

# Statistické hodnocení životnosti razníku

Bc. Vilém Crhonek

---

Diplomová práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vilém Crhonek**  
Osobní číslo: **T22361**  
Studijní program: **N0788A270007 Řízení jakosti**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Statistické hodnocení životnosti razníku**

## Zásady pro vypracování

- Vypracování rešerše na zadané téma.
- Proměření jakosti povrchů zadaných vzorků.
- Nalezení vhodných statistických metod pro hodnocení životnosti razníku

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.

WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.

AGGARWAL, Charu C. *Neural networks and deep learning: a textbook*. Cham: Springer, [2018].

GRAUPE, Daniel. *Deep learning neural networks: design and case studies*. Singapore: World scientific, [2016]. ISBN 978-981-3146-44-0.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Vladimír Pata**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta



## **ABSTRAKT**

Cílem práce je nalézt vhodnou statistickou metodu pro analýzu opotřebení razníku. Práce kombinuje teoretický přehled faktorů ovlivňujících životnost nástrojů s praktickým šetřením, které zahrnuje měření amplitudového parametru drsnosti PV na dosedací ploše razníku během výroby padesáti tisíc kusů. Data byla zpracována prostřednictvím metod regresní analýzy, z níž vyplynulo, že opotřebení dosedací plochy razníku se ve snímaném intervalu vyvíjí lineárně. Na základě experimentu a výsledků, bylo doporučeno prodloužení intervalu broušení pod podmínkou zavedení pravidelného čištění v průběhu výroby.

Klíčová slova: jakost povrchu, opotřebení, životnost nástroje, statistika, regresní analýza, optimalizace

## **ABSTRACT**

The aim of the work is to find a suitable statistical method for wear analysis and to propose more effective grinding and maintenance intervals based on the data obtained. The thesis combines a theoretical review of the factors affecting tool life with a practical investigation, which included the measurement of the amplitude parameter of PV roughness at the punch contact area during the production of fifty thousand pieces. The data were processed through regression analysis methods, which showed that the wear of the punch seating surface develops linearly over the scanning interval. Based on the experiment and the results, it was recommended to extend the grinding interval under the condition of introducing regular cleaning during production.

Keywords: surface quality, wear, tool life, statistics, regression analysis, optimization

Tímto bych chtěl poděkovat firmě KALINA industries s.r.o., Ing. Janu Řezníčkovi za příjemnou spolupráci a poskytnutí finanční podpory v době přípravy experimentu i při jeho provedení. Především pak děkuji panu prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za jeho odborné vedení a cenné rady při tvorbě této diplomové práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ KOVŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 PRINCIP TVÁŘENÍ KOVŮ.....	12
1.1.1 Napětí a napjatost.....	13
1.1.2 Napjatost ve stříhu.....	13
1.1.3 Plastická deformace .....	14
1.2 ROZDĚLENÍ TVÁŘECÍCH TECHNOLOGIÍ .....	14
<b>2 STRÍHÁNÍ</b> .....	<b>15</b>
2.1 ROZDĚLENÍ STRÍHÁNÍ .....	15
2.2 PRINCIP STRÍHÁNÍ.....	15
2.3 STRÍŽNÁ SÍLA .....	16
2.4 STRÍŽNÁ VŮLE.....	17
2.5 KVALITA STRÍŽNÉ PLOCHY .....	18
2.6 STRÍŽNÉ NÁSTROJE.....	21
2.7 ROZDĚLENÍ STRÍŽNÝCH NÁSTROJŮ .....	21
2.7.1 Jednoduché střížné nástroje.....	21
2.7.2 Postupové střížné nástroje.....	22
2.7.3 Sloučené střížné nástroje.....	22
2.7.4 Sdružené střížné nástroje.....	22
2.7.5 Třída A .....	23
2.7.6 Třída B .....	23
2.7.7 Třída C .....	23
2.8 SESTAVA STRÍŽNÉHO NÁSTROJE .....	23
2.8.1 Ravníky .....	24
<b>3 ŽIVOTNOST STRÍŽNÉHO NÁSTROJE</b> .....	<b>25</b>
3.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ŽIVOTNOST NÁSTROJE.....	25
3.2 OPOTŘEBENÍ PRACOVNÍCH ČÁSTÍ STRÍŽNÉHO NÁSTROJE .....	26
3.2.1 Typy opotřebení .....	26
3.3 DRSNOST POVRCHU A JEJÍ VLIV NA OPOTŘEBENÍ .....	27
3.3.1 Měření drsnosti povrchu .....	27
3.4 MOŽNOSTI OPTIMALIZACE ŽIVOTNOSTI.....	28
3.5 SOUČASNÉ METODY SNÍMÁNÍ OPOTŘEBENÍ.....	28
3.5.1 Akustická emise .....	29
3.5.2 Zkoumání opotřebení abrazí pomocí AE .....	30
<b>4 NEURONOVÉ SÍTĚ</b> .....	<b>31</b>

4.1	ARCHITEKTURA NEURONOVÝCH SÍTÍ.....	31
4.2	UČENÍ.....	31
<b>5</b>	<b>REGRESNÍ ANALÝZA .....</b>	<b>33</b>
5.1	PROSTÁ LINEÁRNÍ REGRESE.....	33
5.2	OMEZENÍ .....	35
<b>6</b>	<b>LOGARITMICKÁ REGRESE.....</b>	<b>36</b>
6.1	LOGARITMICKÁ FUNKCE .....	36
6.2	APROXIMACE LOGARITMICKOU FUNKCÍ .....	37
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENT .....</b>	<b>40</b>
7.1	METODIKA .....	40
7.1.1	Lis.....	40
7.1.2	Razník .....	41
7.1.3	Materiál .....	41
7.1.4	Výrobek.....	42
7.2	MOTIV EXPERIMENTU.....	42
7.3	METROLOGICKÝ POSTUP .....	43
7.3.1	Obecný postup – <i>schéma</i> .....	43
7.3.2	Měření oblasti razníku.....	44
7.3.3	Tvorba programu.....	45
7.4.1	Snímky povrchu .....	46
7.4.2	Řezy povrchem.....	47
<b>8</b>	<b>STATISTICKÉ HODNOCENÍ.....</b>	<b>50</b>
8.1	EDA – EXPLORAČNÍ ANALÝZA DAT.....	50
8.1.1	Time series plot – Diagram časového vývoje měření .....	51
8.1.2	Histogram.....	52
8.1.3	Boxplot – Krabicový graf.....	52
8.1.4	Numerické výsledky.....	53
8.1.5	EDA – shrnutí .....	53
8.2.1	Výsledky testování normality .....	54
8.3	GRUBBSŮV TEST ODLEHLÝCH HODNOT .....	55
8.3.1	Grubbsův test odlehlých hodnot – 10RI.....	55
8.3.2	Grubbsův test odlehlých hodnot – 20LI.....	56
8.3.3	Grubbsův test odlehlých hodnot – 20RI.....	56
8.3.4	Grubbsův test odlehlých hodnot – 30LI.....	57
8.4	SOUBORY DAT PRO PRŮBĚH OPOTŘEBENÍ .....	57
8.4.1	Aritmetické průměry výběrových souborů .....	58
8.4.2	Soubory dat pro regresní analýzu.....	58
8.5	REGRESNÍ ANALÝZA.....	60
8.5.1	Regresní model – oblast LO.....	60

8.5.2	Regresní model – oblast LI .....	63
8.5.3	Regresní model – oblast RI .....	65
8.5.4	Regresní křivka – oblast RO .....	66
8.6	POROVNÁNÍ REGRESÍ.....	68
8.6.1	Chow test – LO a RO .....	68
8.6.2	Chow test – LI a RI .....	69
8.6.3	Chow test – LO a LI.....	70
8.6.4	Chow test – RO a RI .....	70
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>72</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>74</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>78</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>79</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>82</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>83</b>

## ÚVOD

Zvyšující se požadavky na přesnost a kvalitu výrobků byly impulsem pro důkladné zaměření se na opotřebení nástrojů. V současném průmyslovém prostředí je vyvíjen neustálý tlak na zvyšování efektivity a snižování nákladů. Především pak v případě otázky životnosti nákladných střížných nástrojů. Ve spojitosti s tím se stává v oblasti plošného tváření zajímavým tématem pokročilá údržba nástrojů a její optimalizace.

Tato diplomová práce se vyznačuje komplexním přístupem k životnosti nástrojů, zkoumá strategie snímání opotřebení nástrojů a hledá vhodné statistické metody pro hodnocení vývoje opotřebení. Cílem teoretické části je poskytnout celistvý pohled na problematiku životnosti nástrojů, identifikovat klíčové faktory, které ovlivňují jejich opotřebení a účinnost.

Praktická část práce je zaměřena na empirické šetření opotřebení razníku prováděné v průmyslovém podniku KALINA industries s.r.o. ve Zlíně. Jako stážista na oddělení kvality jsem se intenzivně zabýván otázkami kvality výrobků, metrologie a aplikovaných metod řízení kvality, které mě přivedli k experimentu. Daný razník byl vybrán, protože v rámci této výroby byl pozorován rychlý vývoj opotřebení, a zároveň pokles jakosti výrobků, což vedlo k častému broušení nástroje. Interval údržby byly nastaveny stejně jako pro výrobu ze svitků z kalené pružinové oceli, což se vzhledem k poddajné povaze zpracovávaného těsnícího materiálu nabízelo k důkladnějšímu prozkoumání. Data byla získávána měřením povrchu dosedací plochy razníku profilometrem. Následně byla data analyzována prostřednictvím statistických metod řízení jakosti, konkrétně regresní analýzy. Jako míra opotřebení byl zvolen amplitudový parametr drsnosti PV. Cílem práce je nalézt optimální funkci, která aproximuje závislost míry opotřebení na počtu vyrobených kusů a v návaznosti na to navrhnout interval broušení a údržby, které povedou k prodloužené životnosti nástroje a udržitelné kvalitě výrobků.

Výsledky této práce mají poskytnout ucelený přehled o tom, jak důsledná údržba a monitorování opotřebení nástrojů může vést k prodloužení jejich životnosti a značným úsporám v rámci provozních nákladů.

