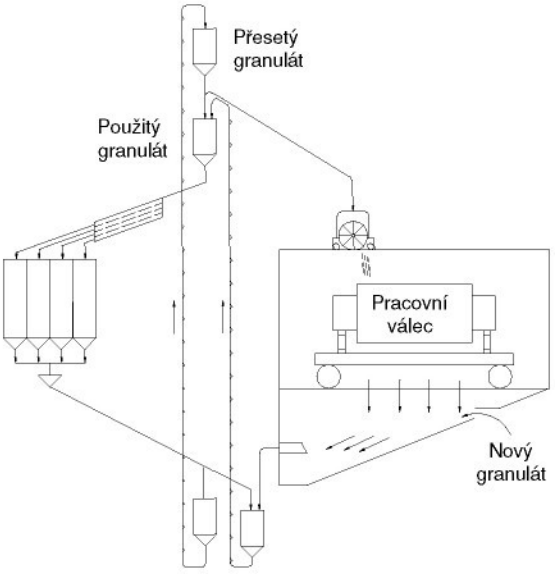
b) EBT-deterministická struktura

Obr.3.28.: *Struktury povrchu pracovního válce morfologií typu EDT a EBT* [34]

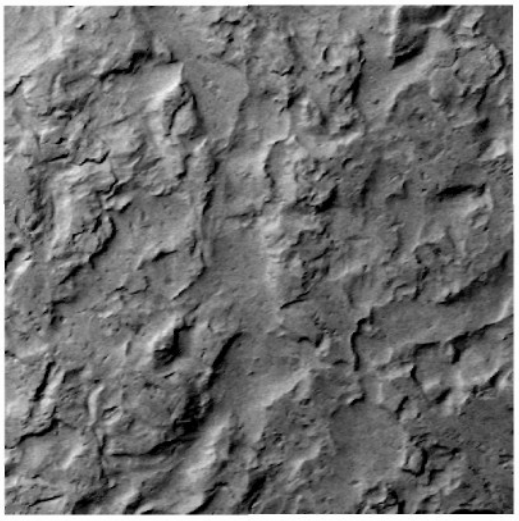
3.5.2.1 Texturování pracovního válce metodou SBT

Texturování pracovního válce metodou SBT je založeno na otryskávání pracovního válce jemným granulátem. Jemnozrnný granulát je na rotující povrch pracovního válce vrhán lopatkovým kolem. Povrch pracovního válce je přetvářen částečnou plastickou deformací za současného deformačního zpevnění. Výsledkem je charakteristická textura, vyznačující se náhodným rozdělením kráterů.

Drsnost válce může být regulována prostřednictvím obvodové rychlosti tryskacího kola, druhem a velikostí tryskacího granulátu nebo tvrdostí pracovního válce. Povrchy získané touto technologií matování pracovního válce jsou stochastické. Princip výroby válce je vidět na obr.3.29..



Obr.3.29.: *Princip texturování pracovního válce metodou SBT*



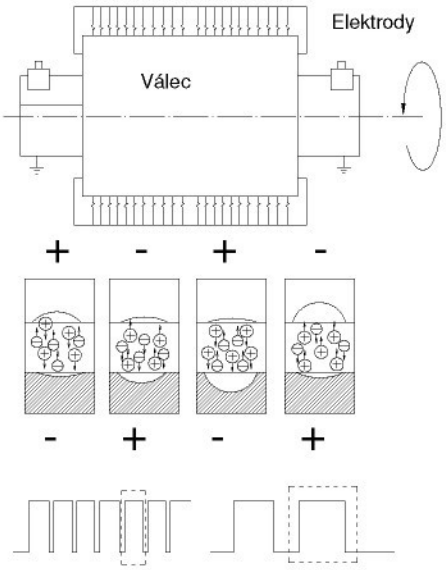
Obr.3.30.: *Povrch plechu „SBT“ zvětšeno 500x*

Střední aritmetická drsnost povrchu plechu, který je vyroben válcem s texturou SBT, se pohybuje v rozmezí $R_a = 1{,}0 \div 6{,}0 \mu m$. Charakteristický povrch žárově pozinkovaného plechu získaného touto metodou je vidět na obr.3.30. .

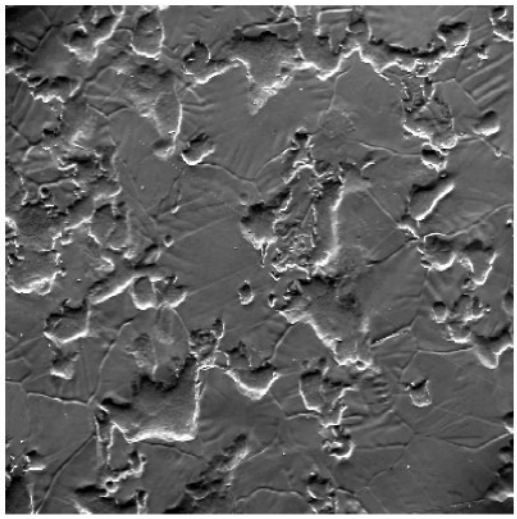
3.5.2.2 Texturování pracovního válce metodou EDT

Texturování pracovního válce metodou EDT se uskutečňuje lokáním natavením povrchu válce v dielektrickém prostředí elektrickým výbojem mezi povrchem válce a elektrodou. Při vyjiskřovacím procesu je potřebné nastavit všechny parametry tak, aby byla dosažena maximální efektivita procesu. Drsnost válce lze měnit, bez ohledu na jeho tvrdost, jen velikostí napětí a vzdáleností elektrod. V porovnání s metodou SBT, metoda EDT umožňuje dosáhnout větší počet vrcholků (RPc) a nižší drsnost (R_a). Požadované parametry jsou snadněji reprodukovatelné. Povrchy získané touto technologií matování pracovního válce jsou stochastické. Princip výroby válce je vidět na obr.3.31..

Střední aritmetická drsnost povrchu plechu, který je vyroben válcem s texturou EDT, se pohybuje v rozmezí $R_a = 0{,}8 \div 10 \mu m$. Charakteristický povrch žárově pozinkovaného plechu získaného touto metodou je vidět na obr.3.32..



Obr.3.31.: *Princip texturování pracovního válce metodou EDT*



Obr.3.32.: *Povrch plechu „EDT“ zvětšeno 500x*

3.5.2.3 Texturování pracovního válce metodou LT

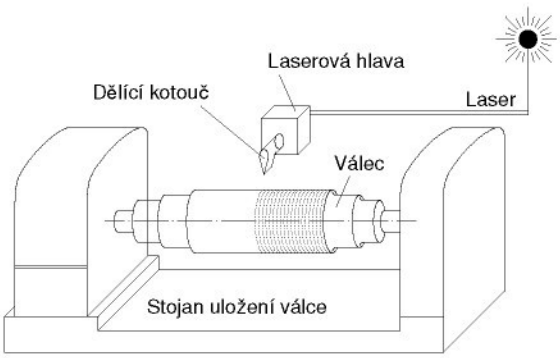
Texturování povrchu pracovního válce metodou LT se provádí pomocí laserového paprsku. Laserový paprsek natavuje povrch pracovního válce a roztavený kov z kráteru se zachycuje jako obruba okolo kráteru, kde ztuhne. Pracovní válec rotuje a je pomalu

posunován v axiálním směru. Drsnost je regulovaná prostřednictvím energie laserového paprsku, axiálním pohybem a otáčkami dělícího kotouče.

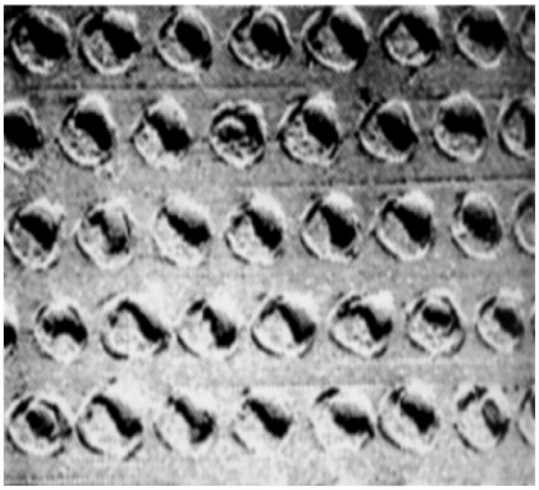
I když povrchy vytvářené touto metodou mají dobré vlastnosti, zkušenosti s touto metodou poukázaly na řadu nedostatků, jako je např. dlouhý čas matování, vysoké náklady, nízká účinnost laserového paprsku, snížená přilnavost obruby kráteru atd.. Z těchto důvodů tato metoda nenašla v praxi širší uplatnění.

Tato technologie umožňuje výrobu (semi)deterministických povrchů. Princip výroby válce je vidět na obr.3.33..

Střední aritmetická drsnost povrchu plechu, který je vyroben válcem s texturou LT, se pohybuje v rozmezí $R_a = 0{,}8 \div 10\mu m$. Charakteristický povrch pracovního válce texturovaného metodou LT je vidět na obr.3.34..



Obr.3.33.: *Princip texturování pracovního válce metodou LT*



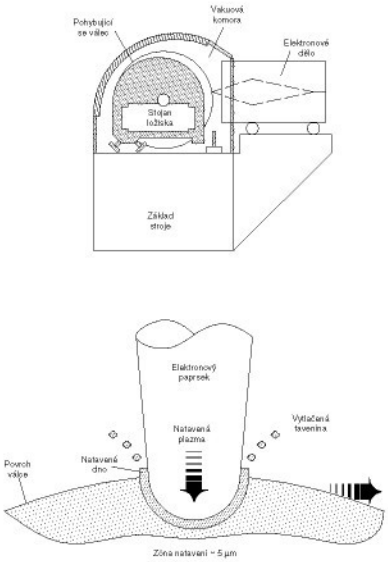
Obr.3.34.: *Povrch pracovního válce „LT“, zvětšeno 500x*

3.5.2.4 Texturování pracovního válce metodou EBT

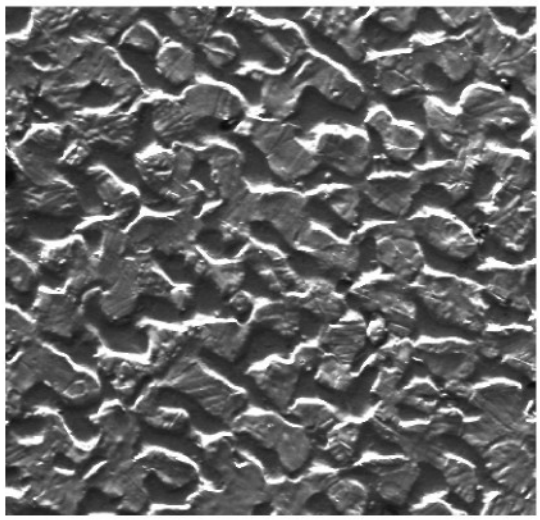
Princip texturování pracovního válce metodou EBT spočívá v natavování povrchu pracovního válce elektronovým paprskem. Proces je realizovaný ve vakuu, díky kterému má okraj kráteru čistý kovový charakter bez přítomnosti oxidů. Je možné regulovat a synchronizovat otáčení válce a frekvenci vystřelujícího elektronového paprsku tak, aby krátery měly rovnoměrné prostorové uspořádání ve všech směrech. U této metody, na rozdíl od jiných (např. LT), je možné zabezpečit pravidelnou geometrii uspořádání kráterů na povrchu válce i na velké vzdálenosti. Takovýto deterministický profil je odolný i vůči velkým smykovým silám při válcování na tandemové trati.

Tato technologie umožňuje výrobu deterministických povrchů. Princip výroby válce je vidět na obr.3.35..

Střední aritmetická drsnost povrchu plechu, který je vyroben válcem s texturou EBT, se pohybuje v rozmezí $R_a = 0{,}4 \div 5\mu m$. Charakteristický povrch žárově pozinkovaného plechu získaného touto metodou je vidět na obr.3.36..



Obr.3.35.: Princip texturování pracovního válce metodou EBT



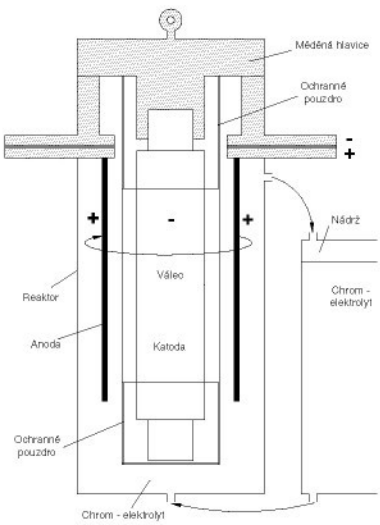
Obr.3.36.: Povrch plechu „EBT“ zvětšeno 500x

3.5.2.5 Texturování pracovního válce metodou PRETEX

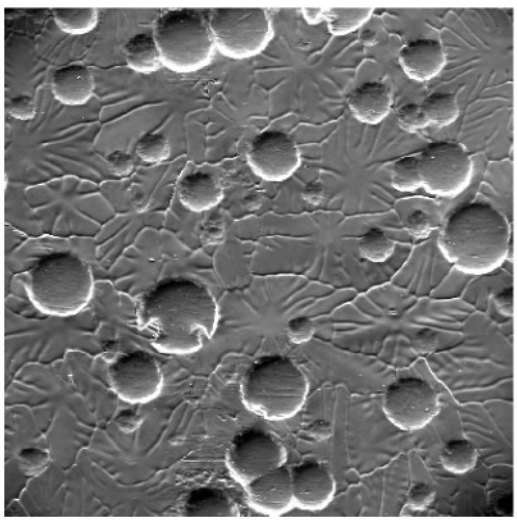
Proces texturování pracovního válce metodou PRETEX je založen na elektrolytickém vyloučení chromu na povrchu pracovního válce. Reaktor s náplní chromového elektrolytu tvoří anodovou klec a ionty chromu se vylučují na povrchu pracovního válce v kovové formě.

Tato technologie umožňuje výrobu stochastických povrchů. Princip výroby válce je vidět na obr.3.37..

Střední aritmetická drsnost povrchu plechu, který je vyroben válcem s texturou PRETEX, se pohybuje v rozmezí $R_a = 0{,}2 \div 20\mu m$. Charakteristický povrch žárově pozinkovaného plechu získaného touto metodou je vidět na obr.3.38..



Obr.3.37.: Princip výroby pracovního válce metodou PRETEX

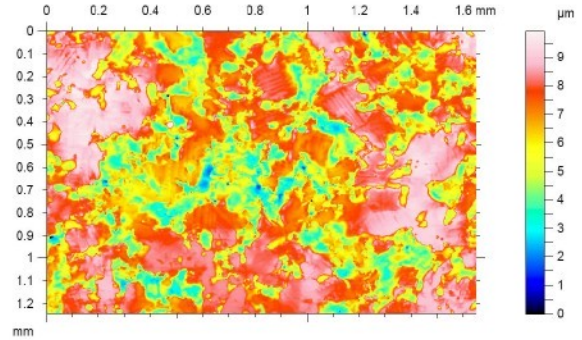


Obr.3.38.: Povrch plechu „PRETEX“, zvětšeno 500x

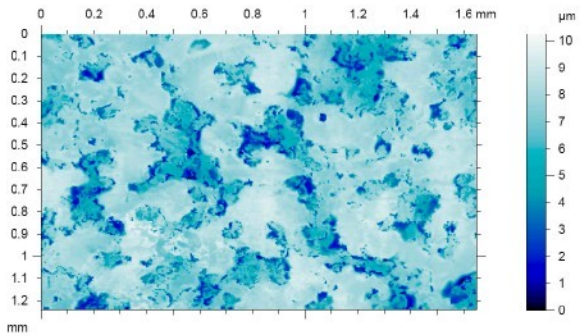
3.5.3 Morfologie povrchu z hlediska vyplnění struktury mazadlem [38]

Každá z předcházejících typů vytvářených morfologií má svá určitá specifika z hlediska konečné drsnosti substrátu, ale také jeho charakteristického povrchu. Důležitou vlastností vhodnosti použití určitého typu morfologie pro lisování, je též schopnost ulpívání požadovaného množství maziva na povrchu substrátu a tím zabránění poškození plechu během tvářecího procesu.

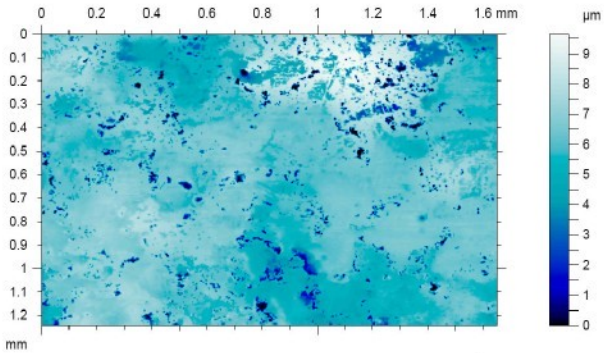
Vyplnění struktury mazadlem při předepsaných množstvích maziva 1,0; 1,5; 2,0gm^{-2} pro různé typy morfologií jsou znázorněny na obr.3.39. a 3.40..



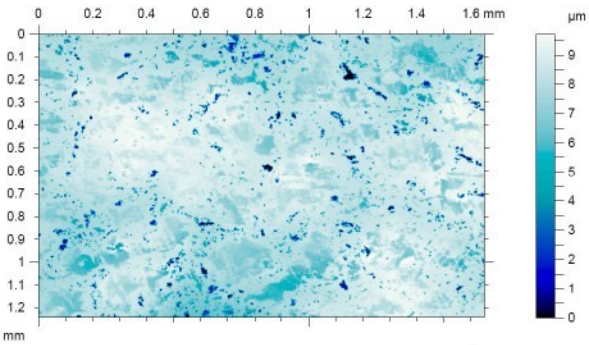
a) *EDT - povrch bez maziva*



b) *EDT - množství maziva 1,0 gm^{-2}*

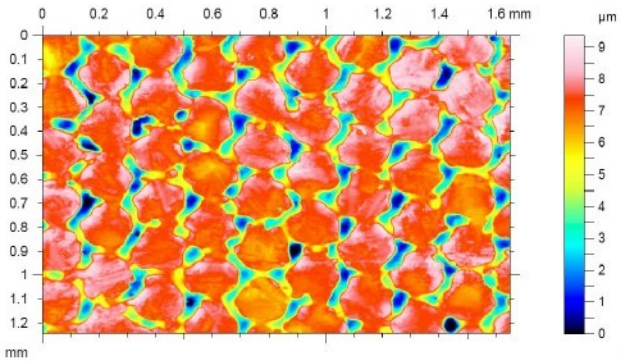


c) *EDT- množství maziva 1,5 gm^{-2}*

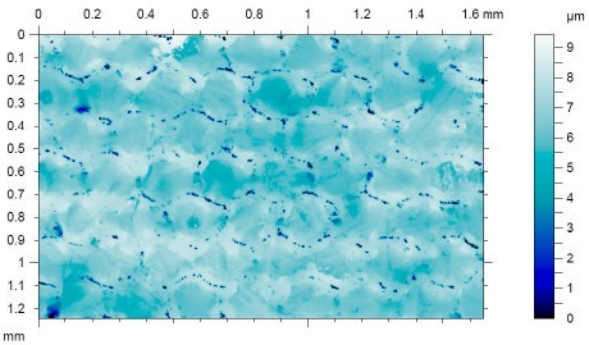


d) *EDT - množství maziva 2,0 gm^{-2}*

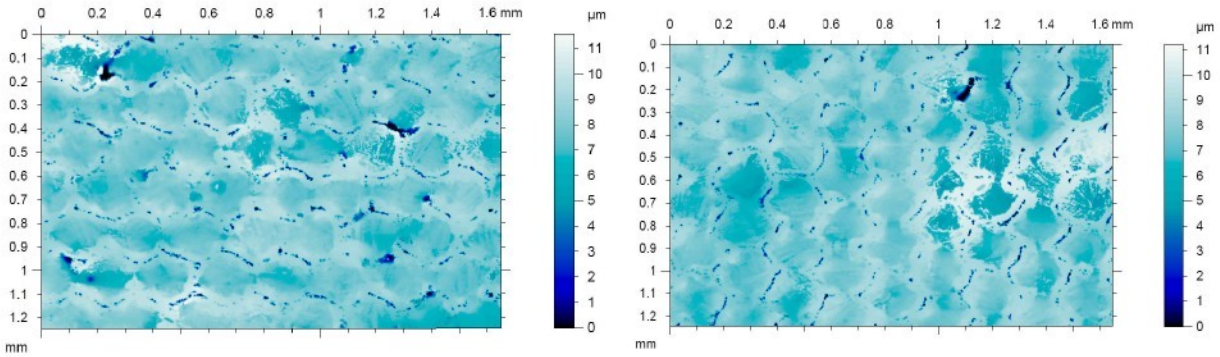
Obr.3.39.: *Vyplněná struktura povrchu typu EDT*



a) *EBT - povrch bez maziva*



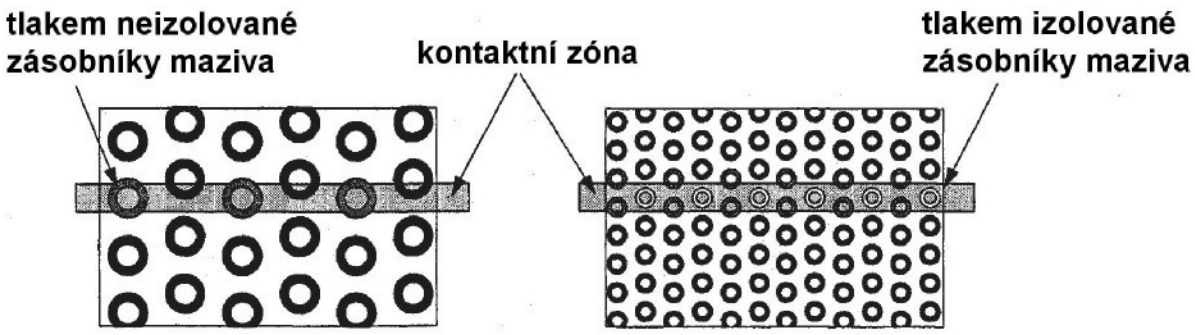
b) *EBT - množství maziva 1,0 gm^{-2}*



c) EBT- množství maziva 1,5 gm^{-2} *d) EBT - množství maziva 2,0 gm^{-2}*

Obr.3.40.: *Vyplněná struktura povrchu typu EBT*

Na obr.3.41. jsou znázorněny dva rozdílné druhy struktury vytvořených povrchů jedním typem texturování – morfologií EBT – SIBETEX. Jejich odlišnost dokazuje, jak důležitou roli v problematice tribologických podmínek spojených s lisováním plechů hraje povrch substrátu. Názorně se projevuje vliv typu vytvořené morfologie vzhledem ke kontaktní ploše styku tvářeného materiálu s nástrojem na uzavření tzv.„zásobníků“ maziva na povrchu substrátu. Tyto zásobníky maziva jsou záměrně vytvářeny při finálním válcování na povrchu substrátu pro zlepšení lisovatelnosti materiálu při operaci hlubokého tažení a udržení požadovaného množství maziva v kontaktní ploše ve styku tvářeného materiálu a nástroje během celé výroby výlisku.



Obr.3.41.: *Schématický pohled dvou rozdílných morfologií pro udržení maziva* [38]

Praktické zkušenosti ukázaly, že kvalita lisování bude záviset nejen na typu použité textury s vytvořenou mikrogeometrií, ale i na tvaru a rozměrech prohlubenin povrchu substrátu. Nevhodný tvar mají prohlubeniny s velkou hloubkou a malou plochou, snadno u nich dojde k uzavření maziva. Vhodný tvar naopak mají prohlubeniny s velkou plochou a malou hloubkou, protože z nich se při deformaci nerovností mazivo vytlačí a dochází ke vzniku hydrostatických oblastí a tím zamezení výskytu zadírání. Tyto poznatky jsou důležité jak pro lisovaní, tak pro hodnocení kvality laku jako finální úpravy vyráběných dílů karosérie.

3.5.4 Hodnocení povrchů z hlediska lisování a kvality laku [9, 25]

Hodnocený povrch je uvažován jako vrstva, která technologickým procesem získala jiné vlastnosti a vzhled oproti povrchu netvářenému. Výslednou kvalitu povrchu však určuje nejen vlastní proces tváření, ale je ovlivněn při jeho výrobě, manipulaci a dopravě.

Povrch karosérie, zejména pohledových dílů, musí po konečném lakování vyhovovat estetickým kritériím, neboť sebemenší rýha je po olakování znatelná. Povrch dílů tedy musí být přiměřeně lesklý, bez rušivých defektů, např. otlaků, rýh, poškrábání, nerovnoměrného matování, změny odstínů, pomerančové kůry apod. Tvrdé dosedy nástroje tzv. otlaky se vytvářejí na pohledových plochách výlisku a způsobují změny v zrcadlení povrchu, což vede k následným reklamacím a zmetkovitosti při výrobě.

Struktura povrchu substrátu (plechu) tak ovlivňuje výrazně výsledný efekt lakování ve stavbě automobilových karoserií. Právě lak a jeho dokonalost společně s tvary karoserie vytváří první a hlavní dojem, kterým automobil působí na zákazníka. Z tohoto důvodu je důležité se zabývat otázkami:

- jaký vliv má struktura povrchu plechu na podmínky při tažení
- jaký vliv má struktura plechu na kvalitu laku

Struktura povrchu plechu v součinnosti s použitým nástrojem pro lisování dávají určité předpoklady pro úspěšné tváření. Pomineme-li aspekty, které ovlivňují bezporuchové lisování, jako např. vznik trhlin a tvarových nepřesností, musíme se zajímat o vlastní povrch plechu, ten se zde uplatňuje několika parametry:

- schopností přenášet vysoké kontaktní tlaky bez a nebo s minimálním poškozením za posuvů přes malé radiusy
- schopností odolávat vysokým kontaktním tlakům při dosednutí částí lisovacích nástrojů
- schopností udržet optimální množství mazacího prostředku a zabránit poškození původní struktury

Jedná se o široké spektrum vlivů, které nelze jednoduchým způsobem porovnat a vyhodnotit.

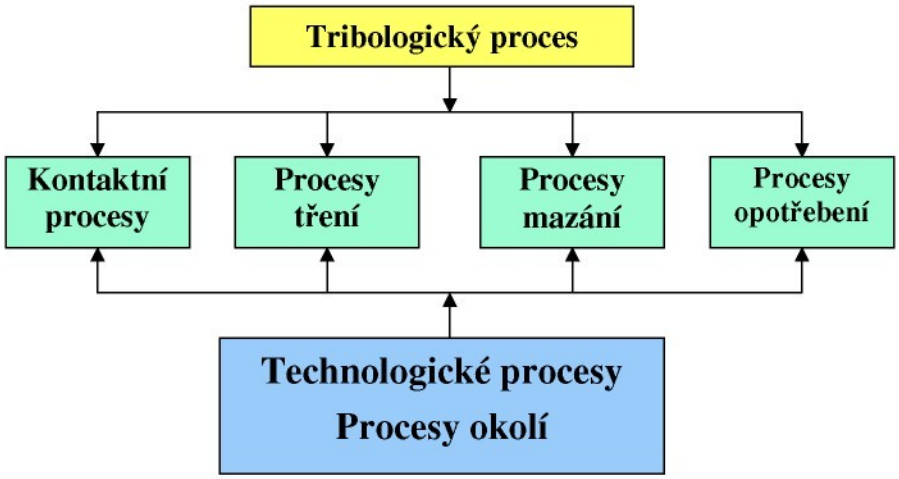
Volbou různého typu morfologie povrchu lze ovlivnit průběh síly potřebné k posuvu materiálu, současně s tím i koeficient tření a případný vznik a velikost zadírání při vlastním procesu tažení. Hodnocení makrogeometrie povrchu není vůbec jednoduché, už z toho důvodu, že dva povrchy, jež mají stejnou drsnost mohou v závislosti na ostatních geometrických parametrech vykazovat odlišné hodnoty koeficientu tření při tváření.

S prudkým nárůstem zpracování plechů se *„zvláštní morfologií“* povrchu se problém tribologie stává složitější a ukazuje se nutnost neustále prohlubovat dosavadní poznatky v tomto odvětví.

4 VLIV TRIBOLOGIE NA PROCES HLUBOKÉHO TAŽENÍ [26, 27, 39-47]

Tribologie je vědní obor, jež se zabývá chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu a nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Tento pohyb může být obecně kluzný, valivý, nárazový nebo kmitavý. Ve skutečnosti se často uplatňují dva i více druhů pohybu současně.Tribologie řeší problematiku nejen tření, ale i mazání a opotřebení těchto povrchů. Je třeba si uvědomit, že pro řešení tribologických otázek je nutná vzájemná spolupráce i s dalšími vědními obory jako jsou např. chemie, fyzika, nauka o materiálu, tribotechnika a další.

Tribologický proces charakterizují materiálové interakce třecích těles, mezilátky a okolí, které probíhají v prostoru a čase. Obecné vazby mezi jednotlivými částmi tribologického procesu jsou znázorněny na obr.4.1..



Obr.4.1.: *Vzájemné vazby v tribologickém systému*

Při tribologických procesech se obecně řeší především otázky:

- jaké jsou mechanizmy přeměny veličin v systému,
- jaké jsou fyzikální procesy přeměny energie
- jaké jsou procesy vedoucí všeobecně ke ztrátám v systému
- jaké jsou možnosti pozitivního působení na systém s ohledem na minimalizaci ztrát

Tyto otázky samozřejmě je nutné řešit i v oblasti tažení v souvislosti s jednotlivými vazbami v tribologickém systému.

4.1 Kontaktní procesy

Kontakt mezi jednotlivými členy tribologického systému je základním znakem a jevem chování tribologického systému. Při kontaktních procesech je třeba uvažovat se základními tvarově-rozměrovými a materiálovými vlastnostmi dotýkajících se částí, jejich vzájemnou vazbou a reakcích mezi nimi. Tyto interakce mohou být materiálové, fyzikální, chemické, atd.

Vzhledem k velké variabilitě kontaktních situací je třeba zvažovat řadu vlivů:

- počet těles zúčastňujících se na kontaktním procesu.
- makrogeometrii a mikrogeometrii kontaktních těles.
- fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti těles tvořících tribologický systém.
- charakteristický druh deformace mezi jednotlivými tělesy.
- typ a rychlost vzájemného relativního pohybu.
- velikost kontaktních napětí

Při řešení tribologických problémů v praxi má velký význam plocha styku, jež zprostředkuje přenos pohybu. Nerozhoduje však geometrická plocha, ale skutečná plocha styku, jež je menší a jen výjimečně se rovná geometrické ploše.

V ideálním případě dvou dokonale hladkých pružných těles se uplatňují klasické Hertzovy vztahy a při zatížení normálnou silou F_N dochází k elastické deformaci:

1. Pro vnik koule s poloměrem r do roviny platí pro max. Hertzův tlak

$$p_{max.} = 1{,}5\frac{F_N}{\pi a_H^2}\sqrt{1-\left(\frac{1}{a_H}\right)^2} \tag{36}$$

kde a_H je poloměr vzniklého kruhového vtisku a vypočte se z

$$a_H = \left(\frac{3r}{2E'}\right)^{\frac{1}{3}} F_N^{\frac{1}{3}} \tag{37}$$

E' je tzv. redukovaný modul pružnosti materiálu

$$E' = \frac{1}{2}\left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right] \tag{38}$$

kde E_1, E_2 resp. ν_1, ν_2 jsou Youngovy moduly pružnosti resp. Poissonovy konstanty jednotlivých materiálů

a pro plochu kruhového vtisku S_H platí

$$S_H = \pi a_H^2 = \pi\left(\frac{3r}{2E'}\right)^{\frac{2}{3}} F_N^{\frac{2}{3}} \tag{39}$$

2. Pro styk dvou koulí s poloměry r_1 a r_2 platí stejné závislosti, přičemž ekvivalentní poloměr zakřivení r je dán vztahem

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \tag{40}$$

3. Pro styk válce a roviny nebo válce a válce platí podobné vztahy jako v (36) až (40).

Ve všech případech Hertzových tlaků je plocha styku úměrná $F_N^{\frac{2}{3}}$. Jelikož reálná tělesa jsou drsná, je jejich styk omezen pouze na výčnělky. V důsledku toho je reálná plocha styku velmi malá a místní tlaky na vrcholcích povrchových nerovností dostatečně velké, aby působily jejich elastické až plastické deformace i při malých zatížení.
Pro stanovení skutečné plochy styku je významný Archardův vztah

$$S_r = k\left[\frac{F_N}{E}\right]^c \qquad (41)$$

kde k, c jsou materiálové konstanty. $0{,}98 \geq c \geq 0{,}87$.
Při dalších zkoumáních Hertzových závislostí se došlo k poznání, že:

- celkový počet mikrokontaktů je téměř úměrný zatížení F_N,
- průměrná velikost mikrokontaktů je téměř nezávislá na F_N,
- skutečná plocha styku je úměrná počtu mikrokontaktů .

Pro plastickou deformaci výčnělků byl odvozen vztah

$$p_m = 1{,}1\sigma_e, \qquad (42)$$

kde p_m je střední kontaktní tlak a σ_e je mez pružnosti v měkčím třecím prvku.
Pro tváření je nutná plastická deformace, aby plastická deformace nastala na celé stykové ploše, musí platit

$$p_m \geq 3\sigma_e \qquad (43)$$

Se stoupající plastickou deformací se zvětšuje plocha styku, která může dosáhnout velikosti geometrické plochy styku.

Poznámka: Experimentální měření prokázala, že takto vysoké hodnoty tlaku už bez přítomnosti maziva podporují zadírání.
Plastická deformace výčnělků dle (42) a (43) vede zcela jasně ke vzniku zadírání.

4.2 Procesy tření [39]

Tření je přírodní jev, který se váže na vzájemný relativní pohyb dvou dotýkajících se prvků tribologického systému. V závislosti na hloubce zkoumání třecích procesů rozeznáváme výzkum na úrovni makromodelu a mikromodelu. Při zkoumání na úrovni mikromodelu se nahlíží na tření jako na elementární proces. Při makro sledování makromodelu zohledňujeme celý funkční projev sledovaného modelu. Makroskopický přístup lze také charakterizovat tím, že získáváme údaje z vnějších měřitelných veličin tribologického systému. Mezi tyto veličiny především patří měření velikosti třecí síly při tangenciálním pohybu, třecího momentu při rotačním průběhu pohybu, popř. třecí práce.

Jedna z nejznámějších obecných definic tření říká:

Tření je odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru.

Tato definice platí pro vnější tření a nepostihuje celkem přesně vnitřní tření. Z tohoto důvodu se projevila nevyhnutelnost nové definice:

Tření je ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo při ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí.

Při řešení jednotlivých tvářecích technologií nelze nikdy dosáhnout ideální rovinnosti stýkajících se ploch nástroje a tvářeného materiálu. Skutečný styk se děje pouze mezi konečným množstvím vyvýšených bodů, které jsou během technologického procesu deformovány.

Tření při tváření většinou plní úlohu pasivního činitele, který brzdí rozvoj deformace, zvyšuje spotřebu energie potřebné na deformační proces a způsobuje opotřebení nástrojů se ztrátou materiálu.

Pokud vycházíme ze základního tribologického systému, mohou nastat čtyři základní stavy tření:

1. *Tření tuhých těles (suché tření)*, nastává tehdy, kdy se určující materiálová oblast nachází v tuhém stavu, tento třecí stav se dále dělí na čisté tření tuhých těles (deformační tření) a na tření v adhezních vrstvách, stav čistého tření tuhých těles nastává především ve vakuu.
2. *Tření kapalinové*, charakterizuje ho stav, při kterém má vrstva materiálu, v které probíhá tření, vlastnosti kapaliny.
3. *Tření plynné*, je obdobou kapalinového tření s tím rozdílem, že charakteristická vrstva má vlastnosti plynu.
4. *Tření plazmatické*, je stav, kdy charakteristická vrstva, ve které probíhá třecí proces, má vlastnosti plazmy.

Jednotlivé třecí stavy se v praxi vyskytují samostatně ve velmi omezené míře. Ve skutečnosti nastává často kombinace jednotlivých druhů tření.

Tření v adhezních vrstvách je stav nejméně dvou třecích vrstev materiálu, které se navzájem dotýkají a mají charakteristické vlastnosti adhezních vrstev vytvořených záměrně nebo přirozeně na základním materiálu. Příčiny tření vyplývají z interakce mezi povrchy, kdy rozlišujeme mechanické a molekulární působení:

- zájemné zachytávání se mikronerovností (drsnosti)
- pružnou deformaci mikronerovností
- plastickou deformaci mikronerovností
- adhezi mezi povrchy (mikronerovnostmi)

4.2.1 Suché tření

Tento druh tření vzniká při bezprostředním styku dotykových ploch bez přítomnosti jakéhokoli maziva. Při tváření je tento stav nežádoucí a vyskytne se pouze při chybném nanesení a nebo při opomenutí nanesení mazadla.

Dva po sobě pohybující se povrchy se stýkají pouze na vrcholcích nerovností a ty jsou plasticky deformovány. Přítlačná normálová síla F_N vyvolává plastickou deformaci na vrcholcích nerovností vlivem velkého místního tlaku. Vytvoří se činná plocha styku S, která je dána rovnicí (44)

$$\mathbf{S = \frac{F_N}{p_m}}, \qquad (44)$$

kde p_m je střední tlak potřebný pro vznik plastické deformace nerovností.

Při vlastním styku vrcholků v oblasti suchého tření dochází k jejich svařování. Tato svarová spojení se při posunutí materiálu v nástroji přerušují. Obtížnost k přerušení svaru je závislá na jejich kvalitě, takže nabývá na důležitosti jejich vzájemná rozpustnost.

Podle dnešních představ má suché tření dva aspekty:

1. deformační
2. adhezní.

V prvém se více uplatňuje mechanika, v druhém chemie. Na obojí mají vliv vlastnosti povrchů, jejich velikost, topografie, tepelné vlastnosti, mechanické vlastnosti, chemické složení včetně přítomných nečistot, adsorbovaných, reakčních a nanesených tuhých vrstev a chemická reaktivita.

Dvojí povahu suchého tření vystihuje např. Kragelského vztah (45) pro třecí sílu:

$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4 + \Sigma F_5 \qquad (45)$$

kde třecí síla F_t je vyčtena jako součet Σ jednotlivých složek sil, kde F_1 je vztaženo k elastické deformaci, F_2 k plastické deformaci, F_3 k deformaci způsobené rytím tvrdého hrotu v měkkém povrchu, F_4 k trhání mikrosvarů s menší pevností, než je pevnost základních materiálů, F_5 k vytrhávání základního materiálu. O tom, zda dochází k elastickým nebo plastickým deformacím, rozhoduje např. index plasticity ψ :

$$\Psi = \left(\frac{E}{H}\right) * \left(\frac{\sigma^*}{r^*}\right) \qquad (46)$$

kde H je tvrdost

σ_k je mez kluzu

Pro tento index platí: $\Psi < 0{,}6$ – deformace je elastická a S_r je úměrná F_N / H.

$\Psi < 1$ – deformace je částečně plastická, S_r je úměrná F_N / σ_k.

Při hodnotě $\psi < 0{,}6$ jsou deformace jen elastické, ovšem většinou jsou hodnoty $\psi > 1$ a to je již oblast deformací plastických.
Velikost smykového napětí - τ je obecně dána vztahem:

$$\tau = \left(\frac{F_t}{S}\right) \tag{47}$$

kde F_t je síla působící na plochu S
S je skutečná plocha, na níž se povrchy stýkají, nikoliv plocha zdánlivá.
Plocha S je zde tedy již výše zmiňovanou plochou S_r.

Skutečnou plochu styku poprvé odvodili z elektrické vodivosti dvou stýkajících se povrchů Bowden a Tabor. Velikost skutečné plochy se může měnit s probíhající plastickou deformací povrchu, s tvorbou a narušováním reakčních vrstev, s teplotou a jinými změnami. Obecně se ukázalo, že celkový počet mikrokontaktů je úměrný kolmému zatížení F_N a skutečná plocha S_r je úměrná počtu kontaktů, čili kolmému zatížení F_N.

V důsledku přiblížení plasticky deformovaných povrchů vlivem jejich vzájemného pohybu se dá předpokládat vznik mezipovrchových vazeb a adhezních spojů. Na této tvorbě se podílejí síly, jež působí na vzdálenost atomů nebo molekul, i síly působící na vzdálenost několikrát vyšší (několik nanometrů). Vzniklá adheze se měří silou F_A, potřebnou na odtržení povrchů a charakterizuje se např. adhezním koeficientem:

$$ak = F_A / F_N \tag{48}$$

Adhezní koeficient roste s klesající tvrdostí H, s klesajícím modulem pružnosti E, s klesajícím tlakem a s rostoucí teplotou. Adhezní koeficient je menší u nepodobných kovů a u kovů krystalizujících v hexagonální soustavě.

4.2.2 Mezné tření

Jestliže mezi třecími povrchy již existuje tenká vrstvička adsorbovaných molekul plynu nebo kapaliny nebo látky vytvořené chemickou reakcí povrchů, mluvíme o mezném tření nebo o mezném mazání. K meznému tření může dojít i u záměrně mazaných povrchů, není-li přívod maziva dostatečný nebo vrstva maziva není dostatečně únosná. Za těchto podmínek se třecí plochy přiblíží natolik k sobě, že jejich bezprostřednímu styku brání již jen mezná vrstva maziva, tj. film polárních molekul maziva s velkou přilnavostí k povrchu. V technické praxi vzniká mezné tření v případech, kdy při malých stykových plochách jsou třecí povrchy zatěžovány velkými tlaky, při malých smykových rychlostech a mezi drsnými povrchy.

Součinitel tření lze odvodit z rovnice (49).

Je-li koeficient α dán jako: $\alpha = \frac{S_k}{S_r}$,

kde S_k je plocha bezprostředního styku povrchu s povrchem,

S_r je oblast reálného styku povrchů,

Pro třecí sílu F_t platí vztah:

$$F_t = \alpha S_r \tau_s + (1-\alpha) S_r \tau_m = S_r [\alpha \tau_s + (1-\alpha)\tau_m]. \quad (49)$$

τ_m je smykové napětí mezného filmu

τ_s je smykové napětí styku povrchu s povrchem,

Jelikož

$$F_N = S_r p_m \approx 3 S_r \sigma_e, \quad (50)$$

kde p_m je tlak na skutečnou třecí plochu, platí pro smykový součinitel tření

$$\mu_{sm} = \frac{F_t}{F_N} = \frac{\alpha\tau_s + (1-\alpha)\tau_m}{p_m} \approx \frac{\alpha\tau_s + (1-\alpha)\tau_m}{3\sigma_e} \quad (51)$$

Mezné tření je spojeno jednak s fyzikální nebo chemickou adsorpcí plynů a kapalin na povrchu třecích dvojic, jednak s chemickými přeměnami třecích povrchů. Pro únosnost mazacího filmu vytvořeného adsorpcí je rozhodující rychlost a pevnost adsorpce molekul na povrchu, jejich koncentrace, orientace vzhledem k povrchu a vliv teploty a tlaku.

Fyzikální adsorpce probíhá prakticky na celém povrchu třecího materiálu. Rovnováha se ustaluje rychle a vratně. Adsorpční teplo a aktivační energie jsou malé. Adsorpce s tlakem roste a se vzrůstající teplotou klesá. Vliv složení materiálu je poměrně malý. Značný význam má však kvalita povrchu.

Chemická adsorpce probíhá na aktivních centrech (hlavně nerovnostech) povrchu. Rovnováha se ustaluje pomalu. Adsorpční teplo se blíží reakčnímu teplu chemických reakcí. Aktivační energie je značná. Adsorpce s tlakem roste až do obsazení aktivních center, potom se ustaluje. S teplotou roste do maxima, pak klesá. Úplná desorpce probíhá obtížně. Vliv složení povrchu je velký, podobně i kvalita povrchu. Chemické adsorpci předchází fyzikální adsorpce.

Tvorba mazacího filmu adsorpcí závisí nejen na povaze adsorbované látky, ale i na povrchu třecích materiálů.

4.2.3 Kapalinové tření

Mezné filmy zmenšují sice podstatně třecí sílu při relativním pohybu dvou těles a zabraňují tvorbě studených svarů, avšak nedokáží zcela oddělit třecí povrchy od sebe a eliminovat tak vliv drsnosti povrchů.

Dokonalého oddělení třecích povrchů se dociluje až při kapalinovém tření, kdy se vytváří mezi třecími povrchy souvislá vrstva maziva, která zcela vyrovnává drsnost povrchů a svým vlastním tlakem ruší účinek kolmého zatížení na povrchy těles. Třecí síla je tedy v podmínkách kapalinového tření závislá pouze na velikosti vnitřního tření v mazací vrstvě a lze ji vyjádřit vztahem

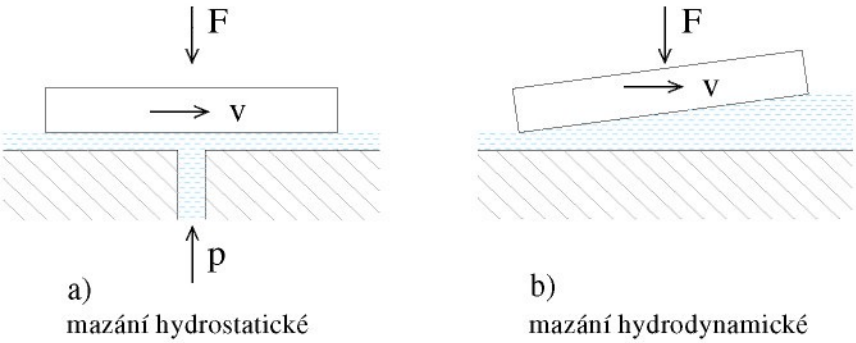
$$F_t = \eta \frac{Sv}{h}, \tag{52}$$

kde η je dynamická viskozita,
S je styčná plocha třecích povrchů,
v je lineární rychlost pohybu třecích povrchů,
h je tloušťka vrstvy maziva.

Pro součinitel kapalinového tření tedy platí vztah

$$\mu = \frac{\eta v}{hp}, \tag{53}$$

kde p je střední měrný tlak F_N/S_N, S_N je průmět kluzné plochy.



Obr.4.2.: *Schematické znázornění vytvoření tlaku v kapalině*

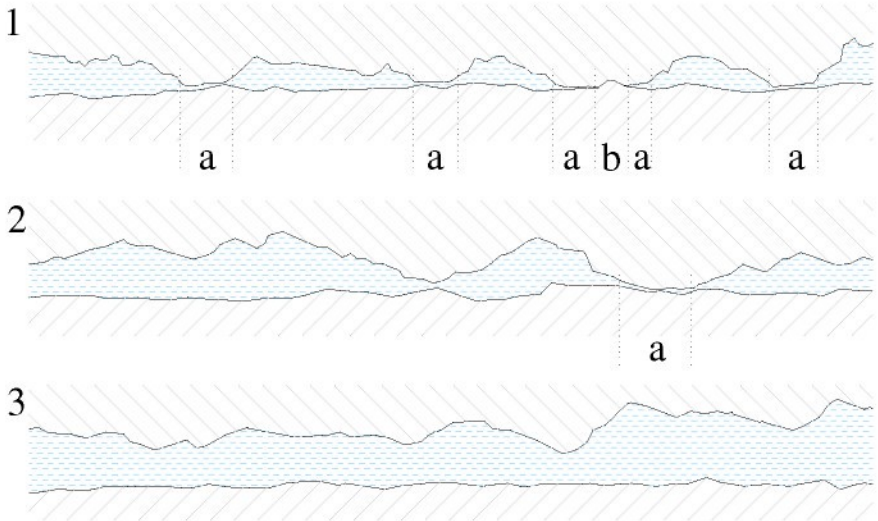
Má-li být mazací vrstva schopna přenášet zatížení, kterým jsou k sobě tělesa přitlačována, musí v ní být vytvořen odpovídající protitlak. Tohoto protitlaku se může dosáhnout dvěma způsoby: hydrodynamicky a hydrostaticky. Schematické znázornění vytvoření hydrostatického tlaku v kapalině je vidět na obr.4.2.(a) a hydrodynamického tlaku je vidět na obr.4.2.(b).

4.2.4 Smíšené tření

Nejsou-li třecí plochy dokonale odděleny vrstvou maziva a dochází i k bezprostřednímu styku jejich nerovností, existuje mezi nimi tření smíšené, tj. jak tření kapalinové, tak i mezné. K tomuto druhu tření dochází, jestliže tloušťka maziva mezi povrchy je menší než tloušťka potřebná pro zajištění kapalinového tření, ale je větší než tloušťka tenkého filmu, který zajišťuje mazání mezné.

K přechodu mazání kapalinového na mazání smíšené může dojít při určité kombinaci parametrů (především velké zatížení a malá smyková rychlost třecích ploch), přičemž významnou roli hraje mikrogeometrie funkčních ploch, zejména tehdy, je-li mazivem kapalina s malou viskozitou. Teplota maziva ovlivňuje proces porušení mazacího filmu hlavně při větších zatíženích a rychlostech třecích ploch.

Smíšené tření představuje nejrozšířenější formu tření při výrobě výlisků karosářského typu a podíl jednotlivých složek (mezné tření a kapalinové tření) do značné míry ovlivňují konečnou kvalitu zhotovovaného výrobku. Na obr.4.3. jsou schematicky znázorněny nejčastější způsoby tření při tváření výlisků nepravidelných tvarů.



Obr.4.3.: *Schematické znázornění nejčastějších způsobů tření při tváření výlisků nepravidelných tvarů*

Na obr.4.3. jsou zobrazeny stavy tření mezného (1), smíšeného (2) a kapalinného (3). Tyto schematické modely tření jsou zakresleny pro dva materiály s odlišnou drsností i tvrdostí povrchu. Spodní materiál (nástroj) má leštěný povrch a podléhá pouze elastické deformaci. Druhý člen soustavy má menší pevnost, větší drsnost povrchu a plasticky se deformuje.

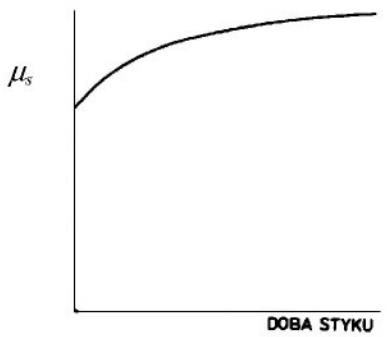
Při mezném tření dochází k deformaci vrcholků nerovností (a), kovovému styku brání pouze mezní vrstva maziva. Přesto jsou ale místa, kde dochází k narušení mezní vrstvy (b), tvrdší materiál zde vniká do druhého a způsobuje porušení vrstvy materiálu. V oblasti smíšeného tření je značná část zatížení přenášena vrstvou mazadla a k meznému tření dochází pouze místy. Možnost kovových kontaktů tak klesá na minimum. Při kapalinném tření je mazací film natolik únosný, že ke kontaktu materiálů již nedochází ani v místech nejvyšších nerovností.

Kromě uvedených způsobů tření existují ještě další způsoby tření (jako je např. elastohydrodynamické tření, valivé tření atd.), ale vzhledem k tomu, že pro tváření nemají tyto druhy tření zásadnější význam, nejsou zde uváděny.

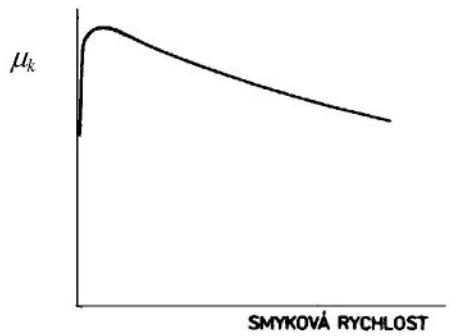
4.2.5 Tření v závislosti na rychlosti pohybu a době styku povrchů

V procesu tváření styku dvou povrchů existuje tření statické (adhezní), jež je nutno překonat pro uvedení tělesa do pohybu a tření kinetické, které lze sledovat, je-li těleso v pohybu. Tření statické je vyšší než tření kinetické, z čehož plyne, že statický součinitel tření je větší než kinetický součinitel, poněvadž síla potřebná k vzniku relativního pohybu těles je obvykle větší než síla potřebná k jeho udržení. Statický součinitel tření je též funkcí doby styku mezi dvěma povrchy [25] (obr.4.4.), kinetický součinitel je funkcí rychlosti pohybu povrchů (obr.4.5.); se stoupající rychlostí přechodně vzroste a pak zpravidla klesá, zpočátku rychle.

Vliv rychlosti pohybu lze těžko oddělit od vlivu teploty. Se zvětšující se rychlostí pohybu stoupají i místní teploty, s růstem teplot zpravidla klesá součinitel tření.



***Obr.4.4.**: Závislost statického součinitele tření na době styku*

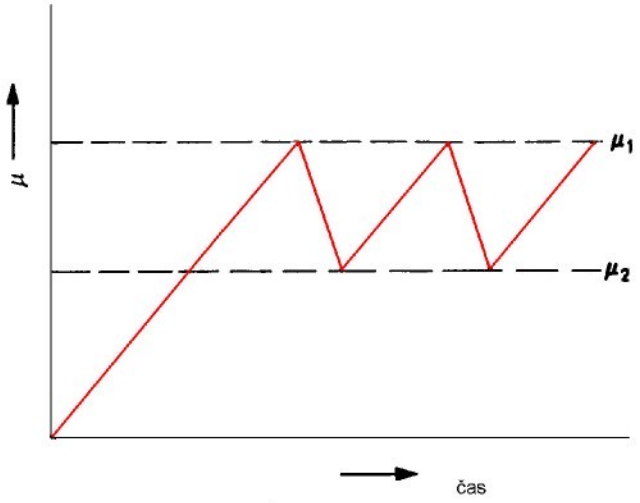


***Obr.4.5.**: Závislost kinetického součinitele tření na smykové rychlosti*

4.2.5.1 Tření a „Stick – Slip“ efekt

Tento efekt se může vyskytovat u tažení, je to stav tření, při vzájemném pohybu stýkajících se povrchů, kde se střídá skluz se stavem zadírání v časově krátkých, většinou následných odstupech. Střídání skluzu se zadíráním představuje trvalé časové změny koeficientu tření, jak je znázorněno na obr 4.6. Jen v malém množství oblastí zpracování kovů má ***Stick – Slip*** efekt větší význam. Je to spojeno s obzvláště nízkými tvářecími rychlostmi a projevuje se výrazným zvukovým efektem tzv. „*drnčením*“. V praxi se tento jev může vyskytovat zvláště při tažení plechů se zinkovým povlakem. V těchto případech může nastat zřetelné poškození povrchu materiálu a také může dojít k poškození tvářecích nástrojů. Důsledkem zadírání je vznik rýh a zviditelnění stop na činných částech nástroje, zejména jsou poškozeny tažné rádiusy, ale i povrch výlisku může být zbytky mikročásteček zinku poškozen natolik, že je vyřazen jako zmetek a nepoužitelný k následným úpravám, např. lakování.

Poznámka: Tento jev byl pozorován při experimentálním měření práce, zejména při malých rychlostech protahování, bylo slyšitelné drnčení a průběh měření odpovídá znázorněnému grafu na obr.4.6., kdy docházelo k místnímu svařování třecích dvojice nástroj-testovaný materiál, neboť právě vlivem malých rychlostí posuvu bylo zajištěna dostatečně dlouhá doba ke vzniku mikrosvarů.



Obr.4.6.: *Časová změna součinitele tření u efektu „Stick – Slip“* [41]

4.3 Tribotechnika [44]

Součástí vědního oboru tribologie je tribotechnika, dílčí oblast zabývající se prostředky a postupy v technickém a ekonomickém působení tření a opotřebení v oblastech strojírenské výroby.

Předmětem zkoumání *Tribotechniky* je.

- technika mazání
- technika ochrany proti opotřebení

Základní tribologický výzkum ve spojení s tribotechnikou dává komplexní přístup k řešení problémů zejména v těchto oblastech:

- výzkum a vývoj nových typů maziv, jejich zkoušení
- vodernizace mazacích postupů a zařízení
- organizace techniky mazání v provozu
- vývoj nových materiálů v oblasti povrchových úprav a jejich zkoušení
- vývoj nových měřících, kontrolních a diagnostických postupů a přístrojů
- výzkum v oblasti optimalizace třecích dvojic s ohledem na tření, opotřebení, zadírání

Řada problémů z oblasti tribotechniky respektive celé problematiky tribologie se v současné době nechá vyřešit pomocí laboratorních zkoušek, ty by se měly co nejvíce přibližovat reálným podmínkám v průmyslové praxi.

4.3.1 Procesy mazání

Maziva, jako dílčí složka v tribologickém systému, mají svou nezastupitelnou úlohu při tažení zejména pak náročných výlisků pro automobilový průmysl.

4.3.1.1 Maziva a jejich úloha [7, 26, 39]

Dříve bylo pohlíženo na maziva jako na *čistě pomocné látky,* toto mínění je dávno překonáno a odborník ví, že význam maziv je rovnocenný významu zúčastněných třecích prvků. Na mazivo jsou vznášeny četné specifické požadavky. Při výběru maziv se musí uživatel řídit vždy tím, že neexistují naprosto dobrá a špatná maziva, nýbrž za daných podmínek je jedno mazivo více či méně vhodné ke konkrétné operaci. Optimálního stavu je dosaženo tehdy, jestliže celková materiálová dvojice (materiál a mazivo), včetně makrogeometrických a mikrogeometrických podmínek je navzájem v souladu.

4.3.1.2 Mazání při tažení

Důvodem, proč se při tažení používají maziva, je zabránění vzniku kovového styku mezi materiálem nástroje a výliskem. Zároveň mazivo chrání nástroj před opotřebením a výlisek před otěrem. Vlivem použití maziva se snižuje součinitel smykového tření a tím je také možno snížit velikost síly potřebné k tažení. Druh a vlastnosti maziva se řídí tvářecím procesem a druhem tvářeného materiálu a jeho předběžnou úpravou. Kromě toho dovolují maziva použít vyšších stupňů tažení, umožňují za stejných technologických podmínek tažení dosáhnout vyššího stupně deformace.

Způsob nanášení maziva, jeho množství, nanášení na polotovar výlisku a mazání nástroje je u jednotlivých způsobů tváření značně individuelní. U nepravidelných výlisků se mazivo nanáší tak, aby vzhledem k uskutečňovaným stavům napjatosti, nedocházelo vlivem velikosti deformace k poškození v kritických místech výlisku. Je zřejmé, že u každého výlisku nepravidelného tvaru budou tato místa jiná, proto je důležité doplnit zde teorii o zkušenosti s praktickým lisováním. Většinou se přístřih a nástroj mažou jen na určitých místech, jenž mají pozitivní vliv na kvalitu výlisku.

Tažení probíhá většinou za podmínek mezního a smíšeného tření. Je nutné podotknout, že při mezním tření není dostačujícím ukazatelem vhodnosti maziva jen koeficient tření, protože se ukázalo, že i když dvě maziva dosahují stejného koeficientu tření, mohou se lišit v účinku na otěr.

Pro tažení se používá velkého množství maziv, pro jejichž výběr musíme brát v úvahu měnící se podmínky během tváření. Mají-li plnit svou funkci, je potřeba vybírat je stejně pečlivě, jako například materiál nástroje na tažení.

4.3.1.3 Požadavky na maziva

Dobré mazivo musí splňovat mnohé požadavky, které lze shrnout do těchto bodů:

- schopnost utvořit pevný souvislý film
- mazací schopnost
- schopnost udržení na třecích plochách
- chemická stálost
- tepelná stálost a odolnost
- snadné nanesení a odstranění
- hygienická nezávadnost
- nízká cena

Většina tvářecích procesů je bez vhodného maziva neuskutečnitelná. Na jeho složení, vlastnostech a použití záleží životnost tvářecích nástrojů, povrchové vlastnosti tvářených materiálů a velikost tvářecí práce. Z těchto úkolů vyplývají požadavky na vlastnosti maziv. Jejich dále uvedený souhrn platí sice obecně, ale v jednotlivých procesech má každá z vlastností větší či menší význam.

Dobré mazivo má mít hlavně schopnost vytvářet nosné mazací filmy nebo filmy s optimálním koeficientem tření. Aby při vysokých tlacích nedocházelo k vytlačování maziva, přidávají se do něho vysokotlaké přísady (nejčastěji grafitu síry a mastku).
Mazivo musí být nekorozivní, tedy jak nástroj, tak i polotovar nesmí podléhat korozi.

Dalším požadavkem je snadné nanášení a též i odstraňování maziva z povrchu výlisku. Obtížnost nanášení je dána především viskozitou maziva. Snadná odstranitelnost maziva je důležitou vlastností, neboť mazivo nesmí mít negativní vliv na další zpracování polotovaru (např. svařování). Mazivo nemá vyvolávat barevné změny na povrchu kovů, nevytvářet lepivé nánosy, s tím souvisí snadná odstranitelnost.

Mazadlo musí být chemicky stálé. Jeho vlastnosti se nesmí s časem výrazně měnit a to např. působením vzduchu, světla a tepla. S teplotou souvisí další vlastnost maziva: tepelná stálost, ta určuje schopnost maziva se změnou teploty stále plnit svůj úkol.

Mazivo by mělo být snášenlivé s ostatními procesními látkami v průběhu stavby karoserie. Též důležitá je skladovatelnost bez potřeby dodatečných úprav před nanášením.

Komplexním požadavkem na mazivo je, aby mělo dostatečnou mazací schopnost. To je vlastnost, která určuje schopnost přilnutí maziva k povrchu. Tento požadavek je dán především mazivostí a viskozitou. Mazivostí posuzujeme pevnost mezní vrstvy maziva. Viskozita je ukazatelem vnitřního tření a vyjadřuje odpor proti vzájemnému posunutí molekul maziva. Lepší výsledky se dosahují u maziv s vyšší viskozitou, neboť mají schopnost odolávat vyšším tlakům. Další důležité požadavky na maziva se týkají bezpečnosti a hygieny práce. Mazadlo musí být fyziologicky nezávadné a při použití nemá jeho zápach obtěžovat okolí. V současné době hraje také důležitou roli ekologické hledisko na znečišťování životního prostředí všech produktů výrobců olejů a maziv .

4.3.1.4 Druhy maziv a jejich použití

Použití určitého typu maziva závisí na tom, pro jaký materiál a technologii tváření má být mazadlo použito. Základem jsou oleje, do nichž se ke zlepšování mazacích schopností přidávají vysokotlaké přísady. Oleje, především syntetické, jsou nejčastěji používanými mazivy pro možnost snadného nanášení. Nevýhodou je nutnost odmašťování. Oleje jsou buď čisté ropné cyklanické s vysokotlakými přísadami nebo oleje rostlinné, živočišné oleje a tuky. Olejové emulze, složené z olejů rozpustných ve vodě, se snadno odstraňují z povrchu výlisků, ale mají problémy s odmašťování po tepelném zatížení a s lepidly. V některých případech se používají vodné roztoky sodných nebo draselných mýdel. Tuhá maziva (mastek, grafit, MoS_2) se používají jen při lisování za tepla. Např. grafit má vyhovující vlastnosti až do 800°C.

4.3.1.5 Nanášení maziv

Nanášení maziva záleží na typu maziva, neboť každé mmzivo je chrakteristické svými užitnými vlastnostmi. Maziva lze rozdělit na tři základní druhy :

- technologická (jednofunkční),
- konzervační (dvoufunkční)
- prací oleje

Konzervační mazadla jsou nanášena na plech již u výrobce – v hutích. V dnešní době je kladen podstatně větší význam na jejich konzervační schopnost (primární funkce), než na schopnost mazací – technologickou (sekundární funkce).

Technologická mazadla jsou nanášena na přístřih až před vlastním tažením a dále dle mazacích plánů pouze na místa, kde chceme omezit vliv tření (přimazávání).

Prací oleje, použití má význam zejména při tažení výlisků karosářského typu, u kterých je požadována vysoká kvalita povrchu (např. z důvodu další úpravy povrchu lakováním).

Nanášení mazadel se v praxi provádí třemi způsoby:

- **nástřikem** - pomocí mazacího zařízení, jenž tryskami rozprašuje požadované množství maziva na povrch substrátu .

- **válečkem** - u mazadel, která nelze nanášet nástřikem ani po jejich zředění. Mazadlo je vtlačováno tlakem o konstantní velikosti do dutého čepu. Ten je opatřen otvory vyvrtanými kolmo na osu otáčení a je potažen látkou či plstí. Mazadlo tak nasákne do textilního povlaku a je poté nanášeno na materiál.

- **praním** - před zpracováním přístřihů na výrobu výlisků, procházejí tyto nejdříve tzv. „pracími stroji“, kde se pomocí pracích olejů odstraňují veškeré nečistoty a též konzervační olej z hutí. Z pracích strojů získáváme plechy ošetřené vrstvou pracího oleje.

4.3.2 Procesy opotřebení povrchu materiálu [26, 27, 28, 42, 48]

V závislosti na přítomnosti maziva je z hlediska tribologického procesu nutné popsat opotřebení, které ovlivňuje výslednou kvalitu výlisku a případné poškození nástroje.

4.3.2.1 Definice opotřebení

Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu materiálu a média, které opotřebení vyvolá při jejich vzájemném relativním pohybu.

Opotřebení se přiřazují tyto předpoklady:

- je vždy spojeno se třením, zahrnuje v sobě změny na třecích plochách
- je vždy hodnoceno na materiálové vrstvě
- platí pro všechny fáze pohybu (včetně rozběhu a doběhu relativního pohybu)
- dochází ke stálé změně tvaru nebo změně vlastností materiálu

Makroskopické opotřebení odpovídá globálnímu pozorování tedy integrovanému zachycení více nebo méně výrazných změn v materiálových a tvarových dvojicích.

Mikroskopické opotřebení odpovídá pozorování základních procesů lokální plastické deformace, které se vzhledem k relativnímu pohybu koncentrují na inhomogenní roviny krystalické mřížky, působí dislokačně a vedou ke vzniku trhlin. Také struktura kovů na hranici zrn výrazně ovlivňuje opotřebení.

4.3.2.2 Studium povrchů opotřebení

Měření velikosti opotřebení kvantifikuje konečný výsledek procesu opotřebení. Tato informace neumožňuje blíže poznat mechanismus a vnitřní stránky tohoto procesu, které jsou základem efektivního boje s opotřebením.

