

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**PETR
PŘÍHODA**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Změna koeficientu tření plechů vlivem zvýšené teploty

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Petr Příhoda

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Ondřej Stejskal

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Příhoda** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **501378**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Změna koeficientu tření plechů vlivem zvýšené teploty

Název bakalářské práce anglicky:

Change in coefficient of friction of metal sheets due to increased temperature

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznámení s problematikou
- 2) Metodika měření při zvýšených teplotách
- 3) Analýza naměřených dat
- 4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Bečka, Jan: Tribologie. Vyd. ČVUT Praha 1997.
Helebrant, František: Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika. VŠB Ostrava 2000

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ondřej Stejskal ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. František Tatiček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **17.10.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Ondřej Stejskal
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ondřej Stejskal, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli v realizaci mé bakalářské práce. Zejména děkuji panu Ing. Ondřej Stejskal za všestrannou pomoc, cenné rady, podněty, doporučení, trpělivost a čas. V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině za podporu, bez které bych tuto práci nemohl dokončit.

Anotace

Název bakalářské práce: Změna koeficientu tření plechů vlivem zvýšené teploty
Autor práce: Petr Příhoda
Vedoucí práce: Ing. Ondřej Stejskal
Konzultant: Ing. František Tatíček, Ph.D.
Akademický rok: 2023/2024
Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu: Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce: 68 stránek, 13 tabulek, 53 obrázků
Klíčová slova: Tribologie, tribologické podmínky, tření, mazání, opotřebení, tváření, tváření za studena, lisování plechů, zkouška tahem

Annotation

Title of the final thesis: Change in coefficient of friction of metal sheets due to increased temperature

Author: Petr Příhoda

Supervisor: Ing. Ondřej Stejskal

Consultant: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Academic year: 2023/2024

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Extent: 68 pages, 13 tables, 53 pictures

Keywords: Tribology tribological properties, friction, lubrication, wear, cold metal forming, sheet metal forming, tensile testing

Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	12
2. TEORIE TRIBOLOGIE.....	13
2.1 Tribologický systém.....	13
2.2 Tření.....	14
2.2.1 Třecí síla a koeficient tření.....	14
2.2.2 Statický koeficient tření.....	15
2.2.3 Dynamický koeficient tření.....	15
2.2.4 Parametry ovlivňující třecí sílu	16
2.3 Opotřebení	16
2.3.1 Abrazivní opotřebení.....	17
2.3.2 Adhezivní opotřebení.....	17
2.3.3 Únavové opotřebení.....	18
2.4 Mazací mechanismy	18
2.4.1 Kapalná maziva	19
2.4.2 Plastická maziva.....	19
2.4.3 Tuhá maziva	20
2.4.4 Plynná maziva.....	20
3. TEORIE TVÁŘENÍ	21
3.1 Charakteristika tvářecích procesů	21
3.1.1 Elastická deformace	21
3.1.2 Plastická deformace	21
3.2 Tvářecí teploty.....	21
3.2.1 Tváření za studena	22
3.2.2 Tváření za poloohřevu.....	22
3.3 Technologie plošného tváření.....	22

3.4	Lisování plechů.....	23
3.4.1	Stříhání.....	23
3.4.2	Ohýbání.....	23
3.4.3	Hluboké tažení.....	24
3.5	Tribologické procesy při lisování plechů	25
3.6	Tribologické zkoušky pro lisování plechů	25
3.6.1	Experimentální určení součinitele tření při plošném tváření.....	27
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
4.1	Příprava vzorků	28
4.1.1	Materiál	28
4.1.2	Úpravy povrchu	28
4.2	Zařízení pro experiment.....	29
4.2.1	Zkušební upínací zařízení	30
4.2.2	Upínací čelisti.....	30
4.3	Způsob ohřevu	31
4.3.1	Konstrukce tepelného zařízení	31
4.4	Metodika měření.....	31
4.4.1	Parametry zkoušky.....	32
4.5	Naměřená data	32
4.5.1	Data ze zkoušky při teplotě 20 °C.....	33
4.5.2	Data ze zkoušky při teplotě 80 °C.....	39
4.5.3	Data ze zkoušky při teplotě 100 °C	45
4.5.4	Data ze zkoušky při teplotě 120 °C	51
4.6	Vyhodnocení.....	57
5.	ZÁVĚR.....	59
	Bibliografie	61
	Seznam tabulek	65

Seznam obrázků	66
Přílohy	68

Seznam použité symboliky

μ	[-]	Třecí koeficient
μ_S	[-]	Statický třecí koeficient
μ_D	[-]	Dynamický třecí koeficient
F	[N]	Posuvná síla
F_t	[N]	Třecí síla (Třecí odpor)
F_{tStat}	[N]	Statická třecí síla (Statický třecí odpor)
F_{tDyn}	[N]	Dynamická třecí síla (Dynamický třecí odpor)
F_n	[N]	Normálová síla
v	[m/s]	Rychlost posuvu
h	[mm]	Tloušťka
T_{TAV}	[°C]	Teplota tavení
N	[ot/s]	Rychlost otáčení ložiska
η	[Pa.s]	Dynamická viskozita maziva
P_{av}	[Pa]	Střední tlak v ložisku
Ra	[-]	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rz	[-]	Největší výška vůči max. hloubce posuzovaného profilu
Rq	[-]	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
\bar{x}	[-]	Střední hodnota
SD	[-]	Směrodatná odchylka

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

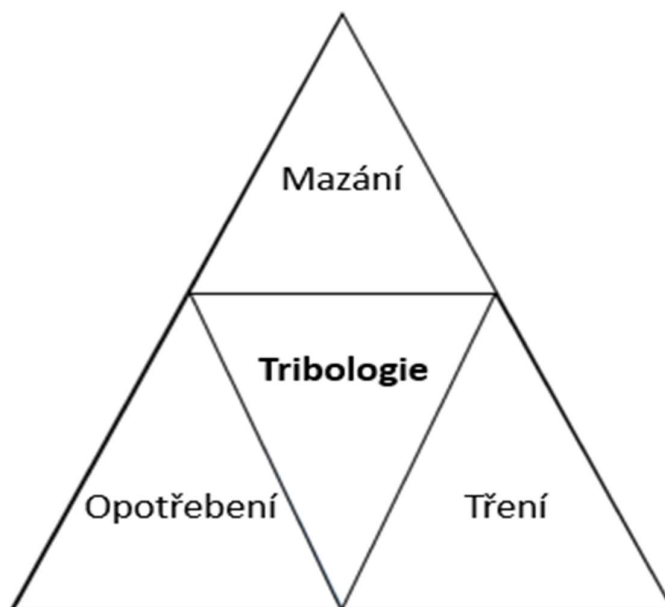
K automobilovému průmyslu neodmyslitelně patří výroba karoserie, která se v dnešní době skládá především z plošného tváření. Tento dynamicky rozvíjející se segment výroby, na který jsou stále častěji kladeny nejrůznější požadavky na komplikovanější tvary, vyšší bezpečnosti, ale také co možná nejnižší hmotnost na karoserii. I na samotné lisovací stroje jsou kladeny složité nároky jako snižování výrobních taktů, minimum prodlev stroje, zvyšování rychlosti nástroje a velikosti tvářecí síly. Všechny tyto požadavky na výrobní procesy mají za následek, že určené lisovací podmínky nemusí zcela odpovídat prvopočátečním plánům, pro které se karoserie navrhovala ve vývojovém středisku.

V průběhu tvářecího procesu víme, že dochází k nárůstu teploty vlivem tření a deformačního zpevnění. Změřená ustálená teplota při lisovacím procesu se přibližně pohybuje od 80 °C do 120 °C. Je běžnou praxí, že nové technologie se ověřují na starších nebo stávajících zařízeních, ale tuto možnost zde nemáme. Spojení tedy těchto empiricky změřených dat v laboratoři s teoretickými poznatky a rešerší nám pomohou lépe pochopit problematiku tribologie a vliv maziv v případě lisovacích procesů.

Cílem práce je ověření, jak tato vyšší teplota ovlivní tribologické vlastnosti materiálů používaných pro stavbu karoserie automobilu. Výsledky této práce mohou být dále využity v praxi pro zpřesnění numerických simulací tvářecích procesů a tím zvýšit spolehlivosti a životnost, nebo ušetřit v ekonomickém hledisku tvářecích nástrojů.

2. TEORIE TRIBOLOGIE

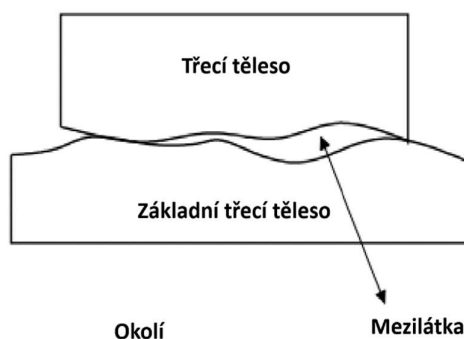
Tribologie je vědní obor, který se zabývá základním mechanismem třením mezi dvěma povrchy, které se vůči sobě pohybují a zároveň důsledky jako je opotřebování, které je nejčastěji nežádoucí a je snaha předejít nekontrolovatelnému opotřebením nebo alespoň minimalizovat jeho dopady. Tudiž můžeme říct, že obor tribologie se skládá ze čtyř základních oblastí, pod které spadá konstrukce povrchu, tření, opotřebením a mazání. [1] [2] [3]



Obr. 1 – Tribologie jako interdisciplinární věda, upraveno [3]

2.1 Tribologický systém

Tribologický systém se klasifikuje na přirozený a umělý, ve kterých probíhá třecí proces, v jehož důsledku na sebe vzájemně působí minimálně dvě tělesa. Tento systém se skládá ze čtyř prvků a jako celek představuje jeden třecí uzel. [4]



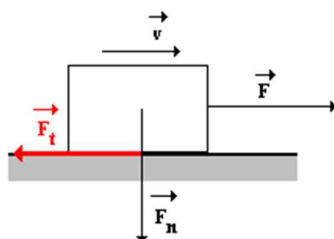
Obr. 2 – Tribologický systém podle DIN 51 320, upraveno [1]

2.2 Tření

Jedná se přírodní jev, který je vázán na vzájemný pohyb dvou dotýkajících se elementů tribologického systému. Tření definujeme na vnitřní a vnější. Tření vnější může být definováno jako mechanický odpor mezi dvěma povrchy, které se proti sobě vzájemně pohybují a jsou tlačeny proti sobě. Při dotyku nebo skluzu těchto dvou povrchů dochází ke ztrátám mechanické energie, která se nevratně přeměňuje na teplo. Děj vnitřního tření probíhá v mikrostruktuře třecího tělesa, kdy končí děj relativního pohybu materiálových struktur. Lze rozdělovat také podle druhu pohybu na statické, dynamické nebo nárazové. [1] [4]

2.2.1 Třecí síla a koeficient tření

Třecí sílu můžeme definovat jako odpor, který si kladou dvě tělesa, která se dotýkají a mají tendenci po sobě smekat se. Tato třecí síla má opačný směr, než je směr pohybu třecího tělesa. Aby se mohlo třecí těleso pohybovat, musí nejprve překonat již zmiňovanou třecí sílu. Mezi normálovou a třecí silou je lineární závislost a zároveň velikost kinematického tření záleží na rychlosti pohybu, jak pojednávají empirické zákony Amontons-Coulombova modelu. Tito dva vědci se mylně domnívali, že velikost třecí síly nezávisí na rychlosti pohybu. Poměr třecí síly k normálové síle se nazývá koeficient tření a značí se μ . [2] [5] [6] [7]

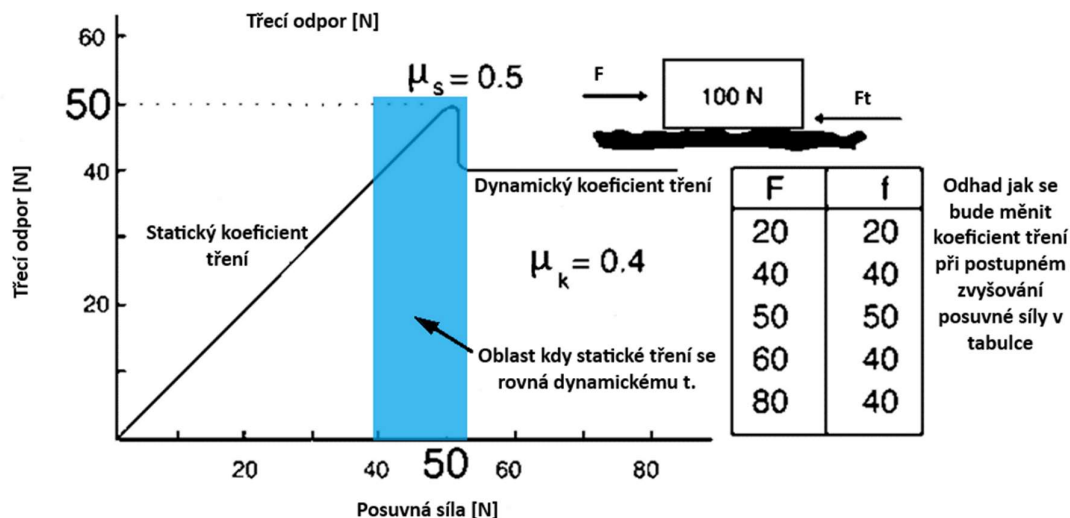


Obr. 3 – Působení třecích a jiných sil na těleso v rovině [6]

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

- kde μ je součinitel tření [–]
 F_t je třecí odpor [N]
 F_n je normálová síla [N]
 F je posuvná síla [N]
 v je rychlost posuvu [m/s]

Třecí koeficient ve skutečném světě nelze jednoduše charakterizovat jako konstantu a je třeba rozlišovat, zda je těleso v klidu, nebo v pohybu. Pokud se uvádějí koeficienty tření pro určité kombinace povrchů, uvádí se obvykle dynamický, protože jeho hodnoty jsou spolehlivější. [8]



Obr. 4 – Teoretický model tření zanesen do grafu, upraveno [8]

2.2.2 Statický koeficient tření

Statický koeficient tření, také nazýván jako limitní, je definován, jako největší možná síla kdy těleso setrvává v klidu. Pro odlišení ve výpočtu se statický koeficient tření značí dolním indexem 0 nebo S. [7] [8]

$$\mu_s = \frac{F_{tStat}}{F_n}$$

kde μ_s je statický součinitel tření [–]

F_{tStat} je statický třecí odpor [N]

F_n je normálová síla [N] [8]

2.2.3 Dynamický koeficient tření

Na rozdíl od statického koeficientu je dynamický koeficient tření definován jako poměr tangenciálního napětí potřebného k podpoře kluzu k působícímu zatížení. Dynamické tření zpravidla u většiny dostupných materiálů bývá obecně nižší než statické tření. [7]

$$\mu_D = \frac{F_{tDyn}}{F_n}$$

kde μ_D je dynamický součinitel tření [–]

$F_{t_{dyn}}$ je dynamický třecí odpor [N]

F_n je normálová síla [N] [8]

2.2.4 Parametry ovlivňující třecí sílu

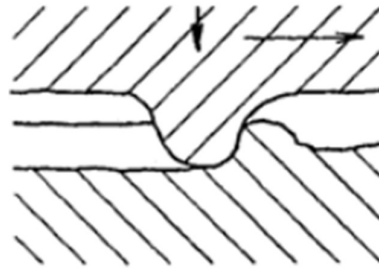
Parametry nutné zahrnout do metodiky měření třecích sil:

- Kontaktní tlak – S rostoucím kontaktním tlakem roste i třecí síla
- Rychlost skluzu třecích těles – Dynamická třecí síla je menší než statická třecí síla
- Materiál – Elastické a plastické vlastnosti materiálu ovlivňují, jak hladce tělesa budou klouzat, při menších kontaktních tlacích budou tělesa na sebe působit pouze elasticky
- Drsnost – Rozhodující je tvar a četnost nerovností, a to jestli je tření suché (bez maziva) nebo s mazivem
- Mazivo – Úzce souvisí s vlastnostmi povrchu, rozprostřením maziva, kontaktním tlaku a kluzné rychlosti, toto vše se různí tvářecí operací
- Teplota – Záleží na teplotě v bodech, kde se tělesa dotýkají a maziva, která závisí převážně na tepelné vodivosti materiálu a maziva
- Deformace – Pro lisování je velmi relevantní, protože tvářený plech je deformován plasticky, kdy zároveň eliminuje většinu elasticity v místě dotyku a tato deformace mění drsnost povrchu [2]

2.3 Opotřebení

Definováno jako mechanický děj odstraňování nebo přemístování částic hmoty z povrchu. Dále je doprovázeno i jevy fyzikálními, chemickými nebo elektrickými. V praxi se nepochybně setkáváme s různou kombinací opotřebení. Tudíž otázka volby materiálů a maziv v tribologickém uzlu je velice podstatná, a také rozhodne o spolehlivosti uzlu a ekonomice celého zařízení. Hodnocení dopadu opotřebení je různé. Jako jeden ze způsobů hodnotících parametrů opotřebení jde použít úbytek objemu nebo tloušťky materiálu. Hlavním důsledkem opotřebení je zvyšování třecích sil. [4] [9]

2.3.1 Abrazivní opotřebení

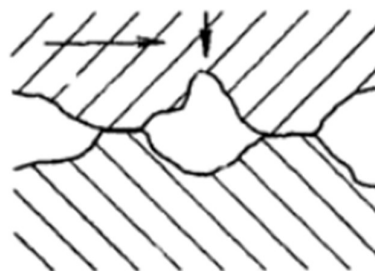


Obr. 5 – Abrazie [4]

Jedná se o mechanické obroušování, kdy tvrdší povrch třecí plochy se vrývá do měkčí plochy a tím vytrhává kusy materiálu. Tato definice spadá do dvou tělesového abrazivního opotřebení, ale můžeme mít i tří tělesové, kdy malé částičky mezi třecími plochami, například nečistoty, jsou tvrdší než alespoň jedna z ploch a tím je mechanicky obroušují. Důsledkem abrazivního opotřebení vznikají nerovnosti na povrchu třecích ploch nebo vytváří se tzv. tříska, kdy se materiál odebírá. [10] [9] [11]

2.3.2 Adhezivní opotřebení

V průběhu adhezivního opotřebení se malé částice z jednoho třecího povrchu přichytávají k druhému buďto dočasně, nebo trvale a tím vznikají tzv. mikro svary. Na adhezi má vliv především hloubka a poloměr zakřivení mikronerovností, síla zatížení a relativní rychlost pohybu třecího tělesa. Třením

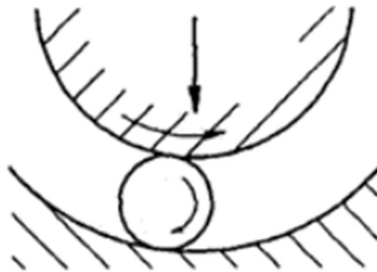


Obr. 6 – Adheze [4]

zde vzniká poměrně rychle teplo, které pokud se v dostatečné míře neodvádí, může zapříčinit až velmi intenzivní formu adheze tzv. zadírání. Zadírání je děj, který zvětší malé svarové spoje z mikrostruktury do makrostruktury a tím úplně mění vlastnosti materiálů třecích ploch. [9] [10] [12]

2.3.3 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení materiálu nastává při silovém, intenzivním a opakovaném styku dvou těles, při kterém vznikají lokálně vysoké tlaky, skluz a tření. Zcela běžně únavové opotřebení nastává na bocích zubů ozubeného, kdy jeho styčné plochy jsou zakřivené do evolventy a dotýkají se jen v některých bodech. [13]



Obr. 7 – Únava materiálu [4]

Na únavu materiálu má vliv, kromě provozních podmínek, zejména tvrdost a pevnost povrchové vrstvy, drsnost povrchu, nečistoty, vměstky, vruby, způsob namáhání a velikost součásti. Empiricky bylo prokázáno, že odolnost proti únavovému opotřebení je přímo úměrná tvrdosti povrchu, a to i v oblasti vysokých tvrdostí (míněno 55 až 68 HRC). [13] [14]