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ KOVŮ

Technologie tváření kovů lidstvo využívá nejméně čtyři tisíce let. Hlavním krokem k zpracování kovů bylo až dosažení schopnosti jejich výroby z příslušných rud. Následně přišla doba bronzová, která má počátky v Malé Asii a v Egyptě, což se odehrávalo okolo tří tisíc let před naším letopočtem. O dalších tisíc let se rozšířila do celého středomoří a do jižní Evropy. Ve střední Evropě se znalost bronzu objevuje asi o tři sta let později [1]

## 1.1 Princip tváření kovů

Tváření kovů představuje výrobní proces, během kterého se za použití vnějších sil mění tvar, případně vlastnosti, výrobku nebo polotovaru. Důležitou charakteristikou je, že nedochází k úběru třísky. Proces tváření je založen na vzniku plastických deformací, jež nastanou, když materiál dosáhne své meze kluzu, tedy okamžiku, kdy je překročeno příslušné napětí. Tento proces způsobuje změny ve fyzikálních vlastnostech a struktuře materiálu, což má za následek ovlivnění mechanických vlastností zpracovávaného materiálu. [1]

Důležité definice

- Tvařitelnost – schopnost materiálu podléhat plastické deformaci do porušení soudržnosti materiálu.
- Metalurgická tvařitelnost – vyjadřuje, jak metalurgiční činitelé ovlivňují tvařitelnost při určitých termomechanických podmínkách.
- Technologická tvařitelnost – vyjadřuje vliv dané technologie tváření na pravděpodobnost vzniku trhliny. Je ovlivněna především stavem napjatosti a vnějším třením. Tvařitelnost pro konkrétní technologie jsou např. válcovatelnost, kovatelnost, tažitelnost.
- Plastičnost – popisuje schopnost materiálu se plasticky deformovat. Mírou plasticity je dosažený stupeň deformace za různých termomechanických podmínek do porušení soudržnosti).
- Deformace – je změna tvaru, velikosti nebo objemu materiálu v důsledku působení vnějších sil, napětí. Deformace může být elastická, což znamená, že materiál se po odstranění vnějších sil vrátí do svého původního stavu, nebo plastická, kdy jsou změny trvalé a materiál se do původního tvaru nevrátí. [1]



### 1.1.1 Napětí a napjatost

Napětí a napjatost jsou základní pojmy používané v mechanice pevných těles a materiálovém inženýrství k popisu reakce materiálu na vnější zatížení. [2]

- Napětí – Napětí je definováno jako intenzita síly  $F$  v daném bodě.

$$\sigma = \frac{\partial F}{\partial A}; \text{ as } \partial A \rightarrow 0, \quad (1.1)$$

kde  $A$  je plocha, na kterou síla působí. Pokud je síla všude stejná pak platí:

$$\sigma = \frac{F}{A}; [\text{N} \cdot \text{m}^{-2}], [\text{Pa}] \quad (1.2)$$

Napětí může být normálové (působící kolmo na plochu) nebo smykové (působící rovnoběžně s plochou). Napětí ilustruje, jak velké síly působí v materiálu a je klíčové pro pochopení, jak materiál reaguje na aplikované zatížení, či zda dojde k jeho deformaci nebo porušení. [2]

- Napjatost je míra deformace materiálu v důsledku působícího napětí. Popisuje relativní změnu tvaru nebo velikosti materiálu a obvykle se vyjadřuje bez jednotek jako poměr. Napjatost může být normálová nebo smyková. Napjatost nám pomáhá pochopit, do jaké míry byl materiál deformován. [2]

### 1.1.2 Napjatost ve stříhu

Pod plochou střížníku a nad střížnicí vzniká v materiálu prostorová napjatost s 3 složkami napětí – dvě tlakové a jedno tahové. Ve střížné ploše vzniká rovinná napjatost vlivem tahu a tlaku. V případě stříhu bez střížné vůle působí v počátku střížného procesu čistý smyk. V praxi ovšem čistého smyku dosáhnout nelze a vždy vzniká kombinované namáhání, které má vliv na životnost střížníku. [6]

Svislým střížným pohybem střížníku dochází ke stlačení a prodloužení vláken a zároveň k jejich ohybu. Hlavní osy deformace jsou natáčeny vůči původnímu směru. Největších deformací je dosaženo ve vrstvách u střížných hran vlivem natočení hlavních os deformací. Nejmenších pak uprostřed střížné plochy. Při stříhu dochází také k napětím působícím opačným směrem. Taková napětí jsou nazvána přídatná a jsou způsobena plastickými deformacemi materiálu. Skutečné napětí je složením hlavních a přídatných napětí. Z toho

důvodu i při čistém smyku a stříhání bez vůle se rovinná napjatost přemění na prostorovou. [2][7]

Stav napjatosti ve stříhu je ovlivněn velikostí deformace materiálu, velikostí střížné vůle a třecími silami. [7]

### 1.1.3 Plastická deformace

Při zpracování kovových materiálů tvářením je využíváno jejich plasticity. Plastická deformace je trvalá změna tvaru materiálu, která nastává, když je působící napětí vyšší než příslušná mez kluzu. Na rozdíl od elastické deformace, kde se materiál po odstranění zatížení vrací do původního tvaru, plastická deformace zanechává v materiálu stálé změny. Tento jev je způsoben pohybem dislokací v krystalové mřížce materiálu, což vede k přeuspořádání atomů a tím k novému, trvalému tvaru. Vznik a průběh plastické deformace je ovlivněn vlastnostmi jako jsou např. tvrdost, pevnost a tvařitelnost. [3]

## 1.2 Rozdělení tvářecích technologií

Technologii lze rozdělit na základě:

- Teploty (za studena, za tepla, za poloohřevu).
- Tepelného efektu (izotermický, adiabatický, polytropický).
- Stupně dosažené deformace (malý, velký, velmi vysoký).
- Působení vnějších sil

Z hlediska typu vnější síly se tváření kovů dělí na:

- Tváření objemové, kdy deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému. Hlavními zástupci se uvádí – válcování, kování, protlačování, tažení drátů.
- Tváření plošné, při kterém převládají deformace ve dvou směrech. Jako hlavní zástupci se udávají – stříhání, ohýbání a tažení. [6]

## 2 STŘÍHÁNÍ

Stříhání se řadí mezi nejvyužívanější metody tváření a je široce využíváno jak pro přípravné úkony, jako je krácení tabulí, řezání profilů, tak pro výrobu finálních dílů z plechu určených pro přímé použití nebo další zpracování technologiemi jako ohýbání nebo tažení. Vedle tradičního stříhání existuje mnoho dalších specializovaných technologií založených na střížném principu. Specializované jsou především střížné nástroje, které jsou o různých tvarech, velikostech v závislosti na složitosti vyráběného dílce. Vyráběné dílce plošným stříháním se nazývají výstřižky, nebo výlisky. [4] [5]

### 2.1 Rozdělení stříhání

Stříhání se může podle teploty procesu dělit:

- stříhání za studena – v případě měkčích ocelí nebo plechů.
- stříhání za tepla – tvrdší, tlustší materiály při teplotě okolo 700 °C. [6]

Dále můžeme stříhání dělit podle konstrukce nože:

- stříhání rovnoběžnými noži,
- skloněnými noži,
- kotoučovými noži,
- noži na profily a tyče. [6]

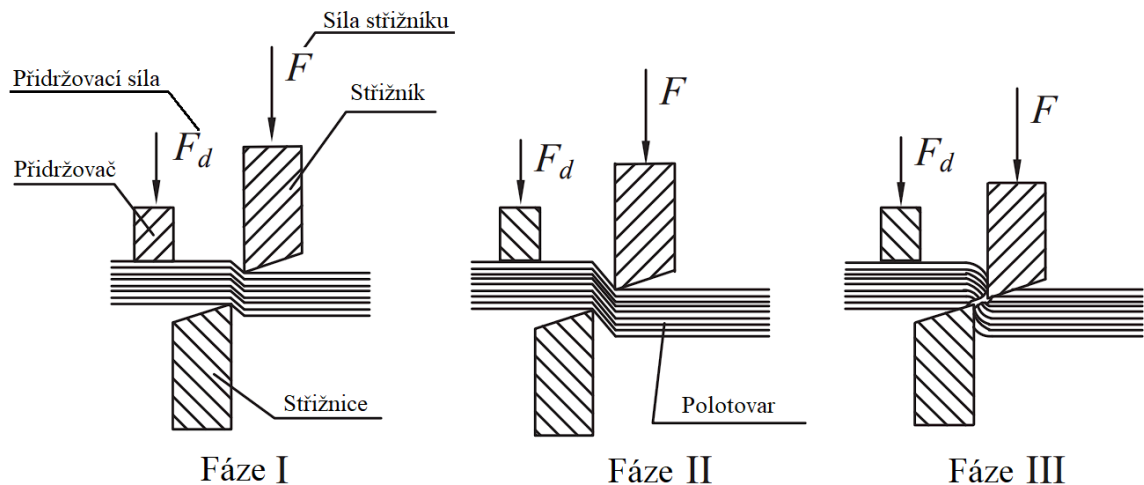
### 2.2 Princip stříhání

Stříhání je prováděno různými typy nožů či razníků ve strojích poháněných mechanickou, hydraulickou nebo pneumatickou silou – lisech. Obecně operace spočívají v pevném přidržení polotovaru a následným stříhem silou razníku, který se pohybuje svisle dolů kolem do matrice. [7]

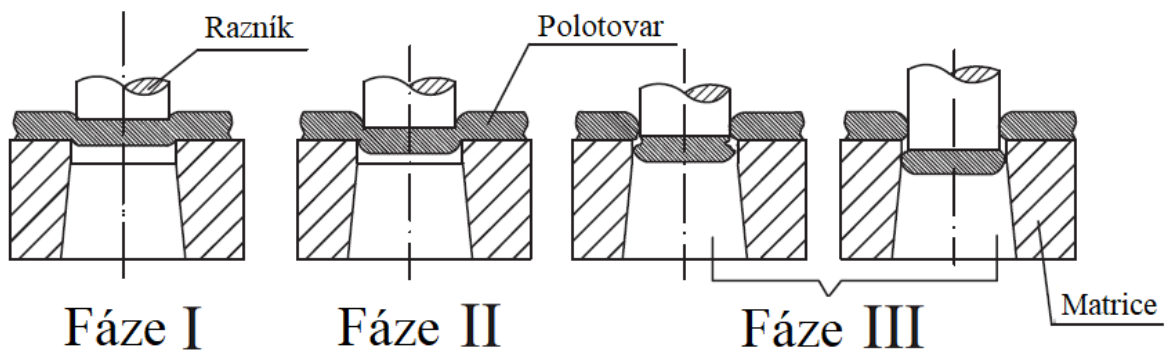
Během stříhu rozlišujeme tři hlavní fáze:

- V první fázi vzniká v materiálu nižší napětí, než je mez kluzu. To znamená, že dochází k pružným deformacím, kdy materiál přetéká do otvoru matrice. [7]
- Ve druhé fázi je síla dostatečně vysoká, aby napětí v materiálu překročilo mez kluzu, ale zůstává pod mezí pevnosti v tahu. To způsobí plastickou deformaci. Konec druhé fáze je definován růstem hodnoty napětí na úroveň meze pevnosti materiálu. [7]

- Ve třetí poslední fázi dosáhne napětí hodnoty vyšší než jen mez pevnosti materiálu a na hranách vznikají trhliny, což vede k definitivnímu utržení materiálu smykem. [7]



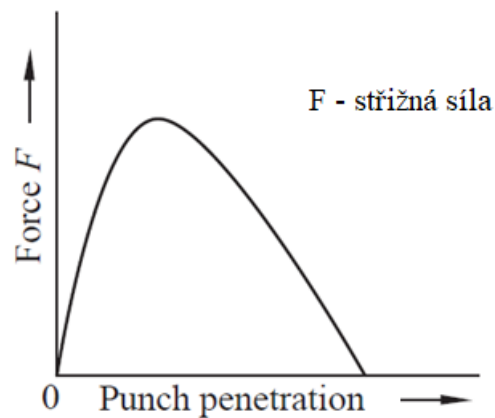
Obr. 1: Fáze stříhu [7]



Obr. 2 Střížné fáze na příkladu děrování [7]

### 2.3 Střížná síla

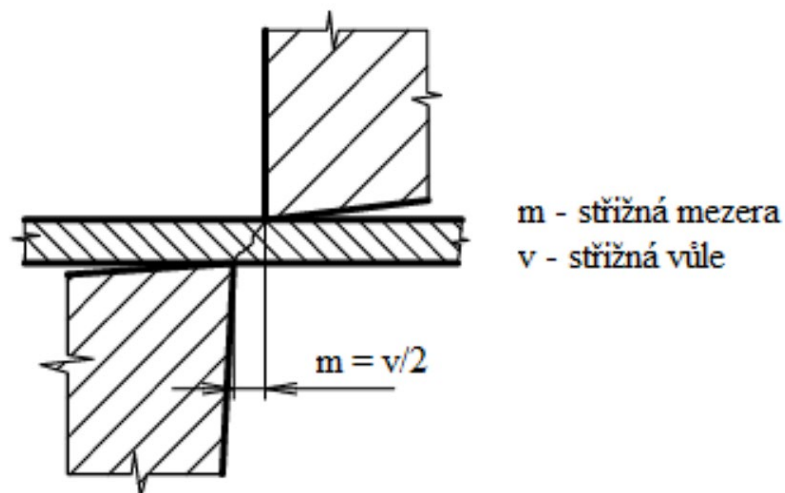
Střížná síla a její výpočet se liší v závislosti na typu střížníku. Obecně je stanoveno, že střížná síla je taková síla, které je zapotřebí pro vystřížení výrobku. To znamená, že střížná síla je vyšší než pevnost ve smyku materiálu. Velikost střížné síly není konstantní, jelikož se mění v závislosti na součinu střížného odporu a střížné plochy. Proto pokud je uvedena jedna hodnota střížné síly, pak se jedná o hodnotu maxima. [6][7]



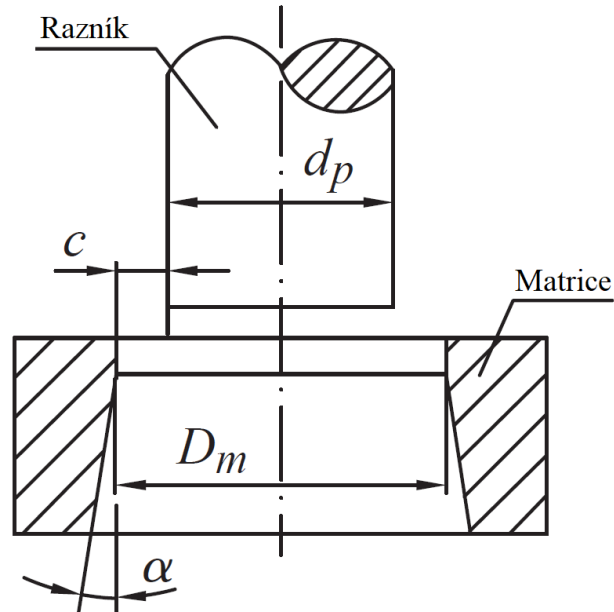
Obr. 3: Velikost střižné síly v závislosti na poloze razníku v tloušťce materiálu [4]

## 2.4 Střižná vůle

Zároveň s geometrií břitů, mechanickými vlastnostmi materiálu aj., je střižná vůle jedním z nejdůležitějších parametrů technologie stříhání. Má výrazný vliv na kvalitu střižné hrany a celé střižné plochy. Střižná vůle se rozumí rozdíl rozměrů střižníku a střižnice. Polovina střižné vůle je střižná mezera viz Obr. 4. Velikost střižné mezery je nutně po celé střižné křivce konstantní. V případě nekonstantní velikosti střižné mezery (nerovnoměrném rozložení střižné vůle) vznikají povrchové vady, prohnutí, ostřiny a nekvalitní střižná plocha. [8]



Obr. 4: Schéma střižná vůle, střižná mezera [10]



Obr. 5: Schéma střižné vůle pro případ děrování,  $c$ -střižná mezera,  $d_p$ -průměr razníku,  $D_m$ -průměr raznice,  $\alpha$ -úhel zkosení [4]

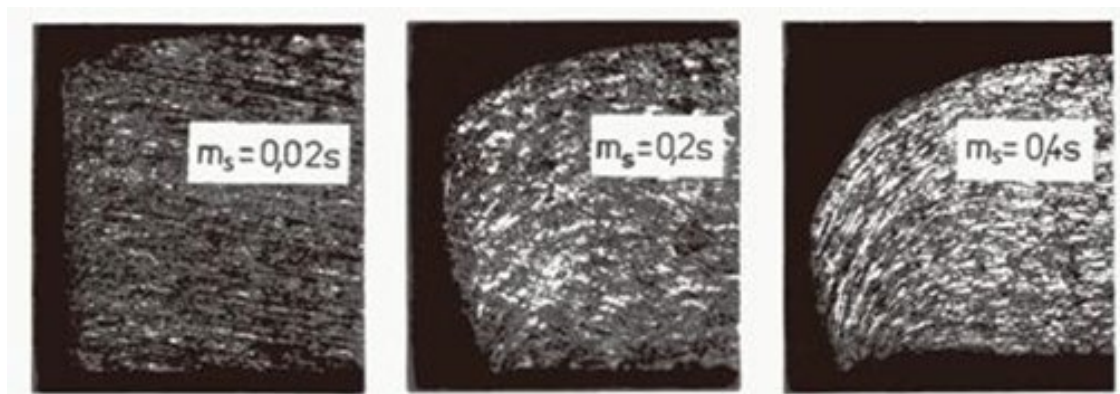
Optimální vůle zajistí, aby se spojily trhliny šířící se od protilehlých pracovních částí – střižnice, střižníku, a nevznikla nežádoucí ostrina. V případě příliš velké nebo malé střižné vůle se trhliny nespojí a dolomením vznikne nekvalitní střižná plocha. [9]

Střižná vůle se volí v závislosti na mezi pevnosti materiálu a jeho tloušťce. Například pro nízkouhlikové oceli se pohybuje velikost střižné vůle mezi 5 % – 12% tloušťky materiálu. [7]

## 2.5 Kvalita střižné plochy

Kvalita střižné plochy je předním ukazatelem úspěšnosti procesu ať se jedná o stříhání kovů, textilií nebo kaučuků. Nejedná se pouze o estetičnost, ale úzce souvisí i s funkčností a životností nástroje. Kvalitu střižné plochy ovlivňuje řada parametrů, mezi které patří:

- Optimální střižná vůle – je zásadní pro dosažení hladkého řezu. Příliš malá vůle může způsobit roztržení materiálu a příliš velká vůle může vést k deformaci okrajů řezu.



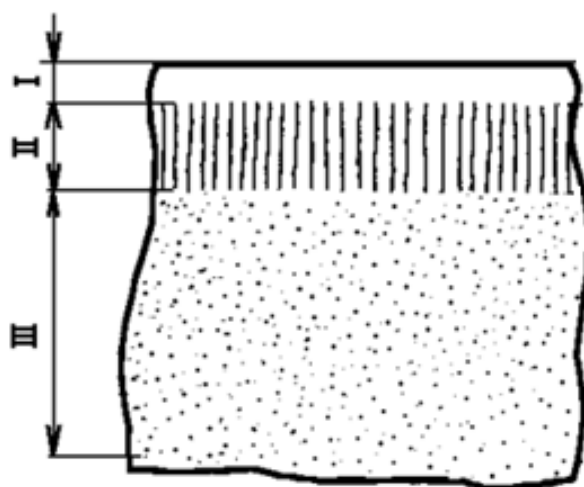
Obr. 6: Kvalita střižné plochy v závislosti na velikosti střižné mezery –  $m_s$ ,  
 $s$  – tloušťka materiálu [6]

Pokud je střižná vůle příliš malá, může to vést k nadměrnému tření mezi materiálem a střižnými nástroji, což zvyšuje potřebnou střižnou sílu a může způsobit zadření nebo dokonce trhliny na střižné ploše. Příliš malá střižná vůle nepříznivě ovlivňuje životnost střižného nástroje, resp. zvyšuje opotřebení. Naopak pokud je střižná vůle příliš velká, materiál může být během stříhání nekontrolovatelně deformován, což vede k nepravidelným nebo roztřepeným hranám. Také se může stát, že materiál nebude úplně ustřižen, což vede k nekvalitnímu řezu s nutností dodatečného opracování.[8]