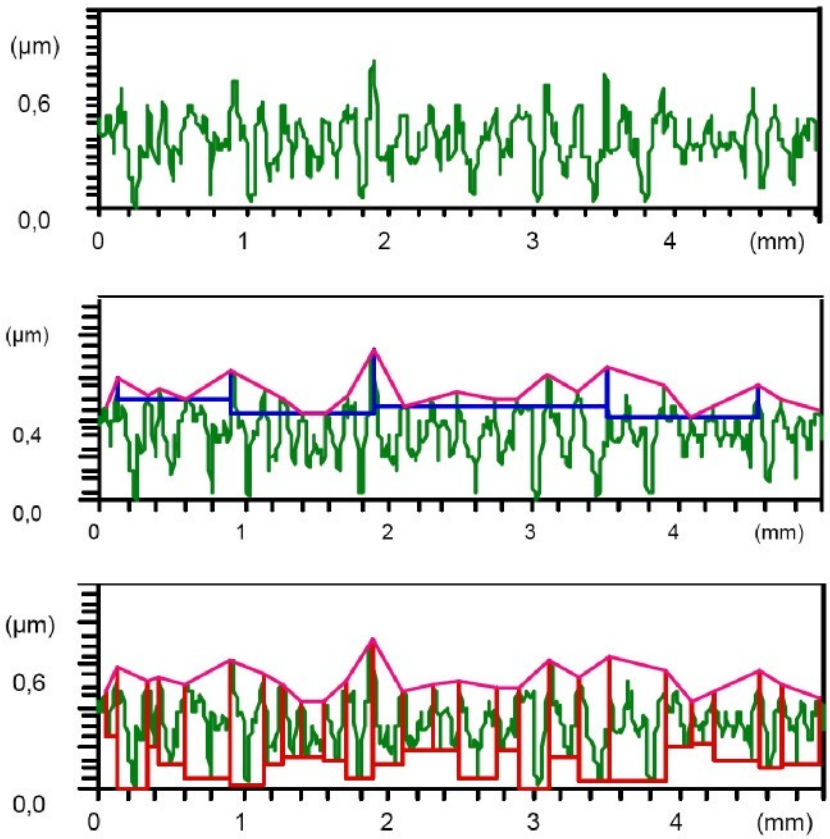
Jedním z prostředků, který umožňuje pronikat do podstaty procesu opotřebení, je studium konečného produktu třecího procesu. Opotřebený povrch představuje vlastně studijní materiál, v kterém jsou zakódované znaky, charakterizující různá stádia interakčních procesů, které na povrchu proběhly a porušily ho. Konečným výsledkem jsou geometrické změny třecích povrchů, ale i změny v jejich složení a vlastnostech.

4.3.2.3 Určení opotřebení

Při hodnocení geometrických vlastností opotřebených povrchů se využívají zejména metody, které jednoznačně charakterizují stav povrchu. K určení velikosti opotřebení profilováním slouží měřící zařízení *Profilograf* s příslušenstvím viz ilustrační foto obr.4.7.. Při této metodě se zhotoví profilogram zkoumaného povrchu před zkouškou a po zkoušce. Takto získané profilografické záznamy se porovnávají a poskytují určitou charakteristiku sledovaného povrchu. Následně můžeme vyhodnotit změny tvaru a rozložení opotřebení

v důležitých rovinách povrchu materiálu. Na obr.4.8. jsou pro názornost profilografické záznamy drsnosti a vlnitosti měřeného povrchu.

Obr.4.7.: *Měřící zařízení* ***Profilograf*** *s příslušenstvím*



Obr.4.8.: *Profilografické záznamy měřeného povrchu drsnosti a vlnitosti* [48]

4.3.2.4 Druhy opotřebení

1. odnosem – vede k úbytku materiálu
2. změnou tvaru – vede ke vzniku vtisků, drážek, rýh
3. zadíráním – k svařování kluzných materiálů

Opotřebením v tribologii rozumíme odstraňování materiálů z třecích povrchů v přímém styku, ve vzájemném pohybu anebo ve styku různými formami účinku maziva. Do opotřebení se zahrnují i adhezní opotřebení vedoucí až ke značnému poškození povrchů.

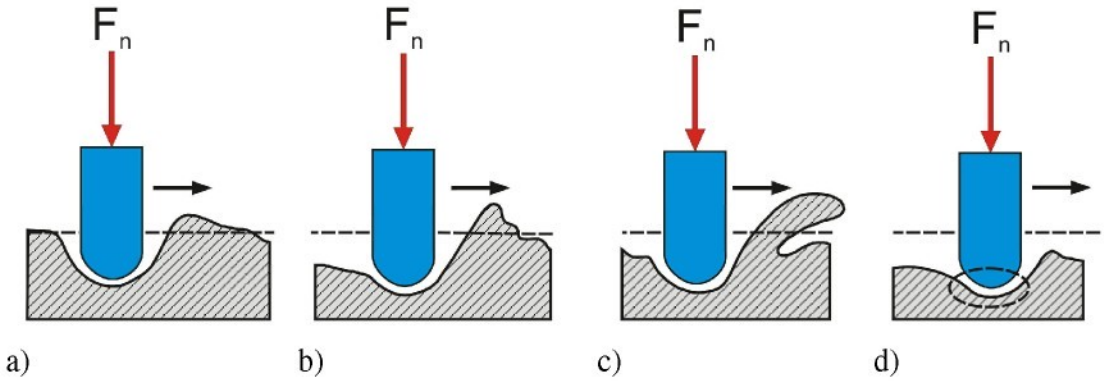
Na velikost a průběh tření a tím i opotřebení mají právě vlastnosti vnější třecí vrstvy rozhodující význam. Vnější třecí vrstva by měla mít vlastní regenerační schopnost a malou pevnost ve smyku oproti základnímu materiálu a to z důvodu zmenšení třecí síly. Vnější třecí vrstva má mít co největší skutečnou kontaktní plochu, to proto, že se sníží zatížení vnějších povrchů a tím i opotřebení.

Dalším stupněm opotřebení už je zadírání *(„galling“),*tento jev je popsán v následující kapitole 5.

4.3.2.5 Základní fyzikální mechanismy opotřebení

Na obr.4.9. jsou znázorněny základní fyzikální mechanismy opotřebení

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



Obr.4.9.: *Základní fyzikální mechanismy opotřebení dle* [42]

Obr.4.9. jsou znázorněny fyzikální mechanismy opotřebení. Oba první druhy opotřebení vznikají únavou materiálu jak při elastické, tak při plastické deformaci. Obrázek ukazuje schematicky vniknutí tvrdých částic do rovného protilehlého tělesa. Přitom utrpí protilehlé těleso pod tvrdou částicí tlakové namáhání, jakož i namáhání v tahu. Střídavé namáhání je výchozím bodem pro zničení materiálu. Při plastické deformaci je tomuto druhu zničení přiřazen počet změn zatížení větší než 10^5. Tento proces únavy materiálu hraje velkou roli především při válcování a to ve spojení s ostatními mechanismy opotřebení. Při plastické deformaci vzniká proces zničení materiálu také hluboko *pod povrchem tření* již počtem změn zatížení převyšuje hodnotu 10^3. Tím je způsobeno opotřebení materiálu i v řadě jiných přerušovaně pracujících procesů tváření kovů (např. hluboké tažení, protlačování, kování).

Průběh opotřebení u těchto základních fyzikálních mechanismů se nechá popsat v následujícím pořadí:

- zpevnění materiálu v oblasti blízko povrchu
- vytváření mikrotrhlin
- vykazování trhlin
- úbytek materiálu

Při abrazi působí tvrdá částice jako mikroostří a vytváří otěr. Tato forma opotřebení hraje velkou roli především u mechanicko - geometrické teorie, jako důsledek zaseknutí povrchů a vznikem otěru. Při tváření kovů se vytváří tento otěr především začleněním tvrdých nečistot do tvářeného materiálu nebo cizím znečištěním povrchu dílu a nástroje nebo maziva.

Opotřebení adhezí je následek svařování obou třených povrchů. Začíná vždy na namáhaném povrchu, je nezávislé na počtu změn zatížení a může vznikat jako u opotřebení abrazí po jediné změně zatížení. Většinou začíná tento proces přenesením materiálu ze základního tělesa na protilehlé těleso nebo obráceně z protilehlého na základní. Přitom závisí na poměrech smykového napětí základního tělesa, protilehlého tělesa a mikrosvarů, zda se měkčí materiál dílu nanáší na tvrdší materiál nástroje, nebo zda přenos materiálu probíhá obráceně. Při mnoha tvářecích operacích patří adhezivní opotřebení k nejvýznamnějším formám opotřebení. Popsané základní fyzikální mechanismy opotřebení se zpravidla nevyskytují jednotlivě, nýbrž jsou většinou navzájem propojené a probíhají často v souvislosti s chemickým opotřebením. Abrazivní i adhezivní opotřebení se může vyskytovat jak v reakčních vrstvách, tak i v základním kovu.

4.3.2.6 Adhezivní opotřebení v procesu tváření [49]

Z fyzikálního hlediska povrchy tuhých těles nejsou nikdy dokonale hladké. Podle použité technologie opracování povrchu vytváří se na nich charakteristický reliéf makro a submikronerovností. Ke styku povrchů dvou součástí nedochází v celé obrysové ploše, ale na velkém množství lokálních dotykových plošek. Jejich vytváření je provázeno elastickou i plastickou deformací vrcholků mikronerovností na povrchu .

Elastická deformace vzniká v první fázi dotyku vrcholků k plastické deformaci povrchových vrstev materiálu s nižšími mechanickými vlastnostmi nerovností. Dosáhne-li tlakové napětí v dotykové oblasti meze kluzu v tlaku, dojde postupně k plastické deformaci povrchových vrstev materiálu s nižšími mechanickými vlastnostmi. V průběhu plastické deformace se mohou porušit v oblasti dotyku povrchové vrstvy. Na „obnažených“ dotykových ploškách se vlivem adhezních sil tvoří „*mikrospoře*“.

Vytvořené mikrospoje se působením tangenciálních nebo normálných sil porušují buď na původní ploše dotyku obou mikronerovností, nebo pod povrchem jednoho z dvojice materiálů.Tato druhá alternativa je v praxi častější. V důsledku plastické mikrodeformace se totiž značně zpevní povrchové vrstvy materiálu a proto jejich pevnost je vyšší než pevnost

podpovrchových vrstev. Může proto dojít při porušení mikrospoje k přenosu částic materiálu na druhý povrch a tedy k jejich vytrhávání z povrchu nástroje.

Adhezivní teorie tření a opotřebení vypracovaná autory v [50] přinesla pokrok nejen v nazírání na podstatu tření, ale zároveň zaznamenala i přínos pro budování teorie opotřebení. Vytváření a opětovné zanikání třecích spojů je závislé na materiálových vlastnostech pohybujících se třecích dvojic. Podle toho můžeme rozlišovat čtyři případy mechanismu tření a opotřebení, dané velikostí smykových napětí ve skutečných místech dotyku.

Jednotlivá napětí jsou označována:

τ_{pM} je napětí k usmýknutí povrchové nerovnosti měkčího členu dvojice

τ_{pT} je napětí k usmýknutí výčnělku tvrdšího členu dvojice

τ_{pS} napětí k rozpojení mikrosvaru v místě, kde se vytvořil

1. Usmýkávají se třecí spoje, součinitel tření dané dvojice a opotřebení měkčího i tvrdšího členu dvojice jsou velmi malé.

$$\tau_{pS} < \tau_{pM} < \tau_{pT} \qquad (54)$$

2. Přednostně se usmýkávají výčnělky měkčího kovu a ulpívají na tvrdším členu dvojice. Zatímco opotřebení měkčího kovu je značné, součinitel tření se neliší od prvního případu.

$$\tau_{pM} < \tau_{pS} < \tau_{pT} \qquad (55)$$

3. Vytvářejí se pevné spoje a dochází k opotřebení měkčího i tvrdšího kovu, součinitel tření je vyšší než v obou předchozích případech.

$$\tau_{pM} < \tau_{pS} \geq \tau_{pT} \qquad (56)$$

4. Za samostatný případ je považováno tření dvojice stejných kovů, při kterém dochází ke zpevnění třecích spojů

$$\tau_{pS} > \tau_{pT} = \tau_{pM} \qquad (57)$$

Důsledkem je přenášení oblasti smykového namáhání do stále větší hloubky obou povrchů, součinitel tření i opotřebení vzrůstají a může dojít až k zadření. Proto je účelné se vystříhat tomu, aby dvě součásti, u nichž dochází ke tření byly z téhož materiálu. Nelze- li to splnit, má mít jeden člen dvojice zvláštní povrchovou úpravu.

Přítomnost povrchových vrstev jakéhokoliv původu má vždy značný vliv na velikost síly tření F_t, neboť smykové napětí τ_{pV} v těchto vrstvách má odlišnou hodnotu od uvažovaných alternativ.

Pro takový případ se rovnice

$$F_t = \tau_p S_r \qquad (58)$$

změní na tvar

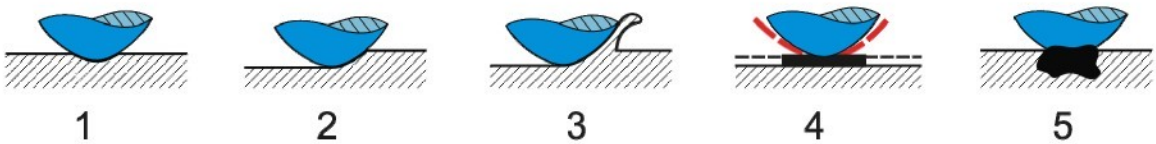
$$F_t = \beta S_r \tau_{pM} + (1-\beta) S_r \tau_{pV} \qquad (59)$$

kde β představuje část plochy styku s přímým kovovým dotykem

Tato teorie tření a opotřebení považuje za primární tvorbu mikrospojů působením adhezních sil a v menší míře uvažuje rýhující účinek mikronerovností.

Poněkud odlišné stanovisko bylo publikováno v [51], kde rozhodující význam při tvorbě mikrospojů je přikládán vzájemnému zablokování mikronerovností na dotykových ploškách následkem plastické deformace. Plastickou deformací na stykových površích se vyvolávají kluzy v různých systémech kluzových rovin, tím se dotykové plošky zdrsní a zpevní a mikronerovnosti se tak vzájemně zablokují. K porušování mikrospojů proto dochází v jednom nebo druhém materiálu při prudkém zvýšení lokální teploty. Zvýšením teploty se zvětší difůze a může dojít k vytvoření pevného spojení mezi odstřiženou částicí a povrchem druhého materiálu. Důležitým předpokladem pro přenos materiálu je však porušení oxidických nebo chemickou reakcí vzniklých povrchových vrstev.

Kromě uvedených hypotéz adhezivního opotřebení je velmi významným přínosem dle [52] molekulárně mechanická teorie tření a opotřebení. Tato teorie bere v úvahu působení makronerovností a mikronerovností stykových povrchů i meziatomárních vazebních sil. Celkem rozlišuje pět typů porušování ve styku nerovností dotykových povrchů, lišících se především stupněm deformace nejbližším okolí styku, jejich znázornění je na obr.4.10.: 1) elastická deformace, 2) plastická deformace, 3) rýhování,4) porušování povrchových vrstev, 5) vytrhávání základního materiálu.



Obr.4.10.: *Základní typy porušování mikrospojů dle* [52]

1. Mikronerovnosti se deformují elasticky, nepřekročí-li napětí ve stykové oblasti hodnotu mez kluzu základního materiálu. Charakter deformace je závislý na hloubce vtlačení mikronerovnosti do druhého tělesa a na poloměru vtlačované mikronerovnosti.
2. Je-li poměr hloubky vtlačení mikronerovnosti a poloměru vtlačované mikronerovnosti větší, nastane plastická deformace materiálu, která pokračuje do vyčerpání jeho deformační schopnosti. Experimentálně bylo prokázáno, že tento poměr závisí na adhezivních silách, které působí v oblasti dotyku.
3. Rýhování materiálu se objeví v případech, kdy materiál zpevněný plastickou deformací není již schopen další plastické deformace a nebude tedy schopen přemisťovat se při průchodu vtlačovaných nerovností. V tomto případě nastane značné poškozování stykových povrchů vytrháváním a odřezáváním částí materiálu, popř. jejich vylamování.
4. Povrchové porušování slabých meziatomárních (adhezivních) mikrospojů vzniká v okamžiku, kdy jejich pevnost je mnohem menší než pevnost obou základních materiálů. Porušování mikrospojů bude probíhat prakticky bez poškozování základních materiálů.

Tento příznivý případ je možný jen při kladném gradientu mechanických vlastností v povrchových vrstvách obou dotykových materiálů, tj. za přítomnosti povlaků vzniklých chemickou reakcí (obvykle oxidací).

5. K hloubkovému porušování pevného adhezivního mikrospoje, které je doprovázeno vytrháváním částic z povrchu základního materiálu, dochází v případech, kdy pevnost meziatomárních vazebných sil je větší, než pevnost mřížky krystalu. Projevuje se intenzivním poškozováním stykových povrchů, přenosem materiálu a tvorbou volných částic.

4.4 Tribologické zkoušky

V oblasti tření, opotřebení a mazání je k dispozici řada zkušebních metod, je pochopitelné, že se nejvhodnější postup při výzkumu tribosoučástí volí podle důležitosti a složitosti daných reálných tribosystémů. Čím přesněji známe spektrum zatížení, tribostrukturu a velikost ztrát, tím cílevědoměji lze zvolit zkušební metodu.

Získat dokonalé informace o reálném tribosystému je vždy velmi obtížné. Na druhé straně existují problémy i s přenosem výsledků zkoušek, které byly získány na jednoduchých zkušebních vzorcích, na výrobek. Proto je mnohdy nutné dělat nejen zkoušky v laboratoři, ale i zkoušky na modelovém zkušebním zařízení a v závažných případech i přímo v provozu.

Obecně lze konstatovat, že čím je tribologický systém složitější, tím nákladnější je jeho zkoušení. Vysokou korelaci výsledků laboratorních měření a reálného tribosystémem lze očekávat v tom případě, jestliže simulační zkoušky odpovídají provozním poměrům.

Při sledování procesu tváření plechů, jakožto tribologického systému zjišťujeme velké množství vlivů vstupujících do tohoto systému. Obecně lze říci, že velikost třecí síly při tváření závisí na:

- mikrogeometrii povrchu substrátu (druh povrchové textury a drsnost této textury).
- rychlosti posuvu plechu po nástroji.
- deformaci materiálu (mechanické vlastnosti materiálu, vypínání plechu a posuvy plechu).
- druhu použitého substrátu (nepokovený, typ pokovení, chemickém složení povrchu použitého substrátu).
- druhu materiálu nástroje a stav jeho povrchu.
- použitém mazivu při tažení.
- velikostí kontaktního tlaku mezi materiálem a nástrojem.
- atd..

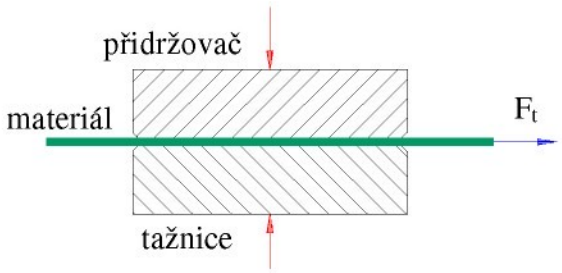
Je třeba si uvědomit, že každá z uvedených veličin se podílí na tribologických dějích ve sledované soustavě. Bohužel se však neuplatňují samostatně, ale vzájemně se ovlivňují. Je proto velmi obtížné výše uvedené vlivy hodnotit odděleně a proto se často při vyhodnocování tribologických podmínek posuzují komplexně výsledky zkoušek pro soustavu nástroj-

mazadlo-materiál-technologické podmínky. Tribologický výzkum v oblasti tváření plechů tak především probíhá na úrovni zkoumání makromodelu, kdy se zohledňuje celý funkční projev sledovaného modelu a tento výzkum lze charakterizovat tím, že získáváme údaje z vnějších měřitelných veličin tribologického systému. Mezi tyto veličiny především patří měření velikosti třecí síly při pohybu testovaného vzorku. Přehled v současnosti používaných testů pro hodnocení tribologických vlastností materiálů a mazadel používaných v automobilovém průmyslu při tváření je uveden v dalších kapitolách.

4.4.1 Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí

Modelování procesu tření při posuvu tvářeného materiálu mezi přidržovačem a tažnicí je jeden z nejrozšířenějších testů. Tento test vyvinul Wojtowicz a jeho princip spočívá v protahování pásku testovaného materiálu mezi zkušebními čelistmi. Princip tohoto testu je znázorněn na obr.4.11. Zřejmou výhodou tohoto testu je snadné nastavení podmínek testu (rychlosti protahování pásku a velikosti normálného zatížení čelisti F_N) a snadné měření sledované veličiny F_t (třecí síly). Výpočet koeficientu tření je snadný a vypočte se z hodnot F_N a F_t.

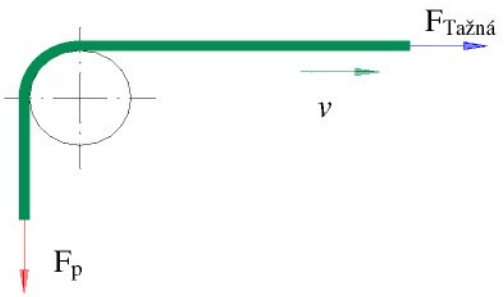
Nevýhodou tohoto testu je, že napjatost testovaného materiálu při zkoušce neodpovídá skutečné napjatosti materiálu pod přidržovačem a v průběhu zkoušky také nedochází k výrazné plastické deformaci testovaného materiálu, tak jako v případě reálného zhotovování výrobku tažením. Na velikost tažné síly má také vliv geometrie čelistí v místech, kde mezi ně materiál vstupuje.



Obr.4.11.: *Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí*

4.4.2 Modelování tření na tažné hraně

Princip tohoto testu spočívá v tažení zkušebního vzorku přes tažnou hranu tažnice, která je zde reprezentována válečkem o zvoleném poloměru R. Vzorek je tažen konstantní rychlostí v. Měřítkem pro posouzení tribologických poměrů vznikajících na tažné hraně je zde velikost tažné síly $F_{Tažná}$. Velikost tažné síly závisí na velikosti protitahu brzdící síly F_P, délkou styku testovaného materiálu s tažnou hranou (tzv.úhlu opásání), koeficientem tření na tažné hraně a mechanickými vlastnostmi protahovaného vzorku. Schematické znázornění uspořádání tohoto testu je na obr.4.12..

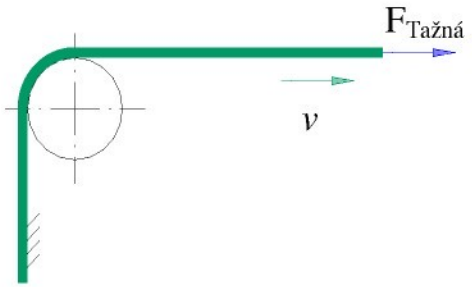


Obr.4.12.: *Modelování tření na tažné hraně*

Výhodou tohoto testu je snadné nastavení rychlosti protahování vzorku. Nevýhodou je špatná kontrola kontaktního tlaku mezi tažnou hranou a vzorkem. Pro určení koeficientu tření na tažné hraně je třeba zjistit velikost síly potřebné pro ohyb a narovnání pásku na tažné hraně.

4.4.3 Modelování vypínání přes tažnou hranu

Princip tohoto testu spočívá v tažení vzorku přes tažnou reprezentované válcovou plochou o poloměru R. Na rozdíl od metody popsané v kapitole 4.4.2. je zkušební vzorek na jedné straně pevně uchycen a druhá strana vzorku se pohybuje rychlostí *v*. Kriteriem pro vyhodnocení zkoušky je síla $F_{Tažná}$ potřebná pro vytvoření předem zvolené deformace testovaného vzorku. Deformace, která vzniká v kontaktní zóně je podobná té, která nastává při hlubokém tažení na čele tažníku. Nevýhodou tohoto testu je obtížná nastavitelnost kontaktního tlaku a kluzné rychlosti na tažné hraně. Schematické znázornění uvedeného testu je vidět na obr. 4.13.

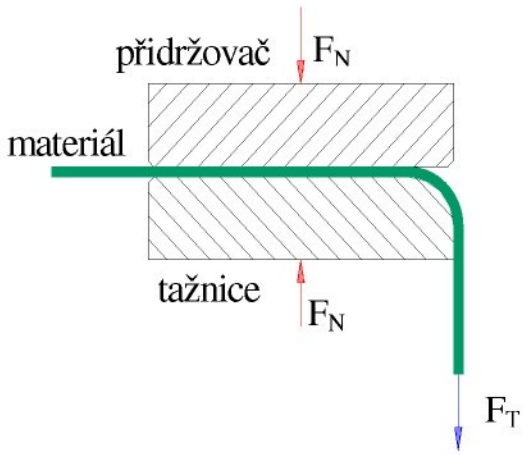


Obr.4.13.: *Modelování vypínání přes tažnou hranu*

4.4.4 Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hanou

Tento test a stejně tak i jeho výhody a nevýhody jsou kombinací metod popsaných v kap.4.4.1 a kap.4.4.2. Hodnotícím kriteriem pro tribologické vlastnosti je opět velikost síly potřebné pro protažení pásku $F_{Tažná}$. Schematické znázornění uvedeného testu je vidět na obr.4.14..

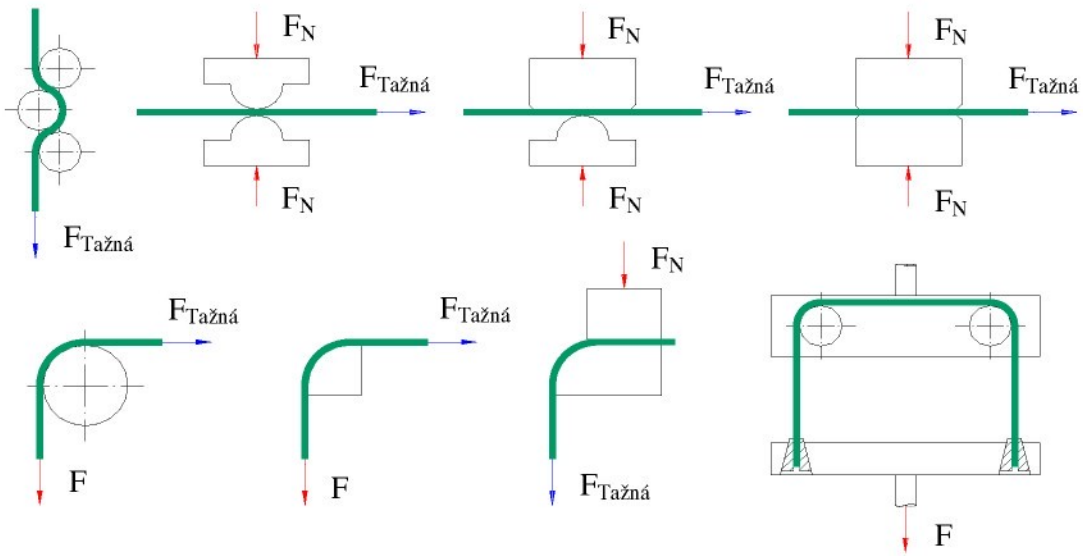
Princip tohoto testu je také používán na katedře strojírenské technologie TU v Liberci a jeho průběh a způsob vyhodnocení bude podrobněji uveden v následujících kapitolách.



Obr.4.14.: *Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou*

4.4.5 Další způsoby tribologických zkoušek plechů

Laboratorních zkoušek pro hodnocení tribologických vlastností testovaných mazadel a substrátů byla vyvinuta celá řada. Ve většině případů se však jedná o zkoušky technologické a výsledky z jednotlivých pracovišť nejsou porovnatelné. Každá ze zkoušek na základě určitých hodnotících kriterií porovnává mezi sebou výsledky jednotlivých testů pro určitou kombinaci testovaný substrát-testované mazivo-technologické podmínky. Příklady některých dalších používaných zkoušek pro hodnocení tribologických vlastností jsou uvedeny, bez dalšího komentáře, na obr.4.15..

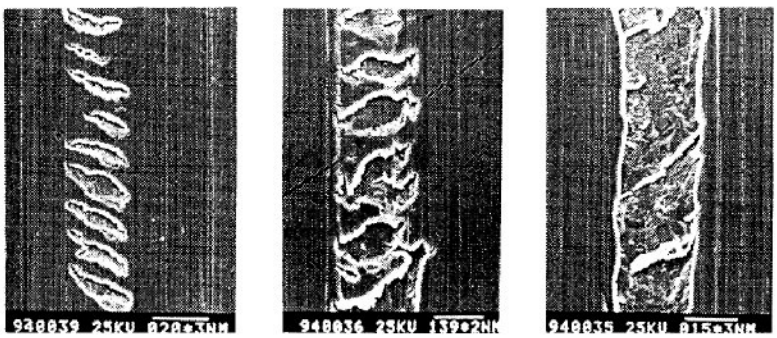


Obr.4.15.: *Příklady dalších tribologických zkoušek plechů*

5 PROCESY ZADÍRÁNÍ PŘI TAŽENÍ [13, 15, 39]

5.1 Definice zadírání

Zadírání můžeme charakterizovat jako mezní stav tření, kdy dochází ke kovovému styku dvou ploch a ke vzniku tzv. "**mikrosvarů**". Představuje hrubé poškození povrchových vrstev, v jehož důsledku se na povrchu zkušebních vzorků objevují úzké rýhy. Ty jsou orientované ve směru posuvu vzorků a viditelné již pouhým okem. Snímky z elektronového mikroskopu ukazují na porušení celistvosti zinkového povlaku v různých stádiích, rozvoj této poruchy dokumentuje obr.5.1.. Na počátku dochází k porušení celistvosti povlaku pouze v podobě lokálního narušení vrstvy, kdy stále existují mezi trhlinami celistvé můstky zinkového povlaku (***a***), při pokračujícím styku plechu s nástrojem se trhliny zvětšují, můstky se bortí (***b***), až dojde k úplnému setření zinkové vrstvy (***c***). Povlak je stržen do té míry, že je možné v příčném řezu pozorovat místa základního materiálu vystupující na povrch.



a *b* *c*

Obr.5.1.: *Vznik a rozvoj zadírání* [53]

5.2 Vliv materiálu na zadírání

Materiál působí jako třecí veličina, povrch třecího materiálu je tvořen vnitřní a vnější vrstvou. Vnitřní vrstva se skládá ze základního neovlivněného materiálu. Vnější vrstva je složena z několika dalších podvrstev, ty svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi a podmínkami vzniku dotvářejí výsledný vliv vnějšího obalu na tření. Vnější vrstva obsahuje přechodovou vrstvu, vrstvu s porušenými krystalovými mřížkami, reakční vrstvu, absorbovanou vrstvu a film maziva.

5.2.1 Povrch materiálu jako třecí veličina při tažení [7, 26, 28]

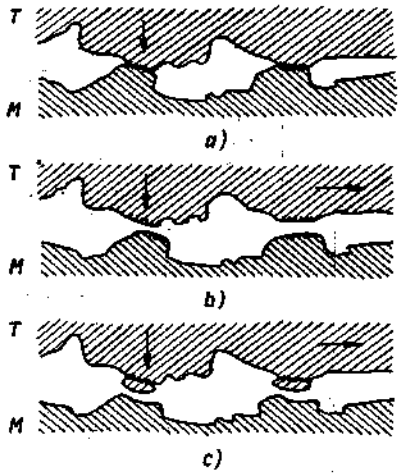
Třecí povrchy vykazují úchylky tvaru, vlnitost, drsnost – nejsou hladké. V důsledku mechanického namáhání jsou deformovány elasticky a plasticky a podléhají fyzikálním a chemickým změnám působením okolního prostředí. Díky své drsnosti se třecí plochy dotýkají pouze v určitých místech. Přiblížením dvou povrchů se vytváří skulinky, ve kterých vznikají hydrostatické a hydrodynamické tlaky, ty jsou nejen závislé na fyzikálních vlastnostech

maziv, ale i na rozměrech prohlubenin. Nevhodný je tvar povrchu, na kterém jsou prohlubeniny s velkou hloubkou a malou plochou, snadno u nich dojde k uzavření maziva. Vhodný tvar naopak mají prohlubeniny s velkou plochou a malou hloubkou, protože z nich se při deformaci nerovností mazivo vytlačí a dochází ke vzniku hydrostatických oblastí.

Na obr.5.2. jsou znázorněny různé druhy porušení třecích ploch, z nichž horní plocha je tvrdší materiál (T) než spodní měkčí materiál (M):

a) místní mikrosvařování dotykových ploch
b) usmyknutí svařeného spoje
c) usmyknutí výčnělků kovu (M) a ulpívajících na povrchu (T)

Je-li pevnost těchto bodových mikrosvarů stejná nebo menší než pevnost materiálu třecí dvojice, odtrhne se svar ve své ploše. Je-li větší, vytrhávají se částice z povrchů materiálů (hlavně měkčího kovu). Ty zůstávají buď volné a mohou být zdrojem opotřebení abrazivního, nebo se vtisknou zpět do jednoho z obou povrchů.



***Obr.5.2.**: Schéma porušení povrchu třecích ploch*

Tření rozhodujícím způsobem ovlivňuje kvalitu a povrchovou jakost výtažků z tenkých plechů. Velikost tření snižujeme použitím vhodných mazadel, jež vytváří mezi plochami tvářeného polotovaru a plochou nástroje mazací film. Ten při vysokých měrných tlacích zabraňuje přímému kovovému kontaktu povrchu materiálu nástroje s tvářeným plechem.

Působením velkého zatížení třecích ploch je mazací film vytlačován, mazaný povrch obnažován a dochází ke svařování třecích povrchů – zadírání. Zadírání neboli kovové tření vzniká při vzájemném pohybu dvou dotýkajících se kovových těles, kdy mezi jejich povrchy není mazivo, vrstva povrchových oxidů ani jiných nečistot. U jednotlivých povrchových výčnělků dochází zpravidla k *„mikrosvarům“*. Vzroste-li jejich počet, dochází k zadření,tj. úplnému svaření obou povrchů, neboť ochranná povrchová vrstva se rozrušuje rychleji, než se tvoří. Dochází k bezprostřednímu styku povrchu s povrchem, povrchy jsou narušeny do hloubky.Charakter zadírání se mění dle použitého maziva.

Nebezpečí zadírání závisí na vzájemné rozpustnosti kovů třecí dvojice.

Z hlediska odolnosti proti zadírání se nejlépe chovají kovy navzájem vůbec nerozpustné nebo kovy, jež mezi sebou tvoří křehké intermetalické fáze s malou smykovou pevností. To souvisí i s vlivem oxidických vrstev, který je závislý na velikosti tlaku. Porušení vrstvy oxidů nemá za následek výrazný růst koeficientu tření, neboť úlomky oxidické vrstvy snižují smykovou mez kluzu mezivrstvy, kterou vytváření.

5.2.2 Svařovací vlna v dotykovém místě povrchů materiálů [54]

Dle článků publikovaných v posledních letech zabývajících se problematikou zadírání, je tento nepříznivý jev způsoben svařováním pevných těles nebo jen jejich částí na dotykové ploše během tření nebo deformací spojených s tvářením materiálů.

Existuje několik různých názorů autorů na mechanismus svařování materiálů v tuhém stavu.

- Semenov [55] zdůraznil, že meziatomové spojení nastává mezi atomy, které překročí určitou energetickou bariéru (aktivované atomy). Aktivace je stimulována přenosem tepla ze spojené části do části nespojené.
- Buche [56] stanovil, že mechanismus zadírání závisí na materiálu, stejně jako na podmínkách, při kterých jsou tyto materiály zpracovávány. V některých případech postačuje ke spojení zničení povrchové vrstvy a použitím dostatečně velké síly respektive tlaku zajistit přímý styk čistě kovových povrchů.

Teoretické úvahy

Každý pravděpodobně pozoroval sbalování kuliček rtuti. Hnací silou tohoto procesu je povrchové napětí materiálu. Sbalování se děje velmi rychle, protože rtuť má malou pevnost ve smyku a viskozitu. Pro všechny pevné látky, které mají pozitivní povrchovou energii, je spojení v dotykové zóně termodynamicky zdůvodněné, ale tento proces je většinou potlačen pevností materiálu, z důvodu malé pohyblivosti atomů. Zkušenost ukazuje, že tato překážka je odstraněna účinkem vysokých tlakových nebo smykových napětí, které se objevují v zóně dotyku během plastické deformace nebo tření. Za takových podmínek lze tento jev přibližně popsat pomocí rovnic pro viskózní kapaliny. Tento poznatek byl aplikován na modelování toku pevných materiálů.

Uvažujeme dvourozměrnou situaci a předpokládejme, že dva materiály (materiál 1 a 2 na obr.5.3.) stejného typu jsou v přímém dotyku na svých rovinných plochách (rovina XZ, obr.5.3.). Dále předpokládejme, že povrchové atomy těchto částí jsou spojeny v $X > 0$ a že nejsou spojeny v $X < 0$, ale vzdálenost mezi atomovými vrstvami je blízká meziatomové vzdálenosti *d*. Tím je osa 0Z lineární hranicí mezi spojenou a nespojenou částí na rovině XZ. Tím v $X < 0$ vznikla uzavřená trhlina, která by měla zmizet s uvolněním povrchové energie. Povrchové atomy trhliny jsou připraveny ke spojení, ale nejsou aktivovány a svařovací proces nenastává spontánně. Nicméně ke svařování může dojít pohybem bodu 0 doleva. Tento

fenomén je nazván ***svařovací vlna*** (**WW**- welding wave) a čára 0Z je čelo svařovací vlny. Pohyb čela svařovací vlny je způsoben tendencí materiálu snížit povrchovou energii.

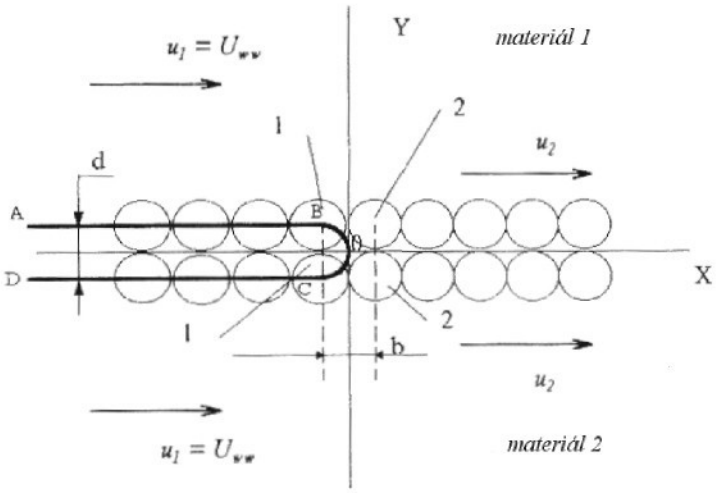
Tato tendence je uvažována dále zavedením vzorce (60) dle Laplace do systému rovnic

$$p_2 - p_1 = -2\gamma/d \qquad (60)$$

kde p_1 je tlak v místě pro rychlost u_1

kde p_2 je tlak v místě pro rychlost u_2

Vzorec udává skok tlaku v bodě 0, kde poloměr zaoblení povrchové čáry je roven *d/2 a* γ je povrchová energie



Obr.5.3.: *Vznik svařovací vlny při kontaktu dvou materiálů* [54]

Na obr.5.3. je znázorněna zóna dotyku pevných částí a vznik svařovací vlny kde:

1. představuje nespojené povrchové atomy právě před čelem svařovací vlny
2. znázorňuje spojené povrchové atomy právě za čelem svař. vlny AB0CD, křivka volného povrchu, představující uzavřenou trhlinu; B0C konvenční zobrazení vrcholu trhliny, jako čáry s poloměrem zakřivení *d/2*; *d*-meziatomová vzdálenost; *b*-šířka čela svařovací vlny, tj. vzdálenost mezi spojenými a nespojenými atomy (předpokládá se, že *b=d*)

Následující předpoklady:

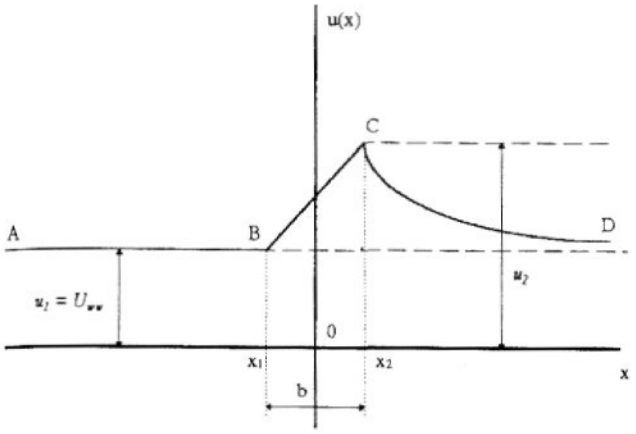
1. tok v blízkosti X je jednorozměrný , kdy platí:

   $u_y=0$ (61)

   $u_x = u\,(x,y) \neq 0,$ (62)

   kde u_x, u_y jsou složky rychlosti hmoty ū.
2. čelo vlny 0Z se může pohybovat doleva s konstantní rychlostí U_{ww}

3. ve vlně pouze povrchové atomy jsou podrobeny rychlostnímu skoku, způsobenému Laplaceovým tlakovým skokem. Proto dále je posuzována čára toku souhlasně s osou X a tato čára toku má tloušťku *2d* (2 atomové vrstvy).
4. rychlost hmoty u(x) závisí lineárně na x uvnitř vlny, dosahuje maxima u_2 právě za čelem vlny a nakonec se snižuje na původní hodnotu u_1.Fyzikální význam této představy je, že vzdálenost mezi zcela spojenými a zcela nespojenými atomy nemůže být menší než meziatomová vzdálenost *d* (viz.obr.5.3.). Lineární aproximace u(x) uvnitř vlny je zcela symbolická, protože je předpoklad vzdáleností meziatomového měřítka, toto je nejjednodušší aproximace.Je však možné použít i jinou křivku, jediným požadavkem je, aby u(x) bylo spojitou funkcí
5. právě před a právě za čelem vlny platí:
   rychlost hmoty u=konstantě (viz obr.5.4. úsek AB)
   $\partial u/\partial x = 0$ (63)
   dle této rovnice je maximální hodnota (viz obr.5.4. bod C)



Obr. 5.4.: *Znázornění rychlosti čela svařovací vlny*

Na obr.5.4. je rychlost hmoty jako funkce x. ABCD. Křivka rychlosti hmoty vztažená vůči x; BC – lineární část křivky uvnitř čela svařovací vlny, *b*- šířka čela vlny(je rovna meziatomové vzdálenosti *d*). Rychlost hmoty se nejdříve zvyšuje z u_1 na u_2, protože se uvolňuje povrchová energie. Potom v $x > x_2$ se rychlost hmoty snižuje díky viskóznímu přenosu setrvačnosti. V bodech x_1 a x_2 je $\partial u/\partial x = 0$

Vyvozené závěry

Rychlost čela vlny U_{ww} velmi záleží na rychlosti deformace ϵ' (rychlost deformace vyvolaná vnějšími silami, které vyvolají tlaková a smyková pnutí v materiálu), protože viskozita materiálu je velmi závislá na tomto parametru toku. Parametr ϵ' charakterizuje stav

materiálu při určitých podmínkách zatížení. Viskozita se snižuje s růstem ϵ' a tím je méně času pro úplné svaření. Pokud známe povrchovou hustotu aktivních bodů, můžeme odhadnout tento čas.

Podle Krasulina [57] hrají roli aktivních bodů dislokační výstupy. Většinou máme v kovech sítě a uskupení dislokací. Takže charakterizujícím rozměrem materiálu na mikroúrovni je velikost buňky l (sítě). Tato velikost se pohybuje od 1μm u nedeformovaných, až do 0,01μm v silně tvářených materiálech.

Čas potřebný k úplnému svaření při působení tlakových napětí je dán rovnicí

$$t_w = l/2U_{ww}. \tag{64}$$

Existuje ještě jedna rychlost deformace ϵ'_{ww}, související s tenzorem deformace ϵ_{ik}, způsobeným skokem rychlosti na čele vlny

Tato hodnota se dá odhadnout jako

$$\epsilon'_{ww} \sim (u_2 - u_1)/d = U_{ww}\chi/d. \tag{65}$$

kde χ je specifický objem relativního skoku na čele svařovací vlny

$$\chi = \frac{u_2 - u_1}{u_1} \tag{66}$$

Na základě výpočtů bylo zjištěno, že ϵ'_{ww} je podstatně větší než ϵ', což je příčinou proč deformace, způsobená vnějšími silami nebyla obsažena v deformačním tenzoru ϵ_{ik}.

Z toho lze učinit závěr, že uvnitř čela vlny a v těsné blízkosti za ní, tok prostředí je mnohem více řízen povrchovým napětím než vnějším zatížením.

Dle mínění autora [52], uvedený model vysvětluje dost dobře mechanismus adhese v tuhém stavu. Jednoduché rovnice (67,68,69,70) pro rychlost U_{ww} čela svařovací vlny mají jasný fyzikální význam a evidentně zdůrazňují důležitou roli povrchové energie při procesu svařování (spojování) materiálu při tváření.

$$U_{ww} = \frac{4\gamma}{\eta\chi} \tag{67}$$

$$U_{ww} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_1 d\chi}} \tag{68}$$

$$U_{ww} = \frac{40\gamma}{\eta} \tag{69}$$

$$U_{ww} = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \tag{70}$$

kde γ povrchová energie čela vlny

η viskozita

K stlačitelnost

ρ_0, ρ_1 hustota

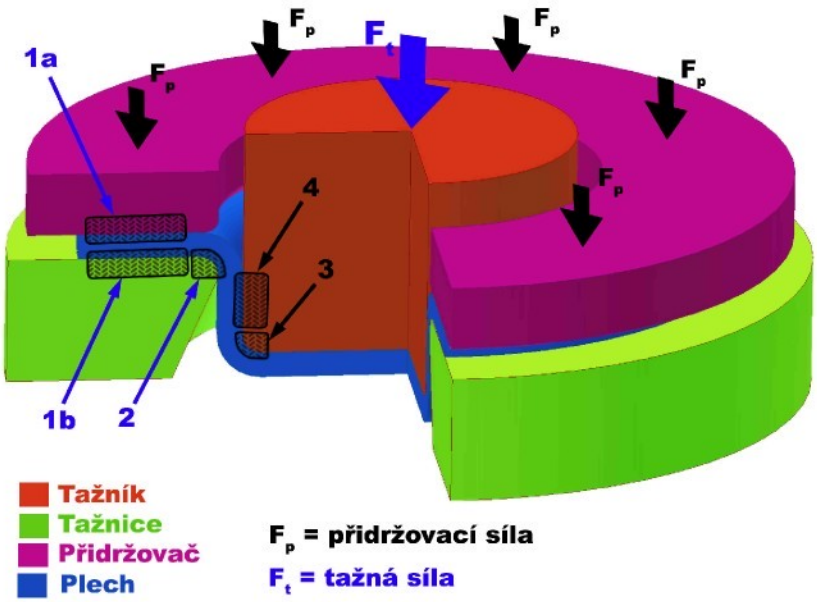
5.3 Zadírání v závislosti na kontaktu nástroje a povrchu materiálu

Tvářecí proces respektive kontakt nástroje s povrchovou vrstvou materiálu se podílí na kvalitě konečných výlisků. Jejich konečnou kvalitu ovlivňuje řada faktorů:

- tvářecí stroj
- geometrie tvářecího nástroje a geometrie plechu
- chování materiálu
- třecí poměry

Při hlubokém tažení je plech z oblasti přidržovače vtahován tažníkem přes zaoblení tažnice do nástroje. Oblast přidržovače je v případě tohoto tvářecího procesu hlavní zónou plastických deformací. Kromě velikosti přidržovací síly má dále v oblasti přidržovače vliv na tvářecí proces ještě materiál výlisku, morfologie povrchu nástroje a výlisku, viskozita maziva a s tím i související tribologické poměry tvářecího procesu.

Na obr.5.5. je schématicky znázorněn tažný nástroj a jeho tribologické poměry, kde síla přidržovače F_p působí kolmo k rovině plechu v oblasti příruby výlisku. Velikost přidržovací síly ovlivňuje tření v tribologickém systému ***1a*** a ***1b*** podle Coulombova zákona. V tribologickém systému ***2, 3*** a ***4*** působí kromě tření ještě tvářecí síla F_t přenášená tažníkem na rozhraní: nástroj – výlisek.



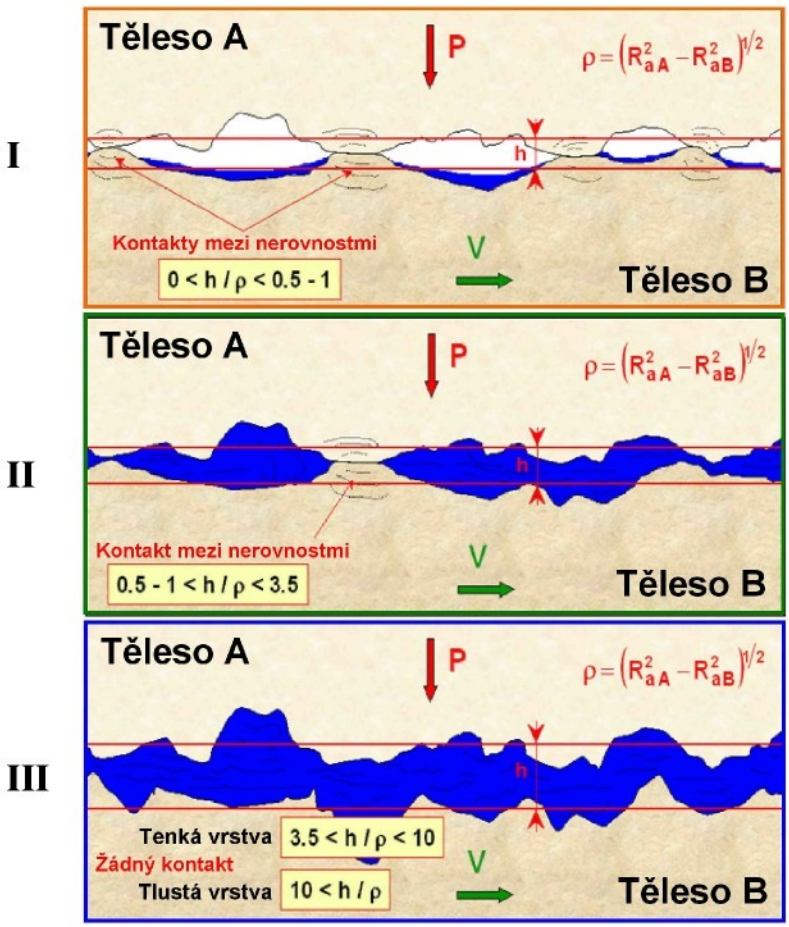
Obr.5.5.: *Schématické znázornění uspořádání tribologických poměrů v tažném nástroji*

U povrchových výlisků mohou vznikat při lisování problémy, s porušením soudržnosti olejového filmu a vzájemném působení plechu a nástroje za vysokých tlaků s výraznějším poškozením povrchu, což negativně ovlivňuje vzhled výlisků. Při zatížení se plocha styku zvětšuje, což může vést k adheznímu spojení těles – zadírání. K tomuto jevu dochází ojediněle i za přítomnosti maziva, jsou-li přítlačné síly příliš vysoké.

Ve většině případů u povrchových a viditelných vad se popsaný problém stává limitujícím při posuzování vhodnosti:

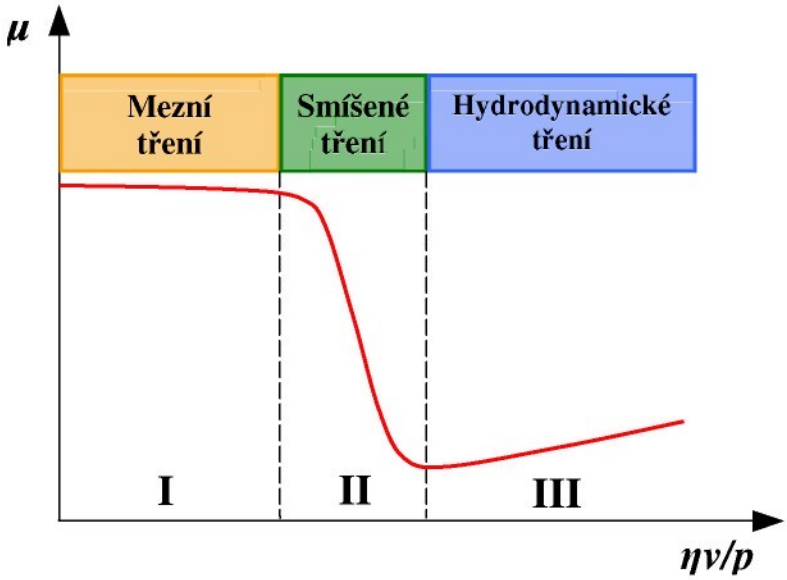
1) struktury povrchu
2) druhu substrátu
3) druhu použitého maziva
4) druhu materiálu na tažné nástroje

Při tažení je koeficient tření μ závislý na druhu maziva a jakosti třecích ploch, jak je to znázorněno na obr.5.6., kde jsou jednotlivé případy možných druhů tření vyskytujících se při tažení nepravidelných výlisků, jsou odvozeny v závislosti na mezní vrstvě maziva ***h*** mezi substrátem (***těleso A***) a nástrojem. (***těleso B***).Jednotlivé typy tření (**I** tření mezné , **II** tření smíšení a **III** tření hydrodynamické) jsou zaznamenány do tzv. Stribeckova diagramu viz obr.5.7., kde koeficient tření je závislý na relativní rychlosti třecích partnerů ***v,*** při použití maziva s určitou viskozitou η a při konstantním zatížení ***p.***



*(**I** tření mezné, **II** tření smíšené a **III** tření hydrodynamické)*

Obr.5.6.: *Jednotlivé typy tření vznikající při tažení karosářských výlisků* [58]



Obr.5.7.: *Stribeckův diagram tření působících při tažení* [58]

5.4 Projevy zadírání při tažení v praxi [59]

Zadírání plechu při hlubokém tažení souvisí s opotřebením třecích materiálů vstupujících do vzájemného kontaktu. Zadírání může být způsobeno opotřebeným nástrojem a zadírání také zvyšuje opotřebení.

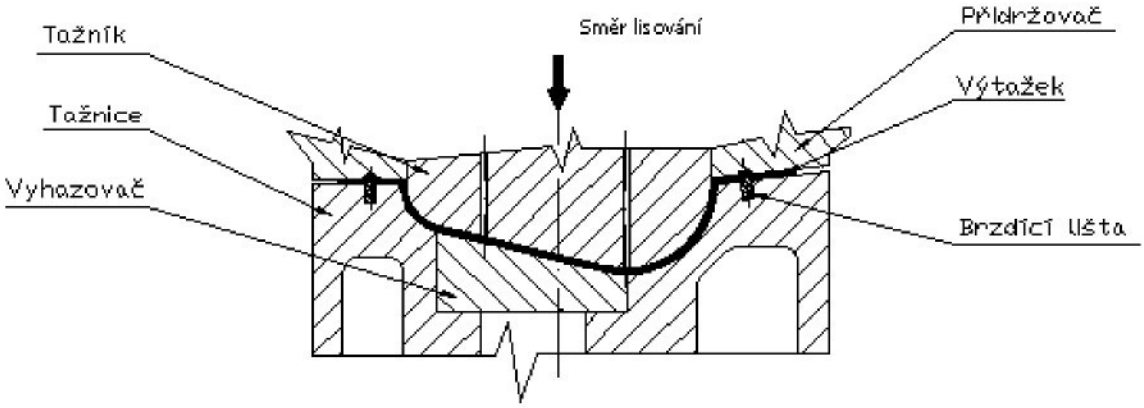
Opotřebení určuje užitečnou dobu použití lisovacího nástroje. Celkové opotřebení je ovlivněno především dobou výroby, počtem kusů a náročností tvářecí operace. Celkové opotřebení je způsobeno abrazí nebo adhezí, tj. zadíráním nebo obojím.

Velikost opotřebení na určité tažnici je úměrná celkovému součtu dráhy plechu na povrchu nástroje při daném tlaku mezi povrchem nástroje a plechu. Tenké, měkké nebo málo pevné plechy způsobují nejmenší opotřebení, silné, středně tvrdé nebo pevné plechy způsobují nejrychlejší opotřebení.

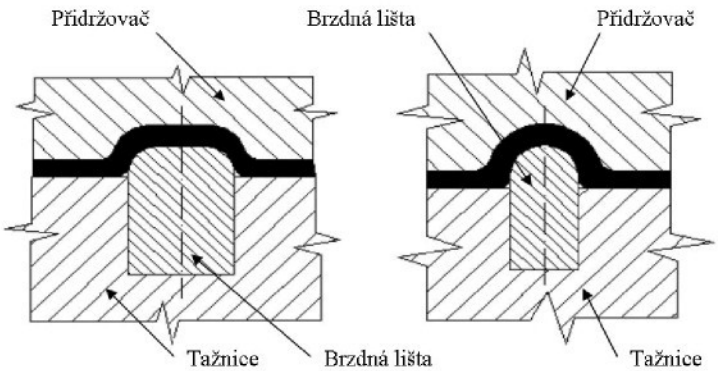
Rychlost opotřebení pro každou kombinaci materiálu výlisku a nástroje se může značně lišit podle charakteristiky povrchu, rychlosti tváření a mazání nástroje případně přimazávání výlisku. V případech, kdy se na výtažcích vytváří zvlnění, vznikají vysoké lokální tlaky působící na nástroj. V těchto místech se tloušťka materiálu zvětšuje a místo prostého tažení dochází k tažení se ztenčením stěny a prakticky vždy se objeví značné abrazivní opotřebení. Podle zkoušek [60] převyšuje tlak v místě přechodu tažného poloměru do válcové části tažnice podstatně tlak na ostatních částech tažné hrany. Zvýšení tlaku a následné vydírání tažnice nebo zadírání plechu, záleží více na velikosti vůle a tažném poloměru. Proti předpokladům se tlaky zvyšují u větších vůlí a u větších poloměrů tažné hrany. Je to způsobeno snadnějším tvořením vln.

Při hlubokém tažení tažník protlačuje plech tažnicí, tím se opotřebovává tažnice a plech současně obepíná tažník, s malým klouzáním po čele tažníku. Životnost tažníku bývá podstatně větší než tažnice, ale tam, kde se tažený výrobek těsně nabaluje na tažník objeví se opotřebení a někdy i zadírání tažníku.

Na obr.5.8. je schématické znázornění tažného nástroje s umístěním brzdících lišt zajišťujících vypínání přitažení a k tomu patřící konkrétní stavy napjatosti (viz obr.2.7.).

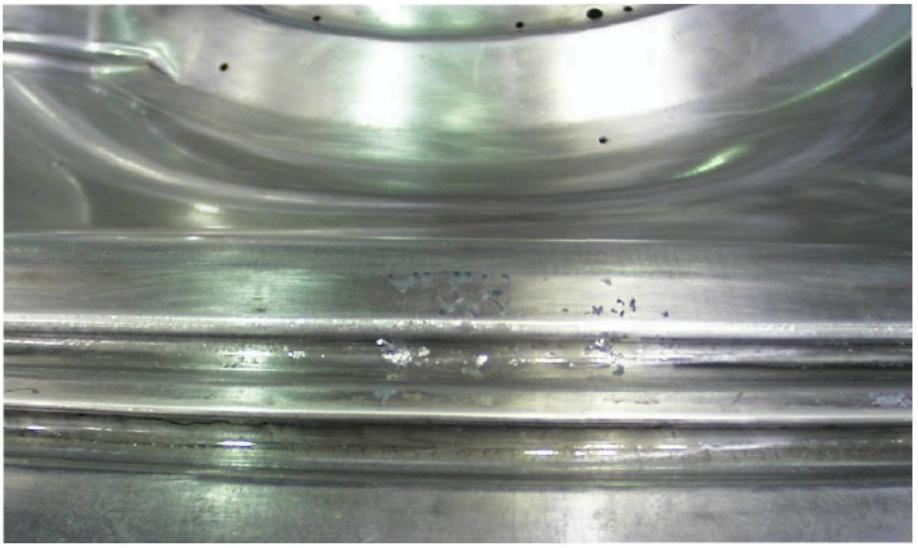


Obr.5.8.: *Schématické znázornění umístění brzdících lišt na tažném nástroji*

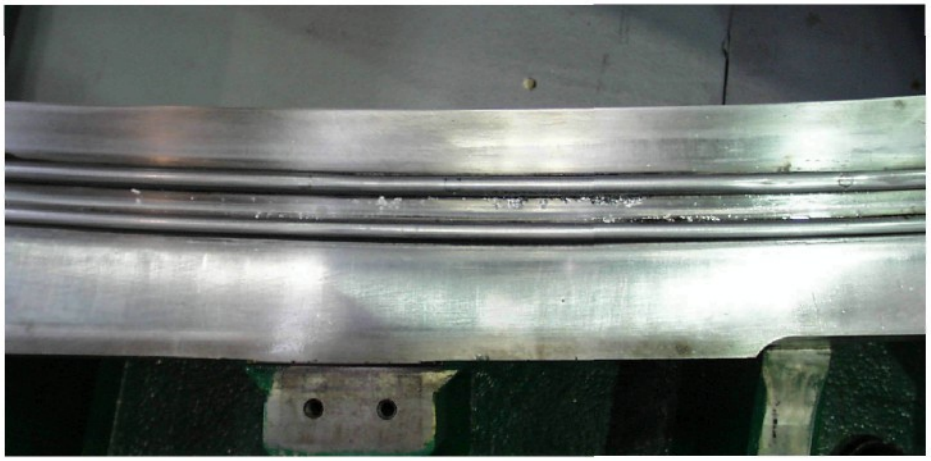


Obr.5.9.: *Základní typy brzdících lišt na tažném nástroji*

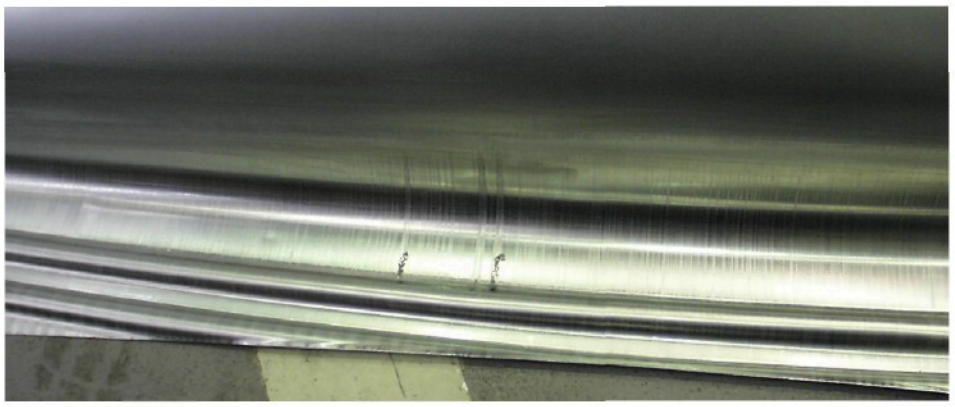
Na obr.5.9. je znázorněn detailní pohled na typy brzdících lišt používaných při tažení karosářských výlisků. Brzdné lišty s ohledem na jejich funkci použití při tažení jsou zdrojem zadírání plechů. Na obr. 5.10. a obr.5.11 jsou fotografie zadřených částí lisovací nástrojů (brzdící lišty) pro tažení karosářských výlisků. Na obr.5.12. a 5.13. jsou fotografie poškozených povrchů výlisků dílů karoserie automobilu. Detailní pohled poškozeného nástroje zadřením je znázorněn na obr. 5.14..



Obr.5.10.: *Brzdící lišty lisovacího nástroje poškozené zadřením při tažení*

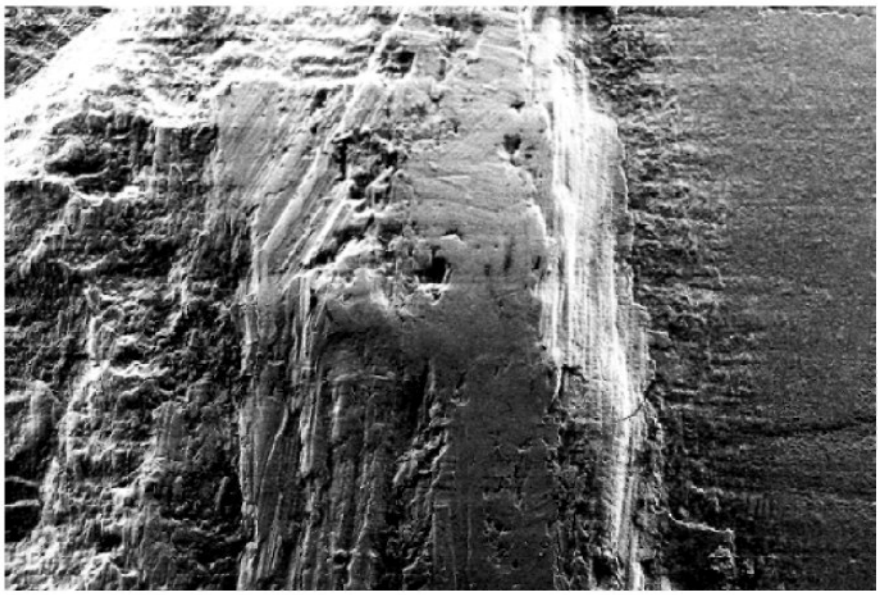


Obr.5.11.: *Brzdící lišty lisovacího nástroje poškozené zadřením při tažení*



Obr.5.12.: *Povrch výlisku poškozený zadřením při tažení*

Obr.5.13.: *Povrch výlisku poškozený zadřením při tažení*



Obr.5.14.: *Detail poškozeného povrchu nástroje zadřením* [61]

5.4.1 Používané materiály na výrobu výlisků a tažných nástrojů [19, 62]

Nemalý vliv na průběh tažení a konečnou kvalitu výlisku má i konstrukce nástroje, zejména výběr materiálu respektive kvalita jeho povrchu a tvar tažné hrany tažnice a tažníku. Z důvodu výskytu zadírání bylo nutné najít vhodné kombinace materiálů, kde dochází k zadírání v nejmenší míře. Na druhé straně je také nutné uvážit možnosti jednotlivých lisoven závodů zabývajících se tvářením plechů. Je zde nutné zohlednit ekonomické hledisko dle výrobního programu jednotlivých podniků a tím tedy sériovost výroby a velikost výrobků,

z toho plynou velikosti tvářecích nástrojů, což do značné míry ovlivní i volbu materiálu na jejich výrobu. Nejen výběr materiálu, ale i jeho konstrukce a výroba nástroje zde ovlivňují konečnou kvalitu výrobku a tím i konkurenceschopnost na mezinárodním trhu.

Správný konstrukční návrh a pečlivě vyrobený vlastní lisovací nástroj dle požadavků, ve spojení spolu se zaváděním moderních lisů do sériové výroby, představuje dnes nejúčinnější způsob zvyšování produktivity ve výrobě a lze konstatovat, že toto neplatí pouze v automobilovém průmyslu, ale i obecně v jiných odvětvích strojírenské výroby.

V následujícím stručném přehledu je charakteristika vybraných materiálů a jejich náchylnost k zadírání při použití v oblasti tváření materiálů, zejména pak tažení.

Hliníkové slitiny

Hliníkových slitin používaných ke tváření je celá řada s velmi rozdílnými vlastnostmi. V porovnání s ocelí jsou však všechny slitiny měkčí a opotřebení nástroje bývá menší. Lze používat i nástroje z podstatně méně tvrdých materiálů, než vyžaduje ocel. Aby nedocházelo k zadírání během pohybu Al plechu mezi tažnicí a přidržovačem, musí se použít mazadla. Důležitá je rovnoměrnost nanášení mazadla. Pro snížení tření a možnosti zadírání se někdy požaduje pochromování nástroje.

Berylium

Hustota Berylia je 1850kgm^{-3}, teplota tavení 1284°C, pevnost závisí na způsobu zpracování, lisováním lze docílit až 370MPa. Berylium se většinou vyrábí z prášku, slisovaného za tepla do bloku, který se pak následně válcuje na plech.

Tvařitelnost berylia je v porovnání s většinou ostatních kovů malá a výrobky se mají tvářet v oblastech 540°C až 815°C. Berylium se používá pro součásti kosmických lodí.