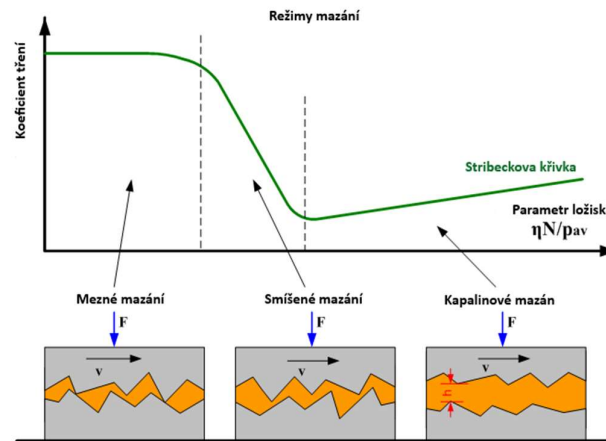
2.4 Mazací mechanismy

Nanášení maziv mezi plochy třecích těles se provádí tak, aby tvořili souvislou mazací vrstvu, tzv. film. Primárním významem všech maziv je snížení tření mezi třecími, ale mohou plnit i sekundární funkce jako kupříkladu izolace, chlazení nebo čištění. [15] [16]

Podstatné parametry pro maziva jsou: výborná přilnavost k základnímu materiálu, vysoká únosnost mazacího filmu, malé vnitřní tření, chemická a teplotní stálost, nízká cena, šetrnost k životnímu prostředí a nekorozní účinky na okolní materiály, které by mohly posléze degradovat třecí plochy nebo například těsnění. [15] [16]

2.4.1 Kapalná maziva

Ideální stav, kdy kapalná maziva mají největší účinnost, když mezi třecími tělesy je neporušený konzistentní tzv. olejový film. Stribeckova křivka popisuje jednotlivé mazací režimy podle nanesené tloušťky olejového filmu a tím i závislou hodnotu třecího koeficientu. [17]



Obr. 8 – Stribeckova křivka, upraveno [17]

Nejčastější metodou výroby kapalných maziv jsou minerální ropné oleje, které se získávají pomocí destilace, rafinace a deparafinace ropy. Doplnění o různé přísady se upravují vlastnosti daného maziva. [15]

Patří zde maziva do motoru, převodovky, strojní, turbínové, hydraulické a kompresorové. [16]

2.4.2 Plastická maziva

Plastická maziva se na rozdíl od kapalných používají tam, kde by to příliš komplikovalo konstrukci nebo zvyšovalo náklady provozu. Nejvíce používaná pro mazání těžko přístupných ložisek, při malých kluzných rychlostech zároveň velkých tlacích a teplotách, v prašném, vlhkém nebo chemicky agresivním prostředí, nebo tam kde je potřeba vyloučit odstřikování oleje, který by mohl znehodnotit funkci některé části stroje. [15]

Vyrábějí se smícháním kapalného maziva se speciálním zahušťovadlem. Pro zahušťovadla se nejčastěji volí mýdla, anorganické látky (bentonit, silikagely), organické polymery (polyamidy, polymočovina), pigmenty a dále uhlovodíky (parafiny, vosky). [15]

2.4.3 Tuhá maziva

Tuhá maziva se používají jako jedna ze složek pro kapalná a plastická maziva, popřípadě ve formě prášku používaného při podmínkách smíšeného tření. Umožňují mazání i při vyšších teplotách než kapalná maziva. Nejpoužívanější je grafit, sirník molybdenu (MoS_2). [9]

2.4.4 Plynná maziva

Mazání plynem se používá v extrémních podmínkách, jako jsou vysoké teploty, chemická agresivita nebo nebezpečné záření. Nejdůležitější použití je pro aerostatická a aerodynamická ložiska v uložení hřídelů s velmi vysokými otáčkami při malém zatížení. [15] [9]

3. TEORIE TVÁŘENÍ

Základní charakteristikou tvářecích pochodů jsou velké plastické deformace, při kterých dochází k trvalým změnám tvaru a rozměrů tvářeného tělesa, vyvolané účinkem vnějších sil nástroje. [18]

3.1 Charakteristika tvářecích procesů

Tváření kovů, které spíše spadá do hospodárnějšího druhu výrobních procesů, protože na rozdíl od ostatních procesů, jako je obrábění, vzniká menší množství odpadu a rychlost výroby je obecně vyšší. Dalším aspektem je velmi dobrá automatizace a zařazení do výrobních linek. Hlavní charakteristikou je, že při tváření je potřeba působit na polotovary větší silou, než je mez pružnosti, ale ne větší než je mez pevnosti daného materiálu. [19]

3.1.1 Elastická deformace

Pokud je těleso zatěžováno takovou silou, že po odlehčení se deformace vrátí do původního stavu, jedná se o elastickou nebo také pružnou deformaci. V této oblasti platí přímá úměra mezi deformacemi a napětím, tedy platí Hookeův zákon. U kovů se jedná o velmi malé deformace v řádech procent. [19] [14]

3.1.2 Plastická deformace

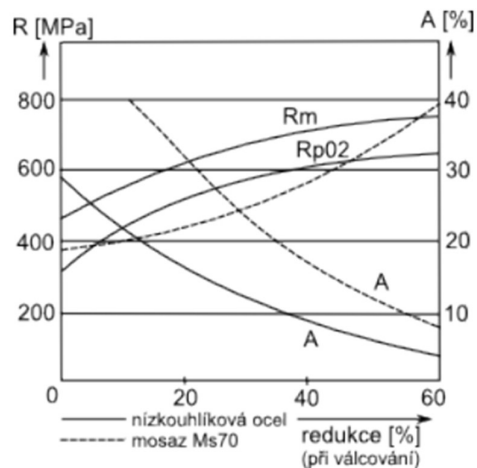
Plastická deformace je taková, kdy vlivem vnější silou těleso deformuje svůj tvar a už se nedokáže vrátit zpět do původního stavu. K tomu zároveň vnitřní síly tělesa působí proti vnějším silám a snaží se samotné deformaci zamezit. [14]

3.2 Tvářecí teploty

Se stoupající tvářecí teplotou poměrně rychle klesá přetvárný odpor tvářeného materiálu. Podle teploty můžeme oddělit tváření do tří kategorií, a to je tváření za studena, za tepla a za poloohřevu. [19]

3.2.1 Tvářenání za studena

Charakteristické pro oceli tvářené za studena je zpevňovací mechanismus. Zpevňování se projevuje hlavně zvýšením meze kluzu a meze pevnosti v tahu a dále snížením tažnosti. O tvářenání za studena mluvíme, pokud se teplotou zpracovávaného kovu pohybujeme pod rekrystalizační teplotou neboli před uzdravovacími procesy. Teoretická teplota rekrystalizace se pohybuje kolem $0,4 T_{TAV}$ – tavicí teploty materiálu. V praxi se tvářenání za studena provádí zpravidla za nižších teplot, to znamená kolem $0,2$ až $0,3 T_{TAV}$. [20]



Obr. 9 – Změna mechanických vlastností po válcování za studena [20]

3.2.2 Tvářenání za poloohřevu

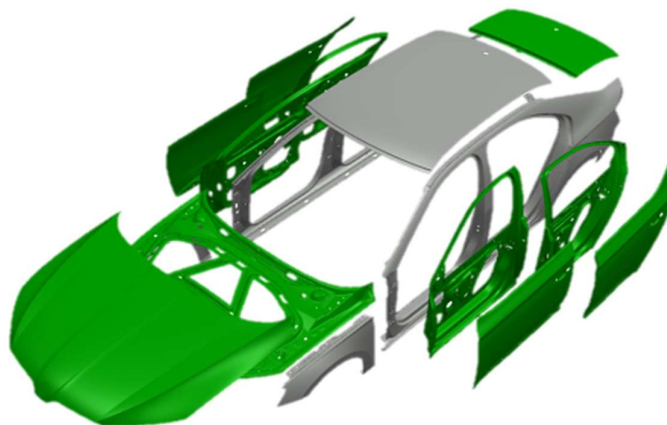
Tvářenání za poloohřevu je tvářecí děj za zvýšené teploty, která však musí být o něco málo nižší, než je teplota rekrystalizace. Jedná se kompromis mezi tvářenání za studena a za tepla. Lze docílit menší přetvárného odporu tvářeného materiálu a díky tomu dosáhneme vyššího stupně deformace oproti tvářenání za studena. Horní hranicí tvářecí teploty za poloohřevu je oxidace povrchu. [21] [22]

3.3 Technologie plošného tvářenání

Při plošném tvářenání se při zpracovávání polotovaru dosáhne bez větší změny v průřezu, na rozdíl od objemového tvářenání, kde změna tvaru v celém objemu a je vždy žádoucí. [19]

3.4 Lisování plechů

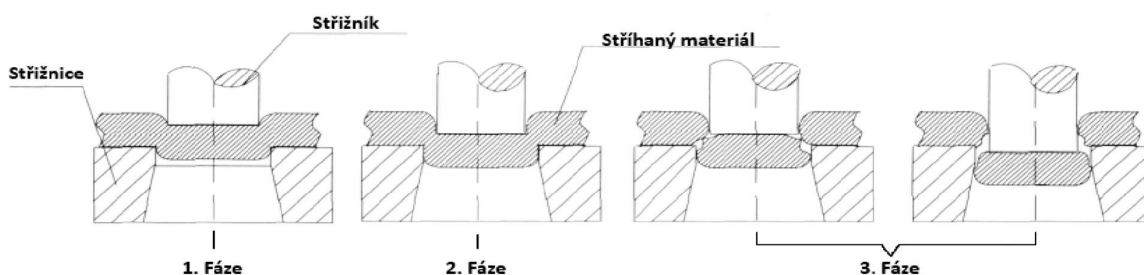
Definice lisovacího procesu spočívá v tom, kdy lis tvaruje lisovaný plech pomocí tlakové síly nebo tlakového rázu. Finální výlisek může být vytvarován jednou nebo postupně na více operací. [23]



Obr. 10 – Lisované díly karoserie [29]

3.4.1 Stříhání

Proces stříhání plechu spadá do kategorie dělení materiálu. V první fázi stříhu nastává pružná deformace a síla střížníku, která působí na materiál, nepřekračuje mez pružnosti. Začátek druhé fáze nastává, když síla překročí mez pružnosti a nastává trvalá deformace. Ve třetí fázi je již materiál namáhán stejnou silou jako je pevnost ve smyku daného materiálu a vytváří se trhliny, které se dále rozšiřují po celém obvodu výlisku. [24]



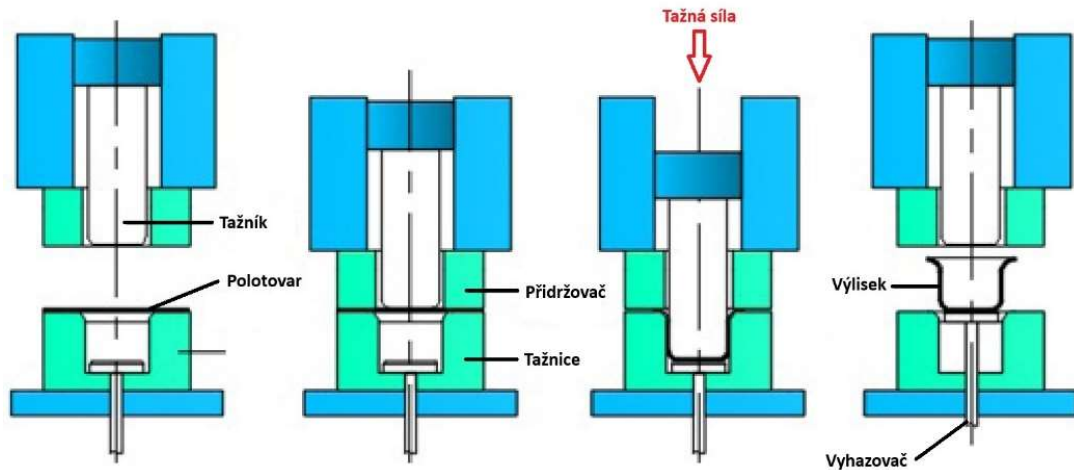
Obr. 11 – Fáze procesu stříhání, upraveno [24]

3.4.2 Ohýbání

Nejběžnější technologie při lisování dílů je ohýbání plechů, které se používá pro L, U a V profily, lemování, zakružování nebo také pro tvarové zpevnění výlisku. [24]

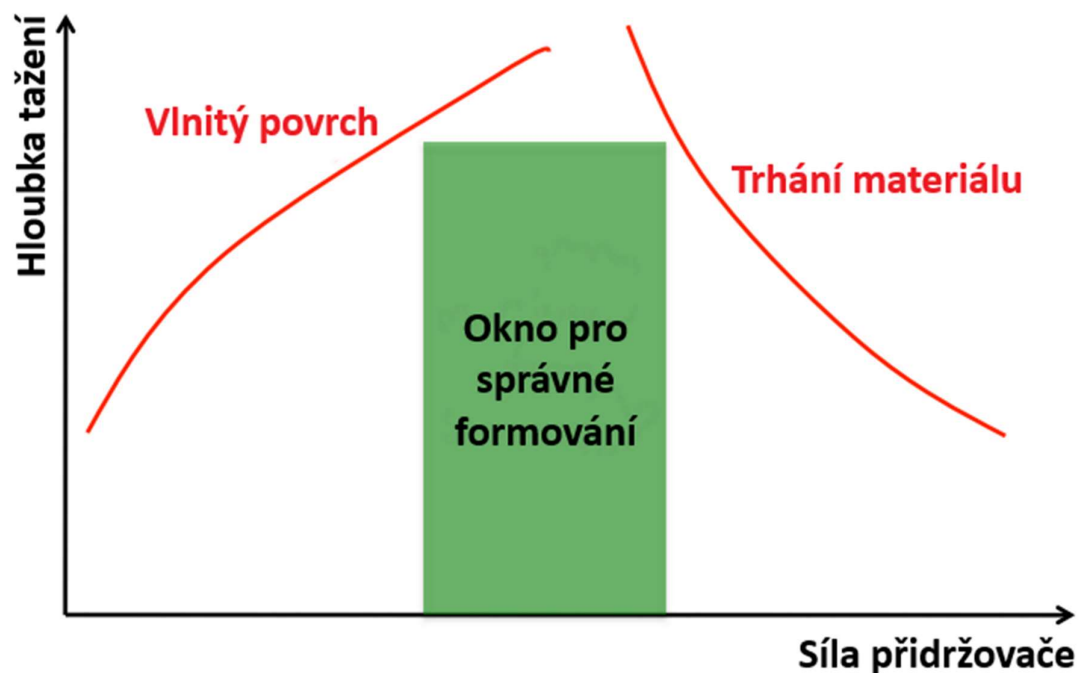
3.4.3 Hluboké tažení

Při hlubokém tažení z plochého plechu vzniká výrobek cylindrového, kuželového nebo téměř hranatého tvaru. Tento typ operace může také sloužit jako test tvářitelnosti materiálu. [24]



Obr. 12 – Operace hlubokého tažení s přidržovačem, upraveno [30]

Hlavní dva druhy konvenčního formování členíme na tažení bez přidržovače a s přidržovačem. Přidržovač preventivně napomáhá k tomu, aby se netvořily trhliny nebo vlnění materiálu v průběhu tažení. Při malých hloubkách tažení není přidržovač nutný. [24] [25]



Obr. 13 – Graf poměru hloubky tažení a síly přidržovače, upraveno [25]



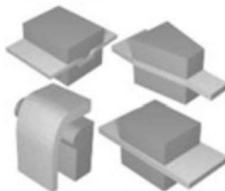

3.5 Tribologické procesy při lisování plechů

Rychlosti při tvářecích procesech jsou relativně nízké, nicméně zde může docházet ke skluzům a velkým lokálním tlakům. Ve většině tvářecích procesů převládá proces tenkovrstvého nebo smíšeného režimu mazání. Mezní mazání nebo tlusté mazací vrstvy převládají pouze ve výjimečných případech. Vrypy, škrábance, otřepy atp. by se mělo předejít správným výběrem maziva. [26]

V úvahu je také nutnost brát v potaz, že drsnost výrobku se v průběhu procesu tváření mění a to i velmi nerovnoměrně. Jedním z proměnných faktorů je i mazací film, který nemusí být rovnoměrně nanesen, nebo jeho mazací účinky jsou nedostatečné. [26]

3.6 Tribologické zkoušky pro lisování plechů

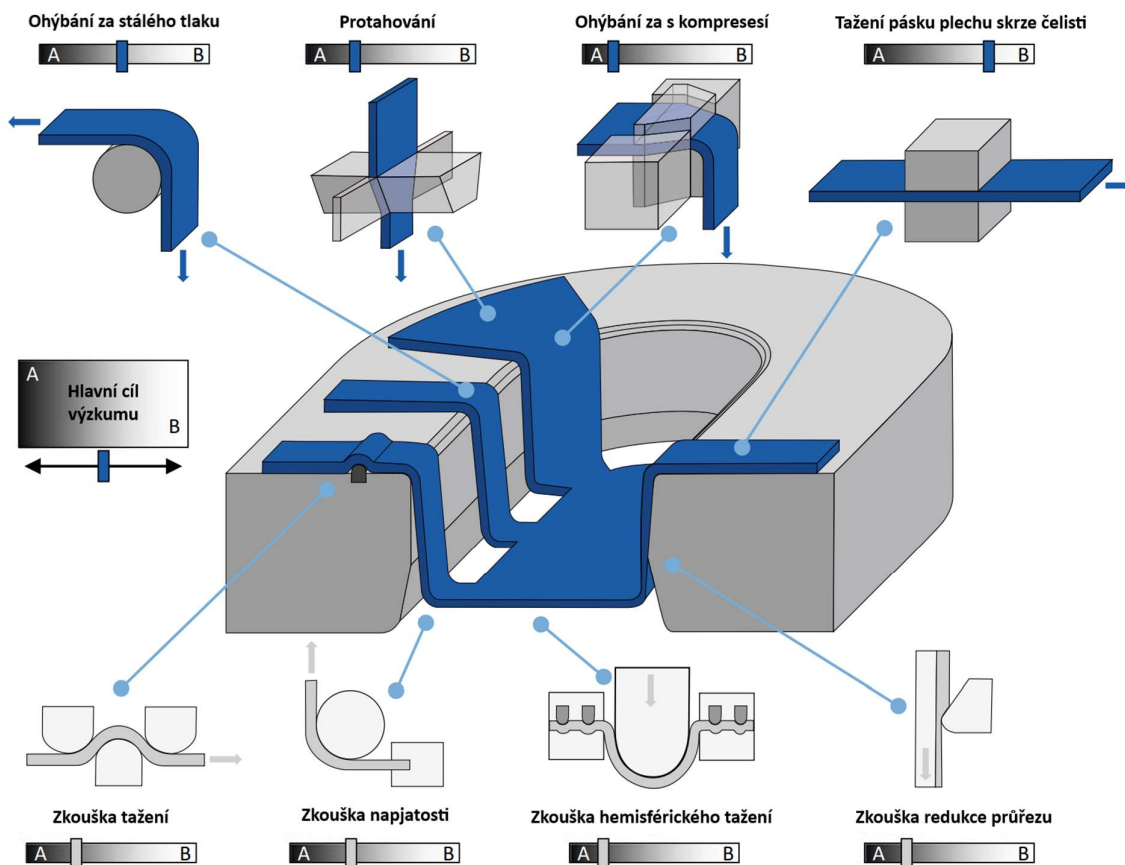
Velké množství činitelů ovlivňují jak průběh, tak i samotný výsledek zkoušky, proto je žádoucí ověření pomocí empirické zkoušky za simulovaných podmínek odpovídajících lisovacím procesům. Nejpodstatnější podmínky jsou geometrie povrchu, chemický stav povrchu, tloušťka filmu maziva, teplota při lisování, rychlost a stupeň deformace. [27]

Kategorie zkoušení tribologických metod pro tváření plechů podle DIN 50322			
			
Kategorie 1-3	Kategorie 4	Kategorie 5	Kategorie 6
Provozní zkouška (Skutečný test tváření v průmyslovém procesu)	Modelová zkouška (Laboratorní zkouška v měřítku)	Modelová zkouška (Tribometr pro tváření plechů)	Modelová zkouška (Obecný test)
Přenosnost na lisovací procesy v měřítku			Metrologická vyhodnotitelnost

Obr. 14 – Tribologické zkoušky tváření plechů dle normy DIN 50322, upraveno [28]

Zkoušky lze rozdělit do šesti základních kategorií podle toho, jak přesně odpovídají reálnému lisovacímu procesu. Přičemž kategorie 6 je nejhůře přenositelná do reálného procesu kvůli odlišným kontaktním podmínkám, ke kluznému kontaktu dochází opakovaně na stejné ploše a není přihlíženo na měnící se zdrsňování povrchu. Naproti tomu kategorie 1 až 3 jsou spíše zkušební

verze v sériovém výrobním procesu, které jsou velmi nákladné a musí se pravděpodobně zastavit výrobní linka pro provedení těchto testů. Vzhledem k tomu že se používají skutečné tvářecí operace, není zde potřeba přenášet výsledky testů. [28]

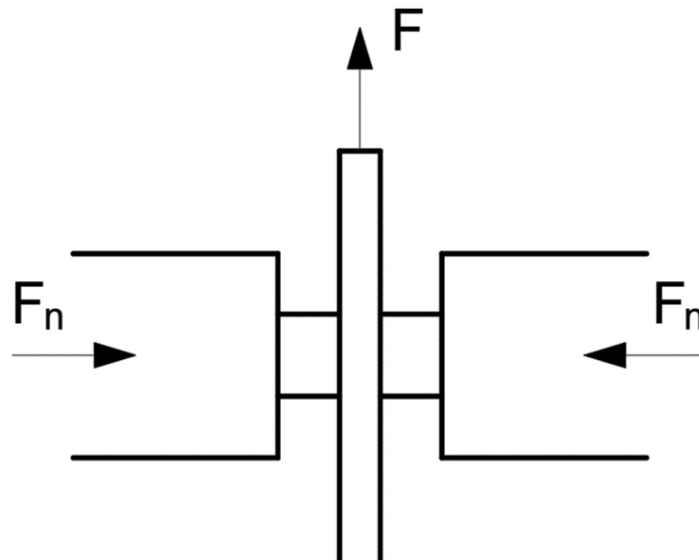


Obr. 15 – Dílčí tribologické zkoušky 5. kategorie z normy DIN 50322, upraveno [28]

3.6.1 Experimentální určení součinitele tření při plošném tváření

Nejčastější zkouškou pro ověření součinitele tření bývá hluboké tažení kalíšku, při kterém hlavní kritérium pro hodnocení výsledků bývá například dosažený stupeň tažení nebo síla potřebná k protažení kalíšku z daného průměru polotovaru. [27]

Další odlišnou zkouškou je použitím speciálního přípravku, který je upnut do trhacího stroje. Zkoušený vzorek je upnut z jedné strany do trhacího stroje a na druhém konci je upnut mezi zkušebními čelistmi. Síla potřebná na protažení zkušební vzorku je přímo závislá na velikosti koeficientu tření a přitlačné síly čelistí přípravku. [27]



Obr. 16 – Zkouška tažení vzorku z čelistí, upraveno [27]

Silové poměry v této zkoušce lze definovat vztahem:

$$\mu = \frac{F}{2 F_n} [-]$$

kde μ je součinitel tření [-]

F je posuvná síla [N]

F_n je normálová síla [N] [27]

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola se zabývá experimentálním měřením závislosti síly na dráze, ze které je vypočten statický a dynamický koeficient tření.