- Ostré a dobře udržované nástroje – jsou nezbytné pro dosažení kvalitní střižné plochy. Otupené nebo poškozené nástroje mohou způsobit ostřiny a nekvalitní střižnou plochu.
- Vlastnosti materiálu – jako jsou: tloušťka, tvrdost a struktura, mají významný vliv na kvalitu řezu. Některé materiály jsou náchylnější k deformacím nebo trhlinám.
- Typ procesu stříhání – existují různé techniky stříhání (např. přesné stříhání, stříhání s přidržovačem), a každá z nich může mít specifické výsledky na kvalitu střižné plochy.
- Rychlost stříhání – může ovlivnit výslednou kvalitu střižné plochy, protože příliš rychlé stříhání může vést k vyššímu tepelnému namáhání a deformaci materiálu. [8]

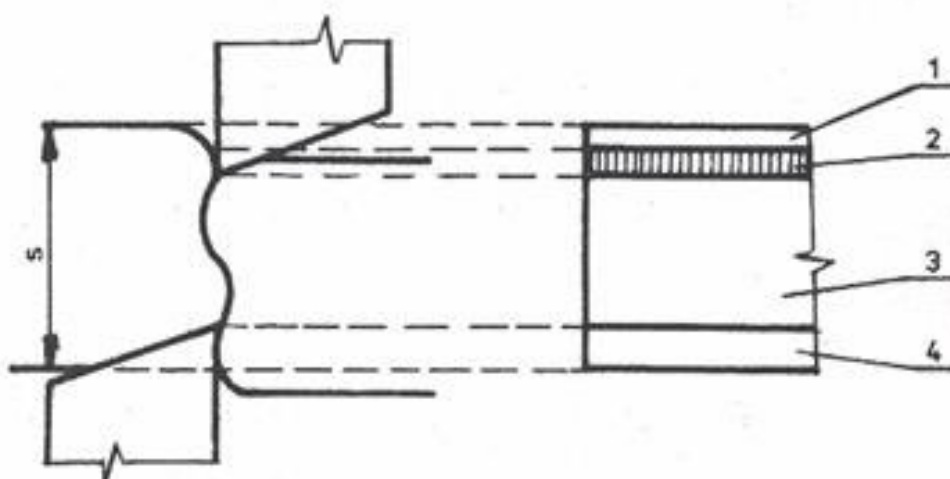
Kvalita se obvykle hodnotí podle hladkosti, rovnosti a absenci defektů například trhin, otřepů nebo deformací střižné plochy. Pro měření a analýzu kvality se mohou používat různé metody, včetně vizuální inspekce, dotykové a bezdotykové měření, jako je mikroskopie nebo skenování. Výsledná kvalita střižné plochy má přímý dopad na další zpracování materiálu,

montážní operace a celkovou kvalitu výsledného produktu, a proto je klíčová pro výrobní efektivitu a spokojenost zákazníka. [8]



Obr. 7: Nehomogenní povrch střížné plochy dle fází stříhu [8]

Utržení materiálu nastane dříve, než poloha dosedové plochy razníku dosáhne celkové tloušťky stříhaného materiálu, tedy poté je výstřížek je vytlačen. Z toho důvodu nejsou střížné plochy rovinné ani s homogenní drsností povrchu. To znamená, že se drsnost v různých pásmech na střížné ploše liší. Pásmo, ve kterém se objevují první tendence se trhat, mají vždy větší jiný povrch s větší drsností než ostatní pásma střížné plochy. K tvorbě těchto pásem dochází důsledkem pružnosti a tvárnosti materiálu. [6]



Obr. 8: 1 – pásmo pružné deformace, 2 – pásmo utržení, 3 – pásmo plastické deformace, 4 – pásmo vytlačení [6]



Proto v rámci stříhání nelze nikdy úplně zamezit následujícím:

- Nehomogenní povrch střížné plochy
- Zaoblení a zeslabení tloušťky výstřížku podél střížné plochy
- Zpevnění střížné plochy do určité hloubky [8]

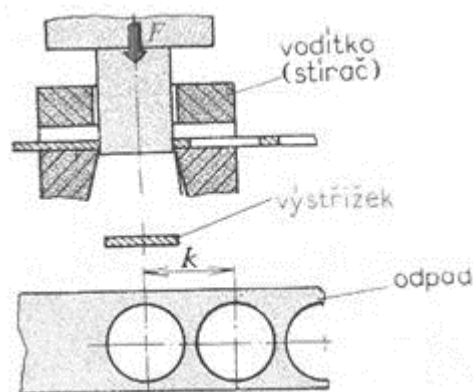
## 2.6 Střížné nástroje

Jedná se o komplexní sestavu přesných strojních součástí. Střížné nástroje mohou mít různé konstrukce v závislosti např. na typu střížné technologie, či zpracovávaném materiálu. Kvalitní design střížného nástroje zaručuje značnou efektivitu a přesnost výroby s vysokou opakovatelností. [4][5]

## 2.7 Rozdělení střížných nástrojů

Nejčastěji jsou střížné nástroje děleny dle vykonávané operace. Je možné je dělit i podle kvality vyrobených kusů a životnosti nástroje. [4]

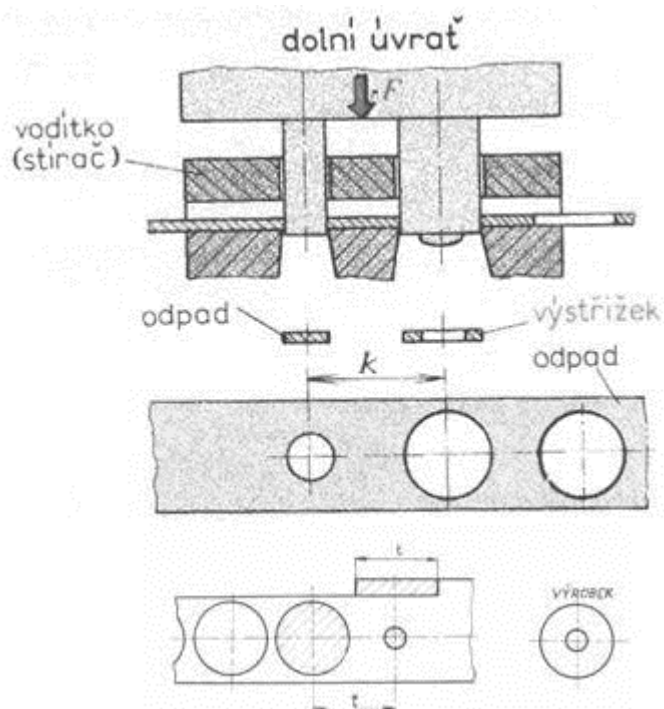
### 2.7.1 Jednoduché střížné nástroje



Obr. 9: Jednoduchý střížný nástroj [6]

Vykonávají jedinou operaci – výstřih tvaru. Poloha pásu bývá zpravidla zaručena dorazem, čímž je hodnota posuvu pevně nastavena, a tak je také stanovena vzdálenost jednoho kroku. V tomto případě bude velikost kroku velikost výrobku v součtu s technologickým přírůstkem – můstkem. [6]

### 2.7.2 Postupové střížné nástroje



Obr. 10: Postupový střížný nástroj [6]

Pomocí postupového střížného nástroje je výstřížek vyráběn postupně. To znamená, že výstřížek dosáhne své finální podoby až po více než jednom kroku, operaci. Počet kroků odpovídá počtu v případě jednořadého nástroje počtu střížníků. Nutné je použití načínacího dorazu pro vložení nového pásu. Na Obr. 10, kde posloupnost operací je zleva doprava, můžeme vidět, že v prvním kroku se jedná o děrovací operaci a je tak vytvořen vnitřní průměr výstřížku. V druhém kroku je vystříhnut vnější průměr finálního výstřížku, který má tvar mezikruží. [6]

### 2.7.3 Sloučené střížné nástroje

Sloučený střížný nástroj se konstruuje pro několik operací na jeden krok. V případě výroby mezikruží by došlo k děrování vnitřního průměru a vystříhnutí vnějšího průměru zároveň. V tomto případě je vhodné mít oddělený sběr odpadu a sběr výstřížků. [6]

### 2.7.4 Sdružené střížné nástroje

Sdružený střížný nástroj se konstruuje pro sdružení různých pracovních úkonů na jeden krok. Podobně jako u sloučeného teda dochází k více než jedné operaci na jeden zdvih, ale na rozdíl od sloučeného nejsou všechny operace stříhací. To znamená že je výrobek zároveň vystříhnut a ohnut nebo tažen během jednoho zdvihu. Takové nástroje vyžadují složitější

konstrukci. Existují také nástroje, které jsou označovány za sdružené postupové střižné nástroje. [6]

Způsobů dělení existuje více. Střižné nástroje lze dělit také podle kvality vyrobených kusů a životnosti nástroje. [4]

### **2.7.5 Třída A**

Střižné nástroje s dlouhou životností a vysokou přesností výroby. Používají pouze pro velkovýrobu. Komponenty jsou vyráběny z nejvhodnějších materiálů. Celá sestava nástroje je konstruována tak, aby komponenty s omezenou životností byly jednoduše vyměnitelné a jejich výměna měla minimální vliv na přesnost a opakovatelnost výroby. Hlavním aspektem při konstrukci střižného nástroje třídy A je životnost celého stříhadla a snadná údržba bez ohledu na zvýšené finanční náklady. [4]

### **2.7.6 Třída B**

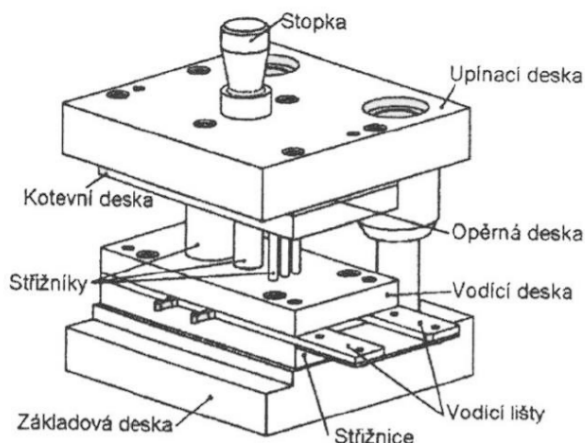
Stříhadla jsou použitelné pro středně velké výroby a jsou dimenzovány pro zhotovení stanoveného množství výrobků. Důležitým hlediskem se stávají náklady na nástroj ve vztahu k celkové výrobě. Materiály jsou vybírány s ohledem na požadovanou životnost, tudíž většinou se často nejedná o materiály nejvyšší kvality. V případě stříhadel třídy B není údržba a jednoduchá výměna prioritou. Prioritou je schopnost vyrobit stanovené množství výrobku, co nejlevněji. [4]