Pro úspěšné zpracování hlubokým tažením je třeba zabránit zadírání použitím mazadel. Při teplotách použitých při zpracování (600 až 675°C pro tvářený plech, 400°C až 500°C pro nástroj) by se konvenční mazadla aplikovaná přímo na plech a nástroj spálila a došlo by k zadírání mezi materiálem a nástrojem v oblasti vyšších tlaků např. na tažnici. Používají se tedy samomazné materiály pro výrobu tažnic, jako je slisovaný grafit (životnost je nízká). Lze také použít suspenzi grafitu na teplotně odolném papírovém nosiči. Další možností jsou emulze grafitu, hliníku a mědi, používají se pro snadnější uvolnění výtažku z tažníku a pro snížení zadírání.

Měď a slitiny mědi

Slitiny mědi jsou pro tažení vhodnější než oceli, činné části nástroje - tažnice je důležité leštit do vysokého lesku,tažníky se obvykle neleští, aby se udržela kontrola pohybu materiálu při tažení.

Existuje velké množství slitin mědi s velmi různými vlastnostmi. Jejich zpracování tvářením přináší různé problémy, ale otázky zadírání nejsou stěžejní.

Hořčík a slitiny hořčíku

Při tváření hořčíku a jeho slitin je důležité, aby povrch nástroje byl perfektně čistý bez cizích částic, které by se mohly vtlačit do povrchu součástí a snížit korozní odolnost.

Mazání je důležitější při tváření za tepla než za studena, protože pravděpodobnost zadírání roste se zvyšující se teplotou tváření. Tvařitelnost Mg slitin se zvyšuje při zvýšených teplotách. Snižuje se tím počet tahů, odstraňuje mezioperační žíhání, zkracuje se výrobní čas a snižuje spotřeba nástrojů. Teplota tavení čistého Mg je 650°C, pevnost slitin za studena je od 280 do 300MPa, při vyšších teplotách a delší době setrvání na teplotě se pevnost snižuje. Pro zpracování plechů z Mg slitin se rozmezí teplot pohybuje od 165°C do 400°C, čas pro tváření je pak od 1 hodiny do 3 minut. Tomu musí odpovídat mazání, zabraňující zadírání.

Pro teploty do 120°C lze použít oleje, tuhé tuky a vosky, mýdlové roztoky. Při teplotách nad 120°C lze použít vždy koloidní grafit, vzhledem k obtížnému odstraňování se použití raději posouvá až nad 230°C, v intervalu 120°C až 230°C lze využít mýdlová mazadla, nad 230°C je to molybden disulfid nebo koloidní grafit. Při horním rozmezí tvářecích teplot zabraňují zadírání tenké vrstvy skelné tkaniny.

Slitiny niklu

Slitiny na bázi niklu se vyznačují dobrou odolností proti atmosférické korozi. Oxidická vrstva, která by zabraňovala spojování difusí se snadno nevytvoří. Proto se lehce vytvářejí studené svary – zadírání – s materiály s podobným průměrem atomů. Jakmile se vytvoří studený svar, vysoká pevnost a tažnost těchto slitin zabraňuje jeho poškození. Z tohoto důvodu je součinitel tření mezi slitinami niklu a jinými kovy vysoký. Zahrnuje to většinu materiálů tažníků a tažnic.

Legování vysoce reaktivními prvky, které snadno vytvářejí oxidickou vrstvu, snižuje zadírání. Pro legování lze použít Cr a proto slitiny NiCr nebo FeNiCr se zadírají méně než samotný Ni nebo slitiny NiCu.

Vrstvy oxidu chrómu samy o sobě jsou však tenké a křehké a jejich ochrana je omezená, lehce se při deformaci podkladu poškozují. Zadírání lze zabránit použitím vysoce účinných mazadel. Přitom některá mazadla, obsahující aditiva S nebo Cl mohou poškodit Ni slitiny, pokud je nelze dokonale odstranit po tváření. Stejně tak pigmentované oleje nebo tuky mohou obsahovat Pb, Zn, které mohou zvýšit křehkost výrobku po tepelném zpracování. Bezpečně lze použít plnidla jako je křída. Pro tažení se doporučují pasty na bázi mýdla, oleje s mastnými estery, minerální oleje a vodní emulze pro lehčí tahy.

Vzhledem k možnému vzniku zadírání při vysokých tlacích by nástroje měly být konstruovány s dostatečnými poloměry a vůlí. Omezení použití je možnost tvoření vln při tažení. Velikost poloměrů a vůle bývá větší než pro nízkouhlíkovou ocel a je asi stejná jako pro nerezavějící ocel.

Titan a slitiny titanu

Slitiny titanu se vyrábějí v rozsáhlém sortimentu a mechanické vlastnosti a tím i jejich tvařitelnost se značně liší. Pevnost v tahu různých druhů komerčně čistého titanu se pohybuje od 240 do 550MPa, pevnost slitin od 480 do 1170MPa.

Zadírání titanových slitin je větší než u nerezavějících ocelí. Titanové slitiny se často tvářejí za tepla, kdy se zvyšuje tvařitelnost, zmenšuje odpružení a lze dosáhnout velkých deformací s minimálním mezioperačním žíháním. Většina tvářecích operací se dělá nad 540°C.

Zadírání je jeden z největších problémů při tváření za tepla. Mazadla mohou s titanem při zahřátí nevhodně reagovat. Úspěšně byl použit molybden disulfid v koloidním grafitu. Doporučuje se nitrid boru jako mazadlo, které si udržuje dobré mazací schopnosti i při vyšších teplotách, dobře se nanáší a odstraňuje. Při obtížném tažení se používají povlaky fosforečnanu zinečnatého pro udržení mazadla.

Při tažení za studena zabraňují zadírání mazadla obsahující grafit.

Nerezavějící oceli

Široký sortiment plechů z nerezavějících ocelí, s různorodými mechanickými vlastnostmi, má společné požadavky na kvalitu povrchu, vyžaduje větší tvářecí síly a dokonalejší mazání. Pro hluboké tažení se nejlépe osvědčují mazadla s pigmenty, vysoce viskózní oleje s Cl a emulze vody, oleje s přísadami S a Cl. Mažou se obě strany polotovaru pro každý tah. Jestliže se použije málo mazadla, mohou nástroje akumulovat příliš mnoho tepla během výroby a zadření může způsobit prasknutí výtažku. Příliš silná vrstva hustého mazadla způsobuje zvlnění stlačované části výtažku, příliš tenká vrstva způsobuje zadření.

Tažnice musí být z materiálů odolných proti zadírání, někdy se používá hliníkový bronz s velkou pevností. Důležité je zabránit vydrolování, které by mohlo poškrábat výtažky.

Jednou z možností jsou také tažné kroužky ze slinutých karbidů. Zvlášť u austenitických nerezavějících ocelí se při tažení může projevit zvětšování tloušťky stěny. Vůle v nástroji má být o 35 až 40% větší než je tloušťka plechu. Feritické oceli zesilují méně, vůle je 10 až 15%.

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DISERTAČNÍ PRÁCE

Jedním z hlavních cílů předkládané disertační práce je provést experimentální měření pomocí laboratorních zkoušek modelujících proces tažení na novém vysokorychlostním zařízení **SOKOL 400** pro hodnocení tribologických vlastností. Zejména výsledky získané z měření při použití vysokých rychlostí mají hlavní přínos práce, neboť díky těmto hodnotám získaným laboratorně, lze zmapovat doprovodné procesy, které se v průběhů tažení vyskytují. Experimentální výsledky napodobňující reálné podmínky během tažení karosářských výlisků budou vyhodnoceny s ohledem na zadané podmínky testování a zjišťován koeficient tření, který úzce souvisí se zadíráním při tažení zejména pozinkovaných plechů.

Disertační práce byla směrována do těchto základních cílů:

- naměřit hodnoty sil potřebných pro tažení pozinkovaných plechů pro zvolené rychlosti
- zjistit koeficient tření při tažení pozinkovaných plechů pro zvolené rychlosti
- posoudit vzájemný vztah vybraných technologických parametrů (rychlosti, tlaku) na vznik zadírání při tažení pozinkovaných plechů

Experimenty lze shrnout do následujících bodů:

1. Zjistit vliv jednotlivých parametrů na výskyt zadírání
- v závislosti na kontaktním tlaku
- v závislosti na rychlosti posuvu plechu a) pro malé rychlosti
  b) pro vysoké rychlosti
- vliv typu použitého mazadla a jeho nanášené množství

2. Pro testovaný substrát zjistit koeficient tření, pomocí laboratorního testu při určených technologických podmínkách, jenž byl stanoven jako kriterium zadírání

3. Popsat projevy zadírání testovaného substrátu s ohledem na koeficientu tření

Pro řešení experimentální části disertační práce bylo nutné zjistit a popsat tyto doplňující údaje:

- Zjistit materiálové charakteristiky testovaného substrátu a ověřit tak vhodnost materiálu pro hluboké tažení
- Popsat mikrogeometrii a morfologii povrchu testovaného substrátu a tažného nástroje, jako jedny z důležitých vstupních parametrů při zjišťování zadírání.

Řešení a diskuse dílčích výsledků k jednotlivým bodům disertační práce jsou uvedeny v následujících kapitolách.

6.1 Stávající zkušební zařízení

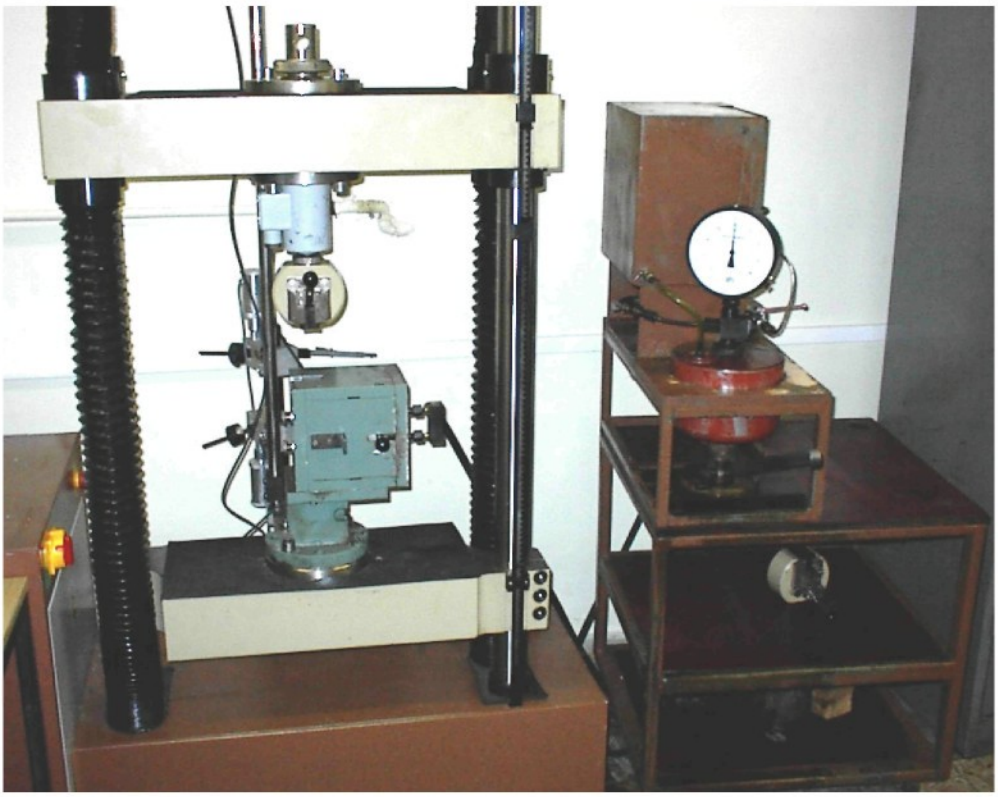
Zadírání při lisování ocelových plechů s povlaky na bázi zinku je obecně velmi složitá problematika, do které vstupuje velké množství faktorů (viz.kapitola 4.4.), jejichž celková komplexní analýza by přesáhla rámec disertační práce, proto pozornost při řešení problému zadírání v této práci bude tedy jen omezena na vybrané faktory a technologické podmínky. Získané výsledky by měly přispět k objasnění příčin vzniku zadírání při lisování tenkých plechů s ochrannou vrstvou zinku, používaných pro výrobu karosářských dílů v automobilovém průmyslu.

Vzhledem k tomu, že výsledky zkoušek jsou značně ovlivňovány podmínkami, při kterých se zkouška provádí (rychlost posuvu, kontaktní tlak, materiál a drsnost plochy nástroje, mazivo atd.), je žádoucí měření provádět za podmínek, které se co nejvíce blíží reálnému stavu při lisování. Jedním z největších problémů většiny laboratorně prováděných zkoušek je omezená rychlost posuvu materiálu při zkoušce. Z tohoto důvodu bylo v rámci řešení předkládané disertační práce na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci ve spolupráci se ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav a výrobci mazadel vyvinuto a sestrojeno nové, jednoúčelové, svého druhu unikátní zařízení pro tribologické zkoušky.

Stávající zkušební zařízení bylo z hlediska potřeb pro další výzkum tribologických parametrů nevyhovující, neboť vzhledem k časté změně jednotlivých technologických parametrů, bylo nutné zajistit jejich snadné nastavení na zkušebním přípravku. Z těchto důvodů, bylo nutno modernizovat doposud používaný zkušební přípravek pro zkoušky tribologie, který byl původně konstruován jako přídavné zařízení na zařízení pro statickou zkoušku tahem TIRAtest 2300 (viz.obr.6.1.). Funkčními částmi tohoto přípravku byly dvě čelisti silově ovládané hydraulickým válcem a tlak v systému byl vyvozován ruční hydraulickou pumpou (viz.obr.6.2.). Konstrukce přípravku neumožňovala změnu teploty čelistí přípravku. Používaná kontaktní plocha při měření byla omezena velikostí čelistí a s ohledem na manipulační prostor trhacího zařízení byly používány vzorky s kontaktní plochou 20mm x 76mm. V odborné literatuře zabývající se tribologickými zkouškami, je ale doporučována minimální kontaktní plocha 3000mm^2.

Modernizace stávajícího přípravku tak dospěla do stadia, kdy bylo nutné vyřešit nejen rychlou výměnu čelistí, automatizovat vyvození tlaku v hydraulickém systému a již zmíněné zvětšení kontaktní plochy čelistí, ale vyvstal zde i další problém a to temperace čelistí. Po zvážení všech aspektů bylo rozhodnuto, ustoupit od modernizace dosud používaného, ale už nevyhovujícího přípravku a jako efektivnější řešení se ukázalo, navrhnout a zkonstruovat zařízení zcela nové, jenž by splňovalo kritéria hodnocení tribologických vlastností plechů, dosahujících při reálných podmínkách tažení výlisků.

Obr.6.1.: *Původní zařízení pro tribologické zkoušky*



Obr.6.2.: *Detail původního zkušebního přípravku a ruční hydraulické pumpy*

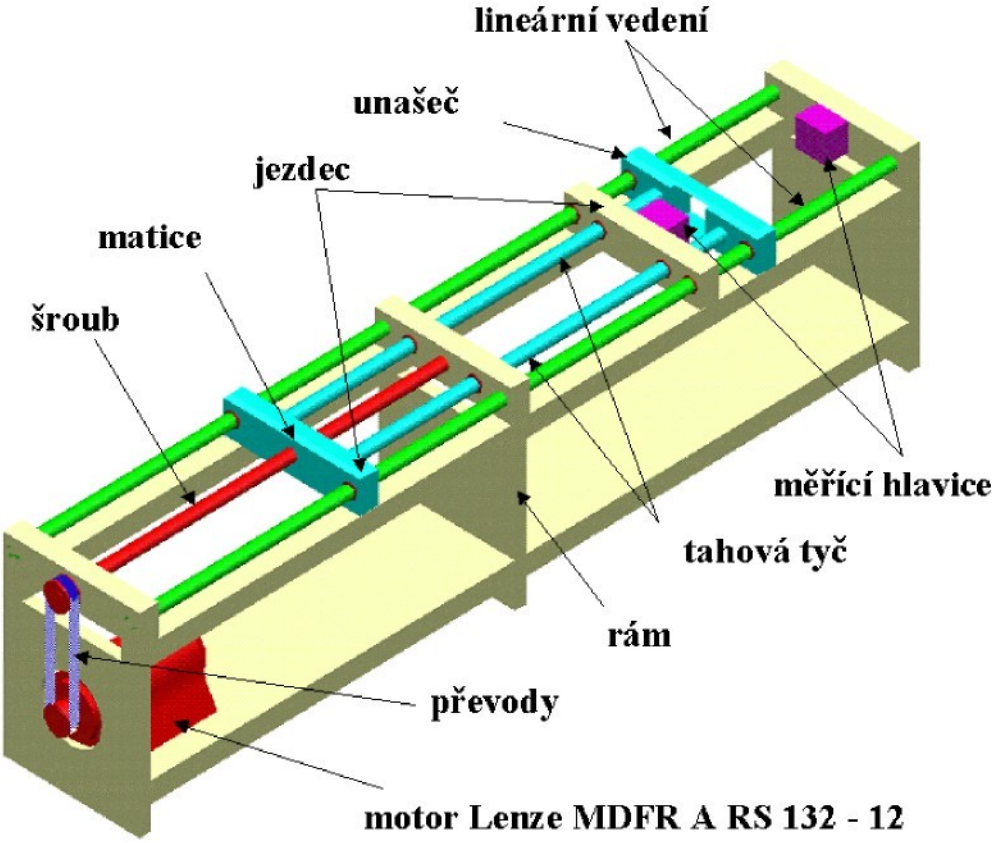
6.2 Nové tribologické zařízení SOKOL 400 [63]

6.2.1 Konstrukční návrh zařízení

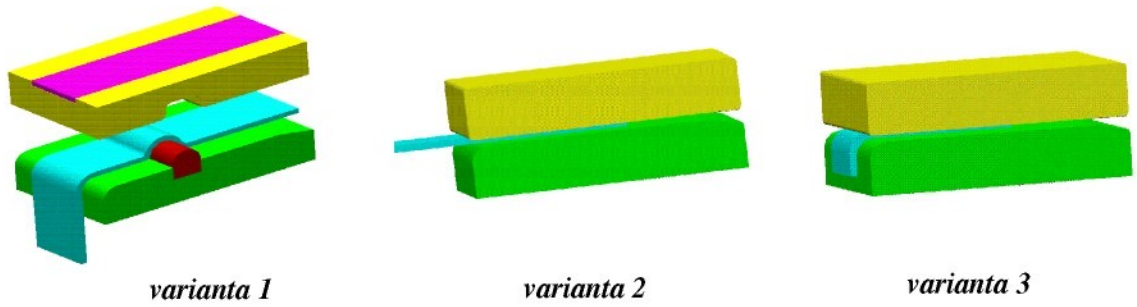
Konstrukční návrh nového vysokorychlostního zařízení byl vypracován pomocí software CATIA V5, používaném na katedře strojírenské technologie, Technické univerzity v Liberci.

Na obr.6.3. je načrtnut zjednodušený konstrukční návrh na stavbu nového zkušebního zařízení pro hodnocení tribologických vlastností za vysokých rychlostí.

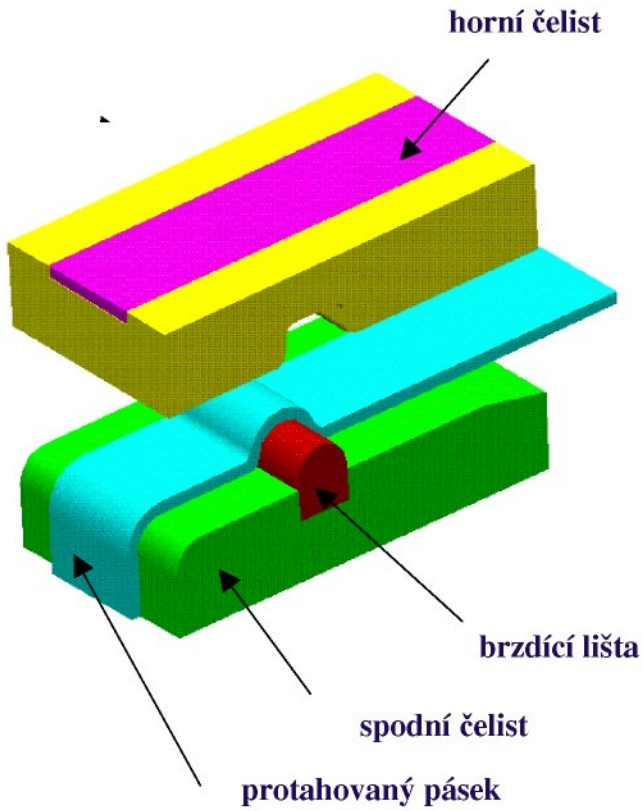
Na obr.6.4. jsou znázorněny jednotlivé návrhy konstrukcí čelistí zkušebního přípravku pro varianty modelování různých podmínek vyskytujících se během tažení výlisků nepravidelného tvaru. Varianta 1) tažení s použitím brzdné lišty, varianta 2) tažení v oblasti přidržovače, varianta 3) tažení v oblasti tažné hrany nástroje. Na obr.6.5. je detailní popis jednotlivých částí varianty 1) obr.6.4..



Obr.6.3.: *Konstrukční návrh nového zkušebního zařízení*



Obr.6.4.: *Navržené varianty konstrukce čelistí modelující podmínky tažení*



Obr.6.5.: *Čelisti zkušebního přípravku, detailní popis varianty 1 viz. obr.6.4.*

6.2.2 Technický popis zařízení

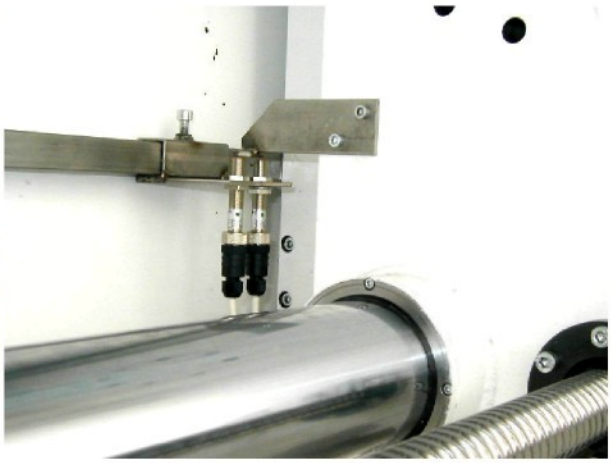
Na obr.6.6. je celkový pohled na zařízení, jehož základem je samonosný rám tvořený dvěma vodícími tyčemi a třemi pevnými deskami. Po vodících tyčích se pohybuje suport unášený párem pohybových kuličkových šroubů. Kroutící moment je přenášen na šrouby pomocí převodu s ozubeným řemenem (viz.obr.6.7.). Motor (viz.obr.6.8.) má snímání otáček pomocí resolveru, ten je připojen na frekvenční servoměnič, který po zapnutí a nalezení výchozí polohy kompletně kontroluje pohyb a polohování suportu.

Na stroji kromě snímače výchozí polohy suportu jsou dále i bezpečnostní snímače koncové polohy suportu (viz.obr.6.9.) a uzavření otevíratelného krytu. Nastavení snímačů výchozí polohy resp. otevření krytu způsobí přerušení pracovního cyklu a řízené zastavení suportu.

Obr.6.6.: *Celkový pohled na zařízení*

Obr.6.7.: *Ozubené převody zařízení*

Obr.6.8.: *Motor*



Obr.6.9.: *Koncové snímače polohy suportu*

Na obr. 6.10. je pohled na ovládací panel stroje, kde pomocí jednotlivých kláves se ovládá chod celého zařízení. Automatický cyklus se spouští pomocí klávesy **F1** na displeji. Pro zahájení automatického cyklu musí být suport ve výchozí poloze. Po odstartování cyklu provede suport pohyb podle nastavených parametrů (rychlosti posuvu, měřené délky pásku, frekvence snímání dat).

Při dosažení nastavené rychlosti začíná odměřovat navolenou dráhu a zároveň se nastaví příslušný výstup frekvenčního měniče jako signál pro zahájení měření.

Automatický cyklus se ukončí po dosažení příslušné dráhy a zastavení suportu.

Pro další měření je třeba provést návrat suportu zpět do výchozí polohy, pomocí klávesy **F5.**

Obr.6.10.: *Ovládací panel zařízení*

6.2.3 Technické parametry zařízení

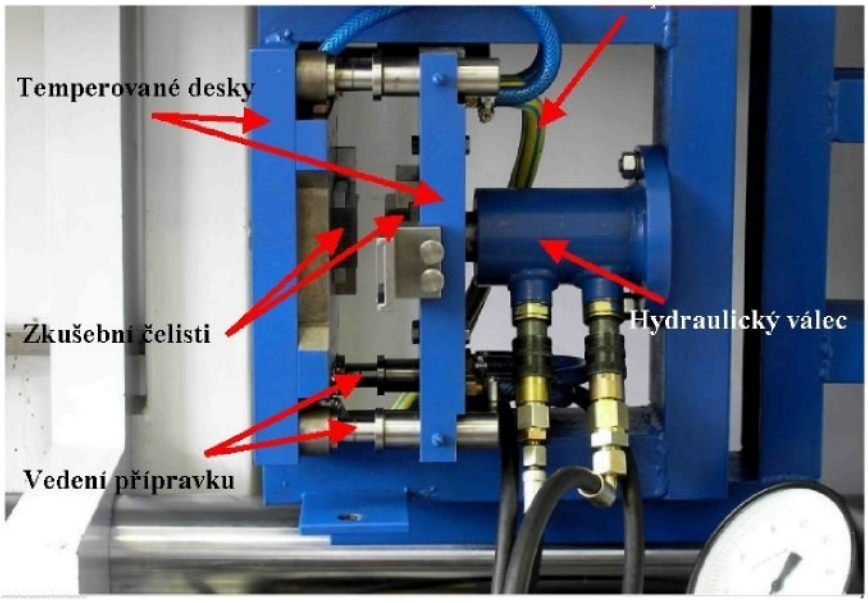
V tabulce 1 jsou uvedeny technické parametry zkonstruovaného nového tribologického vysokorychlostního zařízení.

Tabulka 1.: *Technické parametry nového tribologického zařízení*

Elektromotor asynchronní	5.5 kW 3x380 V / 50Hz externí chlazení	
Frekvenční měnič SERVO	11 kW 3x380 V - LENZE	
Maximální tahová síla suportu	20 000 N	
Rozsah nastavitelných posuvů	1 - 400mms^{-1}	
Snímání otáček	Resolver - LENZE	TS265.1N131E78
Komunikační panel HMI	LENZE	
Primární převod ozubeným řemenem	8MR-50	56/28 zb.
Pohybové šrouby BOSCH-REXROTH	Ø40, stoupání 20	2 ks
Maximální rychlost posuvu	400mms^{-1} při cca 85 Hz	
Délka pracovního posuvu	max. 1,2m	
Celková délka posuvu	1,5m (včetně rozjezdů a dojezdů)	

6.2.4 Technický popis zkušebního přípravku

Na vlastním zařízení je upevněn pomocí rámu zkušební přípravek (viz.obr.6.11.), ten je opatřen čtyř sloupkovým vedením pro zajištění dostatečné tuhosti přípravku a rovinnosti funkčních ploch čelistí. Detailní rozkreslení sestavy přípravku jednotlivých jeho funkčních částí včetně zkušebních čelistí je uvedeno v příloze P1).



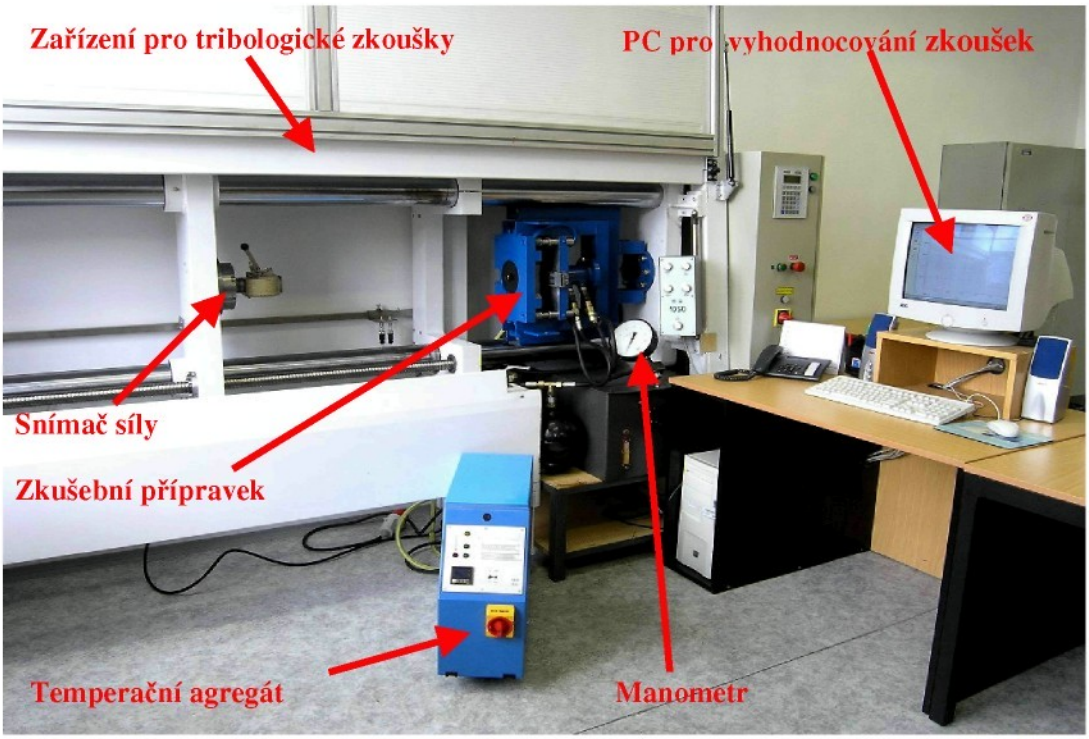
Obr.6.11.: *Zkušební přípravek nového zařízení*

Pomocí temperačních kanálů uvnitř opěrných desek přípravku je udržována teplota čelistí na požadované hodnotě. Požadovanou teplotu média s přesností ± 0,1°C zajišťuje výkonný temperanční agregát, kde je vzhledem k rozsahu používaných teplot používána jako teplonosná kapalina-voda. Čelisti přípravku jsou silově ovládané hydraulickým válcem připojeným na hydraulický agregát. Tlak v systému je vyvozován automaticky dle nastavené požadované hodnoty, čímž odpadlo tak pracné a zdlouhavé vyvození tlaku pomocí ruční pumpy, které bylo u původního zařízení. Kolísání tlaku v systému (způsobené pulsní činností agregátu) se zamezilo zařazením tlakového kompenzátoru spolu s dvoucestným ventilem do hydraulického obvodu. Tlakový kompenzátor udržuje konstantní tlak a dvoucestný ventil odděluje hydraulický obvod přípravku od agregátu. Touto kombinací se docílilo velmi přesného nastavení požadovaného kontaktního tlaku a udržení konstantní hodnoty v průběhu zkoušky. Kontaktní plocha čelistí byla s ohledem na zkoušky uznávané v automobilovém průmyslu zvýšena na hodnotu 3120 mm^2 (40 mm x 78 mm). Parametry, při kterých lze v současnosti provádět tribologickou zkoušku protahováním pásku jsou uvedeny v následující tabulce 2 v porovnání s parametry dosud používaného zařízení.

Tabulka 2.: *Porovnání technických parametrů nového zařízení a zařízení dosud používaného*

Zkušební technické parametry nového zařízení SOKOL 400	
Rychlost posuvu suportu	v = 1 až 400mms^{-1}
Kontaktní tlak čelistí	p = 0,5 až 35MPa
Kontaktní plocha čelistí	S = 40 x 78mm
Teplota čelistí	T = 15 až 95°C
Frekvence snímání dat	f = 10kHz
Zkušební technické parametry stávajícího zařízení	
Rychlost posuvu příčníku	v = 1 až 10mms^{-1}
Kontaktní tlak čelistí	p = 0,5 až 16MPa
Kontaktní plocha čelistí	S = 20 x 76mm
Teplota čelistí	**NE**
Frekvence snímání dat	f = 50Hz

Po modernizaci laboratoří katedry strojírenské technologie tak vzniklo moderní tribologické pracoviště znázorněné na obr.6.12. s unikátním měřícím vysokorychlostním zařízením **SOKOL 400** pro hodnocení triblogických vlastností materiálů, morfologie povrchu plechu, konzervačních a technologických mazadel za laboratorních podmínek.



Obr.6.12.: *Uspořádání tribologického pracoviště se zkušebním zařízením* ***SOKOL 400***

6.3 Volba materiálu pro experimentální měření

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.5. existují různé způsoby texturování povrchu pracovního válce a s tím související různé textury povrchu vyrobeného plechu. S ohledem na požadavky automobilového průmyslu se dnes v tomto odvětví převážně používají pro výrobu karoserie pozinkované materiály s morfologií povrchu EDT, EBT a PRETEX. Materiály s morfologií povrchu plechu označované jako SBT se vzhledem k horší kvalitě laku používají pro pohledové části karoserie v omezené míře. Metoda texturování pracovního válce pomocí laseru (LT - Laser Texturing) nenašla pro svojí náročnost širšího uplatnění a plechy vyrobené těmito válci se prakticky dnes již nepoužívají.

Na základě dlouhodobých zkušeností získaných testováním materiálů s různým typem morfologie a dle doporučení z výsledků disertační práce [64], řešené na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci byl vybrán materiál s typem morfologie, který se osvědčil při lisování karosářských výlisků, jak pro dobrou lisovatelnost, tak i kvalitu laku při následném lakování dílů karosérie.

Pro plánované experimenty byl zvolen hlubokotažný ocelový plech, opatřený protikorozní ochranou vrstvou na bázi zinku, zhotovenou žárovým zinkováním (viz. kapitola 3.3.1.2.). Morfologie povrchu plechu byla vyrobena metodou EBT (viz. kapitola 3.5.2.4.) se specielním typem deterministické struktury tzv."SIBETEX". Tento materiál se v současné době používá pro výrobu pátých dveří Škoda Fabia Combi., limuzína ŠKODA Octavia

Charakteristika plechu vybraného pro experiment:

- St 06 Z 100 MBO (označení dle VW 501 11)
- DX 54 D+Z100 MBO (označení dle EN 10 142)
- výrobce SIDMAR Arcelor Group Belgie
- morfologie povrchu EBT - SIBETEX
- jmenovitá tloušťka 1,00 mm (tolerance rozměrů dle EN 10 143)
- skutečná tloušťka 1,02 mm

Hodnocení mechanických vlastností a kvality povrchu testovaného plechu je uvedeno v následujících kapitolách.

6.4 Charakteristika materiálu použitého pro experiment

6.4.1 Mechanické vlastnosti testovaného materiálu

6.4.1.1 Statická zkouška tahem [65]

Základní materiálové charakteristiky testovaných materiálů byly stanoveny zkouškou tahem. Zkušební tyče byly odebrány ve směrech 0°, 45°, 90° vůči směru válcování. Pro testované materiály jsou hodnoty materiálových charakteristik vždy stanoveny ze souboru 8 vzorků. Tvar a rozměry zkušebních tyčí, rovněž metodika provedení zkoušky je v souladu s uvedenou normou EN 10002-1.

Zkouška tahem byla provedena na stroji TIRAtest 2300 s použitím vyhodnocení naměřených dat pomocí software Labtest 4.01, který vyhodnocuje všechny základní mechanické hodnoty testovaného materiálu (Rp0,2, Rm, A80, Ag). Součinitel normálové anizotropie ***r*** byl stanoven v souladu s EN 10130:1991 při hodnotě deformace ε = 20%. Stanovení exponentu deformačního zpevnění ***n*** a míry přetvárné pevnosti ***C*** bylo provedeno dle:

- EN 10130:1991 v intervalu deformací ε = 10% až 20%
- ČSN 420436 v intervalu deformací ε = 5% až Ag.

Hodnoty materiálových charakteristik zjištěné výše popsaným způsobem byly pro testovaný materiál zpracovány do tabulek 3 a 4, kde jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru **s**. V tabulkách je dále pro jednotlivé charakteristiky uvedena i hodnota směrově střední daná vztahem (71),

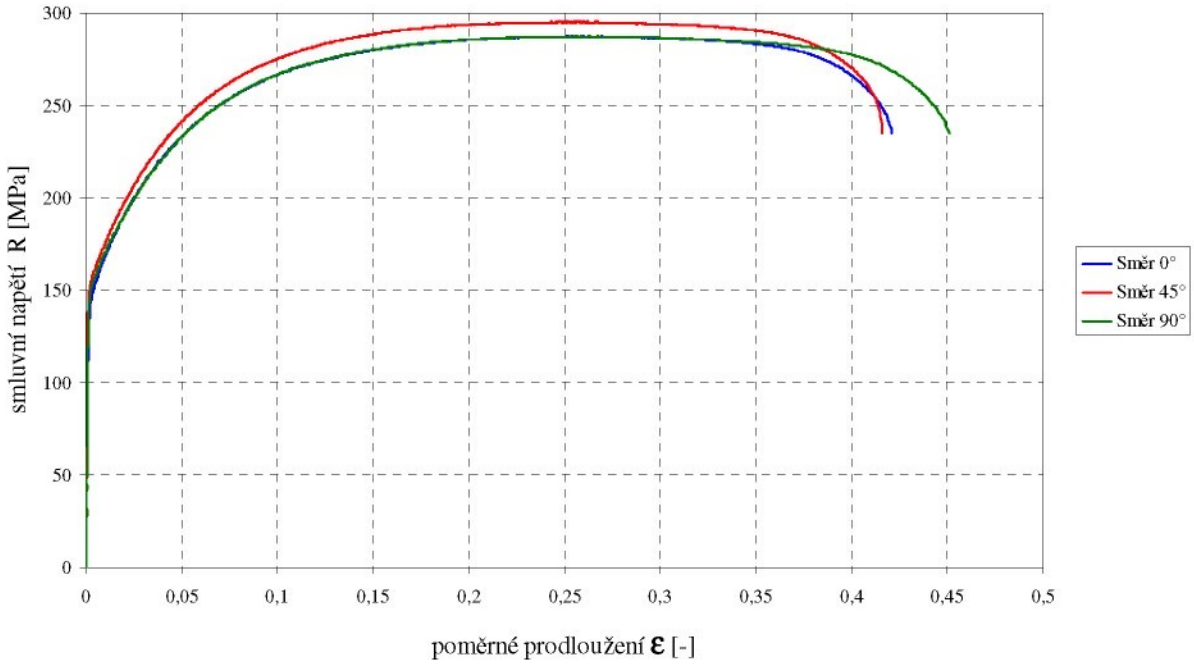
$$x_s = \frac{(x_0 + 2x_{45} + x_{90})}{4} \qquad (71)$$

Tabulka 3.: *Tabulka mechanických hodnot materiálu*

směr	Rp0,2 [MPa]	s	Rm [MPa]	s	A80 [%]	s	Ag [%]	s	r [-]	s
0°	150,19	1,01	287,94	1,10	42,11	1,21	25,48	0,78	1,9440	0,01173
45°	157,12	0,72	295,45	0,39	41,61	0,66	24,70	0,55	1,7301	0,01015
90°	153,98	0,81	287,29	0,27	45,11	0,54	25,41	0,63	2,4099	0,02625
x_s	154,6		291,53		42,61		25,07		1,9535	

Na obr.6.13. jsou znázorněny jednotlivé průběhy diagramů testovaného substrátu ze statické zkoušky tahem zjišťované v zhledem ke směru válcování v 0°, 45° ,90°. Protokoly ze statické zkoušky tahem jsou uvedeny v příloze P2. Veškeré soubory související s výpočtem materiálových charakteristik jsou uloženy na přiloženém CD.

Ilustrační foto zkušebního zařízení TIRAtest 2300 s příslušenstvím pro statickou zkoušku tahem, na kterém byly testy provedeny je uvedeno v příloze P3.



Obr.6.13.: *Diagramy statické zkoušky tahem testovaného materiálu v jednotlivých směrech*

Tabulka 4.: *Exponenty deformačního zpevnění **n** a míry přetvárné pevnosti **C** materiálu*

směr	dle EN 10130:1991		dle ČSN 420436	
	n [-]	C [MPa]	n [-]	C [MPa]
	s	s	s	s
0°	0,2373	514,79	0,2464	523,03
	0,00567	3,463	0,00474	2,647
45°	0,2308	523,38	0,2414	533,33
	0,00069	0,665	0,00104	0,689
90°	0,2348	511,99	0,2450	521,2
	0,00173	1,756	0,00229	2,29
x_s	0,2334	518,39	0,2436	527,72

6.4.2 Morfologie povrchu testovaného substrátu

6.4.2.1 Drsnost povrchu [29]

Drsnost povrchu testovaných materiálů byla měřena ve spolupráci s laboratoří přesného měření ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav. Měření bylo provedeno na přístroji HOMMEL TESTER T6000, který je vidět na obr. 6.14..

Měřící podmínky nastavené pro měření povrchu materiálů jsou v tabulce 5 a vycházejí z DIN EN ISO 4288:1998 a DIN EN ISO 3274:1998.

Obr. 6.14.: *Drsnoměr HOMMEL TESTER T6000*

Tabulka 5.: *Podmínky měření drsnosti*

Mezní vlnová délka λc (lc) [mm]	2,5
Základní délka lr [mm]	2,5
Délka měřeného úseku lt [mm]	15,0
Rychlost posuvu vt [mms^{-1}]	0,5
Měřící rozsah [μm] ± 10nm	80

Drsnost byla zjišťována pro obě strany plechu (A, B) ve směru válcování (označeno v tabulkách podélně 0°) a kolmo na směr válcování (označeno v tabulkách příčně 90°). Měření bylo provedeno vždy v deseti náhodně vybraných místech. V tabulkách 6A a 6B jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a výběrové směrodatné odchylky ***s*** parametrů drsnosti pro testovaný materiál.

Drsnost povrchu byla posuzována dle níže uvedených základních normalizovaných parametrů drsnosti (viz. kapitola 3.4.2.1.):

- Pt-hloubka profilu,
- Wt-hloubka vln,
- Rt-nejvyšší hloubka drsnosti,
- Rz-maximální výška profilu,
- Ra-střední aritmetická hodnota drsnosti,
- RPc-počet výstupků.

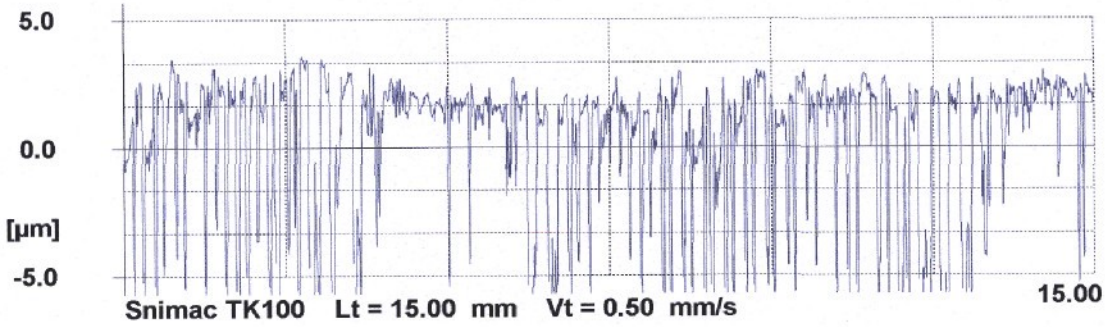
Na obr.6.15. až 6.18. jsou znázorněny profily jednotlivých stran substrátu A a B měřených vzhledem ke směru válcování (podélně 0°, příčně 90°)

Tabulka 6A.: *Naměřené hodnoty drsnosti strany **A** testovaného materiálu **EBT -SIBETEX***

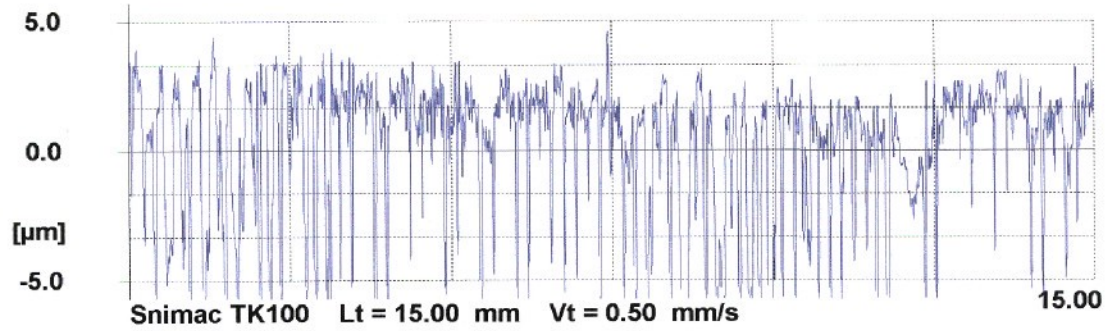
Veličiny měřené k směru válcování	**podélně** **0°**	s	**příčně** **90°**	s
hloubka profilu Pt [μm]	15,05	0,051	15,63	0,058
hloubka vln Wt [μm]	3,63	0,032	3,31	0,020
nejvyšší hloubka drsnosti Rt [μm]	14,25	0,046	16,46	0,056
maximální výška profilu Rz [μm]	12,38	0,038	13,83	0,045
střední aritmetická hodnota drsnosti Ra [μm]	2,46	0,027	2,15	0,016
počet výstupků RPc [cm^{-1}]	68	1,55	80	1,87
základní hloubka Rk [μm]	2,92	0,036	3,19	0,047
redukovaná výška špiček Rpk [μm]	0,67	0,0043	1,04	0,072
Rpk^* [μm]	0,93	0,0081	2,03	0,015
redukovaná hloubka rýh Rvk [μm]	8,59	0,081	7,39	0,065
Rvk^* [μm]	10,26	0,046	10,60	0,058
Podíl materiálu nad profilem jádra Mr1 [%]	8,2	0,025	8,2	0,024
Podíl materiálu pod profilem drsnosti Mr2 [%]	70,0	1,21	74,2	1,46

Tabulka 6B.: *Naměřené hodnoty drsnosti strany **B** testovaného materiálu **EBT -SIBETEX***

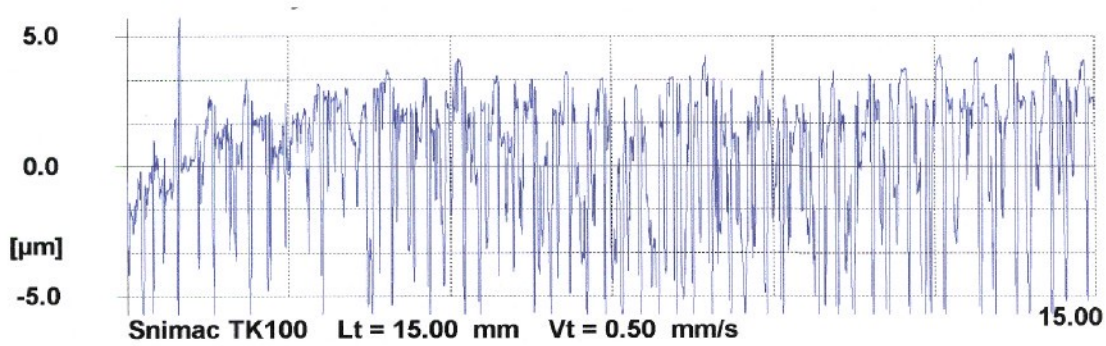
Veličiny měřené k směru válcování	**podélně** **0°**	s	**příčně** **90°**	s
hloubka profilu Pt [μm]	22,29	0,075	20,42	0,080
hloubka vln Wt [μm]	2,14	0,022	5,63	0,058
nejvyšší hloubka drsnosti Rt [μm]	17,49	0,062	19,90	0,096
maximální výška profilu Rz [μm]	14,39	0,045	13,51	0,026
střední aritmetická hodnota drsnosti Ra [μm]	2,42	0,023	2,23	0,019
počet výstupků RPc [cm^{-1}]	84	1,87	112	2,32
základní hloubka Rk [μm]	4,47	0,051	5,09	0,055
redukovaná výška špiček Rpk [μm]	0,82	0,0053	1,78	0,058
Rpk^* [μm]	1,36	0,084	4,22	0,098
redukovaná hloubka rýh Rvk [μm]	6,01	0,069	5,57	0,042
Rvk^* [μm]	11,81	0,086	9,94	0,051
Podíl materiálu nad profilem jádra Mr1 [%]	7,7	0,021	7,3	0,036
Podíl materiálu pod profilem drsnosti Mr2 [%]	71,6	1,35	78,1	1,75



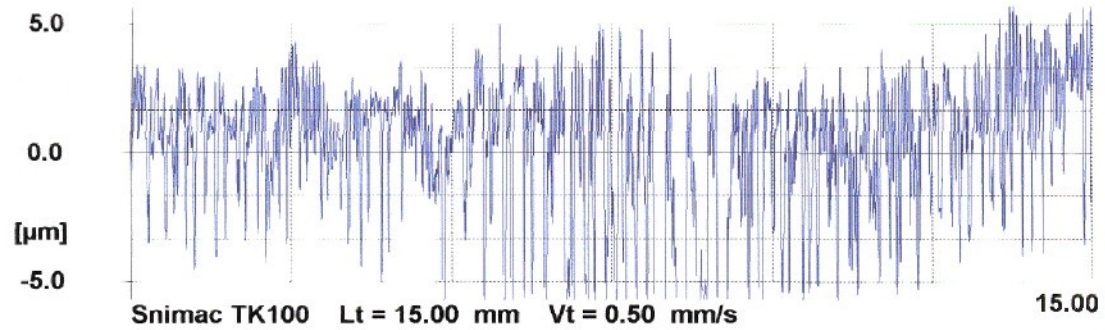
*Obr.6.15.: Měřený profil strany **A** ve směru **0º (podélně)***



*Obr.6.16.: Měřený profil strany **A** ve směru **90º (příčně)***



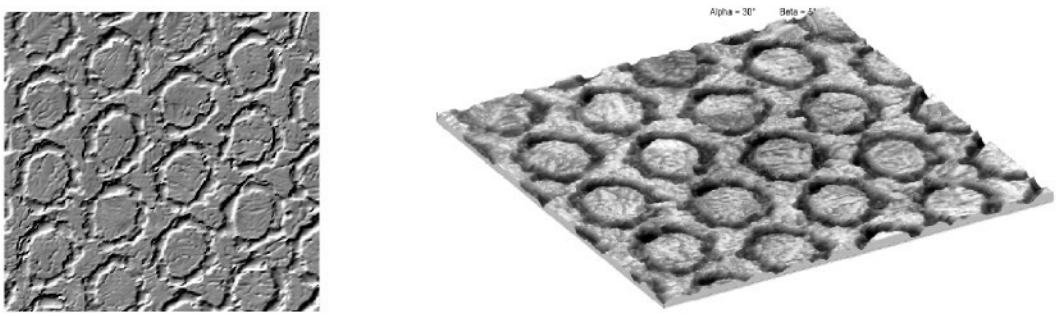
*Obr.6.17.: Měřený profil strany **B** ve směru **0º (podélně)***



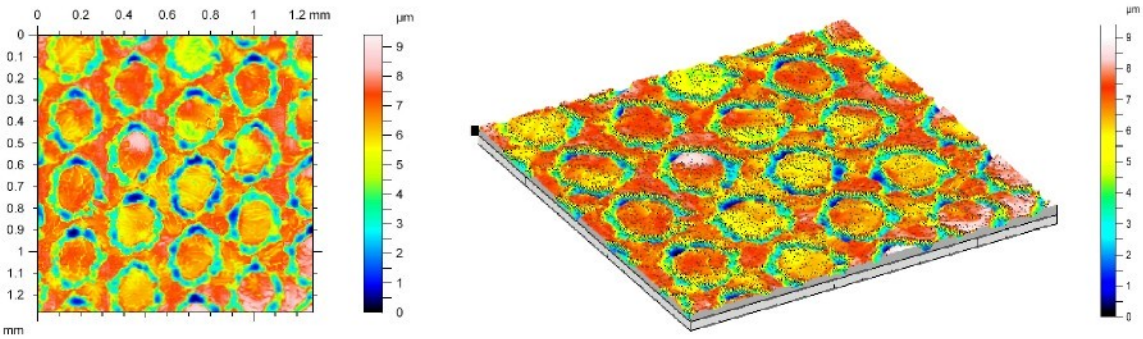
*Obr.6.18.: Měřený profil strany **B** ve směru **90º (příčně)***

6.4.2.2 Snímky povrchu substrátu EBT-SIBETEX

Pro hodnocení povrchu plechů z hlediska jejich tribologických vlastností je důležité znát charakter a typ povrchové textury zkoumaných materiálů. Vedle 2D hodnocení pomocí mikrogeometrie povrchu (drsnost povrchu), které je z obecného hlediska snadno měřitelné, je třeba si uvědomit, že tento 2D popis povrchu plechu má ke skutečným makrogeometrickým poměrům při lisování poměrně daleko a pro hodnocení tribologických vlastností z hlediska dalšího zkoumání vlivu tření spojeného se zadíráním je tedy nedostačující. Z tohoto důvodu byly pořízeny topografické mapy povrchu včetně jeho morfologie ve 2D i 3D, jak je znázorněno na obr.6.19. a 6.20.. Tyto snímky, byly za účelem získání co nejpodrobnějších informací o testovaném substrátu v rámci řešení této práce, naměřeny a vyhodnoceny v automobilovém výzkumném centru ARSA firmy Arcelor Group ve Francii.



Obr.6.19.: *Povrch substrátu a jeho morfologie typu EBT „SIBETEX“ ve 2D a 3D*



Obr.6.20.: *Topografie povrchu substrátu s morfologií typu EBT „SIBETEX“ ve 2D a 3D*

6.4.2.3 Výroba morfologie povrchu EBT -SIBETEX

Metoda výroby této morfologie byla podrobně popsána v teoretické časti práci (kapitola 3.5.2.4.).

7 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ KOEFICIENTU TŘENÍ S OHLEDEM NA VZNIK ZADÍRÁNÍ

Cílem této části disertační práce bylo stanovit pro testované materiály závislost koeficientu tření μ na velikosti kontaktního tlaku p při dané rychlosti posuvu v zkoumaného materiálu, daném typu a množství nanášeného maziva. Na základě experimentálních výsledků měření zjistit vliv těchto technologických parametrů na vznik a výskyt zadírání při tažení ocelových plechů s povlaky na bázi zinku.

7.1 Hodnocení tribologických vlastností za vysokých rychlostí

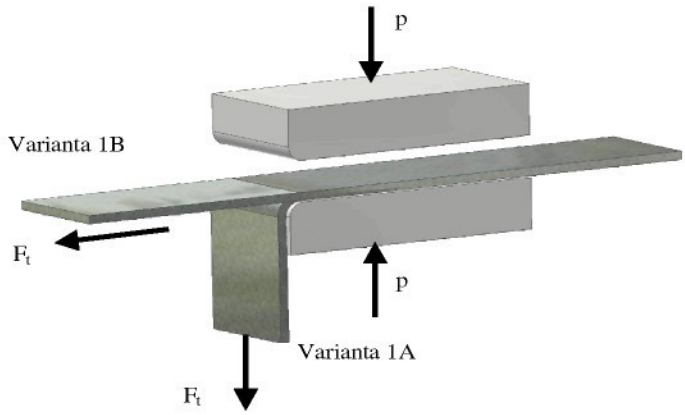
Pro vyhodnocení zkoušky protahováním pásku byla volena metodika, která je podrobně popsaná v [66] a používaná na katedře strojírenské technologie TU v Liberci. Tato metodika byla navržena původně pro test při malých rychlostech (1 až 10mms^{-1}) a v rámci této práce bude rozšířena o poznatky při zjišťování tribologických vlastností za vyšších rychlostí (až do hodnot 400mms^{-1}).

K dalším problémům, který je v odborné veřejnosti v souvislosti s tímto použitým testem protahováním pásku často diskutován je, počet opakování měření, velikost měřené délky a tím související i doba testu. V zahraničí (např. na univerzitě Mannheim) je používána měřená délka protahování 500÷1000mm a počet opakování je zpravidla velmi malý. Mnohdy se protahuje pouze jeden vzorek s následným čištěním zkušebních čelistí na jejichž povrchu dochází k ulpívání zinku spolu se znečistěným mazadlem. Podmínky testu jsou v tomto případě přesně definovány, ale neodpovídají reálnému stavu při lisování, kdy zadírání zinkové vrstvy má zásadní vliv na další průběh lisování a na kvalitu zhotovovaného dílu. Vzhledem k tomu, že posuv materiálu (okraje příruby) při tvářecích operacích je ve většině případů menší než 100 mm, je vhodnější tribologickou zkoušku protahováním pásku provádět na větším počtu bezprostředně po sobě následujících vzorků. Měřená délka vzorku respektive dráha je stanovena v závislosti na rychlosti protahování vzorku. Pro vysoké rychlosti je krátká dráha nepostačující, jelikož na krátké dráze se nestačí neprojevit všechny faktory, které mohou ovlivnit výsledky testu, s ohledem na tyto skutečnosti byly rozměry vzorků pro experimentální měření rozlišeny dle rychlostí, které byly pro měření zvoleny.

Při porovnání tribologických vlastností různých kombinací mazadel, testovaných materiálů a technologických podmínek je také velmi důležité zohlednit velikost síly, které je třeba pro uvedení materiálu do pohybu (přechod mezi třením za klidu a za pohybu). Tato charakteristika je zvlášť důležitá při použití vyšších rychlostí posuvu materiálu, kdy tato síla je maximální silou, které bylo při zkoušce dosaženo.

7.2 Metodika měření

Návrh a konstrukce zařízení včetně zkušebního přípravku vychází z metod měření popsaných v kapitolách 4.4.1 a 4.4.4. Funkčními částmi zařízení jsou dvě výměnné čelisti z materiálu používaného na výrobu nástrojů pro tažení výlisků karosářského typu. Jedna čelist je pevná a druhou lze ovládat pomocí hydraulického systému, který umožňuje vyvození požadovaného kontaktního tlaku při vlastním tribologickém testu. Zkoumaný materiál (pásek plechu) o šířce 40 mm je protahován konstantní rychlostí mezi čelistmi zkušebního přípravku. Velikost kontaktní plochy je dána šířkou pásku (40mm) a délkou funkční části čelistí (78 mm). Rychlost posuvu ***v*** lze měnit v rozsahu v=1 až 400mms^{-1}. Protahovaná délka pásku se mění s ohledem na rychlost protahovaného vzorku a měřená vzdálenost odpovídá kriteriím ŠKODA AUTO a.s. Konstrukce přípravku umožňuje modelovat podmínky v oblasti tažné hrany tažnice (varianta 1A) a v oblasti přidržovače (varianta1B). Funkční část zkušebního přípravku a princip zkoušky je patrný z obr.7.1..



Obr.7.1.: *Funkční část zkušebního přípravku a princip zkoušky*

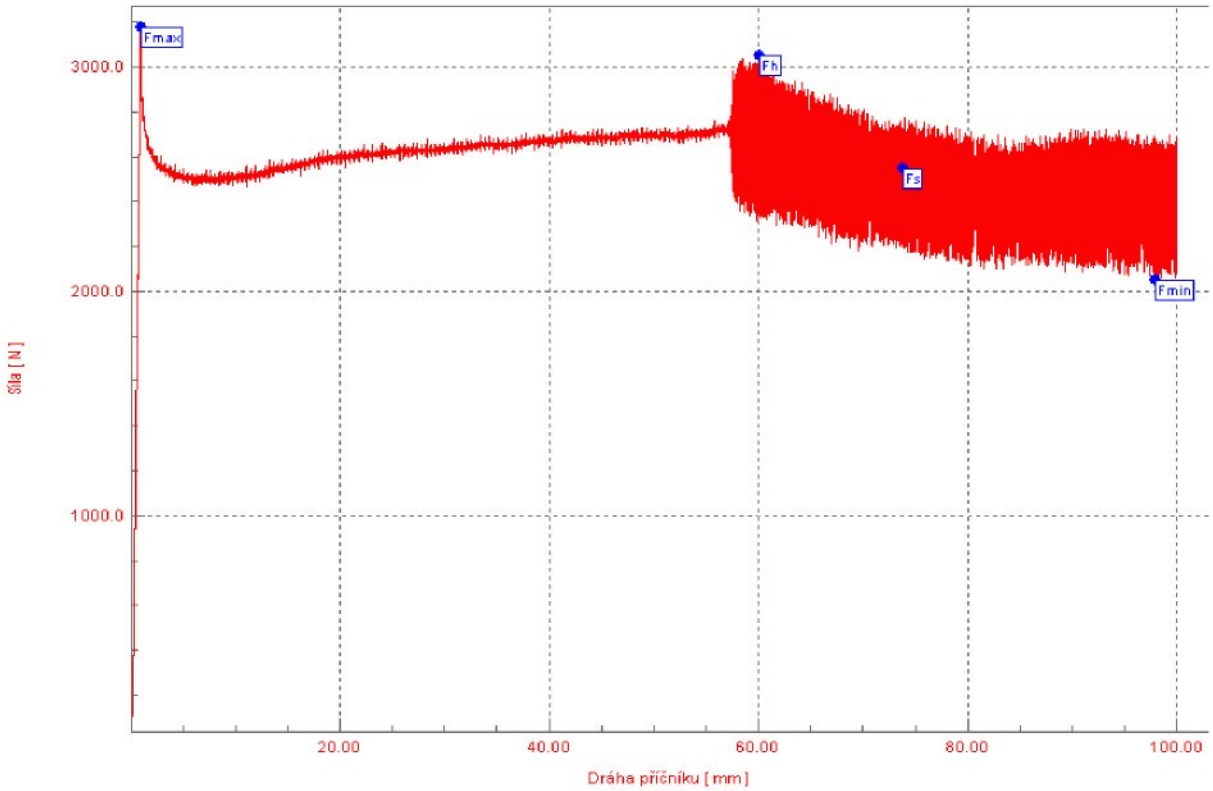
Výsledkem měření je diagram závislosti **síla – posuv**, který slouží jako podklad pro vyhodnocení tribologických vlastností soustavy testované mazivo-testovaný substrát-nástroj. Zjištěná síla potřebná na protažení vzorku je základem pro výpočet koeficientu tření při tažení.

Při hodnocení vlastností testovaného materiálu, mazadla a pro výpočet koeficientu tření jsou zohledňovány následující charakteristiky (viz.obr.7.2.):

- $\mathbf{F_{max}}$ – maximální velikost síly, které bylo dosaženo při zkoušce,
- $\mathbf{F_h}$ – maximální velikost síly, které bylo dosaženo v ustálená části diagramu (po protažení 30mm pásku),
- $\mathbf{F_{min}}$ – minimální velikost síly, které bylo dosaženo v ustálená části diagramu (po protažení 30mm pásku),
- $\mathbf{F_s}$ – střední velikost síly v ustálené oblasti měření,
- $\mathbf{\Delta F}$ – velikost rozkmitu síly v ustálené oblasti měření

$$\Delta F = F_h - F_{min} \tag{72}$$

Rozkmit síly ΔF, jenž je vypočítán dle vztahu (72) má svou opodstatněnou důležitost zejména pro případy, kdy dochází k zadírání Zn povlaků, jak je znázorněno na obr.7.2.. V prezentovaném pracovním diagramu, průběhu síly v závislosti na měřené dráze, získaném zkouškou protahováním pásku, za konkrétních podmínek při rychlosti posuvu v=1mms^{-1} a kontaktním tlaku v čelistech p=4MPa jsou zaznamenány všechny měřené veličiny v průběhu tribologického testu.



Obr.7.2.: *Pracovní diagram zkoušky při v=1mms^{-1}, p=4MPa*

Metodika způsobu přípravy vzorků, vlastního měření a vyhodnocení zkoušky jak již bylo zmíněno je podrobně popsána v [66].

Pro snadnější výpočet koeficientu tření bylo testování prováděno pouze metodou 1B (viz.obr.7.1.), kdy (na rozdíl od varianty 1A) na velikost koeficientu tření nemají vliv mechanické hodnoty zkoušeného materiálu a ani tloušťka plechu. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.4.1., nevýhodou tohoto testu je, že napjatost testovaného materiálu při zkoušce neodpovídá skutečné napjatosti materiálu pod přidržovačem a v průběhu zkoušky také nedochází k výrazné plastické deformaci testovaného materiálu, jako v případě reálného lisování. Na základě provedených četných experimentů na katedře strojírenské technologie [64, 67, 68] pro porovnání tribologických vlastností zkoumaných materiálů je však tato zkouška dostačující. Při použití metody 1A pro výpočet koeficientu tření by bylo také nutno zohlednit fakt, že tento koeficient není konstantní pro oblast tažné hrany a zároveň pro oblast přidržovače (rovinná část zkušebních čelistí) a výpočet by se tak zkomplikoval.

Vhledem k tomu, že pro testy byl použit žárově pozinkovaný plech, pro který je charakteristický vznik tzv. „***stick-slip***" efektu (v literatuře označován jako určitý druh zadírání), je třeba si položit otázku, jakou sílu zvolit pro výpočet koeficientu tření. Tento nepříznivý jev se zvláště uplatňuje při malých rychlostech posuvu materiálu v nástroji, jak je také patrné z obr.7.2. (pro $v=1 mms^{-1}$, p=4MPa). V těchto případech se pak koeficient tření pohybuje v určitém rozmezí hodnot od minimálních μ_{min} (odpovídá síle F_{min} v ustálené oblasti měření) až po maximální hodnoty μ_{max} (odpovídá síle F_h v ustálené oblasti měření). V předkládané práci je pro výpočet koeficientu tření zohledněna maximální síla v ustálené části pracovního diagramu F_h. Oprávněnost tohoto výběru je diskutována v kapitole 9.

Výpočet koeficientu tření při použití zkoušky protahování pásku metodou 1B je pak pro jednotlivé podmínky testu dán vztahem (73)

$$\mu = \frac{F_h}{2Q} \tag{73}$$

kde F_h je největší síla, které bylo dosaženo v ustálené části pracovního diagramu na měřené délce (viz obr.7.2.)

Q je normálová přítlačná síla

$$Q = p \cdot S \tag{74}$$

kde p je kontaktní tlak v čelistech

S je kontaktní plocha čelistí

7.3 Podmínky zkoušky

Předpokladem pro získání korektních výsledků měření je možnost změny technologických parametrů, které nejvíce ovlivňují výsledek zkoušky. Jak již bylo zmiňováno, v předchozích kapitolách, při tažení vstupuje do tohoto procesu velké množství faktorů, majících vliv nejen na tažení samotné, ale i na kvalitu výlisku. Z důvodu přílišné obsáhlosti práce, bude testování provedeno pouze pro omezený počet technologických parametrů, jenž byly pro toto měření vybrány.

Experimentální měření bylo zaměřeno na zjišťování vlivu druhu testovaného substrátu, rychlosti posuvu materiálu v nástroji, kontaktního tlaku přidržovače, množství a typu použitého maziva, naneseného na testovaný substrát před zkouškou.