4.1 Příprava vzorků

Jako zkušební tělesa byly zvoleny vzorky pásů plechu o velikosti 30x200x0,7 (šířka, délka, tloušťka), které byly nastříhány z tabulí plechu využitím pákových nůžek. Pro každou teplotu zkoušky (tedy 20 °C, 80 °C, 100 °C, 120 °C) a 2 rychlosti (tedy 20 mm/min a 600 mm/min) bylo vyčleněno 5 vzorků. Bylo tedy použito 8 sad o celkovém počtu 40 zkušebních vzorků.

4.1.1 Materiál

Materiál pro experimentální část byla ocel běžně používaná pro hluboké tažení a pro složité díly karoserie automobilu. Jakost oceli byla DC05+ ZE50/50 BPO dle normy DIN EN 10152. Jednalo se o hlubokotažený plech za studena s povlakem zinku o tloušťce 5 μm . Dále byl při výrobě povrch plechu fosfátovaný a naolejovaný.

Tab. 1 – Chemické složení oceli DC05 [31]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]
$\leq 0,06$	$\leq 0,50$	$\leq 0,40$	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$	$\geq 0,010$	$\leq 0,30$

Tab. 2 – Mechanické vlastnosti oceli DC05 [31]

R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	n [-]	r [-]
140 ÷ 200	270 ÷ 330	46,14	0,216	2,37

4.1.2 Úpravy povrchu

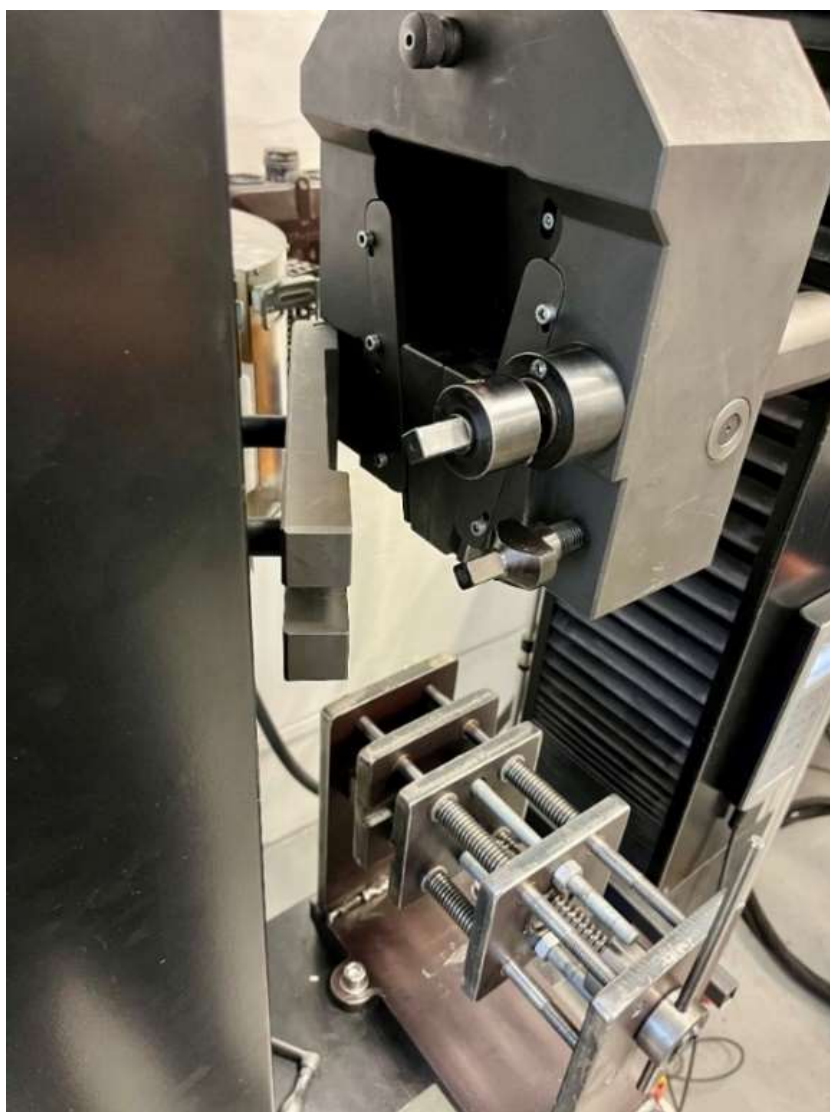
Povrchy vzorků byly odmaštěny detergentem s vodou a následně usušeny. Očištěny byly také od jiných nečistot a dřívějších popisků pomocí ethanolu. Před samotným tažením byl vzorek v místech, kde se dotýkal experimentálních čelistí, velmi tenkým filmem naolejován olejem.

4.2 Zařízení pro experiment

Pro experiment byl použit univerzální trhací stroj LabTest 5.100SP1 na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Pro ovládání pohybu stroje a zaznamenávání výsledků zkoušky byl použit program Test&Motion na počítači v dané laboratoři.

Tab. 3 – Vybrané parametry univerzálního trhacího stroje LabTest 5.100SP1

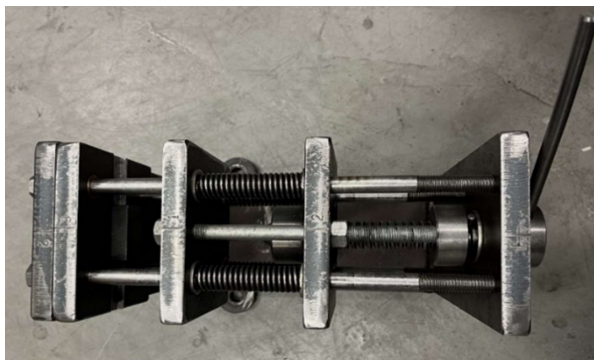
Jmenovité zatížení	100 kN
Max. zkušební rychlost	600 mm/min
Výška pracovního prostoru	1130 mm
Šířka pracovního prostoru	400 mm
Tuhost rámu	$1,6 \cdot 10^{-6}$ mm/N



Obr. 17 – Univerzální trhací stroj s již upnutými experimentálními čelistmi
[Foto autor]

4.2.1 Zkušební upínací zařízení

Pro úspěšné měření bylo potřeba spodní čelisti univerzálního trhacího stroje vyměnit za speciální upínací přípravek, kterým lze kontrolovat přítláčnou sílu na zkoušené vzorky v čelistech. Pro materiál konstrukce zařízení byla použita konstrukční ocel S235JR. Přítlak čelistí zajišťovaly čtyři vinuté tlačné pružiny o velikosti 3x18x113,5 mm s dvaceti závity.



Obr. 18 – Konstrukce experimentálního upínacího zařízení [Foto]

4.2.2 Upínací čelisti

Pro každou čelist byly provedeny tři měření. Povrch byl měřen drsnoměrem Mitutoyo SJ-210 s diamantovým hrotem. Obě kontaktní plochy čelistí jsou 2x 40x30 mm tj. 2400 mm². Materiál pro čelisti byla nástrojová ocel ČSN 19 312, kde kontaktní plochy čelistí se brousily na rovinné brusce TOS.

Průměrné hodnoty drsnosti			
Drsnosti	Ra [μm]	Rz[μm]	Rq[μm]
Čelist 1	0,275	2,254	0,355
Čelist 2	0,269	1,939	0,343
Směrodatná odchylka [-]	0,003	0,158	0,006



Obr. 19 – Čelisti upínacího zařízení [Foto autor]

4.3 Způsob ohřevu

Ohřev byl proveden pomocí tepelného zařízení vyrobeného v laboratořích Ústavu strojírenské technologie. Čelisti byly temperovány na teplotě delší dobu, aby nedocházelo k rychlému chladnutí při samotných zkouškách.

4.3.1 Konstrukce tepelného zařízení

Jednoduché zařízení pro ohřev čelistí se skládá z univerzálního regulátoru ESM-7730. V tomto případě jeho funkcí je ohřev termoelektrického článku pomocí proudu a napětí, udržovat nastavenou teplotu a monitorování teploty. Čelisti upínacího zařízení ze strany obsahovaly vyvrtanou díru, ve které zařízení monitorovalo teplotu čelistí pomocí termočlánku typu K.



Obr. 20 – Experimentální zařízení pro ohřev a měření teploty čelistí [Foto autor]

4.4 Metodika měření

Zkouška se prováděla za různých teplot. Kontrolní teplota byla ustálená teplota laboratoře 20 °C a ostatní teploty odpovídaly lisovacím teplotám tj. 80 °C, 100 °C a 120 °C. Dále zkouška se snažila ověřit vlivu rychlosti tažení při dané teplotě. Rychlosti tažení byly stanoveny na 20 mm/min a 600 mm/min. Cíl zkoušení byl zjistit statický a dynamický koeficient tření při dvou zmíněných rychlostech při různých teplotách.

Vzorky byly označovány třemi po sobě seřazenými informacemi a to délka stlačení pružiny, číslo vzorku a na konec teplota, při které probíhal experiment

dané sady vzorků. Vzorky s nižší rychlostí (20 mm/min) tažení byly označovány číslem vzorku 01 až 05 a s vyšší rychlostí (600 mm/min) zase číslem 11 až 15.

Experiment probíhal tak, že na začátku měření se provedla výměna spodní čelisti. Dále se provedla kalibrace stroje společně s nastavením počítače, kam se vložily parametry zkoušky, které se poté uložili i do zvláštního textového souboru pro případné pozdější znovunačtení do systému. První dvě sady byly referenční a měřili za pokojové teploty přibližně 20°C. Poté následovalo měření za zvýšených teplot, proto byl do čelistí vložen termoelektrický článek pro ohřev. Čelisti upínacího zařízení byly temperovány na požadovanou teplotu. Při této teplotě nedošlo k výraznému poklesu teploty, která by měla výraznější dopad na průběh zkoušky. Teplota byla po celý průběh zkoušky monitorována i při samotném ohřevu a temperování. Po tažení zkušební vzorku skrze čelisti se vzorek vyjmul, očistil od přebytečného oleje, označil unikátním kódem a odložil. Stroj se znovu uvedl do počáteční polohy před zkouškou a do spodní čelisti se opět vložilo topné těleso. Takto se experiment opakoval pro všech šest sad vzorků za zvýšené teploty.

4.4.1 Parametry zkoušky

Zkušební vzorky byly vyrobeny z plechu o rozměrech a to 0,7 x 30 x 200 mm. Dráha tažení plechu skrze čelisti byla u všech vzorků stejná a to 25 mm. Délka stlačení pružin byla 64 mm, které se vypočítalo vyvozené napětí na zkoušený vzorek v čelistích.

4.5 Naměřená data

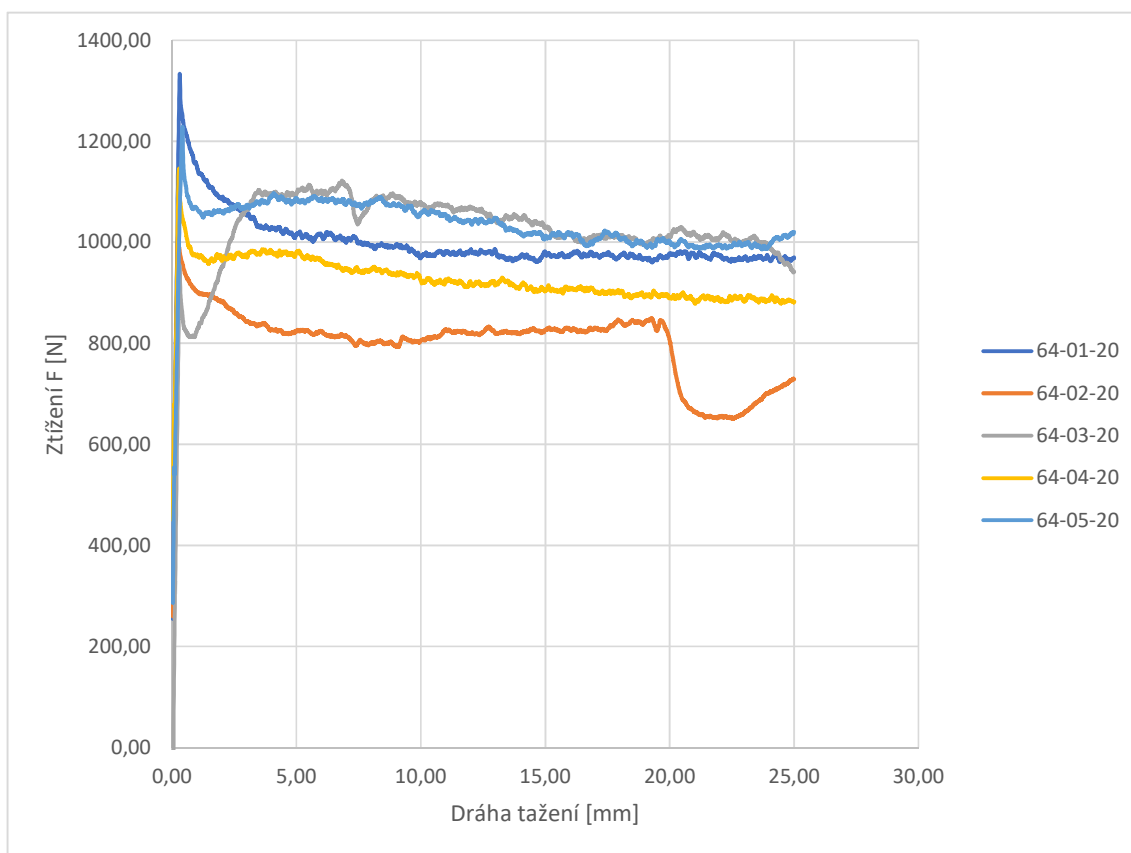
Data byla rozdělena podle zkušebních teplot, pro každé teploty byla zkouška provedena pro rychlosti 20 mm/min a 600 mm/min. Vzorky byly vizuálně zkontrolovány. Následně byla provedena na vybraných vzorkách makroskopická zkouška mikroskopem LEXT OLS 3000. Naměřená data jsou vyobrazena v příloze č. 1, makroskopické snímky jsou v příloze č. 2 a fotodokumentace vzorků v příloze č. 3.

4.5.1 Data ze zkoušky při teplotě 20 °C

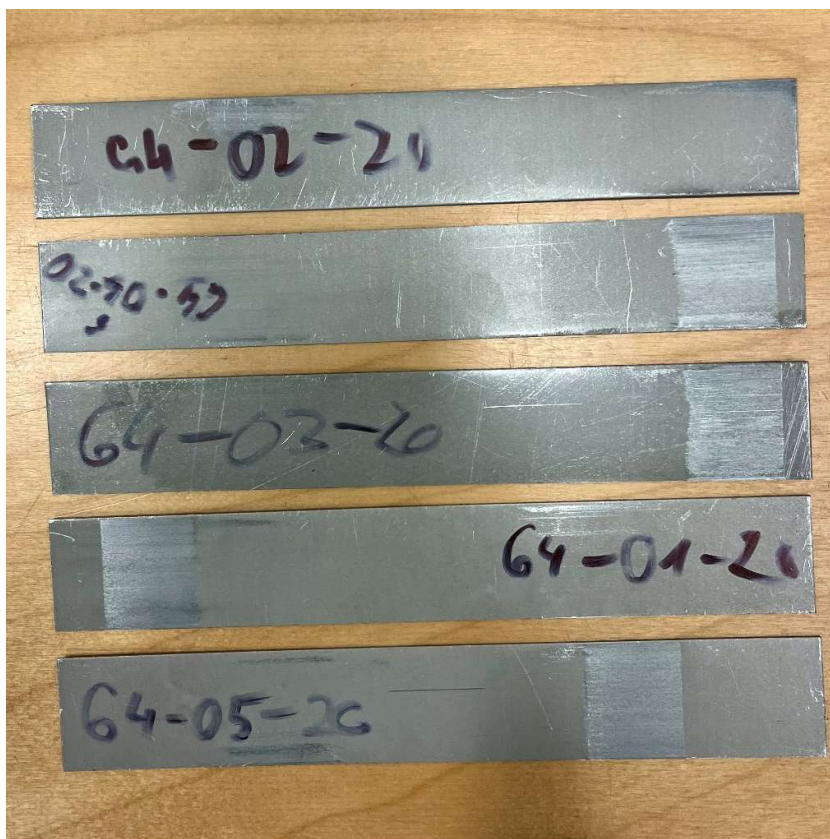
Zkouška proběhla při teplotě 20 °C a při rychlosti 20 mm/min.

