

Stanovení vlivu kontaktního tlaku na změnu drsnosti plechu při tribologické zkoušce protahováním pásku

Bakalářská práce

Studijní program:

Autor práce:

Vedoucí práce:

Konzultant práce:

B0715A270008 Strojírenství

Jakub Křováček

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Stanovení vlivu kontaktního tlaku na změnu drsnosti plechu při tribologické zkoušce protahováním pásku

Jméno a příjmení: **Jakub Křováček**
Osobní číslo: S19000278
Studijní program: B0715A270008 Strojřemeslnictví
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

1. Význam tribologických procesů při tváření kovů (druhy tření, používaná maziva a způsob nanášení na povrch, atd.).
2. Způsoby hodnocení povrchu plechu (2D a 3D analýzy povrchu, základní parametry drsnosti atd.)
3. Pro zvolený materiál provést stanovení vlivu kontaktního tlaku na změnu drsnosti plechu při tribologické zkoušce protahováním pásku.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Diskuze a závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] BHUSHAN, Bharat. *Introduction to tribology*. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [2] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [3] TOTTEN, George E. a Robert W. BRUCE, ed. *Handbook of lubrication and tribology*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. ISBN 978-0-8493-2095-8.
- [4] LUDEMA, K. C. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Boca Raton: CRC Press, 1996. ISBN 978-0-8493-2685-1.
- [5] MARQUARD, Elizabeth a Heather LAMPMAN. *ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming*. B.m.: ASM International, 2006. ISBN 0-87170-710-1.
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.
- [7] TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes – machines – tools*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

29. března 2021

Jakub Křováček

Stanovení vlivu kontaktního tlaku na změnu drsnosti plechu při tribologické zkoušce protahováním pásku

Anotace

Bakalářská práce se zabývá zjišťováním změny drsnosti povrchu při tribologické zkoušce protahováním pásku. Zkouška se prováděla na speciálním tribologickém testovacím zařízení SOKOL 400, kde byly použity následující kontaktní tlaky: 4, 6, 8 a 10 MPa. Pro sledování změny drsnosti povrchu při tribologické zkoušce protahováním pásku se sledovaly následující parametry drsnosti – střední aritmetická úchylka profilu (R_a) a počet špiček (R_{Pc}). Na vyhodnocení měření se nejprve použila grafická znázornění a porovnání jejich procentuálních změn drsnosti povrchu a také analýza rozptylu (ANOVA), která měla především poukázat, zdali se v těchto případech jedná o statisticky významný vliv.

Klíčová slova v českém jazyce: drsnost povrchu, tribologie, kontaktní tlak, koeficient tření, vícefaktorová analýza rozptylu (2F ANOVA)

Determination of the Contact Pressure Influence on the Change of Sheet Roughness at Tribological Strip Drawing Test

Annotation

The bachelor's thesis deals with determining the change in surface roughness in a tribological test by stretching the tape. The test was performed on a special tribological test device SOKOL 400, where the following contact pressures were used: 4, 6, 8 and 10 MPa. To monitor the change in surface roughness in the tribological test by strip drawing, the following roughness parameters were monitored - mean arithmetic deviation of the profile (Ra) and number of peaks (RPc). To evaluate the measurements, graphical representations were first used and their percentage change in surface roughness was compared. Mainly, the analysis of variance (ANOVA) was used to primary prove whether there was statistically significant impact on these cases.

Key words: surface roughness, tribology, contact pressure, coefficient of friction, multifactor analysis of variance (2F ANOVA)

Poděkování

Rád bych poděkoval především svým rodičům, kteří mi umožnili studium na vysoké škole a měli se mnou trpělivost v celé délce mého bakalářského studia. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za vřelý přístup a odbornou pomoc při vypracování teoretické, a především experimentální části práce, za poskytování cenných rad, konzultací a informačních podkladů.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
1 Úvod.....	10
2 Teoretická část	11
2.1 Hodnocení kvality povrchu	11
2.1.1 Parametry drsnosti povrchu.....	11
2.1.2 Měření drsnosti povrchu	15
2.2 Tribologie	19
2.2.1 Tribologický proces	20
2.3 Povrchové úpravy	24
2.3.1 Ochranné povlaky	25
2.3.2 Výroba povrchu plechu HDG	27
3 Experimentální část.....	28
3.1 Příprava vzorku	28
3.2 Parametry tribologické zkoušky protahováním pásku	30
3.3 Průběh zkoušky	32
3.4 Vyhodnocení zkoušky	36
3.5 Popis porovnání změny drsnosti.....	40
4 Závěr	44
5 Seznam literatury	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení – Význam	[Rozměr]
Pt – hloubka profilu	[μm]
Wt – hloubka vlny	[μm]
Rt – hloubka drsnosti	[μm]
Ln – měřená délka	[mm]
Ra – Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
l – vzdálenost měřeného profilu	[mm]
Rz – výška nerovnosti profile z deseti bodu	[μm]
Y _{pm} – výška největšího výstupku	[μm]
Y _{vmi} – hloubka největší prohlubně	[μm]
RPc – počet špiček	[1/cm]
μ – koeficient třecích ztrát	[1]
Ft – třecí síla	[N]
Fn – normálová síla (přítlačná)	[N]
y(x) - funkce závislosti délky profilu na velikosti úchylek	[1]
m – střední čára profilu	
HDG – žárově pozinkovaný plech	
PTFE – polytetrafluorethylen	
SBT – Shot Blast Texturing	
EDT – Electric Discharge texturing	
Lt – Laser Texturing	
EBT – Electron Beam Texturing	

1 Úvod

V automobilovém průmyslu je v dnešní době jiné kladen stále větší důraz také na vzhled automobilu. Auto s hezkou a lesklou barvou většinou přináší větší zisky pro automobilky. Důraz je však kladen nejen na samotný vzhled, ale také např. na životnost nebo snadnou zpracovatelnost, popř. levnou výrobu. Všechny tyto aspekty se pak promítají do výroby karoserie vozu.

Výroba pohledových dílů karoserie automobilu spočívá zejména v lisování hlubokotažných plechů. Každá automobilka se snaží přijít s lepší a levnější metodou zpracování plechů. Důležitým aspektem je také zvolení vhodného materiálu. Vybraný plech musí odolávat silovému namáhání při zpracování bez porušení, odolávat proti korozi nebo např. nevykazovat zadírávání ochranného povlaku. Na samotnou kvalitu povrchu plechu je opět kladen nemalý důraz. Mezi důležité aspekty zohledňující kvalitu povrchu patří zejména jeho drsnost. Plech musí mít správnou morfologii, aby na něm ulpívalo mazivo apod. Možnost ulpívání maziva zajišťují malé výstupky na povrchu plechu. Na druhou stranu plech nesmí být příliš drsný na dotek a musí na něm dobře držet nanesená barva. Drsnost povrchu je tedy velmi důležitý parametr.

Vzhled jakékoliv dílu nebo strojní součásti ovlivňuje z větší části kvalita povrchu. Kvalitou povrchu se myslí zejména jeho drsnost. Drsnost povrchu je velmi důležitý parametr také ve strojírenském průmyslu. Každý strojní výkres musí mít značku drsnosti na výkresu.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jestli při lisování hlubokotažného plechu dochází ke změně drsnosti povrchu. Na provedení takového testu byla zapotřebí zkouška, která by přiblížila tento proces. Jednalo se o tribologickou zkoušku protahováním pásku, která byla provedena v laboratořích Katedry strojírenské technologie Fakulty strojní na Technické Univerzitě v Liberci. Jako materiál, který byl použit na tuto zkoušku, byla použita hlubokotažná ocel s povrchovou úpravou žárového zinkování (HDG). Plech byl dodán od firmy Škoda Auto a.s. Průběh zkoušky probíhal podle následujících kroků tak, že byly změřeny parametry drsnosti (R_a , RP_c) před zkouškou a po tribologické zkoušce protahováním pásku. Následně došlo k vyhodnocení měření a porovnávala se velikost změny parametrů. Smyslem vypracování práce bylo pomoci objasnit situaci, jestli má cenu se více zajímat o změnu drsnosti povrchu během lisování. Před měřením existoval předpoklad, že se zvyšujícím kontaktním tlakem bude docházet ke snižování parametrů R_a a RP_c .

2 Teoretická část

S ohledem na zadání bakalářské práce byla rozdělena teoretická část do tří kapitol. V první kapitole „Hodnocení kvality povrchu“ je věnováno nejvíce pozornosti popsání parametrů drsnosti povrchu, jelikož experiment je založen na měření změny drsnosti povrchu. Druhá kapitola se zaměřuje na tribologii, protože procesy s tím spojené jsou základní parametry každého technologického procesu. Poslední kapitola teoretické části se zabývá ochrannými povlaky. Povlaky jsou nedílnou součástí výrobků, které potřebují zlepšit své vlastnosti s ohledem na jejich použití jako je např. ochrana proti korozi u karosářských plechů.

2.1 Hodnocení kvality povrchu

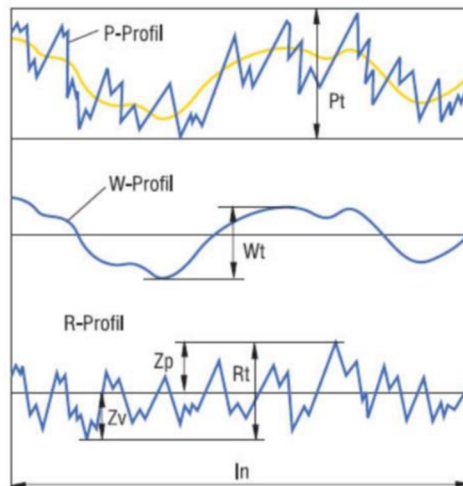
Kvalita povrchu je velmi důležitý aspekt ve strojírenství, nejčastěji se s ní setkáme v oblasti obrábění. Už při konstrukci strojní součásti je potřeba zvolit správnou drsnost povrchu, aby součást splňovala svou funkčnost, pro kterou byla navržena. Jelikož je drsnost povrchu celosvětově uznávaná vlastnost, byly z tohoto důvodu vytvořeny příslušné normy (např. DIN EN ISO 4287). Díky technickým normám se můžou porovnávat příslušné drsnosti povrchu. V současné době je vytvořeno mnoho norem na hodnocení kvality povrchu. Nové normy, týkající se měření drsnosti povrchu, jsou vyvíjeny v závislosti na rostoucích požadavcích ohledně povrchu součásti.

Drsnost povrchu je technická geometrická veličina, která je definována jako soubor nerovností s velmi malými vzdálenostmi od sebe. Nerovnosti vznikají v důsledku použití vnější síly např. obrábění, řezání, vrtání apod. Na kvalitě povrchu je závislá celá řada odvětví průmyslu, nejen strojírenství ale i další obory, např. stavební, dopravní, textilní průmysl apod [1].

2.1.1 Parametry drsnosti povrchu

Parametry drsnosti jsou důležité pro porovnávání a hodnocení povrchů. Existuje celá řada parametrů drsnosti povrchu. Každá metoda měření využívá jiné parametry pro specifikaci povrchu. S novými metodami měření vznikají nové parametry. Základní parametry drsnosti povrchu jsou sepsány na následujících stránkách.

1) Profil povrchu – Norma DIN EN ISO 4287



Obr. 1 Profil povrchu [2]

P-profil (profil drsnosti): hloubka profilu P_t , která je zobrazena na obr. 1. Jedná se o vzdálenost mezi dvěma mezními přímkami profilu. Hloubka profilu je závislá na měřené délce l_n [2].

W-profil (profil vlnitosti): hloubka vln W_t , která je zobrazena na obr. 1, ukazuje vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu. Hloubka vln je závislá na měřené délce l_n [2].

R-profil (profil drsnosti): hloubka drsnosti R_t je zobrazena na obr. 1, značí vzdálenost mezi nejvyšší špičkou a nejnižší prohlubní profilu. Hloubka drsnosti je závislá na měřené délce l_n [2].