### **2.7.7 Třída C**

Spadají sem nejlevnější střižné nástroje, používané k výrobě malých objemů. Může se jednat o zakázkové výroby a podobně. [4]

## **2.8 Sestava střižného nástroje**

Existují stovky provedení střižných nástrojů. Provedení záleží na spoustu faktorech a celkově nastavení celého výrobního procesu. Většina střižných nástrojů se skládá nutně z pracovních částí nástroje – střižník, střižnice, dále z desek, které se ukotví k lisu. Mezi desky se řadí především deska upínací, kotevní, opěrná, vodící, základová, ale existují aplikace, které vyžadují i další desky jako je například stírací/vyhazovací, nebo odpruženou vodící a další. Mezi komponenty sestavy střižného nástroje mohou patřit také vodící sloupky, vodící lišty pro materiál, spojovací komponenty. [11] [12]



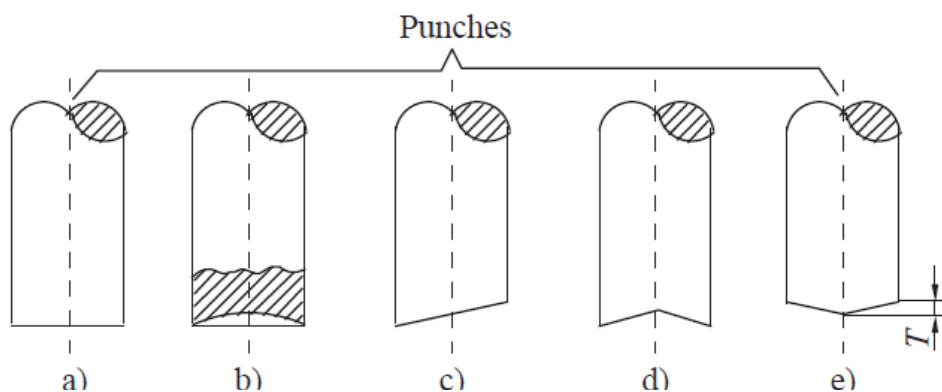
Obr. 11: Obecné schéma střížného nástroje [4]

### 2.8.1 Ravníky

Jedná se jednu ze dvou pracovních částí střížného nástroje. Pohyb ravníku se odehrává ve svislém směru. Osa ravníku je totožná s osou matrice, tudíž při již zmíněném svislém pohybu se ravník vnoří do matrice a důsledkem je ustříhnutí materiálu. [11]

K dispozici jsou standardizované ravníky pro širokou škálu různě tvarovaných otvorů. Nejčastěji se setkáváme s kulatými a obdélníkovými průřezy. Výrobci dodávají tyto ravníky ve standardních velikostech. Ovšem běžné jsou i výroby ravníků o specifických průřezích a tvarech na zakázku. Tři hlavní nároky na funkci ravníku jsou:

- 1) Při stříhání nedochází k prohnutí, ke vzpěru.
- 2) Dostatečná pevnost, která zaručí, že se ravník při vyhození výrobků stíracím mechanismem neodštěpí nebo nepraskne.
- 3) Nedochází k rotaci ravníku v důsledku střížného procesu. [4]



Obr. 12: Typy geometrie ravníků: a) ploché, b) konkávní, c) zkosené, d) vnitřní dvojité zkosení, e) vnější dvojité zkosení [4]

### 3 ŽIVOTNOST STŘIŽNÉHO NÁSTROJE

Zvyšující se požadavky na přesnost a složitost výrobků v prostředí nejen evropského průmyslu plošného tváření byly impulsem pro důkladné zaměření se na životnosti nákladných střížných nástrojů. V důsledku toho se stalo zajímavými tématem v oblasti plošného tváření využití vysoce kvalitních ocelí, PVD povlaků, tepelného zpracování a pokročilé údržby střížných nástrojů. [15]

#### 3.1 Faktory ovlivňující životnost nástroje

Životnost střížných nástrojů závisí na několika faktorech, především:

- konstrukci nástroje,
- použitých materiálech,
- výrobní přesnosti komponent nástroje,
- tepelném zpracování komponent nástroje,
- zpracovávaném polotovaru,
- výrobních podmínkách a údržbě. [13]

Jakákoli odchylka v kvalitě výše uvedených faktorů bude mít negativní účinky na životnost nástroje a vede k jeho selhání. Jako selhání se rozumí neschopnost zhotovení kvalitních výrobků. Poté je vyžadováno přebroušení nástroje – ostření razníku, matrice. [11][12][14]

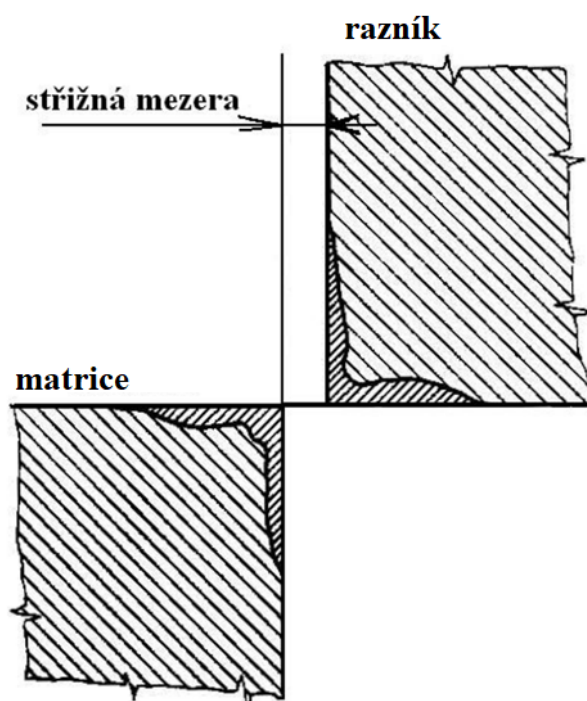
Životnost celého střížného nástroje je závislá na životnosti jeho komponent. Nejvýznamnější je životnost pracovních částí – razníku a matrice. Životnost pracovních částí lze rozlišit na dva typy, kdy každý z nich má svůj praktický význam.

- Životnost dílčí – jedná se o životnost razníku a matrice mezi dvěma přebroušeními. Vyjadřuje se počtem kvalitně vystříhnutých výrobků do selhání – neschopnosti dosáhnout požadované kvality výstřižků.
- Životnost celková – Vyjadřuje se počtem možných přebroušení. Počet přebroušení je závislý na rozměrech pracovních částí, konstrukci nástroje a rozměrech výstřižku. Jakmile je dosaženo celkové životnosti, pak nelze pracovní části dále brousit a je třeba tyto části vyrobit nové. [15]

## 3.2 Opotřebení pracovních částí střížného nástroje

Opotřebení je spojeno s náklady, protože opotřebené razníky je třeba brousit, leštit nebo vyměnit, což vyžaduje dočasné přerušení výroby. Pokaždé když se dva povrchy dostanou do kontaktu jsou vystaveny tření a opotřebení. Na střížných hranách nástroje vznikají vysoké tlaky, které vlivem adheze a abraze způsobují opotřebení viz Obr. 13. Opotřebení vzniká otěrem povrchu razníku nebo vymletím čela. [16]

Rychlost úběru materiálu je výsledkem všech složek přítomných v systému opotřebení, kombinace materiálů, kvality povrchu, kontaktních tlaků, teploty, kluzných rychlostí, přítomnosti maziv nebo třetích těles např. písek. Opotřebení je často pomalý proces, který poškozuje jeden nebo více povrchů, dokud nepřestanou fungovat tak, jak mají. [16]



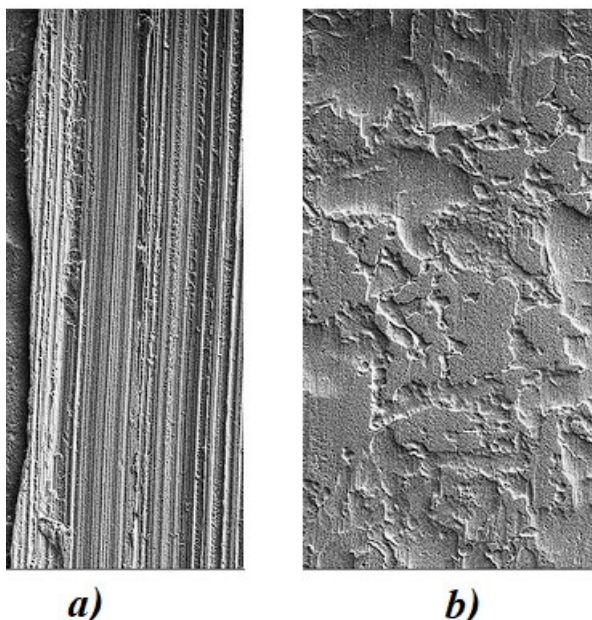
Obr. 13: Opotřebení pracovních částí stříhadla [10]

### 3.2.1 Typy opotřebení

Opotřebení lze rozdělit dle mechanismu:

- Adheze – zahrnuje přilepení nebo dokonce přilnutí k druhému povrchu. Jde o přenášení materiálu z jednoho povrchu na druhý.
- Abraze – zahrnuje úběr materiálu vlivem obroušení, poškrábáním. [16]

Nikdy se nelze omezit pouze na jeden typ opotřebení. Celkové opotřebení je vždy složeno z obou jevů. V případě stříhání, děrování má větší podíl na opotřebení adheze, naopak v případě lisování, hlubokého tažení je opotřebení způsobeno převážně abrazí. [16]



Obr. 14: Opotřebení způsobené převážně a) abrazí, b) adhezí [16]