Tab. 4 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 20 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-01-20	1333,300	979,722	0,187	0,138
64-02-20	1014,000	786,508	0,143	0,111
64-03-20	1103,500	1039,112	0,155	0,146
64-04-20	1146,100	913,854	0,161	0,128
64-05-20	1228,500	1029,569	0,173	0,145
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,164	0,133
Směrodatná odchylka SD [-]			0,015	0,013

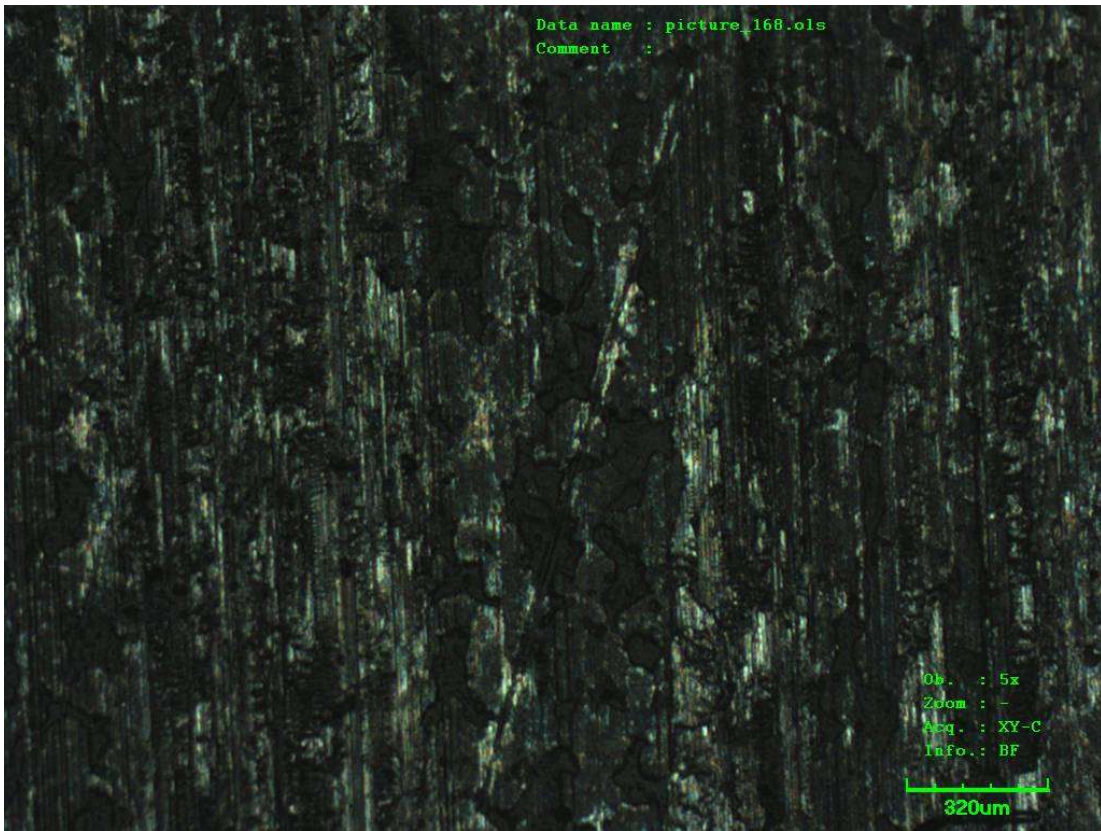


Obr. 21 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a teplotě 20 °C

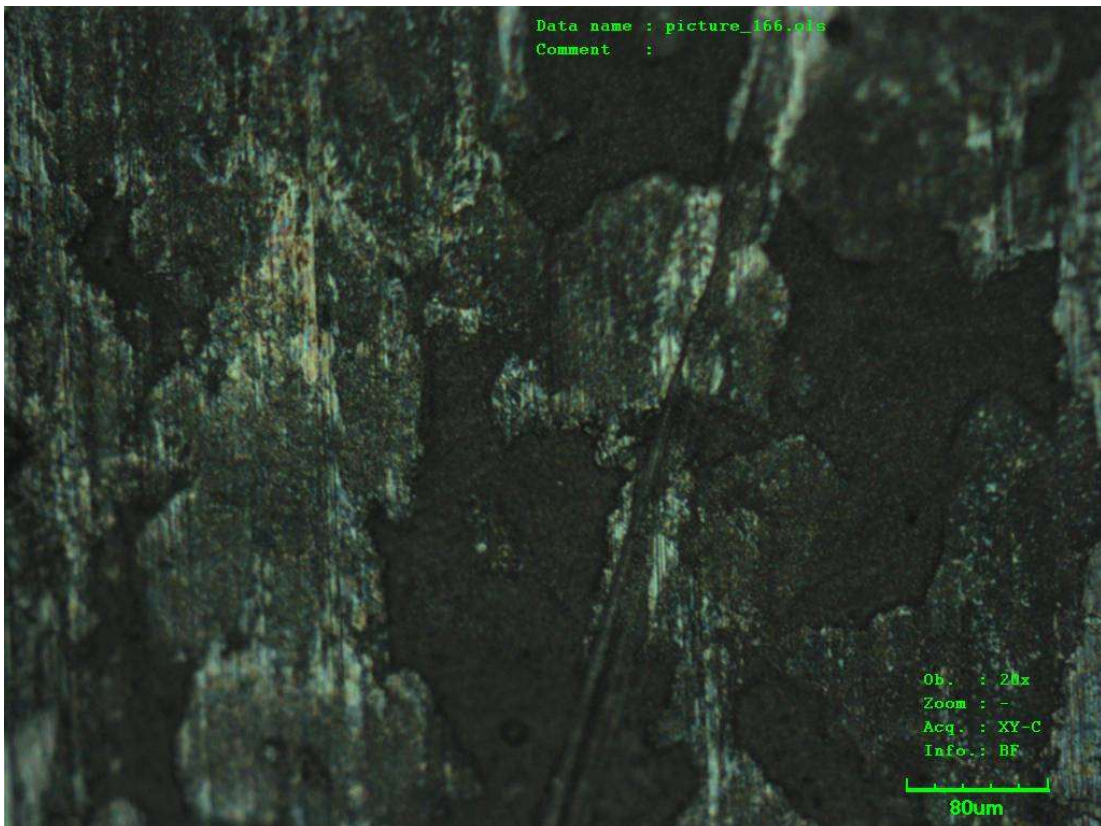


Obr. 22 – Vzorky tažené při 20 mm/min a 20 °C [Foto autor]

První měření probíhalo při rychlosti 20 mm/min a při teplotě 20 °C. Hodnoty sil v grafu jsou relativně konstantní s menšími lokálními výkyvy. Podle očekávání statické koeficienty tření byly o několik stovek newtonů větší než dynamické koeficienty. Směrodatné odchylky se pohybují okolo 0,015 pro statický koeficient a 0,013 pro dynamický koeficient. Na všech vzorcích lze pozorovat otěr zinkového povlaku v místě, kde se dotýkaly čelisti vzorku. Vzorek 64-02-20 se od ostatních liší nejspíše proto, že zkušební vzorek mohl být lehce zkroucený.



Obr. 23 – Makroskopický snímek vzorku 64- 03-20 zvětšený 120x [Foto autor]

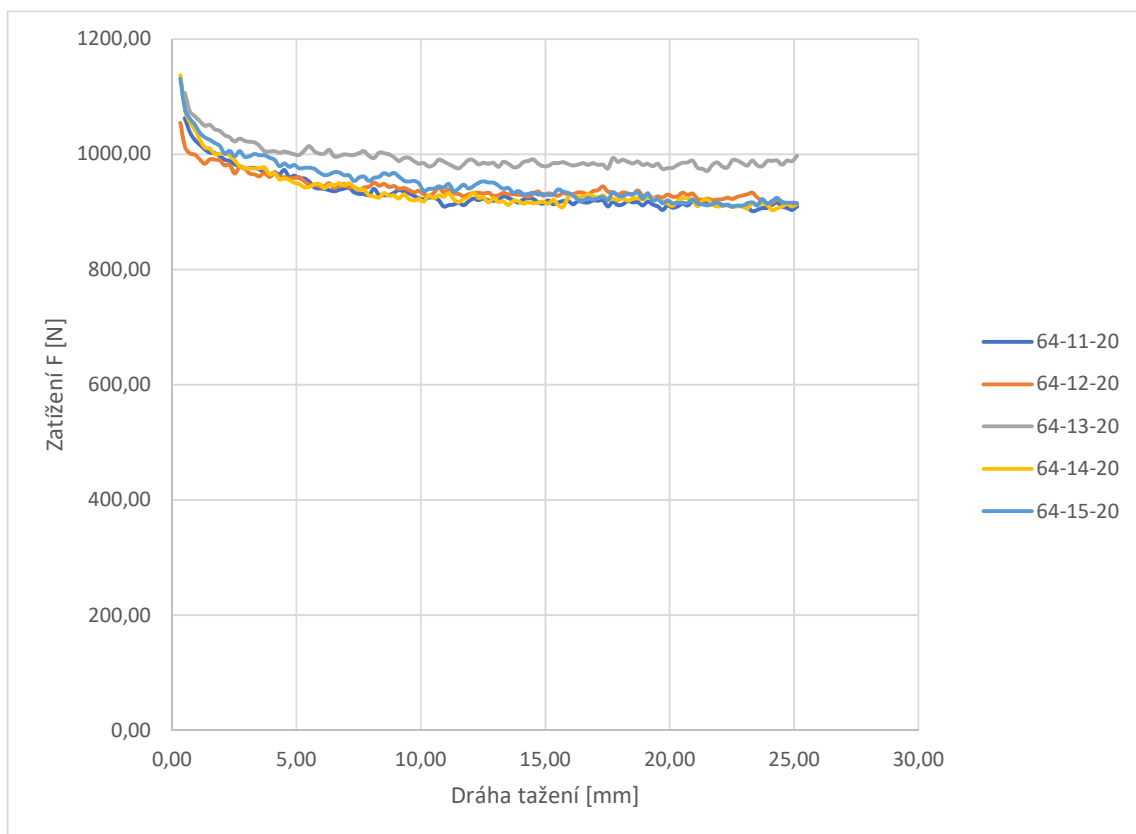


Obr. 24 – Makroskopický snímek vzorku 64-15-20 zvětšený 480x [Foto autor]

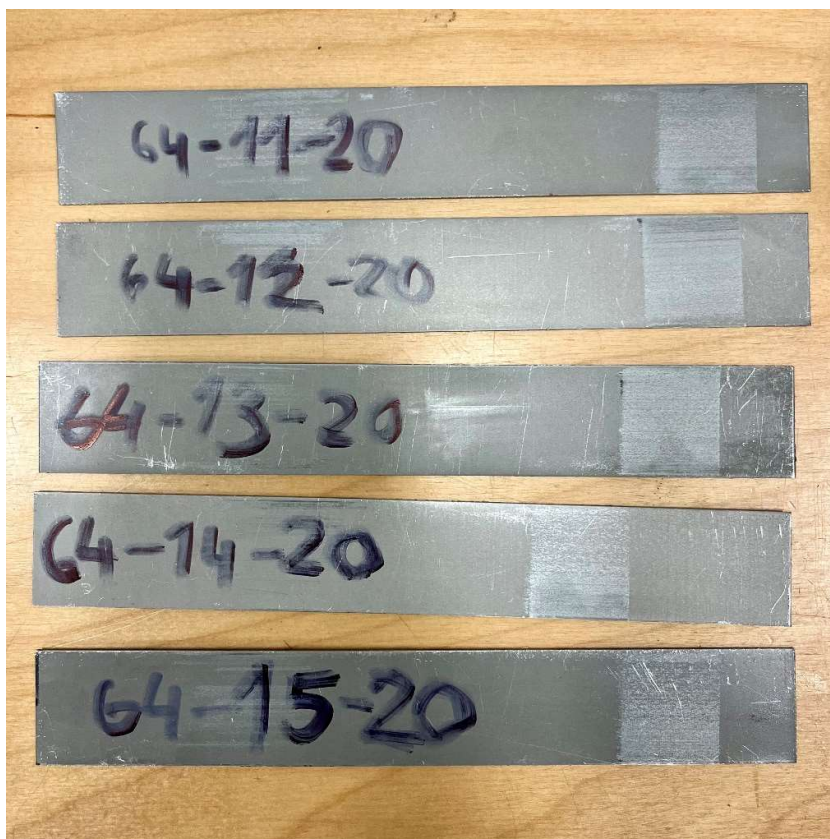
Zkouška proběhla při teplotě 20 °C a při rychlosti 600 mm/min.

Tab. 5 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 20 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-11-20	1062,600	920,269	0,149	0,129
64-12-20	1054,400	932,542	0,148	0,131
64-13-20	1106,800	987,170	0,156	0,139
64-14-20	1136,800	922,873	0,160	0,130
64-15-20	1130,800	936,019	0,159	0,132
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,154	0,132
Směrodatná odchylka SD [-]			0,005	0,003

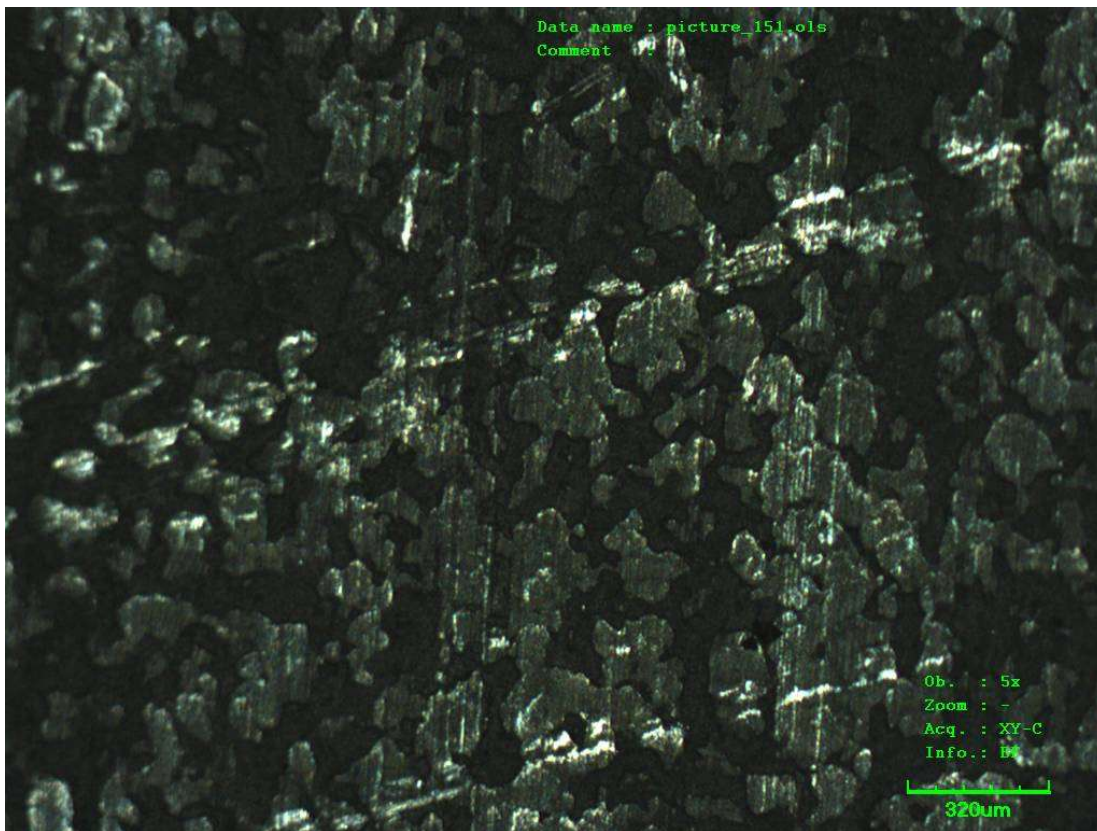


Obr. 25 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 20 °C

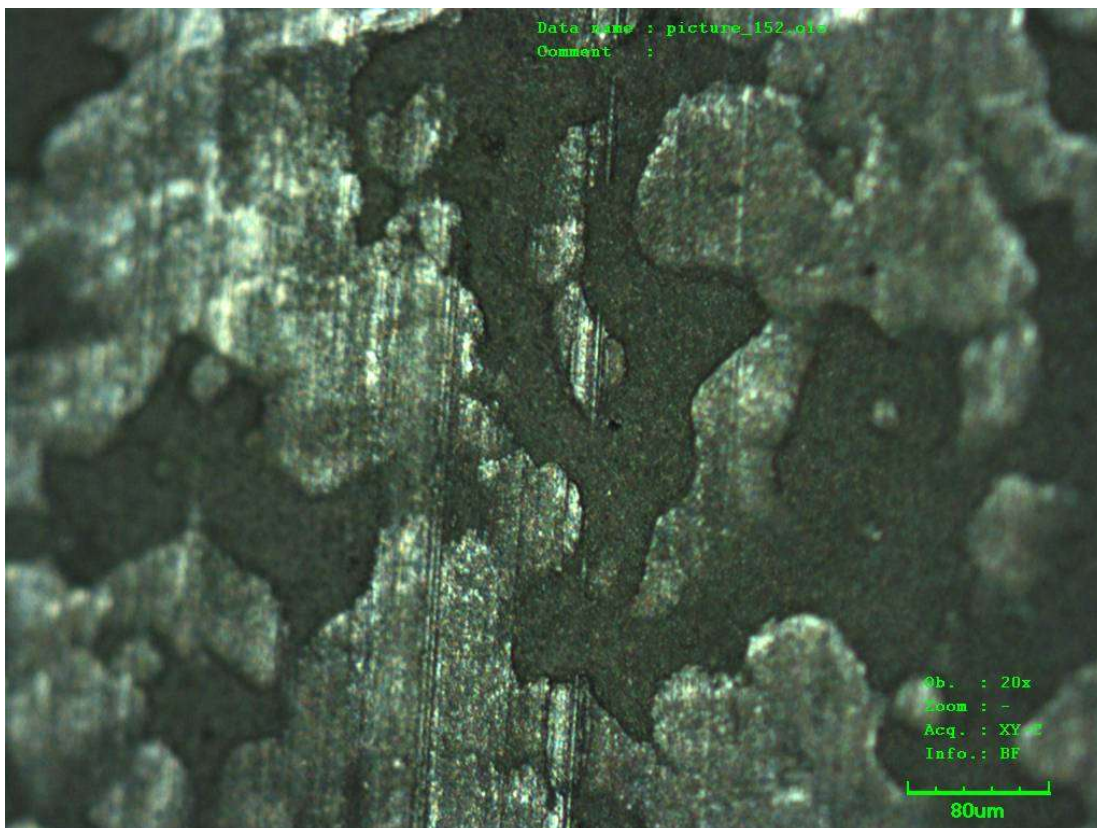


Obr. 26 – Vzorky tažené při 600 mm/min a 20 °C [Foto autor]

Druhé měření probíhalo při rychlosti 600 mm/min a teplotě 20 °C. Hodnoty sil jsou téměř identické. Hodnoty odchylek, které jsou v řádech desítek newtonů, a z toho plynou i velmi malé směrodatné odchylky třecích koeficientů, které se pohybují v tisícinách. Rozdíl jedné tisícin v dynamickém koeficientu tření při rychlosti tažení 20 mm/min a 600 mm/min je zanedbatelný v rámci statistické chyby.



Obr. 27 – Makroskopický snímek vzorku 64-15-20 zvětšený 120x [Foto autor]



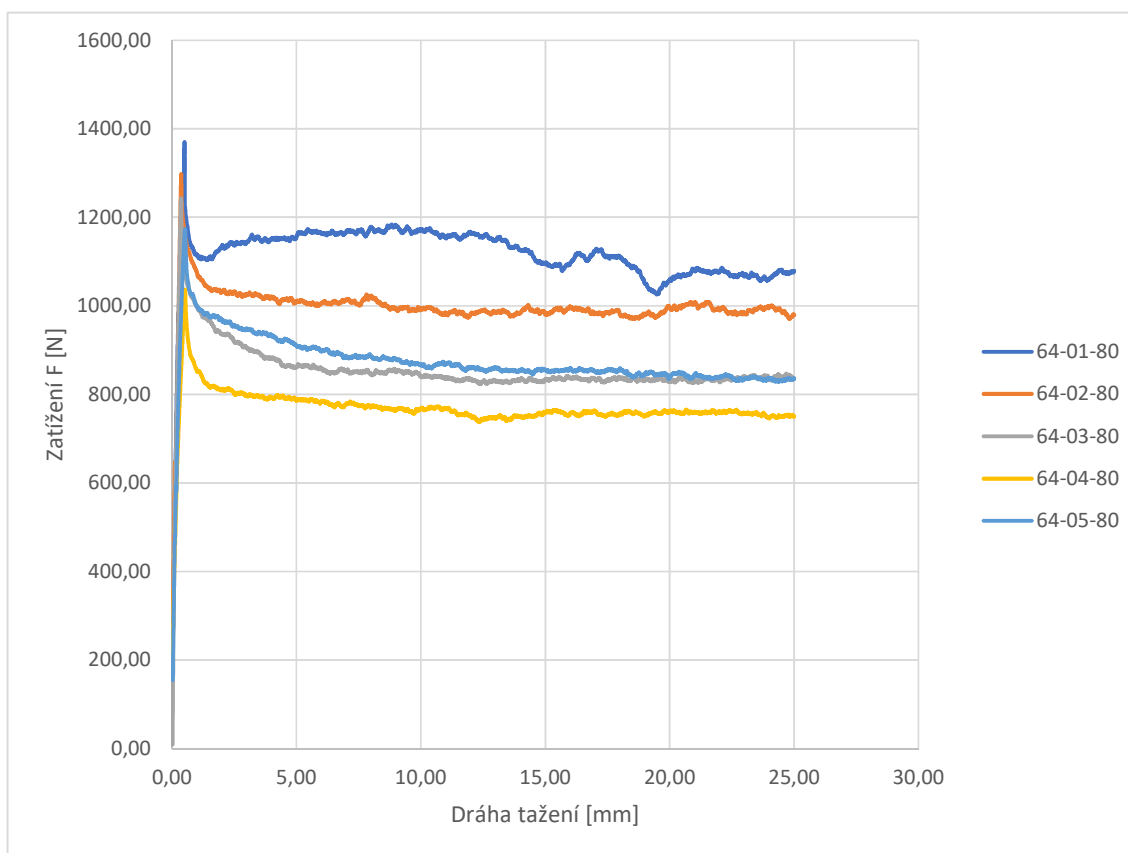
Obr. 28 – Makroskopický snímek vzorku 64-15-20 zvětšený 480x [Foto autor]

4.5.2 Data ze zkoušky při teplotě 80 °C

Zkouška proběhla při teplotě 80 °C a při rychlosti 20 mm/min.