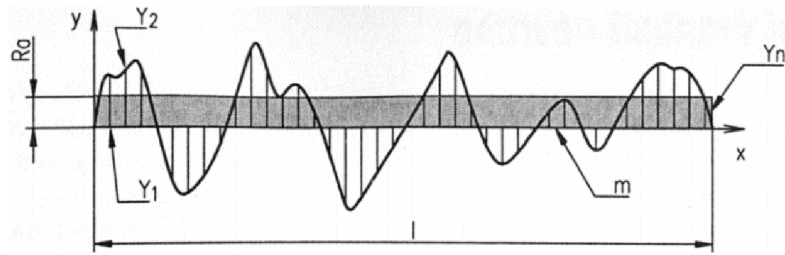
2) Střední čára profilu m

Střední čára profilu je základní čára, která se značí písmenem m . Přímka má tvar jmenovitého profilu a dělí ho tak, že v celé délce l je součet úchylek kvadrantů od střední čáry m minimální. Na obr. 2 je znázorněn profil střední čáry profilu.



Obr. 2 Schéma střední čáry profilu m

3) Střední aritmetická úchylka profilu Ra – Norma DIN EN ISO 4287



Obr. 3 Schéma střední aritmetické úchylky profilu Ra

Střední aritmetická úchylka Ra je definována pomocí aritmetického průměru všech úchylek profilu na délce l . Obr. 3 představuje schématický náčrt střední aritmetické úchylky Ra, která se spočítá pomocí rovnice (1).

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

kde značí:

- R_a - střední aritmetická úchylka [μm],
- l - vzdálenost měřeného profilu [mm],
- $y(x)$ - funkce závislosti délky profilu na velikosti úchylek [1].

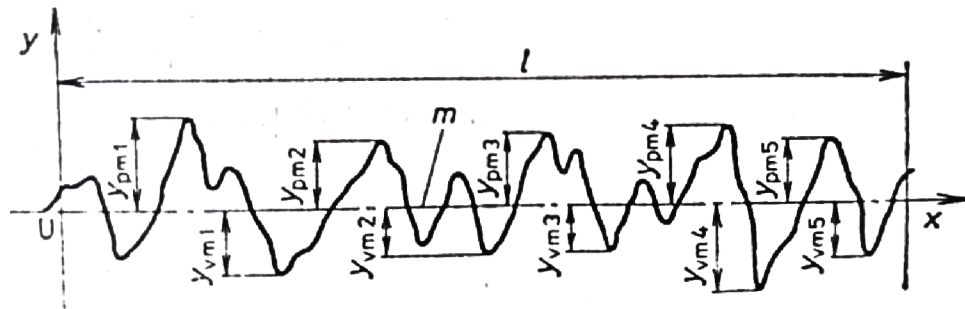
Tab. 1 zobrazuje přibližné hodnoty parametru Ra různých povrchů po provedení daných obráběcích technologiích.

Tab. 1 Vliv druhů obrábění na výslednou velikost parametru Ra

Druh obrábění	Ra [μm]
Soustružení	1,6 – 0,4
Frézování	3,2 – 0,8
Vrtání, vyvrtávání	1,6 – 0,4
Hoblování	3,2 – 1,6
Broušení	0,4 – 0,025
Lapování	0,1 – 0,05
Honování, superfinišování	0,1 – 0,025

4) Výška nerovností profilu z deseti bodů Rz – Norma DIN EN ISO 4287

Střední výška profilu Rz je definována jako absolutní hodnota 5 nejvyšších výšek profilu a všech 5 nejnižších prohlubní profilu v závislosti na délce ln. Na obr. 4 je schéma střední výšky profilu Rz. Pomocí vzorce (2) se vypočte hodnota Rz [1].



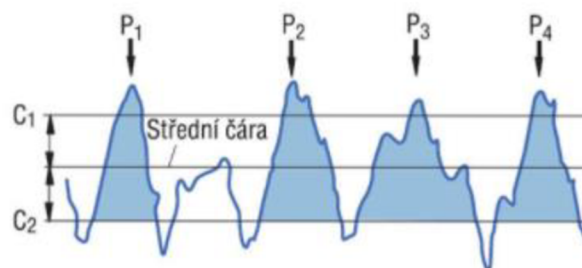
Obr. 4 Schéma výšky nerovnosti profilu z deseti bodů Rz [3]

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5} \quad (2)$$

kde značí: R_z - výška nerovnosti profilu určená z 10-ti bodů [μm],
 y_{pmi} - výška největšího výstupku [μm],
 y_{vmi} - hloubka největší prohlubně [μm].

5) Počet špiček RPc

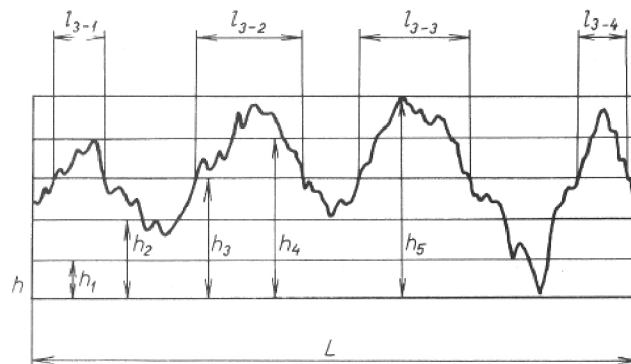
Počet špiček RPc je definováno jako množství profilových prvků na centimetr. Elementy, které se započítávají musí překročit horní hranici C1 a následně musí být pod dolní hranicí C2. Na obr. 5 je vidět schéma špiček. Elementy, které splní podmínku bývají označovány písmenem P.



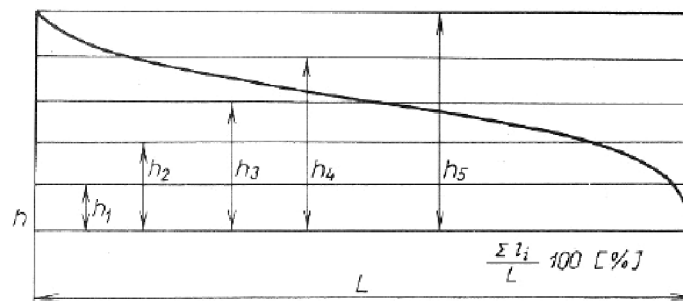
Obr. 5 Schéma počtu špiček RPc [4]

Abbottova křivka

Abbottova křivka pomáhá specifikovat profil drsnosti tím, že popisuje všechny ostatní hodnoty drsnosti v jedné křivce. Tvar křivky je pouze pro uvažovaný tvar profilu. Nevýhoda je, že tato křivka neumožňuje podrobně popsat jednotlivé tvary drsnosti povrchu. K vytvoření křivky je zapotřebí profilogram, který se určí pomocí sítě rovnoběžek a je zobrazen na obr. 6. Tyto informace slouží k sestrojení Abbottovy nosné křivky, která je vidět na obr. 7 [5].



Obr. 6 Profilogram s určenou sítí rovnoběžek



Obr. 7 Sestrojení Abbottovy nosné křivky

2.1.2 Měření drsnosti povrchu

Na hodnocení drsnosti povrchu existuje řada metod a přístrojů. Tyto metody jsou založeny na různých fyzikálních vlastnostech a principech. Správný postup při měření zajišťují normy, které vznikly s příslušnými metodami měření. Měření drsnosti povrchu lze obecně rozdělit do 2 skupin: měření dvojrozměrnou (2D) technologií a měření trojrozměrnou (3D) technologií.

Měření 2D technologií

Nejvyužívanější zařízení na měření 2D metody jsou mechanická měřidla. Snímač hrotu měřidla působí tlakem na povrch měřeného materiálu. Hrot zároveň poškozují měřený povrch, proto tento způsob měření není vhodný pro přesné měření. Zároveň je tato metoda levná, vyhodnocení velmi rychlé a v praxi nejvíce využívaná. Z důvodu možného nepoškození povrchu, byly vyvinuty novější optické metody, které nijak nepoškozují měřený povrch.

Dotykové profiloměry

Dotykové profiloměry jsou historicky nejčastěji používaným zařízením na měření drsnosti povrchu. Postup je takový, že po měřené ploše se pohybuje konstantní rychlostí měřící hrot. Tento hrot je na svém vrcholu zaoblený. Pohyby výšky hrotu přenáší snímač (měnič) na elektrické signály. Signály dokáže přeměnit numerický přístroj (viz obr. 8) na hodnotu drsnosti povrchu [1].



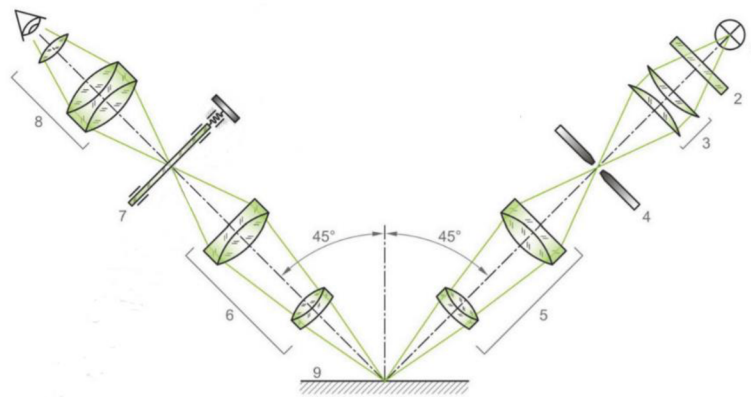
Obr. 8 Profiloměr Hommel-Etamic T8000 [6]

Optické (bezdotykové) metody

Optické měření drsnosti patří mezi novější metody. Povrch měřeného materiálu se nijak nepoškodí, jelikož se nepoužívá žádný hrot, který by působil tlak na zkoušený povrch. V praxi se nejčastěji vyskytuje metoda světelného řezu, popř. interferenční metoda

a) Metoda světelného řezu

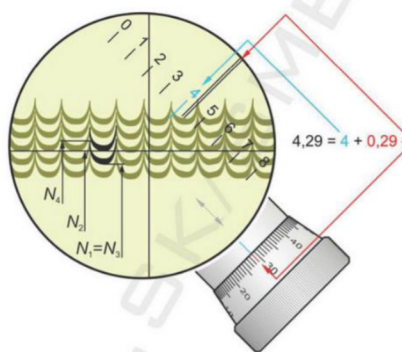
Metoda světelného řezu se vyhodnocuje pomocí mikroskopu, jehož základní schéma je na obr. 9. Princip této metody spočívá v průniku světelných paprsků s nerovnostmi povrchu. Světlo se pomocí optické soustavy nastavuje na rovinu. Ke změně parametru světelného paprsku se používají optické systémy, které mají za úkol dopad světla pod úhlem 45° na měřený povrch. Průnikem světelné roviny a měřeného povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu. Obraz profilu má tvar vlny v tmavém pozadí.



Obr. 9 Optické schéma mikroskopu pro světelný řez [7]

b) Interferenční metoda

Tato metoda se používá pro měření drsnosti velmi jemných ploch (broušení, honování, superfinišování). Princip je založen na skládání vln, které mají stejné frekvence a konstantní fázový posuv. Jedná se o tzv. koherentní vlnění. Tohoto vlnění se dosáhne pomocí jednoho zdroje tak, že se světlo rozdělí a poté se znovu spojí. Interference se v mikroskopu zobrazí jako shluk světlých a tmavých křivek (viz obr. 10) [7].

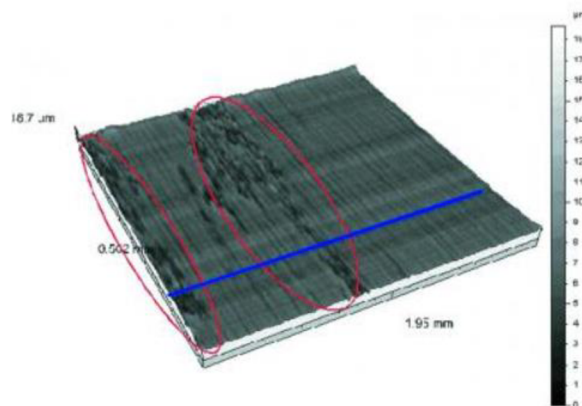


Obr. 10 Pohled do mikroskopu interferometru [7]

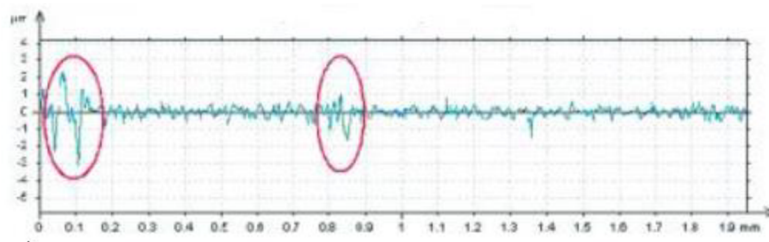
Měření 3D technologií

Technologie prostorového (3D) měření povrchu se začala vyžívat z důvodu funkčních vlastností. Tyto vlastnosti jsou přínosnější než základní hodnoty drsnosti R_a , která je nejčastěji měřena pomocí 2D technologie. Způsoby měření hodnoty drsnosti R_a se stále inovují a vylepšují, ale nedokážou podrobně popsat měřený povrch a posoudit funkční vlastnosti, a to i přesto, že je tento parametr R_a mezinárodně uznávaný a snadno změřitelný.