7.3.1 Rozměry vzorků testovaného materiálu

Jednou z podmínek zkoušky byl i výběr testovaného materiálu, jedná se o ocelový plech s povlakem vytvořeným žárovým zinkováním (HDG), podrobný popis je uveden v předcházející kapitole 6.4.. Rozměry testovaných pásků respektive délky měřených úseků vzorků byly voleny s ohledem na rychlosti protahování a jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7. *Rozměry vzorků pro jednotlivé rychlosti měření*

Materiál	Tloušťka pásku s_p [mm]	Šířka pásku b_p [mm]	Délka měřeného úseku pásku l_p [mm] pro příslušnou protahovací rychlost **v** [mm s^{-1}]
HDG **EBT** **SIBETEX**	**1,02**	**40 ± 0,05**	**100 (v = 1;5;10 ;25mms^{-1})** **150 (v = 50mms^{-1})** **800 (v = 100;200; 300;400mms^{-1})**

7.3.2 Materiál nástroje na tažení

Nástrojem pro tažení, v případě laboratorního testu, byl přípravek na tribologickém zařízení SOKOL 400. Funkčními částmi přípravku byly dvě výměnné čelisti z materiálu používaného na výrobu nástrojů pro tažení výlisků karosářského typu v průmyslové praxi.

Vzhledem k rozměrům nástrojů pro výlisky karosářského typu se pro jejich výrobu používá nejčastěji tvárná litina. Z důvodů poškození povrchu nástroje během tažení se v současné době nástroje tepelně zpracovávají kalením. Tohoto tepelného procesu se používá v průmyslové praxi např. pro povrchové zakalení tažných radiusů tažnice nebo brzdících lišt. Zakalení materiálu přispívá ke zvýšení životnosti nástrojů, kdy nedochází k jejich opotřebení až poškození exponovaných povrchů částí nástrojů a současně přispívá ke snížení výskytu zadírání během procesu tažení.

Materiál, na výrobu čelistí zkušebního přípravku, byl tedy použit tvárná litina s označením GGG-70L (interní označení v koncernu VW dle normy DIN 1693) a následně zakalené. Pro testování pak zjištěné hodnoty tvrdosti, chemického složení a drsnosti:

- Tvrdost 280 HB
- Chemické složení C = 3,2÷3,4%, Mn = 0,3÷0,8%,
  Si = 1,8÷2,4%,P ≤0,05%,
  S ≤ 0,01%, Cu ≈ 1,0%,
  Ni ≈ 1,0%, Mo ≈ 0,5%
- Drsnost čelistí R_a = 0,07 µm, R_z = 0,76 µm

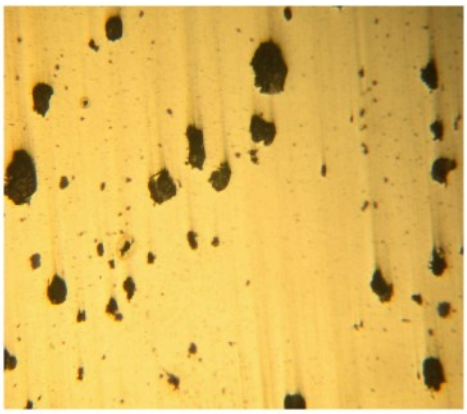
Kontaktní plocha čelistí je S=3120 mm^2, je dána šířkou testovaného pásku 40mm a délkou funkční části čelisti 78mm.

7.3.2.1 Metalografické hodnocení materiálu čelistí

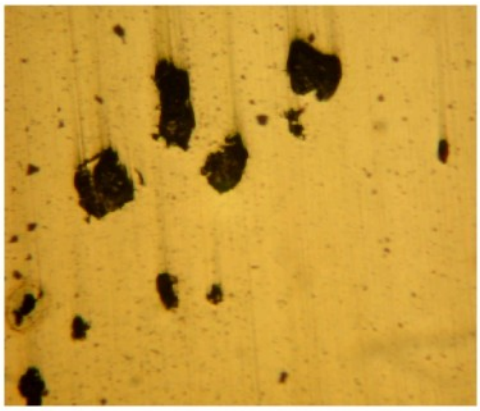
Povrch obou čelistí byl broušen a leštěn podle běžných zásad pro přípravu vzorků k metalografickému hodnocení. Materiál čelistí GGG-70L-kalený byl metalograficky vyhodnocen na optickém mikroskopu NEOPHOT 21 (viz.obr.7.3.).

Tvar a rozložení grafitu byl sledován v neleptaném stavu při zvětšení stonásobném (viz.obr.7.4.) a zvětšení dvěstěnásobném (viz.obr.7.5.). V leptaném stavu byla sledována základní kovová struktura litiny při zvětšení pětsetinásobném (viz.obr.7.6.).

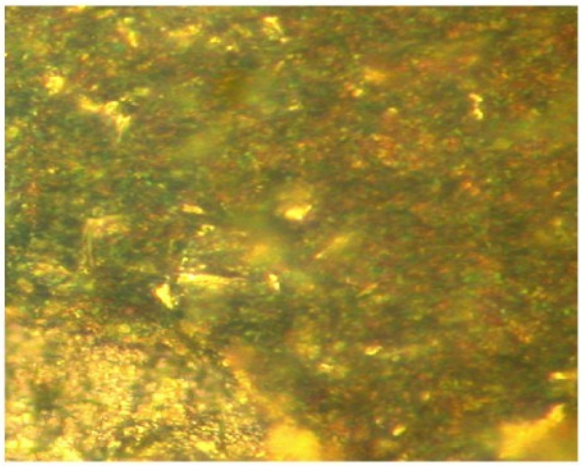
Obr.7.3.: *Optický mikroskop NEOPHOT 21*



Obr.7.4.: *Leštěný povrch, zvětšeno 100x*



Obr.7.5.: *Leštěný povrch, zvětšeno 200x*



Obr.7.6.: *Leptaný povrch čelistí, zvětšeno 500 x*

7.3.2.2 Měření mikrogeometrie nástroje

Měřící zařízení

Drsnost povrchu testovaného materiálu byla měřena ve spolupráci se ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav. Pro měření drsnosti povrchu plechu byl použit drsnoměr PERTHOMETR M4Pi (viz.obr.7.7.). Tento přístroj je přizpůsoben pro měření drsnosti, vlnitosti a parametru profilu plechu podle norem DIN, ISO, JIS.

Obr.7.7.: *Drsnoměr Perthometer M4Pi*

Princip měření

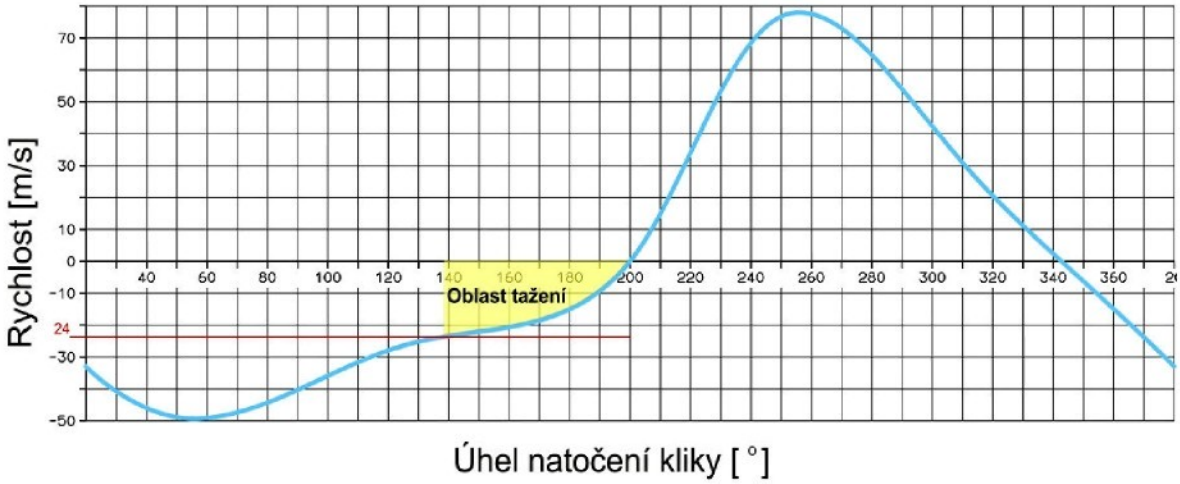
Měřící přístroj PERTHOMETR M4Pi pracuje vždy s jedním z pěti možných programů. Přiložený snímač na testovaný materiál měří drsnost povrchu na ploše 37,5 mm^2. Jedná se pruh o konstantní šířce 2,5 mm a délce pohybující se v intervalu od 0 do 15 mm. Pohyb posuvu jezdce je stanoven výrobcem přístroje na 1,0 $mm.s^{-1}$. Měřící podmínky nastavené pro měření povrchu materiálů vycházejí z DIN EN ISO 4288:1998 a DIN EN ISO 3274:1998.

Přístroj provádí měření v šesti cyklech, z nichž se jeden (s největším rozptylem hodnot) automaticky odfiltruje. Výsledkem jsou průměrné hodnoty zjištěné z pěti nezávislých cyklů. Měření proběhlo přiložením měřícího snímače na povrch nástroje ve směru rovnoběžném a kolmém vůči směru protahování pásků v čelistech.

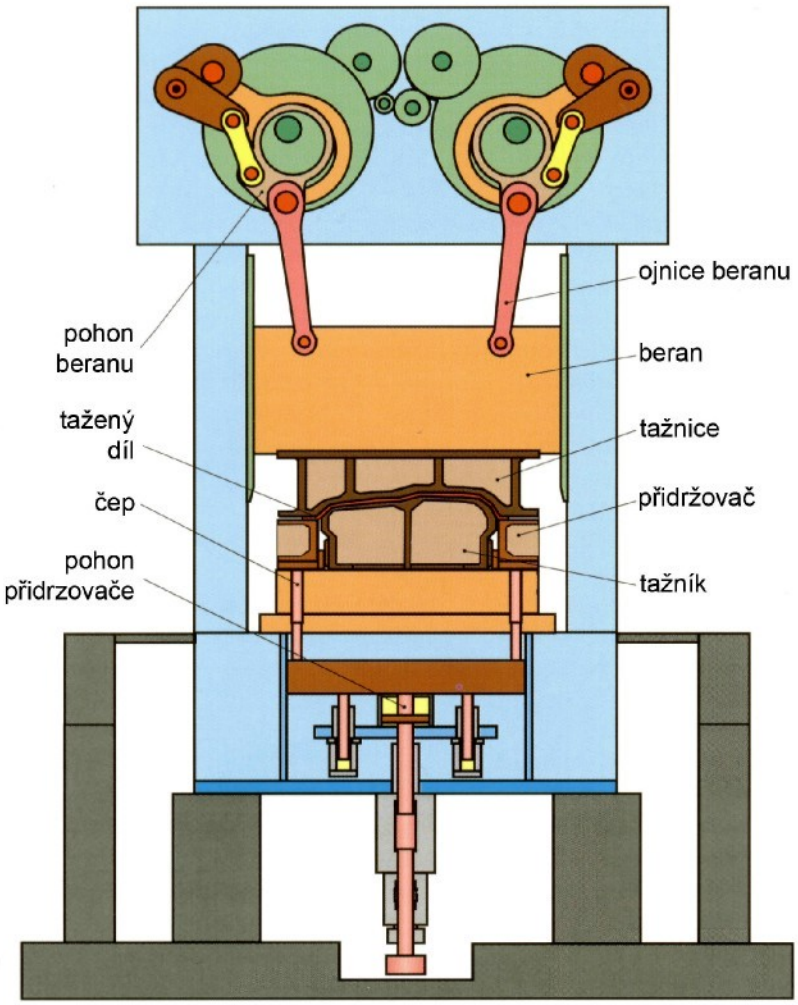
7.3.3 Rychlost posuvu

Dlouholeté poznatky a praktické zkušenosti ukázaly, že výsledky měření získané při malých rychlostech posuvu mají poměrně vysokou vypovídací hodnotu, avšak tento rozsah je nadále již nepostačující pro další verifikaci výsledků experimentálně naměřených v laboratorních podmínkách, v porovnání spolu s hodnotami získanými při reálném tažení.

Jak již bylo zmiňováno v předchozích kapitolách nové zařízení SOKOL 400 umožňuje protahování pásku při nastavení rychlosti v rozmezí v = 1 až 400mms^{-1}, tento rozsah odpovídá používaným rychlostem posuvu plechu při reálném lisování u klikových lisů, neboť u moderních lisů dosahují v současné době rychlosti beranu až 500mms^{-1}, jak na obr.7.8. znázorňuje graf průběhu reálné rychlosti u kliko-kolenového lisu SCHULER (viz obr.7.9.), tyto lisy se používají v automobilovém závodě ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav.



Obr.7.8.: *Průběh rychlosti u kliko-kolenového lisu firmy SCHULER* [69]



Obr.7.9.: *Kliko-kolenový lis firmy SCHULER pro tažení karosářských výlisků* [70]

Z důvodu modelování reálných podmínek tažení karosářských výlisků, jak v oblasti malých rychlostí, tak i zároveň pokrytí určitého rozsahu rychlostí vyšších, byly pro testování voleno *devět* rychlostí posuvu materiálu v nástroji dle následující tabulky 8.

Tabulka 8.: *Zvolené rychlosti protahování pásku u tribologického testu*

v[mms^{-1}]	1	5	10	25	50	100	200	300	400

7.3.4 Kontaktní tlak

Při zkoušce protahování pásku za malých rychlostí (v=1;5;10;25;50mms^{-1}) byl kontaktní tlak volen v rozsahu p=2 až 8MPa, což je rozsah přidržovacích tlaků, který se běžně používá pro tyto rychlosti v praxi. Maximální kontaktní tlak p=8MPa byl volen s ohledem na velikosti tlaků, ke kterým může dojít při tažení v nástroji používaném v automobilovém průmyslu [64]. Tento kontaktní tlak je také volen s ohledem na použitý testovaný materiál, jako mezní přidržovací tlak, kdy nedochází ještě k přetržení zkoumaného vzorku.

Při zkoušce protahování pásku za vyšších rychlostí (v=100;200;300;400mms^{-1}) byl počáteční kontaktní tlak zvolen p=4MPa, neboť tato hodnota odpovídá reálným lisovacím tlakům. Maximální hodnoty kontaktního tlaku, kterou lze ještě vzorek protáhnout za daných podmínek, byly zjišťovány v rámci této disertační práce.

7.3.5 Použité mazivo

Jedním z rozhodujících vlivů pro výrobu kvalitního výlisku je volba použitého maziva a množství maziva naneseného na povrch taženého materiálu. Z hlediska kvality povrchu je při lisování nejen pohledových částí karoserií nezbytně nutné zbavit povrch plechu nečistot. Plech projde soustavou válců v tzv.“pracím stroji“, který je umístěn před nástřihovou linkou v lisovně, zde je zbaven nejen mechanických nečistot z výroby, dopravy a manipulace materiálu, ale i zbytků oleje nanášeného v hutích z důvodu protikorozní ochrany materiálu.

Kvalita pracích olejů je v současné době zpravidla tak vysoká, že prací olej zároveň slouží jako mazadlo pro vlastní výrobu výlisku. Pro extrémně náročné výlisky, kde prací olej svými mazacími vlastnostmi nevyhovuje, se používá přimazávání tzv. „tažným olejem“.

V rámci měření při zjišťování tribologických vlastností testovaného materiálu se specifickou morfologií povrchu EBT-SIBETEX bylo použito mazadlo: prací olej, s označením **Anticorit PL 3802-39LV** (dále jen AC PL 3802-39LV), výrobce Fuchs-Europe Schmierstoffe GmbH&Co.KG. Tento typ maziva je typickým představitelem pracího oleje a běžně se používá v praxi při lisování karosářských výlisků (též v automobilovém závodě ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav).

Stručná charakteristika použitého mazadla je uvedena v tabulce 9 a materiálový list je uveden v příloze P4.

Tabulka 9.: *Stručná charakteristika použitého maziva - pracího oleje AC PL 3802-39LV*

Označení oleje	Kinematická viskozita při 40°C [mm^2s^{-1}]	Měrná hmotnost při 15°C [$kg\ m^{-3}$]	Bod vzplanutí [°C]
AC PL 3802-39LV	**17**	**890**	**150**

Jak již bylo uvedeno v předcházejících kapitolách, nezbytnou podmínkou pro výrobu výlisku zejména pak karosářského typu je přítomnost maziva. Přítomnost maziva na povrchu výlisku však komplikuje následné operace jako jsou svařování, lepení, lakování atd.. Z tohoto důvodu (pomineme-li spotřebu mazadla) je snahou zpracovatelů plechů používat mazadla v co nejmenším množství. Snaha minimalizovat množství nanášeného mazadla na výlisek tak vede k tomu, že nanesené množství se pohybuje u pracích olejů v rozmezí 1,0 až 2,0gm^{-2}, u prelubů a tažných olejů 2,0 až 3,0gm^{-2}, emulze 4,0 až 5,0gm^{-2}.

Je nutné si ale uvědomit, že přítomnost maziva vůbec a jeho množství ovlivňuje a mění podmínky tažení respektive mění tření v průběhu celé operace, které může za určitých podmínek přivodit zadírání.

Zajistit ovšem optimální množství maziva, jež je dáno konkrétním typem maziva na celé ploše výlisku je velmi problematické, zvláště v reálných podmínkách provozu lisoven při sériové výrobě.

Pro zjišťování množství a pro kontrolu naneseného maziva na povrchu substrátu se na katedře strojírenské technologie TUL používala gravimetrická metoda. Tato původní metoda, vážení na analytických vahách, se ukázala v rámci řešení problematiky zadírání jako ne zcela přesná a nedostačující, jelikož metodou vážení byl zaručen pouze celkový gramážní podíl naneseného maziva, nikoliv však podíl objemový na celé ploše testovaného substrátu.

Jelikož při řešení práce vyvstala nezbytnost přesné kontroly naneseného maziva z důvodu posouzení vlivu jeho množství na vznik zadírání, v rámci spolupráce automobilového průmyslu a výrobců maziv bylo zakoupeno ve ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav specielní zařízení, které na zakázku nechala vyrobit a dodala firma Fuchs-Europe Schmierstoffe GmbH&Co.KG jako jeden z předních výrobců maziv. Zařízení bylo vyvinuto pro potřeby využití v průmyslovém prostředí a umožňuje proměřit a vyhodnotit množství naneseného maziva na snímaném povrchu za účelem kontroly nanášeného množství maziva. Má sloužit jako pomocník při kontrole mazání zpracovatelům, jež při operacích lisování plechů maziva v hojné míře používají, ale též výrobcům maziv k informacím o vlastnostech jednotlivých typů maziv.

V rámci experimentálního měření práce bylo na katedru strojírenské technologie toto zařízení firmou ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav zapůjčeno k účelům kontroly přesnosti nanášeného množství maziva.

7.3.5.1 Zařízení na měření množství maziva [71]

Jedná se o ruční přenosné zařízení (viz.obr.7.10.) k jednoduchému zjišťování tloušťky vrstvy oleje na kovovém povrchu. Zařízení se skládá z pevného hliníkového obalu, potaženého pryží, který obsahuje osvětlovací systém, filtrové kolo, detektor, referenční mechaniku, baterie a elektroniku. Zařízení je založeno na infračervené – filtrovací technice a je vyvinuto specielně pro použití v průmyslovém prostředí. Konstrukce měřícího aparátu umožňuje infračerveným paprskem snímat povrch plechu o rozměrech 10x10mm a zaznamenávat množství maziva naneseného na kontrolované ploše. Z jednotlivých měření je pak vypočtena průměrná hodnota měřené vrstvy maziva, která se zobrazí na LCD displeji, jak je znázorněno na obr.7.11..

Kalibrace je přednastavená na několik druhů kovového povlaku např. na ocelové plechy válcované za studena, na plechy s povlaky žárově zinkovanými (HDG), elektrolyticky zinkovanými (EG), plechy pohliníkované. Další povrchy mohou být dle požadavků přidány. Zařízení je schopno měřit vrstvy maziv v rozsahu hodnot 0,2 až 6gm^{-2}.

Obr.7.11.: *Detail měřícího zařízení*

Obr.7.10.: *Měřící aparát pro kontrolu naneseného množství maziva firmy Fuchs*

7.3.5.2 Nanášené množství maziva

Množství nanášeného pracího oleje bylo voleno s ohledem na praktické podmínky lisování v množství **1,0; 1,5; 2,0 ± 0,1gm^{-2}**, aby bylo možné prověřit také vliv množství maziva na výskyt zadírání v závislosti na vyplnění struktury povrchu vzhledem k morfologii povrchu plechů viz. kapitola 3.5.3. .

Prací olej byl nanášen pomocí bavlněné tkaniny, 1 hodinu se testovaný vzorek kondicionoval v horizontální poloze pro dokonalé roztečení maziva po celé testované ploše vzorku. Po kondicionaci byla provedena kontrola množství maziva naneseného na povrchu plechu pomocí zmiňovaného zařízení.

Výsledná hodnota, která měla odpovídat požadovanému množství nanášeného maziva pro jednotlivé testy byla stanovena vždy z pěti náhodně volených měření jako průměrná hodnota na každém testovaném pásku.

7.3.6 Teplota nástroje [72]

Teplota nástroje je jednou z technologických podmínek, která ovlivňuje velikost třecí síly a tím i tribologické vlastnosti plechů. Změnou teploty se změní podmínky tažení v závislosti na rychlosti pohybu.Vliv rychlosti pohybu při tváření úzce souvisí s teplotou, neboť při tažení dochází vlivem třecích poměrů třecích dvojic k zahřívání nástroje, což může ovlivnit nejen vlastnosti maziva, ale také změny povrchových vrstev plechu i nástroje.

V závislosti na podmínkách vzniku mají přetvořené, resp. nově vzniklé vrstvy povrchů různé tribologické vlastnosti. Schopnost vnějších vrstev zabraňovat svarům výčnělků nerovností povrchů záleží na jejich tloušťce, pevnosti vazby, stálosti za zvýšených teplot i snášenlivosti s mazivem. K vytvoření vrstev s vyhovujícími vlastnostmi je nutný vhodný výběr materiálů třecích dvojic i maziva. Tepelné energii je vystaveno při praktickém použití každé mazivo a důsledky jejího vlivu jsou funkcí výšky pracovní teploty na tepelně exponovaném povrchu nástroje.

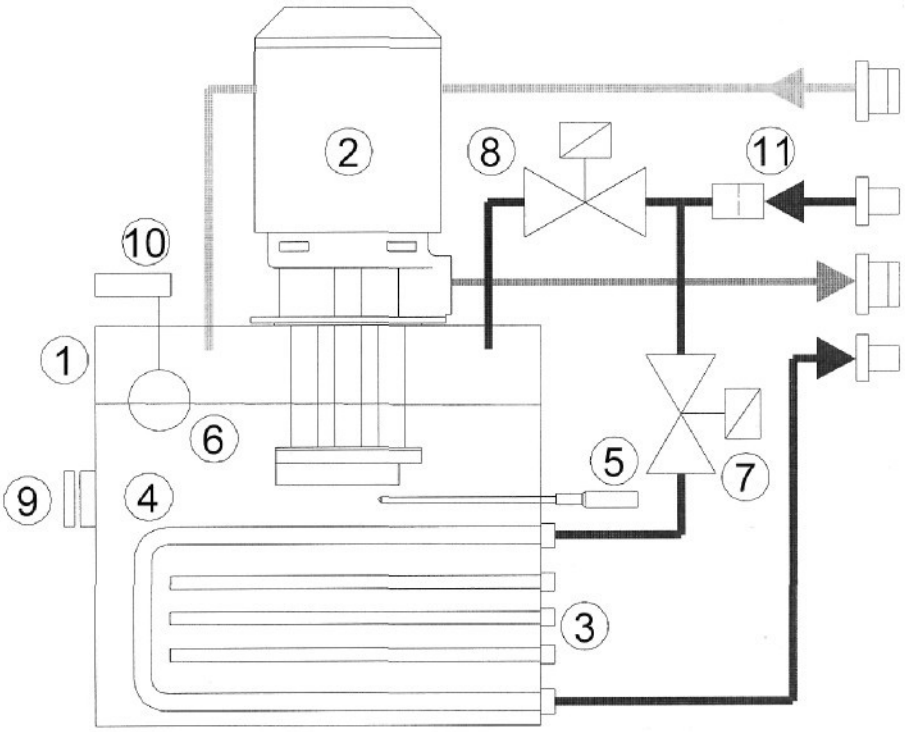
Teplota nástroje respektive teplota, jež byla použita pro ohřev obou čelistí zkušebního přípravku byla zvolena **T=40±2°C** s ohledem na reálné teploty, jež vznikají pří lisování karosářských výlisků. K dosažení stejných podmínek pro všechna měření, bylo vždy nutné nechat čelisti důkladně prohřát na teplotu zvolenou pro měření.

K vytemperování čelistí nástroje zkušebního přípravku na požadovanou teplotu byl použit temperační agregát TA 3 (viz.obr.7.12.), základní technické údaje jsou v tabulce 10. Jeho funkčnost je zajištěna připojením k tlakovým hadicím pro teplonosné cirkulující médium - vodu Vytápění nerezové vany agregátu s vodou zabezpečuje jedno topné těleso o výkonu 3kW. Případné chlazení zajišťuje chladící šnek s oběhem studené vody. Teplota temperační vody je snímána termočlánkem. Regulaci topení zajišťuje regulátor s PID řízením. Hladinu vodní náplně v nádrži udržuje plovákový spínač a oběh vody přes formu je zajišťován ponorným čerpadlem, schéma zapojení je znázorněno na obr.7.13..

Tabulka 10.: *Technické údaje temperačního agregátu*

Maximální teplota	°C	95
Topný výkon	kW	3
Výkon čerpadla	l/min	60
Objem nádrže	l	5
Elektrické připojení	V / Hz	400 / 50

Obr.7.12.: *Temperační agregát TA 3*



(1) nádrž, (2) motor s čerpadlem, (3) topná tělesa, (4) chladící šnek, (5) teplotní čidlo, (6) plovák, (7) ventil chlazení, (8) ventil automatického doplňování vody, (9) termostat, (10) snímač hladiny, (11) filtr

Obr.7.13.: *Schéma zapojení temperačního agregátu TA 3*

7.4 Tribologická zkouška protahováním pásku

Pro srovnání tribologických vlastností sledované soustavy materiál nástroje-testovaný substrát slouží záznamy průběhů tažných sil v závislosti na protahované délce. V průběhu zkoušky dochází ke změně velikosti síly potřebné k protažení pásku a graf lze rozdělit na dvě hlavní části: náběhovou a ustálenou. Část náběhová má význam zejména pro vyhodnocování metodou 1B, kde důležitým parametrem z hlediska zadírání je zjištění velikosti síly F_{max} jako počáteční síly vzniklé při protahování pásku. V ustálené části diagramu jsou vyhodnocovány všechny ostatní veličiny zjišťované při zkoušce F_h ,$F_{střední}$. F_{min} , stanovené zadáním L_{mez}, jako počáteční hodnotou měřené délky.

Zkouška probíhala dle metodiky popsané v kapitole 4.4.1.a podrobně uvedené v [66]. Použité podmínky zkoušky jsou uvedeny v kapitole 7.3.. Koeficient tření μ pro jednotlivé kombinace je vypočítán dle vztahu (73). Naměřené hodnoty a výsledky měření jsou prezentovány ve formě přehledných tabulek (tabulka 11 až tabulka 20), kde jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru s. Vzhledem k tomu, že koeficient tření μ je vypočítán z maximální velikosti síly dosažené v ustáleném stavu F_h, jsou v tabulkách v následujícím textu prezentovány hodnoty této síly a pro zjištění podmínek vzniku zadírání pak hodnoty F_{max}, ΔF, jsou hodnoty F_s uvedeny pouze jako porovnávací pro výpočet koeficientu tření v závislosti na velikosti sil F_h a F_s. Diskuze a zdůvodnění výběru těchto veličin pro výpočet koeficientu tření je uvedena v kapitole 9.

Pro získání statisticky významného počtu měření a průměrné hodnoty sledované charakteristiky, pro každou jednotlivou kombinaci nastavení vstupních parametrů testu, byl stanoven vždy soubor 10 měřených vzorků. Při změně nastavení vstupních parametrů se tak jedná o 2160 zkoušek (1 testovaný materiál, 8 různých kontaktních tlaků, 9 rychlostí posuvu, 1 mazivo, 3 množství maziva). Z tohoto důvodu jsou výsledky jednotlivých zkoušek prezentovány pouze formou uložených souborů Microsoft Excel na přiloženém CD.

Získané experimentální výsledky jsou zpracovány a vyhodnoceny standardními statistickými postupy.

7.4.1 Zpracování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty byly zpracovány dle postupu pro opakovaná měření.

Hodnota aritmetického průměru $\bar{x}$ byla určena dle vztahu

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad (75)$$

kde x_i je hodnota při jednom měření, **n** je počet opakovaných měření.

Dále byla stanovena výběrová směrodatná odchylka (jednoho měření) **s**

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{76}$$

Pro výpočet výběrové směrodatné odchylky $\bar{s}$ střední hodnoty (aritmetického průměru) byl použit vztah

$$\bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \tag{77}$$

8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

8.1 Výsledky experimentu – tabulky naměřených dat

Z naměřených registračních záznamů, z jejich průběhů lze sledovat okamžik vzniku zadírání protahované vzorku. Tento okamžik je charakteristický rozkmitem síly v grafu registračního diagramu a jeho počátek tak lze poměrně snadno určit.

Z naměřených a vypočítaných hodnot byly pro jednotlivé technologické parametry sestrojeny závislosti koeficientu tření μ na velikosti kontaktního tlaku **p** pro danou rychlost posuvu **v** sledovaného vzorku, při daném typu maziva a jeho množství.

K jednotlivým grafům byly zjištěny spojnice trendu dány rovnicí regrese

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \qquad (78)$$

kde a,b,c jsou regresní koeficienty

k rovnicím regrese byla vypočtena odpovídající hodnota spolehlivosti R^2

Grafické znázornění výsledků měření pro jednotlivé kombinace zadaných parametrů jsou prezentovány v kapitole 8.2 a v kapitole 8.3 je provedeno následné dílčí vyhodnocení těchto grafických průběhů.

V kapitole 8.4 je vyhodnocení koeficientu tření μ v závislosti na konstantní rychlosti **v** a v kapitole 8.5 v závislosti na konstantním tlaku **p**. Diskuse k těmto naměřeným výsledkům je uvedena v kapitole 9..

V prezentovaných grafech je současně uvedeno porovnání závislostí koeficientu tření μ na velikosti kontaktního tlaku **p** a rychlosti posuvu **v** protahovaného pásku s ohledem na nanesené množství maziva pro testovaný materiál.

Hodnocení maziva z hlediska jeho ulpění na povrchu testovaného substrátu bylo provedeno zdokumentováním povrchu substrátu s příslušným množstvím naneseného maziva a je popsáno v kapitole 9.3..

Tabulka 11.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p)$ $v = 1mms^{-1}$

Rychlost posuvu **1mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** s [N]	Maximální síla **Fh [N]** ustálená s [N]	Střední síla **Fs [N]** ustálená s [N]	Rozkmit síly **ΔF [N]** s [N]	Koeficient tření **μ [-]** s [-]
2	1590,21 21,30	1452,59 52,60	1319,83 16,26	198,35 4,46	0,116393 0,002312
3	2777,78 36,23	2335,59 44,65	2157,14 24,23	1004,85 13,26	0,124764 0,001649
4	3775,73 47,60	3447,32 55,45	2815,69 26,36	1463,28 24,32	0,138114 0,00123
5	4779,84 55,23	4400,24 47,69	3487,33 26,12	1825,82 17,35	0,141033 0,004929
6	6008,57 54,69	5664,01 56,23	4331,82 33,65	2664,39 25,46	0,151282 0,001014
8	8725,11 87,65	8725,11 89,55	5339,51 56,59	7990,90 76,87	0,174782 0,006437
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
2	1436,51 16,09	1297,32 15,23	1177,53 25,69	157,44 3,24	0,103952 0,000525
3	2213,54 35,89	2041,45 43,43	1905,94 44,58	271,03 3,40	0,109052 0,000456
4	3501,65 34,87	2992,76 23,93	2575,27 45,62	834,99 4,77	0,119902 0,000236
5	369,49 34,88	3912,33 35,25	3266,48 36,32	1291,68 14,94	0,125395 0,002562
6	5178,47 56,53	4905,98 46,72	3912,49 44,32	1986,99 16,09	0,131036 0,002713
8	7793,52 67,91	7479,29 78,17	4364,47 46,96	4519,60 43,70	0,149826 0,004415
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
2	1354,22 14,36	1229,85 12,36	1137,96 23,69	183,79 2,23	0,098546 0,008123
3	2310,45 25,68	1944,09 25,48	1847,91 14,36	192,36 3,45	0,103851 0,007169
4	3158,56 34,98	2830,86 25,69	2663,14 26,45	335,44 5,98	0,113416 0,003459
5	4070,45 56,48	3738,31 35,62	3372,71 35,35	731,21 8,12	0,119818 0,003423
6	4894,69 37,36	4836,99 45,64	3923,18 36,85	1825,61 16,25	0,129166 0,002283
8	7250,98 78,65	7032,12 68,12	4248,58 45,23	3385,22 34,21	0,140868 0,005537

Tabulka 12.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p,v)$ $v = 5mms^{-1}$

Rychlost posuvu **5mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** s [N]	Maximální síla **Fh [N]** ustálená s [N]	Střední síla **Fs [N]** ustálená s [N]	Rozkmit síly **ΔF [N]** s [N]	Koeficient tření **μ [-]** s [-]
2	1470,52 24,25	1365,21 15,11	1218,51 14,36	123,65 2,23	0,10939 0,001129
3	2413,24 35,34	1998,54 24,11	1709,10 23,98	200,57 5,05	0,1069 0,00368
4	3428,23 26,59	2811,96 26,51	2387,84 25,89	435,67 3,78	0,11265 0,000651
5	4446,14 47,25	3583,06 36,25	2772,20 23,58	621,73 4,51	0,11774 0,000458
6	5823,13 54,23	4968,96 55,55	3730,22 33,87	1317,80 8,21	0,12672 0,00157
8	7894,53 88,65	6676,80 67,21	4605,01 34,65	3467,29 22,54	0,14375 0,001236
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
2	1372,08 22,36	1285,40 23,45	1152,25 12,45	119,78 2,05	0,10299 0,00256
3	2027,98 33,12	1808,42 22,89	1746,34 22,56	124,16 2,25,	0,099604 0,00356
4	3430,55 44,25	2687,23 25,12	2266,92 23,25	159,34 2,19	0,10366 0,003165
5	4011,91 55,68	3315,16 55,23	3035,49 34,36	200,57 3,98	0,10726 0,004121
6	5159,05 55,61	4289,76 54,87	3447,72 32,78	570,20 6,11	0,11058 0,005321
8	6811,69 66,87	5490,97 45,47	4710,67 51,12	1560,59 8,23	0,12095 0,002621
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
2	1330,89 13,45	1167,00 14,99	1107,70 14,06	116,29 1,14	0,09351 0,003512
3	2207,25 25,23	1787,44 15,65	1728,23 14,89	118,42 2,65	0,09548 0,003248
4	3064,89 26,47	2375,55 25,87	2312,14 14,67	126,82 2,18	0,096174 0,005132
5	3886,57 35,36	3078,11 37,11	3011,82 24,88	132,58 2,55	0,098658 0,004511
6	4765,32 47,15	4025,45 55,46	3689,18 35,13	353,36 3,24	0,106518 0,004269
8	6794,13 62,41	5376,76 61,32	4900,08 58,64	568,56 4,24	0,113708 0,006231

***Tabulka 13.**: Naměřené a vypočtené hodnoty pro $\mu = f(p,v)$ $v = 10mms^{-1}$*

Rychlost posuvu **10mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** s [N]	Maximální síla **Fh [N]** ustálená s [N]	Střední síla **Fs [N]** ustálená s [N]	Rozkmit síly **ΔF [N]** s [N]	Koeficient tření **μ [-]** s [-]
2	1324,69 22,35	1276,31 12,31	1143,08 12,56	127,09 2,12	0,099726 0,003245
3	2232,86 24,26	1789,48 35,27	1709,10 13,59	154,20 2,47	0,09844 0,004356
4	3148,79 45,78	2428,56 44,36	2323,47 30,14	290,58 8,58	0,099698 0,005312
5	4124,18 56,12	3039,52 45,64	2767,47 33,82	237,71 10,11	0,1056 0,005123
6	5536,47 67,21	4467,23 58,24	3309,32 37,57	798,65 9,98	0,111317 0,006128
8	7013,65 78,45	5563,25 63,47	4647,03 54,31	1322,62 11,78	0,123443 0,006552
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
2	1320,13 35,12	1194,93 14,35	1134,46 14,12	120,95 2,26	0,095748 0,004346
3	2026,44 44,15	1805,36 33,45	1741,15 23,23	138,43 3,55	0,09644 0,004664
4	3003,92 44,46	2392,01 32,34	2313,77 31,56	187,09 3,78	0,096956 0,002947
5	3945,13 43,25	2981,21 32,95	2962,26 30,28	285,19 4,11	0,097421 0,002368
6	4638,46 44,87	3686,91 45,26	3516,89 44,65	440,92 5,24	0,099945 0,001322
8	6590,36 70,56	5096,12 61,12	4793,26 42,23	605,70 12,52	0,102086 0,001225
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
2	1304,33 13,78	1154,23 11,11	1074,92 12,47	113,83 2,15	0,092486 0,006698
3	1985,13 21,15	1781,95 23,65	1725,00 22,41	123,91 2,87	0,092033 0,005836
4	2862,05 30,02	2298,13 24,25	2226,33 26,22	159,46 3,14	0,092073 0,004907
5	3703,36 44,65	2886,33 40,98	2826,45 41,67	202,18 3,56	0,092511 0,007689
6	4299,32 51,78	3597,31 48,24	3537,33 35,32	340,03 4,78	0,096082 0,008777
8	6123,23 77,32	4801,49 45,36	4705,40 50,47	523,11 7,97	0,096184 0,005823

Tabulka 14.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p,v)$ $v = 25mms^{-1}$

Rychlost posuvu **25mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** s [N]	Maximální síla **Fh [N]** ustálená s [N]	Střední síla **Fs [N]** ustálená s [N]	Rozkmit síly **ΔF [N]** s [N]	Koeficient tření **μ [-]** s [-]
2	1231,19 12,35	1198,12 13,56	1139,39 11,23	122,17 2,14	0,097003 0,003602
3	2026,44 21,56	1805,36 20,03	1741,15 16,64	148,43 3,17	0,09589 0,005436
4	2856,29 25,65	2400,36 23,56	2131,01 19,35	193,32 3,26	0,096168 0,002436
5	3472,46 25,23	2983,38 28,56	2908,73 28,67	412,49 4,56	0,096621 0,004563
6	4863,45 42,38	3862,71 35,58	3313,92 30,35	465,26 4,12	0,09723 0,005612
8	5563,24 52,36	4986,32 51,23	4023,34 39,54	753,86 6,45	0,108032 0,008230
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
2	1288,16 11,39	1173,60 10,65	1126,69 11,69	111,51 2,14	0,094038 0,003445
3	2005,36 19,23	1724,93 16,25	1642,04 15,23	126,48 3,17	0,093144 0,005789
4	2805,11 24,36	2370,13 23,56	2005,47 19,56	165,78 3,26	0,092957 0,007423
5	3800,44 36,56	2886,17 27,26	2679,93 25,35	289,11 4,36	0,092905 0,005478
6	4521,50 44,34	3452,55 33,69	3219,92 30,69	421,35 6,12	0,094216 0,004578
8	6123,54 59,36	4829,86 47,54	4194,99 42,87	703,23 8,25	0,096752 0,006532
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
2	1244,45 12,56	1123,51 11,96	1093,03 10,65	93,81 2,23	0,088025 0,007869
3	1900,01 18,78	1708,63 20,65	1654,58 15,14	108,10 3,47	0,090073 0,005698
4	2662,55 22,35	2255,79 20,78	2204,52 20,24	132,54 4,02	0,089615 0,004875
5	3491,16 31,65	2789,53 26,54	2733,85 25,66	198,36 5,23	0,089808 0,006769
6	4012,36 48,21	3433,04 35,19	3370,43 28,47	325,44 4,56	0,090694 0,004796
8	5813,68 60,45	4500,64 48,18	4421,69 45,42	557,89 8,12	0,093257 0,003898

Tabulka 15.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p,v)$ $v = 50mms^{-1}$

Rychlost posuvu **50mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** **s [N]**	Maximální síla **Fh [N]** ustálená **s [N]**	Střední síla **Fs [N]** ustálená **s [N]**	Rozkmit síly **ΔF [N]** **s [N]**	Koeficient tření **μ [-]** **s [-]**
2	961,7 5,12	1136,7 6,47	920,20 4,96	105,00 2,23	0,091082 0,004536
4	2605,34 25,96	2355,11 22,85	2057,56 24,06	213,60 2,89	0,094355 0,004832
6	3950,45 40,05	3612,01 38,32	3635,10 33,69	229,62 3,11	0,096475 0,005923
8	4997,14 48,56	4967,94 50,12	4484,25 45,69	232,83 3,68	0,099518 0,006137
10	6636,74 68,45	6243,94 63,57	6092,02 61,25	309,71 3,98	0,100063 0,006472
12	7772,32 78,36	7426,76 72,25	7170,91 70,23	511,71 4,58	0,099182 0,006358
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
2	950,10 4,96	1025,6 7,15	843,11 4,51	84,29 1,71	0,082179 0,003569
4	2450,98 23,36	2177,12 20,54	2005,47 19,65	153,30 2,47	0,087224 0,005424
6	3593,50 36,67	3386,02 35,02	3271,21 30,45	191,05 2,98	0,090439 0,004512
8	5220,44 49,87	4626,89 48,23	4730,88 50,21	197,96 3,45	0,091686 0,004736
10	6361,37 65,21	5763,01 54,52	5608,16 60,47	287,29 4,31	0,092356 0,005734
12	7950,73 80,25	6992,58 71,36	6645,14 60,85	303,82 5,12	0,093384 0,006438
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
2	911,12 4,15	980,23 8,25	838,08 7,47	83,00 1,11	0,078544 0,007124
4	2211,31 22,58	2003,52 23,47	1856,55 19,68	143,21 2,56	0,081269 0,0059523
6	3624,66 38,28	3102,99 41,58	3175,47 30,55	153,81 3,43	0,082879 0,006893
8	4997,82 48,36	4236,89 45,69	4113,69 43,58	177,11 3,97	0,084874 0,000962
10	6291,76 74,25	5321,45 61,82	5515,41 58,47	243,18 4,15	0,08528 0,007955
12	7694,26 78,65	6460,36 68,12	6338,77 62,36	294,87 4,85	0,08627 0,007987

Tabulka 16.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p,v)$ $v = 50mms^{-1}$

Rychlost posuvu **50mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** **s [N]**	Maximální síla **Fh [N]** ustálená **s [N]**	Střední síla **Fs [N]** ustálená **s [N]**	Rozkmit síly **ΔF [N]** **s [N]**	Koeficient tření **μ [-]** **s [-]**
14	9791,50 96,53	8137,42 85,36	7839,30 77,51	596,25 6,32	0,098847 0,007521
16	11326,44 98,89	9162,79 88,14	8833,45 81,98	658,69 8,31	0,096775 0,006825
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
14	9459,17 93,58	7928,12 77,27	7747,92 72,36	360,29 4,58	0,090752 0,006842
16	11122,86 95,21	8535,95 88,68	8273,32 84,65	525,25 5,94	0,089696 0,007137
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
14	9242,16 90,68	7448,74 74,32	7455,89 71,25	335,72 4,12	0,085265 0,007732
16	10791,25 93,57	8284,54 81,69	8147,90 79,56	473,28 4,89	0,083978 0,006296

***Tabulka 17.**: Naměřené a vypočtené hodnoty pro $\mu = f(p,v)$ $v = 100mms^{-1}$*

Rychlost posuvu **100mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** s [N]	Maximální síla **Fh [N]** ustálená s [N]	Střední síla **Fs [N]** ustálená s [N]	Rozkmit síly **ΔF [N]** s [N]	Koeficient tření **μ [-]** s [-]
4	2562,98 26,69	2331,94 25,45	2156,27 20,32	394,19 4,37	0,096427 0,005934
6	4108,57 39,54	3691,3 37,12	3478,54 30,58	457,01 5,41	0,098592 0,006823
8	5184,30 50,36	5053,87 52,47	4643,98 47,24	675,36 6,15	0,101239 0,006721
10	6876,73 65,89	6358,25 64,58	6191,46 60,25	1088,22 8,51	0,106895 0,005733
12	11633,74 98,25	8923,65 95,28	8311,07 83,54	1122,33 9,86	0,113173 0,008936
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
4	2428,66 26,23	2243,25 25,68	2051,57 19,57	383,37 4,59	0,089874 0,005423
6	3765,35 38,25	3437,88 35,46	3309,37 30,59	425,52 5,17	0,091824 0,007512
8	4953,12 50,35	4711,56 49,39	4659,80 46,69	523,11 5,63	0,094382 0,008734
10	7023,11 68,56	6077,27 62,69	5979,87 58,13	929,23 7,82	0,098392 0,006812
12	10749,29 96,36	7519,95 80,58	7339,02 72,51	1018,97 8,69	0,102424 0,008647
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
4	2410,74 26,88	2129,66 22,52	2074,70 18,64	351,35 4,21	0,085323 0,005864
6	3623,12 37,57	3301,68 35,48	3095,51 30,65	421,11 5,12	0,087186 0,008231
8	4875,82 52,36	4411,21 46,58	4160,24 39,48	486,95 5,96	0,088366 0,007998
10	6281,17 64,25	5476,18 55,12	4811,57 47,69	691,76 6,35	0,092566 0,009123
12	8559,8 88,32	7203,59 74,25	6857,70 66,58	854,48 7,73	0,096202 0,009527

Tabulka 18.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p,v)$ $v = 200mms^{-1}$

Rychlost posuvu **200mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** s [N]	Maximální síla **Fh [N]** ustálená s [N]	Střední síla **Fs [N]** ustálená s [N]	Rozkmit síly **ΔF [N]** s [N]	Koeficient tření **μ [-]** s [-]
4	2667,39 27,39	2410,20 26,56	2224,14 21,58	401,28 5,24	0,096563 0,005623
6	4129,69 42,56	3666,76 38,45	3458,25 33,74	527,90 6,28	0,097937 0,006812
8	5515,88 55,47	4879,77 50,14	4612,19 45,58	595,17 6,49	0,099992 0,008239
10	6748,28 66,68	6183,26 65,14	5709,94 55,49	1000,08 8,19	0,103110 0,009813
12	8819,01 90,43	8785,03 88,35	7535,49 74,15	2499,08 20,18	0,107132 0,009961
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
4	2690,34 27,26	2263,17 25,47	2076,86 19,54	372,61 4,65	0,090672 0,006423
6	3693,14 37,15	3414,06 35,98	3150,1 30,571	431,51 5,11	0,091188 0,007529
8	5023,65 52,69	4589,56 46,51	4176,48 40,85	547,89 6,32	0,092038 0,006823
10	6894,19 71,58	6006,70 62,14	5631,58 55,17	750,24 6,98	0,096261 0,005921
12	7462,35 76,26	7458,56 77,13	6343,19 60,54	1450,41 11,53	0,100326 0,0087247
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
4	2389,12 25,68	2165,32 22,49	1909,02 18,23	354,11 4,38	0,086752 0,007596
6	3598,63 36,87	3263,87 33,19	3015,83 31,05	417,02 4,98	0,086176 0,007625
8	4700,69 48,61	4395,64 44,15	3929,99 38,68	496,10 5,05	0,086054 0,008136
10	6005,36 62,48	5340,27 53,64	4994,82 48,69	690,90 6,58	0,090581 0,008348
12	8530,75 86,47	7183,27 72,64	6800,99 67,63	864,57 8,27	0,093930 0,007982

Tabulka 19.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p,v)$ $v = 300mms^{-1}$

Rychlost posuvu **300mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** **s [N]**	Maximální síla **Fh [N]** ustálená **s [N]**	Střední síla **Fs [N]** ustálená **s [N]**	Rozkmit síly **ΔF [N]** **s [N]**	Koeficient tření **μ [-]** **s [-]**
4	2631,60 27,25	2526,08 26,14	2350,28 23,47	445,96 5,29	0,097752 0,006826
6	4292,43 45,21	3786,31 38,47	3521,56 35,38	529,50 5,98	0,098937 0,008523
8	5508,02 56,78	4913,55 50,58	4539,07 46,32	748,96 6,87	0,101205 0,009823
10	6909,38 69,51	6131,08 62,39	5747,53 54,68	856,23 8,12	0,10594 0,008763
12	9630,15 98,26	7635,04 78,69	6622,56 65,25	2024,97 19,45	0,108321 0,006923
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
4	2747,35 28,49	2315,21 24,11	2071,74 21,58	351,61 4,69	0,09278 0,006726
6	3955,45 40,12	3511,12 35,98	3500,56 35,57	463,00 5,25	0,093333 0,007569
8	5236,98 53,25	4635,23 47,68	3947,04 38,14	647,25 6,31	0,094938 0,0079258
10	6135,55 63,87	5836,25 60,25	4971,01 48,24	740,17 7,57	0,096061 0,008621
12	8286,44 85,12	7001,23 73,58	6964,45 68,89	1111,12 10,98	0,10121 0,009423
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
4	2423,87 26,15	2226,31 24,68	1853,73 18,69	346,03 4,25	0,087752 0,007436
6	3695,47 37,28	3298,56 33,87	2775,53 26,98	402,29 4,98	0,087176 0,006912
8	4926,18 50,65	4389,65 45,68	3878,73 38,56	489,85 5,04	0,088054 0,007639
10	6035,71 61,58	5138,66 53,45	4818,57 47,69	667,22 6,14	0,093261 0,007935
12	8250,69 85,65	6430,74 65,23	6143,44 60,31	974,58 8,59	0,09476 0,008411

Tabulka 20.: *Naměřené a vypočtené hodnoty pro* $\mu = f(p,v)$ $v = 400mms^{-1}$

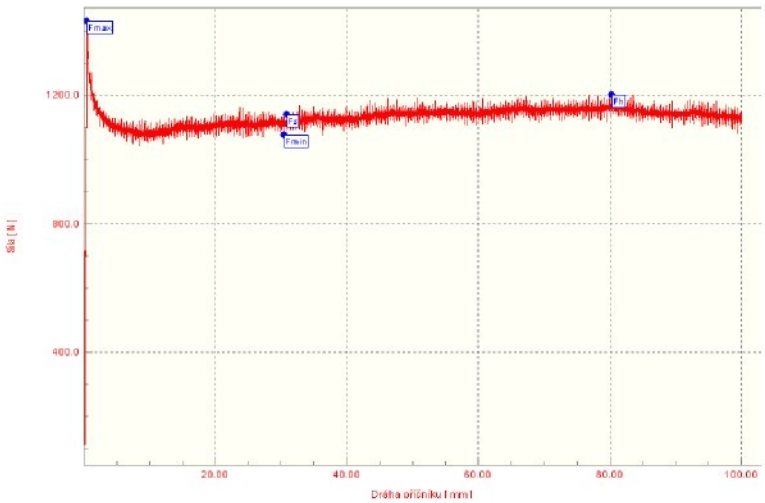
Rychlost posuvu **400mms^{-1}**					
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,0gm^{-2}**					
Kontaktní tlak **p [MPa]**	Maximální síla **Fmax [N]** **s [N]**	Maximální síla **Fh [N]** ustálená **s [N]**	Střední síla **Fs [N]** ustálená **s [N]**	Rozkmit síly **ΔF [N]** **s [N]**	Koeficient tření **μ [-]** **s [-]**
4	2789,13 28,89	2589,56 26,51	2233,81 20,23	607,60 6,54	0,099742 0,008523
6	4189,34 45,68	3733,40 37,99	3364,07 30,58	774,66 7,85	0,099885 0,008627
8	6012,36 62,47	4944,81 50,45	4530,58 44,97	828,46 8,29	0,103055 0,009521
10	7010,48 74,36	6058,40 65,47	5683,22 55,71	842,30 8,88	0,107732 0,009645
12	8405,67 85,65	7332,83 75,28	6792,11 66,43	1081,66 10,01	0,109584 0,009623
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **1,5gm^{-2}**					
4	2741,57 28,23	2458,73 25,19	2154,93 20,11	503,89 5,50	0,095277 0,008824
6	3997,08 40,45	3584,52 37,15	3058,29 29,65	530,49 5,81	0,095740 0,007935
8	5491,52 55,47	4903,28 52,68	3798,07 35,58	561,48 6,07	0,097421 0,008439
10	5815,55 60,45	5439,47 55,14	4617,48 45,26	586,31 6,28	0,098006 0,008536
12	7626,64 77,58	6617,69 68,74	6277,18 63,48	681,02 7,13	0,102210 0,009835
Prací olej **AC PL 3802-39LV** množství maziva **2,0gm^{-2}**					
4	2544,16 27,47	2438,11 24,98	1714,07 19,12	381,92 4,35	0,090870 0,007528
6	3997,08 40,65	3395,23 35,48	3058,29 29,21	438,97 4,68	0,091356 0,005731
8	5156,23 53,68	3272,68 34,52	3053,24 28,45	475,92 5,01	0,092622 0,007389
10	5603,07 58,14	4875,10 50,15	3937,14 38,69	490,51 5,18	0,094338 0,007769
12	7864,04 80,47	5444,74 56,39	5151,58 49,61	555,12 6,11	0,095839 0,006835

8.2 Grafy průběhů měřených sil při protahování pásku

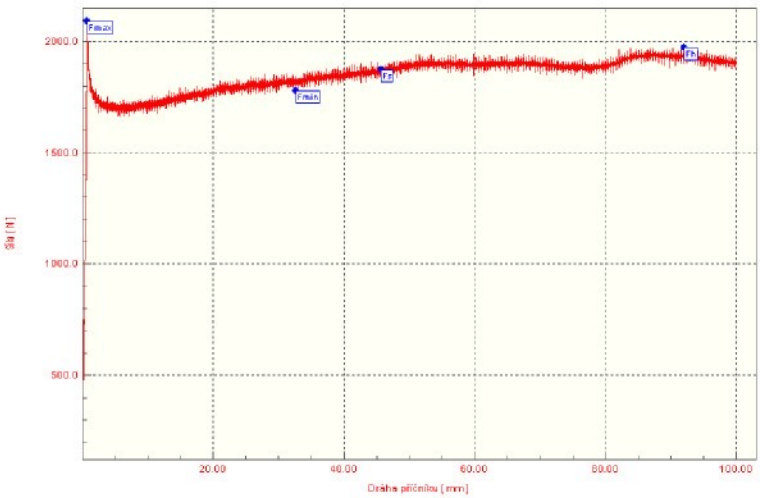
Následující grafy jsou záznamy průběhů měřených veličin F_{max}, F_h, F_s, F_{min}, (viz kapitola 7.2.) při nastavených vstupních technologických podmínkách tribologického testu. Každá kombinace zadaných vstupních parametrů představuje soubor testů z 10 měřených vzorků, z nichž je zde prezentován jeden charakteristický průběh. Ostatní grafy jednotlivých souborů testů zkoušek jsou uvedeny v přiloženém CD.

Grafy jsou rozděleny dle stanovené rychlosti posuvu protahovaného pásku v čelistech přípravku a nastaveném kontaktním tlaku v čelistech u tribologického testu.

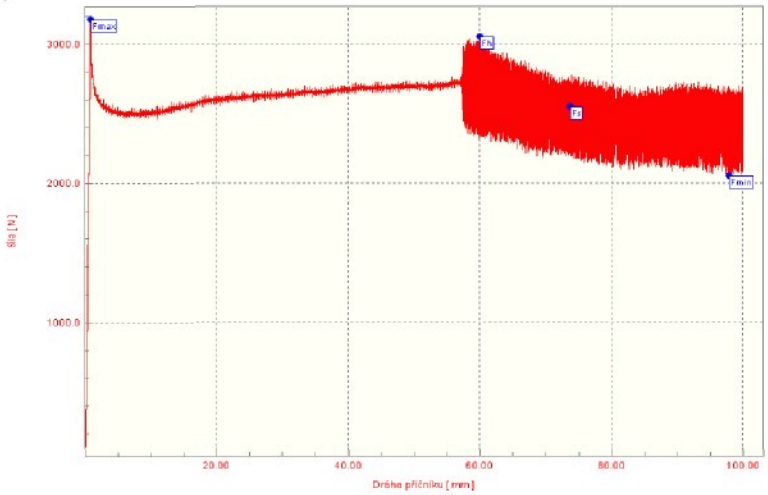
8.2.1 Rychlost posuvu: v=1mms^{-1}



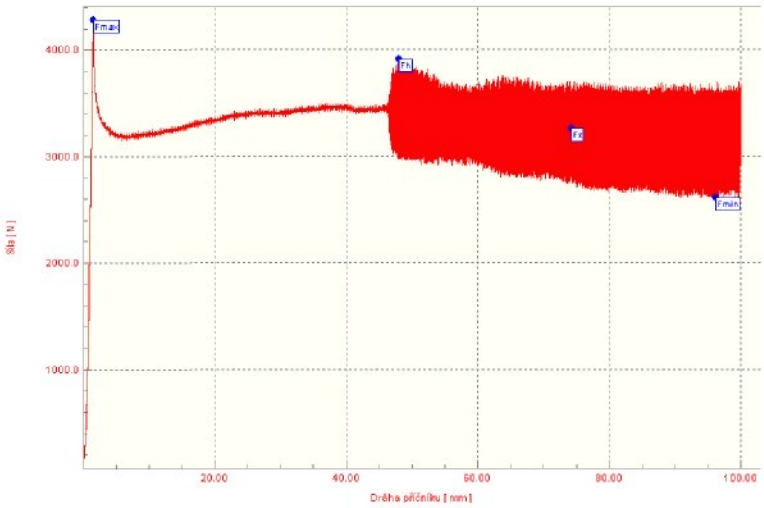
GRAF 1.: G 1/2 Kontaktní tlak: **p=2MPa**



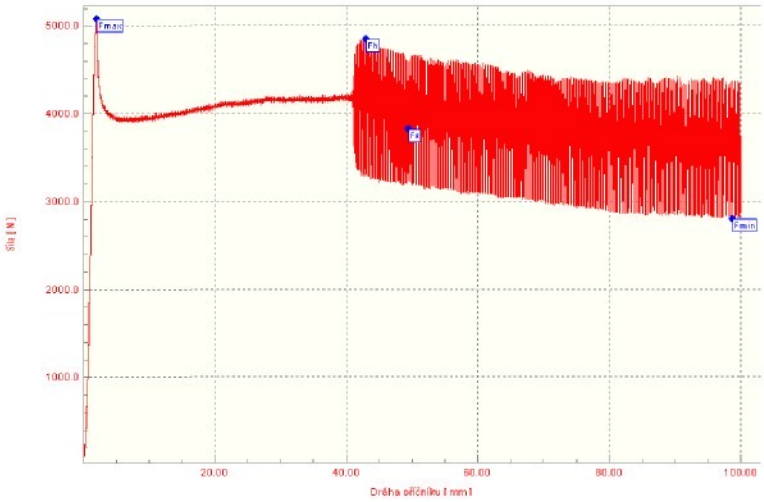
GRAF 2.: G 1/3 Kontaktní tlak: **p=3MPa**



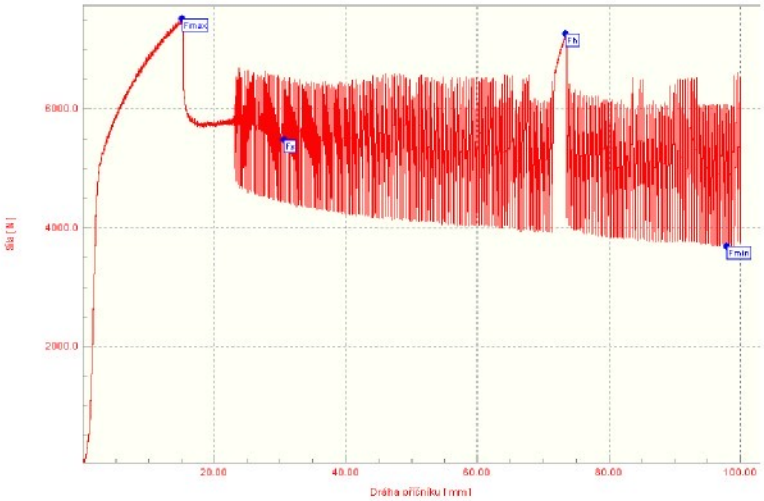
GRAF 3.: G 1/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**



GRAF 4.: G 1/5 Kontaktní tlak: **p=5MPa**

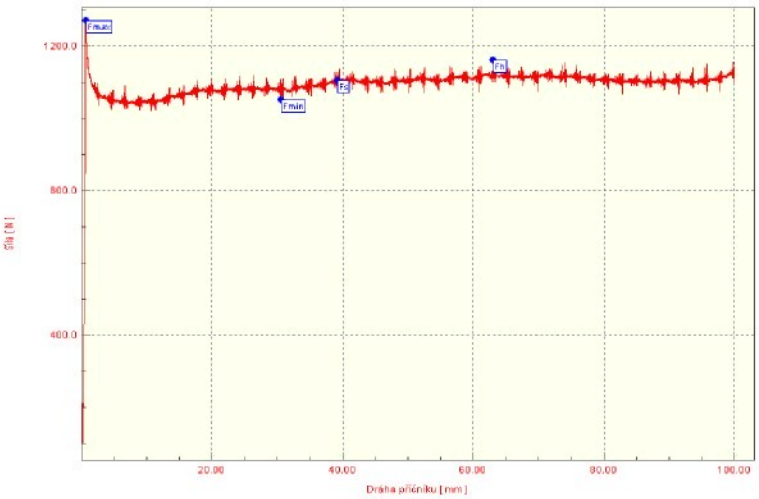


GRAF 5.: G 1/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**

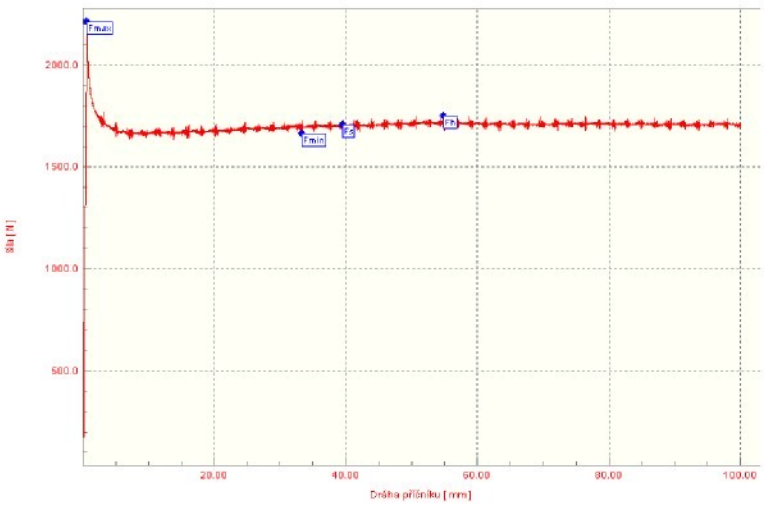


GRAF 6.: G 1/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**

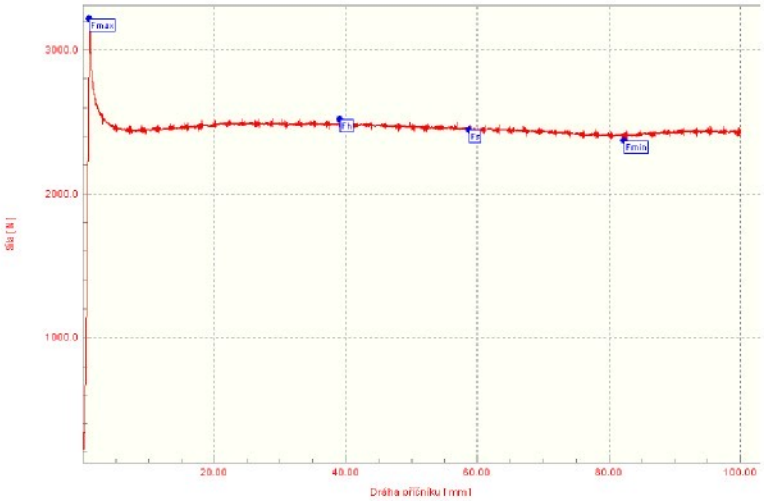
8.2.2 Rychlost posuvu: v=5mms^{-1}



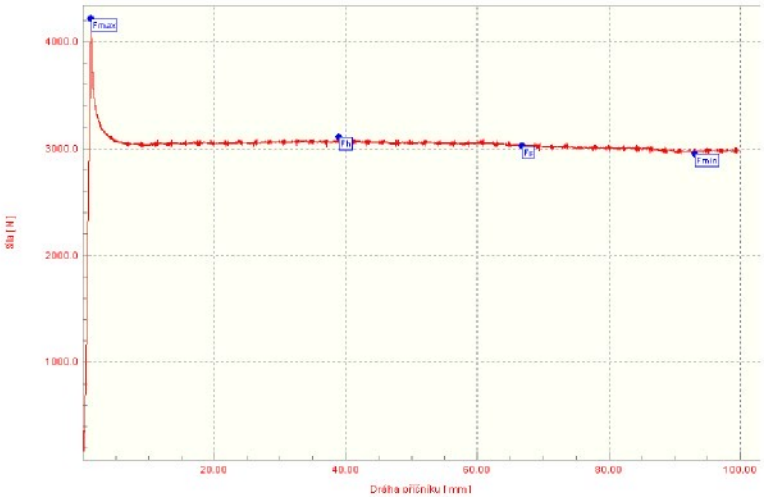
GRAF 7.: G 5/2 Kontaktní tlak: **p=2MPa**



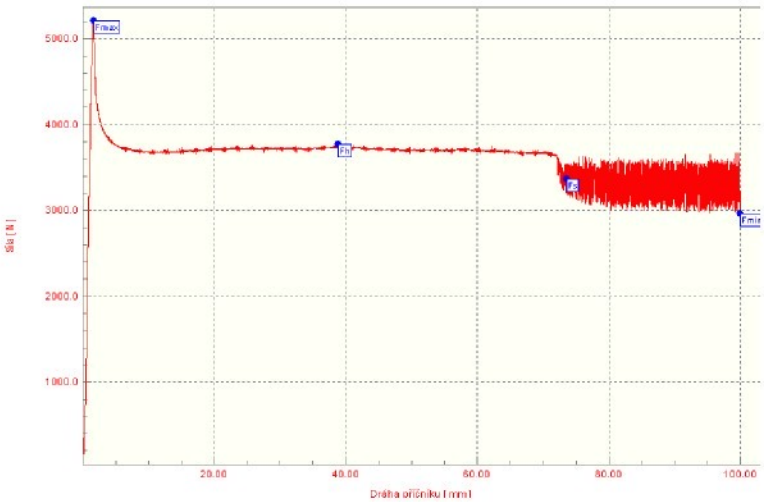
GRAF 8.: G 5/3 Kontaktní tlak: **p=3MPa**