Tab. 6 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 80 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-01-80	1368,700	1118,901	0,192	0,157
64-02-80	1297,800	992,127	0,182	0,139
64-03-80	1242,700	839,015	0,175	0,118
64-04-80	1036,400	761,000	0,146	0,107
64-05-80	1173,400	858,746	0,165	0,121
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,172	0,128
Směrodatná odchylka SD [-]			0,016	0,018

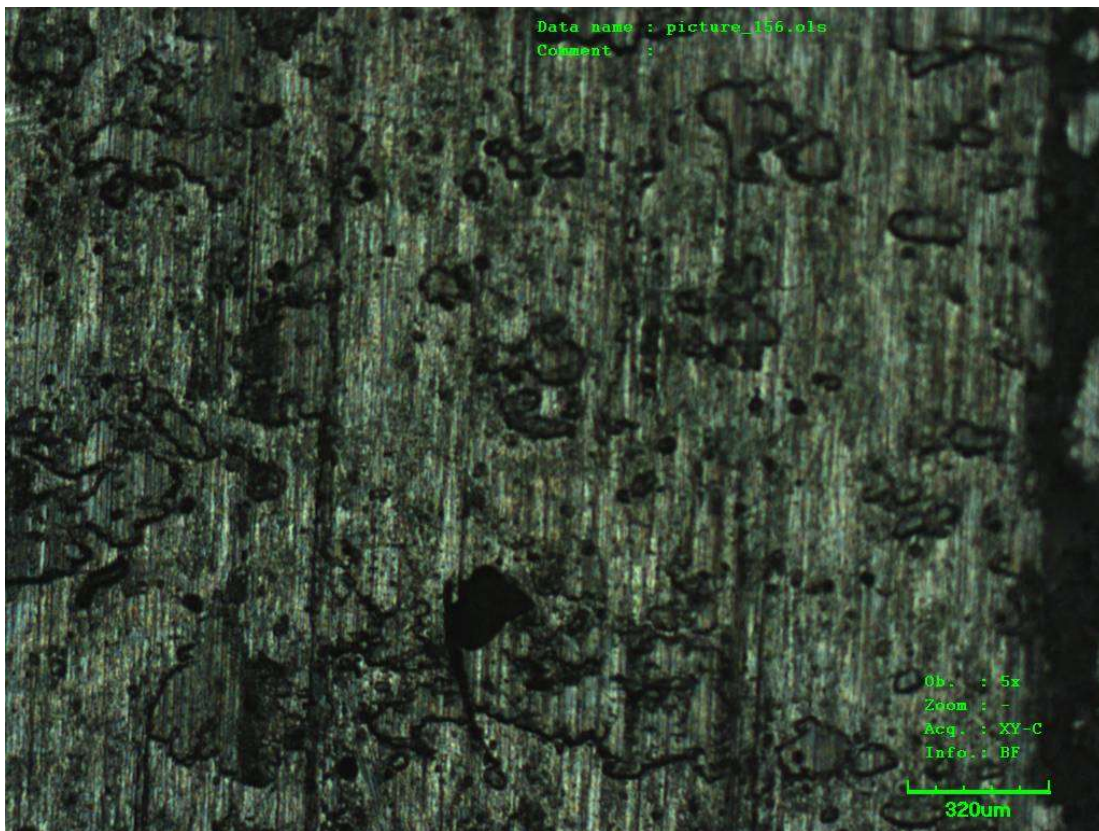


Obr. 29 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a 80 °C

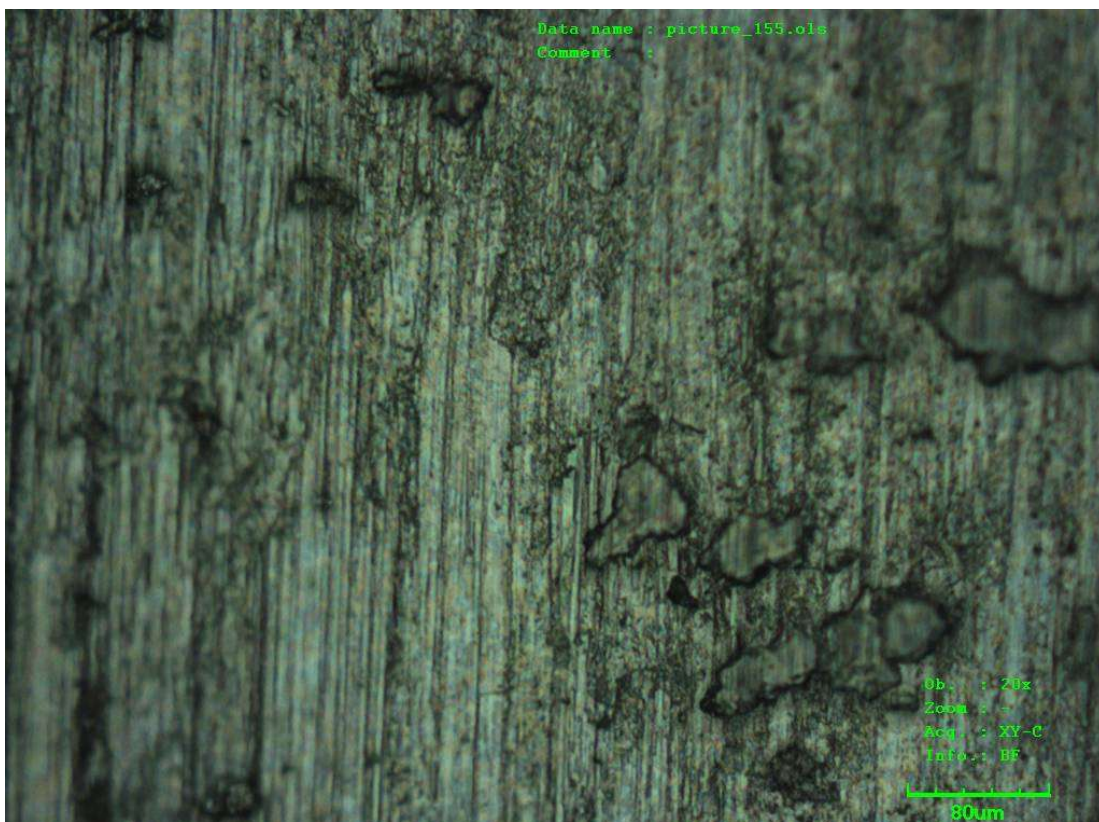


Obr. 30 – Vzorky tažené při 20 mm/min a 80 °C [Foto autor]

Třetí měření probíhalo při rychlosti 20 mm/min a při teplotě 80 °C. Místa, kde probíhala měření, jsou vidět na pravých stranách vzorků. Hodnoty sil jsou relativně konstantní, kdy vzorek 64-01-80 obsahuje menší fluktuace, což by mohlo dle obrázků vzorků být zapříčiněno zvýšeným zadíráním. Drážky na obrázku vzniklé vlivem zadírání jsou od pohledu větší než u zkoušky při teplotě 20 °C.



Obr. 32 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-80 zvětšený 120x [Foto autor]

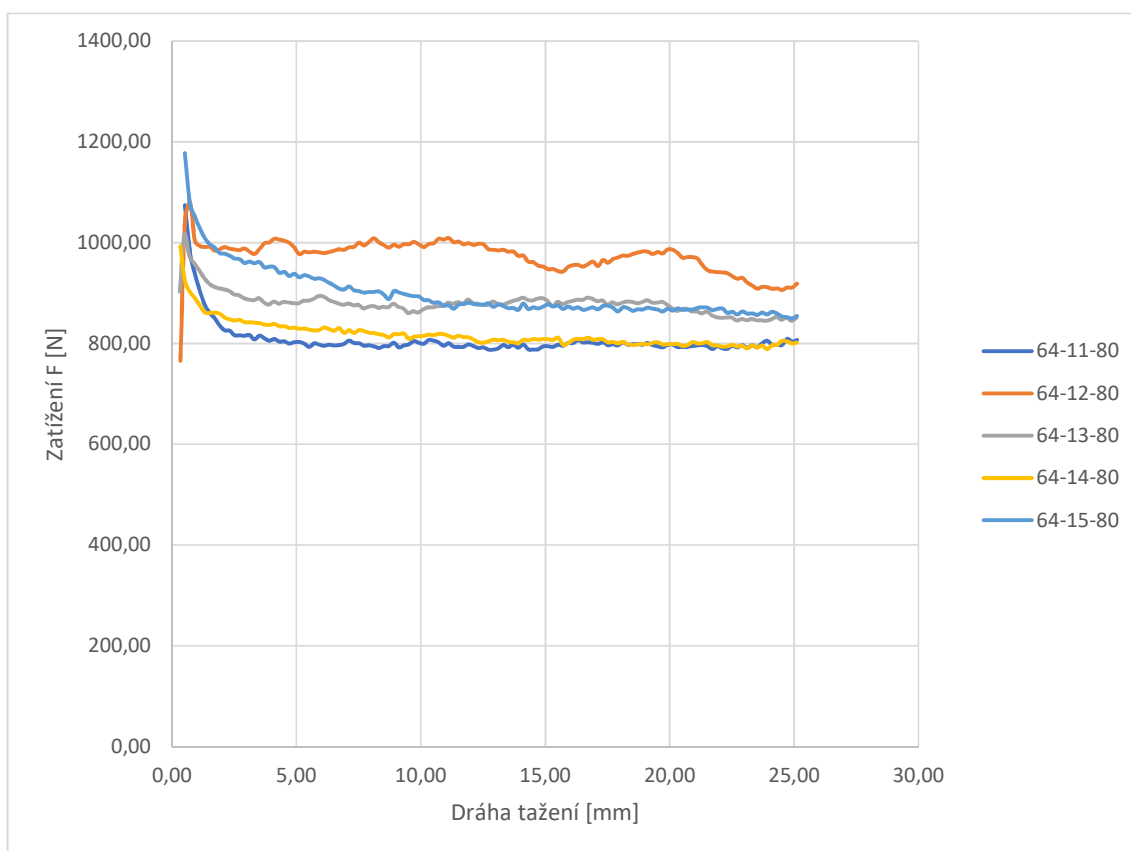


Obr. 31 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-80 zvětšený 480x [Foto autor]

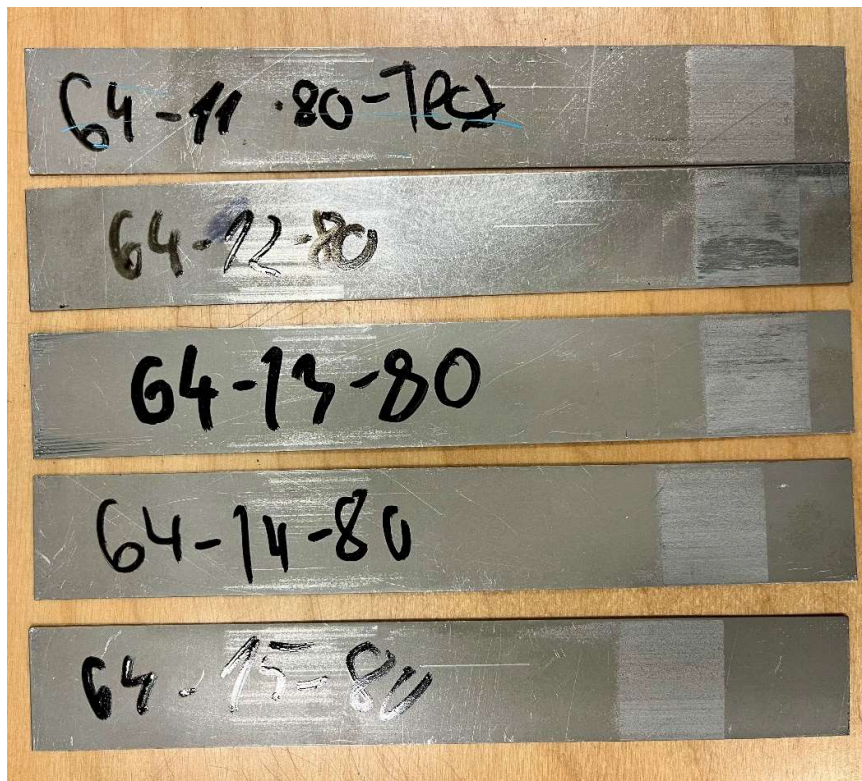
Zkouška proběhla při teplotě 80 °C a při rychlosti 600 mm/min.

Tab. 7 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 80 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-11-80	1074,000	796,590	0,151	0,112
64-12-80	1079,500	969,355	0,152	0,136
64-13-80	1015,100	873,090	0,143	0,123
64-14-80	992,700	807,973	0,140	0,114
64-15-80	1177,200	879,164	0,165	0,124
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,150	0,122
Směrodatná odchylka SD [-]			0,009	0,009

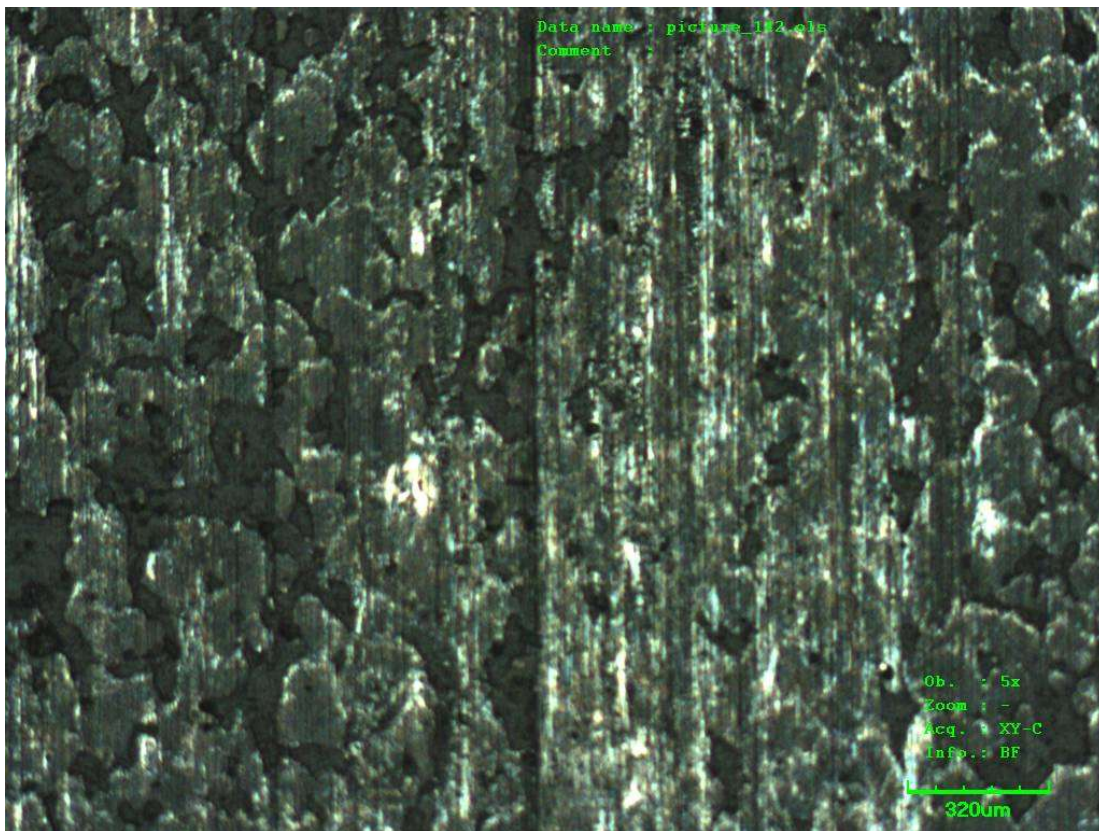


Obr. 33 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 80 °C

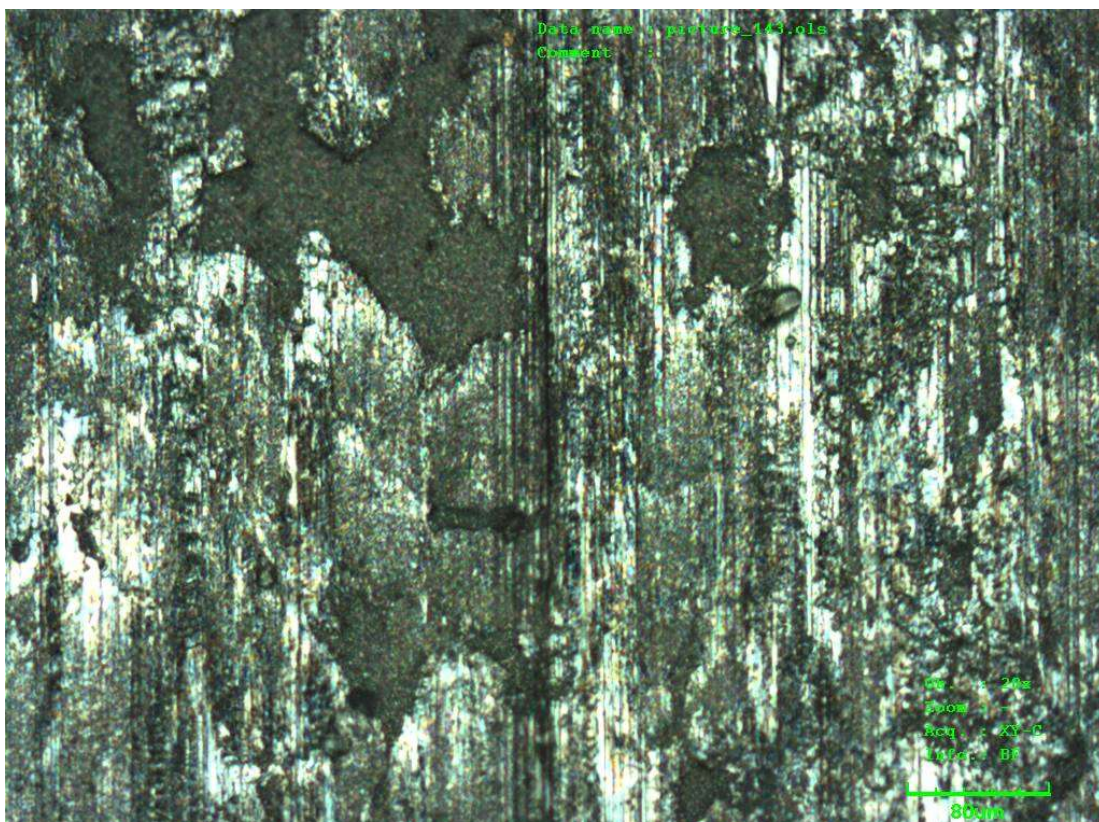


Obr. 34 – Vzorky tažené při 600 mm/min a 80 °C [Foto autor]

Čtvrté měření probíhalo při rychlosti 600 mm/min a teplotě 80 °C. Hodnoty sil jsou relativně konstantní, kdy vzorek 64-12-80 obsahuje zvýšené hodnoty, které by mohlo být zapříčiněno zvýšeným a nerovnoměrným zadíráním dle obrázku s příslušnými vzorky.