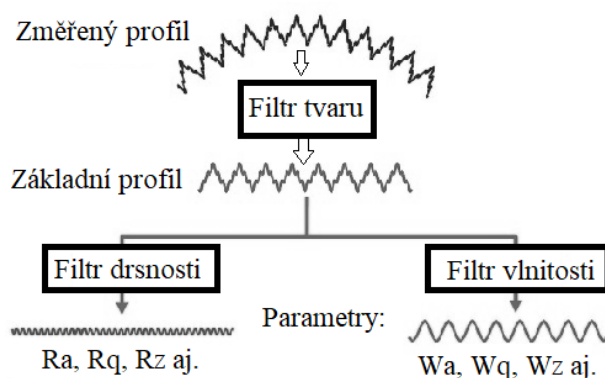
### 3.3 Drsnost povrchu a její vliv na opotřebení

Drsnost povrchu se odkazuje na míru nerovnosti a nepravidelností na povrchu materiálu, kterou lze charakterizovat odchylkami skutečného povrchu od jeho dokonale rovného stavu. Drsnost povrchu je klíčovým faktorem v mnoha inženýrských aplikacích, protože má významný vliv na tření, opotřebení, těsnost a další. Drsnost povrchu strojářských dílů je ovlivněna především výrobním procesem. V oblasti obrábění je drsnost povrchu považována za jednu z nejdůležitějších charakteristik. Nejčastěji vyskytujícím se parametrem drsnosti ve výkresové dokumentaci je aritmetická odchylka profilu – Ra. [24][30]

#### 3.3.1 Měření drsnosti povrchu

Měřit a analyzovat drsnost povrchu lze prostřednictvím specializovaných zařízení – profilometrů, které umožňují získání detailních informací o mikroskopických strukturách na povrchu materiálu. Parametry struktury povrchu lze rozdělit do několika skupin podle toho, kterou strukturu povrchu popisují a jakým způsobem. [24][30]

ČSN EN ISO 21920-1 (014450) - Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil – Část 1: Indikace textury povrchu. Zmíněná norma definuje parametry drsnosti, vlnitosti a základního profilu. Dále důležité pojmy v oblasti struktury povrchu. [25]



Obr. 15: Filtry struktury povrchu, parametry drsnosti, vlnitosti [30]

Profil povrchu je nejprve podroben filtraci. Filtr můžeme rozdělit na tři prvky:

- $\lambda_c$  mezní vlnová délka – filtr definuje mezní vlnovou délku drsnosti a vlnitosti.
- $\lambda_s$  je filtrem profilu – filtruje drsností a kratšími složky vln na povrchu.
- $\lambda_f$  – filtruje vlnitost od delších složek vln na povrchu. [24]

Následně lze povrch hodnotit pomocí parametrů. Parametry drsnosti lze dělit na amplitudové ( $R_a$ ,  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_z$  aj.), hybridní ( $R_{mr}$ ) a délkové ( $R_{Sm}$ ). [24]

### 3.4 Možnosti optimalizace životnosti

Střížné nástroje používané pro přesné stříhání jsou vystaveny vysokému mechanickému namáhání, především tlaku a dynamickému rázu. Tyto podmínky vedou ke značnému opotřebení a mají největší vliv na životnost střížného nástroje [14].

Životnost střížného nástroje lze zvýšit několika způsoby – optimalizace tvarů razníků viz Obr. 12 a kombinování s vhodnou konstrukcí matric. Dalším hojně využívaným způsobem, jak zvýšit životnost razníku, je aplikace PVD povlaku. Jedná se o ochranný povlak odolný proti opotřebení, který je nanášen fyzikální metodou nikoliv chemicky. [13]

### 3.5 Současné metody snímání opotřebení

Výkonnost lisování závisí na stavu razníku a matrice. Rozdíly v rozměrech razníku a matrice mají významný vliv na kvalitu výrobku. V posledních letech se vyvíjí několik pokročilých metod, které slibují efektivnější monitorování a měření opotřebení střížných nástrojů, razníku a dalších nástrojů. Tyto metody využívají moderní technologie a umožňují rychlejší, přesnější a často i automatizované hodnocení opotřebení. Některé nacházejí uplatnění ve vývoji, ovšem komerčně ve velkém měřítku uplatněny nejsou.



- Digitální obrazová korelace (DIC): Tato technika zahrnuje použití vysokorozlišovacích kamer pro sledování povrchových změn nástroje během jeho používání. Analýza získaných obrazů pomáhá detekovat deformace a jiné známky opotřebení na mikroskopické. [36] [37]
- Neuronové sítě/Hluboké učení (NN/DL): Nejsou využity ke snímání opotřebení, ale především analýze velkých, složitých datových souborů (AE, DIC, IoT). Data mohou být založeny na souboru dat obrázků, signálů z procesu, při kterém dochází k opotřebení nástroje v procesu. Trénovaná neuronová síť identifikuje korelace mezi parametry a může opotřebení hodnotit, či klasifikovat. [35] [36]
- Akustická emise (AE): Akustická emise je metoda, která detekuje ultrazvukové vlny emitované materiálem během jeho deformace nebo porušení. Použití AE v kontextu razníků umožňuje identifikovat začátky opotřebení dříve, než jsou viditelné jinými metodami. Právě AE bylo podrobena spoustě studií a experimentů. [32][33][34]
- Senzory založené na IoT: Integrace senzorů schopných sbírat data o vibracích, teplotě a dalších fyzikálních veličinách a analyzovat je umožňuje nejen sledovat stav nástroje v reálném čase, ale také aplikovat pokročilé analýzy dat pro predikci opotřebení a optimalizaci údržby. [33][34][36][37]
- Laserové skenery mohou být použity k rychlému a přesnému měření geometrických změn razníků způsobených opotřebením. Tato technologie umožňuje rychlé skenování a získání detailních 3D modelů nástrojů, což je ideální pro porovnání s původními CAD modely nebo FEM analýzu. [38]

### 3.5.1 Akustická emise

Funguje na principu detekce ultrazvukových vln vyvolaných změnami ve struktuře materiálu, jako jsou praskliny nebo plastická deformace. I když je AE velmi užitečná, má také několik omezení, která mohou ovlivnit její efektivitu. Mezi tato úskalí patří:

- Citlivost na šum.

V prostředích s vysokou úrovní hluku mohou být signály AE obtížně rozpoznatelné.

- Omezený dosah detekce.

Signály AE se šíří ve formě elastických vln a mohou být tlumeny nebo rozptýleny v závislosti na materiálu a geometrii struktury. To omezuje vzdálenost, ze které může být zdroj emise účinně detekován.

- Kalibrace.

Zařízení AE vyžadují pravidelnou kalibraci, aby bylo zajištěno přesné a spolehlivé měření. Kalibrace může být složitá, zvláště v hlučných průmyslových prostředích podobně.

- Náklady na zařízení a provoz.

Vysoce kvalitní senzory, zesilovače a analytický software mohou znamenat velkou investici. Případně při využití neuronových sítí a hlubokého učení pro analýzu výstupních dat – signálů, může být výpočetní model nákladný.

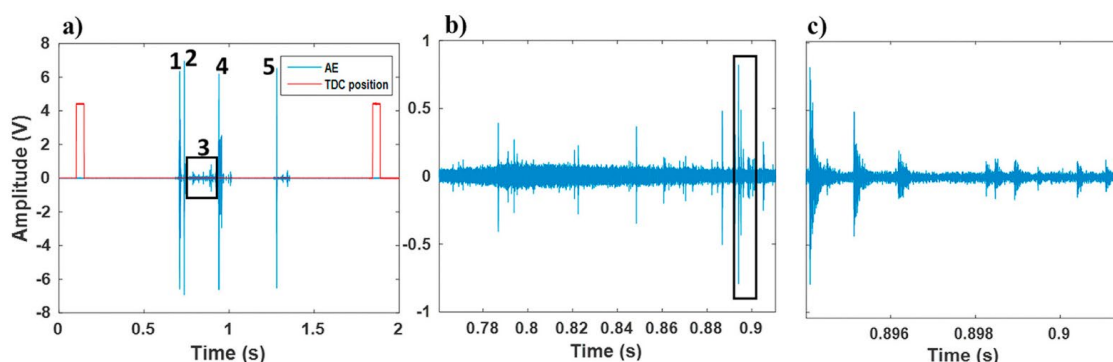
- Omezení na specifické aplikace.

I když je AE účinná pro detekci prasklin a jiných poruch ve strukturách, nemusí být vhodná pro všechny typy monitorování. Například nemusí efektivně detekovat korozní poškození nebo opotřebení povrchu, které neprovází významné strukturální změny. [32][33][34]

Přestože mají tyto omezení značný dopad na komerční aplikaci a efektivitu technologie AE, stále je to slibná pro diagnostiku materiálůvých a strukturálních poruch, zejména když jsou využity neuronové sítě.[32]

### 3.5.2 Zkoumání opotřebení abrazí pomocí AE

Shanbhag a kol. provedli experiment, kde zkoumali opotřebení v důsledku zadírání při lisování plechů pomocí akustické emise. [33]



Obr. 16: Příklad signálu AE, a) jeden zdvih, b) signál v čase lisování, c) peak – dochází k opotřebení [33]

Studie položila pevný základ pro další výzkum monitorování stavu a diagnostiku poruch na základě frekvenci, které mohou odhalit vznik opotřebení mnohem dříve, než se objeví. [33]

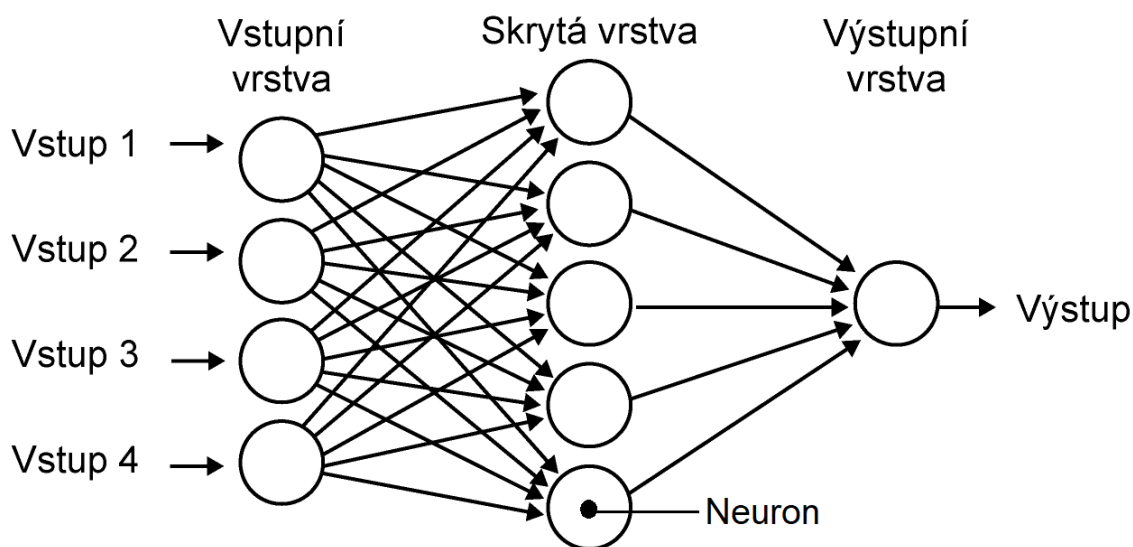
## 4 NEURONOVÉ SÍTĚ

Neuronové sítě jsou součástí umělé inteligence, který se v posledních letech stal stěžejním prvkem v mnoha technologických aplikacích. Neuronové sítě jsou inspirovány biologickým mozkem a jsou schopny učení, adaptace a rozpoznávání vzorů, což je činí jedním z nejvíce mocných nástrojů pro zpracování a analýzu dat. [26][27]