Povrch s ostrými výstupky (hřebeny), bývá považován jako izotropní povrch. Tento povrch má parametr R_a zprůměrován do jedné hodnoty. Prostorové měření povrchu dokáže podrobněji popsat a určit místa, kde se nachází nedokonalosti povrchu. Díky tomu se určí, kde se povrch bude opotřebovávat nejvíce, kde bude nejvíce ulpívat mazivo, jaká místa jsou více náchylná na tvorbu trhlin apod. Na obr. 11 je 3D zobrazení drsnosti povrchu. Poškozená místa povrchu jsou zvýrazněna červeně. Modrá čára zobrazuje řez, ve kterém se podrobněji nahlédne na výškové rozdíly (viz obr. 12) [8].



Obr. 11 3D zobrazení drsnosti povrchu



Obr. 12 Grafický záznam drsnosti

Abbotova křivka ve 3D

Abbotova křivka je založena na principu horizontálních řezů, používá se ve 3D na parametry povrchu plechů. Křivka se určí z vrstev podílů topografie a matematicky je vyřešena pomocí 3D souřadnic tvaru plochy. Mezi důležité řezy patří ty, které si zachovávají konstantní vzdálenost od sebe, čímž se myslí povrchové řezy vrstvami. Takové řezy se vážou k příslušným nerovnostním výstupkům plochy. Řezy se oddělí sečnými rovinami od zbytku plochy. Abbotova křivka poté vznikne jako podíl ploch na veškerou plochu řezné roviny, čímž se rozumí podíl řezné plochy.

2.2 Tribologie

Pojem tribologie je složen z řeckých slov *tribé* a *logios* – tření a věda. Pod tímto výrazem se rozumí mezioborová věda, která se zaměřuje na stavy a procesy v přírodních a umělých tribologických systémech. Zabývá se také vzájemnými účinky povrchu při jejich relativním pohybu nebo aspoň při pokusu o relativní pohyb. Z hlediska relativních pohybů lze rozlišit následující pohyby: obecně kluzný, valivý, rotační, nárazový a kmitavý pohyb.

Historie

První použití praktik z tribologie se datuje do staré civilizace v Egyptě. Již tehdy bylo objeveno, že při stavbě pyramid se mezi dvě třecí plochy může použít kapalina pro snížení tření. Díky tomu šlo použít menší sílu na tahání těžkých břemen. Používal se přírodní olej nebo živočišný tuk. S nalezením ropy začal velký rozmach využití maziv. Největší posun v tribologii nastal s prací Leodarda da Vinci (1452 až 1519), který po řadě experimentů došel k následujícím závěrům:

- a) *velikost třecí síly je úměrná kolmému zatížení a nezávisí od velikosti plochy třecích těles,*
- b) *součinitel tření je pro všechny kovy stejný a dosahuje hodnoty 0,25.*

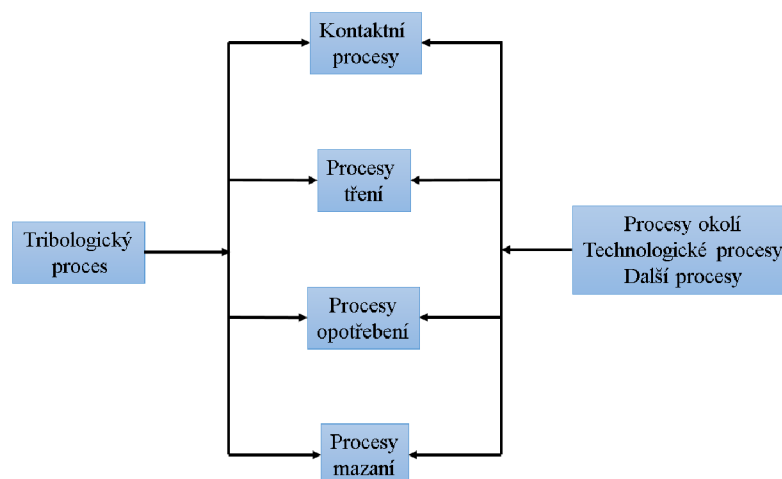
Koncem 17. století francouzský inženýr Gauillaumem Amonts zakládá teorii tření, kde ve vztahu poprvé definuje pojem koeficient tření. Později byl tento zákon potvrzen po řadě experimentů, které provedl Charlese-Augustina de Coolomb. Po Coolombovi je také pojmenovaný následující vztah (3) [9–11].

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (3)$$

kde značí: μ - koeficient tření [1],
 F_t - třecí síla [N],
 F_n - normálová síla (přítlačná) [N]

2.2.1 Tribologický proces

Tribologický proces charakterizuje materiálové vzájemné propojení třecích těles mezi látkou a okolím, které se koná v prostoru a čase. Na obr. 13 jsou znázorněny vazby mezi jednotnými segmenty v tribologickém systému. Při řešení procesu se rozlišují čtyři hlavní analýzy:



Obr. 13 Vazby v tribologickém systému

a) Kontaktní procesy

Kontakt neboli dotyk mezi jednotlivými členy v tribologickém systému je základním jevem při správném fungování systému. V obecné rovině jsou při kontaktních procesech základními parametry geometrie a materiálové vlastnosti vzájemně se dotýkajících ploch. V další řadě jsou důležité mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti dvou těles ve vzájemném působení. Existuje velké množství kontaktních procesů, a proto je třeba zvažovat zejména následující:

- množství těles zapojených do kontaktního procesu,
- zevnější rozměry těles, což je makrogeometrie nebo mikrogeometrie těles,
- přetrvávající stejná deformace,
- charakter a rychlost vzájemného pohybu.

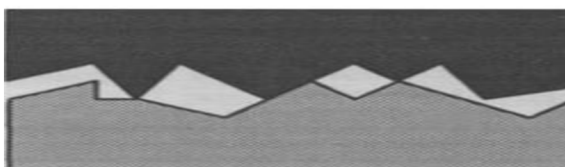
b) Procesy tření

Tření se řadí mezi přírodní jevy. Vzniká při pohybu dvou vzájemně dotýkajících se ploch, např. nástroje a obráběného materiálu. Tření můžeme definovat jako odpor proti trvalému nebo budoucímu relativnímu pohybu tuhých těles, která jsou ve vzájemném kontaktu. Následkem tření je navýšení spotřební energie, která je potřebná pro deformační proces. Taktéž způsobí opotřebení na nástrojích a zabraňuje rozšíření deformací.

Z hlediska základního systému lze rozlišit čtyři základní stavy tření:

Suché tření

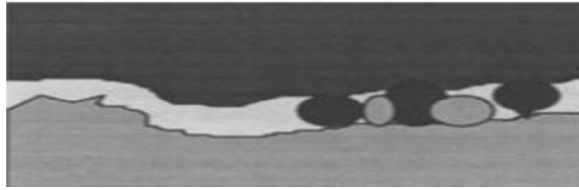
Suché tření (obr. 14) nastane, když je daná materiálová oblast v tuhém skupenství. Tento stav vzniká při dotyku ploch, u kterých se nenalézá jakýkoliv mazací prostředek. Z toho vyplývá, že suché tření je nežádoucí jev např. při tváření a objevuje se v některých případech špatného nanesení maziva.



Obr. 14 Suché tření [12]

Mezné tření

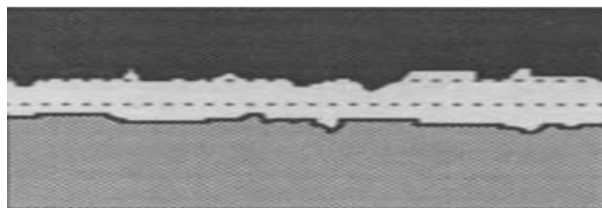
Vyskytne se za podmínky, že mezi třecími plochami je velmi tenoučká vrstva maziva. Mezní vrstvu mohou tvořit molekuly kapaliny, plynu nebo jiné látky, které mají velkou adhezi k třecí ploše. Jev se může vyskytnout i u povrchů, které se mažou záměrně, jelikož přísun maziva je nedostačený v místě tření nebo vrstva maziva není úměrná únosnosti. Za těchto podmínek dojde k velkému přiblížení třecích ploch a to takovému, že jejich vzájemnému kontaktu zabraňuje už jen mezní vrstva maziva. Mezní tření se vyskytuje v praxi (obr. 15) tam, kde velké tlaky působí na malé stykové plochy.



Obr. 15 Mezné tření [12]

Tření kapalinné

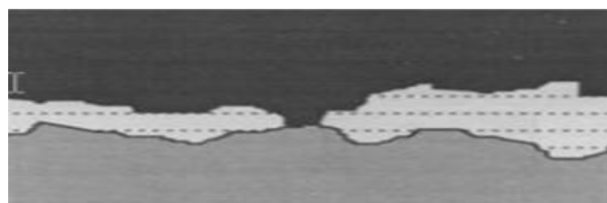
Tření kapalinné občas bývá nazýváno jako hydrodynamické, je vidět na obr. 16. V tomto stavu jsou plochy od sebe odděleny trvalou vrstvou maziva. Rozdíl drsnosti povrchu se skoro sníží téměř na nulu, jelikož stabilní vrstva maziva zredukovala nedokonalosti povrchu. Samotný proces tření se nyní uskutečňuje už jen v této vrstvě. Schopností této vrstvy je přenést zatížení, které vytvoří dostatečný protitlak a tím drží přitlačená tělesa u sebe. Protitlak může vzniknout buď hydrodynamicky, nebo hydrostaticky.



Obr. 16 Kapalinné tření [12]

Smíšené tření

Smíšené tření (obr. 17) se vyskytuje nejčastěji s kombinací více stavů. Tření vzniká v okamžiku, kdy vrstva maziva mezi plochami není stabilně silná pro vznik kapalinného tření, ale na druhou stranu je vrstva větší než v případě mezného tření. Ke smíšenému tření může dojít, když působí větší zatížení a nízká smyková rychlost [9, 13–15].



Obr. 17 Smíšené tření [12]

c) Procesy opotřebení

Proces opotřebení je spjatý s procesem tření. Je to proces, který zapříčiňuje odebírání nebo přemísťování materiálu v místech, kde se nachází třecí plochy. Taktěž tyto plochy musí být ve vzájemném kontaktu nebo ve styku s příslušným mazivem. Opotřebení způsobuje trvalou a taktěž nechtěnou změnu struktury povrchu nebo změnu tvaru tuhých těles. Takto lze může dojít k trvalému a nevratnému poškození strojních součástí nebo stroje. V praxi obecně existuje šest základních druhů opotřebení: adhezní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační [9, 10, 16].

d) Procesy mazání

Mazání je nejlepší prostředek na zmenšení tření, opotřebení a také snížení energetické náročnosti. Úloha mazání je redukovat přímý kontakt povrchů, které se nacházejí ve vzájemném pohybu. V procesu tváření je mazivo velmi důležitým faktorem, bez kterého by se proces nemohl uskutečnit. Například životnost tvářecí technologie ovlivňuje složení a správné použití maziv. Nalezení vhodného maziva je složitý proces, často se musí hledat vhodný kompromis. Výsledkem se stává optimální mazivo pro daný tvářecí proces.

Druhy maziv

Obecně se dají použít různá kritéria pro rozdělení maziv, z nichž hlavní je skupenství:

- Plynná maziva: vykazují malou viskozitu a nízký součinitel tření, používají se např. v tzv. plynových ložiscích,
- kapalná: nejvíce používané mazivo, malá viskozita, řadí se mezi ně ropné oleje, syntetické oleje, emulze a vodní roztoky,
- plastická: skládají se ze dvou fází, a to kapalnou a zpevňovadlem. Plastická se zpevňovadlem zlepšují viskozitu. Mezi ně se řadí gely, mazací tuky, soli a rosoly,
- tuhá: používají se tam, kde kapalně mazivo neobstojí, což jsou velké tlaky a vysoká teplota. Patří mezi ně anorganické jako sulfidy, selenidy, grafity nebo organické jako nějaké polymery (PTFE).