Obr. 35 – Makroskopický snímek vzorku 64-13-80 zvětšený 120x [Foto autor]



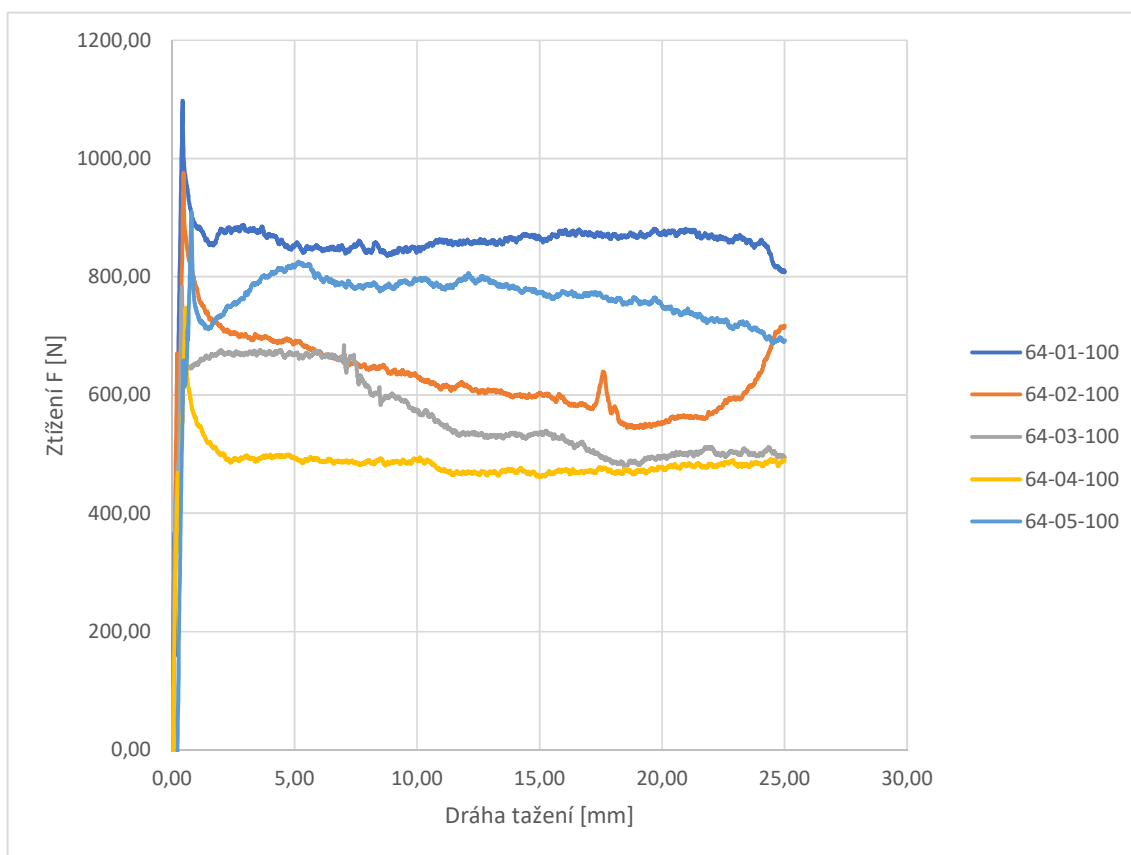
Obr. 36 – Makroskopický snímek vzorku 64-13-80 zvětšený 480x [Foto autor]

4.5.3 Data ze zkoušky při teplotě 100 °C

Zkouška proběhla při teplotě 100 °C a při rychlosti 20 mm/min.

Tab. 8 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 100 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-01-100	1098,100	859,615	0,154	0,121
64-02-100	975,800	610,441	0,137	0,086
64-03-100	783,200	544,675	0,110	0,077
64-04-100	747,700	478,356	0,105	0,067
64-05-100	909,800	766,829	0,128	0,108
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,127	0,092
Směrodatná odchylka SD [-]			0,018	0,020

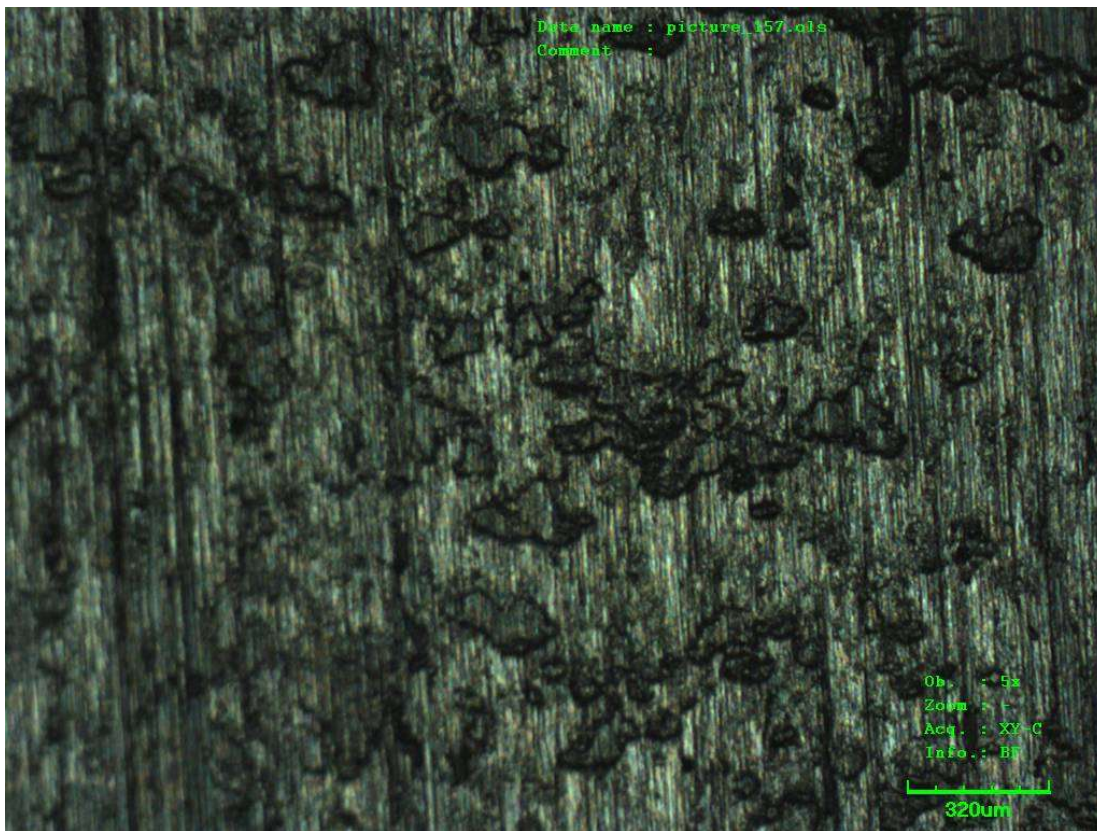


Obr. 37 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a teplotě 100 °C

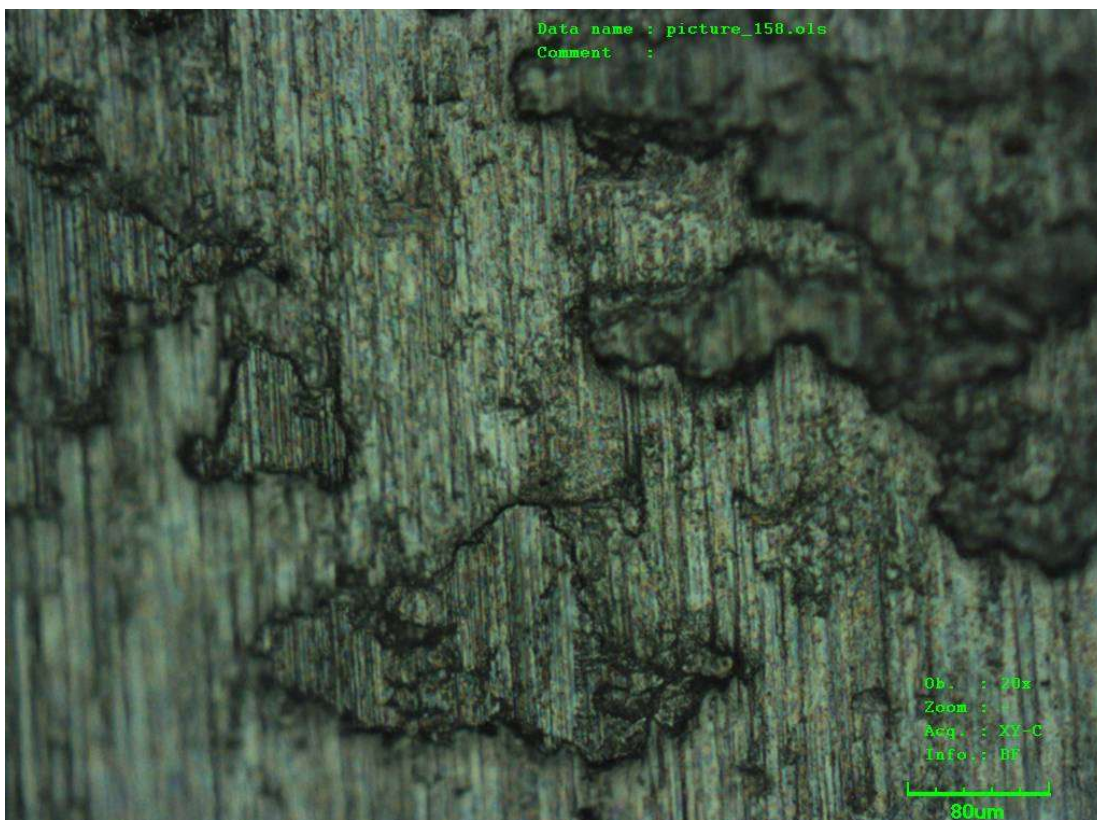


Obr. 38 – Vzorky tažené při 20 mm/min a 100 °C [Foto autor]

Páté měření probíhalo při rychlosti 20 mm/min a při teplotě 100 °C. Hodnoty jsou relativně konstantní a drží se v rozptylu 500 až 900 newtonů. Směrodatné odchylky obou koeficientů tření jsou velmi vysoké při porovnání s ostatními měřeními. Vzorky s vyššími hodnotami sil (například vzorky 64-01-100 a 64-05-100), které lze vidět v grafu vykazují značnou úroveň zadírání v porovnání s ostatními vzorky s nižšími hodnotami sil.



Obr. 39 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-100 zvětšený 120x [Foto autor]

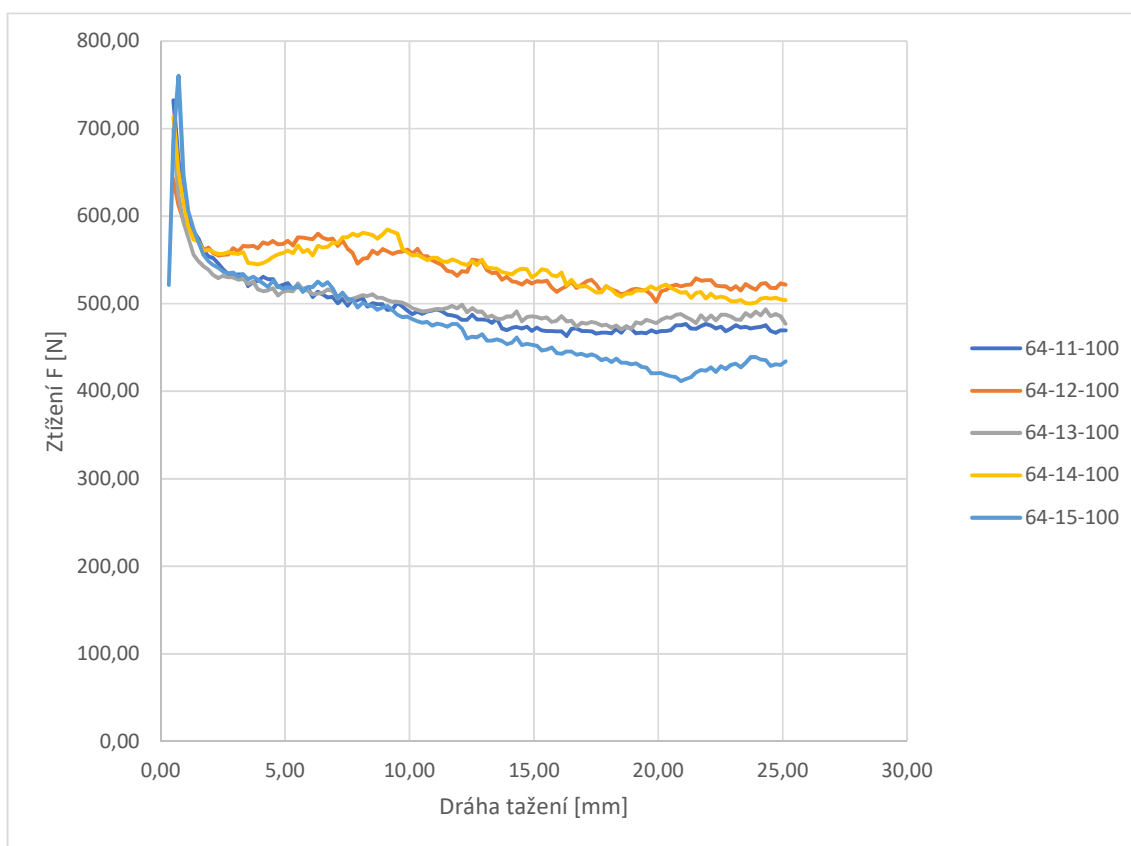


Obr. 40 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-100 zvětšený 480x [Foto autor]

Zkouška proběhla při teplotě 100 °C a při rychlosti 600 mm/min.

Tab. 9 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 100 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-11-100	732,400	481,886	0,103	0,068
64-12-100	641,800	535,521	0,090	0,075
64-13-100	699,100	490,490	0,098	0,069
64-14-100	713,300	535,780	0,100	0,075
64-15-100	760,300	458,730	0,107	0,064
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,100	0,070
Směrodatná odchylka SD [-]			0,006	0,004

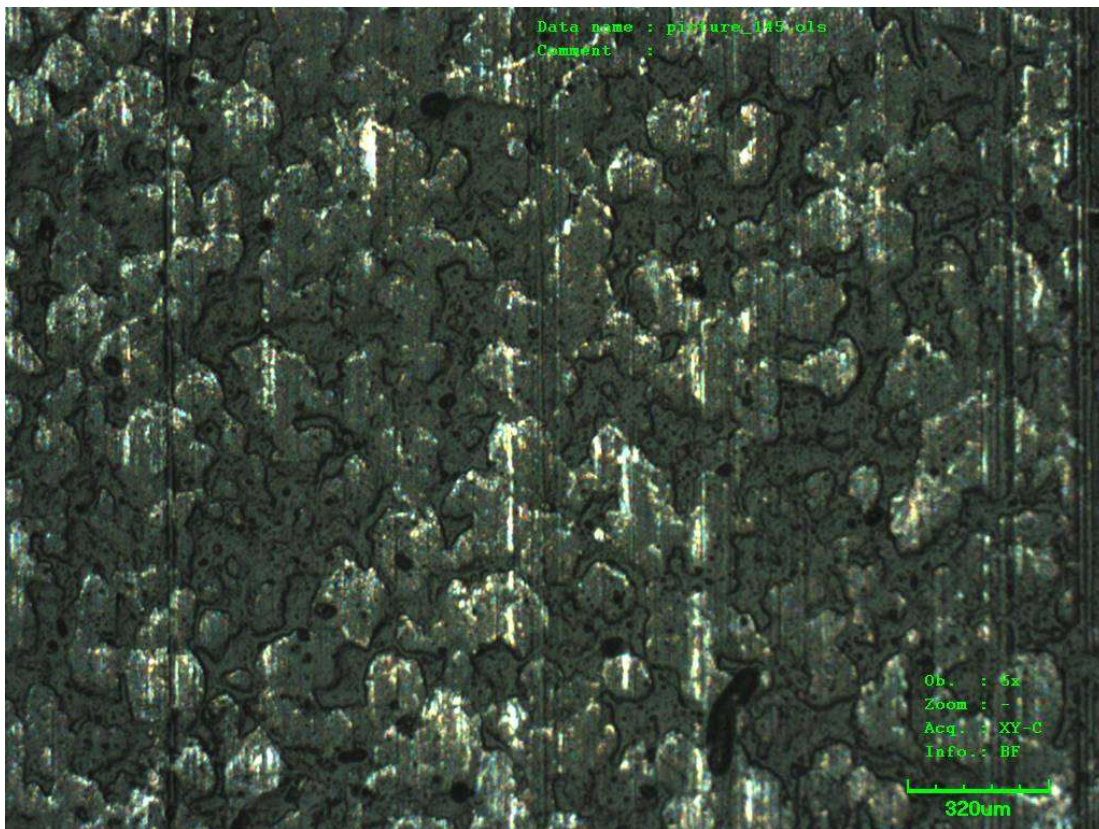


Obr. 41 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 100 °C

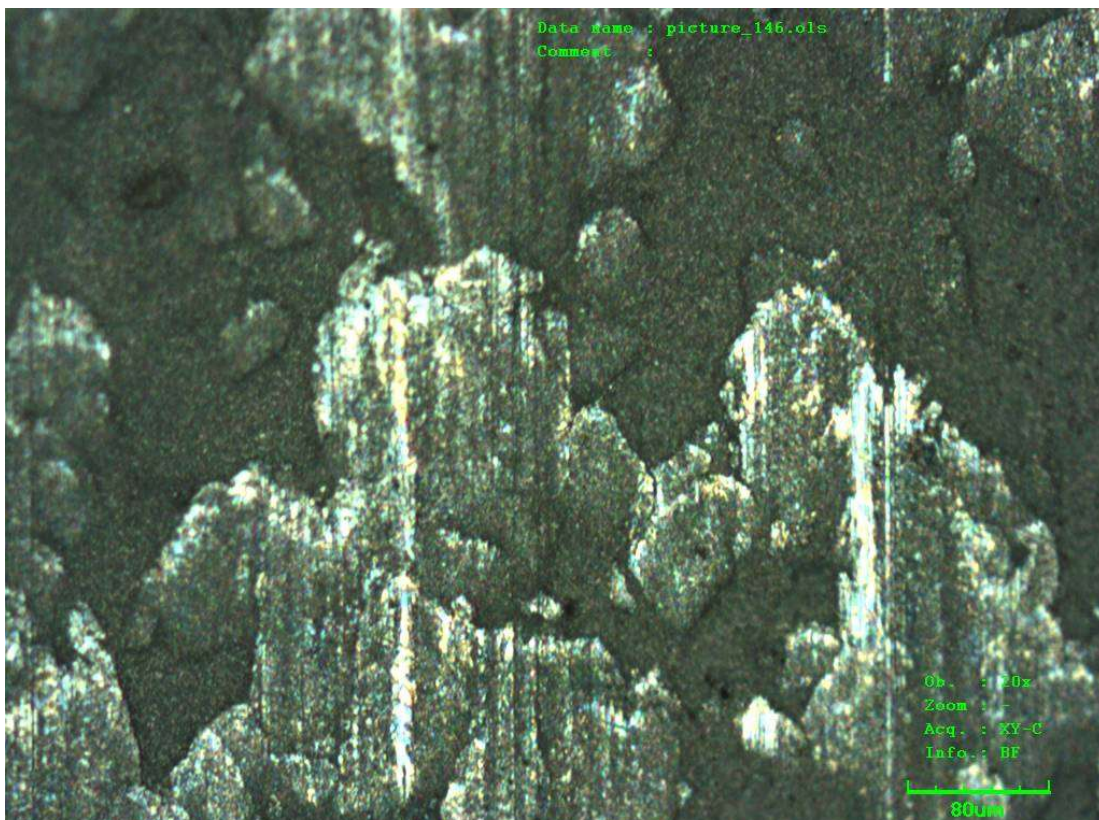


Obr. 42 – Vzorok tažené při 600 mm/min a 100 °C [Foto autor]

Šesté měření probíhalo při rychlosti 600 mm/min a teplotě 100 °C. Bylo dosaženo neoptimálnějších výsledků. Z grafu lze vyvodit, že se jedná o poměrně stabilní průběhy sil, přičemž dynamický koeficient tření je nejnižší ze všech sad měření. Statický koeficient se směrodatnou odchylkou jsou také relativně nízké, ale ten je o něco málo spolehlivější než dynamický koeficient.