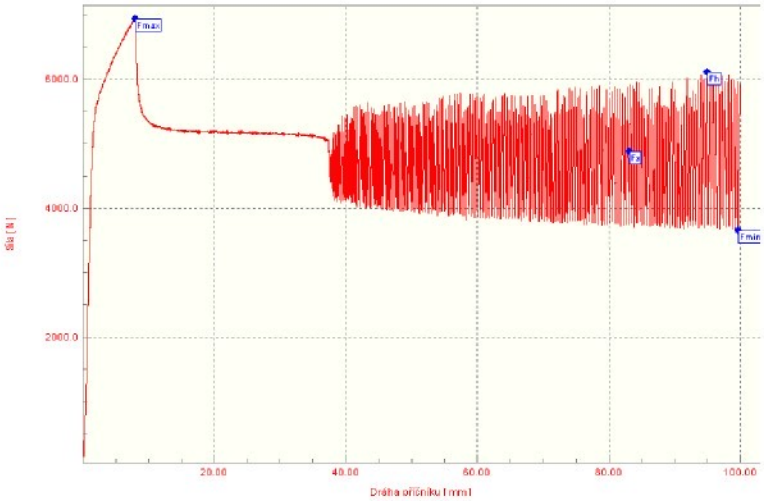
GRAF 9.: G 5/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**



GRAF 10.: G 5/5 Kontaktní tlak: **p=5MPa**

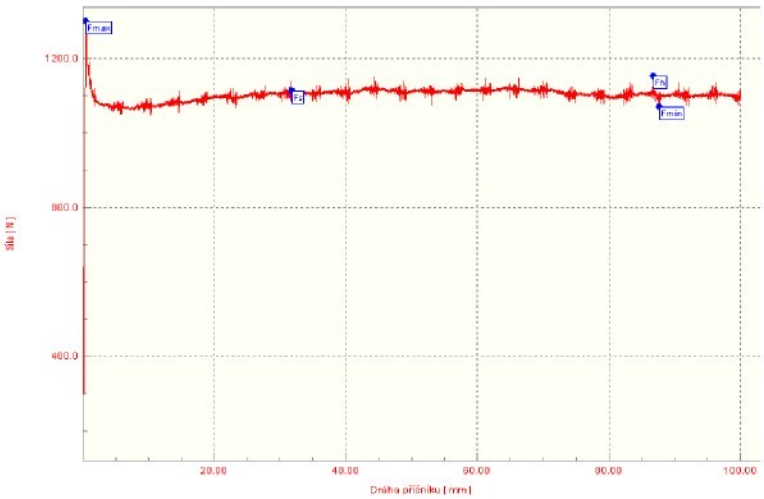


GRAF 11.: G 5/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**

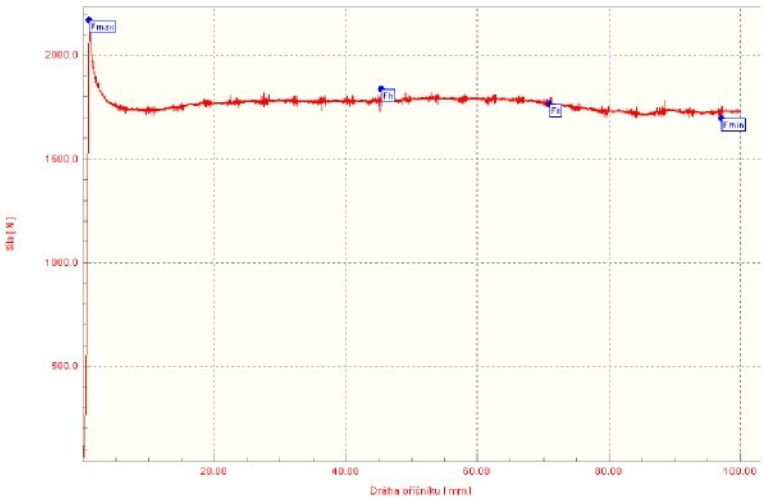


GRAF 12.: G 5/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**

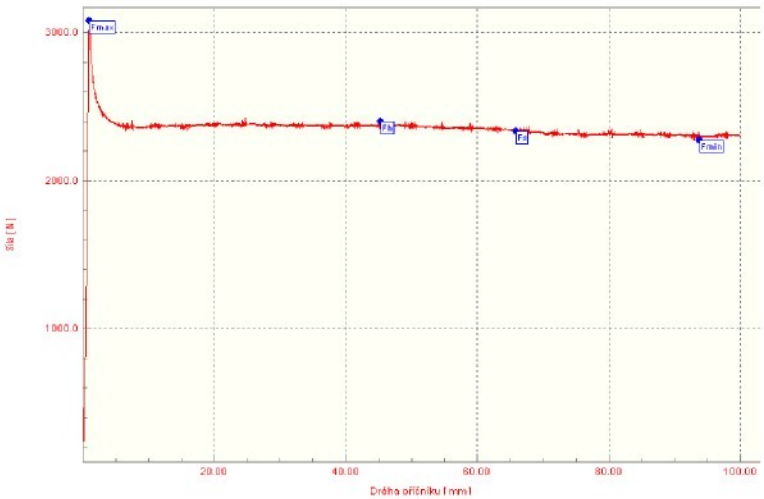
8.2.3 Rychlost posuvu: v=10mms^{-1}



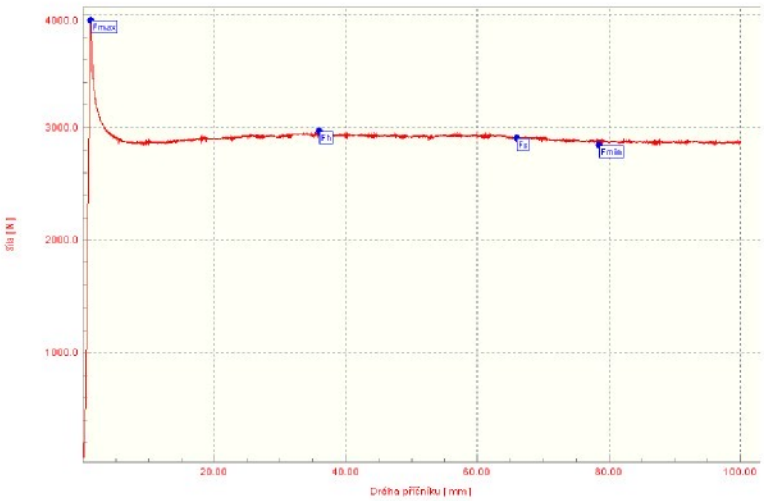
GRAF 13.: G 10/2 Kontaktní tlak: **p=2MPa**



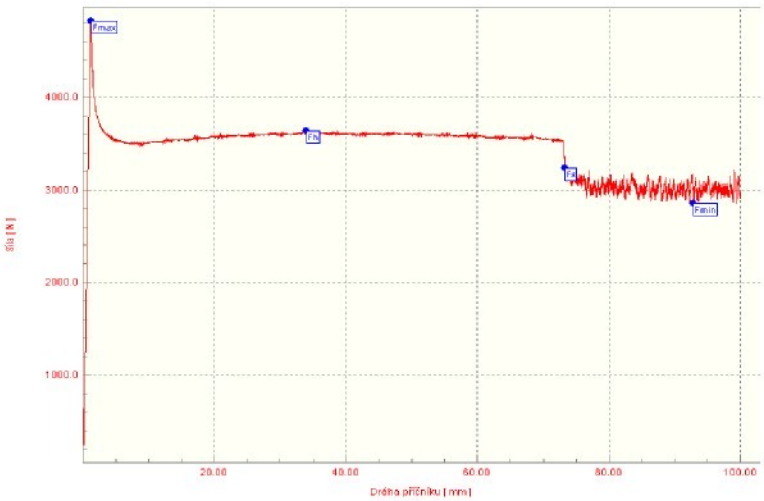
GRAF 14.: G 10/3 Kontaktní tlak: **p=3MPa**



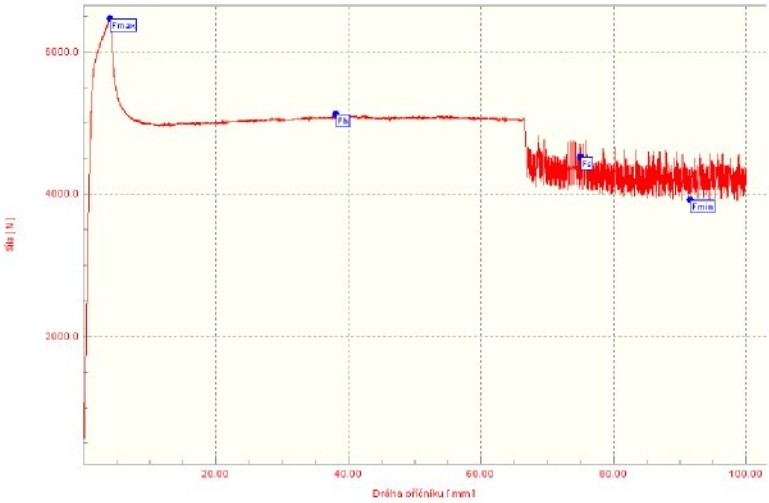
GRAF 15.: G 10/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**



GRAF 16.: G 10/5 Kontaktní tlak: **p=5MPa**



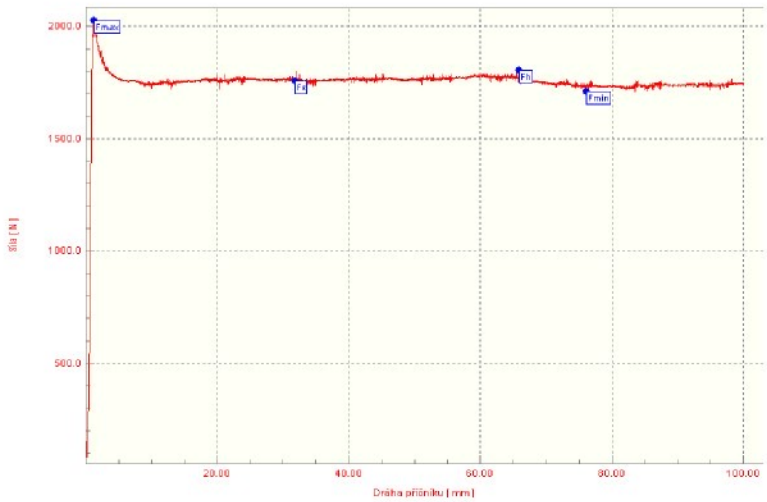
GRAF 17.: G 10/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**



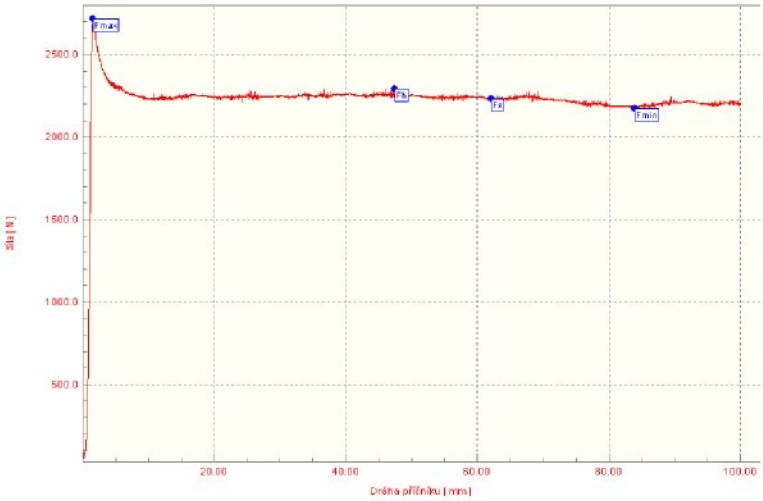
GRAF 18.: G 10/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**

8.2.4 Rychlost posuvu: v=25mms^{-1}

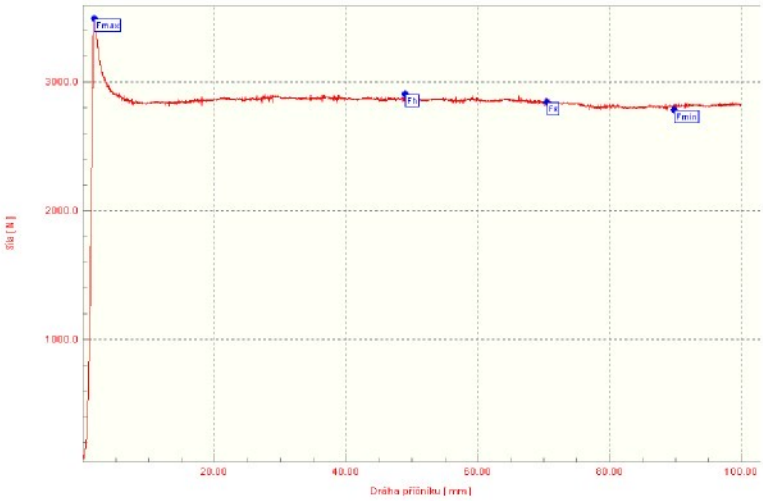
GRAF 19.: G 25/2 Kontaktní tlak: **p=2MPa**



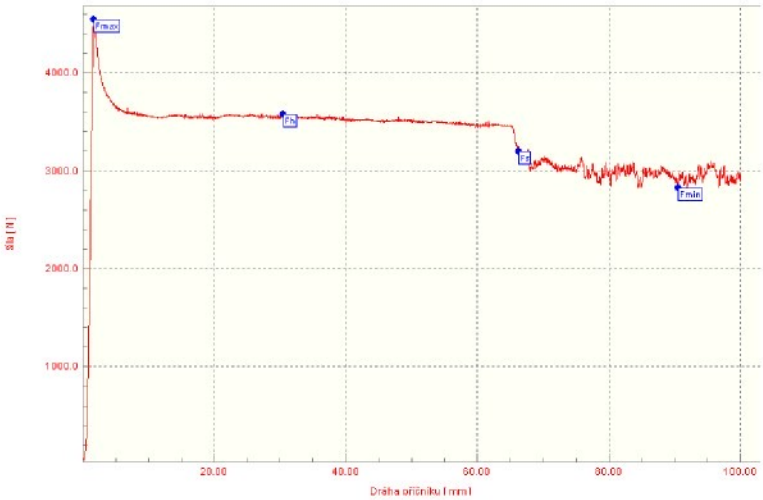
GRAF 20.: G 25/3 Kontaktní tlak: **p=3MPa**



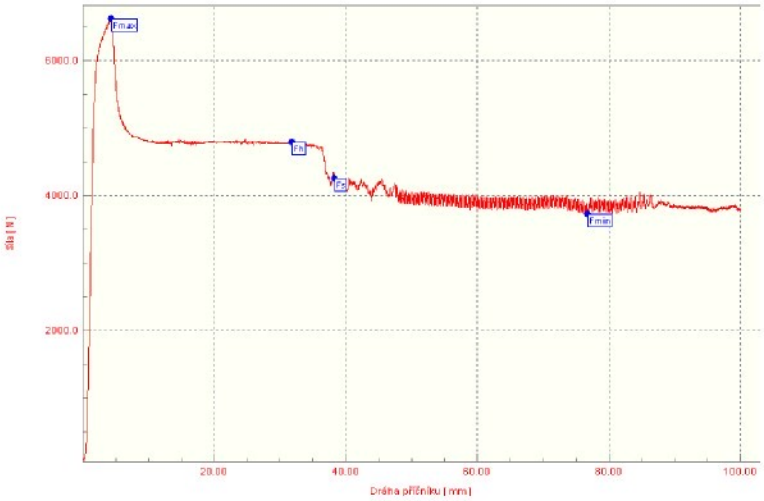
GRAF 21.: G 25/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**



GRAF 22.: G 25/5 Kontaktní tlak: **p=5MPa**



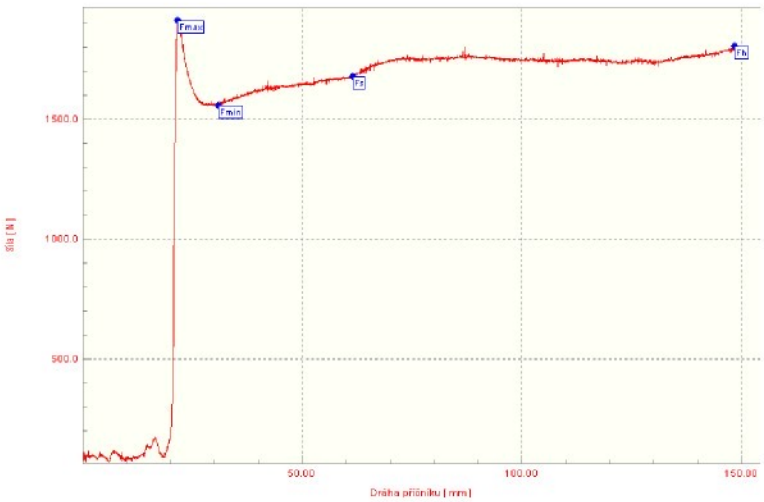
GRAF 23.: G 25/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**



GRAF 24.: G 25/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**

8.2.5 Rychlost posuvu: v=50mms^{-1}

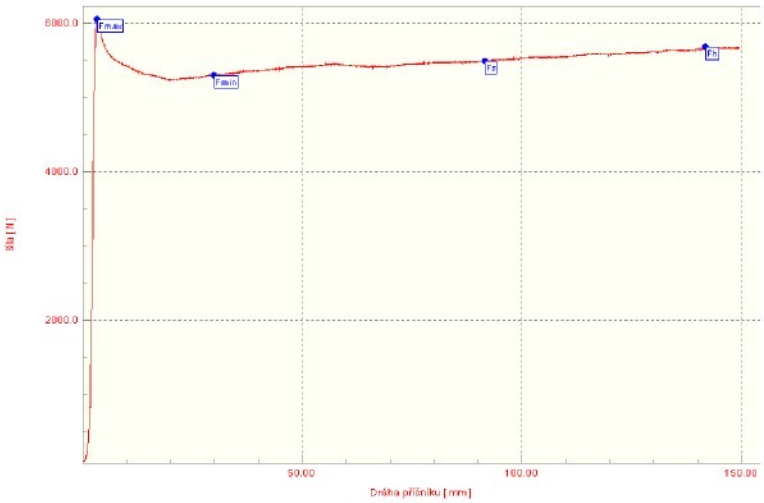
GRAF 25.: G 50/2 Kontaktní tlak: **p=2MPa**



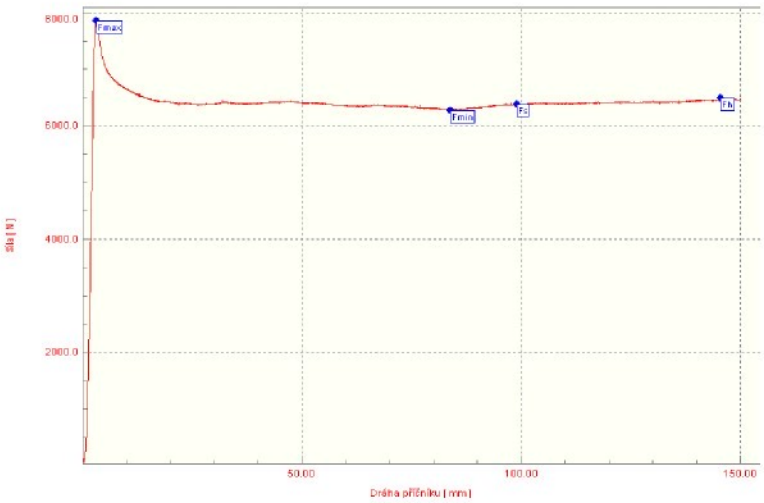
GRAF 26.: G 50/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**

GRAF 27.: G 50/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**

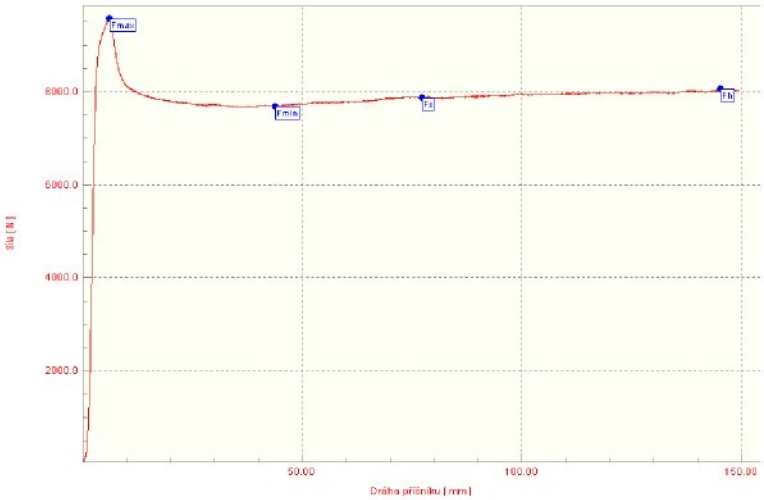
GRAF 28.: G 50/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**



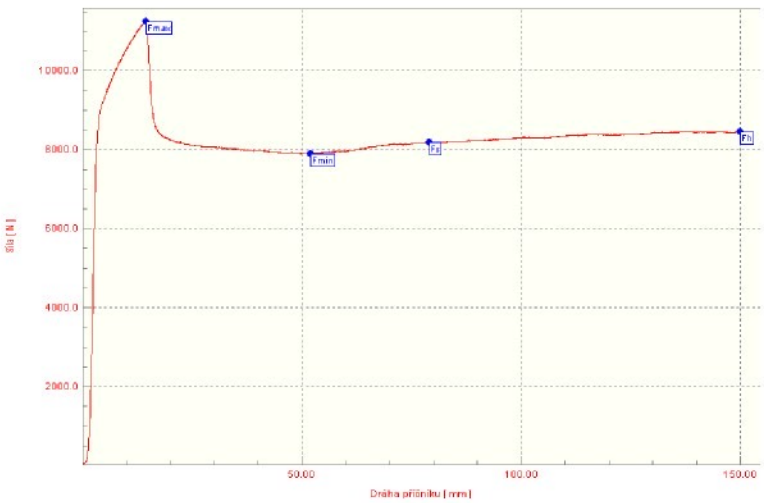
GRAF 29.: G 50/10 Kontaktní tlak: **p=10MPa**



GRAF 30.: G 50/12 Kontaktní tlak: **p=12MPa**

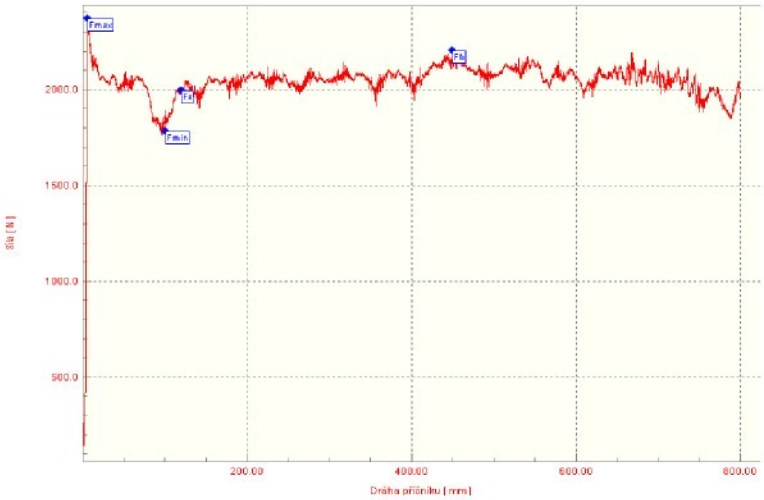


GRAF 31.: G 50/14 Kontaktní tlak: **p=14MPa**

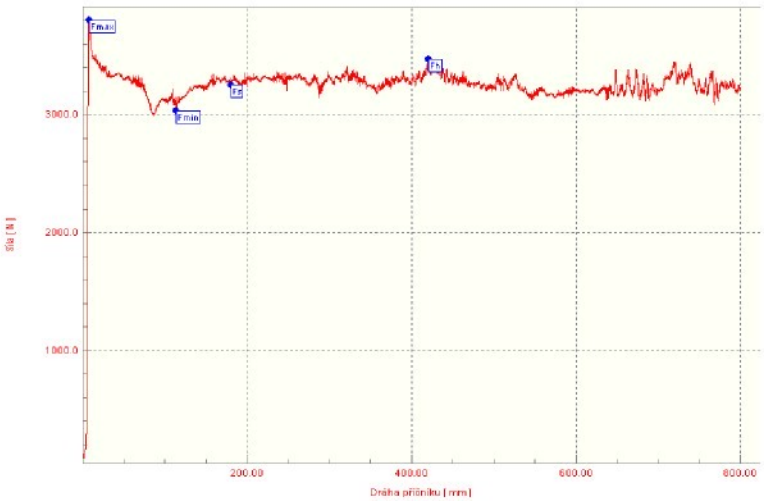


GRAF 32.: G 50/16 Kontaktní tlak: **p=16MPa**

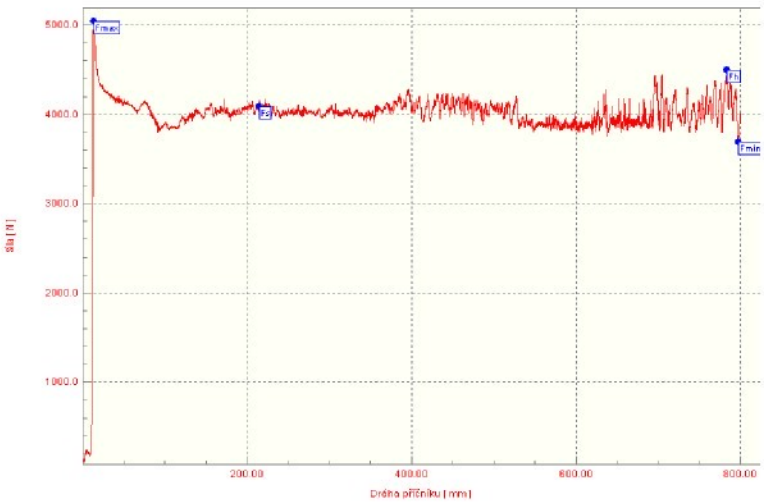
8.2.6 Rychlost posuvu: v=100mms^{-1}



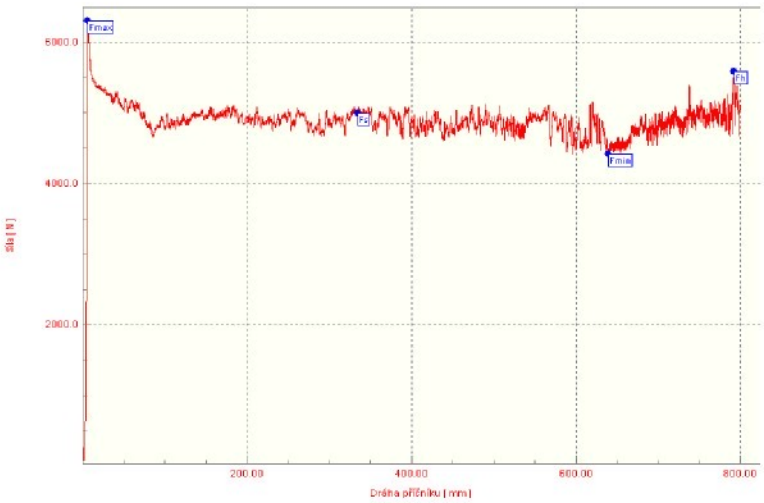
GRAF 33.: G 100/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**



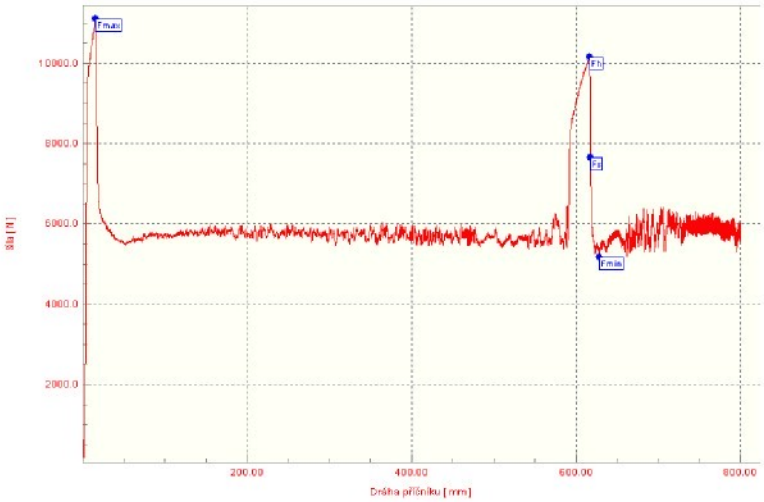
GRAF 34.: G 100/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**



GRAF 35.: G 100/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**

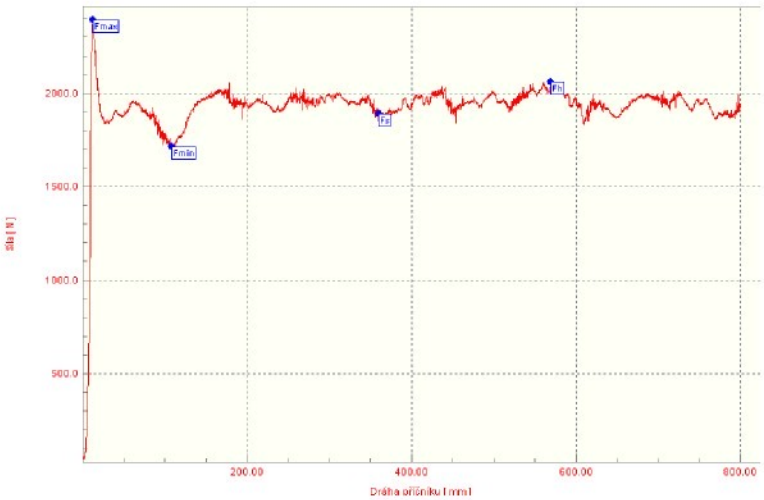


GRAF 36.: G 100/10 Kontaktní tlak: **p=10MPa**

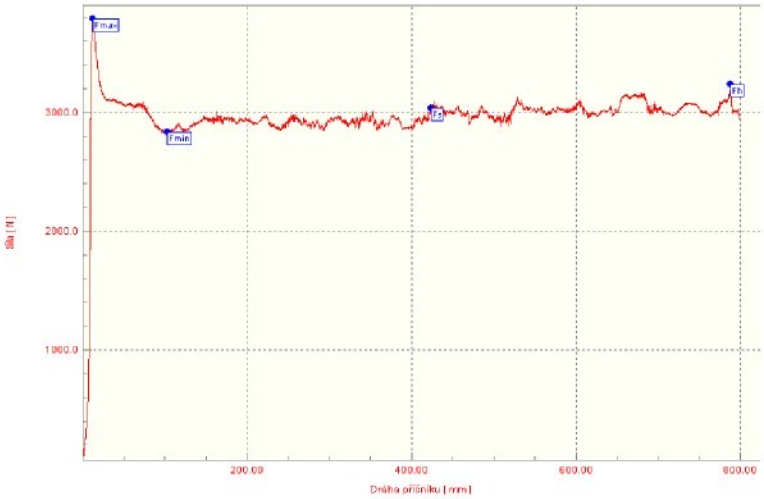


GRAF 37.: G 100/12 Kontaktní tlak: **p=12MPa**

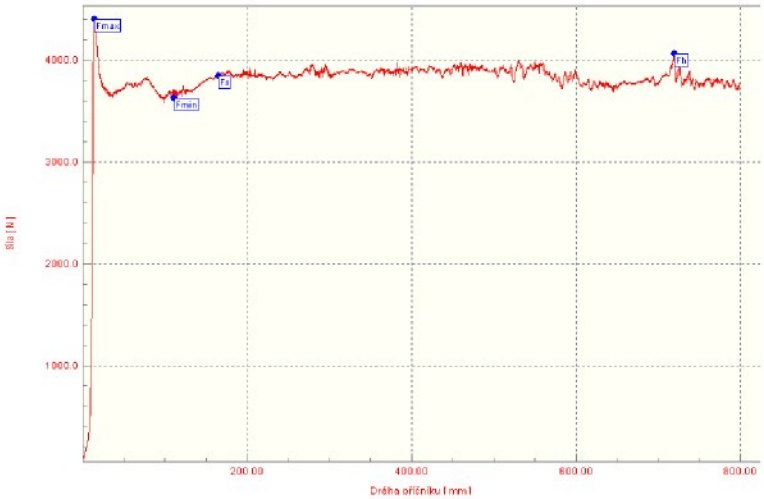
8.2.7 Rychlost posuvu: v=200mms^{-1}



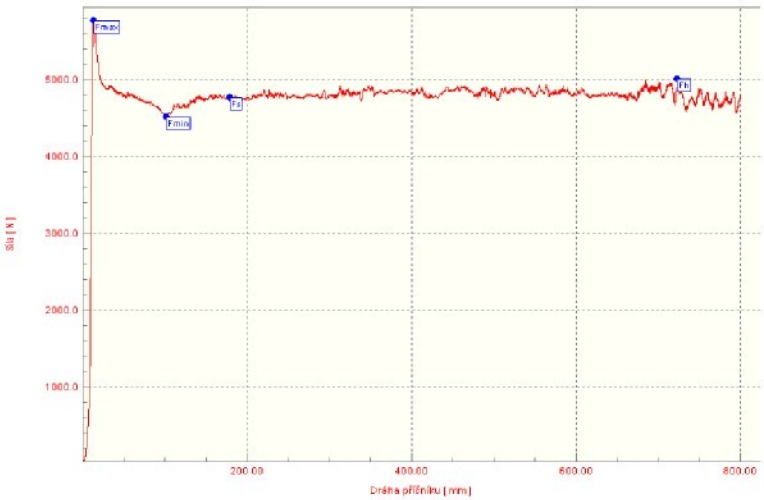
GRAF 38.: G 200/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**



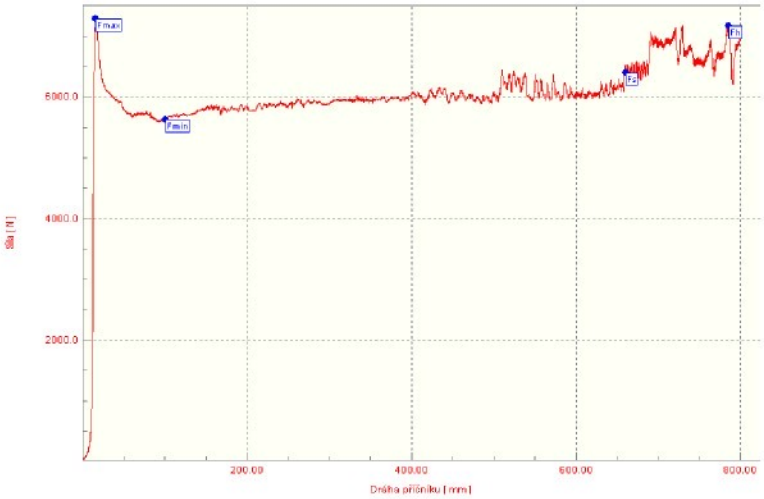
GRAF 39.: G 200/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**



GRAF 40.: G 200/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**

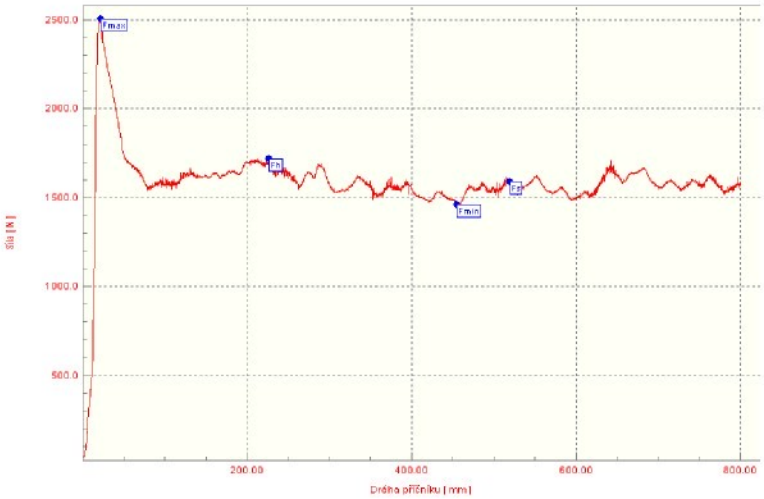


GRAF 41.: G 200/10 Kontaktní tlak: **p=10MPa**

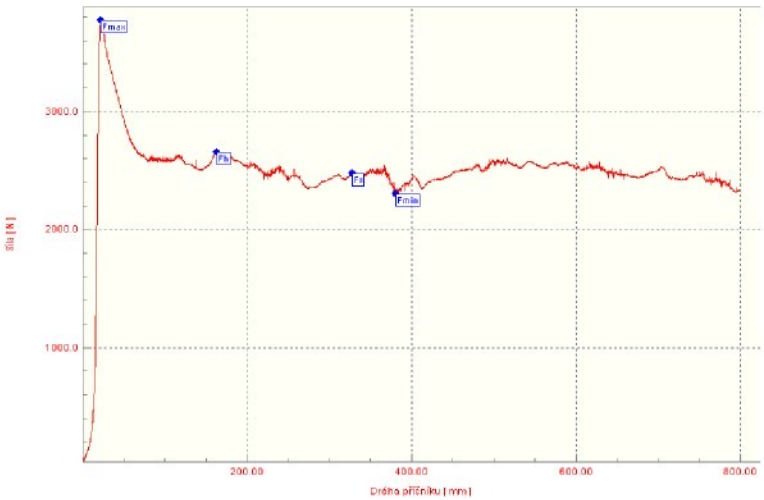


GRAF 42.: G 200/12 Kontaktní tlak: **p=12MPa**

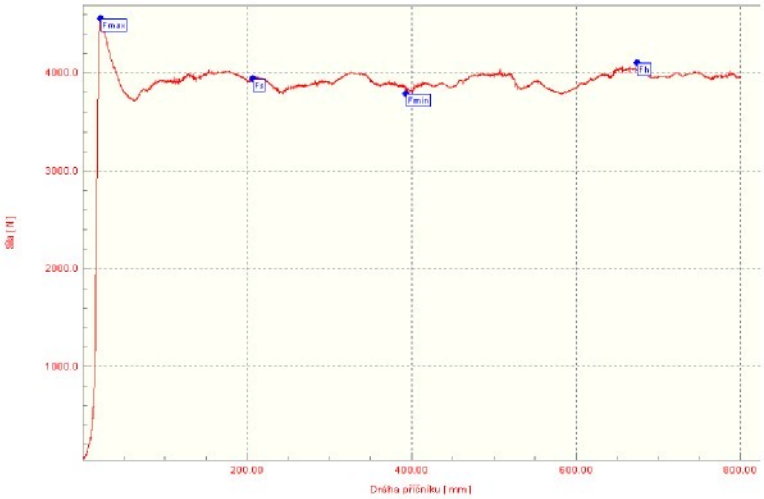
8.2.8 Rychlost posuvu: v=300mms^{-1}



GRAF 43.: G 300/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**

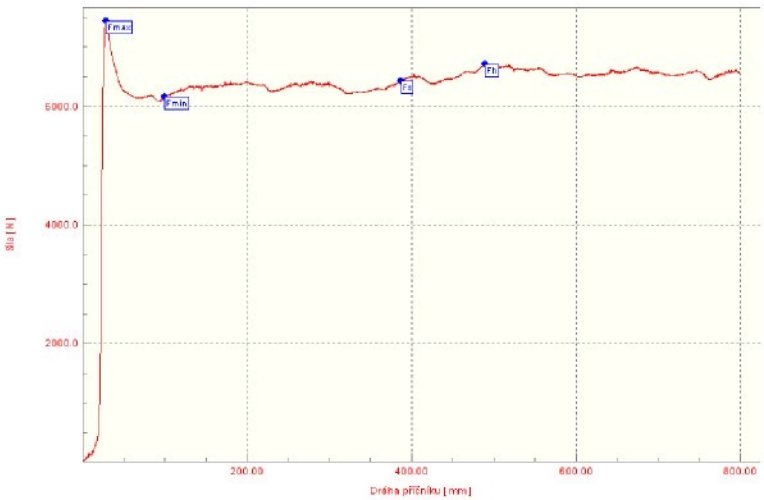


GRAF 44.: G 300/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**



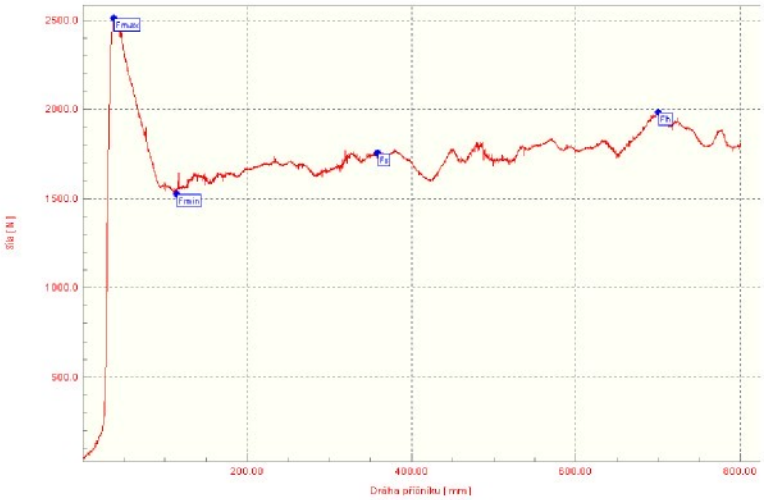
GRAF 45.: G 300/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**

GRAF 46.: G 300/10 Kontaktní tlak: **p=10MPa**

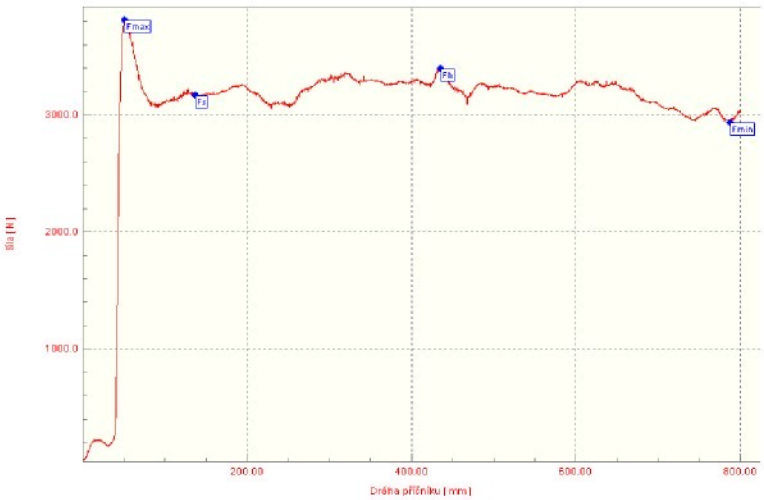


GRAF 47.: G 300/12 Kontaktní tlak: **p=12MPa**

8.2.9 Rychlost posuvu: v=400mms^{-1}

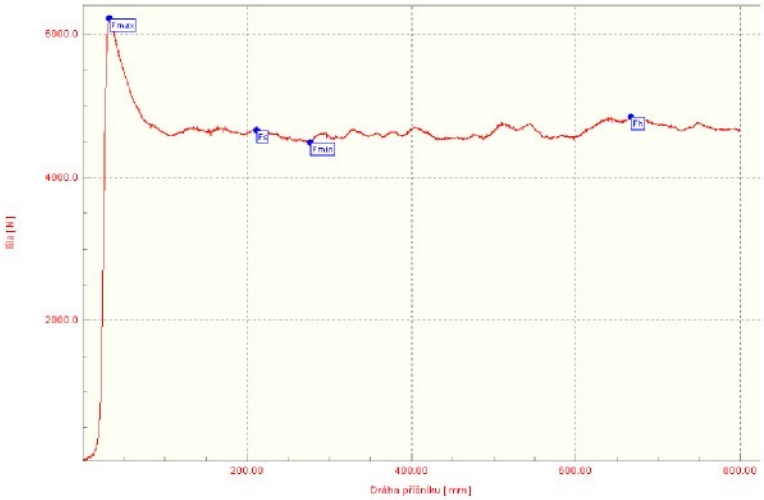


GRAF 48.: G 400/4 Kontaktní tlak: **p=4MPa**



GRAF 49.: G 400/6 Kontaktní tlak: **p=6MPa**

GRAF 50.: G 400/8 Kontaktní tlak: **p=8MPa**



GRAF 51.: G 400/10 Kontaktní tlak: **p=10MPa**

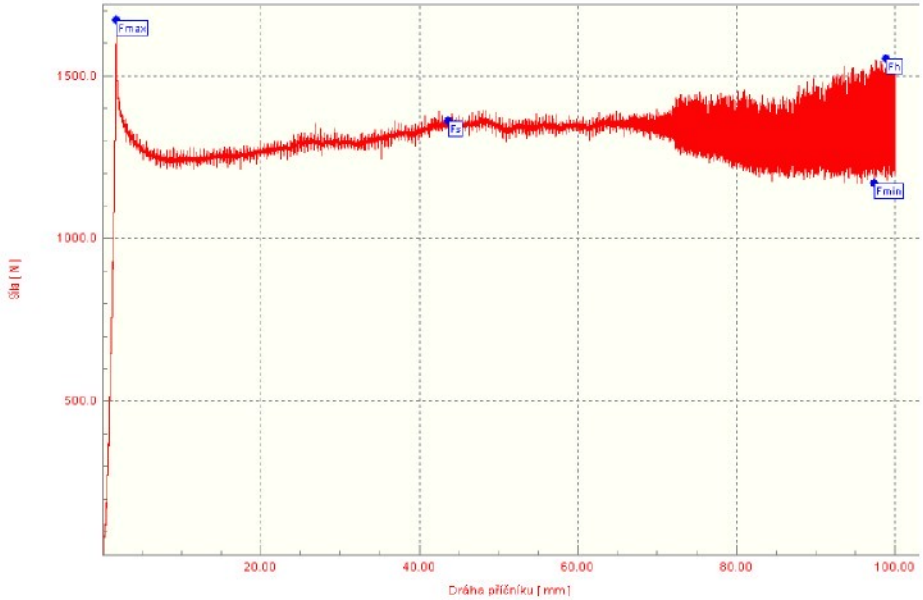
GRAF 52.: G 400/12 Kontaktní tlak: **p=12MPa**

8.3 Dílčí hodnocení charakteristik grafů dle průběhů naměřených sil pro zvolené rychlosti

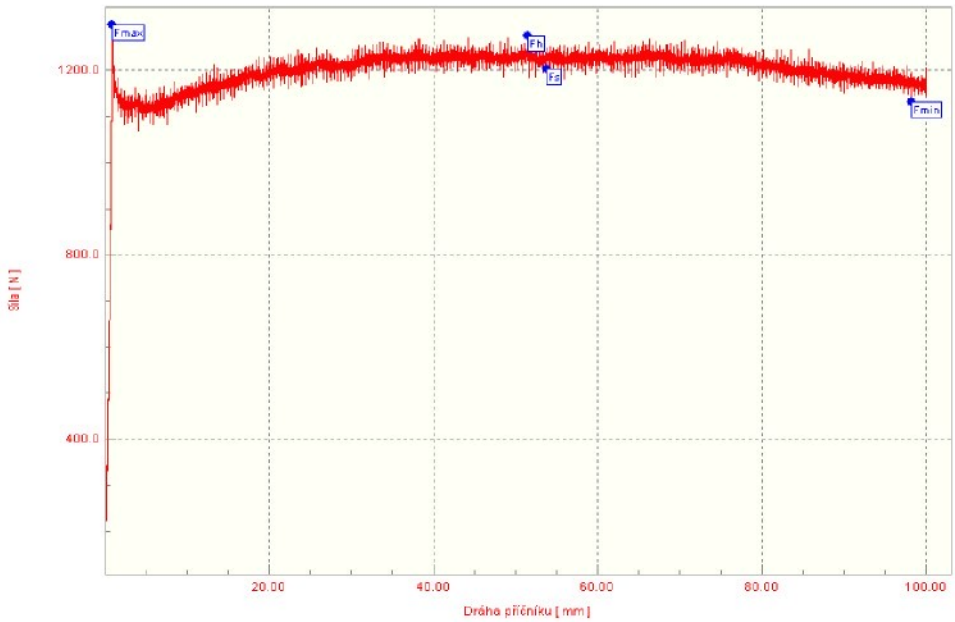
Prezentované grafy a jejich následné hodnocení získaných výsledků experimentálního měření bylo provedeno z důvodu rozsahu práce pouze pro množství maziva 1,5gm^{-2}. Toto množství maziva bylo vybráno jako střední aritmetický průměr ze tří zvolených množství (1,0; 1;5; 2,0gm^{-2}) nanášeného maziva - pracího oleje AC PL 3802-39LV na povrch substrátu a současně odpovídá množství nanášenému v reálných podmínkách lisoven.

Jako příklad porovnání naměřených grafů a tedy výsledných hodnot sil potřebných pro tažení plechů se zinkovým povlakem jsou pro názornost uvedeny grafy, kde na obr.8.1. je množství maziva 1,0gm^{-2} a na obr.8.2. je množství maziva 2,0gm^{-2}. Kromě této změny v množství naneseného maziva zůstaly ostatní podmínky testu zachovány (v=1mms^{-1}, p=2MPa). Na prezentovaných grafech se názorně projevuje vliv testovaného množství maziva, pro nižší množství maziva (1,0gm^{-2}) je materiál náchylnější k zadírání, neboť se zde

vyskytuje jeho charakteristika tohoto jevu v podobě rozkmitu sil ΔF, jak je zřetelné z grafu na obr.8.1..



***Obr.8.1.**: Příklad průběhu naměřených hodnot sil při protahování pásku.*
$v=1mms^{-1}$, p=2MPa, množství maziva $1,0gm^{-2}$



***Obr.8.2.**: Příklad průběhu naměřených hodnot si při protahování pásku.*
$v=1mms^{-1}$, p=2MPa, množství maziva $2,0gm^{-2}$

Na jednotlivých grafech získaných při změnách technologických parametrů lze poměrně snadno, dle průběhových charakteristik prezentovaných grafů, zjistit začátek projevů zadírání při protahování pásku. Vznik zadírání iniciuje zvláště velmi malá rychlost posuvu materiálu v nástroji ($v=1mms^{-1}$) a z hlediska kontaktu třecích povrchů tak může dojít k místnímu svařování povrchových nerovností třecích dvojic a tedy ke vzniku „ mikrosvarů“. Ty jsou

příčinou vytváření tzv. „stick-slip"efektu (viz.kapitola 4.2.5.1.) mezi testovaným substrátem a materiálem použitým na čelisti přípravku. „Stick-slip"efekt a tím tedy i intenzitu zadírání určuje rozkmit síly ΔF, jeho naměřené hodnoty pro jednotlivé technologické podmínky jsou uvedeny v tabulkách 11 až 20. Obecně lze definovat velikost zadírání a tím i sklonu materiálu k tomuto jevu, vznikajícím při tažení plechů s povlaky na základě hodnoty amplitudy sil ΔF. Čím bude tento rozkmit větší, tím více se projeví zadírání, v tomto případě u plechů s povlakem zhotoveným žárovým zinkováním.

Zjišťovaná veličina při sledování výskytu zadírání protahování pásku, je i maximální síla F_{max}, stanovena jako maximální hodnota dosažené síly během testu. Velikost této hodnoty je posuzována z hlediska fyzikální podstaty tření, neboť při vlastním protahování pásku dochází ze statického tření, tedy klidového stavu pásku (zde je většinou dosaženo hodnoty F_{max}), pak následuje prudký pokles síly v důsledku přechodu do tření dynamického, tedy v uvádění tělesa do pohybu. Během protahování pásku jsou zaznamenávány i ostatní měřené veličiny F_h, F_s, F_{min} (viz.kapitola 7.2.).

8.3.1 Hodnocení rychlosti posuvu: v= 1mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p= 2;3;4 5;6;8MPa**

Při použití kontaktního tlaku **p=2MPa** je z průběhu grafu (G 1/2) patrné, že již při tomto malém tlaku dochází ke vzniku zadírání a vyskytuje se v celém průběhu měřeného úseku pásku v délce 100mm. Vznik zadírání iniciuje zvláště použitá velmi malá rychlost posuvu materiálu v nástroji (v =1mms^{-1}) a z hlediska kontaktu třecích povrchů tak může dojít k místnímu svařování, rozkmit sil jenž svařování charakterizuje je $\Delta F_{2/1}$=157,44N

kde $\Delta F_{X/Y}$ X je kontaktní tlak
Y je rychlost posuvu

Pro nastavené technologické podmínky a kontaktní tlak **p=3MPa** dochází k místnímu zadíraní z důsledku nastavení vyššího tlaku v čelistech zkušebního přípravku, zvyšuje se i rozkmit sil $\Delta F_{3/1}$ =271,03N a efekt „stick-slip"spolu s mikrosvary se zde opět vyskytuje po celý průběh měření a je patrný z grafu měření (G 1/3).

Hodnota kontaktního tlaku **p=4MPa** je určující parametr z hlediska nastavení technologických podmínek pro laboratorní testy, neboť tohoto tlaku se dosahuje u tažných nástrojů při reálném tažení karosářských výlisků Při použití tohoto tlaku dochází k pokračujícímu projevu zadírání (G1/4), kde při protahování pásku na dráze cca 60mm, z celkové délky 100mm, dochází ke vzniku zadírání, což prezentuje rozkmit sil ΔF, který je v porovnání s použitým tlakem 3MPa přibližně třikrát vyšší ($\Delta F_{3/1}$=271,03N pro 3MPa a $\Delta F_{4/1}$=834,99N pro 4MPa).

S rostoucím kontaktním tlakem na hodnoty **p=5;6;8MPa** se u testovaném vzorku zkracuje délka měřeného úseku, kdy dochází k iniciaci vzniku zadírání (pro 5MPa-50mm,

6MPa-40mm, 8MPa-30mm) a na druhé straně se zvyšují výsledné charakteristiky sil potřebných na protažení vzorku (G 1/5, 1/6, 1/8). Těmito charakteristikami se potvrzuje závislost, že se stoupajícími hodnotami kontaktního tlaku rostou i síly potřebné k tažení, jak je patrné z tabulky **11** a tedy i rozkmity sil charakterizující zadírání ($\Delta F_{5/1}$ =1291,68N pro 5MPa, $\Delta F_{6/1}$=1986,99N pro 6MPa, $\Delta F_{8/1}$=4519,60N pro 8MPa)

V celkovém hodnocení naměřených výsledků pro rychlost **v=1mms^{-1}**, byla zjištěna nejméně příznivá kombinace pro hluboké tažení z tribologického hlediska : malá rychlost tažení a vysoký kontaktní tlak na přidržovači (rychlost v=1mms^{-1}a tlak p=8MPa), kdy se při těchto podmínkách nepodařilo protáhnout všechny pásky z celkového počtu zkoušených při samotném tribologickém testu experimentálním měření.

8.3.2 Hodnocení rychlosti posuvu: v=5mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p= 2; 3;4;5;6;8MPa**

Pro zadané podmínky, kontaktního tlaku **p=2MPa** je z grafu (G 5/2) viditelné, že v porovnání s rychlostí 1mms^{-1-} a stejnou velikostí kontaktního tlaku, má průběh grafu odlišný charakter. Amplituda rozkmitu síly se mění s ohledem ke snížení možnosti vzniku zadírání se stoupající rychlostí. V porovnání s rozkmitem síly pro rychlost v=1mms^{-1} a tlak p=2MPa, kdy $\Delta F_{2/1}$=157,44N je v tomto případě $\Delta F_{2/5}$=119,78N.

Pro kontaktní tlak **p=3MPa** graf (G 5/3) vykazuje stejný charakter typický pro tuto rychlost a rozkmit síly z hlediska zadírání se vlivem rostoucího tlaku zvyšuje na hodnotu $\Delta F_{3/5}$=124,16N.

Pro kontaktní tlak **p=4MPa** si graf (G 5/4) zachovává svůj obdobný charakter, rozkmit síly se zvyšuje na $\Delta F_{4/5}$=159,34N.

S rostoucím tlakem **p=5MPa** v grafu (G 5/5) rostou též všechny měřené veličiny, včetně charakteristiky zadírání $\Delta F_{5/5}$=200,57N.

Při tlaku **p=6MPa** se charakter průběhu křivky v grafu (G 5/6) mění, od měřené vzdálenosti cca 70mm až do konce měřeného úseku (100mm), se projevuje větší hodnota rozkmitu sil $\Delta F_{6/5}$=570,20N, což je nárůst vzhledem k hodnotě u tlaku 5MPa 2,8krát.

Pro kontaktní tlak **p=8MPa** z průběhu grafu (G 5/8) lze vyčíst, že výrazně stoupají hodnoty všech měřených veličin (viz.tabulka **12**) a tím i zadírání se začíná projevovat už na délce cca 65mm měřeného úseku a opět až do jeho konce, tedy 100mm. Hodnota rozkmitu sil je $\Delta F_{8/5}$=1560,59N, což je nárůst vzhledem k hodnotě u tlaku nižšího (6MPa) přibližně třikrát.

8.3.3 Hodnocení rychlosti posuvu: v=10mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p=2;3;4;5;6;8MPa**

Grafy všech tlaků pro hodnotu této rychlosti mají odlišný charakter, oproti předcházející charakteristice pro v=5mms^{-1}. Mezi jednotlivými místními přidřeními se zvětšila vzdálenost, tedy prodloužila se frekvence výskytu zadírání.

Pro tlaky **p=2;3;4;5MPa** mají grafy (G 10/2, 10/3, 10/4, 10/5) obdobný charakter jen rozkmit síly je pro každý tlak jiný ($F_{2/10}$=120,95N, $\Delta F_{3/10}$=128,43N, $\Delta F_{4/10}$=137,09N, $\Delta F_{5/10}$=185,19N).

Při nastavení tlaku **p= 6MPa** již můžeme pozorovat (G 10/6) výrazné zadírání zejména ve druhé polovině měřené vzdálenosti pásku tj.cca od 65mm. Také zde je patrný nárůst rozkmitu sil jako charakteristiky zadírání a to na hodnotu $\Delta F_{6/10}$=440,92N,

Při zvolené hodnotě tlaku **p=8MPa,**dosahuje rozkmit sil $\Delta F_{8/10}$=605,70N a charakterizuje zadírání, jež se objevilo již v 65-ti mm měřeného úseku protahovaného pásku (G 10/8).

8.3.4 Hodnocení rychlosti posuvu: v=25mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p=2;3;4;5;6;8MPa**

Grafy (G 25/2, 25/3, 25/4, 25/5) pro zvolené tlaky **p=2;3;4;5MPa** se vyznačují společným znakem, kdy zadírání se zde projevuje střídáním oblastí místního svařování třecích dvojic a tedy rozkmitem sil s úseky s nižším průběhem měřených veličin, vše v závislosti na konkrétní hodnotě zadaného kontaktního tlaku. Jejich rozkmit sil roste s ohledem na zvyšování tlaku $\Delta F_{2/25}$=111,51N, $\Delta F_{3/25}$ =126,48N, $\Delta F_{4/25}$=165,78N, $\Delta F_{5/25}$=289,11N.

Při kontaktním tlaku **p=6MPa** se průběh (G 25/6) odlišuje od nižších tlaků tím, že přibližně v 65mm měřené délky pásku nastává větší rozvoj zadírání ($\Delta F_{6/25}$=421,35N), který se projevuje odlišným průběhem v této měřené oblasti až do jejího konce tj. 100mm.

Obdobná skutečnost nastává i při kontaktním tlaku **p=8MPa,** ale poněkud dříve a to již v měřené délce 35 mm a frekvence zadírání zde ještě roste v souvislosti s použitým tlakem, rozkmit sil má hodnotu $\Delta F_{8/25}$=703,23N (G 25/8).

8.3.5 Hodnocení rychlosti posuvu: v=50mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p=2;4;6;8;10;12;14;16MPa**

Pracovní graf (G 50/2) pro kontaktní tlak **p=2MPa** je charakterizován svými výkmity, jak dochází ke styku třecích dvojic pouze v malých oblastech povrchu. Rozkmit sil jako projev zadírání je $\Delta F_{2/50}$=84,29N.

Pro kontaktní tlaky **p=4;6;8;10;12MPa** mají průběhy grafů (G 50/4, 50/6, 50/8, 50/10, 50/12) obdobný charakter, jen s tím rozdílem, že v závislosti na velikosti tlaků se mění rozkmity sil a to na jednotlivé hodnoty: $\Delta F_{4/50}$=153,30N, $\Delta F_{6/50}$=191,05N, $\Delta F_{8/50}$=197,96N, $\Delta F_{10/50}$=287,29N, $\Delta F_{12/50}$=303,82N.

Průběhy grafů (G 50/14 ,50/16) pro vysoké kontaktní tlaky **p=14;16MPa** jsou odlišné tím, že se zde projevuje velký nárůst maximální síly, která se u obou zmiňovaných tlaků pohybuje v hodnotách $F_{max14/50}$=9459,17N a $F_{max16/50}$=11122,86N, následně průběh rychle klesá na hodnoty, kde pak jsou měřeny jednotlivé charakteristiky sil $F_{h14/50}$=7928,12N a $F_{h16/50}$=8535,95N pro výpočet koeficientu tření a též rozkmit sil jako projev zadírání $\Delta F_{14/50}$=360,29N, $\Delta F_{16/50}$=525,25N.

Kontaktních tlaků **14** a **16MPa** bylo možno dosáhnout jen za těch podmínek tažení, že při rychlosti 50mms^{-1} byl v rámci experimentální měření této práce zjištěn nejmenší koeficient tření (viz tabulky 15 a 16) s ohledem na kombinace rychlostí a tlaků, můžeme říci že i výskyt zadírání.

8.3.6 Hodnocení rychlosti posuvu: v=100mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p=4;6;8;10;12MPa**

Získané pracovní grafy (G100/4, 100/6, 100/8, 100/10, 100/12) odpovídají závislosti narůstající hodnoty tlaku, kde úměrně s jeho zvyšováním rostou též hodnoty maximální síly ($F_{max4/100}$=2428,66N,$F_{max6/100}$=3765,35N,$F_{max8/100}$=4953,12N,$F_{max10/100}$=7023,11N,$F_{max12/100}$=10749,29N) a současně s tím i hodnoty určující zadírání, prezentovány rozkmitem sil při vlastním protahování pásku ($\Delta F_{4/100}$=383,37N, $\Delta F_{6/100}$=425,52N, $\Delta F_{8/100}$=523,11N, $\Delta F_{10/100}$=929,23N, $\Delta F_{12/100}$=1018,97N).

8.3.7 Hodnocení rychlosti posuvu: v=200mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p=4;6;8;10;12MPa**

Grafy (G 200/4, 200/6, 200/8, 200/10, 200/12) získané při těchto podmínkách se projevují též výskytem zadírání, kdy průběh v počátku měření dosahuje maximálních hodnot $F_{max4/200}$=2690,34N,$F_{max6/200}$=3693,14N,$F_{max8/200}$=5023,65N,$F_{max10/200}$=6894,19N,$F_{max12/200}$=7462,35N, pak dochází k poklesu až je dosaženo minimální síly u všech tlaků společně (měřeno v ustálené oblasti od 30mm až do 200mm). Následně průběhy opět rostou a zaznamenávají se další měřené veličiny. Rozkmity sil pro určení zadírání jsou pro jednotlivé tlaky v následujících hodnotách: $\Delta F_{4/200}$=372,61N, $\Delta F_{6/200}$=431,51N, $\Delta F_{8/200}$=547,89N $\Delta F_{10/200}$=750,24N, $\Delta F_{12/200}$= 1450,41N.

8.3.8 Hodnocení rychlosti posuvu: v=300mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p=4;6;8;10;12MPa**

Při této vysoké rychlosti se již pomalu ztrácí znatelný rozdíl jednotlivých fází zadírání a průběhy grafů (G 300/4, 300/6, 300/8, 300/10, 300/12) jsou charakterizovány jednotlivými veličinami měřenými během protahování pásku. Opět zde je nejprve nárůst síly, jako maximální měřitelné veličiny v grafu, tj. při statickém tření. Tyto síly dosahují pro jednotlivé tlaky těchto naměřených hodnot: $F_{max4/300}$=2747,35N,$F_{max6/300}$=3955,45N, $F_{max8/300}$=5235,98N, $F_{max10/300}$=6135,55N, $F_{max12/300}$=8286,44N. Rovněž zadírání je zde jako v předchozích případech vyjádřeno rozkmitem sil pro jednotlivé tlaky: $\Delta F_{4/300}$=351,61N, $\Delta F_{6/300}$=463,00N$\Delta F_{8/300}$=647,25N, $\Delta F_{10/300}$=740,17N, $\Delta F_{12/300}$=1111,12N.

Čím větší tlak byl nastaven, tím na grafu méně výrazný byl efekt „stick-slip“, což lze vysvětlit vysokou rychlostí protahování pásku, kdy se nestačily vytvářet „mikrosvary“.