V případě lisování hlubokotažných plechů lze maziva rozdělit do tří základních skupin podle jejich využití na:

- technologická (jednofunkční – tažná): nanášejí se těsně před samotným tažením a poté jen na místa mazacího plánu, kde je potřeba omezit tření,
- konzervační (dvoufunkční): je nanášeno už ve výrobě v hutích u výrobce. Hlavní účel je antikorozi ochrana,
- prací oleje: odstraní nečistoty po tváření a po konzervačních olejích. Plech je potom očištěn a připraven na lakování.

Mazadla mohou být také rozdělena podle druhu nanášení. V praxi se používají tři základní technologie nanášení:

- nástřikem: bývá používán speciální mazací přístroj, který rozprašuje mazadlo na tížený povrch tryskami,
- válečkem: mazadlo se tlakem vtlačuje do vnitřního prostoru válečku, který má tvar čepu. Ve válečku jsou vyvrtané otvory, kterými mazivo vytéká na plst. Plstí je potažen celý váleček. Využívá se tam, kde se nedá použít nástřík,
- praním: používá se jako odstranění všech nečistot, taktéž konzervačních olejů. Po praní je čistý povrch a je na něm nanesena vrstvička pracího oleje. Proces praní se provádí na „pracím stroji“ [9, 13, 17–19].

2.3 Povrchové úpravy

Povrchové úpravy se používají pro zlepšení dosažených vlastností materiálu, které materiály samy nevykazují, např. korozi odolnost. Úpravy se provádí na povrchu a nijak nezasahují do jádra materiálu. Výběr vhodné povrchové úpravy bere v úvahu zejména skutečnost, v jakém prostředí bude díl použit. V automobilovém průmyslu je u plechů důležitý také vzhled (což je dekorativní úprava, mezi kterou patří lesk a barva laku). U karosářských plechů je snahou vytvořit takovou povrchovou úpravu, která by zajišťovala snadné lisování a na druhou stranu např. zabraňovala nežádoucímu zadírání nebo tvorbě trhlin. Nicméně nejdůležitějším faktorem v automobilovém průmyslu je ochrana proti korozi plechu, která udává životnost výrobku. Z hlediska zákazníka se jedná o důležitý faktor, a proto se na ni výrobci hodně zaměřují. V současné době existuje poměrně široká škála různých druhů ochrany proti korozi v případě ocelových plechů, z nichž nejvíce se v současné době používá ochrana pomocí zinku [20, 21].

2.3.1 Ochranné povlaky

Povlaky se definují jako všechny látky, které vzniknou nebo se také nanesou na povrch materiálu. Nanesením zároveň zvětšují rozměr dílu. Většinou se jedná o tloušťku. Vhodný povlak musí mít dobré složení materiálu, vlastnosti a také tloušťku. Důležitá je taky přilnavost a soudržnost s materiálem, na který je nanášen.

Jak již bylo zmíněno dříve, v případě lisování plechů v automobilovém průmyslu se nejvíce používá ochrana pomocí zinku. Největším důvodem pro použití zinku je nízká cena, a především skvělá ochrana proti korozi. Vznikají elektrochemické vlastnosti, které podkladu dávají katodickou ochranu. Vrstvička povlaku zinku markantně zvětšuje odolnost proti podkorodování a podstatně oddaluje korozi v záhybech a spárách, kam se nátěrový systém nedostane.

Z tohoto důvodu se plechy na výrobu karoserie často žárově popř. elektrolyticky pozinkují. Ochranná vrstva se nanese buď na jednu, nebo na obě strany plechu. Nevýhodou v případě pozinkování bývá možný výskyt zadírání plechu a také narušení celistvosti ochranného povlaku se základním materiálem. Řešení může být fosfátování povrchu, čímž se zabrání zadírání [20–24].

Žárové zinkování

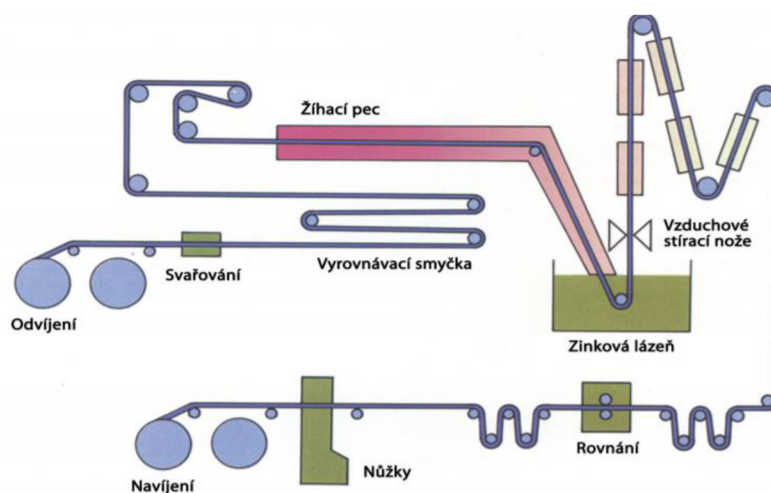
Jedná se o nejběžnější výrobu zinkového povlaku. Technologie se nazývá žárové zinkování ponorem. Postup procesu tkví v ponořování plechů nebo součástí do lázně zinku. Reakcí podkladového materiálu se zinkem v roztavené lázni, která má teplotu přibližně kolem 420 až 470°C, vzniká povlak zinku. Provádí se i za vyšších teplot než 530°C, ale to už se jedná o tzv. vysokoteplotní zinkování. Tloušťka zinkového povlaku se pohybuje v rozmezí od 7 až do 200 µm. Výrobu povlaku pomocí žárového zinkování je možné uskutečnit dvěma způsoby – mokrým a suchým.

Suchý způsob výroby spočívá v odmaštění, odmoření a poté opláchnutí. Výrobek se potom ponoří do lázně z tavidla. Lázeň tvoří roztok chloridu zinečnatého a amonného. Po usušení se výrobek ponoří do zinkové lázně a po vynoření se přesouvá na ochlazení a kontrolu. Tento způsob se může lépe mechanizovat.

Mokrý způsob také začíná odmaštěním, nicméně z hlediskem následujícího moření se postup liší. Po moření se výrobek ihned přesouvá do tavidla, které je opatřeno

přepážkou, za kterou se nachází zinková lázeň. Po lázni se výrobek ochladí a kontroluje. Tento způsob je rychlejší, jelikož nedochází k sušení výrobku.

Při výrobě povlaku na plechy se používá způsob kontinuálního pokovování. Celý proces je zapojen do uzavřeného systému (viz obr. 18). Plech se přiveze ve svitkách (rolích), které se následně svažují do nepřerušovaného pásu. Po odmaštění a odmoření se povrch zbaví oxidů při 950°C. Přitom probíhá změkčovací žihání oceli. Nyní je povrch čistý a v ochranné atmosféře vstupuje do zinkové lázně. Po lázni se redukuje tloušťka vrstvy pomocí tzv. vzduchových stíracích nožů, které vzduchem stírají zinkový povlak na požadovanou tloušťku. Plech postupuje k ochlazení a rovnání, kde se následně nastříhá zpátky na role a je vyexpedován [20, 22, 23, 25].



Obr. 18 Kontinuální žárové zinkování plechu [22]

Elektrolytické (galvanické) zinkování

Tento způsob se hodí pro menší výrobky a také pro tvary, které se dají dobře opláchnout od zbytků z lázně. Velikost vrstvy u elektrolytickém zinkování je poněkud menší, než u předchozího typu. Normální tloušťka povlaku se pohybuje přibližně mezi hodnotou 7 až 10 μm . Tento způsob zinkování je také lepší s ohledem na mechanické vlastnosti materiálu např. hlubokotažnost plechu. Tato metoda umožňuje zinkovat i tenké vrstvičky, které dosahují kolem 3 μm , a též dokáže na výrobku zinkovat pouze jednu stranu. Postup výroby začíná odmaštěním a mořením daného dílu, další krok je v zavěšení do bubnu nebo zvonu. Díl je zavěšený v roztoku zinečnaté soli neboli elektrolytu. Katoda je zapojena na výrobek do stejnosměrného proudu a anoda se napojuje

na destičku z čistého zinku. V okamžiku zapojení proudu se zinek začíná rozpouštět z anody a směřuje ke katodě, kde se uvolňuje na povrch výrobku. Na druhou stranu po elektrolytickém zinkování často nevyhovují vzhledově. Může docházet ke špatné přilnavosti maziva nebo vzniká možnost zadíraní a z tohoto důvodu se zařazuje např. fosfátování [20, 22, 23].

Fosfátování

Tato metoda je nejvíce používaná v oblasti chemické úpravy oceli. Fosfátování lze použít na povrchu železa, oceli, taktéž zinku, hliníku a jejich slitin. Při fosfátování se z roztoků kyseliny fosforečné a rozpustných solí téže kyseliny tvoří na povrchu vrstvička nerozpustitelných nebo těžce rozpustných fosforečnanů kovů. Doba fosfátování je kolem 3–10 minut, teplota procesu je kolem 30–70°C. Fosfátování se rozděluje podle funkce a taktéž podle cíle použití. V automobilovém průmyslu se proces fosfátování používá jako příprava před nanesením nátěrových hmot. Tyto procesy vytvoří velice jemné, ucelené krystalické fosfátované vrstvy. Vytvořená vrstva zvětšuje přilnavost nátěru k základnímu materiálu, zamezuje podrezivění nebo zabraňuje zadíraní [20, 26, 27].

2.3.2 Výroba povrchu plechu HDG

HDG (Hot Dip Galvanized) plechy se používají v automobilovém průmyslu k tvorbě karoserií. Jedná se o žárově zinkovaný plech. Při konečném válcování musí struktura povrchu (morfologie) vypadat tak, aby byla umožněna správná přilnavost maziva a také, aby se zabránilo možnému vzniku zadíraní povrchu plechu při dalším zpracování. Tento povrch se dá vytvářet více metodami tzv. texturování povrchu pracovního válce, z nichž ty nejdůležitější jsou uvedeny na následujících řádcích:

- metoda SBT (Shot Blast Texturing),
- metoda EDT (Electric Discharge Texturing),
- metoda LT (Laser Texturing),
- metoda EBT (Electron Beam Texturing),
- metoda PRETEX (Preussag Texturing) [23, 28].

3 Experimentální část

V experimentální části bakalářské práce bylo zjišťováno, do jaké míry se mění drsnost povrchu plechu po tažení. Výsledek experimentu by měl pomoci ve strojírenském průmyslu pochopit, do jaké míry se změní drsnost povrchu po lisování. Na uskutečnění takového výzkumu byla použita tribologická zkouška protahováním pásky, která svým průběhem napodobuje tribologické podmínky během procesu lisování. Primárně se pomocí této zkoušky zjišťují důležité tribologické parametry jako je např. velikost různých tribologických sil, popř. výpočet koeficientu tření. Práce je zaměřená na zjišťování změny drsnosti povrchu při testování vybraných kontaktních tlaků (4, 6, 8 a 10 MPa). Existuje předpoklad, že vlivem lisovacího procesu dochází ke změně drsnosti, nicméně tato změna nebývá často sledována. Na experiment byl vybrán klasický pozinkovaný hlubokotažný plech HDG (žárový pozink), který se používá pro vnější pohledové díly karoserie automobilu.

3.1 Příprava vzorku

Tato kapitola se zabývá samotnou přípravou vzorku na testování. Jednalo se o plech HDG, což značí povrchovou úpravu žárovým pozinkem. Použitý plech měl původně tvar tabule o rozměrech 450 mm x 850 mm a tloušťce 1,3 mm. Následně bylo nutné plech nastříhat na menší pásky, které byly následně použity pro tribologické testování. Na obr. 19 je vidět použitá tabule plechu před rozstříháním na menší pásky.



Obr. 19 Tabule HDG plechu před stříhem

Plech byl stříhán v 90° vůči směru válcování. Na tabulových nůžkách byl nastaven rozměr 44,7 mm. Tabule byla následně nastříhána na 10 identických dílů. Rozměr jednoho zkoušeného pásku byl 850 mm x 44,7 mm. Na obr. 20 je vidět označení směru válcování a taktéž na sobě naskládané všechny plechové pásky plechu.