Obr. 44 – Makroskopický snímek vzorku 64-11-100 zvětšený 120x [Foto autor]



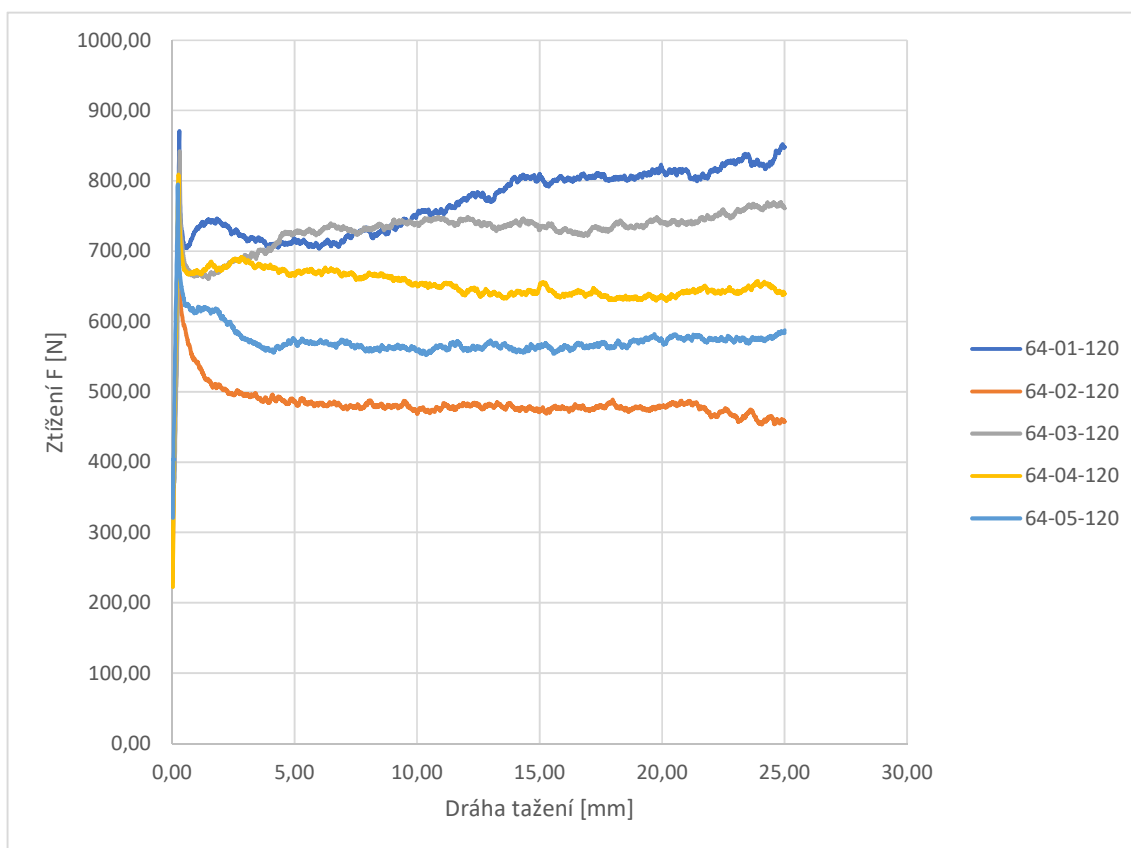
Obr. 43 – Makroskopický snímek vzorku 64-11-100 zvětšený 480x [Foto autor]

4.5.4 Data ze zkoušky při teplotě 120 °C

Zkouška proběhla při teplotě 120 °C a při rychlosti 20 mm/min.

Tab. 10 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 120 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-01-120	871,100	781,601	0,122	0,110
64-02-120	784,300	476,684	0,110	0,067
64-03-120	842,100	739,835	0,118	0,104
64-04-120	808,800	647,958	0,114	0,091
64-05-120	794,600	567,883	0,112	0,080
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,115	0,090
Směrodatná odchylka SD [-]			0,005	0,016

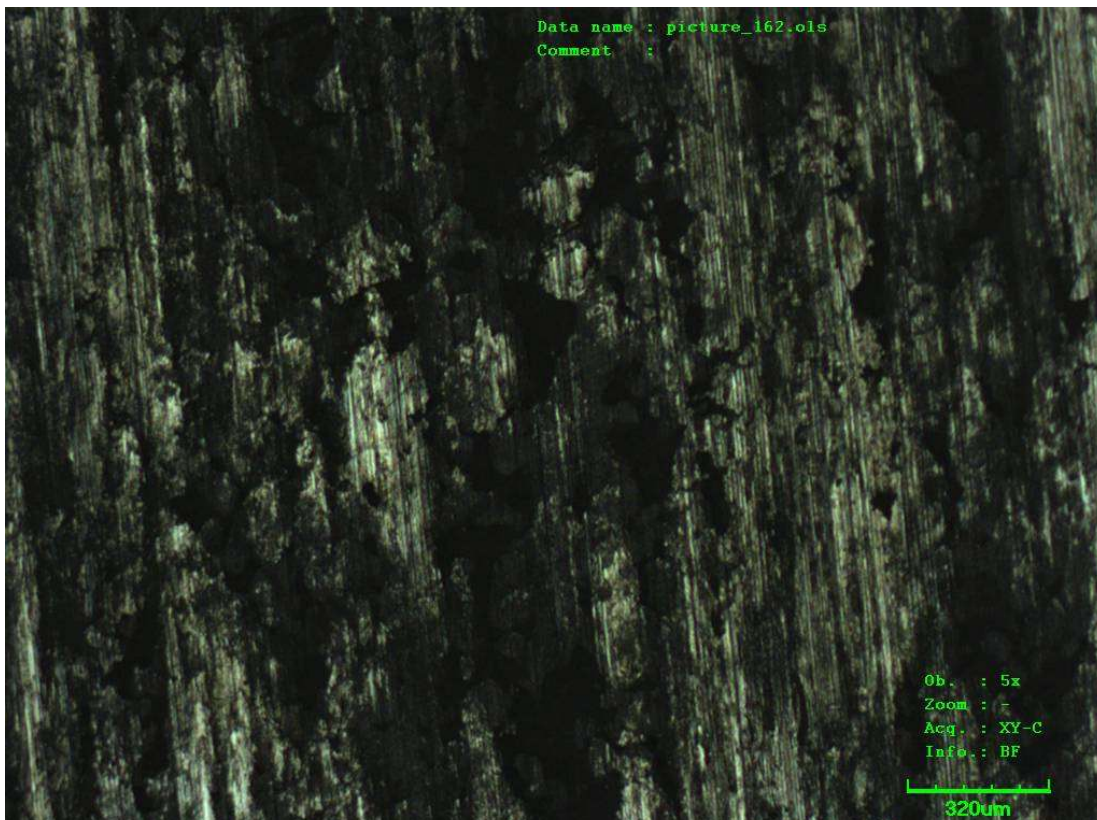


Obr. 45 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a teplotě 120 °C

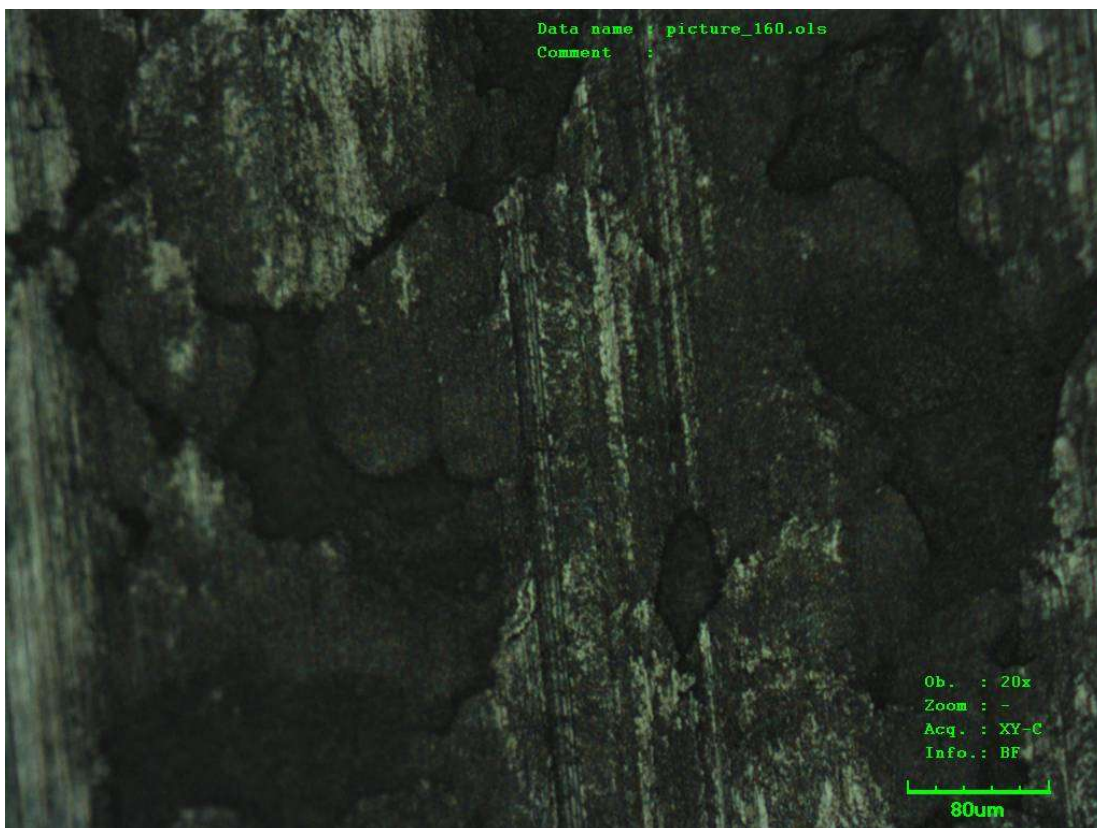


Obr. 46 – Vzorok tažené při 20 mm/min a 120 °C [Foto autor]

Sedmé měření probíhalo při rychlosti tažení 20 mm/min a teplotě 120 °C. Lze pozorovat již větší míře rozptyl absolutních hodnot v grafu, avšak rozptyl statického koeficientu zůstával velmi nízký. U některých vzorků dochází ke zvýšení dynamického koeficientu tření v průběhu zkoušky, to může mít za následek degradace mazacího oleje. Dle obrázku některých vzorků se měnila i míra zadírání.



Obr. 47 – Makroskopický snímek vzorku 64-04-120 zvětšený 120x [Foto autor]

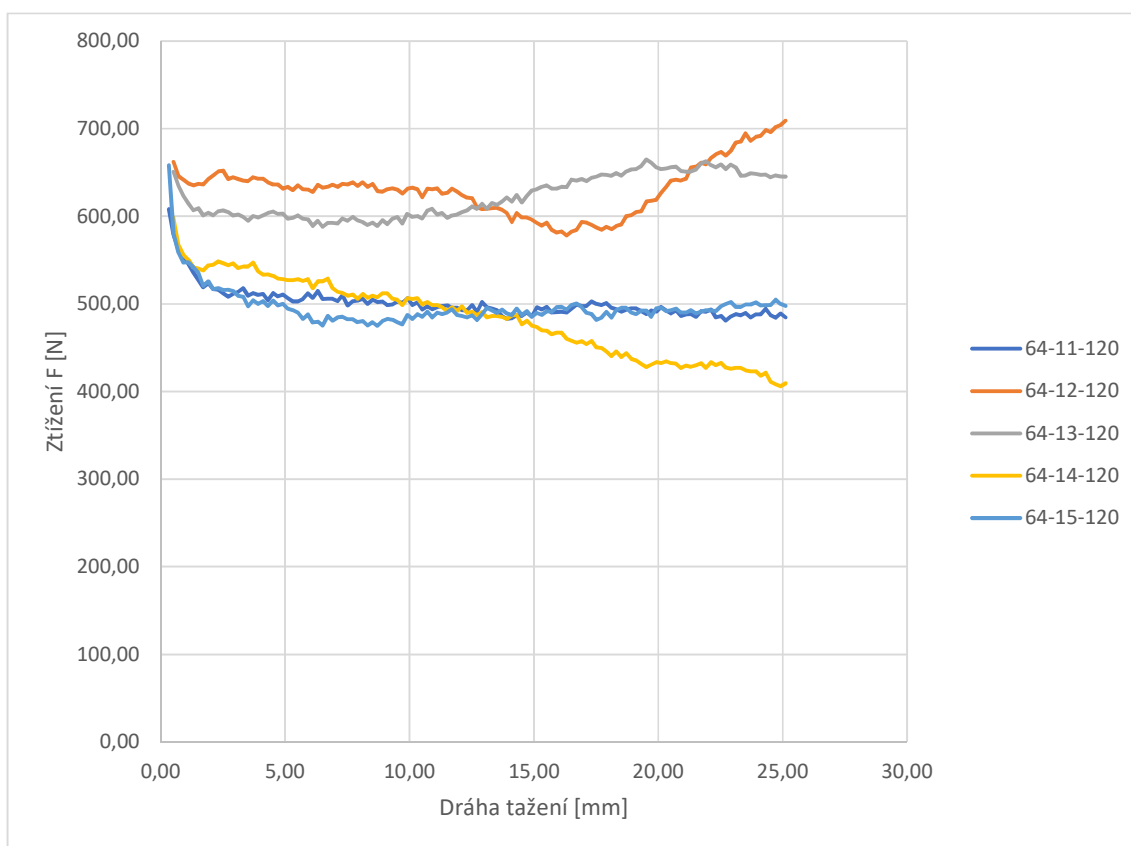


Obr. 48 – Makroskopický snímek vzorku 64-04-120 zvětšený 480x [Foto autor]

Zkouška proběhla při teplotě 120 °C a při rychlosti 600 mm/min.

Tab. 11 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 120 °C

Označení vzorků	Maximální síla Ft [N]	F na intervalu s = (5;25)	Koeficient tření μ [-]	
			Statický [-]	Dynamický [-]
64-11-120	608,000	495,095	0,085	0,070
64-12-120	709,000	628,856	0,100	0,088
64-13-120	664,800	625,669	0,093	0,088
64-14-120	598,700	470,036	0,084	0,066
64-15-120	658,200	489,710	0,093	0,069
Střední hodnota \bar{x} [-]			0,091	0,076
Směrodatná odchylka SD [-]			0,006	0,010

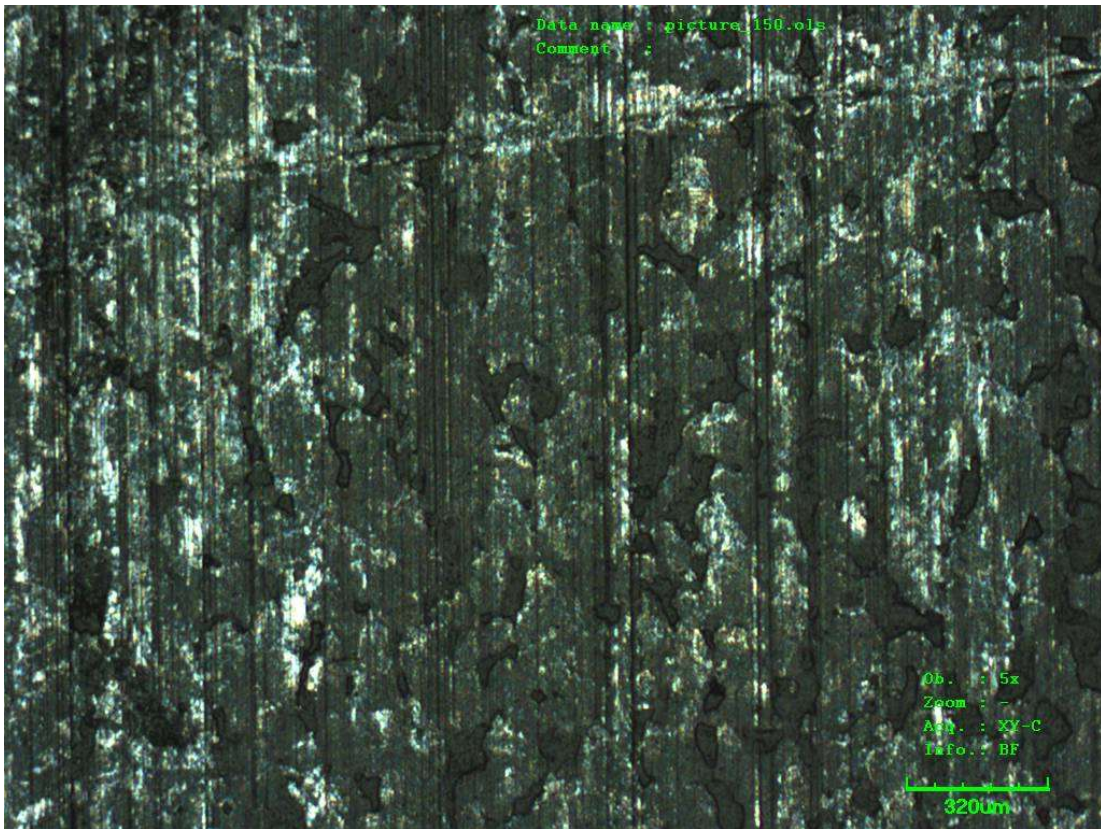


Obr. 49 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 120 °C

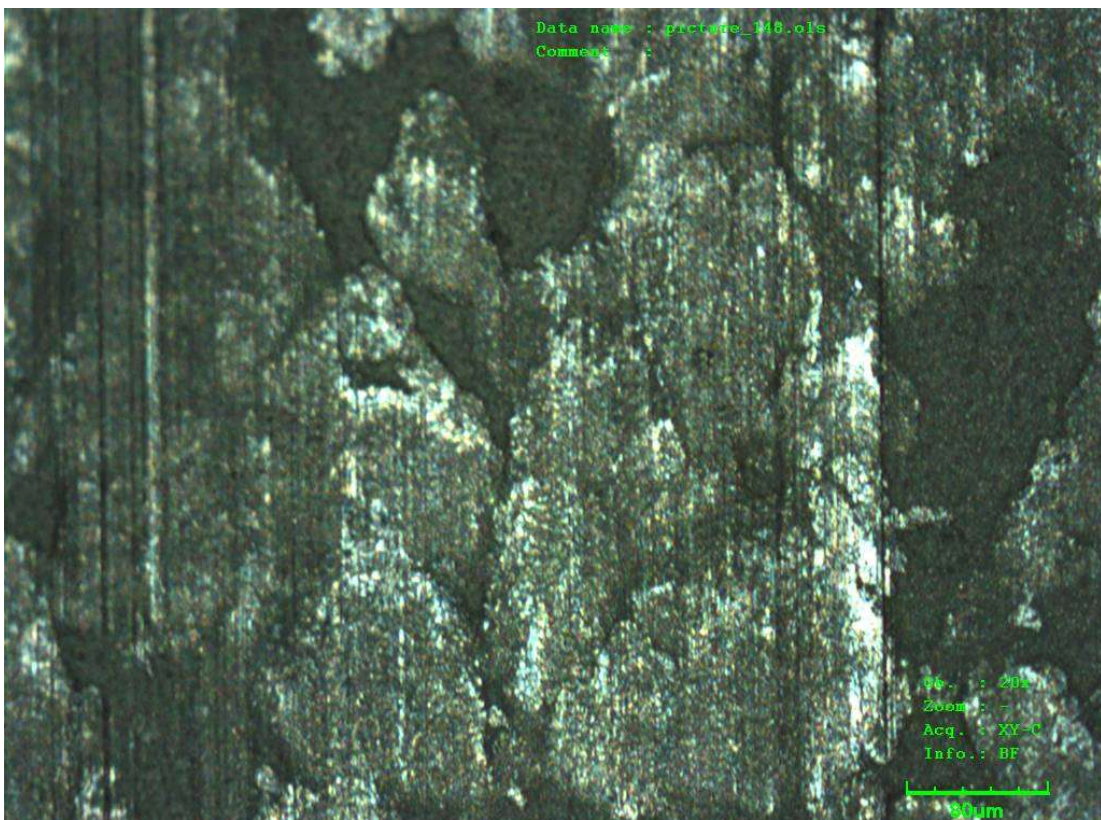


Obr. 50 – Vzorčky tažené při 600 mm/min a 120 °C [Foto autor]

Osmé měření probíhalo při rychlosti 600 mm/min a teplotě 120 °C. Na grafu lze pozorovat, že oproti nižším teplotám (20, 80 a 100 °C) se objevuje diskontinuita naměřených hodnot. Fluktuace je pravděpodobně zapříčiněna degradací jednotlivých složek v mazivu, kdy byly i při měření pozorovány výpary, které stoupaly přímo z oblasti, kde bylo nanášeno mazivo.