### 4.1 Architektura neuronových sítí

Neuronová síť je uspořádání neuronů (primitivní jednotka) do struktury, která komunikuje pomocí orientovaných spojů s ohodnocením. Každá síť má specifické vlastnosti, včetně typu neuronů, jejich uspořádání a adaptivní strategie při trénování. Tato síť může mít různé architektury, včetně jednoduchých lineárních modelů až po složité hluboké neuronové sítě, které mají stovky až tisíce vrstev neuronů.[27]

Neuronové sítě se zpravidla pojmenovávají dle počtu neuronů v jednotlivých vrstvách. Například neuronová síť níže na obrázku je pojmenována 4-5-1.



Obr. 17: Neuronová síť 4-5-1 [30]

### 4.2 Učení

Trénování neuronových sítí je iterativní proces. Neuronové sítě se učí ze vstupních, trénovacích dat a přizpůsobují své vnitřní váhy tak, aby minimalizovaly chyby v predikcích nebo klasifikacích. Trénování neuronových sítí je proces, ve kterém se síť učí identifikovat vzory a provádět požadované úkoly. Tento proces vyžaduje poskytnutí trénovacích dat neuronové síti, analýzu výstupů sítě a následné upravování parametrů sítě tak, aby se

minimalizovaly chyby v predikcích nebo klasifikacích. Proces učení může probíhat prostřednictvím různých algoritmů, včetně zpětného šíření chyb, genetických algoritmů nebo učení s posilováním.[28]

- Příprava dat: Velmi důležitým krokem před trénováním neuronové sítě je volba a příprava dat, aby byla vhodná pro vstup do sítě. Data jsou obvykle připravena trénovací a doplněna i o validační sadu.
- Inicializace vah: Váhy neuronové sítě jsou inicializovány náhodně nebo pomocí předem definovaných hodnot. Tento krok je důležitý pro zahájení trénování sítě.
- Zpracování dat sítí: Neuronová síť zpracovává každý vstup a je přenášen mezi neuronovými vrstvami. V průběhu je vstup zpracován pomocí aktivační (přenosové) funkce, kterou je definován výstup. Tyto výstupy jsou porovnány s požadovanými výstupy, a chyby jsou vypočteny – střední a maximální chyba učení.
- Zpětná propagace chyb: Po výpočtu chyby je použit algoritmus zpětné propagace chyb k upravení vah sítě tak, aby se minimalizovala chyba. Tento proces se opakuje pro každý vzorek trénovacích dat.
- Ověření a validace: Po dokončení trénování je síť ověřena pomocí validační sady dat. To pomáhá zjistit, zda je síť schopná generalizovat naučené vzory na nová data.

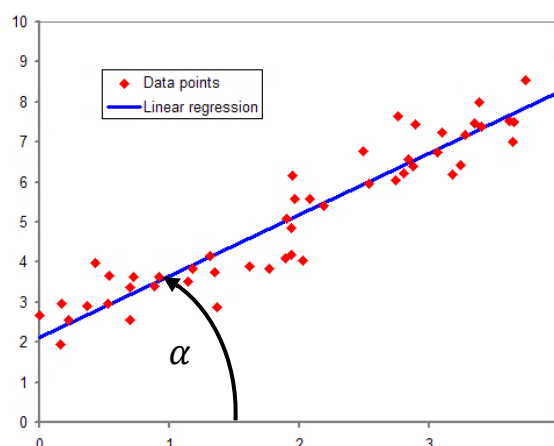
Správně trénovaná síť může dosáhnout vysoké úrovně přesnosti a generalizace při řešení široké škály problémů včetně rozpoznávání obrazů, iterativní optimalizační výpočty – generativní design či nelineární regrese. [27][28]

## 5 REGRESNÍ ANALÝZA

Regresní analýza je statistická metoda, umožňující vyšetřit vztah mezi takzvanou závislou proměnnou, (nazývanou též jako vysvětlovanou nebo regresand) a jednou nebo více nezávislými proměnnými (též známé jako vysvětlující proměnné nebo regresory.) Narozdíl od korelační analýzy, pracujeme se závislostí kauzálního charakteru – tedy zajímá nás nejen, zda mezi proměnnými existuje závislost, ale také jakého typu tato závislost je. [17]

### 5.1 Prostá lineární regrese

Prostá lineární regrese je statistická technika, která se používá pro studium závislosti dvou náhodných veličin. Využívá se k aproximování vztahu mezi závislou a nezávislou proměnnou. Tento vztah je aproximován lineární funkcí neboli data jsou proložena přímkou. Prostá lineární regrese je díky předpokladům pouze omezeným nástrojem pro skutečnou empirickou analýzu. [18]



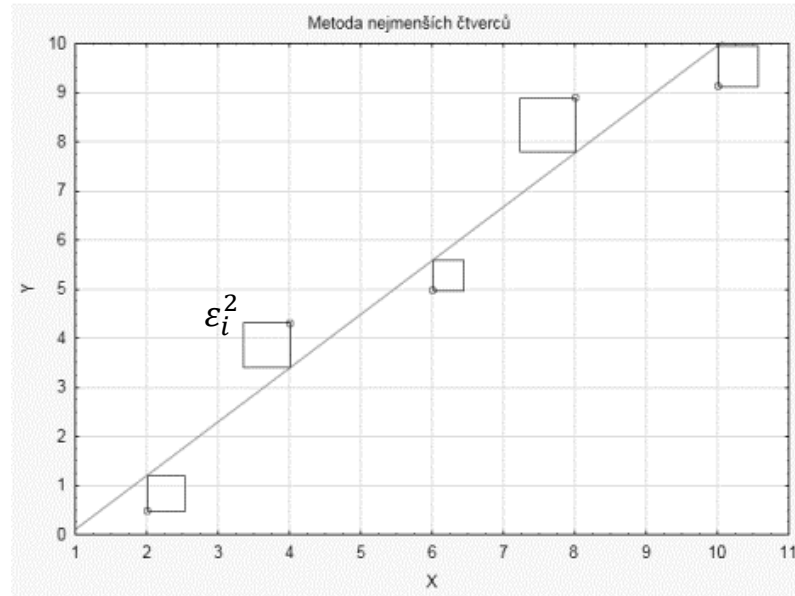
Obr. 18: Proložení bodů přímkou [9]

Rovnice regresní křivky:  $f(x) = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$  (5.1)

Směrnice přímky:  $\tan \alpha = \beta_1$  (5.2)

- $b_1 x$  – lineární člen; kde  $b_1$  je směrnici přímky a udává její natočení.
- $b_0$  – absolutní člen, který udává posunutí na svislé ose.
- $\varepsilon$  – chybová složka (reziduum), umožňuje ostatním faktorům rovněž ovlivňovat hodnoty závislé proměnné  $y$

Podstatou prosté lineární regrese je nalézt právě takovou přímku, aby součet druhých mocnin reziduí byl co nejmenší. Takovou přímku nalezneme s pomocí metody nejmenších čtverců viz Obr. 19. [17]



Obr. 19 Metoda nejmenších čtverců [22]

Uvažujme předpis lineární funkce (5.1).

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$$

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2 = Q; \quad \text{kde } \epsilon \text{ je reziduum} \quad (5.3)$$

### 5.1.1 Aproximace přímkou

Abychom mohli vztah aproximovat přímkou, musíme nalézt absolutní člen  $\beta_0$  a lineární člen  $\beta_1$  (také regresní koeficienty) funkce. Provedeme tak položením obou parciálních derivací součtu kvadrátů reziduí rovno 0.  $Q \rightarrow \text{MIN}$  [23]

$$0 = \frac{\partial Q}{\partial \beta_0} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i$$

$$0 = \frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) x_i = \quad (5.5)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = \beta_0 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2$$

Řešením soustavy dvou rovnic (5.4), (5.5) o dvou neznámých vyjádříme regresní koeficienty  $\beta_0, \beta_1$ . [23]

$$\beta_0 = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (5.6)$$

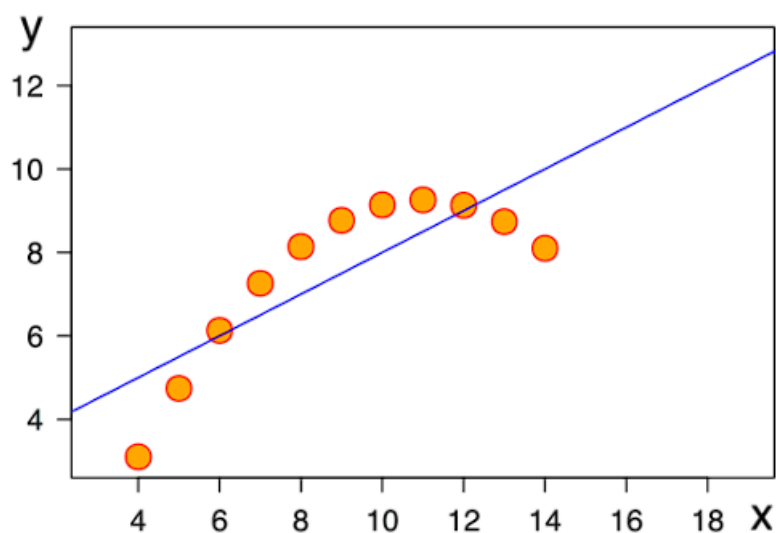
$$\beta_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (5.7)$$