Obr. 20 Nastříhané pásky na rozměr

Po nastříhání všech pásků plechu na požadovaný rozměr (850 mm x 44,7 mm) bylo dalším krokem jejich odmaštění a očištění od nečistot. Odmaštění probíhalo ve speciální lázni (viz obr. 21) kapalinou D-sol 100. Všechny testované pásky byly současně ponořeny do chemického roztoku na dobu přibližně 2–3 hodin. Za tuto dobu se všechny pásky důkladně odmastily. Zároveň při ponoření pásků do roztoku se do lázně začal vhnět stlačený vzduch. Tento vytvářel bubliny, které pomohly důkladně odmastit a očistit každé místo na plechovém pásku. Na levé části obr. 21 je vidět odmašťovací lázeň, kde jsou na jejím dnu vidět ponořené vzorky. Na pravé straně obrázku je vidět aplikace stlačeného vzduchu do prací lázně.



Obr. 21 Odmašťovací lázeň

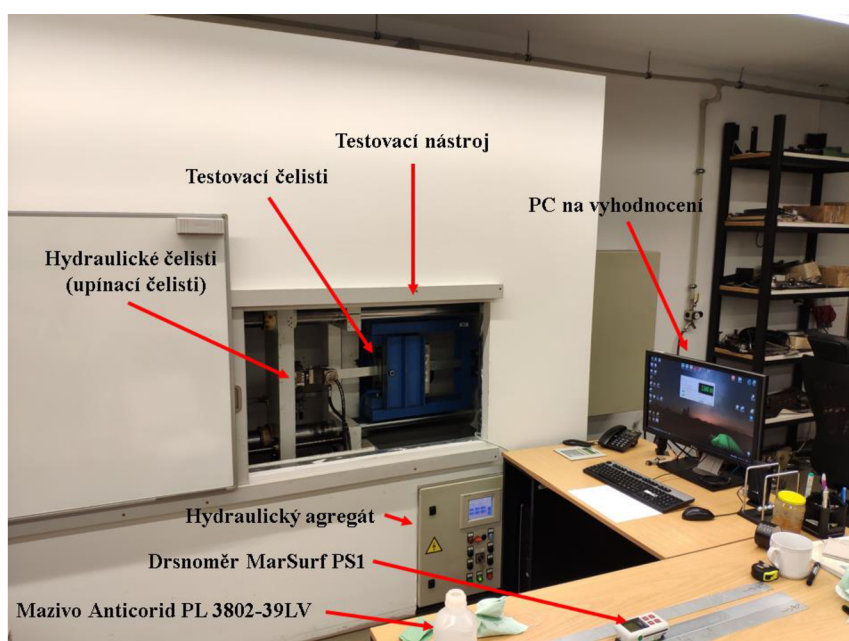
Po důkladném odmaštění v lázni byly vzorky vyndány a položeny na odkapávací zařízení. Po odkapaní zbytku oleje následuje už samotné testování vzorků. Vzorky odložené na odkapávací jsou k vidění na obr. 22.



Obr. 22 Odkapání vzorků po odmaštění

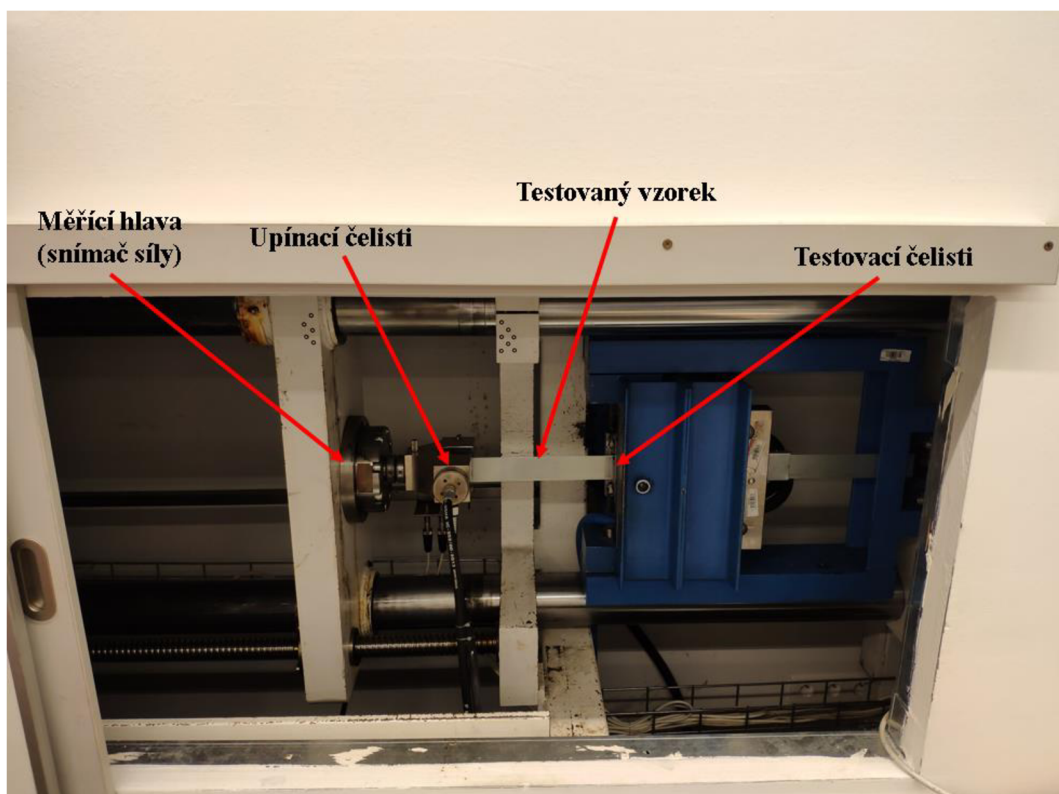
3.2 Parametry tribologické zkoušky protahováním pásku

Testovací zařízení se nachází v laboratořích katedry strojírenské technologie fakulty strojní Technické Univerzity v Liberci. Přístroj na tribologickou zkoušku protahováním pásku se nazývá SOKOL 400 a byl vytvořen ve spolupráci se Škoda Auto a. s. Zařízení je vidět na obr. 23, kde lze vidět hydraulický agregát, testovací nástroj, testovací čelisti, hydraulické (upínací) čelisti, mazivo (zde Anticorid PL 3802-39 LV), drsnoměr (MarSurf PS1) a počítač na vyhodnocení zkoušky. Na obr. 23 jsou k vidění také vodičí tyče, po kterých se pohybuje pohyblivá část přípravku (tam, kde dochází k upnutí testovaného vzorku). Naopak na obr. 23 není vidět teplotní agregát, který se nachází vlevo ve směru pořízené fotky.



Obr. 23 Testovací zařízení SOKOL 400

Hydraulický agregát dodával požadovaný přitlačný tlak (4, 6, 8 a 10 MPa) na testovací vzorky. Upínací čelisti v pohyblivé části přípravku byly také hydraulické. Teplotní agregát udržoval konstantní teplotu 40°C po celou dobu probíhající zkoušky. Na počítači se nastavovala rychlost posuvu (tzn. rychlost, kterou se pohybovala pohyblivá část nástroje) a také se zde snímala veškerá tribologická data. Frekvence snímání dat byla 2 KHz. Na obr. 24 je detail testovacího zařízení. Je zde zobrazen vzorek upnutý mezi upínací hydraulické čelisti a také detailněji měřící hlava za upínacími hydraulickými čelistmi, která slouží k měření síly.



Obr. 24 Tribologický přípravek s pohyblivou částí

Prací olej, který byl použit na tribologickou zkoušku protahováním pásku, byl označen jako Anticorid PL 3802-39 LV (výrobcem je firma Fuchs, spol. s r.o.). V rámci zkoušky byla nastavena řada dalších parametrů, které jsou sepsány v tab. 2. Rozměr čelistí (77 x 40 mm) byl zvolen z hlediska únosného rozměru testovaného vzorku. Použitá rychlost posuvu (1 mm/sec) v testu se v praxi příliš nevyskytuje. Nicméně, z hlediska obecného tribologického testování, je tato rychlost nejpřísnější, zejména s ohledem na možný výskyt tzv. zadírání zinkového povrchu.

Tab. 2 Parametry tribologické zkoušky protahováním pásku

Parametry tribologické zkoušky	
Druh materiálu	Hlubokotažná ocel HDG
Rozměr vzorku	850 x 44,7 x 1,3 mm
Počet vzorků	10 ks
Rozměr čelistí	77 x 40 mm
Rychlost posuvu	1 mm/sec
Teplota v průběhu zkoušky	40°C
Mazivo	Anticorit PL 3802-39 LV
Testované tlaky	4,6,8,10 MPa
Metoda testu	1B (tzv. „na přímo“)

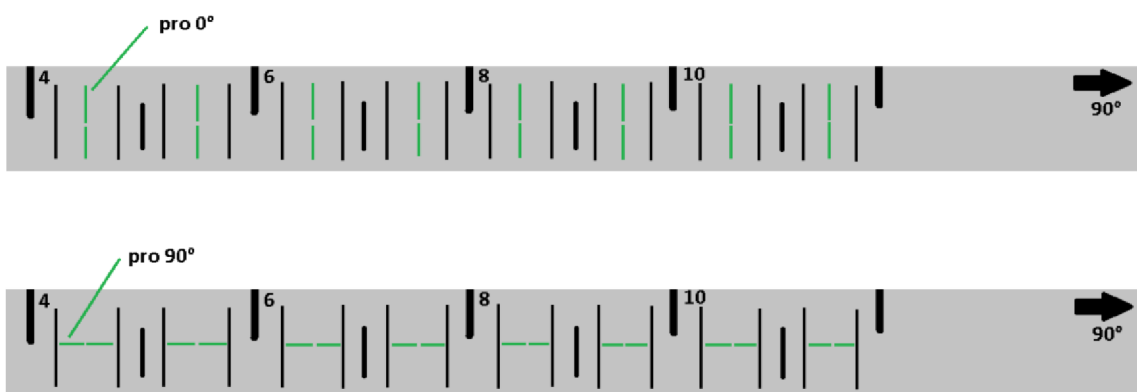
3.3 Průběh zkoušky

Před začátkem zkoušky se změřila drsnost povrchu na obou čelistech. Každá čelist byla změřena 3krát a následně byla vypočítána výsledná průměrná hodnota, která je vidět v tab. 3. Dále byla změřena drsnost povrchu testovaných vzorků před zkouškou. Vzorky se měřily jak ve směru válcování (značeno 0°), tak kolmo na směr válcování (90° vůči směru válcování). Výsledná hodnota drsnosti povrchu vzorků byla stanovena z 90 naměřených hodnot. V tab. 3 jsou vidět naměřené parametry drsnosti před zkouškou. U čelistí se neuvádí parametr R_{Pc} , protože „vrcholky“ se nepředpokládají a ani nejsou žádoucí. Parametr R_z je tedy vhodnější na měření čelistí, vypočítává se 10 výšek nerovnosti povrchu – viz kap. 2.1.1 Parametry drsnosti povrchu. U testovaných vzorků se vyžaduje parametr R_{Pc} , jelikož je vhodné vědět, kolik „vrcholků“ je na měřené délce povrchu. Naopak parametr R_z se v tomto případě nezjišťuje (je nevyhovující).