Obr. 52 – Makroskopický snímek vzorku 64-12-120 zvětšený 120x [Foto autor]



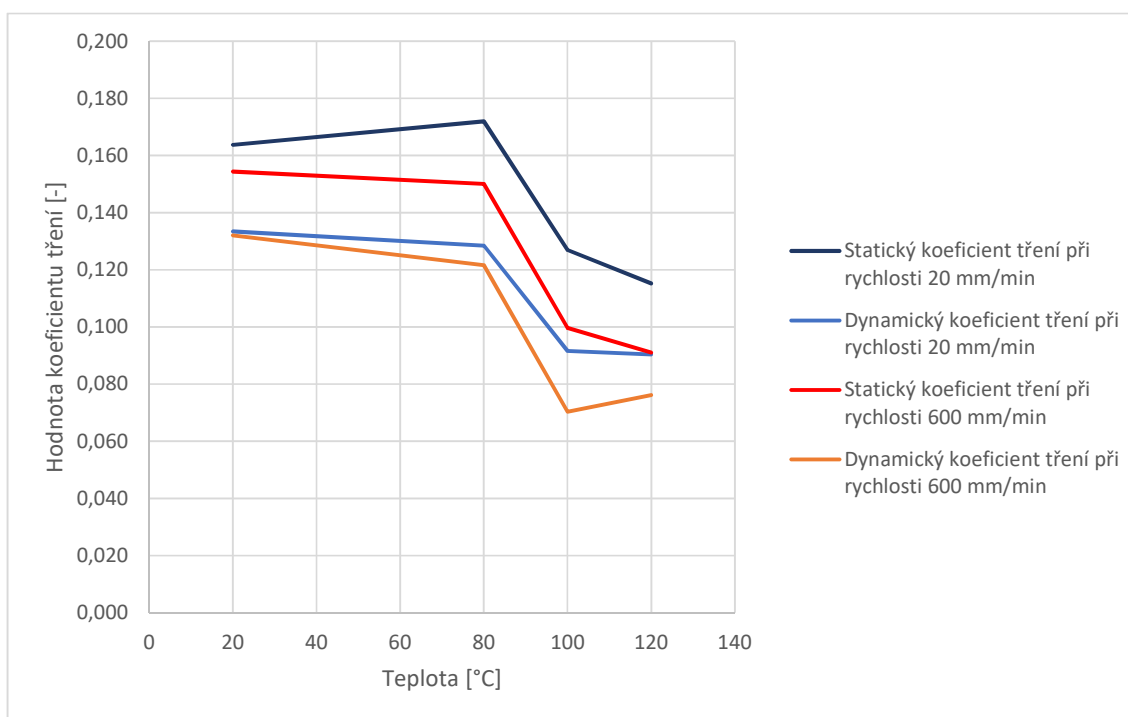
Obr. 51 – Makroskopický snímek vzorku 64-12-120 zvětšený 480x [Foto autor]

4.6 Vyhodnocení

Vypočtené koeficienty tření z naměřených hodnot byly zaneseny do jedné tabulky a grafu pro lepší přehlednost a k dalšímu porovnání.

Tab. 12 – Tabulka středních hodnot koeficientů tření

Teplota tažení	Rychlost 20 mm/min		Rychlost 600 mm/min	
	Statický k. t.	Dynamický k. t.	Statický k. t.	Dynamický k. t.
20 °C	0,164	0,133	0,154	0,132
80 °C	0,172	0,128	0,150	0,122
100 °C	0,127	0,092	0,100	0,070
120 °C	0,115	0,090	0,091	0,076



Obr. 53 – Graf porovnání dynamických a statických koeficientů oproti teplotě tažení

Z výsledků experimentů lze konstatovat, že se stoupající teplotou klesá statický i dynamický koeficient tření, bez ohledu na to zda se jedná o rychlost 20 mm/min nebo 600 mm/min. Obecně lze také říct, že dynamický koeficient je o několik setin menší než statický, přičemž tento výsledek, dle teoretické části této bakalářské práce, se očekával.

Tab. 13 – Tabulka směrodatných odchylek koeficientů tření

Teplota tažení	Rychlost 20 mm/min		Rychlost 600 mm/min	
	Statická odchylka	Dynamická odchylka	Statická odchylka	Dynamická odchylka
20 °C	0,015	0,013	0,005	0,003
80 °C	0,016	0,018	0,009	0,009
100 °C	0,018	0,020	0,006	0,004
120 °C	0,005	0,016	0,006	0,010

Směrodatné odchylky dle tabulky mají spíše tendenci s rostoucí teplotou zvětšovat. Směrodatné odchylky z pohledu porovnání statického a dynamického koeficientu různě fluktuují, avšak z pohledu porovnání rychlostí 20 mm/min a 600 mm/min lze pozorovat, že vyšší rychlost 600 mm/min má od jednotek setin až po jednotky tisícín menší odchylky.

5. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce měla za cíl objasnit a dále ověřit vliv teplot na tribologické vlastnosti karosářských plechů se žárově naneseným zinkovým povlakem v lisovacím procesu. V teoretické části blíže objasnily tři tribologické pilíře a to tření, opotřebení a mazání. Pro úplnost byly doplněny o technické poznatky lisovacích procesů a jejich zkoušení.

Pro experimentální určení koeficientu tření byl použit test tažení pásu plechu skrze ploché čelisti na univerzálním trhacím stroji LabTest 5.100SP1. Aby bylo možné tuto zkoušku uskutečnit, bylo potřeba jednu čelist stroje vyměnit za jiný upínací přípravek, kdy čelisti byly vyrobeny z materiálu 19 312 a jejich kontaktní plocha byla 30 x 40 mm. Zkouška probíhala za teplot 20, 80, 100 a 120 °C a pro dvě rychlosti a to 20 mm/min a 600 mm/min. Dráha tažení byla pro všechny vzorky stanovena na 25 mm. Pro každou teplotu a rychlost tažení se zkoušela sada o 5 vzorkách (celkově 40 vzorků za celý experiment). Zkoušený vzorky měly rozměr 0,7 x 30 x 200 mm a byly vyrobeny z materiálu určeného pro tažení DC06+ ZE50/50 BPO. Pro zkoušku bylo použito mazivo, které se svými vlastnostmi blíží mazivům používaných při lisovacích procesů karoserií.

Pro porovnání výsledů měření bylo použito několik výstupů ze zkoušek v kombinaci s teoretickými znalostmi. Nejdůležitějším byl silový záznam měření z univerzálního trhacího stroje, který určil, jak se měnila hodnota sil tažení v čase. Z tohoto průběhu sil se určili hodnoty statického a dynamického koeficientu tření pro všechny sady vzorků. Střední hodnoty koeficientů byly zaneseny do tabulky pro porovnání, jak se mění tribologické vlastnosti v závislosti na teplotě. Vizuální kontrola odhalila, že na povrchu měřených vzorků se objevilo zadíráání, proto se přistoupilo i k makroskopické zkoušce na vybraných vzorcích.

Střední hodnoty třecích koeficientů s rostoucí teplotou mají tendenci klesat. Lze z tabulky s výsledky vyvodit, že vyšší rychlost tažení má pozitivní vliv jak na statický součinitel tření tak i na dynamický, tzn. že koeficienty tření jsou nižší při rychlosti 600 mm/min než při 20 mm/min. Z jednotlivých měření lze pozorovat také to, že se stoupající teplotou směrodatné odchylky koeficientu tření mají tendenci stoupat, ačkoliv absolutní hodnoty třecích koeficientů spíše klesají.

Byla provedena makroskopická zkouška pro jeden vzorek z každé série. Pro pořízení zvětšených snímků byl použit mikroskop LEXT OLS 3000. Zvětšení snímků vybraných vzorků bylo 120x a 480x. Při porovnávání výsledků měření s makroskopickými snímky, byla zjištěna závislost mezi zadíráním a velikostí třecích sil.

Tato bakalářská práce se zabývala pouze teplotami do 120 °C, ale bylo by do budoucna vhodné provést měření i ve vyšších teplotách. Další výzkum by se také mohl zabývat různou kombinací materiálů tažených polotovarů, různých povrchových úprav tažených plechů a různých materiálů upínacích čelistí.

Bibliografie

- [1] AUTOR, Nenalezený. Carbon Tribology. In: MORGANITE LUXEMBOURG S.A. *Morgan Advanced Materials* [online]. 2022, , s. 10 [cit. 2023-10-12]. Dostupné z:
https://www.morganadvancedmaterials.com/media/2690/carbon_tribology.pdf
- [2] MAKHKAMOV, Anvar. *Tribology in Sheet Metal Forming*. Porto, Portugalsko, 2017. Dostupné také z: <https://core.ac.uk/download/pdf/143410245.pdf>. Diplomová práce. Faculdade De Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica. Vedoucí práce Abel Dias dos Santos.
- [3] WAGH, Vivek, Nikhil SABOO a Ankit GUPTA. Tribology as emerging science for warm mix technology: A review: A review. *Construction and Building Materials*. 2022, **359**, 129445. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129445>
- [4] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-883-6.
- [5] FIGUEIREDO, L., A. RAMALHO, M.C. OLIVEIRA a L.F. MENEZES. Experimental study of friction in sheet metal forming. *Wear*. Portugalsko: Mechanical Engineering Department, University of Coimbra, 2011, **271**(9), 1651-1657. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.020>
- [6] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Smykové tření. In: *Nenalezený vydavatel* [online]. 2011 [cit. 2023-10-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/36-smykove-treni>
- [7] WANG, Q. a Yip-Wah CHUNG, ed. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA NEW YORK 2013. *Encyclopedia of Tribology* [online]. 2012. New York, NY: Springer, 2013, 4139 s. [cit. 2024-01-03]. eBook: první. ISBN 978-0-387-92897-5. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5>

- [8] GEORGIA STATE UNIVERSITY, DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY. *HyperPhysics* [online]. Atlanta, Georgia, 2016 [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [9] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. První. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 216 s. ISBN 80-708-2668-1.
- [1 ANDERS, Gåård. *Wear in sheet metal forming* [PDF]. První. Karlstad, Švédsko: 0] Karlstad University, 2008, 34 s. ISBN 978-91-7063-168-9. ISSN 1403-8099. Dostupné také z: <https://kau.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A5516&dswid=3627>. Licenciát. Karlstad University.
- [1 KOPELIOVICH, Dmitri. Mechanisms of wear. In: *SubsTech (Substances & 1] Technologies)* [online]. Smooth Sliding. Izrael, 2023, 2023-06-19 [cit. 2023-10-26]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear#abrasive_wear
- [1 SHISODE, Meghshyam, Javad HAZRATI, Tanmaya MISHRA, Matthijn DE ROOIJ, 2] Carel HORN, Jeroen VAN BEECK a Ton VAN DEN BOOGAARD. Modeling boundary friction of coated sheets in sheet metal forming. *Tribology International*. 2021, 153, 106554. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106554>
- [1 AUTOR, Nenalezený. Údržba a opravy stájové techniky: Únavové opotřebení. 3] In: MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ. *Nenalezený vydavatel* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3599&typ=html
- [1 MACEK, Karel, Petr ZUNA a KOLEKTIV. *Nauka o materiálu*. 1999. Praha: České 4] vysoké učení technické, 1996, 209 s. ISBN 80-010-1507-6.
- [1 BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997, 212 s. ISBN 5] 80-010-1621-8.

- [1 ZAJÍČEK, Václav a Michal ZELENÁK. *HOSPODAŘENÍ S MATERIÁLEM VYBRANÝCH*
6] *MAJETKOVÝCH USKUPENÍ: Maziva*. První. Brno: Vydavatelská skupina
Univerzity obrany, 2012, 99 s. ISBN 978–80–7231-891-9.
- [1 KOPELIOVICH, Dmitri. Lubrication regimes. In: *SubsTech (Substances &*
7] *Technologies)* [online]. Izrael, 2023 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z:
https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=lubrication__regimes
- [1 PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAPOTIL, Milan NĚMEC a Jiljí NOVOTNÝ. *Technologie*
8] *slévání, tváření a svařování*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1982,
343 s.
- [1 ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 13. uprav. vyd. Praha: SNTL
9] - Státní nakladatelství technické literatury, 1977. Příručka rozdělena do dvou
samostatných svazků.
- [2 BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK. *Technologie tváření* [online]. 2014.
0] Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014, 91 s. [cit. 2023-10-12]. ISBN 978-
80-261-0449-0.
- [2 BEROUN, Stanislav, Helena VACKOVÁ, ed. TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ KOVŮ. In:
1] *DocPlayer* [online]. 2016, s. 10 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z:
<https://docplayer.cz/18802374-Technologie-tvareni-kovu.html>
- [2 LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů: Rozdělení tvářecích procesů podle
2] teploty. In: TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Skripta* [online skripta]. [cit.
2023-10-15]. Dostupné z:
https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta__tkp/sekce/01.htm
- [2 ALTAN, Taylan a Erman TEKKAYA. *Sheet Metal Forming Processes and*
3] *Applications*. První. ASM International, 2012, 380 s. ISBN 978-1-61503-844-2.
- [2 BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. První.
4] New York: Industrial Press, 2004, 215 s. ISBN 0-8311-3182-9.
- [2 Sheet Metal Forming. In: COOPER, D. *Massachusetts Institute of Technology*
5] [online]. Cambridge, USA, 2015 [cit. 2023-10-27]. Dostupné z:
https://web.mit.edu/2.810/www/files/lectures/2015_lectures/lec6-sheet-metal-forming-2015.pdf

- [2] KALPAKJIAN, S. Recent Progress in Metal Forming Tribology. *CIRP Annals*.
6] 1985, **34**(2), 585-592. ISSN 0007-8506. Dostupné z:
doi:[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60191-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60191-7)
- [2] KOTOUČ, Jiří. *Teorie a metodika tváření: návody ke cvičení*. 1. vyd. Praha:
7] České vysoké učení technické, 1992, 84 s.
- [2] SCHELL, L. a P. GROCHE. *In Search of the Perfect Sheet Metal Forming*
8] *Tribometer*. In: . Cham: Springer International Publishing, 2021, s. 81-96. ISBN
978-3-030-75381-8.
- [2] AUTOR, Nenalezený. Výroba lisovacího nářadí: Pro výrobu automobilů. In:
9] *Nářadovna ŠKODA AUTO* [online]. [cit. 2023-10-26]. Dostupné z:
<https://skoda-naradovna.cz/cs/lisovaci-naradi/>
- [3] GÜRÜN, Hakan a İbrahim KARAAĞAÇ. The Experimental Investigation of
0] Effects of Multiple Parameters on the Formability of the DC01 Sheet Metal. In:
Strojníški vestnik - Journal of Mechanical Engineering [online]. Ankara,
Turecko: Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing
Engineering, 2015, , s. 61 [cit. 2023-10-27]. ISSN 0039-2480. Dostupné z:
doi:10.5545/sv-jme.2015.2562
- [3] FLACHERZEUGNISSE AUS STAHL ZUR KALTUMFORMUNG / SHEET STEEL FOR
1] COLD FORMING. *VDA 239-100*. 05/2016. Gruppenlizenz (group license).
Dostupné také z: <https://webshop.vda.de/VDA/en/vda-239-100-05-2016>

Seznam tabulek

Tab. 1 – Chemické složení oceli DC05 [31].....	28
Tab. 2 – Mechanické vlastnosti oceli DC05 [31].....	28
Tab. 3 – Vybrané parametry univerzálního trhačího stroje LabTest 5.100SP1.....	29
Tab. 4 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 20 °C...	33
Tab. 5 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 20 °C.	36
Tab. 6 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 80 °C...	39
Tab. 7 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 80 °C.	42
Tab. 8 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 100 °C.	45
Tab. 9 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 100 °C	48
Tab. 10 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 20 mm/min a teplotě 120 °C	51
Tab. 11 – Tabulka výsledných hodnot při rychlosti 600 mm/min a teplotě 120 °C	54
Tab. 12 – Tabulka středních hodnot koeficientů tření.....	57
Tab. 13 – Tabulka směrodatných odchylek koeficientů tření	58

Seznam obrázků

Obr. 1 – Tribologie jako interdisciplinární věda, upraveno [3]	13
Obr. 2 – Tribologický systém podle DIN 51 320, upraveno [1].....	13
Obr. 3 – Působení třecích a jiných sil na těleso v rovině [6]	14
Obr. 4 – Teoretický model tření zanesen do grafu, upraveno [8]	15
Obr. 5 – Abraze [4]	17
Obr. 6 – Adheze [4]	17
Obr. 7 – Únava materiálu [4].....	18
Obr. 8 – Stribeckova křivka, upraveno [17].....	19
Obr. 9 – Změna mechanických vlastností po válcování za studena [20]	22
Obr. 10 – Lisované díly karoserie [29].....	23
Obr. 11 – Fáze procesu stříhání, upraveno [24].....	23
Obr. 12 – Operace hlubokého tažení s přidržovačem, upraveno [30].....	24
Obr. 13 – Graf poměru hloubky tažení a síly přidržovače, upraveno [25].....	24
Obr. 14 – Tribologické zkoušky tváření plechů dle normy DIN 50322, upraveno [28]	25
Obr. 15 – Dílčí tribologické zkoušky 5. kategorie z normy DIN 50322, upraveno [28]	26
Obr. 16 – Zkouška tažení vzorku z čelistí, upraveno [27]	27
Obr. 17 – Univerzální trhací stroj s již upnutými experimentálními čelistmi [Foto autor]	29
Obr. 18 – Konstrukce experimentálního upínacího zařízení [Foto autor]	30
Obr. 19 – Čelisti upínacího zařízení [Foto autor].....	30
Obr. 20 – Experimentální zařízení pro ohřev a měření teploty čelistí [Foto autor]	31
Obr. 21 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a teplotě 20 °C.....	33
Obr. 22 – Vzorky tažené při 20 mm/min a 20 °C [Foto autor].....	34
Obr. 23 – Makroskopický snímek vzorku 64- 03-20 zvětšený 120x [Foto autor].	35
Obr. 24 – Makroskopický snímek vzorku 64-15-20 zvětšený 480x [Foto autor]..	35
Obr. 25 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 20 °C	36
Obr. 26 – Vzorky tažené při 600 mm/min a 20 °C [Foto autor].....	37
Obr. 27 – Makroskopický snímek vzorku 64-15-20 zvětšený 120x [Foto autor]..	38

Obr. 28 – Makroskopický snímek vzorku 64-15-20 zvětšený 480x [Foto autor]..	38
Obr. 29 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a 80 °C	39
Obr. 30 – Vzorky tažené při 20 mm/min a 80 °C [Foto autor]	40
Obr. 31 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-80 zvětšený 480x [Foto autor]..	41
Obr. 32 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-80 zvětšený 120x [Foto autor]..	41
Obr. 33 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 80 °C	42
Obr. 34 – Vzorky tažené při 600 mm/min a 80 °C [Foto autor].....	43
Obr. 35 – Makroskopický snímek vzorku 64-13-80 zvětšený 120x [Foto autor]..	44
Obr. 36 – Makroskopický snímek vzorku 64-13-80 zvětšený 480x [Foto autor]..	44
Obr. 37 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a teplotě 100 °C	45
Obr. 38 – Vzorky tažené při 20 mm/min a 100 °C [Foto autor].....	46
Obr. 39 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-100 zvětšený 120x [Foto autor]	47
Obr. 40 – Makroskopický snímek vzorku 64-01-100 zvětšený 480x [Foto autor]	47
Obr. 41 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 100 °C.....	48
Obr. 42 – Vzorky tažené při 600 mm/min a 100 °C [Foto autor]	49
Obr. 43 – Makroskopický snímek vzorku 64-11-100 zvětšený 480x [Foto autor]	50
Obr. 44 – Makroskopický snímek vzorku 64-11-100 zvětšený 120x [Foto autor]	50
Obr. 45 – Graf zatížení v čase při rychlosti 20 mm/min a teplotě 120 °C	51
Obr. 46 – Vzorky tažené při 20 mm/min a 120 °C [Foto autor].....	52
Obr. 47 – Makroskopický snímek vzorku 64-04-120 zvětšený 120x [Foto autor]	53
Obr. 48 – Makroskopický snímek vzorku 64-04-120 zvětšený 480x [Foto autor]	53
Obr. 49 – Graf zatížení v čase při rychlosti 600 mm/min a teplotě 120 °C.....	54
Obr. 50 – Vzorky tažené při 600 mm/min a 120 °C [Foto autor]	55
Obr. 52 – Makroskopický snímek vzorku 64-12-120 zvětšený 480x [Foto autor]	56
Obr. 51 – Makroskopický snímek vzorku 64-12-120 zvětšený 120x [Foto autor]	56
Obr. 53 – Graf porovnání dynamických a statických koeficientů oproti teplotě tažení.....	57

Přílohy

Příloha 1 – Naměřené hodnoty

Příloha 2 – Makroskopické snímky

Příloha 3 – Fotodokumentace