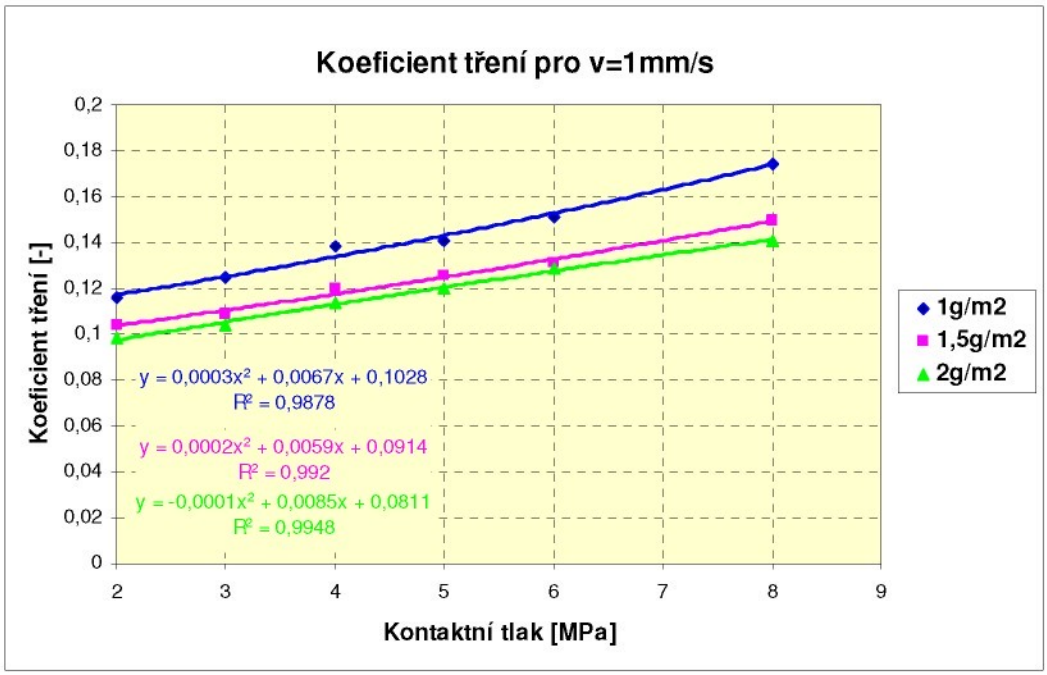
8.3.9 Hodnocení rychlosti posuvu: v= 400mms^{-1}

- **Kontaktní tlak p=4;6;8;10;12MPa**

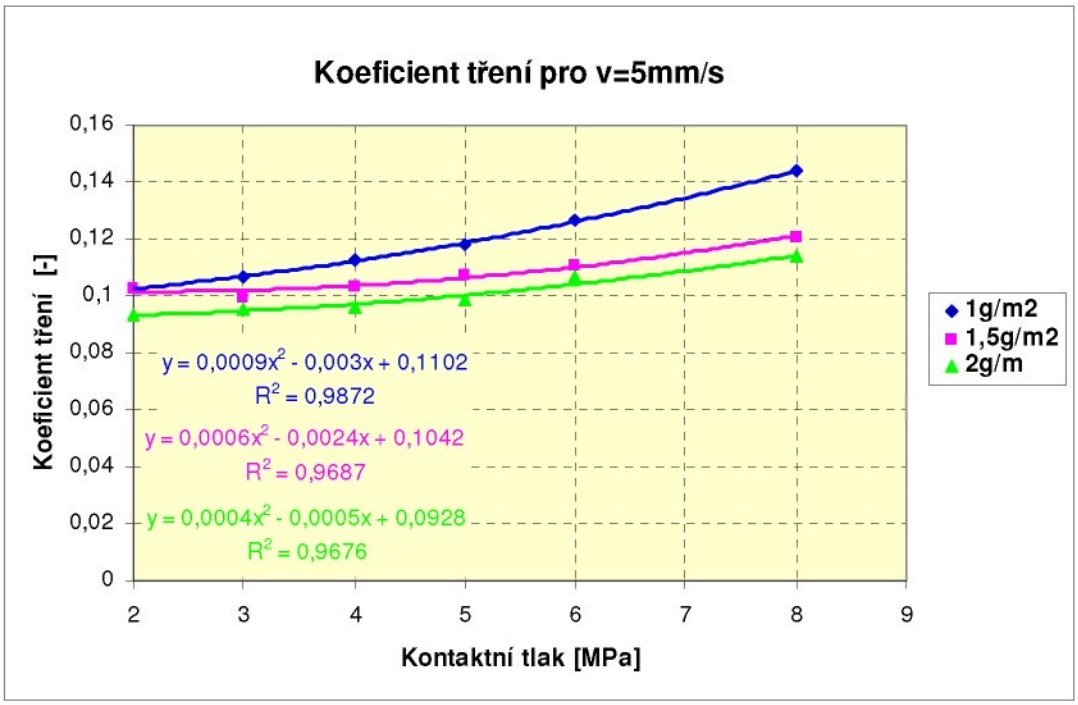
U této maximální dosažitelné rychlosti testovacího zařízení stejně tak jako při protahování pásku rychlostí 300mms^{-1} se zde v grafických záznamech průběhu měření (G 400/4, 400/6, 400/8, 400/10, 400/12) dochází u všech použitých tlaků k vytrácení výrazných projevů „stick-slip“ efektu a průběhy obou rychlostí mají tak odlišné charakteristiky od rychlostí nízkých , kdy je v průběhu tažení dostatečně dlouhá doba, jenž poskytuje podmínky pro vznik „mikrosvarů“ a tím spojený i výrazný projev zadírání v třecí dvojici: materiál-nástroj. Maximální hodnoty dosažených sil při měření pro jednotlivé tlaky jsou:$F_{max4/400}$=2741,57N, $F_{max6/400}$=3997,08N, $F_{max8/400}$=5491,55N, $F_{max10/400}$=5815,55N, $F_{max12/400}$=7626,64N. Rozkmity sil určujících zadírání mají hodnoty:$\Delta F_{4/400}$=503,89N, $\Delta F_{6/400}$=530,49N, $\Delta F_{8/400}$=561,48N, $\Delta F_{10/400}$=586,31N, $\Delta F_{12/400}$=681,02N.

8.4 Grafy koeficientu tření sestrojené v závislosti na kontaktním tlaku při konstantní rychlosti posuvu

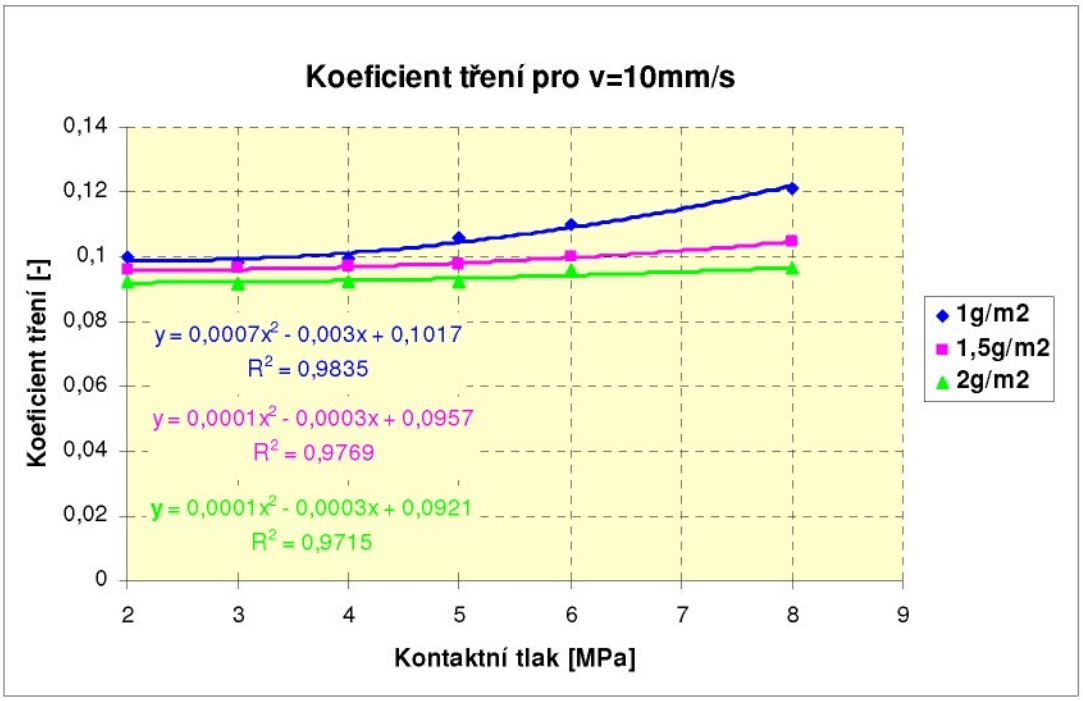
- Mazivo : prací olej AC PL 3802-39LV
- Množství maziva: 1,0;1;5; 2,0gm^{-2}



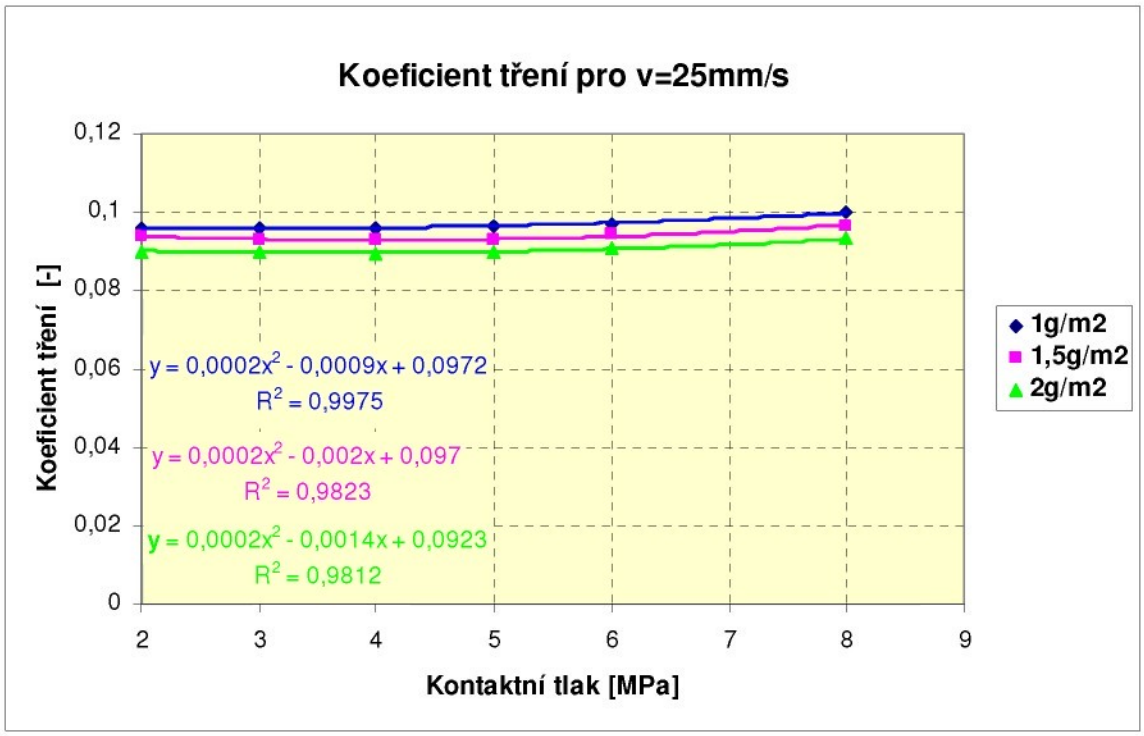
GRAF 53.: Rychlost posuvu : **v=1mms^{-1}** Kontaktní tlak : **p=2;3;4 5;6;8MPa**



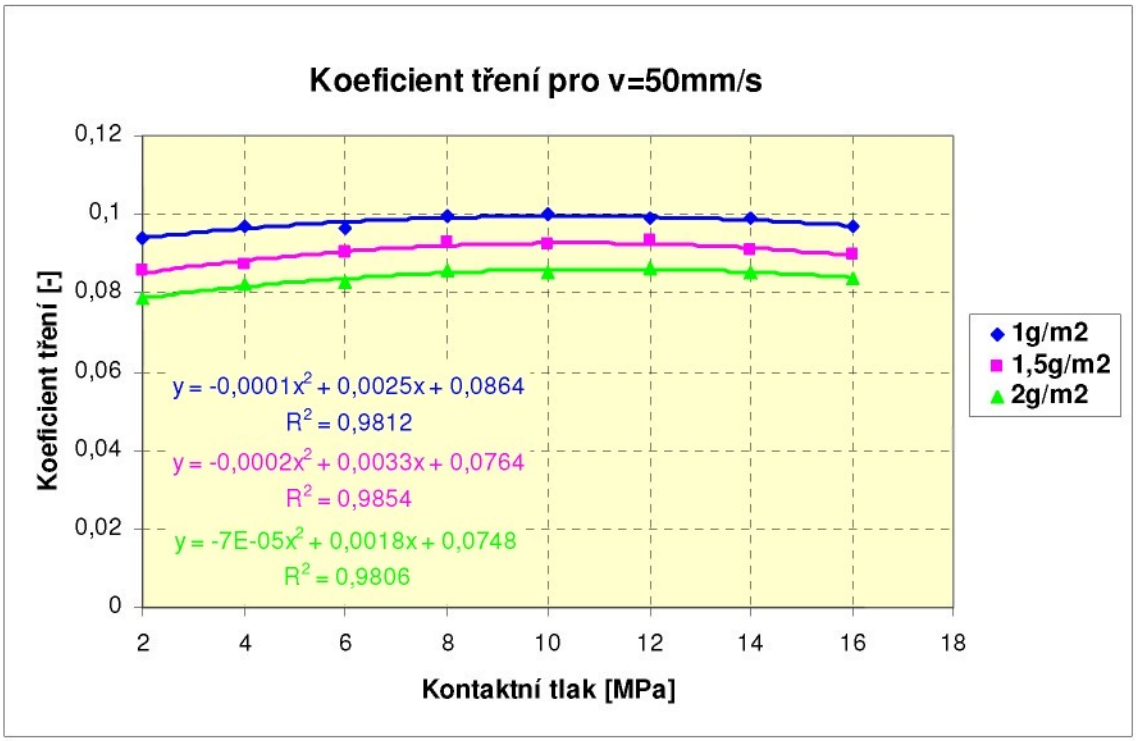
GRAF 54.: Rychlost posuvu : **v=5mms^{-1}** Kontaktní tlak : **p=2;3;4 5;6;8MPa**



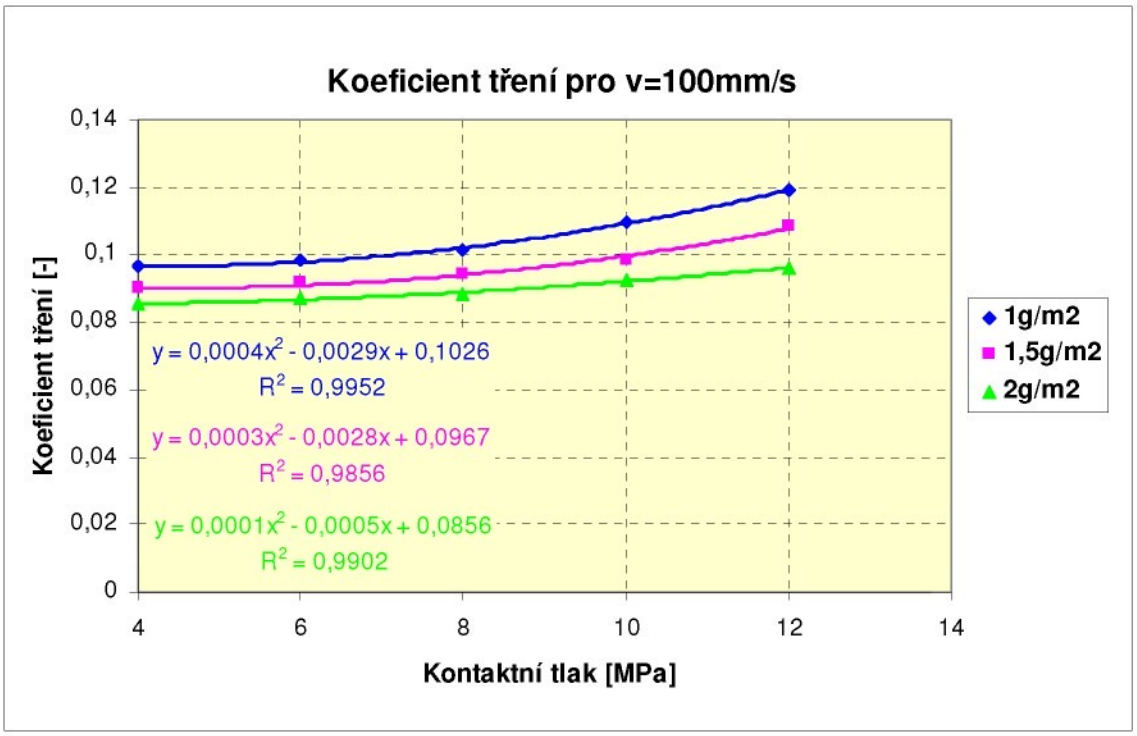
GRAF 55.: Rychlost posuvu : **v=10mms^{-1}** Kontaktní tlak : **p=2;3;4 5;6;8MPa**



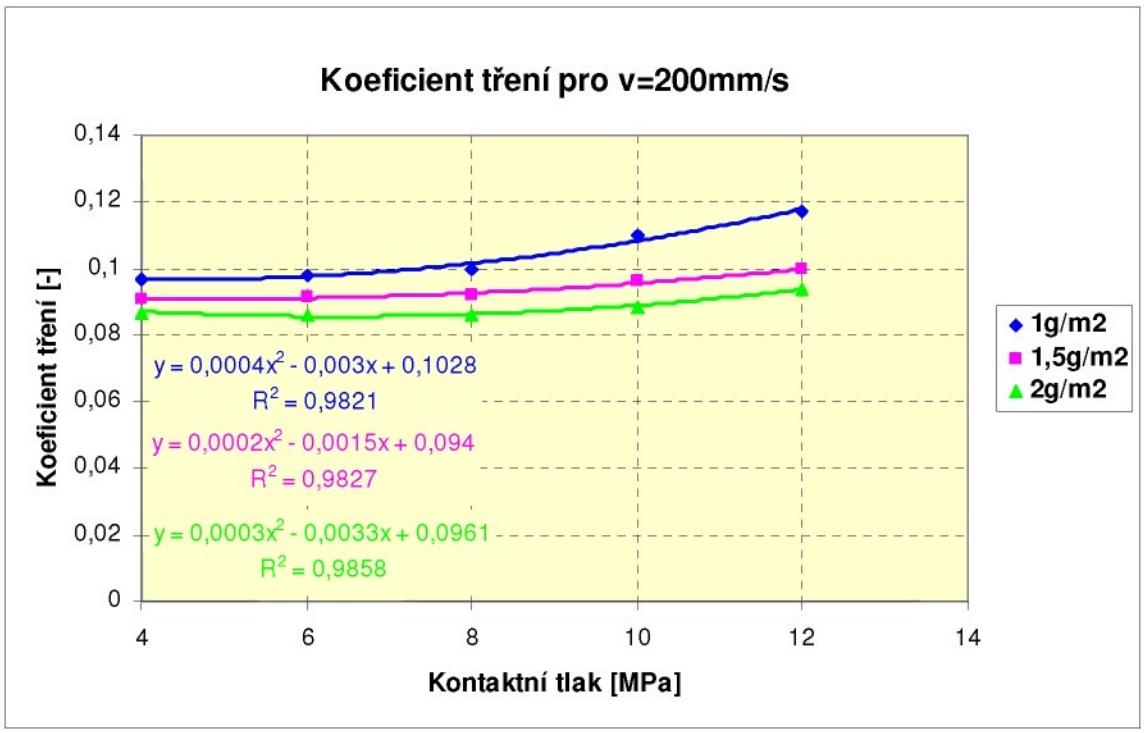
GRAF 56.: Rychlost posuvu : **v=25mms^{-1}** Kontaktní tlak : **p=2;3;4 5;6;8MPa**



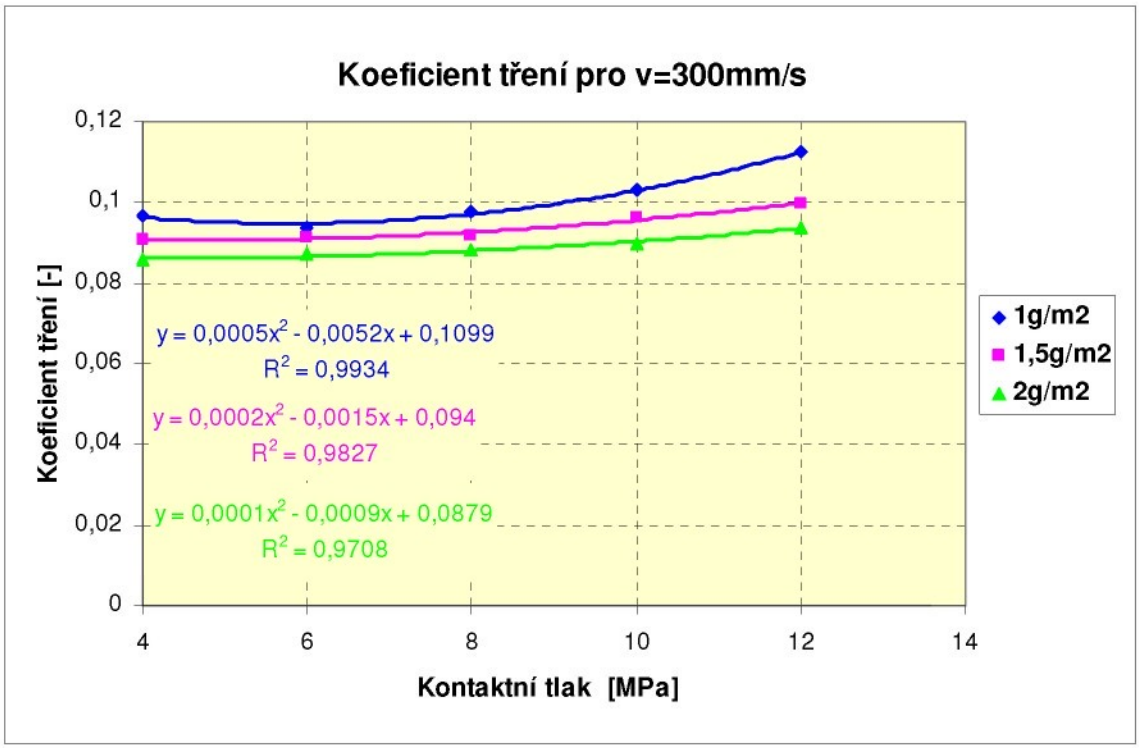
GRAF 57.: Rychlost posuvu : **v=50mms^{-1}** Kontaktní tlak : **p=2;4;6;8;10;12;14;16MPa**



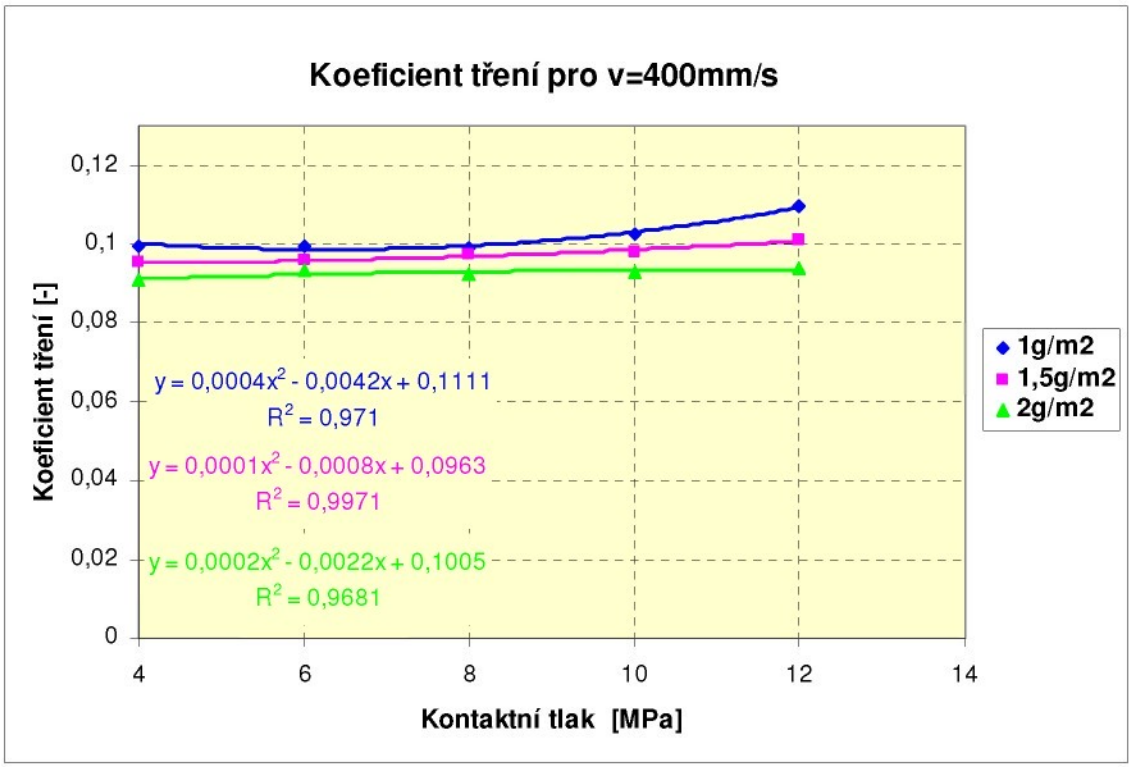
GRAF 58.: Rychlost posuvu :**v=100mms^{-1}** Kontaktní tlak :**p=4;6;8;10;12MPa**



GRAF 59.: Rychlost posuvu :**v=200mms^{-1}** Kontaktní tlak :**p=4;6;8;10;12MPa**



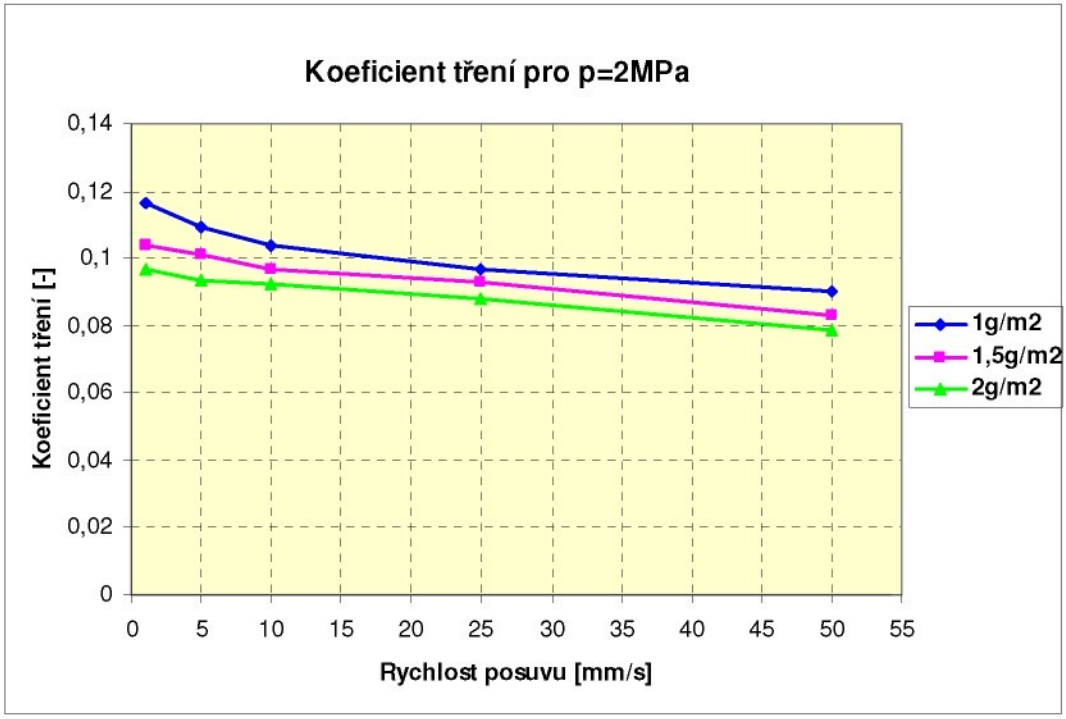
GRAF 60.: Rychlost posuvu :**v=300mms^{-1}** Kontaktní tlak :**p=4;6;8;10;12MPa**



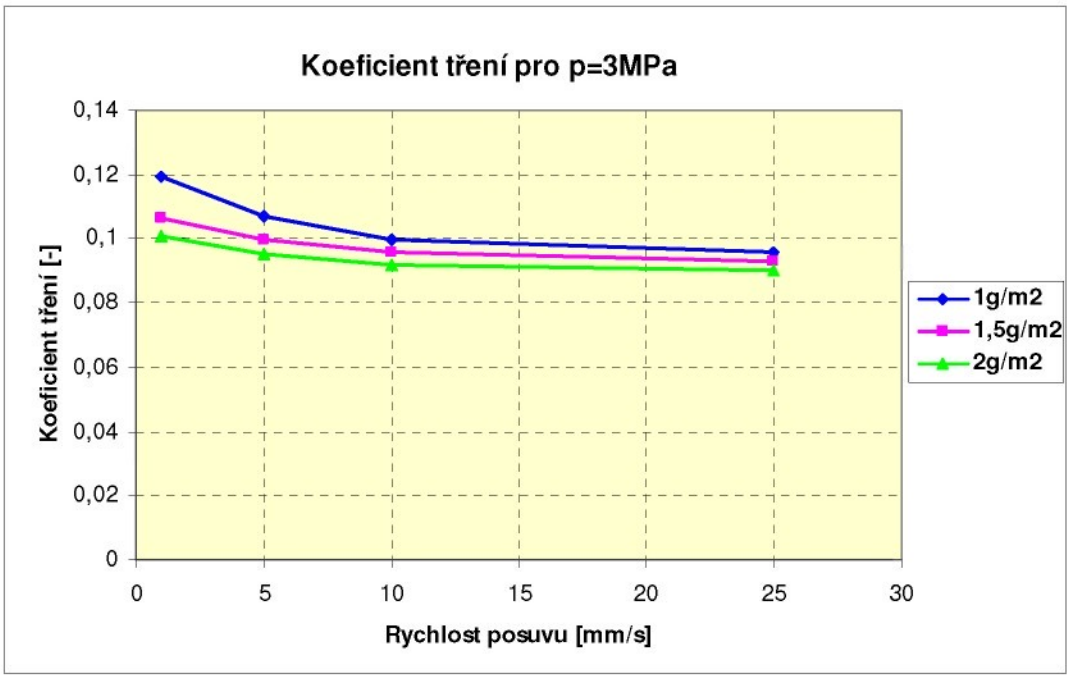
GRAF 61.: Rychlost posuvu: **v=400mms^{-1}** Kontaktní tlak :**p=4;6;8;10;12MPa**

8.5 Grafy koeficientu tření sestrojené v závislosti na rychlosti posuvu při konstantním kontaktním tlaku

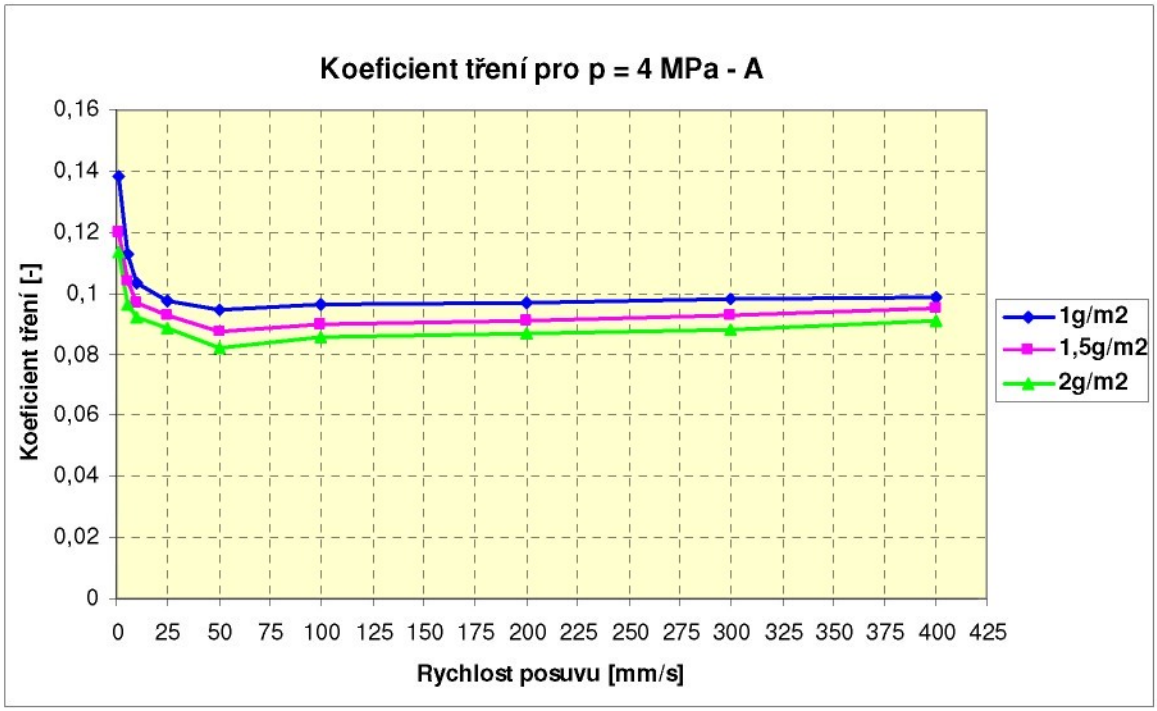
- Mazivo : prací olej AC PL 3802-39LV
- Množství maziva: 1,0;1;5; 2,0gm^{-2}



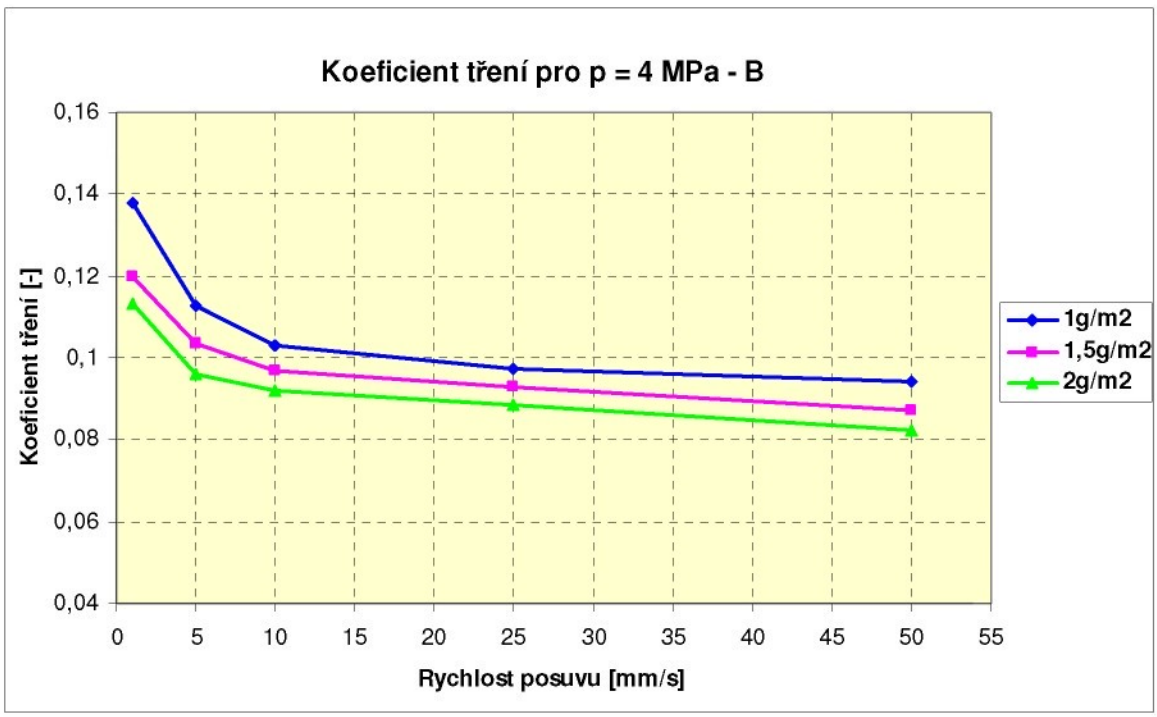
GRAF 62.: Kontaktní tlak: p=2MPa Rychlost posuvu: **v=1;5;10;25;50mms^{-1}**



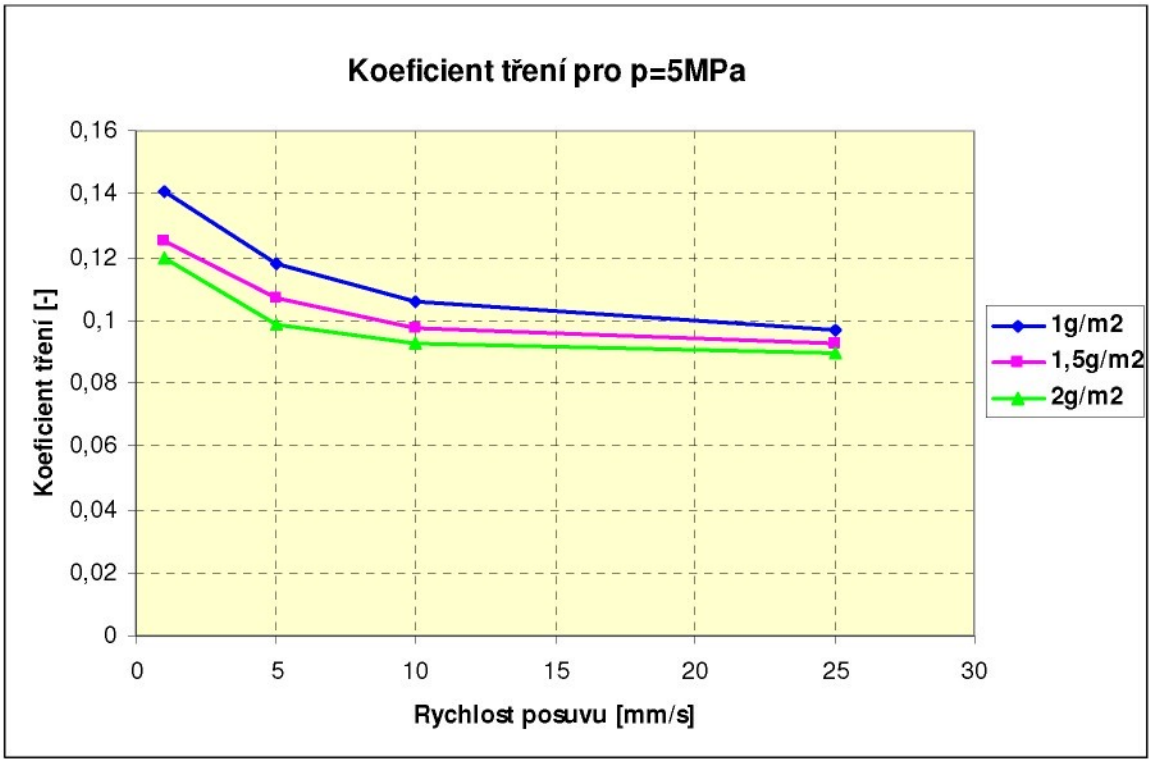
GRAF 63.: Kontaktní tlak: p=3MPa Rychlost posuvu: **v=1;5;10;25mms^{-1}**



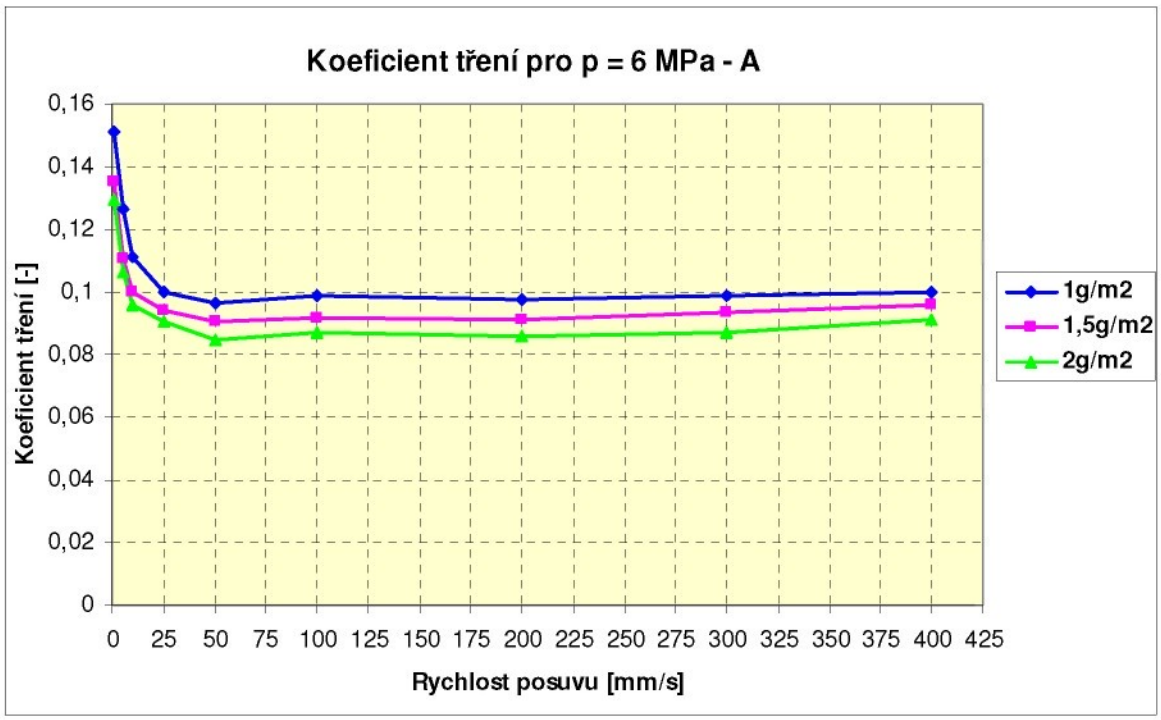
GRAF 64.: Kontaktní tlak:p=4MPa -A
Rychlost posuvu v=1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1}



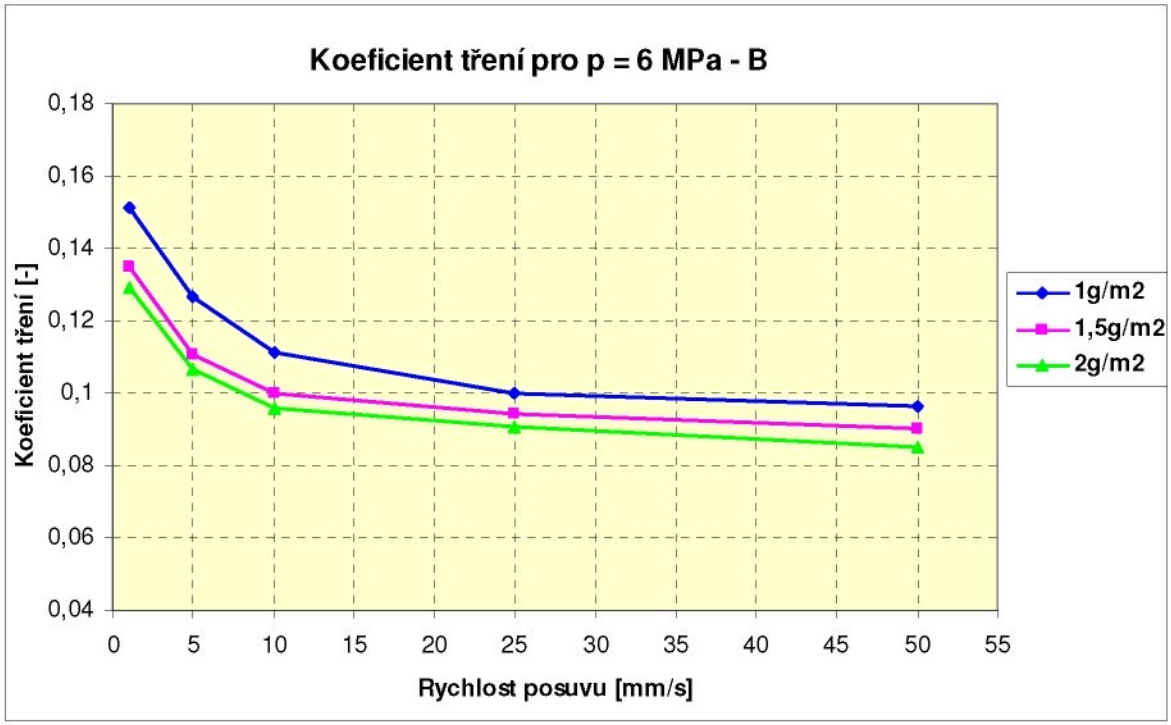
GRAF 65.: Kontaktní tlak:p=4MPa-B Rychlost posuvu v=1;5;10;25;50mms^{-1}



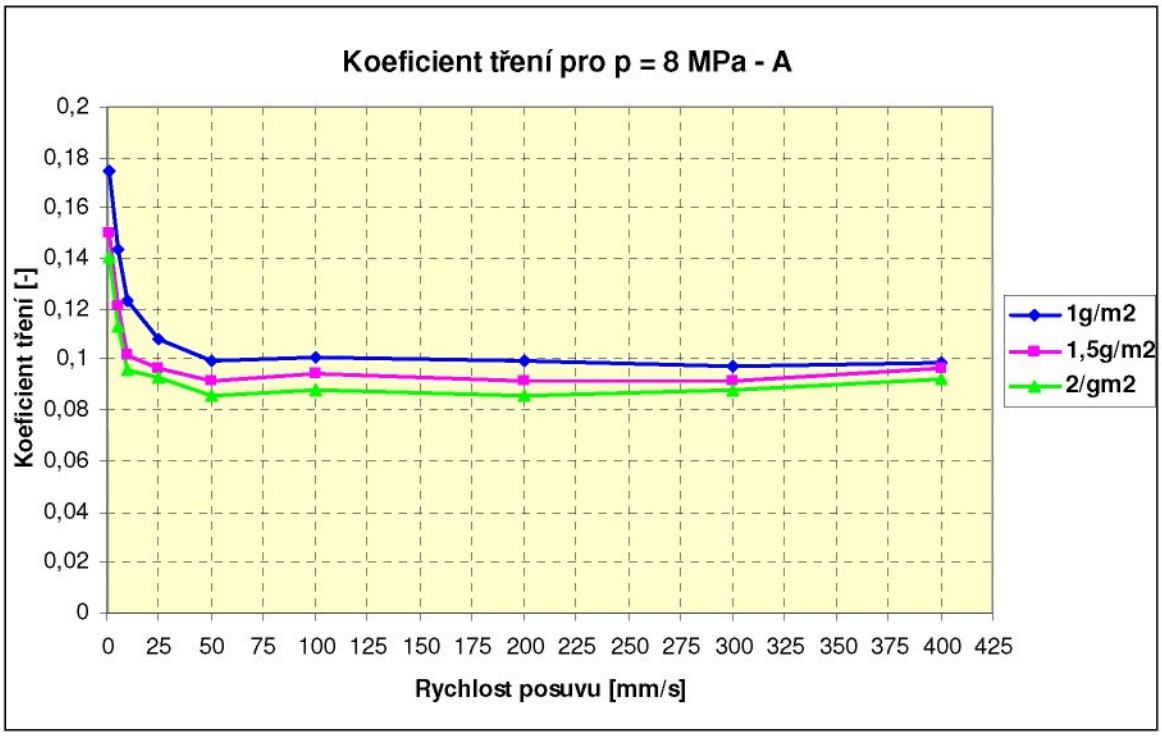
GRAF 66.: Kontaktní tlak:p=5MPa Rychlost posuvu v=1;5;10;25mms^{-1}



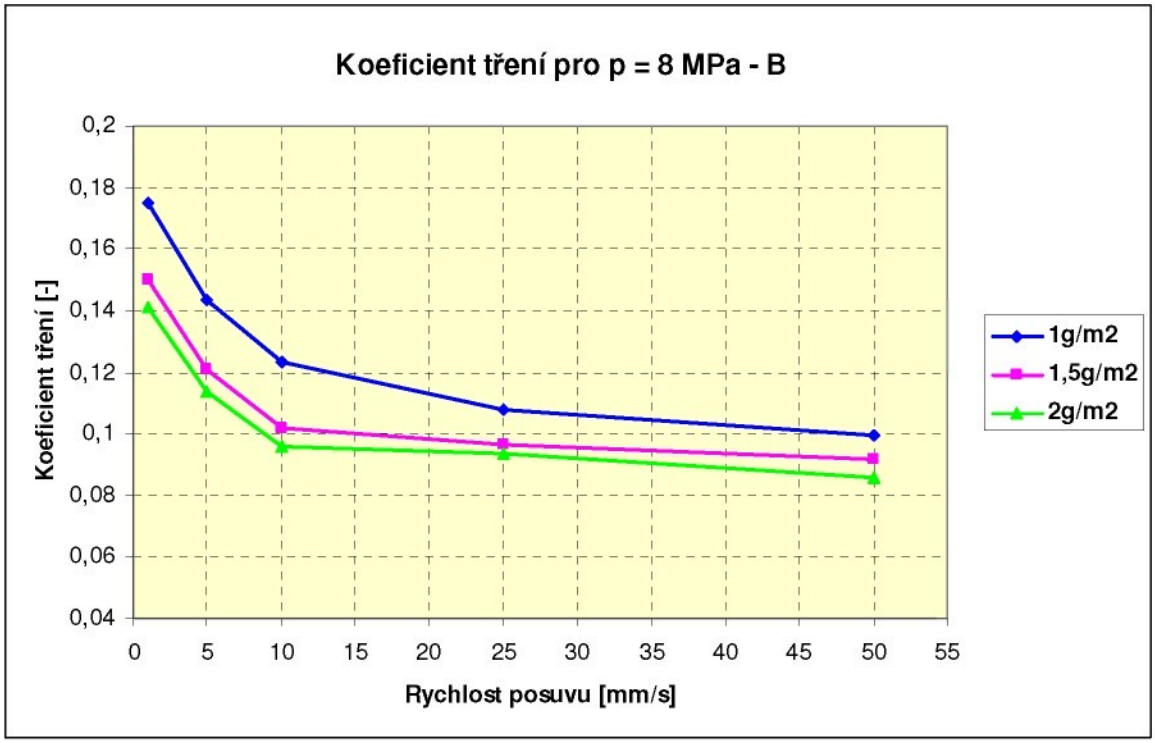
GRAF 67.: Kontaktní tlak:p=6MPa -A
Rychlost posuvu v=1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1}



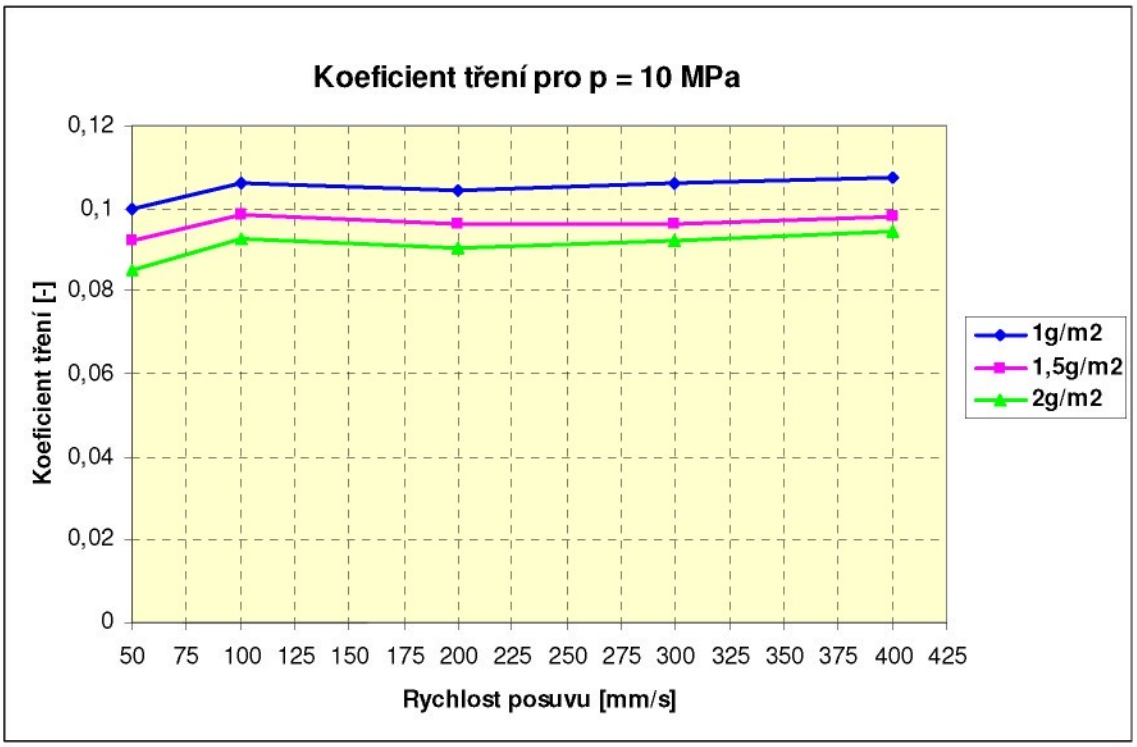
GRAF 68.: Kontaktní tlak:p=6MPa- B Rychlost posuvu v=1;5;10;25;50mms^{-1}



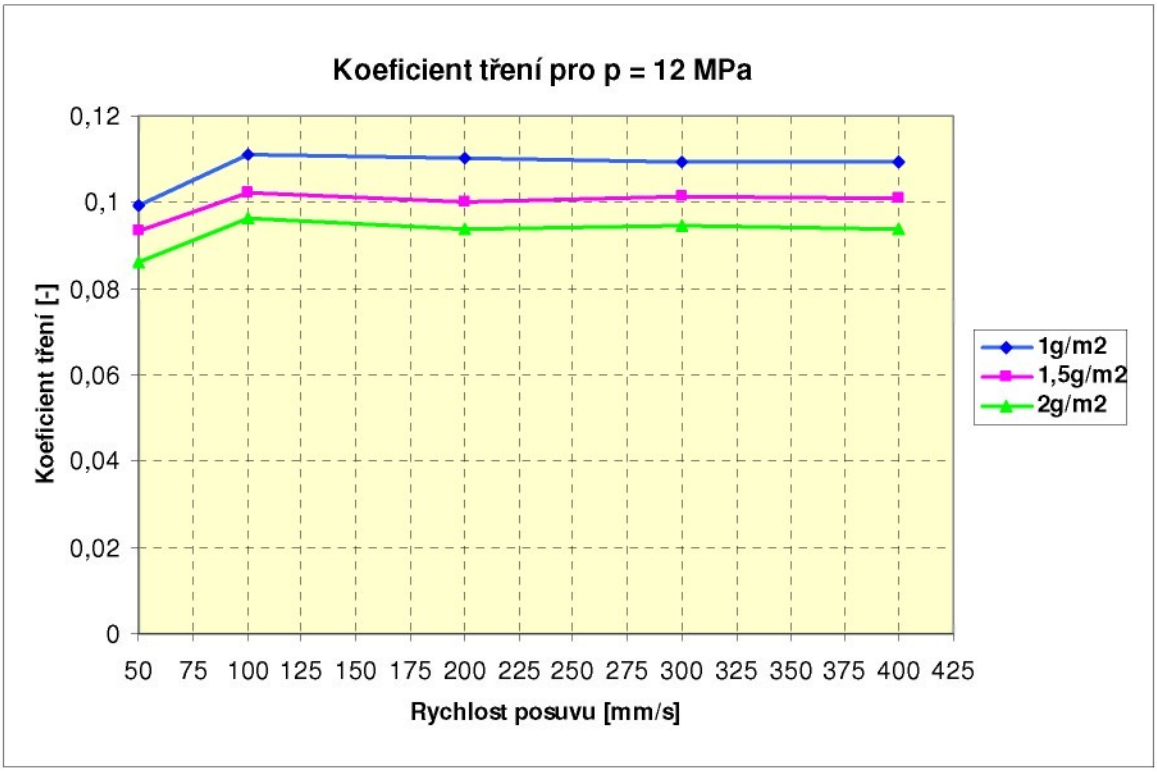
GRAF 69.: Kontaktní tlak:p=8MPa -A
Rychlost posuvu v=1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1}



GRAF 70.: Kontaktní tlak:p=8MPa -B Rychlost posuvu v=1;5;10;25;50mms^{-1}



GRAF 71.: Kontaktní tlak:p=10MPa Rychlost posuvu v=50;100;200;300;400mms^{-1}



GRAF 72.: Kontaktní tlak:p=12MPa Rychlost posuvu v=50;100;200;300;400mms^{-1}

9 DISKUSE DÍLČÍCH VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

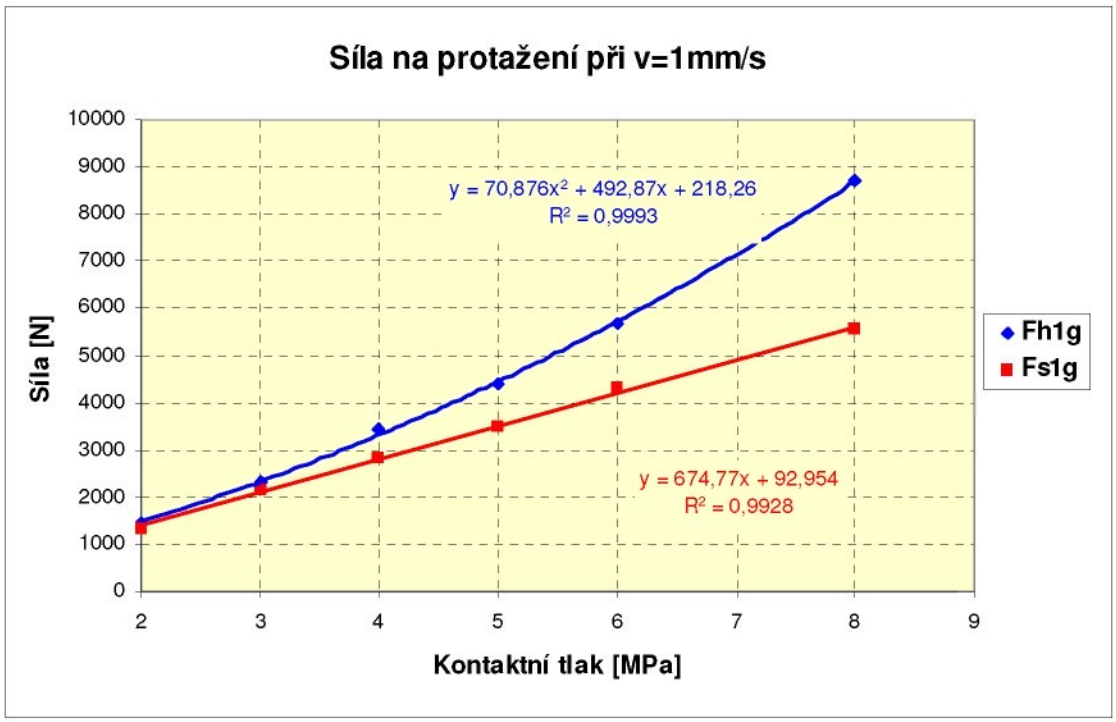
Pro zjišťování tribologických vlastností respektive vlivu technologických podmínek na výskyt zadírání s ohledem na koeficient tření byla v předkládané disertační práci použita zkouška protahováním pásku, která se na katedře strojírenské technologie TU v Liberci používá již několik let a její metodika se neustále inovuje na základě výsledků získaných z mnoha experimentálních měření. Výhody a nevýhody této zkoušky byly již popsány v předcházejících kapitolách a proto v dalším textu již nebudou popisovány.

K vyhodnocení zkoušky protahováním pásku byla volena metodika, podrobně popsána v [66] a její použití je diskutováno v této kapitole. S ohledem na hodnocení výsledků experimentálního měření, je nutné upozornit, že prozatím neexistuje žádná závazná norma pro provádění tribologických testů charakterizujících hluboké tažení výlisků nepravidelných tvarů. Pro tyto tribologické zkoušky v obecném měřítku je velmi důležité, jakým způsobem je proveden vlastní test a jakým způsobem je proveden výběr a vyhodnocení měřených veličin. Realizované tribologické testy jsou ve většině případů porovnávací a nalezení objektivního měřítka tohoto testu je velmi obtížné. Měřítkem pro posouzení vhodné kombinace mazadlo-materiál-nástroj-technologické podmínky na zjišťování podmínek vzniku zadírání je v literatuře nejčastěji uváděn koeficient tření μ. Pro hodnocení tribologických vlastností je významně ovlivněna interakce v soustavě nástroj-plech a koeficient tření je jednou z určujících veličin při hodnocení zadírání. Praktické zkušenosti v oboru tváření však ukázaly, že koeficient tření je ovlivňován četným množstvím faktorů vstupujících do tribologického systému a posuzovat danou soustavu jen pomocí tohoto koeficientu je často velmi zjednodušené hodnocení a tudíž ne zcela vyhovující k exaktnímu popsání vzniku zadírání při operaci tažení. Zatím však jiné a spolehlivé metody k jednoznačnému určení vzniku zadírání doposud nejsou známy.

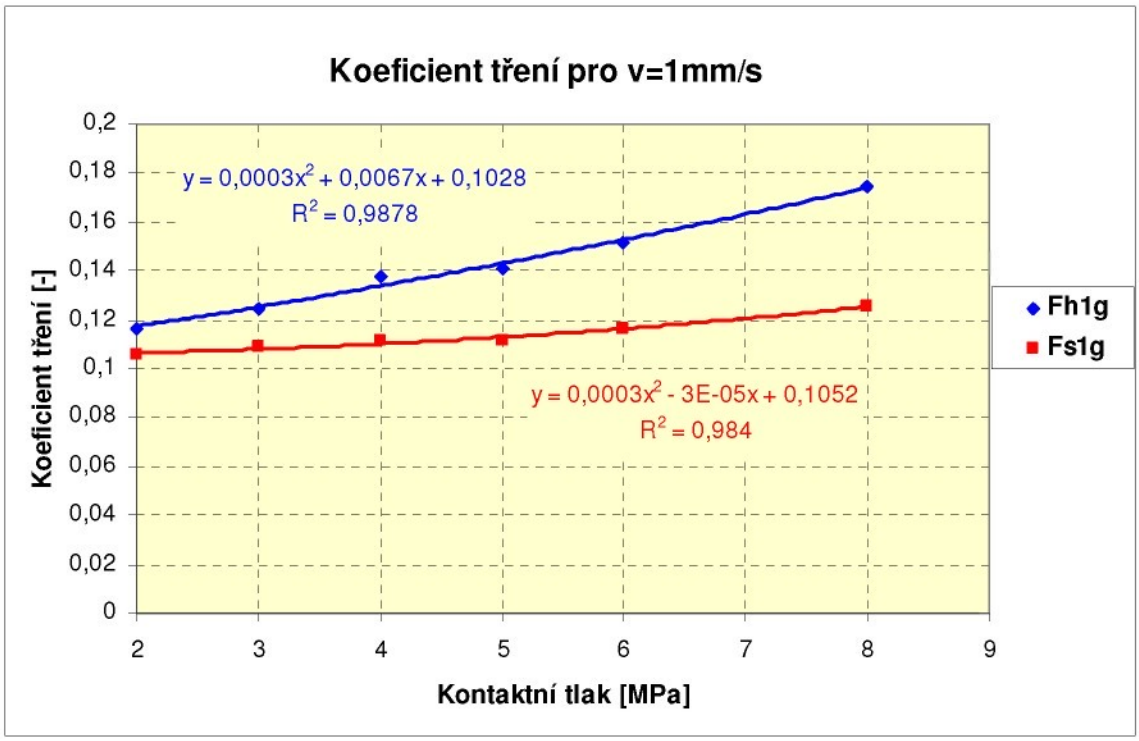
Jak již bylo uvedeno v kapitole 7.2. při provádění tohoto testu se určují charakteristiky: F_{max}, F_h, F_{min}, F_s, ΔF. Otázkou však je, jakým způsobem vyhodnocovat tribologický test v problematice zadírání. Nejčastěji je v literatuře uváděn koeficient tření μ, který je vypočítán ze střední síly F_s v ustálené oblasti měření. Při použití materiálu s povrchovou, zejména, kde je nanesena vrstva zinku a při malých rychlostech posuvu materiálu v nástroji však dochází ke vzniku tzv. „stick-slip" efektu (viz kapitola 4.2.5.1.), který je označován jako určitý projev zadírání. Důsledkem tohoto jevu je, že dochází ke kolísání síly v rozmezí F_{min} až F_h a s tím samozřejmě dochází i ke změně koeficientu tření μ. U těchto materiálů je pak výpočet koeficientu tření pomocí střední síly F_s velmi diskutabilní. Jelikož pro experiment byl s určitým záměrem vybrán materiál s povlakem zinku, musíme zohlednit při vyhodnocování výsledků měření právě tuto skutečnost. Z důvodu popsání reálného nepříznivého stavu při tažení je v této práci při výpočtu koeficientu tření upřednostněna maximální síla F_h, které bylo dosaženo v ustálené oblasti měření protahovaného vzorku. Takto vypočítaný koeficient

tření představuje tedy nejméně příznivý stav, který může z tribologického hlediska nastat při tváření daného materiálu a při respektování daných technologických podmínek. Pro názorné podložení této hypotézy jsou na grafu 73 a grafu 75. vyhodnoceny jednotlivé síly na protažení vzorku a na grafu 74. a grafu 76. pak sestrojeny grafy závislostí koeficientu tření **μ= f(v,p)** pro nejméně příznivé technologické podmínky (malé rychlosti v=1 a 10mms^{-1}, nejnižší množství maziva 1gm^{-2}).Koeficient tření je vypočítán ze střední síly F_s v ustálené oblasti měření a maximální síly F_h v ustálené oblasti měření. Jak je patrné z grafů, s rostoucím působením kontaktního tlaku, rozdíl mezi hodnotami F_s a F_h roste a proto z hlediska hodnocení tribologických vlastností a zvláště pak výpočtu koeficientu tření je výběr hodnoty F_h logicky zdůvodnitelný a podložený provedenými experimentálními měřeními v této práci. Pro nejvýše nastavený tlak p=8MPa při rychlosti v=1mms^{-1} je rozdíl v hodnotách naměřených sil 3385,6 N (F_h =8725,11 a F_s = 5339,51) a koeficient tření vypočtený z F_s je μ =0,125523 a vypočtený z F_h je μ=0,174782, což představuje nárůst hodnoty koeficientu tření téměř o 42%.

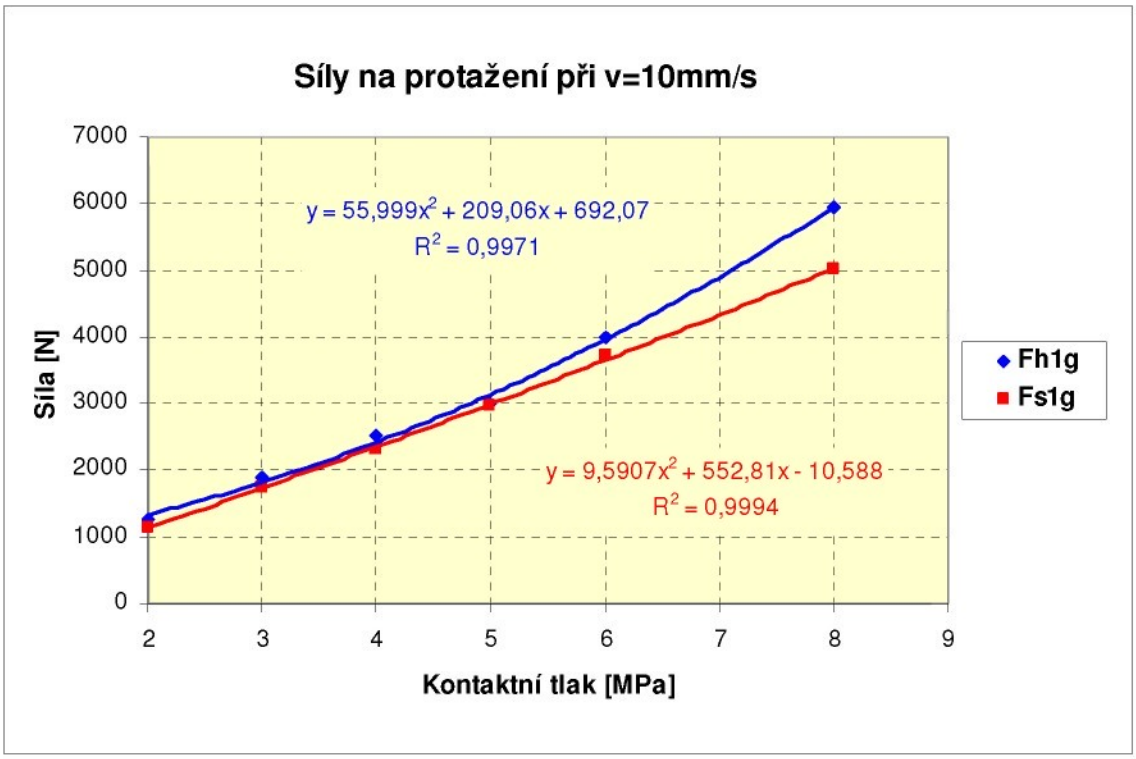
Zejména u malých rychlostí (v=1;5;10mms^{-1}) se zadírání projevuje v největší míře, neboť při malé rychlosti mají třecí dvojice: nástroj- materiál vhodné podmínky pro vznik tzv. „mikrosvarů“, toto se projevilo při experimentálním měření této práce.