Tab. 3 Drsnost povrchu čelistí a testovaných vzorků před zkouškou

Drsnost povrchu	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{Pc} [1/cm]
Čelistí	0,186	2,98	-
Testované vzorky (0°)	1,713	-	87
Testované vzorky (90°)	1,686	-	90

Po úvodním změření drsností povrchů následovala příprava vzorku na měření drsnosti po zkoušce. Jak již bylo zmíněno výše, byly použity následující hodnoty kontaktního tlaku: 4, 6, 8 a 10 MPa. Vzhledem k délce pásku (850 mm) bylo možno během testování jednoho vzorku naměřit všechny požadované hodnoty kontaktního tlaku, kdy se jeho hodnota automaticky měnila po ujetí dráhy 100 mm. Z prvního vzorku byla vytvořena šablona, pomocí které se měřila drsnost u následujících 9 vzorků. Před vložením vzorku do testovacího zařízení SOKOL 400 byl na povrch aplikován olej (Anticorid PL 3802-39 LV) v množství $1,5 \pm 0,1 \text{ g/m}^2$. Po namazání byl vzorek vložen do zařízení a upnut do upínacích čelistí, které se ovládají pomocí panelu. Pro spuštění zkoušky se použil příslušný software LabNET v.4.50. Na hydraulickém agregátu byly nastaveny odpovídající tlaky (4, 6, 8 a 10 MPa) a zapnul se start. V okamžiku, kdy na hydraulickém agregátu bylo dosaženo hodnoty kontaktního tlaku 4 MPa, došlo k zapnutí snímače síly na počítači. Jak již bylo zmíněno dříve kontaktní tlaky se automaticky zvyšovaly po dosažení dráhy 100 mm pro jeden kontaktní tlak. Po projetí posledního tlaku byla zkouška ukončena, došlo k otevření čelistí a vyjmutí vzorku. Vzorek se následně odmastil acetonem, aby se mohly změřit výsledné hodnoty drsnost povrchu (odstranění naneseného maziva). Tento první vzorek byl následně použit jako šablona pro následující měření a na tomto vzorku bylo vidět, kde začíná působit první kontaktní tlak (4 MPa). Z tohoto bodu se po 100 mm udělaly úseky a zakreslily na šablonu. V každém úseku se měřila drsnost povrchu dvakrát pro oba směry válcování. Zakreslily se přesné intervaly, kde se bude měřit drsnost povrchu, aby byly zajištěny stejné podmínky pro všechny kontaktní tlaky. V horní části obr. 25 je znázorněna šablona pro směr 0° vůči směru válcování. Na spodní části obr. 25 je šablona pro směr 90° vůči směru válcování. Zelené úseky zobrazují dráhu, na kterých se měřila drsnost povrchu. Na obr. 25 jsou směry válcování rozdělené kvůli přehlednosti.



Obr. 25 Grafická ilustrace rozmístěných měřených úseků na testovaném pásku

Pro identické měření drsnosti povrchu se měřila vždy stejná strana vzorku. Nyní po zakreslení šablony se mohl jeden vzorek po druhém dávat do testovacího zařízení. Na obr. 26 (vlevo) je k vidění aplikace samotného měření drsnosti povrchu podle vytvořené šablony. Zde se měřilo pro směr 90° vůči válcování. Na měření drsnosti povrchu se použil přenosný drsnoměr MarSurf PS1. Na obr. 26 (vpravo) je k vidění porovnání povrchu před zkouškou a po zkoušce – více lesklý povrch (značen písmenem A) je po proběhnuté zkoušce.



Obr. 26 Měření drsnosti povrchu a vzhled vzorku po zkoušce (A)

Po vytažení posledního testovaného vzorku ze zkušebního zařízení následovalo měření drsnosti povrchu pomocí výše zmíněné šablony. Provedlo se celkem 160 měření (80 pro směr 0° a 80 pro směr 90° vůči směru válcování) drsností povrchu na vzorcích. Na následujícím obr. 27 je zobrazen výsledný protokol z tribologického zkoušky protahování pásku. V záhlaví jsou vidět všechny nastavné parametry se zobrazením všech 10 vzorků a jejich výsledných sil.

Na obr. 27 je vložen graf z jednoho měření, kde je vidět působení jednotlivých kontaktních tlaků (4, 6, 8 a 10 MPa) na dráze 400 mm. Z hlediska prostoru jsou zobrazeny výsledné hodnoty sil v tabulce jen pro první dva kontaktní tlaky.



Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

Tribologie - test protahováním pásku

Vstupní hodnoty

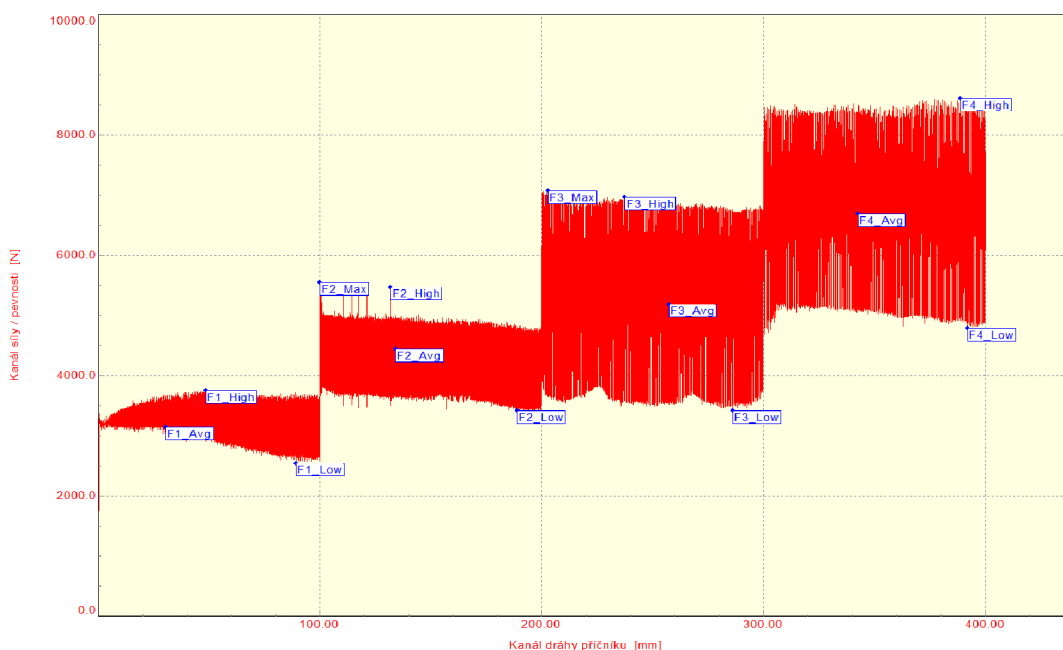
Testované mazivo : Anticorit PL 3802-39LV
Množství maziva : 1,5 ± 0,1 g/m²
Testovaný substrát : HDG
Drsnost povrchu : Ra=1,512/1,463 μm R_{Pc}=90/86 1/cm
Materiál nástroje : GGG 70L - kaleno
Kontaktní tlak : 4 - 6 - 8 - 10 MPa

Kontaktní plocha : 40 mm x 78 mm
Rychlost posuvu : 1 mm/s
Varianta : 1B
Teplota : 40°C
Rychlost snímání dat : 2 kHz
Měřená délka : 400 mm

Výstupní hodnoty

Zkouška	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	delta_F1 N	F2_Max N	F2_Avg N	F2_High N	delta_F2 N
1	3776	3187	3776	1178	5597	4378	5251	1744
2	3798	3140	3798	1196	5545	4438	5468	2059
3	4001	3292	3990	1397	5742	4450	5372	1844
4	4000	3300	4000	1399	5563	4295	5163	1735
5	4819	3726	4819	2186	6709	5119	6709	3180
6	3730	3184	3730	1093	5425	4389	5371	1964
7	3685	3160	3685	1049	5504	4412	5353	1881
8	5215	3919	5215	2591	5900	4676	5900	2449
9	3982	3304	3982	1357	5873	4559	5516	1913
10	5068	3818	5068	2500	5568	4409	5464	2109

Statistika	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	delta_F1 N	F2_Max N	F2_Avg N	F2_High N	delta_F2 N
Počet zkoušek	10	10	10	10	10	10	10	10
Průměrná hodnota	4201	3403	4200	1596	5752	4513	5556	2088
Směrodatná odchylka	594	298	594	594	370	237	450	436



Obr. 27 Protokol z tribologické zkoušky protahování pásku

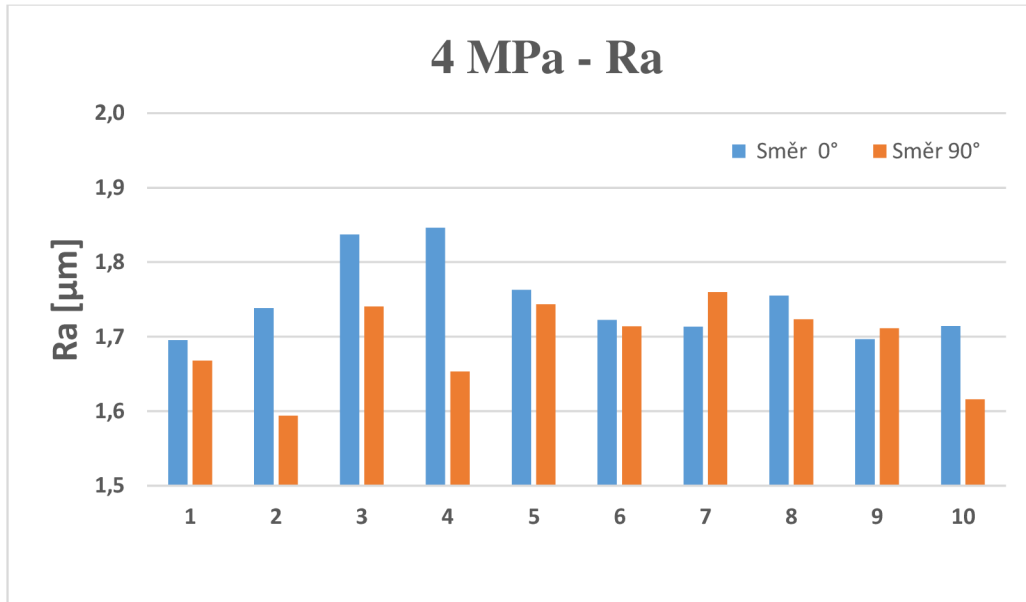
3.4 Vyhodnocení zkoušky

Na vyhodnocení zkoušky byl použit program Excel, kde byly zapsány všechny naměřené hodnoty. V rámci kontaktního tlaku 4 MPa jsou všechny naměřené hodnoty zapsány v tab. 4, kde jsou rozděleny podle parametrů (Ra, RPc), podle směru válcování (0°, 90°) a také podle čísla vzorku. Dole v tab. 4 je vypočtený aritmetický průměr a též příslušná výběrová směrodatná odchylka. Následné základní vyhodnocení se zobrazením všech výsledků kontaktních tlaků (aritmetického průměru a výběrové směrodatné odchylky) je vidět v tab. 5.

Tab. 4 Naměřené parametry drsnosti (Ra, RPc) povrchu pro kontaktní tlak 4 MPa

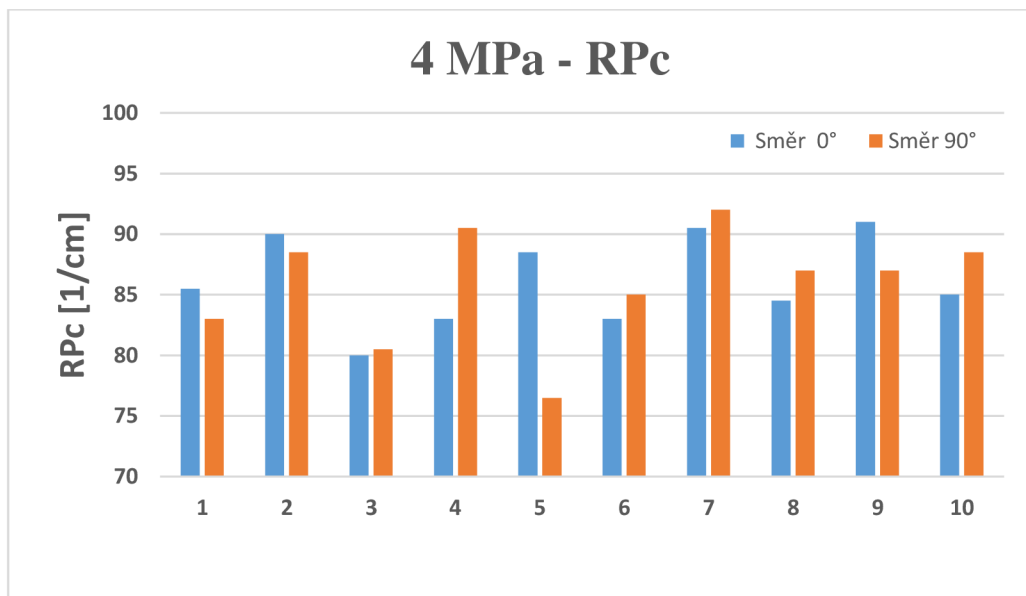
4 MPa					
Vzorek	Směr	Ra [μm]		RPc [1/cm]	
1	0°	1,673	1,718	84	87
	90°	1,597	1,739	84	82
2	0°	1,766	1,711	89	91
	90°	1,611	1,577	83	94
3	0°	1,754	1,92	82	78
	90°	1,76	1,721	79	82
4	0°	1,859	1,833	86	80
	90°	1,604	1,703	89	92
5	0°	1,746	1,78	90	87
	90°	1,759	1,728	75	78
6	0°	1,753	1,692	85	81
	90°	1,727	1,701	82	88
7	0°	1,716	1,711	90	91
	90°	1,716	1,804	95	89
8	0°	1,716	1,711	90	91
	90°	1,753	1,694	88	86
9	0°	1,679	1,714	93	89
	90°	1,756	1,667	93	81
10	0°	1,734	1,695	80	90
	90°	1,618	1,614	86	91
Výsledky					
Ari. průměr 0°		1,748 \pm 0,068		86 \pm 4	
Ari. průměr 90°		1,692 \pm 0,067		86 \pm 6	

V následujících grafech jsou vždy v rámci použitých směrů znázorněny dva sloupce, přičemž jeden značí směr válcování 0° (označen modrou barvou) a druhý značí 90° (kolmo na směr válcování a je označen oranžovou barvou). Na obr. 28 je grafické zobrazení střední aritmetické úchytky drsnosti (R_a) v závislosti na číslu testovaném vzorku pro kontaktní tlak 4 MPa.



Obr. 28 Závislost R_a na testovaném vzorku – kontaktní tlak: 4 MPa

Na obr. 29 je parametr drsnosti RP_c v závislosti na číslu testovaném vzorku pro kontaktní tlak 4 MPa.



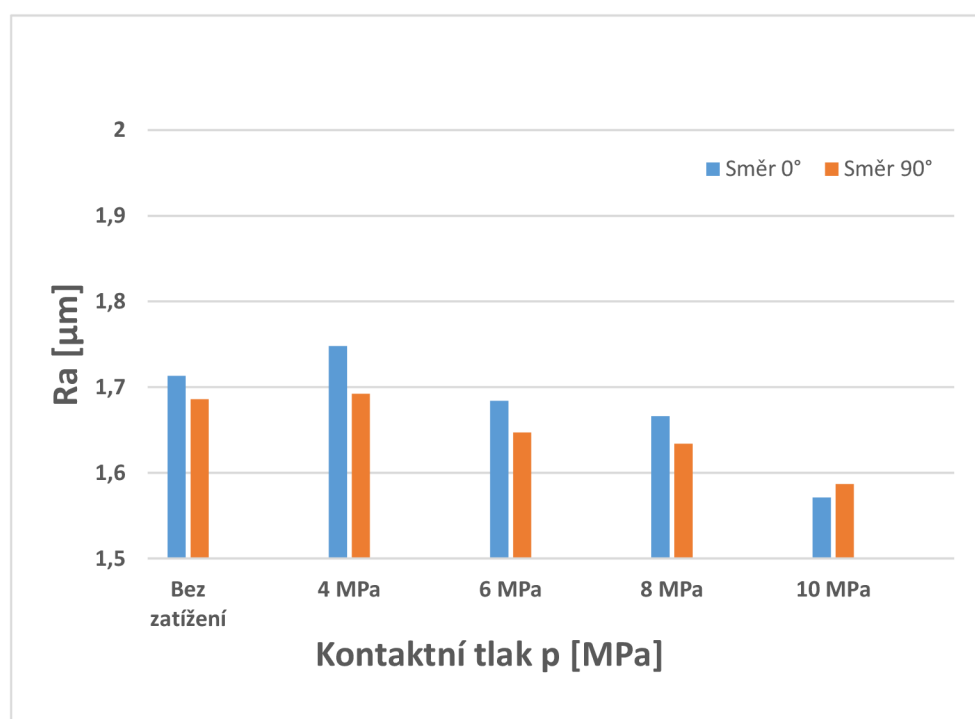
Obr. 29 Závislost RP_c na testovaném vzorku – kontaktní tlak: 4 MPa

V tab. 5 jsou uvedeny výsledky pro všechny použité kontaktní tlaky a také pro stav bez zatížení s vypočítaným aritmetickým průměrem a příslušnou výběrovou směrodatnou odchylkou. Stav bez zatížení znamená drsnost povrchu před zkouškou.

Tab. 5 Výsledky měřených parametrů drsnosti pro všechny použité kontaktní tlaky

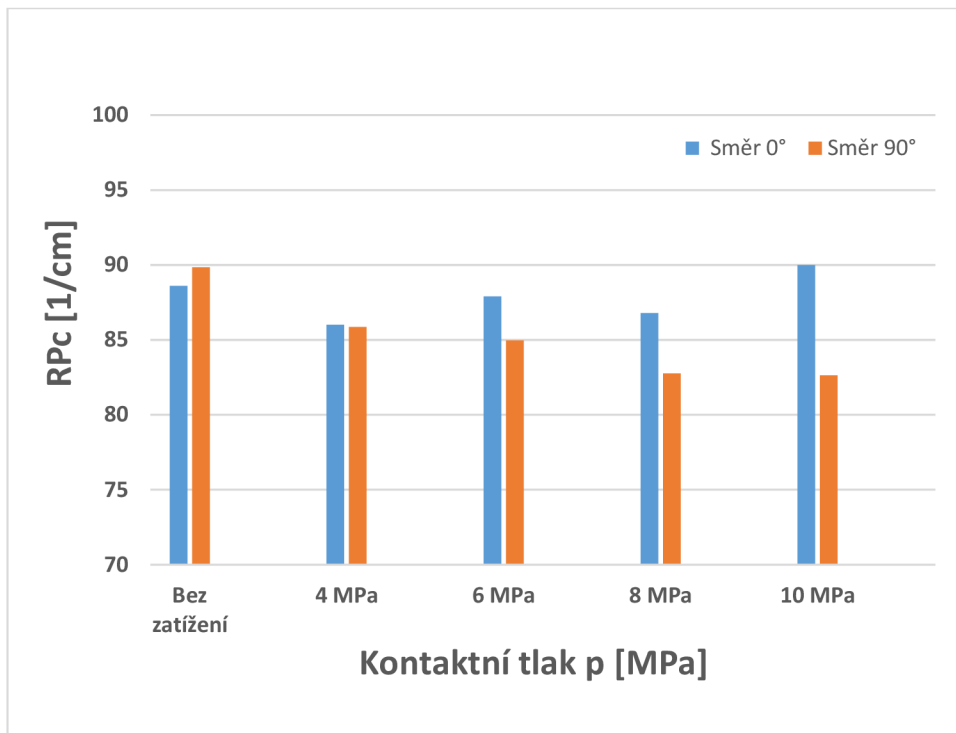
Tlak	Parametr	Směr 0°	Směr 90°
Bez zatížení	Ra [μm]	1,713 \pm 0,107	1,686 \pm 0,083
	RPc [1/cm]	89 \pm 6	90 \pm 4
4 MPa	Ra [μm]	1,748 \pm 0,068	1,692 \pm 0,067
	RPc [1/cm]	86 \pm 4	86 \pm 6
6 MPa	Ra [μm]	1,684 \pm 0,067	1,647 \pm 0,059
	RPc [1/cm]	88 \pm 5	85 \pm 4
8 MPa	Ra [μm]	1,666 \pm 0,087	1,634 \pm 0,051
	RPc [1/cm]	87 \pm 5	83 \pm 5
10 MPa	Ra [μm]	1,571 \pm 0,071	1,587 \pm 0,052
	RPc [1/cm]	90 \pm 5	83 \pm 5

V následující grafech jsou vždy v rámci použitých směrů znázorněny dva sloupce, přičemž jeden značí směr válcování 0° (označen modrou barvou) a druhý značí 90° (kolmo na směr válcování a je označen oranžovou barvou). Na obr. 30 je grafické zobrazení střední aritmetické úchyly drsnosti (Ra) v závislosti na všech testovaných kontaktních tlacích (4, 6, 8 a 10 MPa) a stavu bez zatížení.



Obr. 30 Závislost Ra na všech testovaných kontaktních tlacích a stavu bez zatížení

Na obr. 31 je parametr drsnosti RP_c v závislosti na všech testovaných kontaktních tlacích (4, 6, 8 a 10 MPa) a stavu bez zatížení.



Obr. 31 Závislost RP_c na všech testovaných kontaktních tlacích a stavu bez zatížení

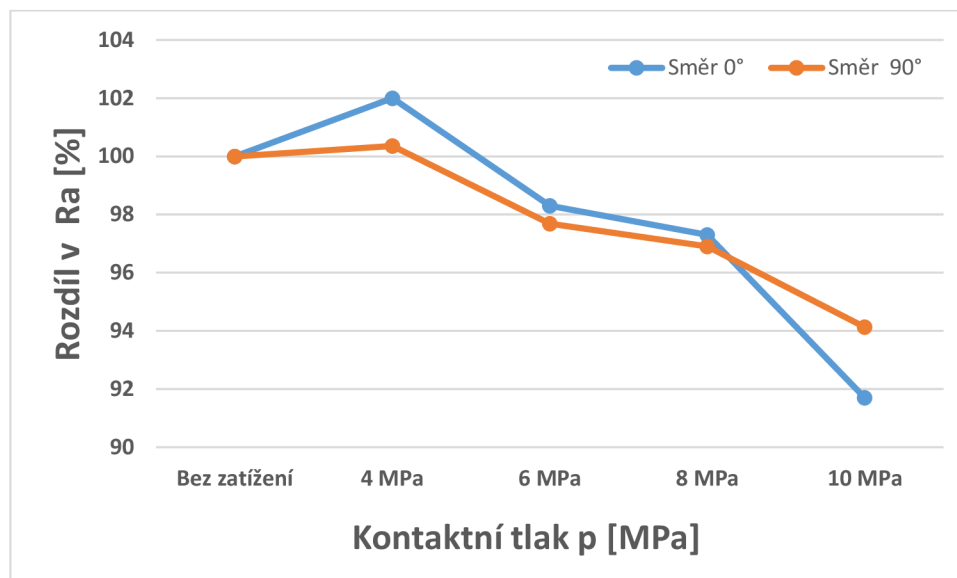
3.5 Popis porovnání změny drsnosti

V této kapitole se porovnávají naměřené výsledky. V tab. 6 se porovnává stav bez zatížení se všemi použitými kontaktními tlaky (4, 6, 8 a 10 MPa). Jak již bylo zmíněno dříve, stav bez zatížení značí naměřenou drsnost před provedenou zkouškou. V tab. 6 se jako 100 % bere zmíněný stav bez zatížení. Od této hodnoty se ostatní výsledky berou v procentuálním rozdílu.

Tab. 6 Porovnání stavu bez zatížení se všemi kontaktními tlaky

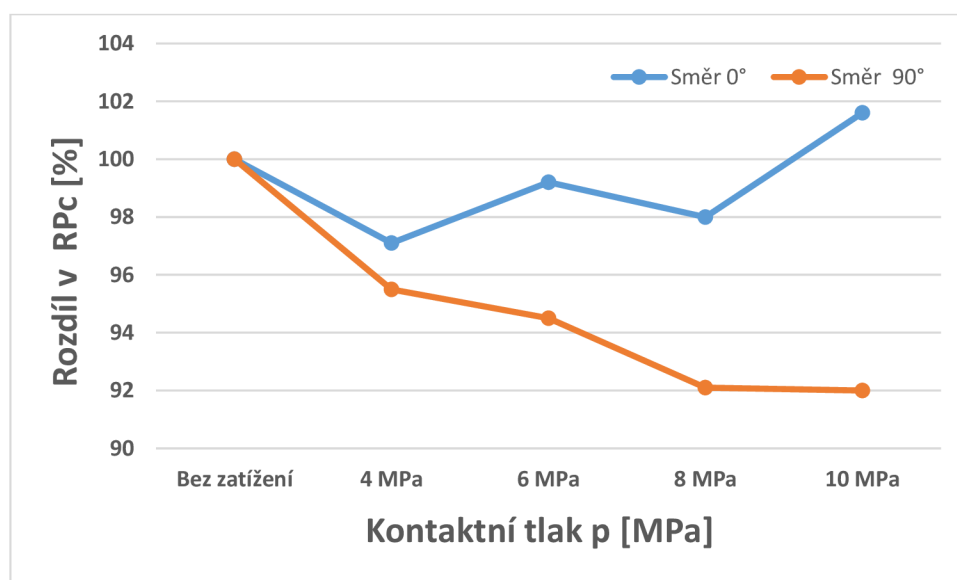
Tlak	Parametr	Směr 0°	Směr 90°
Bez zatížení	Ra [μm]	100,0 %	100,0 %
	RPc [1/cm]	100,0 %	100,0 %
4 MPa	Ra [μm]	102,0 %	100,4 %
	RPc [1/cm]	97,1 %	95,5 %
6 MPa	Ra [μm]	98,3 %	97,7 %
	RPc [1/cm]	99,2 %	94,5 %
8 MPa	Ra [μm]	97,3 %	96,9 %
	RPc [1/cm]	98,0 %	92,1 %
10 MPa	Ra [μm]	91,7 %	94,1 %
	RPc [1/cm]	101,6 %	92,0 %

V následující grafech jsou vždy v rámci použitých směrů znázorněny dvě čáry, přičemž jeden značí směr válcování 0° (označen modrou barvou) a druhý značí 90° (kolmo na směr válcování a je označen oranžovou barvou). V grafech se jako hodnota 100 % bere stav bez zatížení. Na obr. 32 je grafické zobrazení porovnání stavu bez zatížení a všech kontaktních tlaků (4, 6, 8 a 10 MPa) v procentuální závislosti na parametru Ra. Z grafu na obr. 32 je patrné, že s rostoucím kontaktním tlakem se zvětšoval procentuální rozdíl od stavu bez zatížení, a to v obou směrech válcování. Při kontaktním tlaku 10 MPa činí rozdíl od stavu bez zatížení ve směru válcování 0° skoro 9 %, ve směru válcování 90° je rozdíl 6 %.