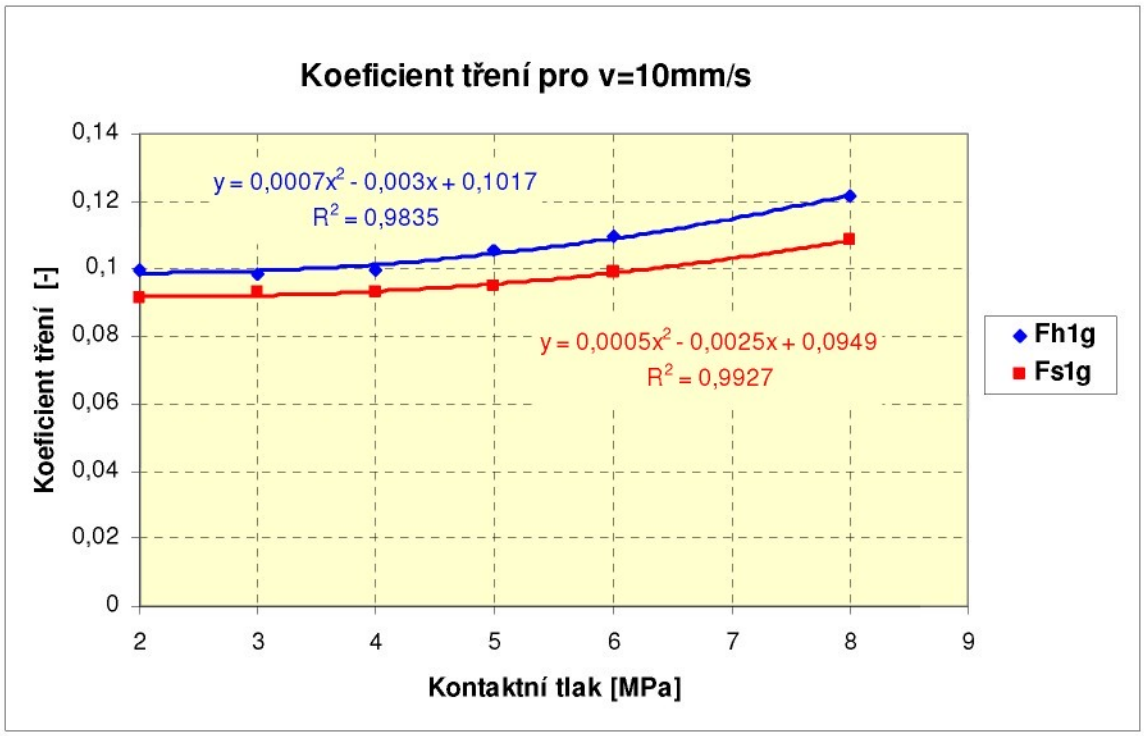
GRAF 73.: Rozdíl v hodnotách sil Fh a Fs, při v=1mm s^{-1} mazivo 1gm^{-2}



GRAF 74.: Koeficient tření vypočtený z Fh a Fs , při v=1mm s^{-1},mazivo 1gm^{-2}



GRAF 75.: Rozdíl v hodnotách sil Fh a Fs ,při v=10mm s^{-1},mazivo 1gm^{-2}



GRAF 76.: Koeficient tření vypočtený z Fh a Fs , při v=10mm s^{-1},mazivo 1gm^{-2}

9.1 Vliv rychlosti posuvu

Pro jednotlivá měření byly použity kombinace vstupních parametrů:

- Rychlost posuvu **v= 1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1}**
- Kontaktní tlak **p=2;3;4;5;6;810;12MPa**
- Mazivo : prací olej **AC PL 3802-39LV**
- Množství maziva: **1,0;1;5; 2,0gm^{-2}**

Získanými charakteristikami na základě experimentálních měření byly potvrzeny závislosti, že se stoupajícími hodnotami kontaktního tlaku rostou i síly potřebné k protažení vzorku. Z jednotlivých sestrojených grafů v kapitole 8.4 je patrné, že s rostoucím kontaktním tlakem roste i koeficient tření a s ním tedy i zadírání pásku při jeho protahování určitou rychlostí a za konkrétní hodnoty kontaktního tlaku v čelistech. Tento jev je způsoben vlivem zinkového povlaku, který se sdírá z povrchu materiálu při tažení, ulpívá na nástroji a vlivem zinkových mikročásteček dochází ke vzniku zadírání a tedy i nárůstu koeficientu tření.

9.1.1 Vliv rychlosti posuvu: v=1;5;10mms^{-1}

- **p=2;3;4;5;6;8MPa**

Při rychlosti posuvu **v=1mms^{-1}** pro množství maziva 1gm^{-2} je vypočtený koeficient tření v rozmezí 0,116 až 0,175 pro množství maziva 1,5gm^{-2} je koeficient tření v rozmezí 0,104 až 0,150 a pro 2gm^{-2} je koeficient tření v rozmezí 0,099 až 0,141. Z grafu je patrný nárůst koeficientu tření, jeho navýšení je úměrné k hodnotám zvyšujícího se kontaktního tlaku v kombinaci s malou rychlostí posuvu.V závislosti na množství nanášeného maziva je hodnota 1gm^{-2} nejméně příznivá z tribologických podmínek.

Při rychlosti posuvu **v=5mms^{-1}**pro množství maziva 1gm^{-2} je vypočtený koeficient tření v rozmezí 0,107 až 0,143 pro množství maziva 1,5gm^{-2} je koeficient tření v rozmezí 0,103 až 0,121 a pro 2gm^{-2} je koeficient tření v rozmezí 0,093 až 0,1140

Z grafu je patrné, že hodnota koeficientu tření při vzrůstajícím kontaktním tlaku roste nepatrně až do hodnot tlaku 6 a 8MPa, kdy je zvýšení koeficientu tření více výrazné a dle zákonitostí tření i předvídatelné.

Při rychlosti posuvu **v=10mms^{-1}** pro množství maziva 1gm^{-2} je vypočtený koeficient tření v rozmezí 0,116 až 0,174 pro množství maziva 1,5gm^{-2} je koeficient tření v rozmezí 0,103 až 0,149 a pro 2gm^{-2} je koeficient tření v rozmezí 0,098 až 0,1408.

Pro tyto malé rychlosti je typické dle jejich průběhů, že se zvýrazňuje rozdíl v minimálním množství maziva což je 1gm^{-2} naproti tomu u množství 1,5gm^{-2} a 2gm^{-2} mají křivky stejnou tendenci nárůstu regresní křivky mají obdobný charakter.

9.1.2 Vliv rychlosti posuvu: v=25mms^{-1}

- **p=2;3;4;5;6;8MPa**

Při rychlosti posuvu **v=25mms^{-1}** se vypočtený koeficient tření pohybuje v hodnotách 0,090 až po 0,999 pro všechny tři sledované množství maziva. Jak je patrné z grafu jednotlivá množství mají stejný trend a rozdíly oproti nízkým rychlostem nejsou výrazné s ohledem na vzrůstající hodnoty tlaku a rozdílná množství maziva.

9.1.3 Vliv rychlosti posuvu: v= 50mms^{-1}

- **p=2;3;4;5;6;8;10;12;14MPa**

Při rychlosti posuvu **v= 50mms^{-1}** se vypočtený koeficient tření pohybuje v rozmezí 0,079 až 0,099 pro všechna nanášená množství maziva. V porovnání s nižší rychlostí 25mms^{-1} lze z jednotlivých průběhu tření vyčíst, zvětšující se rozdíl mezi jednotlivými množstvími maziva, jednotlivé křivky mají podobný trend.Při této rychlosti byly naměřeny nejmenší hodnoty koeficientu tření a můžeme konstatovat, že v rozsahu použitých rychlostí je tato rychlost mezníkem, kdy se koeficient tření mění nejvýrazněji v přechodu z malých rychlostí do rychlostí vyšších. Tento výsledek měření je možné sledovat u všech sestrojených grafů pro všechny podmínky měření.

9.1.4 Vliv rychlosti posuvu: v= 100mms^{-1}

- **p=2;3;4;5;6;8;10;12;14MPa**

Rychlost posuvu **v= 100mms^{-1}** můžeme přiřadit již k vyšším rychlostem tváření, pro použité množství maziv je vypočtený koeficient tření v rozmezí 0,087 až 0,119.

Z grafu je patrné, že hodnota koeficientu tření při vzrůstajícím kontaktním tlaku roste, ačkoliv je rychlost protahování již dosti vysoká vzhledem k možnosti vytvoření mikrosvarů při styku nástroje a materiálu. Tento jev lze zdůvodnit použitím testovaného substrátu, který má povlak na bázi zinku a ten se podílí na podmínkách zadírání při této rychlosti.

9.1.5 Vliv rychlosti posuvu: v= 200mms^{-1}

- **p=2;3;4;5;6;8;10;12MPa**

Při této rychlosti posuvu materiálu v nástroji **v= 200mms^{-1}** se hodnoty tření pohybují v oblasti od 0,086, a 0,118, což je podobné intervalu hodnot u rychlosti 100mms^{-1}. Stejně tak trend křivek je zachován, se vzrůstajícím tlakem roste koeficient tření.Vliv jednotlivých množství maziv je zde i nadále patrný a jejich diference je na první pohled viditelná.Největší rozdíl se projevuje při nejvyšším použitém tlaku 12MPa.

9.1.6 Vliv rychlosti posuvu: v= 300mms^{-1}

- **p=2;3;4;5;6;8;10;12MPa**

Při rychlosti posuvu **v= 300mms^{-1}** je vypočtený koeficient tření v rozmezí 0,086 až 0,112. U grafů pro jednotlivá množství maziva narůstá závislost k vzhledem ke zvyšujícímu se tlaku.Největší rozdílu se projevuje při nejvyšším použitém tlaku 12MPa.

9.1.7 Vliv rychlosti posuvu: v= 400mms^{-1}

- **p=2;3;4;5;6;8;10;12MPa**

Při maximální použité rychlosti posuvu **v= 400mms^{-1}** je vypočtený koeficient tření v rozmezí 0,091 až 0,110. U grafů pro jednotlivá množství maziva roste se projevuje závislost vzhledem ke zvyšujícímu se tlaku.

Při hodnocení vlivu rychlosti tažení na koeficient tření lze učinit závěr: na základě experimentálních měření bylo prokázáno, že všechny měřené rychlosti protahování pásku vykazují tendenci růstu koeficientu tření s rostoucím tlakem a ohledem na nanesené množství maziva. Výjimku tvoří rychlosti 25 a 50mms^{-1}, zde se prokázalo, že tyto rychlosti tvoří hraniční pásmo v oblasti změn hodnot koeficientu tření, zejména rychlost 50mms^{-1} byla experimentálně ověřena jako minimální hodnota koeficientů tření v průběhů grafů tribologických testů.

9.2 Vliv kontaktního tlaku

Pro jednotlivá měření byly použity kombinace vstupních parametrů:

- Kontaktní tlak **p=2;3;4;5;6;810;12MPa**
- Rychlost posuvu **v= 1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1}**
- Mazivo : prací olej **AC PL 3802-39LV**
- Množství maziva: **1,0;1;5; 2,0 g m^{-2}**

Z grafů v kapitole 8.5 a jejich průběhů lze pozorovat, že většinou s rostoucí rychlostí má koeficient tření klesající charakter.

9.2.1 Vliv kontaktního tlaku: p=2MPa

- **v=1;5;10;25;50mms^{-1}**

Kontaktní tlak **p=2MPa** byl volen pro malé rychlost posuvu v=1;5;10;25;50mms^{-1}.Při těchto rychlostech byl koeficient tření vypočten v rozmezí hodnot 0,116393 až 0,090082 pro množství maziva 1,0gm^{-2} , pro množství maziva 1,5gm^{-2} v hodnotách 0,103952 až 0,083179 a pro 2,0gm^{-2} 0,096546 až 0,078544. Z grafu 62. lze pozorovat, že při tomto nastaveném tlaku s rostoucí rychlostí posuvu má koeficient tření klesající charakter.

9.2.2 Vliv kontaktního tlaku: p=3MPa

- **v=1;5;10;25mms^{-1}**

Pro kontaktní tlak **p=3MPa** a rychlosti posuvu v=1;5;10;25mms^{-1} jsou hodnoty koeficientu tření z nich vypočtené pro množství maziva 1,0gm^{-2} 0,11925 až 0,09589, pro množství maziva 1,5gm^{-2} v hodnotách 0,106152 až 0,093144 a pro 2,0gm^{-2} 0,100851 až 0,090073. I za těchto kombinací technologických podmínek koeficient tření má klesající tendenci, z počátku při rychlostech 1;5;10mms^{-1} je pokles rychlejší a následně do rychlosti 25mms^{-1} se pokles zmírňuje,jak je patrné z grafu 63..

9.2.3 Vliv kontaktního tlaku: p=4MPa

- **v=1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1}**

Kontaktní tlak **p=4MPa** byl nastaven pro všechny testované rychlosti v=1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1} protahování pásku, z důvodu jeho použití v reálných podmínkách tažení. Z průběhu naměřených hodnot sil při protahování pásku a následném vypočteném koeficientu tření z těchto hodnot je patrné z grafu 64 konkrétně varianty grafu **4MPa-A**, že koeficient tření má klesající charakter až do rychlosti v=50mms^{-1}, kde je minimální hodnota koeficientu tření. V grafu 65 varianty **4MPa-B** je znázorněn detail průběhů koeficientů tření získaných při nízkých rychlostech, jenž potvrzuje klesající charakteristiky znázorněné v grafech **4MPa-A**. Při zvyšující se rychlosti začíná hodnota koeficientu tření opět pozvolně narůstat. Pro množství maziva 1,0gm^{-2} 0,138114 až 0,094355

tato minimální hodnota tření je pro v = 50mms^{-1}, pro množství maziva 1,5gm^{-2} v hodnotách 0,119902 až 0,087224 (minimum v=50mms^{-1}) a pro 2,0gm^{-2} 0,113416 až po 0,082269 pro v=50mms^{-1}.

9.2.4 Vliv kontaktního tlaku: p=5MPa

- **v=1;5;10;25mms^{-1}**

Pro kontaktní tlak **p=5MPa** a rychlosti posuvu v=1;5;10;25mms^{-1} jsou hodnoty koeficientu tření z nich vypočtené pro množství maziva 1,0gm^{-2} 0,141033 až 0,096621, pro množství maziva 1,5gm^{-2} v hodnotách 0,125395 až 0,092905 a pro 2,0gm^{-2} 0,119818 až 0,089808. Při těchto kombinací technologických podmínek koeficient tření má klesající tendenci, viz graf 66.., kde rychlejší pokles je z rychlosti 1mm^{-1} na 5mm^{-1}, pak už křivka tření má pozvolnější trend.

9.2.5 Vliv kontaktního tlaku: p=6 a 8MPa

- **v=1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1}**

Pro kontaktní tlaky **p=6 a 8MPa** jsou průběhy koeficientů tření v obdobném trendu jako se vyskytuje průběh u tlaku 4MPa, minimální hodnota je i v těchto případech při rychlosti protahování v = 50mms^{-1}. Též u těchto tlaků detailní grafy (graf 68. **6MPa-B** a graf 70. **8MPa-B)** dokazují klesající hodnoty koeficientu tření, jež je prokazatelně patrné i z celkového pohledu u grafů graf 67. **6MPa-A** a graf 69. **8MPa-A**.

Pro výpočet koeficientů tření bylo použity těchto tlaků v kombinaci se všemi testovanými rychlostmi **v= 1;5;10;25;50;100;200;300;400mms^{-1},** stejně jako u tlaku 4MPa.

Hodnoty koeficientů tření pro tlak **6MPa** a množství maziva 1,0gm^{-2} 0,174782až 0,099518 pro v = 50mms^{-1}, pro množství maziva 1,5gm^{-2} v hodnotách 0,149826až 0,090439 pro v = 50mms^{-1}a pro 2,0gm^{-2} 0,129166 až po hodnotu 0,085879 při v = 50mms^{-1}

Hodnoty koeficientů tření pro tlak **8MPa** a množství maziva 1,0gm^{-2} 0,151282 až 0,096475 pro v = 50mms^{-1}, pro množství maziva 1,5gm^{-2} v hodnotách 0,131036 až 0,090439 pro v = 50mms^{-1}a pro 2,0gm^{-2} 0,129166 až po hodnotu 0,085879 při v = 50mms^{-1}.

9.2.6 Vliv kontaktního tlaku: p=10MPa

- **v=50;100;200;300;400mms^{-1}**

Pro tlak **10MPa** při množství maziva 1,0gm^{-2} je hodnota koeficientu tření pro rychlost v=50mms^{-1} 0,100063 a pro ostatní rychlosti (v =100; 200;300;400mms^{-1}) jsou hodnoty 0,104111 až 0,107321, rozdíl hodnot je pouze 0,00321. Pro množství maziva 1,5gm^{-2} je hodnota koeficientu tření pro rychlost v=50mms^{-1} 0,092356 a pro ostatní rychlosti (v =100; 200;300;400mms^{-1}) jsou hodnoty 0,096061 až 0,098392, rozdíl hodnot je pouze 0,00233. Pro množství maziva 2,0gm^{-2} je hodnota koeficientu tření pro rychlost v=50mms^{-1} 0,08528 a pro

ostatní rychlosti (v =100; 200;300;400mms^{-1}) jsou hodnoty od 0,090581 až 0,094338, kdy rozdíl mezi hodnotami je 0,00375.

9.2.7 Vliv kontaktního tlaku: p=12MPa

- **v=50;100;200;300;400mms^{-1}**

Pro tlak **12MPa** při množství maziva 1,0gm^{-2} je hodnota koeficientu tření pro rychlost v=50mms^{-1} 0,099182 a pro ostatní rychlosti (v=100; 200;300;400mms^{-1}) jsou hodnoty 0,1090321 až 0,111173, rozdíl hodnot je pouze 0,00214. Pro množství maziva 1,5gm^{-2} je hodnota koeficientu tření pro rychlost v=50mms^{-1} 0,093384 a pro ostatní rychlosti (v=100; 200;300;400mms^{-1}) jsou hodnoty 0,100326 až 0,102424, rozdíl hodnot je pouze 0,002098. Pro množství maziva 2,0gm^{-2} je hodnota koeficientu tření pro rychlost v=50mms^{-1} 0,086276 a pro ostatní rychlosti (v=100; 200;300;400mms^{-1}) jsou hodnoty od 0,093839 až 0,096202, kdy rozdíl mezi hodnotami je 0,00236.

U kontaktních tlaků **10** a **12MPa** mají grafy koeficientů tření obdobný charakter, jejich průběhy vykazují minimální hodnotu na počátku při rychlosti v=50mms^{-1} a pak následuje pozvolný nárůst tření při rychlosti v = 100mms^{-1} a pro ostatní sledové rychlosti (v = 200;300;400mms^{-1}) průběhy setrvávají ve stejném pásmu hodnot, jak je znázorněno na grafech 71. pro tlak 10MPa a 72. pro tlak 12MPa.

9.3 Vliv množství naneseného maziva

Při experimentálním měření zkoušek tribologického testu bylo voleno množství maziva při nanášení na substrát s ohledem na zachování stejných podmínek, které se používají při reálném lisování v oblasti mazání a přimazávání během tažení karosářských výlisků. Jak již bylo popisováno v kapitole 7.3.5. pro testování byly voleny 3 množství maziva:1,0;1;5; 2,0± 0,1gm^{-2}. Jako testované mazivo byl vybrán prací olej **AC PL 3802-39LV.**

V grafech z celého experimentálního měření, jednotlivých průběhů vynesených dle množství maziva a následně vypočtených koeficientů tření z naměřených hodnot protahování pásku je zřejmé, že při nižším množství naneseného maziva 1,0gm^{-2} jsou podmínky pro tažení nejméně příznivé a tedy hodnoty jednotlivých měření dosahují nejhorších výsledků. Pro množství maziva 2,0gm^{-2} jsou podmínky pro tažení (v porovnání ke zvolenému množství maziva) nejlepší z možných tří variant a tedy bylo dosaženo lepších respektive nižších hodnot sil potřebných k protažení pásku u tribologického testu.

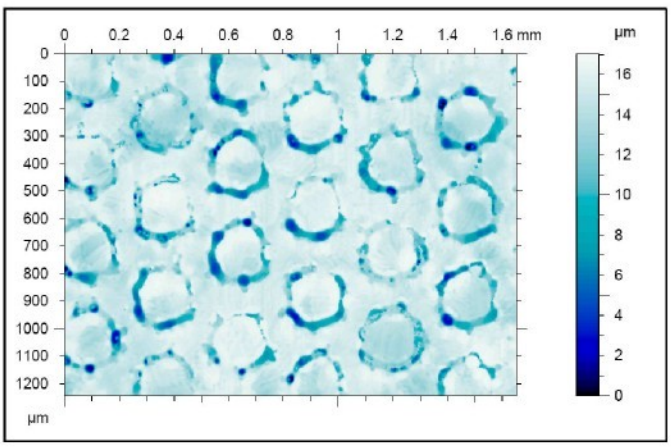
Z hlediska smyslu a účelu používání mazadel při operaci tažení je zřejmé, že cílem je co největší snížení pasivních odporů při posuvech tvářeného plechu a to zejména v oblasti přidržovače a tažné hrany tažnice. Nemenší podíl zde hraje také používaný typ substrátu a materiál z něhož je vyroben nástroj. Snaha nalézt optimální kombinaci vstupujících prvků do

triblogické soustavy ve svých důsledcích vede ke snížení celkové síly potřebné při tažení a tím i k poklesu napětí a deformace v kritických místech výlisku.

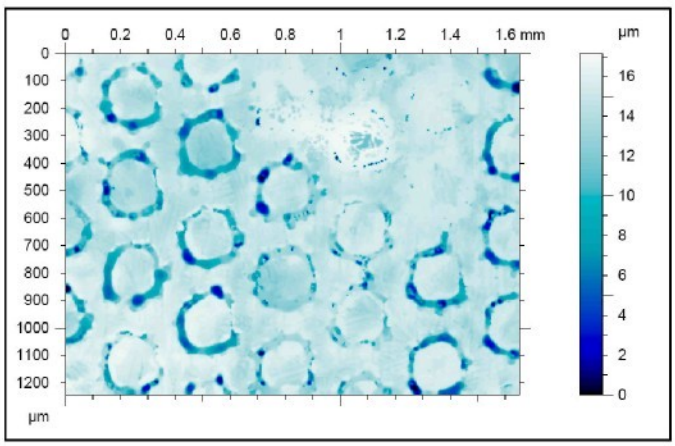
Nežádoucí skutečností v průběhu tažení je výskyt zadírání, jeho vznik můžeme částečně ovlivnit a minimalizovat právě množstvím nanášeného maziva na substrát, jak bylo potvrzeno v rámci experimentálního měření této disertační práce.

Výsledky měření jen potvrdily analýzu hodnocení morfologie i z hlediska vyplnění struktury mazivem. Množství nanášeného maziva na substrát se podílí na tribologických dějích ve sledované soustavě a morfologie povrchu plechu má značný vliv na ulpívaní maziva v textuře.

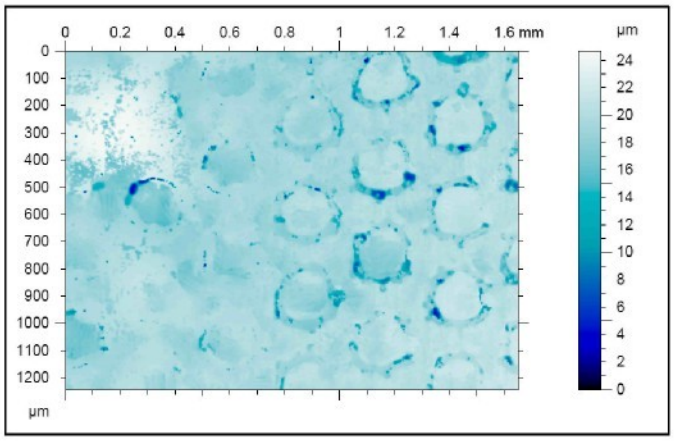
Na obr.9.1 až 9.3. je možné sledovat vliv jednotlivých množství maziva, které ulpí na povrchu testovaného substrátu, při daných specifických hodnotách mikrogeometrie povrchu substrátu jež byly popsány v kapitole 3.4.2 ..



Obr.9.1.: *Množství naneseného maziva 1,0gm^{-2} na povrchu substrátu EBT-SIBETEX*

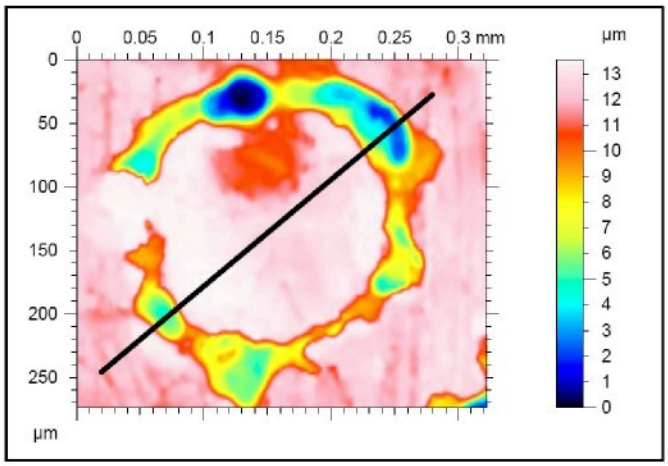


Obr.9.2.: *Množství naneseného maziva 1,5gm^{-2} na povrchu substrátu EBT-SIBETEX*

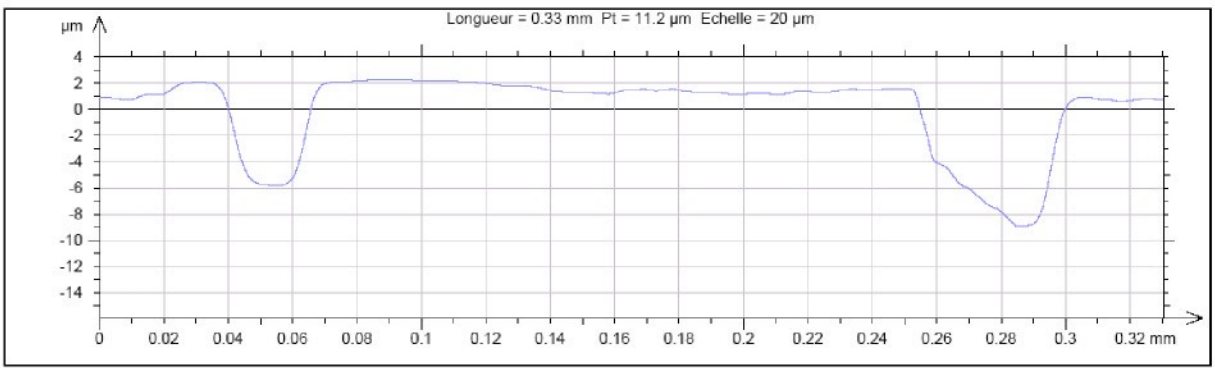


Obr.9.3.: *Množství naneseného maziva 2,0gm^{-2} na povrchu substrátu EBT-SIBETEX*

Na obr.9.4 je zobrazen detail elementu morfologie typu EBT-SIBETEX bez maziva a změřena jeho hloubka profilu textury, na obr.9.5 je pak znázorněn proměřený profil tohoto elementu.

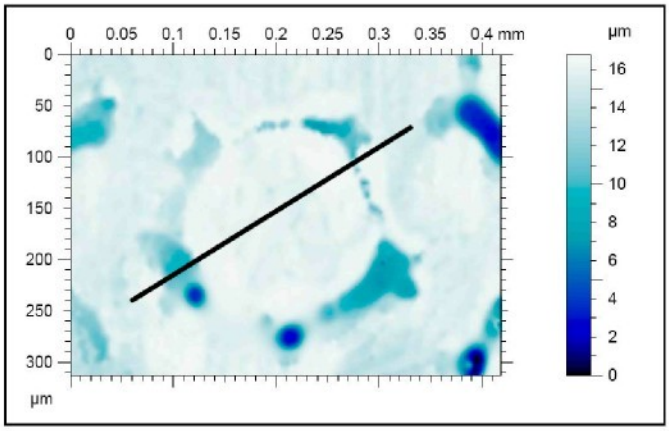


Obr.9.4.: *Detail elementu morfologie EBT-SIBETEX, bez maziva*

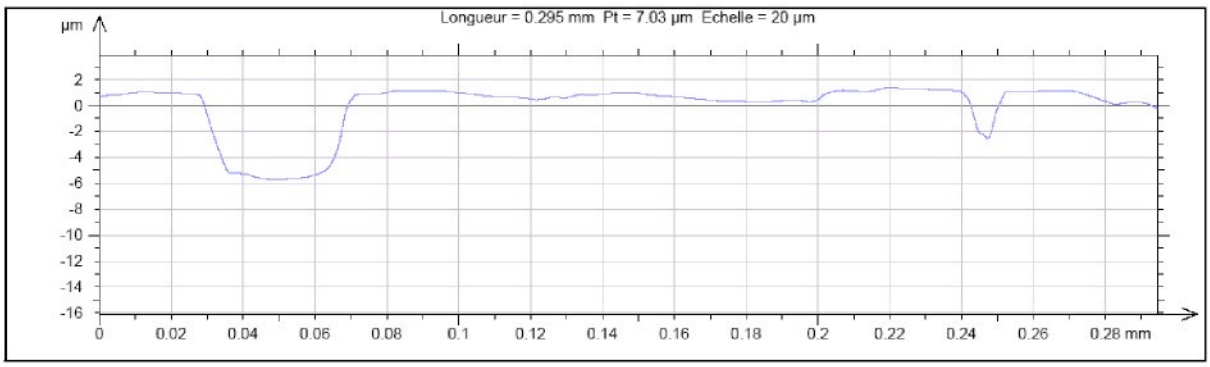


Obr.9.5.: *Profil elementu morfologie EBT-SIBETEX, bez maziva*

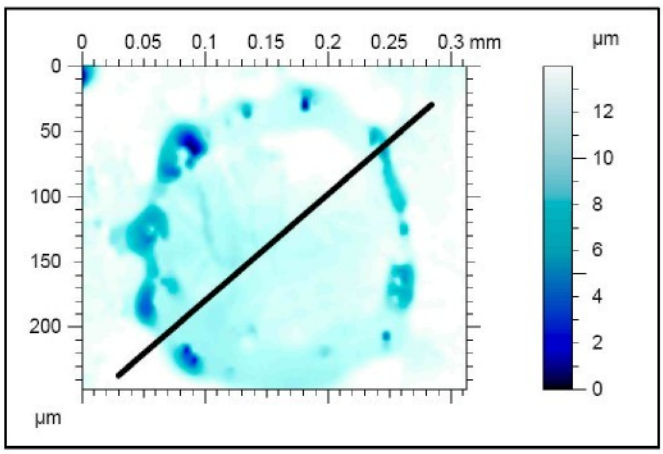
Na obr.9.6. je detailní pohled elementu s množstvím maziva 1gm^{-2} a na obr.9.7 je profil elementu vyplněný tímto množstvím maziva a proměřené jeho odpovídající množství. Stejné znázornění elementu je i pro množství maziva 1,5gm^{-2} na obr.9.8 a obr. .9 a také pro množství maziva 2gm^{-2} jež jsou na obr.9.10 a 9.11. Z jednotlivých profilů měřených elementů morfologie je patrné, že nejpříhodnější podmínky pro tažení jsou splněny při množství maziva 2gm$^{-2,}$, kde vyplnění profilu elementu má příznivý vliv na tribologické podmínky tažení.



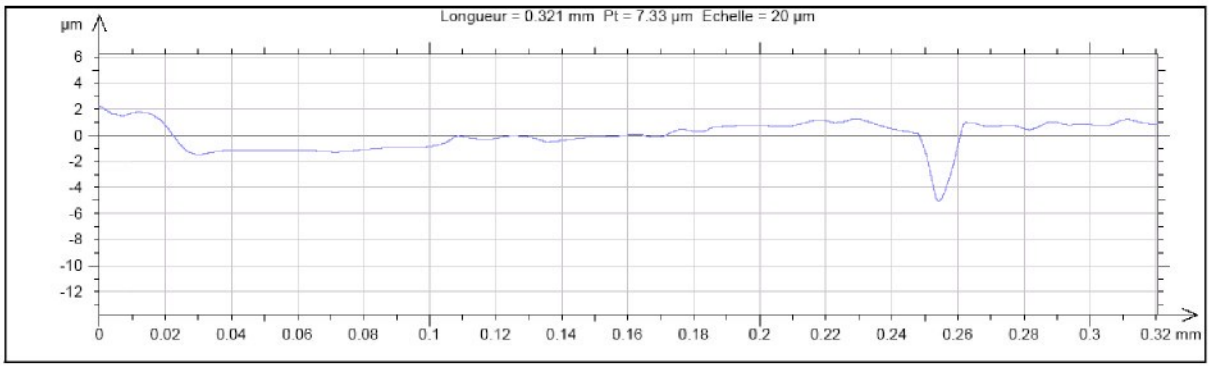
Obr.9.6.: *Detail elementu morfologie EBT-SIBETEX ,množství maziva 1gm^{-2}*



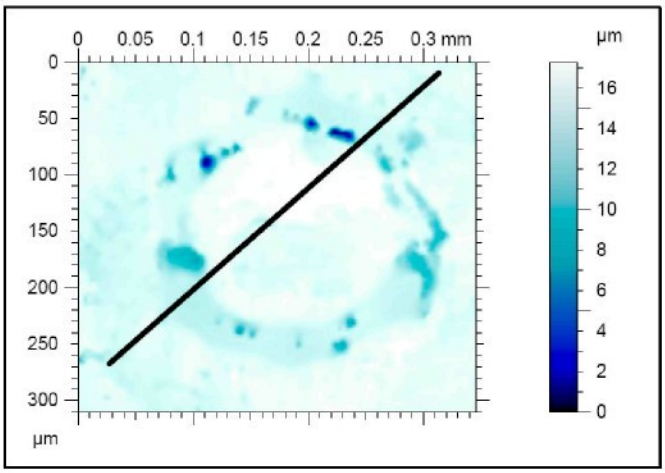
Obr.9.7.:*Vyplněný profil elementu morfologie EBT-SIBETEX, množství maziva 1gm^{-2}*



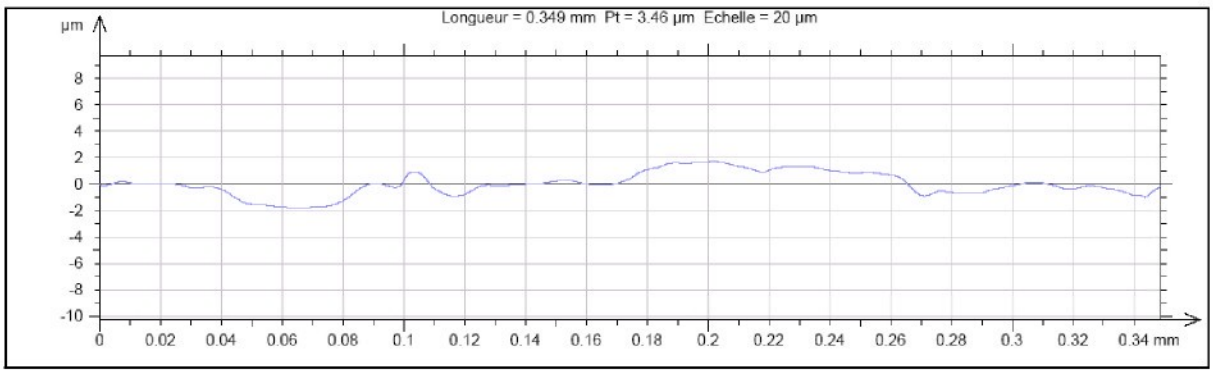
Obr.9.8.: *Detail elementu morfologie EBT-SIBETEX, množství maziva 1,5gm^{-2}*



Obr.9.9.: *Vyplněný profil elementu morfologie EBT-SIBETEX, množství maziva1,5gm^{-2}*



Obr.9.10.: *Detail elementu morfologie EBT-SIBETEX, množství maziva 2,0gm^{-2}*



Obr.9.11.: *Vyplněný profil elementu morfologie EBT-SIBETEX, množství maziva 2,0gm^{-2}*

10 DISKUSE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Diskuse výsledků disertační práce navazuje na dílčí diskuse výsledků uvedené v předcházejících kapitolách k jednotlivým výsledkům.

Předložená disertační práce na téma **Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení** je příspěvkem při řešení teoretických i praktických problémů spojených s výrobou výlisků z plechu. Téma a řešení disertační práce úzce souvisí s problematikou zpracování pozinkovaných plechů se zvláštní morfologií povrchu v automobilovém průmyslu. Testovaný materiál s morfologií povrchu typu EBT-SIBETEX byl vybrán s ohledem na dnes běžně používané materiály v sériové výrobě ve ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav. Hodnocení testovaného materiálu bylo provedeno pomocí základních mechanických hodnot zjištěných s použitím statické zkoušky tahem. Morfologie povrchu plechu byla hodnocena pomocí základních normovaných parametrů drsnosti a též bylo využito specielní pracoviště ve Francii pro získaní vrstevnicových map topografie povrchu ve 3D, které tak lépe odpovídají kritériím hodnocení povrchu.Vzhledem k tomu, že nejen drsnost povrchu zpracovávaného materiálu má značný vliv na výsledek celého procesu lisování, je důležitý podrobný komplexní popis povrchu plechu. Zatím vliv povrchu testovaného materiálu byl opomíjen a tím tak docházelo k ovlivnění výsledků zkoušek při testování.

Pro zjišťování tribologických vlastností s ohledem na výskyt zadírání při tažení plechů s povlaky zinku byl, na základě hodnot tažných sil získaných experimentálním způsobem, vypočten koeficient tření při zadaných technologických podmínkách. Koeficient tření byl zjišťován pomocí zkoušky protahováním pásku za použití maziva a to konkrétně pracího oleje AC PL 3802-39LV ve stanoveném množství 1,0; 1,5; 2,0 ± 0,1gm^{-2}, rychlosti posuvu materiálu v=1; 5; 10; 25; 50; 100; 200; 300; 400mms^{-1}, kontaktním tlaku p=2 až 16MPa. Všechny podmínky testování byly voleny s ohledem na reálné lisování a co největšímu přiblížení podmínkám vyskytujícím se v provoze lisoven.

Tribologickou zkouškou bylo prokázáno, že koeficient tření není v průběhu procesu tažení plechů konstantní a poměrně výrazně se mění. Pro testovaný materiál byly nalezeny funkční vztahy koeficientu tření na velikosti kontaktního tlaku, rychlosti posuvu materiálu a použitém mazadlu. Tyto vztahy mohou být použity pro zpřesnění výpočtových modelů při analýze deformace výlisku pomocí metody konečných prvků. V současné době již probíhá začlenění těchto nových poznatků do vývoje nové verze simulačního programu PAM-STAMP^{TM}, kde by již měla být možnost tyto hodnoty zadávat.

Významné pro další sledování tribologických dějů při tažení jsou zejména zjištěné hodnoty koeficientů tření získané při vysokých rychlostech tažení, které doposud chyběly jednak pro detailnější analýzu pohledu na tažení pozinkovaných plechů a vliv jejich zadírání během tohoto procesu, ale též při zadávaní vstupní dat pro simulační programy.

Experimentální měření disertační práce jednoznačně prokázala jednotlivé vlivy zadaných technologických podmínek na vznik zadírání při tažení pozinkovaných plechů. Z hlediska

vyhodnocení byl též důležitý výběr hodnot pro určení koeficientu tření a na základě stanovených technologických podmínek experimentálních měření pak proveden jeho výpočet

1. Výběr naměřených hodnot sil stanovených pro výpočet koeficientu tření

Při tribologickém testu byly určovány charakteristiky sil F_{max}, F_h, F_{min}, F_s, ΔF získané při protahování pásku za určitých podmínek modelující proces tažení. Otázkou bylo, jakým způsobem vyhodnocovat tribologický test v problematice zadírání. Jak již bylo diskutováno v dílčí diskuzi, pro popsání reálného stavu při tažení bylo v práci pro výpočet koeficientu tření upřednostněna maximální síla F_h, které bylo dosaženo v ustálené oblasti měření protahovaného vzorku. Hodnoty takto vypočítaných koeficientů tření představují nejméně příznivý stav při tažení, který může z tribologického hlediska nastat za daných technologických podmínek a tvářeného materiálu. Výběr této hodnoty F_h byl podložen provedenými experimentálními měřeními v této práci.

Zejména u malých rychlostí (v=1; 5; 10mms^{-1}), jsou příznivé podmínky pro vznik zadírání a to se projevuje v největší míře jak je patrno z grafů jednotlivých měření. Během tažení dochází ke vzniku„mikrosvarů“ třecích dvojic nástroj- materiál, tyto mikrosvary se projevují v grafických průbězích tzv.“stick -slip“ efektem, což je určitý projev zadírání, kteý se vyskytuje zvláště u pozinkovaných plechů. Právě vrstva zinku zde hraje důležitou roli při zadírání a její přítomnost na povrchu substrátu značně zhoršuje podmínky tažení, iniciuje a způsobuje vznik zadírání.

2. Vliv rychlosti tažení a kontaktního tlaku na koeficient tření

Tyto dvě veličiny jako technologické podmínky tažení nelze hodnotit jednotlivě, neboť spolu úzce souvisí a tím i přímo ovlivňují hodnotu koeficientu tření.

Pro posouzení vzájemného vlivu kombinací parametrů devíti rychlostí, osmi tlaků pro tři množství maziva jsou sestrojeny grafy a uvedeny v příloze P5.

Na základě provedených experimentálních měření a z uvedených grafů závislostí parametrů lze konstatovat, že se zvyšující se rychlostí současně s rostoucím tlakem narůstá velikost koeficientu tření, vypočítaného z naměřených jednotlivých charakteristik sil potřebných na protažení pásku. Spolu se vzrůstající silou se zvyšuje zároveň i možnost vzniku nežádoucího zadírání. Vzhledem k výsledkům uváděným v literatuře [40], kdy s rostoucí rychlostí a zvyšujícím se tlakem koeficient tření klesá, lze opačný trend charakteristiky jednotlivých grafů vysvětlit přítomností zinkového povlaku na povrchu testovaného substrátu, kdy jeho účast v procesu styku třecích dvojic v tribologické soustavě zcela mění podmínky tažení samozřejmě s ohledem na použitý materiál nástroje.

Z hlediska závislosti vlivu koeficientu tření na rychlosti protahování pásku, bylo při testování zjištěno, že rychlost 50mms^{-1} představuje jakousi „hraniční“ hodnotou v rozsahu měřených rychlostí, neboť právě při této hodnotě byl zjištěn minimální koeficient tření pro všechny použité tlaky a nanášené množství maziva.

Z tribologického hlediska je zajímavé zjištění při rychlosti 400mms^{-1}malého rozdílu hodnot rozkmitu sil u nejmenšího tlaku 4MPa až po nejvýše použitý přidržovací tlak 12MPa. Tento rozdíl činí pouze 177,13 N a potvrzuje tvrzení o vyrovnávání průběhů jednotlivých charakteristik měřených hodnot sil během testu při vysokých rychlostech.

Je nutné podotknout, že tato maximální rychlost použitá při experimentální měření protahování pásku (400mms^{-1}) je hodnota, které se během tažení dosahuje jen u moderních lisovacích strojů. Její používání klade vysoké nároky na tvářecí nástroje a na dobré zvládnutí samotného procesu tažení výlisků. Nicméně při tažení u vybraných druhů lisů dosahuje rychlost beranu tuto hodnotu, proto její testování má význam z praktického hlediska.

3. Vliv nanášeného množství maziva

Jednotlivá experimentální měřeních a následně zhotovené grafy jednoznačně potvrdily vliv naneseného množství maziva na povrch testovaného substrátu. Jak je patrné z grafů, nejméně příznivé podmínky tažení jsou u nanesení nejmenšího množství maziva 1,0gm^{-2}, což je zdokumentováno i na obrázcích o vyplnění povrchu substrátu mazivem. Zde je názorně vidět jednotlivé vyplnění povrchu profilu elementu morfologie pro množství maziva 1,0; 1,5; 2,0gm^{-2}.

11 ZÁVĚR

V rámci řešení disertační práce byl experimentálně prokázán vliv vybraných technologických parametrů na zadírání při tažení karosářských plechů s povlakem na bázi zinku. Jedním z cílů práce bylo provést a vyhodnotit tribologické testy na novém vysokorychlostním zařízení, nejen pro testy při standardních rychlostech, ale zejména při vysokých rychlostech, na které bylo nové zařízení zkonstruováno. Testy probíhaly v laboratorních podmínkách, při zachování technologických parametrů, co nejvíce se přibližujících reálnému tažení v lisovnách automobilových firem při výrobě výlisků, jednotlivých dílů karoserie automobilu.

Cílem experimentálního měření bylo zjistit závislosti jednotlivých zadaných vstupních parametrů, majících vliv na bezporuchové lisování a zmapovat podmínky pro vznik a výskyt zadírání při tažení nepravidelných výlisků tzv."karosářského typu" v automobilovém průmyslu. Z popsané teorie v předkládané práci a z provedených laboratorních tribologických testů vyplývá, že řešená problematika je jen vyřešením dílčích problémů v celé oblasti tažení a její tribologické soustavy. V rámci disertační práce bylo možné obsáhnout pouze část vlivů do tribologické soustavy vstupujících a tím ovlivňujících vlastní proces tažení. Z mnoha vlivů byly vybrány ty, jež se dají pokládat za stěžejní (rychlost posuvu materiálu v nástroji, kontaktní tlak pod přidržovačem, mazivo a jeho nanášené množství).

Výsledky uváděné v práci jsou tedy platné pro zadané konkrétní podmínky a lze je formulovat jako obecné závěry s tím, že odpovídající mezní hodnoty budou záviset na testovaném materiálu použitém na výrobu výtažku, stejně tak jako materiálu použitého na výrobu nástroje pro tažení, typu maziva a dalších mnoha faktorech.

Do tribologické soustavy vstupují ještě ostatní nežádoucí vlivy, které tak zhoršují podmínky tažení a do značné míry též ovlivňují možný vznik a výskyt zadírání. Jedná se problém čistoty prostředí v lisovnách, který je trošku opomíjen, neboť v laboratorních podmínkách se nevyskytuje.

Tažení se provádí v reálném provozu dílen, kde není vždy zaručena čistota prostředí, čistota je zvláště důležitá při styku kontaktu nástroje a materiálu, kdy v nástroji z důvodů přítomnosti různých nečistot se mohou též projevit sklony k zadíraní při tažení v sériové výrobě. Zadírání způsobuje znehodnocení výlisku, ale též vede k možnému poškození nástroje některým z typů opotřebení. Zejména manipulace s tvářeným materiálem během výroby dílů karoserie může znečistit povrchy výlisků, jelikož jsou opatřeny mazivem, tím snadněji na nich ulpívají nečistoty. Během tažení mazivo a jeho čistota hraje důležitou roli, kdy podmínky tažení jsou prokazatelně zhoršovány v závislosti na době používání maziv v lisovnách [73].

Výsledky disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. V teoretické části jsou shrnuty základní poznatky o problematice tažení nepravidelných výlisků tzv."karosářského typu". Jsou zde popsány jednotlivé druhy výroby morfologií povrchu plechu, výroba zinkových povlaků a jejich ochranná funkce.V kapitolách pojednávajících o tribologii je analyzován vliv tření a s tím související i úloha mazání při tažení a hodnocení tribologických vlastností na základě laboratorních zkoušek. S ohledem na výskyt zadírání při tažení je zde zmínka o opotřebení nástrojů a s tím související poškození povrchu plechů při tažení.
2. V rámci experimentálního měření bylo provedeno množství laboratorních zkoušek, jejichž podmínky byly předem stanoveny a diskutovány v rámci řešení práce. Výsledky měření byly zaneseny do grafických záznamů a z nich vyhodnoceny závěry, kdy z pracovních digramů získaných za stanovených technologických parametrů zkoušek byly vypočteny koeficienty tření jako základní kriterium při hodnocení zadírání.
3. Nalezení závislostí a objasnění podmínek vzniku zadírání a jeho projevů při tažení ocelový plechů s povlaky na bázi zinku přispěje ke zlepšení lisovatelnosti těchto plechů a tím zvýšení kvality výroby karosářských výlisků.

Vlastní přínosy práce

Práce přináší nové poznatky především v hodnocení tribologických vlastností testované soustavy: nástroj-materiál-technologické podmínky, zjišťovaných za vysokých rychlostí. K tomuto účelu bylo v rámci disertační práce navrženo a zkonstruováno nové zařízení, umožňující nastavení technologických podmínek, přibližujících se reálnému lisování a experimentálně tak provedeny zkoušky pomocí tribologického testu .

V rámci řešení této práce tak na katedře strojírenské technologie vzniklo moderní pracoviště s unikátním zařízení pro hodnocení tribologických vlastností plechů a maziv.

Z hodnot získaných při experimentálním měření byl vypočten koeficient tření jako základní kriterium pro hodnocení lisovatelnosti plechů s povlakem zinku. Z jednotlivých grafů pak sledována náchylnost těchto materiálů na vznik zadírání při tažení za určitých zvolených podmínek.

Konkrétní hodnoty vypočteného koeficientu tření budou sloužit jako podklady do databáze vstupních dat, jenž je nutné zadávat při simulacích procesu tažení. Během tažení koeficient tření není konstantní a výsledky experimentálního měření tak poslouží k zpřesnění výpočtu a tím i větší shodě simulace s reálným tažením. Zejména hodnoty získané z měření pro vysoké rychlosti tažení doposud chyběly nejen pro již zmíněné simulace, ale též jako informativní podklady do provozu lisoven.

Jedním z přínosů práce lze považovat zavedení do provozu lisoven a využití nového zařízení pro přesné zjišťování a kontrolu množství maziva na povrchu testovaného substrátu, neboť nejen množství maziva, ale jeho přítomnost vůbec v procesu tažení ovlivňuje silové poměry v tribologické soustavě a tím samozřejmě i koeficient tření, s kterým souvisí bezprostředně zadírání.

Přínosy disertační práce pro praxi

1. zmapování vlivu vybraných technologických parametrů na výskyt zadírání při tažení pozinkovaných plechů
2. zjištění reálných hodnot koeficientu tření za laboratorních podmínek
3. možnost modelování procesu tažení za reálných podmínek s ohledem na hodnoty koeficientu tření, který není při tažení konstantní
4. vyzkoušení zařízení pro kontrolu maziva, jeho využití a zavedení do provozu lisoven

Doporučení vyplývající z experimentálních výsledků

Z výsledků experimentálních měření vyplývá jako doporučení pro další tribologický výzkum v oblasti zpracování plechů zaměřit se na jednotlivé faktory vstupující do tribologické soustavy při tažení plechů jako např. na vliv materiálu nástroje, vliv mikrogeometrie nejen nástroje, ale i zpracovávaného materiálu, vliv jednotlivých typů maziv a jejich nanášené množství, vliv morfologie povrchu substrátu, vliv teploty nástroje atd. Dokud nebudou všechny tyto kombinace vzájemně prozkoumány a vyhodnoceny, nemůžeme s určitostí odpovědět na otázku, která trápí současné výrobce automobilových dílů a tou je zadírání a jeho příčiny vzniku při tažení karosářských plechů, vyskytující se zejména u plechů s povlaky na bázi zinku. Vzhledem k neustálému vývoji nových materiálů používaných na výrobu tažných nástrojů, ale i zpracovávaných materiálů a jejich povlaků je nutné tyto vlivy sledovat a řešit.

Otázka chování se materiálu jako prvku tribologického systému má extrémně široký záběr a obsahuje mechanické, termické, chemické, statické i dynamické vlastnosti, projevují se zde vlivy nejen základního materiálu, ale i povrchových a podpovrchových vrstev.

Při modelování tribologických systémů musí jednotlivé modely obsahovat vlastnosti materiálů a vliv mikrogeometrie třecího povrchu, zároveň i celkovou oblast tření a mazání (hydrodynamiku, smíšené tření, tření v mezních vrstvách, tření tuhých těles). Výzkum je třeba zaměřit nejen na chování tribologických prvků při bezporuchovém chodu systému, ale i na kritické momenty souvisejícími se zadíráním a opotřebováním.

Tribologický výzkum v oblasti tváření plechu probíhá zejména na úrovni zkoumání makromodelu, kdy se zohledňuje celý funkční projev sledovaného modelu a tento výzkum lze

charakterizovat tím, že jsou získávány údaje z vnějších měřitelných veličin tribologického systému. Katedra strojírenské technologie v rámci vědeckovýzkumné činnosti spolupracuje na řešení mnohých problémů spojených s výrobou karoserie automobilů v oblasti tváření tenkých plechů a zkoumání tribologických dějů s naším předním výrobcem automobilů ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav. V rámci této dlouholeté spolupráce, na základě experimentálních měření prováděných na katedře strojírenské technologie TUL a prezentovaných výsledků ve výzkumných zprávách českých i zahraničních firem byla katedra oslovena, aby se začlenila do evropského projektu v oblasti řešení problematiky zadírání plechů, neboť má zkušenosti s výzkumem tribologických dějů a disponuje novým moderním a ve své podstatě ojedinělým tribologický pracovištěm v České republice. Jak již bylo zmíněno, zařízení na zjišťování tribologických vlastností při tažení plechů umožňuje provádět tribologické testy s možností nastavení technologických parametrů, přibližujících se reálným podmínkám při tažení plechů v lisovnách.

Navrhovaný projekt má název „Zlepšení kvality povrchu automobilových pohledových dílů z HDG po lisování“ a je podáván v rámci Evropské komise, programu: „Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel“. Řešení projektu bude v rámci mezinárodní spolupráce s firmami zabývajícími se výrobou a zpracováním plechu, výzkumnými pracovišti a univerzitami ze Švédska, Rakouska, Německa a České republiky.

Projekt by měl sledovat proces výroby materiálu, jeho distribuci ke zpracovateli, tj.k výrobci karoserií automobilu. V rámci této linie by jednotlivé prováděné testy a laboratorní zkoušky ověřovaly kvalitu výchozího materiálu až k jeho zpracování na finální výrobek.

Výsledkem projektu, plynoucích z poznatků ze zkušeností tažení tenkých plechů s povlaky na bázi zinku, je snaha prohlubovat další poznatky a nalezení závislostí vlivu technologických parametrů na výskyt zadírání při tažení a minimalizovat možnost jeho vzniku při sériové výrobě.

12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] TMĚJ,J. – MIKEŠ,V.: Teorie tváření, skripta VŠST, Liberec 1981
[2] ČABELKA,J.: Mechanická technológia, Slovenská akademia vied, Bratislava 1967
[3] BUCHAR,Z.: Digramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů, Kandidátská disertační práce,VŠST Liberec, Liberec1987
[4] SPIŠÁK,E.: Matematické modelovanie a simulácia technologických procesov –ťahanie, Košice 2000
[5] PRIMUS,F.: Teorie tváření plechu a trubek, skripta ČVUT, vydavatelství ČVUT, Praha, 1980
[6] POLLÁKOVÁ,G.: Trenie v procese hlbokého ťahania. In:Sborník přednášek 6. mezinárodní konference „FORMABILITY ´94“, s.179-185, Ostrava 1994
[7] BAREŠ,K. - A KOLEKTIV: Lisování SNTL, Praha 1971
[8] HOUSER,J.: Analýza lisovatelnosti náročného výlisku vozu ŠKODA se zaměřením na vlastnosti hlubokotažných karosářských ocelových plechů válcovaných za studena, Diplomová práce, ČVUT Praha 2005
[9] ROLEČEK,L. - KOZMÉROVÁ,A.: Vliv struktury povrchu karosářských plechů na vzhled laku při výrobě osobních automobilů. In: Zborník prednášok z konferencie „Plechy – smaltovanie - lakovanie“, Stará Lesná, 1998, s.21-1-11
[10] JÍRA,M.: Úspora hmotnosti automobilové karoserie použitím pevnostních plechů, Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec1999
[11] RUMÍŠEK,P.: Příspěvek k mechanizmu plastického přetvoření u tváření povrchově upravených plechů. In:7.mezinárodní konference „FORM 2004“, Brno 2004, ČR, s.127-130, ISBN 80-86607-11-9
[12] MACHEK,V.: Tenké ocelové pásy a plechy válcované za studena.SNTL, Praha 1987
[13] SEDLÁČEK,V.: Povrchy a povlaky kovů, ČVUT Praha, 1992
[14] HRIVŇÁK,A. - TKÁČOVÁ,J .- GREŠKOVIČ,F.: Hodnotenie vybraných parametrov lisovatelnosti pozinkovaných plechov. In: 5. Mezinárodní konference „TECHNOLÓGIA 1997“, Bratislava 1997, s.801-805
[15] ŠIMČÁK,F.-BILLY,J.-ŠTEFAN,B.: Plechy vyšších technických parametrov – separátný výtlačok, In: Zborník prednášok z konferencie „Plechy – smaltovanie - lakovanie“, Stará Lesná, 1994
[16] ŠIMČÁK,F. - BILLY,J. - ŠTEFAN,B.: Hodnotenie vybraných charakteristik pozinkovaných hlbokoťažných plechov.Hutnické listy,č.12,1995
[17] BILLY,J. - ŠIMČÁK,F. - ŠTEFAN,B.: Parametre ovplyvňujúce lisovatelnosť pozinkovaných karosárských plechov. Acta Metallurgica Slovaca,č.3,Košice1997
[18] PARISOT,R.: Deformation and Demage Mechanisms of Zinc Coatigs on Hot-Dip Galvanized Steel Sheets:Part I.Deformation Modes.Metallurgical and Materials Transactions, Vol.35A,Iss.3,pg.797,15pgs. ISSN 10735623, 2004
[19] SEDLÁČEK,V.: Neželezné kovy a slitiny, SNTL Praha 1979
[20] MACHEK,V. – SODOMKA,J.: Nauka o materiálu –Kovy a kovové materiály 2.část, skripta ČVUT, Praha 2002
[21] KOLEKTIV AUTORŮ: Nové smery v technologii žiarového zinkovania. Alfa Bratislava, 1987
[22] HUBÁČKOVÁ,J.: K problematice jakosti povlaků vytvořených technologií žárového pozinkování. In:Sborník mezinárodní metalurgické sympozium „METAL ´96“, sborník díl 3., s. 62-67, Ostrava 1996

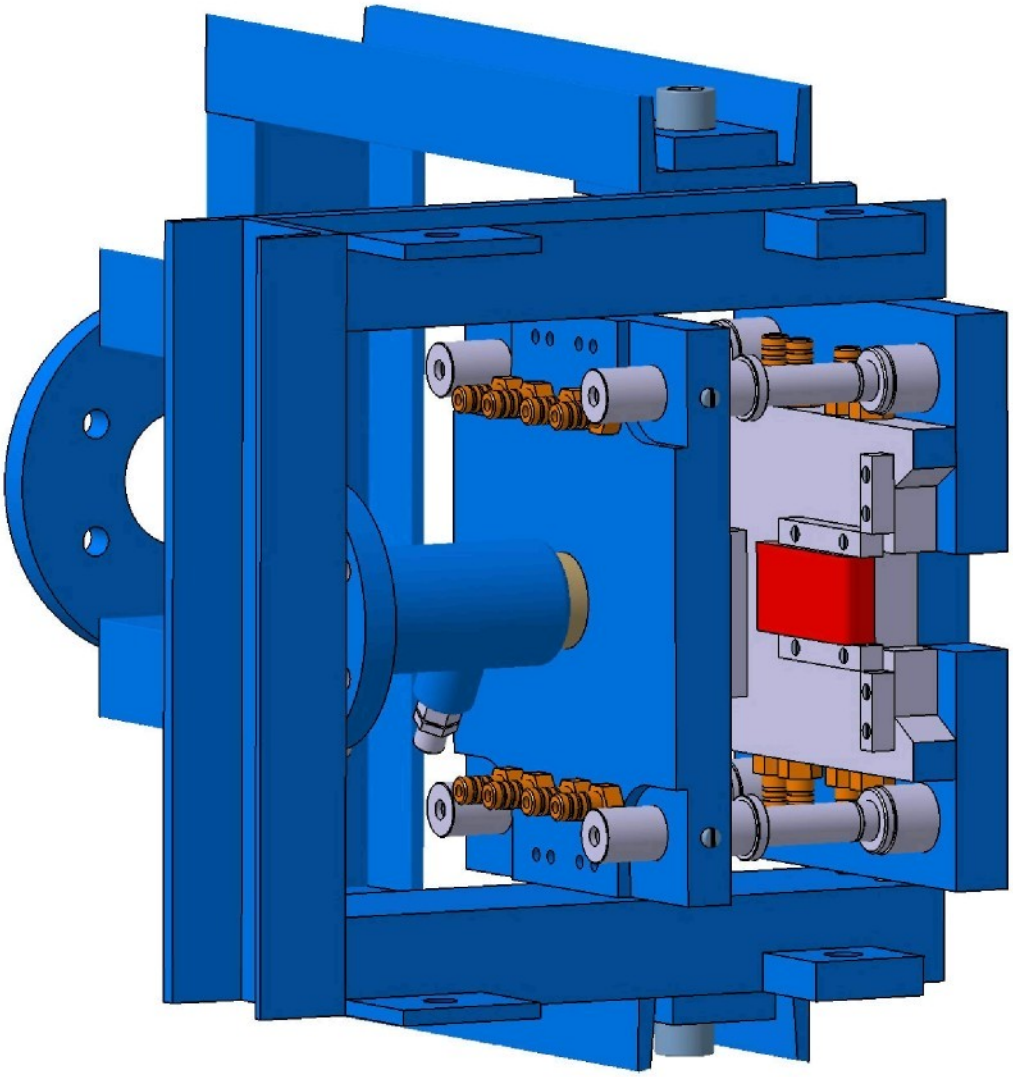
[23] MIKEŠ,V.: Hodnocení vlivu plastické deformace na ochrannou funkci povlaků Zn-Fe ocelových plechů určených pro tváření výlisků karosářského typu.Výzkumná zpráva TU v Liberci, Liberec 1996
[24] HRBÁČEK,P.: Charakteristiky mezních stavů při tváření ocelových plechů s kovovými povlaky v automobilovém průmyslu, Kandidátská disertační práce,TU v Liberci, Liberec 1991
[25] BACHORÍK,L. - ŠIMČÁK,F. - KUNDRÁTOVÁ,B.: Karosériové plechy produkcie VSŽ. In:Sborník mezinárodní metalurgické sympozium „METAL ´95“, sborník díl I.,s.33-37, Ostrava 1995
[26] ŠTĚPINA,V. - VESELÝ,V.: Maziva v tribologii.VEDA Bratislava, 1985,ISBN 71-059-85
[27] BLAŠKOVIČ,P. - BALLA,J. - DZIMKO,M.: Tribológia. Alfa Bratislava 1990
[28] VOCEL,M. - DUFEK,V. - A KOLEKTIV: Tření a opotřebení strojních součástí, SNTL, Praha 1976
[29] DIN EN ISO 4287, DIN EN ISO 13565 – Normy parametrů drsnosti povrchu
[30] WAGNER,S.: 3D-Erfassung der Oberflächenstrukturen von Aluminiumfeinblechen zur Beschreibung des tribologischen Verhaltens.In:EFB-Kolloquium Reinbung,Schmierung,Tribologie in der Blechbearbeitung,Německo 1993,s.
[31] ROLEČEK,L.: Výsledky lakování v návaznosti na topografii povrchu plechu In: Zborník prednášok „Plechy – smaltovanie - lakovanie“, Stará Lesná, 1999,
[32] Vzorky povrchu plechu ve 3D,výzkumné pracoviště firmy Sollac LEDEPP, Francie
[33] STEINHOFF,K. - RASP,W. - PAWELSKI,O.: Development of deterministic-stochastic surface structures ti improve the tribological conditions of sheet forming processes.In: 6th International Conference „METAL FORMING ´96“, Krakow1996, s.355-361
[34] BÜNTEN,R.-STEINHOFF,K.-RASP,W.- KOPP,R.-PAWELSKI,O.:Development of a FEM-model for the simulation of the transfer of surface structure in cold.rolling processes. In: „METAL FORMING´96“,Krakow1996, s.369-376
[35] BODÁK,V. - BARICA,S.: Rozbor súčasných možností prípravy povrchu pracovných valcov určených na valcovanie plechu za studena.Hutnické listy č.9, s.22-26, 1998
[36] BODÁK,V. - RAKUČIAK,R. - BARON,A.: Možnosti úpravy povrchu plechov produkcie VSŽ pred lakovaním a plastovaním. In: Zborník prednášok z konferencie „Plechy -smaltovanie - lakovanie“, Stará Lesná, 1998, s.23-1-8
[37] BILLY,J. - ŠIMČÁK,F. - ŠTEFAN,B.-ZÁBOJ,J.: Parameters influencing stamping behaviour of coated sheets.In:19 th Biennial IDDRG Congres, Maďarsko 1996, s.467-476
[38] JONASSON,M.: Influence of Surface Morphology on Frictional Behaviour in Sheet Metal Forming, 20th Biennial Congress IDDRG, Belgie 1998 s.225-237
[39] BRENDEL,H. - A KOLEKTIV: Tribotechnika, SNTL Praha 1984
[40] MANG,T. - DRESEL,W.: Lubricants and Lubrication,WiLEY-VCH GmbH,2001
[41] DANE,C.M.:Multipass friction tests on zinc coated sheet to simulate galling bahaviour.Sborník IDDRG, str.233-239, Lisabon, Portugalsko1994
[42] MANG,T.: Die Schmierung in der Metallberbeitung,Wurzburg,1983
[43] WIRTSCH,J. - GROCHE,P.: Tribological Investogation of a Lubricant Sample in the Strip Drawing Test.Technische University Darmstadt, 2000
[44] BOHÁČEK,F. - A KOLEKTIV: Části a mechanismy strojů II, Skripta VUT Brno,1983
[45] DRBOUT,J.: Tribologické podmínky při tažení výlisku z plechu, Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec2002
[46] JONÁŠ,V.: Vliv teploty na tribologické vlastnosti mazadel používaných při tažení výlisků .Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec 2002