Obr. 32 Porovnání stavu bez zatížení a všech kontaktních tlaků v závislosti na parametru Ra

Na obr. 33 je grafické zobrazení porovnání stavu bez zatížení a všech kontaktních tlaků (4, 6, 8 a 10 MPa) v procentuální závislosti na parametru RPc. V grafu na obr. 33 je vidět, že s rostoucím kontaktním tlakem pouze ve směru válcování 90° roste procentuální rozdíl od stavu bez zatížení. Při kontaktním tlaku 10 MPa je rozdíl 8 %. Je poněkud zajímavé, že ve směru válcování 0° se procentuální rozdíl skoro nemění a pohybuje se kolem hodnoty 100 %.



Obr. 33 Porovnání stavu bez zatížení a všech kontaktních tlaků v závislosti na parametru RPc

Všechny hodnoty vypočítaných dat se následně také podrobily analýze rozptylu (ANOVA – v tomto případě dvoufaktorová ANOVA). Test se prováděl na hladině významnosti $\alpha=5\%$. V následujících tab. 7 a 8 se pomocí p-hodnoty (popř. porovnání F a F_{krit}) určuje, zda má daný faktor statisticky významný vliv či nikoli. Faktor 1 (F1) představoval vliv směru válcování a faktor 2 (F2) představoval vliv kontaktních tlaků.

Tab. 7 Výsledky analýzy rozptylu (2F ANOVA) pro parametr Ra.

Faktor	p-hodnota	F	F_{kr}	Vyhodnocení
F1 – směr válcování	0,009	7,01	3,89	Má vliv
F2 – kontaktní tlaky	$3,25 \cdot 10^{-15}$	22,48	2,42	Má vliv
F1 – F2	0,275	1,29	2,42	Nemá vliv

1) Faktor F1 – vliv směru válcování

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5% **má směr válcování statisticky významný vliv** na změnu hodnoty parametru Ra.

2) Faktor F2 – vliv kontaktního tlaku

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5% **má kontaktní tlak statisticky významný vliv** na změnu hodnoty parametru Ra.

3) Faktor F1-F2 – vliv interakcí směru válcování a kontaktních tlaků

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5% **nemá interakce směru válcování a kontaktního tlaku statisticky významný vliv** na změnu hodnoty parametru Ra.

Tab. 8 Výsledky analýzy rozptylu (2F ANOVA) pro parametr R_{Pc}.

Faktor	p-hodnota	F	F _{kr}	Vyhodnocení
F1 – směr válcování	4*10 ⁻⁶	22,92	3,90	Má vliv
F2 – kontaktní tlaky	0,65	0,55	2,66	Nemá vliv
F1 – F2	0,01	3,86	2,66	Má vliv

1) Faktor F1 – vliv směru válcování

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5% **má směr válcování statisticky významný vliv** na změnu hodnoty parametru R_{Pc}.

2) Faktor F2 – vliv kontaktního tlaku

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5% **nemá kontaktní tlak statisticky významný vliv** na změnu hodnoty parametru R_{Pc}.

3) Faktor F1-F2 – vliv interakcí směru válcování a kontaktních tlaků

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5% **má interakce směru válcování a kontaktního tlaku statisticky významný vliv** na změnu hodnoty parametru R_{Pc}.

V tab. 9 jsou zapsána všechna vyhodnocení analýzy rozptylu (ANOVA) na hladině významnosti $\alpha=5\%$ pro oba sledované parametry drsnosti (R_a, R_{Pc}).

Tab. 9 Vyhodnocení statistického testování analýzy rozptylu

Parametr	Faktor	Vyhodnocení
R_a	F1 – směr válcování	Má vliv
	F2 – kontaktní tlaky	Má vliv
	F1-F2 – interakce	Nemá vliv
R_{Pc}	F1 – směr válcování	Má vliv
	F2 – kontaktní tlaky	Nemá vliv
	F1-F2 – interakce	Má vliv

4 Závěr

Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo zjistit, jestli se mění drsnost povrchu při změně kontaktních tlaků během lisování. K tomuto zjištění bylo zapotřebí simulovat proces lisování. V laboratořích byla použita tribologická zkouška protahováním pásku, která přibližuje tento proces. Experiment se prováděl v laboratoři KSP.

V teoretické části byly popsány parametry drsnosti a povrchové úpravy. V experimentální části bakalářské práci se zjišťovaly změny parametru drsnosti povrchu během tribologické zkoušky protahováním pásku. Pro vyhodnocení tohoto experimentu byly použity následující dva parametry drsnosti – Ra a RPC. Použitý materiál na tribologickou zkoušku protahováním pásku byl HDG plech (žárově pozinkovaný). Na tribologickou zkoušku byly použity tyto kontaktní tlaky: 4, 6, 8 a 10 MPa.

Z výsledných naměřených hodnot, které byly zapsány graficky a poté ověřeny analýzou rozptylu bylo zřejmé, že se výsledky ohledně změn parametrů Ra a RPC z hlediska kontaktního tlaku poněkud liší. U parametru Ra se drsnost povrchu podle předpokladu snižovala s rostoucím kontaktním tlakem, a to v obou směrech válcování (viz obr. 32). Ověření analýzou rozptylu se potvrdilo, že na změnu parametru Ra má na hladině významnosti 5% statisticky významný vliv jak kontaktní tlak tak směr válcování (viz tab. 7). Na druhou stranu již z grafického a procentuálního rozdílu byl vidět odlišný trend u parametru RPC. Po ověření analýzou rozptylu se zjistilo, že na změnu parametru RPC má na hladině významnosti 5% staticky významný vliv směr válcování (viz tab.8). Z hlediska výsledku ANOVY nemá kontaktní tlak na hladině významnosti 5% statisticky významný vliv. Naopak výsledek vzájemné interakce ukázal, že i v případě parametru RPC existuje statistický vzájemný vliv, což již bylo graficky naznačeno na obr. 33.

Výsledek u parametru RPC nebyl předpokládán a vyšel poněkud překvapivě. Aby byla možnost říci, že tento vliv kontaktního tlaku na parametr RPC není, je potřeba do budoucna udělat širší množství experimentů, které by tento trend potvrdily nebo vyvrátily, a to na stejném materiálu a za stejných podmínek. Do budoucna by bylo vhodné provést i tribologické testování kontaktního tlaku na změnu parametru drsnosti za jiných podmínek, jako je např. jiná rychlost, jiný druh a množství naneseného maziva (použití tažného oleje) atd. Mimo jiné také vyzkoušet jinou povrchovou úpravu plechu a vliv teploty na změnu, v případě použití menší plochy čelistí pro využití vyšších kontaktních tlaků.

5 Seznam literatury

- [1] KAREL SLANEC, 1938-. *Základy konstruování : geometrická přesnost*. 1996.
- [2] Parametry drsnosti. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. [vid. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [3] BUMBÁLEK, B, V ODVODY a B OŠTÁDAL. *Drsnost povrchu*. B.m.: SNTL Praha, 1989.
- [4] Parametry drsnosti. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. [vid. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [5] MULLER, Karel. *1.1 Povrchy povlaků - mikrogeometrie* - [online]. [vid. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11452301-1-1-povrchy-povlaku-mikrogeometrie.html>
- [6] T8000 Drsnoměr. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. [vid. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/produkty/mereni-drsnosti-kontury/t8000-drsnomer/>
- [7] KAŤUCH, Petr. *Drsnost' povrchu - dotykové a bezdotykové metody merania* [online]. B.m.: Studijní podklady k předmětu Metrologie. Katedra biomedicínského inženýrstva a merania TU v Košiciach 2011. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/smetrologia/navody/uloha10.pdf>
- [8] NOVÁK, SVOBODA, Zdeněk. *Přednosti prostorového hodnocení textury povrchu v praxi* [online]. [vid. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prednosti-prostoroveho-hodnoceni-textury-povrchu-v-praxi.html>
- [9] BLAŠKOVIČ, Pavel, Jozef BALLA a Marián DZIMKO. *Tribológia*. B.m.: Alfa, 1990. ISBN 978-80-05-00633-3.
- [10] *Tribotechnika*. B.m.: Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [11] BHUSHAN, Bharat. *Introduction to Tribology*. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [12] HELEBRANT, F, L HRABEC a J BLATA. *Tribologie, základní pojmy* [online]. B.m.: Studijní podklady k předmětu Provoz, diagnostika a údržba strojů. K340 TU v Ostrav 2013. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Provoz-diagnostika-a-udrzba-stroju-studijni-material.pdf>
- [13] KOHOUT, Ladislav. *Porovnání koeficientu tření zjišťovaného při tribologickém testu za různých podmínek regulací tlaku*: B.m.: Diplomová práce. Liberec: technická univerzita. 2007
- [14] LUDEMA, Kenneth C. *Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology*. B.m.: CRC Press, 1996. ISBN 978-0-8493-2685-1.

- [15] TOTTEN, George E. a Robert W. BRUCE. *Handbook of Lubrication and Tribology*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. 2nd ed. ISBN 978-0-8493-2095-8.
- [16] SUCHÁNEK, J. Opatřebení materiálu. *Článek v časopise Tribotechnika* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42009/opotrebeni-materialu.html>
- [17] ŠTĚPINA, Václav a Václav VESELÝ. *Maziva v tribologii*. B.m.: Bratislava: Veda, 1985.
- [18] KOLÁŘ, Jaroslav. *Vliv tlaku na velikost koeficientu tření mazadel používaných v automobilovém průmyslu*. B.m.: Diplomová práce. Liberec: technická univerzita. 2006
- [19] STACHOWIAK, Gwidon a Andrew W. BATCHELOR. *Engineering Tribology*. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [20] TULKA, Jaromír. *Povrchové úpravy materiálů*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2005. ISBN 978-80-214-3062-4.
- [21] SEDLÁČEK, Vladimír. *Povrchy a povlaky kovů*. B.m.: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 978-80-01-00799-0.
- [22] *Příručka žárového zinkování*. B.m.: 3. vydání. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven. listopad 2009
- [23] BROZOVÁ, Veronika. *Vliv nových typů povrchových úprav plechů na kvalitu lepených spojů při stavbě karoserie osobních automobilů*. B.m., 2012. Diplomová Práce. Technická Univerzita v Liberci.
- [24] MARQUARD, Elizabeth a Heather LAMPMAN. *ASM Handbook, Vol. 14b: Metalworking: Sheet Forming*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2006. ISBN 978-0-87170-710-1.
- [25] HAVRÁNKOVÁ, Zdenka. Žárové zinkování ponorem - Základní informace pro uživatele. *Konstrukce* [online]. 2006, **2005**(3). Dostupné z: <http://www.acsz.cz/clanek/zarove-zinkovani-ponorem-zakladni-informace-pro-uzivatele/>
- [26] LORENC, David. *Návrh optimální chemické předúpravy před aplikací katarforetické nátěrové hmoty pro automobilový průmysl*. B.m., 2020. Diplomová Práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [27] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. B.m.: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.
- [28] TSCHAETSCH, H. *Metal forming practise: Processes - Machines - Tools*. New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.