[47] DYNYI,J.: About the Friction in Deep drawing Processes.In: 20th Biennial Congress and Working Group Meetigs, 1998
[48] ROBBE - VALLOIRE,F. - PAFFONI,B. - PROGRI,R. - GRAS,R.: An Asperity based Model for Fiction in Mixed Lubrication.www.tribology/altavista.com
[49] SUCHÁNEK,J.: Zhodnocení metod zkoušení odolnosti proti opotřebení u nástrojových ocelí pro tvářecí nástroje. In: Mezinárodní celostátní konference „Opotrebovanie a životnosť v tvárnení kovov",Bratislava 1974,s.75-86
[50] BOWDEN,F.P. - TABOR,D.: The Fiction and Lubrication of Solids,Part II Oxford,Clarendon Press 1964
[51] FENG,I. – MING,A.: New Theory of Metal Transfer and Wear.Lubrication Engng,1954 vol.10,č.1
[52] KRAGELSKIJ,I.V.: Trenije i iznos.Mašinostrojenie,1968
[53] ŠIMČÁK,F. - BILLY,J. - ŠTEFAN,B. - HOLÝ,A.: Evaluation of specific characteristics of zinc coated deep drawing sheets.In: 18th Biennial Congress IDDRG Recent Developments. In: Sheet Metal Forming Techlology,Portugalsko 1994, s.109-120
[54] SHTERTSER,A.A.: Welding wave on the contact spot of solid.In:Tribology International,Vol.31 No.4 1998, Elsvevir Science Ltd.,s.169-174,ISSN 03101-679X
[55] SEMENOV,A.P.: Skhvatyvanije metallov i metody ego predotvrashenija pri trenii. In:Trenijei Iznos,19801(2),s.236-246
[56] BUCHE,N.A.: Podshipnikovyje Splavy Dlja Podvizhnogo Sostava.In: Transport, Moscow ,1967
[57] KRASULIN,J.L.: Vzaimodeistvije Metalla s Poluprovodnikom v Tverdoi Faze. In: Nauka, Moskow,1971
[58] ARCELOR AUTO – Arcelor Group: Analysis of tribological tests on NIT by Liberec, Belgie 2004
[59] Fotografická dokumentace zadřených nástrojů – ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav
[60] KRÁL, M.: Napjatost výtažku a tlak na tažnou hranu při hlubokém tažení plechu. Kandidátská disertační práce, ČVUT Praha 1973.
[61] SANDBERG;O. – BUSTAD,P. – CARLSSON,B. - FÄLLSTRÖM;M. – JOHANSON,T.: Characterization of Tool Wear in Stamping of EHS and UHS Steel Sheet.In:Recen Advances in Manufacture & Use of Tool &Dies and Stamping Steel Sheets, Švédsko 2004
[62] TIŠNOVSKÝ,M. - MÁDLE,L.: Hluboké tažení plechu na lisech, SNTL Praha 1990, ISBN 80-03-00221-4
[63] Technický prospekt - Zařízení pro zkoušku tribologie ,OPRA s.r.o. Liberec:
[64] SOLFRONK,P.:Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisků z plechu. Disertační práce,TU v Liberci, Liberec 2002
[65] EN 10002-1 -norma pro zkoušku tahem
[66] SOLFRONK,P.: Metodika měření koeficientu tření zkouškou protahováním pásku,výzkumná zpráva č.HČ 2350/478, Liberec 2001
[67] KOLNEROVÁ,M.: Hodnocení tribologických vlastností plechů v závislosti na změně technologických parametrů s ohledem na výskyt zadírání v procesu tažení. In: Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25.výročí ustavení katedry tváření a plastů, TU v Liberci 2004, ČR, s.53-60, ISBN 80-7083-856-6
[68] ZBRÁNEK,I.: Vliv technologických parametrů (rychlosti, teploty a tlaku) na velikost koeficientu tření při tažení plechů s povlaky Zn. Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec 2004
[69] Firemní materiály průběhů rychlostí lisů– ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav
[70] SCHULER GmbH: Handbuch der Umformtechnik ISBN 3-540-61099-5, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

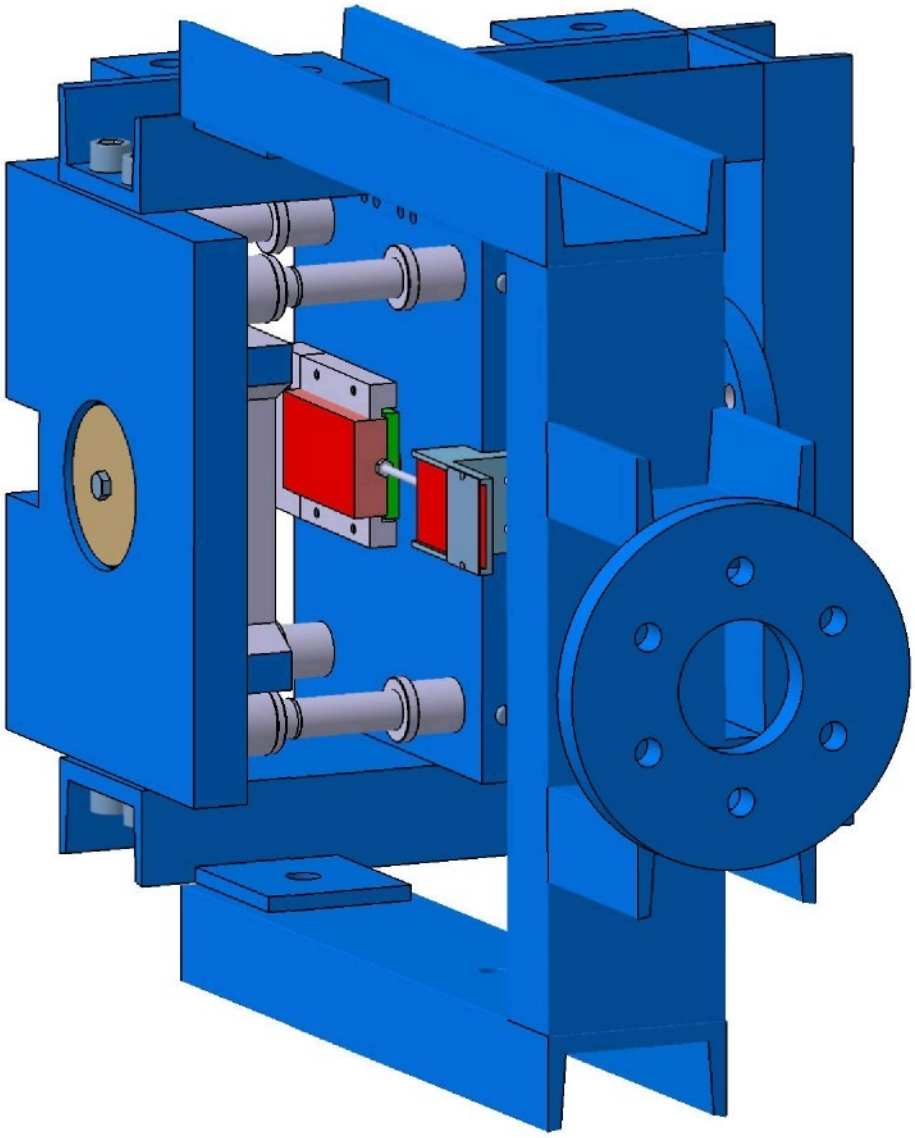
[71] Firemní materiály měřícího zařízení - Fuchs-Europe Schmierstoffe GmbH&Co.KG
[72] Prospekt -Temperačního agregátu TA3, A.M. spol. s r.o.,Liberec
[73] SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M. - KOVÁRNÍK,L. - DOUBEK,P.: Vliv doby používání maziva v lisovně na změnu tribologických vlastností při tažní karosářských výlisků.In: Mezinárodní konference „PRO-TECH-MA ´04"Košice,2004,SR s.419 424,ISSN 1335-2393
[74] MELOUN,M. - MILITKÝ,J.: Statistické zpracování experimentálních dat, edice PLUS,Praha 1994
[75] DRÁB,V. - MOC,L.: Teorie spolehlivosti a řízení jakosti,skripta VŠST,Liberec 1992

13 SEZNAM PŘÍLOH

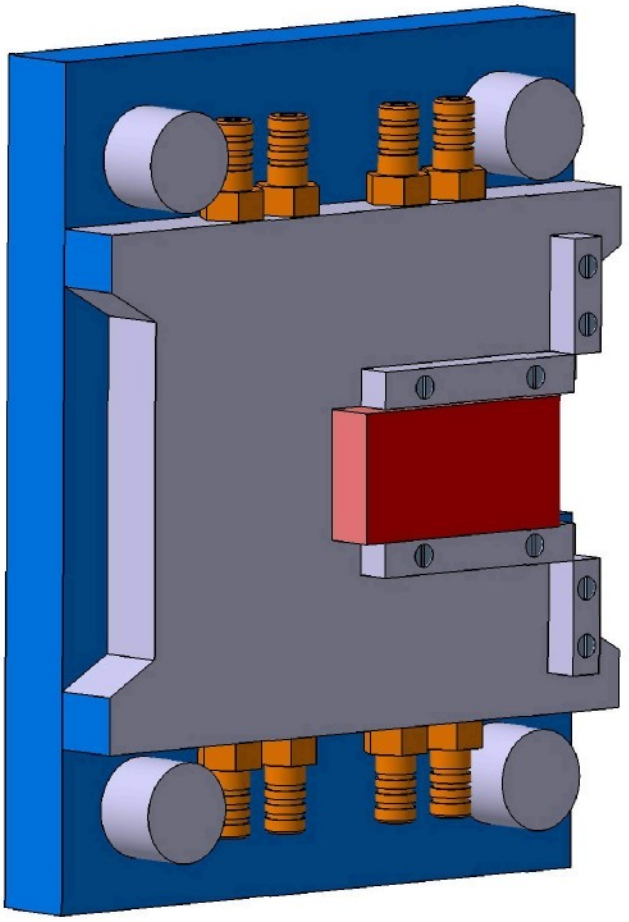
Příloha 1 Zkušební přípravek a čelisti vysokorychlostního zařízení SOKOL 400
Příloha 2 Zkušební protokoly zkoušky tahem dle EN 10002
Příloha 3 Zařízení pro statickou zkoušku tahem TIRAtest 2300
Příloha 4 Materiálový list maziva pracího oleje Anticorit AC PL 3802-39LV
Příloha 5 Komplexní vyhodnocení grafů koeficientu tření
Příloha 6 Seznam publikací

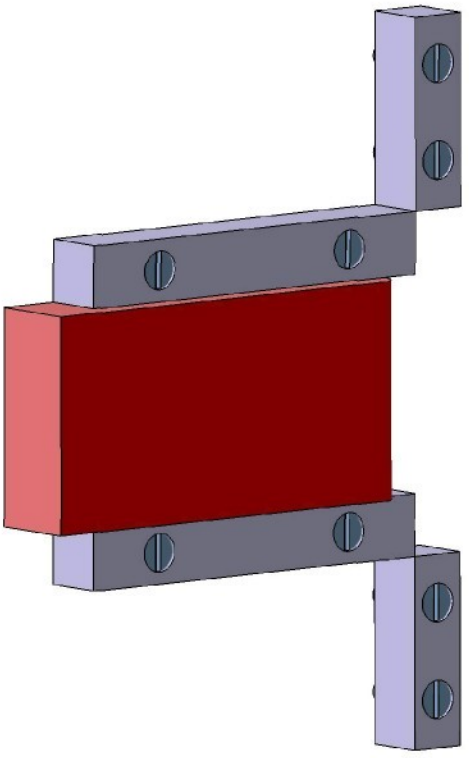


P1/1 Detailní pohled na otevřený zkušební přípravek

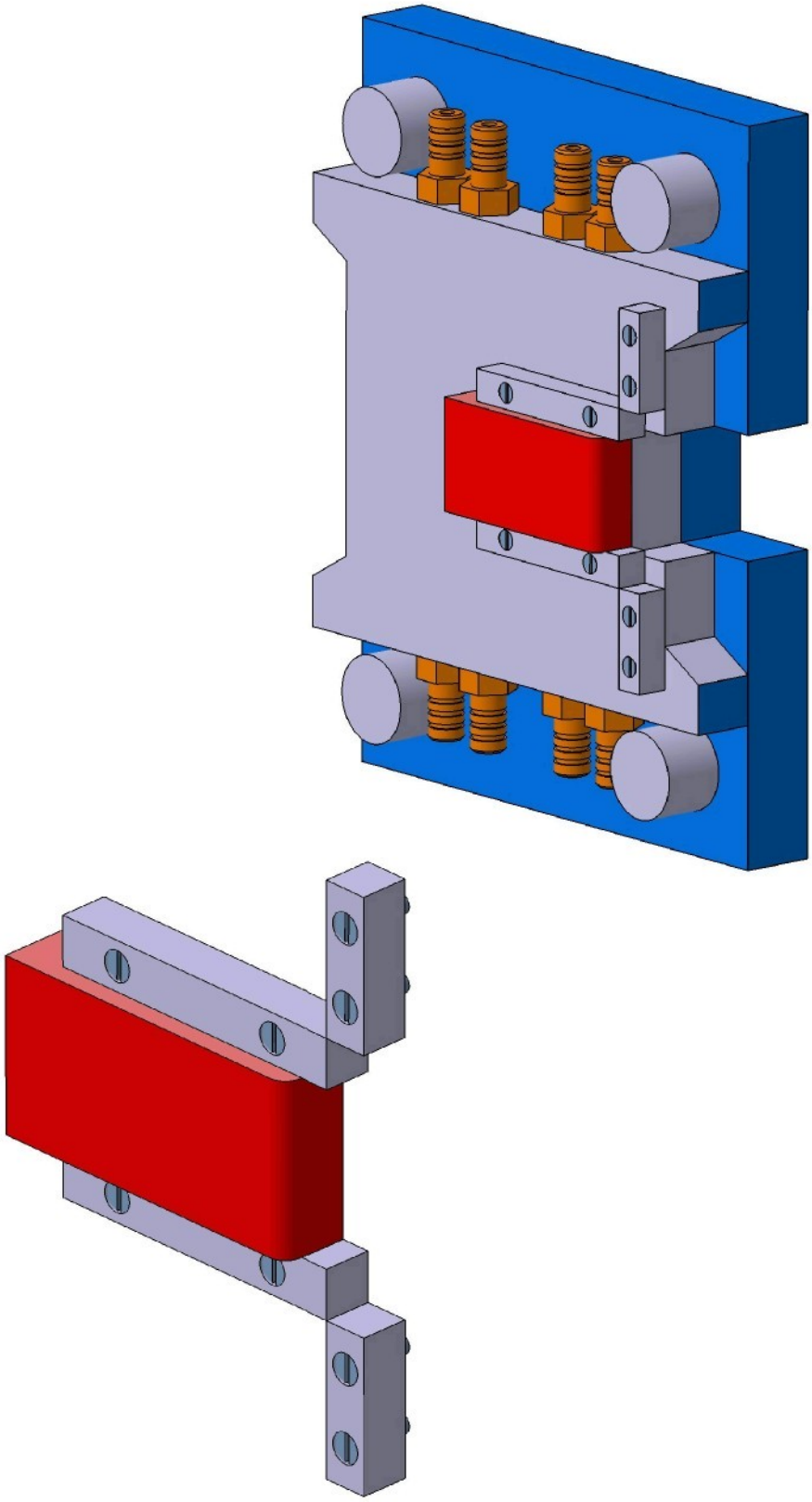


P1/2 Detailní pohled na otevřený zkušební přípravek

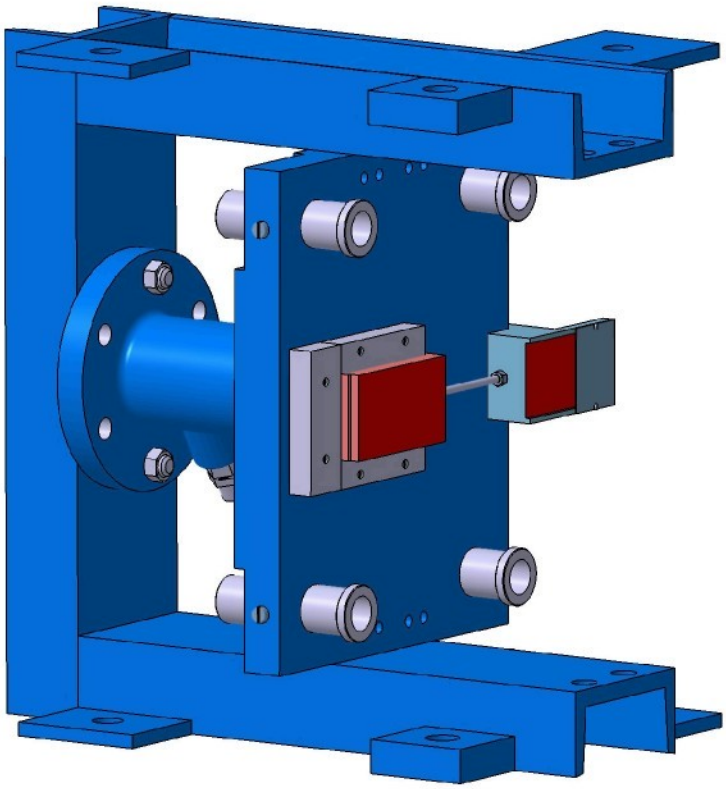


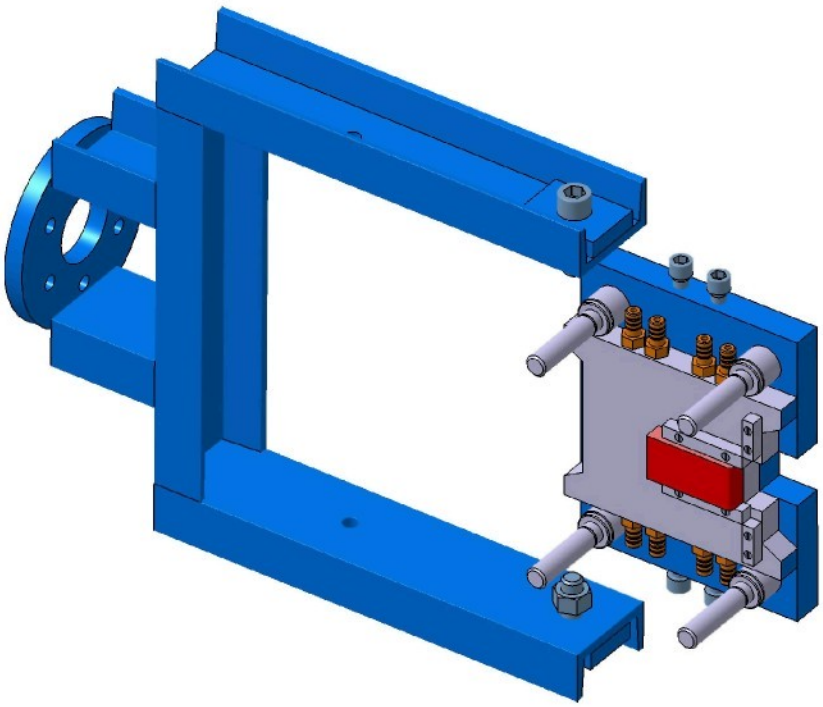


P1/3 Rozložená sestava přípravku s detailním pohledem na zkušební čelisti



P1/4 Rozložená sestava přípravku s detailním pohledem na zkušební čelisti





P1/5 Rozložená sestava přípravku

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

katedra strojírenské technologie

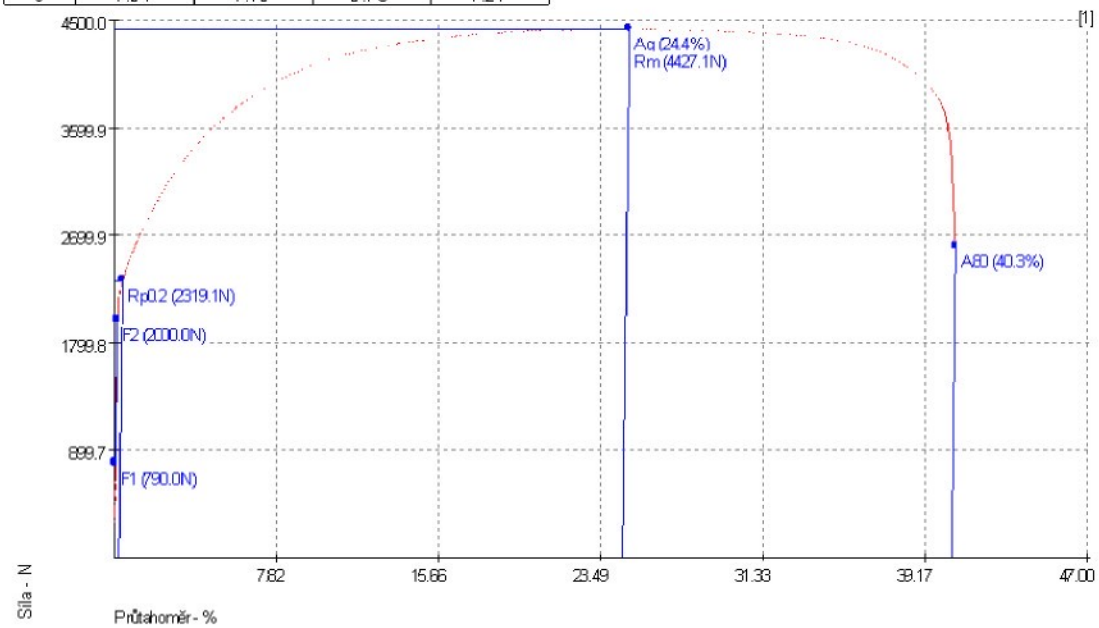
STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Vstupní hodnoty

testovaný materiál: DX 54D + Z100MBO		**rozměr vzorku:**	**20 x 1,02 mm**
výrobce: SIDMAR Arcelor Group		**morfologie povrchu:**	**EBT - SIBETEX**
směr: 0°		**zkouška provedena dle:**	**EN 10002**

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80 %
1	151.35	288.92	24.43	40.27
2	149.60	287.44	25.07	42.85
3	150.27	289.00	26.08	42.06
4	148.89	286.52	26.58	43.27
5	151.44	288.75	24.42	40.31
6	149.71	287.27	26.02	42.91
7	151.10	289.03	25.60	42.04
8	149.12	286.57	25.63	43.13
x	150.19	287.94	25.48	42.11
s	1.01	1.10	0.78	1.21



P2/1: Protokol měření ze statické zkoušky tahem materiálu EBT -SIBETEX ve směru 0°

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

katedra strojírenské technologie

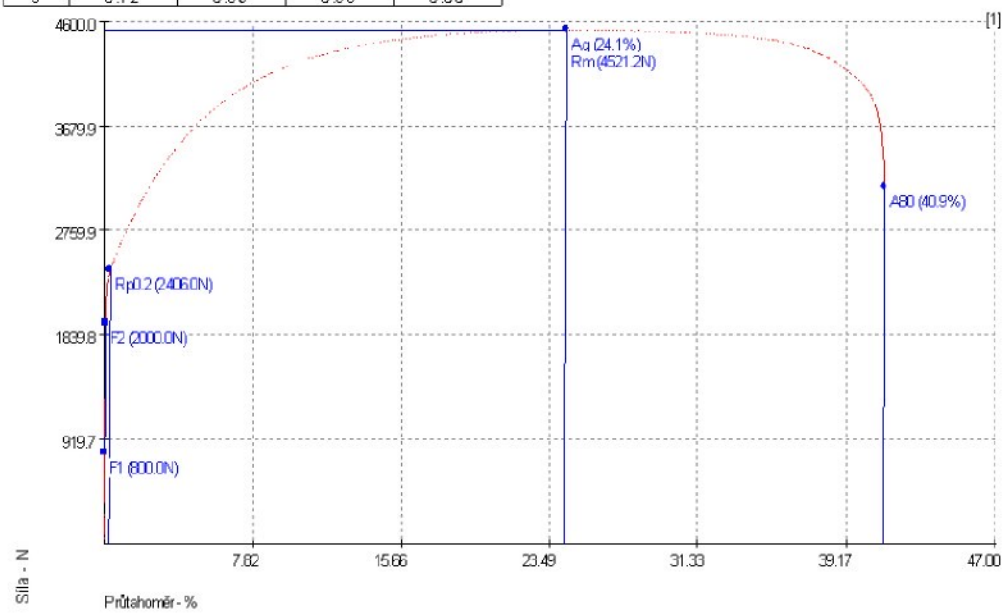
STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Vstupní hodnoty

testovaný materiál: DX 54D + Z100MBO		**rozměr vzorku:**	**20 x 1,02 mm**
výrobce: SIDMAR Arcelor Group		**morfologie povrchu:**	**EBT - SIBETEX**
směr: 45°		**zkouška provedena dle:**	**EN 10002**

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Aq %	A80 %
1	157.02	295.06	24.14	40.94
2	157.58	295.93	24.39	42.06
3	158.06	295.52	25.23	42.37
4	155.73	295.19	23.94	41.06
5	156.91	295.24	24.42	40.94
6	157.84	296.13	24.88	42.02
7	156.95	295.47	25.28	42.40
8	156.88	295.11	25.31	41.07
x	157.12	295.45	24.70	41.61
s	0.72	0.39	0.55	0.66



P2/2: Protokol měření ze statické zkoušky tahem materiálu EBT -SIBETEX ve směru 45°

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

katedra strojírenské technologie

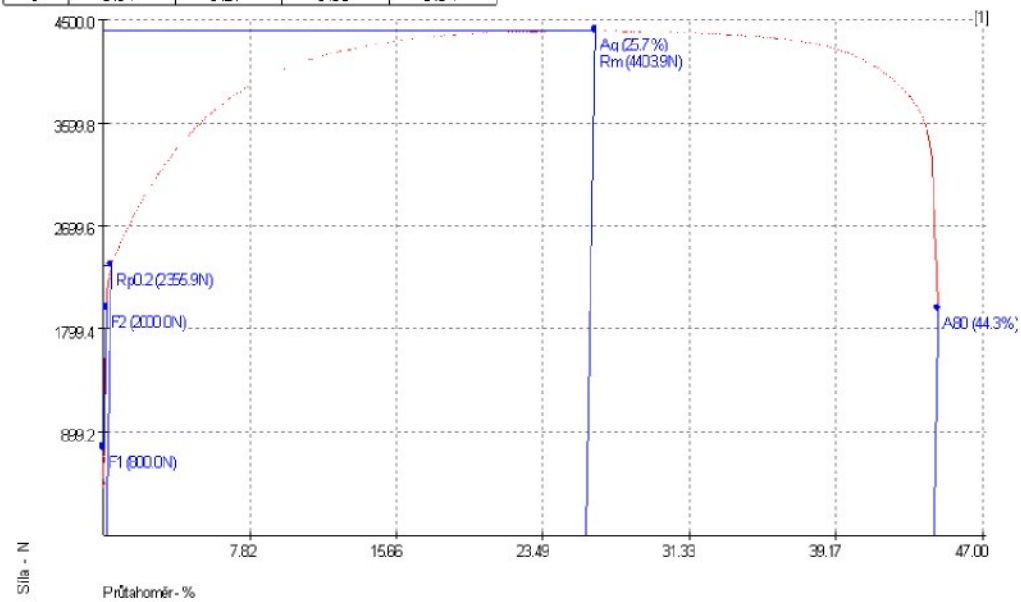
STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Vstupní hodnoty

testovaný materiál:	**DX 54D + Z100 MBO**	**rozměr vzorku:**	**20 x 1,02 mm**
výrobce:	**SIDMAR Arcelor Group**	**morfologie povrchu:**	**EBT - SIBETEX**
směr:	**90°**	**zkouška provedena dle:**	**EN 10002**

Výstupní hodnoty

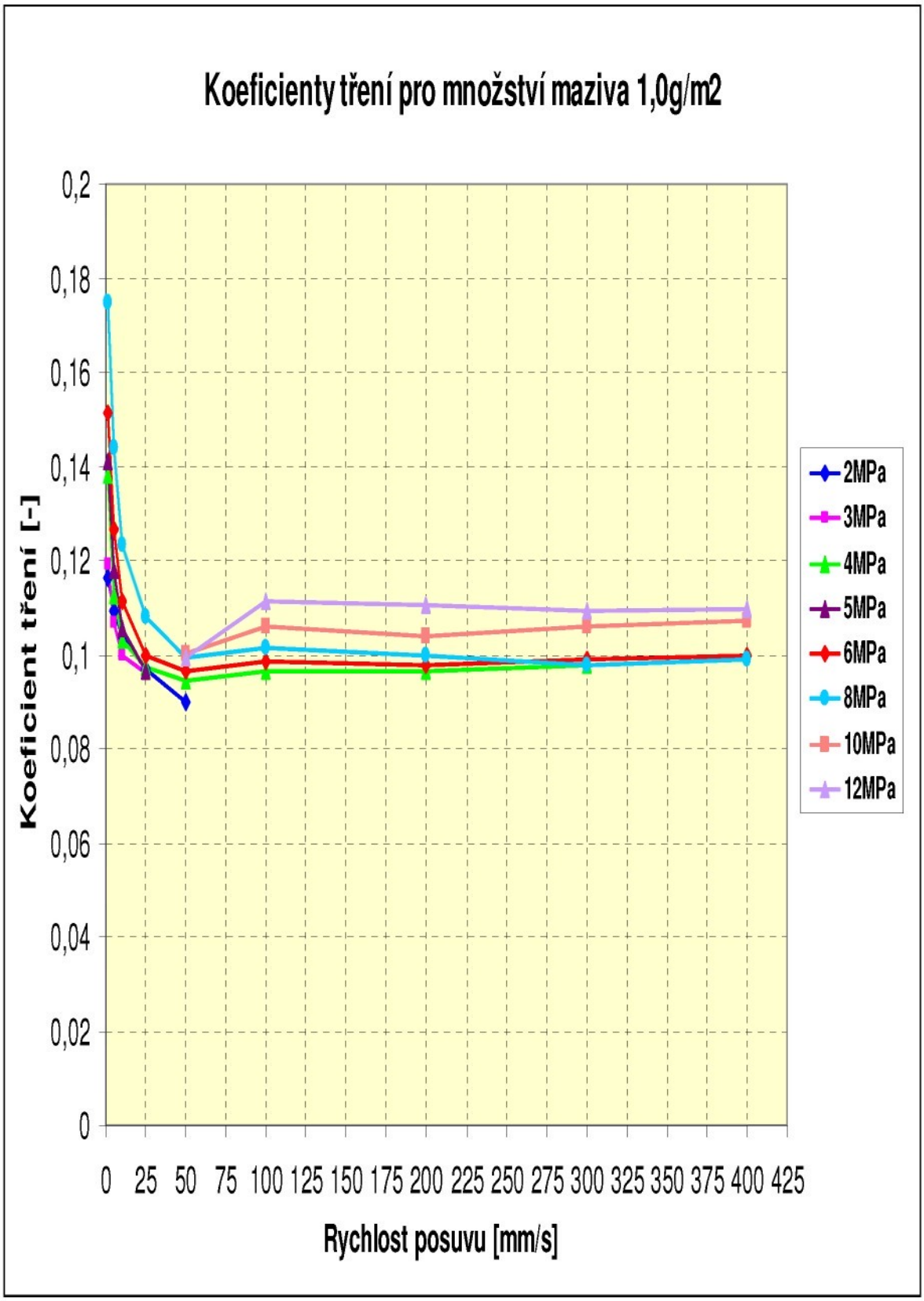
Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80 %
1	153.75	287.41	25.71	44.26
2	153.39	287.28	26.07	45.18
3	154.14	286.95	26.11	45.35
4	155.10	287.63	26.02	45.65
5	152.63	287.22	24.85	44.30
6	153.73	287.09	25.18	45.21
7	154.09	287.04	24.75	45.33
8	154.96	287.71	24.62	45.61
x	153.98	287.29	25.41	45.11
s	0.81	0.27	0.63	0.54

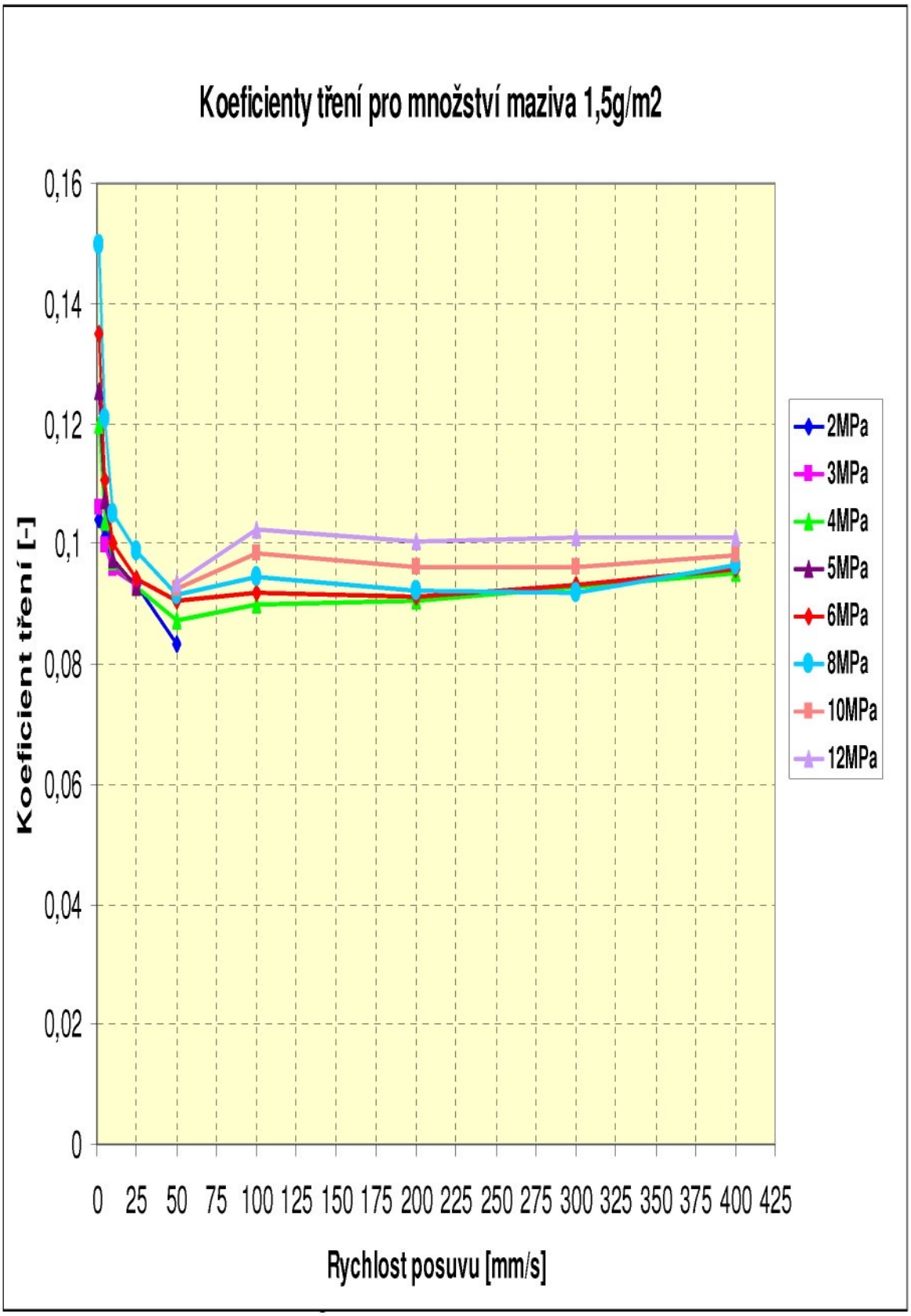


P2/3: Protokol měření ze statické zkoušky tahem materiálu EBT -SIBETEX ve směru 90°

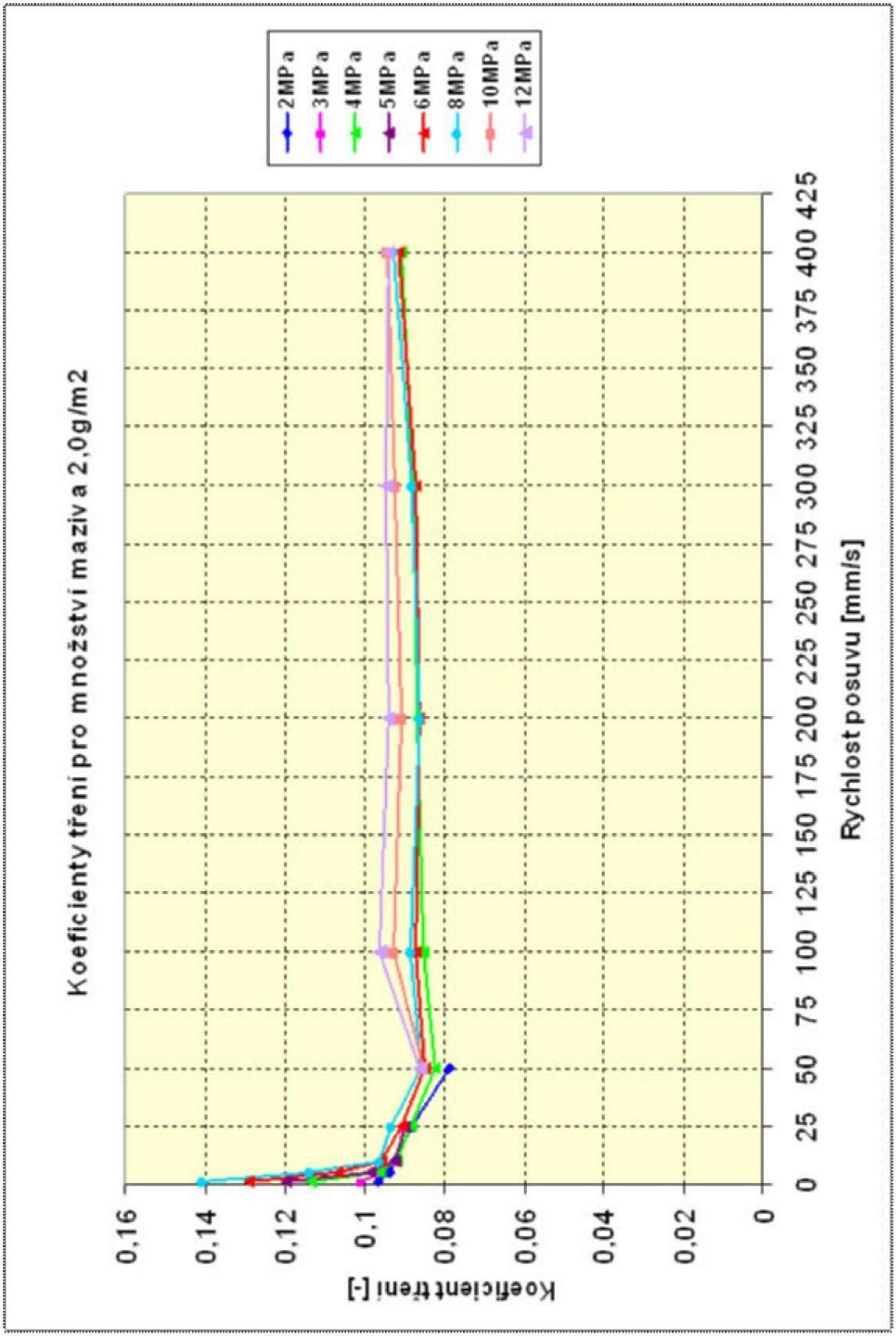
Příloha P3 str.1/1

P3/1: Zkušební zařízení TIRAtest 2300 s příslušenstvím pro statickou zkoušku tahem


Koeficienty tření pro množství maziva 1,0g/m2
Koeficient tření [-]
0,2
0,18
0,16
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
0 25 50 75 100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425
Rychlost posuvu [mm/s]
2MPa
3MPa
4MPa
5MPa
6MPa
8MPa
10MPa
12MPa


Koeficienty tření pro množství maziva 1,5g/m2
Koeficient tření [-]
0,16
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
0 25 50 75 100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425
Rychlost posuvu [mm/s]
2MPa
3MPa
4MPa
5MPa
6MPa
8MPa
10MPa
12MPa

Příloha P5 str.3/3



Příloha P6 str.1/4

Publikační činnost - vlastní publikace

[1] Kolnerová, M. - Solfronk, P. - Sobotka, J. - Doubek, P: Vliv technologických parametrů na koeficient tření při tažení. In.: Mezinárodní konference „Technológia 2005“, Bratislava 2005, SR,s.100, ISBN 80-227-2264-2

[2] Kolnerová, M. - Solfronk, P. - Sobotka,J - Doubek, P: Vliv morfologie typu EBT na tribologické podmínky tažení. In.: XII. Mezinárodní vědecká konference “FORMING 2005“, Lednice, ČR.s.123-128, ISBN 80-248-0888-9

[3] Kolnerová, M. - Solfronk, P. - Sobotka,J - Doubek, P: Vliv velikosti elementu deformační sítě na přesnost určení mezního stavu přetvoření. In: Mezinárodní vědecká konference pořádaná u příležitosti 55 let založení Fakulty strojní, Ostrava, ČR., 2005, ISBN 80-248-0902-9

[4] KOLNEROVÁ, M. - SOLFRONK, P. - DOUBEK, P. - KOVÁRNÍk, L.: Zvýšení rozměrové přesnosti ložiskových komponentů pomocí optimalizace střižné mezery. In. Acta Mechanica Slovaca, PRO-TECH-MA 2004, Košice, 2004, ISSN 1335-2393

[5] KOLNEROVÁ,M. - KOVÁRNÍK,L. -DOUBEK,P. - SOLFRONK, P.: Morphology forming methods on the surface of sheets determined for the automobile industry. In: NSVT 2004, Prešov 2004, SK,s.304 – 308, ISBN 80-8073-136-5

[6] Kolnerová, M. - Solfronk, P.-Doubek, P.- Kovárník, L.:Vliv technologických parametrů na výskyt zadírání při tažení plechu.In:7.mezinárodní konference „FORM 2004“,Brno 2004,ČR,s.63-68, ISBN 80-86607-11-9

[7] KOLNEROVÁ, M. - Kovárník, L. - DOUBEK, P. –SOLFRONK,P.:Vliv rychlosti deformace při zjišťování okrajových podmínek pro numerické simulace procesu tažení. In: XI.Mezinárodní vědecká konference „FORMING 2004“,Vysoké Tatry,SK,s.115-120, ISBN 80-227-2091-7

[8] Kolnerová, M.:Hodnocení tribologických vlastností plechů v závislosti na změně technologických parametrů s ohledem na výskyt zadírání v procesu tažení. In: Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25.výročí ustavení katedry tváření a plastů, TU v Liberci 2004, ČR, s.53-60, ISBN 80-7083-856-6

[9] Kolnerová, M.-Solfronk, P.- Doubek, P.:Hodnocení tribologických vlastností plechu v závislosti na jeho mikrogeometrii povrchu. In: 8.mezinárodní konference”TECHNOLÓgia 2003”, Bratislava,SR, s.124. ISBN 80-227-1935-8

[10] Kolnerová, M.-Solfronk, P.- Doubek, P.: Vliv změny technologických podmínek na velikosti tažné síly. In: “IVX Mezinárodní vědecké sympozium TU Dresden – TU Liberec“, Drážďany 2003,SRN, s.115-121. ISBN 3 – 8600-371-X

[11] Kolnerová, M.-Solfronk, P.- Doubek, P.:Tribologické vlastnosti hliníkových plechů používaných. pro karosářské výlisky.In: 3. Mezinárodní konference,„aluminium 2003“,děčín,čr, s.161-166.

[12] Kolnerová,M.-Solfronk,P.:Hodnocení tribologických vlastností hliníkových plechů používaných v automobilovém průmyslu.In:Mezinárodní konference „PRO-TECH-MA ´02“,Košice 2002, SR, s.243 –248. ISSN 1335-2393

[13] Kolnerová,M.-Solfronk,P:Vliv teploty nástroje při hodnocení tribologických vlastností plechů určených k lisování.In: 6.mezinárodní konference „Nové smery vo výrobnom inžinierstve 2002“, Prešov 2002, SR, s.53-56.ISBN 80-70099-828-8

[14] Kolnerová,M.-Solfronk,P.:Porovnání tribologických vlastností hliníkových a ocelových plechů používaných při stavbě karoserie. In: 6.mezinárodní konference „FORM 2002“,Brno 2002, ČR, s.207-212.ISBN 80-214-2162-2

[15] Kolnerová,M.-Solfronk,P.: Simulace odpružení výlisku z pevnostního plechu pomocí software PAM-STAMP.In:Mezinárodní vědecká konference „FORMING 2002“, Luhačovice 2002, ČR, s .165-170.ISBN 83-910722-6-6

[16] Kolnerová,M.-Solfronk,P.: Morfologie plechů se zinkovým povlakem používaných v automobilovém průmyslu. In:10. Mezinárodní konference "Metal 2001",Ostrava 2001,ČR, s.73-79.ISBN 80-85988-56-9

[17] KOLNEROVÁ,M - SOLFRONK,P.: Hodnocení povrchu plechu při vypínání. In:TECHNOLÓGIA 2001, Bratislava 2001, SR, s.306 - 307.ISBN 80-227-1567-0

[18] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P.: Vliv povrchové úpravy plechu na jeho lisovatelnost. In":XIII.Mezinárodní vědecké sympozium TU Liberec - TU Dresden", Liberec 2001,ČR, s.22 -27.ISBN 80 -7083- 469 –2

[19] Kolnerová,M.-Solfronk,P.: Morfologie povrchu plechů určených pro lisování.In:Mezinárodní konference „Materiálové inženýrství", Liberec 2000, ČR, s.110 – 115,ISBN 80-7083-404-8

[20] KOLNEROVÁ,M. - SOLFRONK,P.: Vliv technologických podmínek při vypínání plechů s povlaky. In: 5. Mezinárodní konference" Form 2000", Brno 2000,ČR s. 139-144. ISBN 80-214-1661-0

<u>Publikační činnost – spoluautorství</u>

[1] Solfronk, P.- Kolnerová, M.- Kovárník ,L.-Sobotka, J: Vliv povrchově upraveného nástroje na velikost koeficientu tření. In.: XII. Mezinárodní vědecká konference "FORMING 2005", Lednice, ČR. ISBN 80-248-0888-9

[2] Solfronk, P. - Kolnerová, M. - Kovárník, L. - Sobotka, J.: Vliv povlaku nástroje na poškození povrchu taženého materiálu. In.: Mezinárodní konference „Technológia 2005", Bratislava, SR, 2005. ISBN 80-227-2264-2

[3] Solfronk, P.- Kolnerová, M.- Kovárník ,L.-Sobotka, J: Určení metodiky eliminace odpružení při ohýbání korozivzdorných materiálů In: Mezinárodní vědecká konference pořádaná u příležitosti 55 let založení Fakulty strojní, 7.– 9.9.2005 Ostrava, ČR. ISBN 80-248-0902-9

[4] Sobotka, J. - Doubek, P. - Kolnerová, M. - Kovárník, L.: Zhodnocení použití pevných a polotuhých mazadel v sériové výrobě při lisování výlisků karosářského typu In: Mezinárodní vědecká konference pořádaná u příležitosti 55 let založení Fakulty strojní, 7.– 9.9.2005 Ostrava, ČR. ISBN 80-248-0902-9

[5] Sobotka, J. - Doubek, P.- Kolnerová, M.- Kovárník, L: Stabilita procesu lisování s ohledem na použitý materiál. In.: XII. Mezinárodní vědecká konference "FORMING 2005" 14.9 – 17.9.2005 Lednice, ČR. ISBN 80-248-0888-9

[6] Sobotka, J. - Doubek, P.- Kolnerová, M. - Kovárník, L: Srovnání tribologických vlastností HDG a NIT plechů při použití maziv typu Hotmelt. In.: Mezinárodní konference „Technológia 2005", 13.-14.9.2005, Bratislava, SR, 2005. ISBN 80-227-2264-2

[7] Doubek, P. - Kovárník, l. - Solfronk, P. - Kolnerová, M.: Rozložení deformace v okolí lomu křehkých materiálů při jednoosém zatěžování In: Mezinárodní vědecká konference pořádaná u příležitosti 55 let založení Fakulty strojní, 7.– 9.9.2005 Ostrava, ČR. ISBN 80-248-0902-9

[8] Doubek, P. - Kovárník, l. -Solfronk, P. - Kolnerová, M.: Zjišťování diagramů mezních přetvoření při vyšších rychlostech deformace. In.: XII. Mezinárodní vědecká konference "FORMING 2005" 14.9 – 17.9.2005 Lednice, ČR. ISBN 80-248-0888-9

[9] Doubek, P. -Kovárník, l. - Solfronk, P. - Kolnerová, M: Vliv rychlosti deformace na diagramy mezních přetvoření. In.: Mezinárodní konference „Technológia 2005", 13.-14.9.2005, Bratislava, SR, 2005. ISBN 80-227-2264-2

[10] Solfronk, P.- Kolnerová, M. - Kovárník, L. -Doubek, P: Využití simulačního programu PAM – STAMP2G při odpružení výlisků z plechu, In: 7.mezinárodní konference „NSVT „Prešov 2004,SK, ISBN 80-8073-136-5

[11] Doubek, P.- Kovárník, L.- Kolnerová, M.- Solfronk, P-: Vliv stárnutí na tvařitelnost hliníkových plechů, In: 7.mezinárodní konference „NSVT „Prešov 2004,SK,ISBN 80-8073-136-5

[12] Kovárník,L.-DOUBEK, P.–SOLFRONK,P.- KOLNEROVÁ, M.: Optimalizace tvarového nástřihu plechu u tažených výlisků pomocí software PAM-Stamp 2G™,In: 7.mezinárodní konference“ NSVT „Prešov 2004,SK,s.241-246, ISBN 80-8073-136-5

[13] Solfronk, P.-Kolnerová, M- Kovárník, L.-Doubek, P.: Vliv doby používání maziva v lisovně na změnu tribologických vlastností při tažení karosářských výlisků, In : Mezinárodní konference“ PRO –TECH-MA 2004“, Košice 2004,SK,s.419 - 424 ,ISSN 1335-2393

[14] Kovárník,L.-DOUBEK,P.–SOLFRONK,P.-KOLNEROVÁ,M.:Moderní digitální technika při analýze deformace plechových výlisků, In : Mezinárodní konference „PRO –TECH-MA 2004“, Košice 2004,SK,s.241-246,ISSN 1335-2393

[15] Doubek, P.- Kovárník, L.- Kolnerová, M.- Solfronk, P: Vliv použitého maziva na výrobu atypických šroubů M8, In : Mezinárodní konference „PRO –TECH-MA 2004“, Košice 2004,SK,s.59-62,ISSN 1335-2393

[16] Solfronk, P.-Kolnerová, M- Kovárník, L.-Doubek, P.:Vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace. In:7.mezinárodní konference „FORM 2004“,Brno 2004,ČR,s.153-158, ISBN 80-86607-11-9

[17] Kovárník,L.-DOUBEK,P.–SOLFRONK,P.-KOLNEROVÁ,M.:Optimalizace tvaru nástroje pro výrobu svodu výfukového potrubí pomocí simulačního programu. In:7.mezinárodní konference „FORM 2004“,Brno 2004, ČR, s.69-74, ISBN 80-86607-11-9

[18] Doubek, P.- Kovárník, L.- Kolnerová, M.- Solfronk, P.: Mezní stavy pevnostních plechů při vyšších deformačních rychlostech. In:7.mezinárodní konference „FORM 2004“,Brno 2004,ČR,ISBN 80-86607-11-9

[19] Doubek, P.- Kolnerová, M.- Kovárník, L.- Solfronk, P.:Mezní stavy při tváření plechů z Al slitin a oceli.In: XI.Mezinárodní vědecká konference „FORMING 2004“,Vysoké Tatry,SK,s.43-48,ISBN 80-227-2091-7

[20] Kovárník,L.-DOUBEK,P.–SOLFRONK,P.-KOLNEROVÁ,M.: Využití audiotechniky při zjišťování diagramu mezních přetvoření. In: XI.Mezinárodní vědecká konference „FORMING 2004“,Vysoké Tatry,SK,s.121-126,ISBN 80-227-2091-7

[21] Solfronk, P. - Kovárník, L.-Doubek, P. -Kolnerová, M.:Využití simulačních programů při optimalizaci výroby výlisku z plechu. In: XI.Mezinárodní vědecká konference „FORMING 2004“,Vysoké Tatry,SK,s.250-255,ISBN 80-227-2091-7

[22] Solfronk, P.- Kolnerová, M. - Doubek, P.: Aplikace software PAM-STAMP při zjišťování mezních stavů při tváření hliníkových slitin. In: 3. Mezinárodní konference „aluminium 2003“, děčín, čr, s.200-205.

[23] Solfronk, P.- Kolnerová, M. - Doubek, P.: Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisků v automobilovém průmyslu. In: 8.mezinárodní konference TECHNOLÓgia 2003”, Bratislava,SK, s.143. ISBN 80-227-1935-8

[24] Doubek, P.- Kolnerová, M.- Solfronk, P.: Mezní stavy při lisování svařovaných přístřihů. In: 8.mezinárodní konference ”TECHNOLÓgia 2003”, Bratislava,SR, s.114. ISBN 80-227-1935-8

[25] Doubek, P.- Kolnerová, M.- Solfronk, P:Vliv maziv na technologii lisování atypických šroubů M8. In: „IVX Mezinárodní vědecké sympozium TU Dresden – TU Liberec“, Drážďany 2003, SRN, s.167-172.ISBN 3 – 8600-371-X

[26] Solfronk, P.- Doubek, P. - Kolnerová, M.: Simulace mezních stavů pomocí PAM-STAMP při tváření svařovaných přístřihů v automobilovém průmyslu In: “IVX Mezinárodní vědecké sympozium TU Dresden – TU Liberec“,Drážďany 2003,SRN,s.108 – 114. ISBN 3 – 8600-371-X

[27] Doubek,P.- Solfronk,P.-Kolnerová,M.: Porovnání tvařitelnosti plechů z AL slitin a z oceli. In: 3. Mezinárodní konference „aluminium 2003“,děčín, čr, s.194-199.

[28] Solfronk,P.-Kolnerová,M.: Využití software PAM-STAMP při zjištění mezních stavů při ohýbání trubek. In:Mezinárodní konference „PRO-TECH-MA ´02“,Košice 2002,SR,s.145-150.ISSN 1335-2393

[29] SOLFRONK,P.-KOLNEROVÁ,M.:Vliv výpočtového modelu na přesnost výsledku simulace mezního stavu při tváření hliníkových slitin. In: "Nové smery vo výrobnom inžinierstve 2002"Prešov, SR, s.148-151. ISBN 80-70099-828-8

[30] SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M.: Simulace mezního stavu pomocí software PAM-STAMP při ohýbání trubek. In: 6.mezinárodní konference "FORM 2002", Brno,ČR,s.213-218.ISBN 80-214-2162-2

[31] SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M.: Simulace mezního stavu pomocí software PAM-STAMP při tváření hliníkových slitin.In :Mezinárodní vědecká konference“ FORMING 2002“, Luhačovice 2002,ČR, s.269-274.ISBN 83-910722-6-6

[32] SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M.: Simulace procesu rozšiřování stříhaného otvoru pomocí software PAM-STAMP. In:TECHNOLÓGIA 2001, Bratislava 2001, s.356-359. ISBN 80-337-1567-0

[33] SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M.: Simulace účinků brzdicí lišty používané při hlubokém tažení. In:“XIII. Vědecké sympozium TU Liberec - TU Dresden“, Liberec 2001, s. 37-42. ISBN 80 -7083- 469 –2

[34] SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M.: Vliv textury povrchu plechu určeného pro hluboké tažení na tribologické vlastnosti. . In: 5. Mezinárodní konference „Form 2000“, Brno 2000, ČR, s. 133-138. ISBN 80-214-1661-0

[35] SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M.: Vliv morfologie povrchu plechů na tribologické vlastnosti. In:Mezinárodní konference „Materiálové inženýrství,“ Liberec 2000, ČR, s.218-223. ISBN 80-214-1661-0

[36] SOLFRONK, P. - KOLNEROVÁ, M.: Vliv morfologie povrchu plechů typu "SIBETEX" na tribologické podmínky při tažení výlisků. . In. XII. Mezinárodní vědecké sympozium TU Dresden – TU v Liberci ,Drážďany1999, NSR, s.147-152. ISBN 3-86005-235-7

[37] HISEM ,P. - SOLFRONK,P. - KOLNEROVÁ,M. : Hodnocení maziv z hlediska lisování a lepení plechů v automobilovém průmyslu. In. XII. Mezinárodní vědecké sympozium TU Dresden – TU Liberec ,Drážďany1999, NSR, s.1-6. ISBN 3-86005-235-7

Příloha P4 str.1/4

Bezpečnostní list

podle směrnice ES čís. 96/54, § 14 GefStoffV, TRGS 220 a dle vyhlášky čís. 27/1999 Sb.

Datum tisku: 20.06.2000 přepracováno: 01.06.2000

1 Identifikační údaje

Údaje o produktu:

- ***Obchodní název:*** **ANTICORIT PL 3802 - 39 LV**
- ***Výrobce / dodavatel:***
  FUCHS OIL CORPORATION (CZ), spol. s r.o.
  Lažanského 1081
  149 00 PRAHA 4 - Chodov
  Tel.: +420 2 - 67 91 24 64 Fax: +420 2 - 793 37 91 Mobil: +420 603 - 89 99 00
- ***Informační oddělení:***
  FUCHS OIL CORPORATION (CZ), spol. s r.o.
  Opuštěná 4, 602 00 BRNO
  Technické oddělení
  Tel.: +420 5 - 4316 3234 Fax: +420 5 - 4316 3235
- ***Hotline:*** Tel.: +420 2 - 2491 5402 a +420 2 - 2491 9293 (Toxikologické informační středisko Praha)

2 Složení přípravku / údaje o složkách

- ***Chemická charakteristika***
- ***Popis:*** Přípravek je vyroben z vysoce rafinovaných ropných olejů a přísad.

Obsah nebezpečných látek: odpadá.

3 Možná rizika

- ***Označení nebezpečnosti:***
  Při dodržení běžných bezpečnostních předpisů pro zacházení s ropnými a chemickými produkty, jakož i pokynů pro manipulaci (bod 7) a při vybavení osobními ochrannými pomůckami (bod 8), žádná zvláštní nebezpečí nejsou známa.
- ***Zvláštní pokyny pro ochranu osob a životního prostředí:***
  Produkt je látka ohrožující vodu, viz údaje WGK.
- ***Klasifikační systém:***
  Klasifikace odpovídá aktuálním seznamům ES, je však doplněna o údaje z odborné literatury a o poznatky firmy.
  Vychází z použití tzv. konvenční metody hodnocení nebezpečných látek dle GefStoffV Anh. II Nr. 1, 1.3.2 na základě specifických údajů složek.

4 Pokyny pro první pomoc

Všeobecné pokyny:
Produktem nasáklé nebo znečištěné ošacení a obuv vyměnit.
Produktem nasáklé čistící hadry nestrkat do kapes pracovního oděvu.

- ***Při vdechnutí:***
  Zajistit přísun čerstvého vzduchu, při potížích vyhledat lékařskou pomoc (může k tomu dojít vdechnutím par přehřátého produktu).
- ***Při styku s pokožkou:*** Umýt vodou a mýdlem. Všeobecně produkt nedráždí pokožku.
- ***Při zasažení očí:*** Oči s otevřenými víčky několik minut vymývat tekoucí vodou.
- ***Při požití:*** Při déletrvajících potížích konzultovat s lékařem.

Příloha P4 str.2/4

Obchodní název: ***ANTICORIT PL 3802- 39 LV***

5 ***Opatření pro likvidaci požáru***

- ***Vhodné hasící prostředky:***
  CO_2 , hasící prášek nebo postřik vodou. Větší požár hasit proudem vody nebo pěnou odolnou vůči alkoholu.
  Opatření při hašení požáru přizpůsobit okolí.
- ***Z bezpečnostních důvodů nevhodné hasící prostředky:*** prudký proud vody.
- ***Speciální ochranné vybavení při hašení:*** nezávislý dýchací přístroj

6 ***Opatření při náhodném úniku:***

- ***Ochranná opatření týkající se ohrožených osob:***
  Při úniku/vylití produktu vzniká nebezpečí uklouznutí.
- ***Opatření pro ochranu životního prostředí:***
  Zabránit vniknutí do kanalizace, povrchových a spodních vod.
  Zabránit plošnému rozšíření (například přehrazením nebo izolací olejovou zábranou).
  Zabránit vniku do půdy.
- ***Postup při čištění / odstranění:***
  Odstranění pomocí materiálu, který váže kapaliny, jako je písek, křemelina, prostředek, který váže kyseliny, univerzální nasákavý prostředek (například RENOLEX) nebo dřevěné piliny.
  Použitý materiál likvidovat podle příslušných předpisů.
- ***Další pokyny:*** Nedochází k uvolňování nebezpečných látek.

7 ***Manipulace a skladování***

- ***Manipulace:***
- ***Pokyny pro bezpečné zacházení:*** Zabránit tvorbě aerosolů.
- ***Pokyny pro zabránění požáru a exploze:*** Nezahřívat na teploty blízké bodu vzplanutí.
- ***Skladování:***
- ***Požadavky na skladovací prostory a nádoby:*** Nejsou žádné zvláštní požadavky.
- ***Pokyny pro společné skladování:*** Skladovat odděleně od potravin.
- ***Další údaje k podmínkám skladování:***
  Je nutné dodržet vodohospodářské předpisy a nařízení týkající se zařízení pro manipulaci s látkami ohrožujícími vodu.
- ***Třída nebezpečnosti pro skladování:***
- ***Hořlavost:*** odpadá.

8 ***Omezení expozice a osobní ochranné vybavení***

- ***Další údaje k formě technických zařízení:*** žádné další údaje, viz bod 7.
- ***Mezní hodnoty složek látky, které musejí být ve vztahu k pracovnímu prostředí kontrolovány:***

Číslo CAS	Označení látky	%	druh	hodnota	jednotka

Produkt jako takový neobsahuje žádná relevantní množství látek se sledovanými mezními hodnotami.

- ***Doplňující údaje:*** Podkladem byly platné výrobní receptury.
- ***Osobní ochranné vybavení:***
- ***Všeobecná ochranná a hygienická opatření:***
  Je nutné v každém případě dodržovat běžná bezpečnostní opatření pro zacházení s ropnými produkty, případně s chemikáliemi.
  Zabránit delšímu a intenzivnímu kontaktu s pokožkou.
  Pokožku preventivně chránit ochranným krémem.
  Produktem nasáklé čistící hadry neponechávat v kapsách pracovního oděvu.
- ***Ochrana proti vdechnutí:*** Nevyžaduje se.
- ***Ochrana pokožky rukou:*** Ochranné rukavice nebo ochranný krém.
- ***Ochrana očí:*** Při doplňování se doporučují ochranné brýle.
- ***Ochrana těla:*** Ochranný pracovní oděv.

Příloha P4 str.3/4

Obchodní název: ***ANTICORIT PL 3802 - 39 LV***

9 *Fyzikální a chemické vlastnosti*

- ***Skupenství:*** tekutina
- ***Barva:*** hnědá
- ***Zápach:*** charakteristický

	Hodnota/rozsah	Jednotka	Metoda
Změna stavu			
Bod tuhnutí / tání / rozsah teploty tání:	není stanoveno		
Bod varu / rozsah teplot varu:	neužívá se		
Bod vzplanutí:	150	°C	ISO 2592
Teplota rozkladu:	není stanoveno		
Samovznítitelnost:	není samovznítitelný		
Nebezpečí výbuchu:	není výbušný		
Hustota: při 15 °C	890	kg/m^3	DIN 51 757
Rozpustnost v / mísitelnost s			
voda:	není, případně málo mísitelný		
Viskozita nebo třída konzistence:			
kinematická: při 40 °C	15	mm^2/s	DIN 51 562

10 *Stabilita a reaktivita*

- ***Tepelný rozklad / nutno zabránit podmínkám:*** Při odborné manipulaci k rozkladu nedochází.
- ***Nebezpečné reakce:*** Žádné nebezpečné reakce nejsou známy.
- ***Nebezpečné produkty rozkladu:*** Nejsou známy žádné nebezpečné produkty rozkladu.

11 *Toxikologické údaje*

- ***Akutní toxicita:***
- ***Primární dráždivé účinky:***
- ***pokožka:*** Dráždivé účinky nejsou známy.
- ***oči:*** Dráždivé účinky nejsou známy.
- ***senzibilizace:*** Žádné senzibilizující účinky nejsou známy.
- ***Dodatečné toxikologické pokyny:***
  Dle poslední verze výpočtové metody Všeobecné směrnice ES pro zařazování produktů nevyplývá povinnost tento produkt označovat.
  Při odborném zacházení a dodržení stanoveného způsobu použití tento produkt dle našich zkušeností a dostupných informací nemá škodlivé účinky na zdraví.

12 *Ekologické údaje*

- ***Chování v životním prostředí:***
- ***Mobilita a bioakumulativní potenciál:*** Žádné dostupné údaje k dispozici.
- ***Ekotoxické účinky:***
- ***Chování v čistících zařízeních:*** Produkt vyplave na hladinu vody / odpadní vody.
- ***Všeobecné pokyny:***
  2. třída látek ohrožujících vodu (zařazení dle konceptu VCI): ohrožuje vodu.
  Zabránit vniknutí do spodních vod, vodních toků nebo kanalizace.

13 *Pokyny pro likvidaci*

- ***Produkt:***
- ***Doporučení:***
  I malá množství musejí být likvidována dle příslušných předpisů.
  Musí být likvidováno v souladu s předpisy o odpadech jako použitý olej nebo znovu zpracováno.
  Dodržet nařízení o odpadních a zbytkových látkách. Při skladování použitých produktů dodržovat zákaz míchání. Podkladem pro likvidaci je zákon o odpadech a jejich recyklaci.

Příloha P4 str.4/4

Obchodní název: ***ANTICORIT PL 3802 - 39 LV***

Likvidace odpadů zahrnuje jejich zhodnocení nebo likvidaci, přičemž jejich zhodnocení je přednostní. Podrobné informace o likvidaci a kontrole řeší zákonná nařízení (zákon a navazující vyhlášky). Spojte se prosím s firmou oprávněnou k likvidaci odpadů.

- ***Číslo kódu odpadu / možnost přiřazení k:***
  (musí být odsouhlaseno s likvidátorem odpadu, například dle původu)
  54109
  Označení: Vrtné, řezné a brusné emulze
  Pokyny pro likvidaci: Chemicko fyzikální zpracování
  Spalování zvláštních odpadů
  EWC: 12 01 07
- ***Znečištěné obaly:***
- ***Doporučení:***
  Kontaminované obaly je nutno vyprázdnit. Prázdné vratné obaly mohou být dány po odpovídajícím vyčištění znovu do oběhu.
  Malé nevratné obaly musejí být likvidovány v souladu s právními předpisy (nařízení o obalech).

14 Údaje o přepravě

- ***Pozemní doprava ADR/RID a GGVS/GGVE (mezinárodní/vnitrostátní):***
- ***Třída ADR/RID-GGVS/E:*** -
- ***Lodní námořní doprava IMDG/GGVSee:***
- ***Třída IMDG/GGVSee:*** -
- ***Letecká doprava ICAO-TI a IATA-DGR:***
- ***Třída ICAO/IATA:*** -
- ***Přeprava/další údaje:*** Dle přepravních předpisů se nejedná o nebezpečnou látku.

15 Předpisy

- ***Označení dle směrnic ES:***
  Musejí být dodržena běžná bezpečnostní opatření pro manipulaci s ropnými produkty, případně s chemikáliemi.
  Podle směrnic ES/GefStoffV včetně 25. ATP a dle zákona ČR čís. 157/98 Sb. není povinností produkt označovat.
- ***Národní předpisy:***
- ***Třída nebezpečnosti ohrožení vod:*** WGK 2 (zařazení dle konceptu VCI): látka ohrožující vodu.

16 Ostatní údaje:

Veškeré obsažené látky jsou uvedeny v seznamu Evropského označení látek a smějí být v ES provozovány v dopravě. Veškeré údaje se opírají o současný stav našich znalostí. Mají popisovat produkt po bezpečnostně-technické stránce, neposkytují však žádné záruky úplnosti vlastností (například způsobu technického použití) a nezakládají s tím spojenou právní zodpovědnost.
Tento list je List bezpečnostních údajů dle § 14 GefStoffV a odpovídá vyhlášce ČR čís. 27/99 Sb.
U produktů, u kterých n e n í povinnost označení, je toto vystaveno dobrovolně.
Je vyhotoveno dle TRGS 220, opírá se o EDV a není podepsáno.

- ***Listinu vystavující útvar:***
  FUCHS OIL CORPORATION (CZ), spol. s r.o.
  Opuštěná 4, 602 00 BRNO
  Technické oddělení Tel.: +420 5 - 4316 3234 Fax: +420 5 - 4316 3235
- ***Platnost:***
  Vydáním tohoto Bezpečnostního listu pozbývají všechny předchozí, týkající se tohoto produktu, platnosti.