Řešením (5.6) a (5.7) pro konkrétní hodnoty  $x_i, y_i$  lze získat hodnoty parametrů  $\beta_0, \beta_1$ . [23]

## 5.2 Omezení

Přímková lineární regrese předpokládá lineární vztah mezi závislou proměnnou a nezávislými proměnnými, což znamená, že závislá proměnná se mění úměrně se změnami nezávislých proměnných. Mnoho jevů v reálném světě se však řídí nelineárními vztahy. Pokusy o proložení takových dat přímkou tak mohou vést k nesprávným interpolacím a chybám. [20]

Mnoho přírodních jevů a procesů v různých oblastech, jako je biologie, ekonomie a fyzika, vykazuje nelineární chování. Například růst populace, chemické reakce nebo šíření infekčních chorob se často řídí exponenciálními nebo logaritmičnými trendy, které není schopen lineární model dostatečně popsat. [20]



Obr. 20: Nelineární data proložena lineární funkcí [20]

## 6 LOGARITMICKÁ REGRESE

V případě, že vztah mezi závislou a nezávislou proměnnou vykazuje nelineární průběh, pak nebude vhodné využít přímkové regrese. Logaritmická regrese je speciálním případem regrese lineární (z pohledu regresních koeficientů), kdy je soubor dat aproximován logaritmickou funkcí. Logaritmické funkce zpočátku rychle rostou nebo klesají, ale pak se zvyšující se hodnotou nezávislé proměnné se snižuje rychlost růstu nebo poklesu funkce. [20]

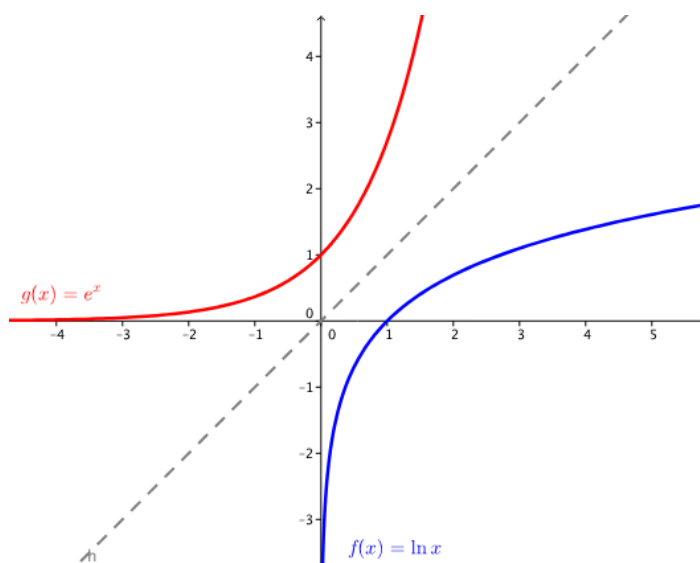
### 6.1 Logaritmická funkce

Logaritmická funkce  $f(x) = \log_a x$  je inverzní k funkci exponenciální. Právě protože je logaritmická funkce inverzní k exponenciální, musí platit následující ekvivalence: [19]

$$y = \log_a x \leftrightarrow a^y = x \quad (6.1)$$

Také platí že:

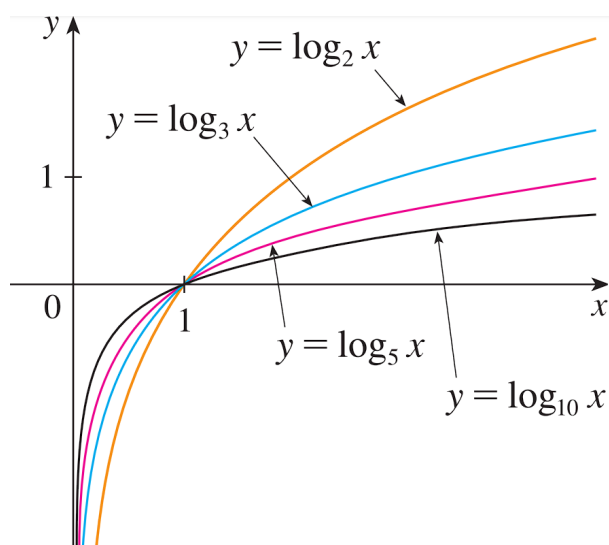
$$y = \log_a x; a \in R^+ / \{1\} \quad (6.2)$$



Obr. 21: Logaritmická funkce inverzní k exponenciální funkci [4]

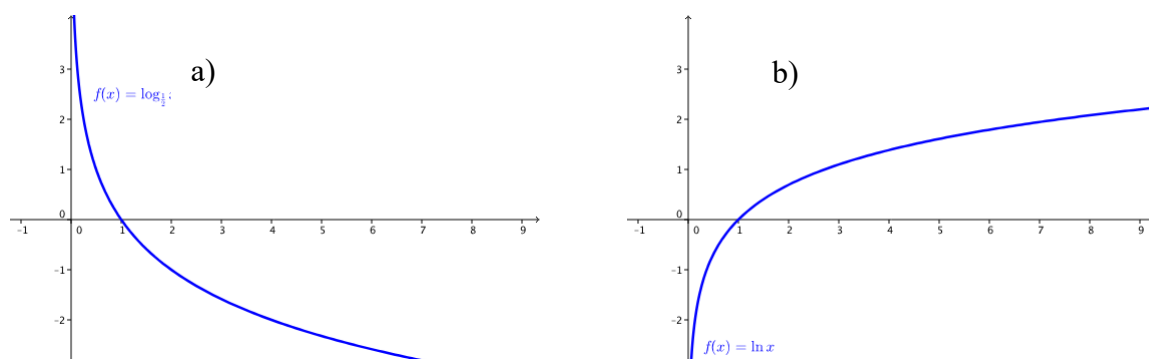
Na Obr. 22 můžeme vidět čtyři rostoucí logaritmické funkce. Pro všechny čtyři platí definiční obor  $D \in (0; \infty)$  a obor hodnot  $H \in (-\infty; \infty)$ , a zároveň platí že  $a > 1$ . Z grafu je patrné, že funkce rostou pomaleji při  $x > 1$ . [19]





Obr. 22: 4 příklady logaritmické funkce [19]

Pokud je základ logaritmu menší než 1 pak s rostoucím  $x$  funkce klesá. Obr. 23 a)



Obr. 23: Logaritmická funkce o základu a)  $a < 1$ ; b)  $a > 1$

Speciálním případem logaritmické funkce je přirozený logaritmus „ $\ln x$ “. Jedná se o logaritmus o základu Eulerovo číslo,  $e \doteq 2,718281828$ . Dalším speciálním případem je logaritmus dekadický, což je logaritmická funkce o základu deset. Značen je pouze  $\log x$ . [19]

## 6.2 Aproximace logaritmickou funkcí

Pokud vztah mezi závislou a nezávislou proměnnou vykazuje logaritmický průběh, pak je možno data proložit logaritmickou funkcí. Aby byla data proložena optimální logaritmickou funkcí, je třeba vyšetřit hodnoty regresních koeficientů  $\beta_0, \beta_1$ . Obecný předpis logaritmické funkce je uveden níže jako rovnice (6.3). [23]

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(x) \quad (6.3)$$

Mějme sumační funkci  $Q$  vycházející z metody nejmenších čtverců (4.3).

$$Q = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow Q = \sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 \log x_i))^2 \rightarrow MIN \quad (6.4)$$

Položme obě parciální derivace součtu čtverců rovno nule viz (6.5) a (6.6).

$$0 = \frac{\partial Q}{\partial \beta_0} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \log x_i) = \quad (6.5)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n \log x_i$$

$$0 = \frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \log x_i) \log x_i = \quad (6.6)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i \log x_i = \beta_0 \sum_{i=1}^n \log x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n (\log x_i)^2$$

Stejně jako v případě přímkové regrese se regresní koeficienty  $\beta_0, \beta_1$  získají vyřešením soustavy dvou rovnic o dvou neznámých níže a dosazením konkrétních hodnot proměnných  $x$  a  $y$ . [23]

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \beta_1 \sum_{i=1}^n \log x_i}{n}; \quad \beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - n\beta_0}{\sum_{i=1}^n \log x_i} \quad (6.7)$$

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \log x_i - \beta_1 \sum_{i=1}^n (\log x_i)^2}{\sum_{i=1}^n \log x_i}; \quad \beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \log x_i - \beta_0 \sum_{i=1}^n \log x_i}{\sum_{i=1}^n (\log x_i)^2}$$

Vyjádřené koeficienty:

$$\beta_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i \log x_i - \sum_{i=1}^n \log x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (\log x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \log x_i)^2} \quad (6.8)$$

$$\beta_0 = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log x_i)^2 - \sum_{i=1}^n y_i \log x_i \cdot \sum_{i=1}^n \log x_i}{n \sum_{i=1}^n (\log x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \log x_i)^2} \quad (6.9)$$

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 EXPERIMENT

Bylo provedeno snímání a statistické hodnocení vývoje parametru opotřebení razníku střížného blokového nástroje. Experiment byl proveden v prostorech průmyslové firmy KALINA industries s.r.o. ve Zlíně. V rámci experimentu byl vybrán výrobní proces – stříhání na 40 tunovém lisu se dvěma lineárními podavači. Stříhán byl těsnící materiál Klingsil C4430. Výstupem tohoto výrobního procesu je výrobek s geometrií mezikruží – těsnící podložka. Pro experiment byl zvolen výrobní proces na 50 tisíc kusů výrobků. Každých 10 tisíc kusů byla výroba pozastavena, razník vyjmut z blokového nástroje a snímán povrch dosedové plochy razníku na profilometru Zygo New View 9000. Cílem experimentu bylo popsání vývoje opotřebení razníku.

### 7.1 Metodika

#### 7.1.1 Lis

Experiment byl proveden na výstředníkovém lisu TOMA LEN 40C s lisovací silou 40 tun. Speciálním příslušenstvím lisu jsou 2 lineární podavače, které slouží k automatizovanému podávání materiálu do pracovního prostoru.



*Obr. 24: Výstředníkový lis LEN 40C*

### 7.1.2 Razník

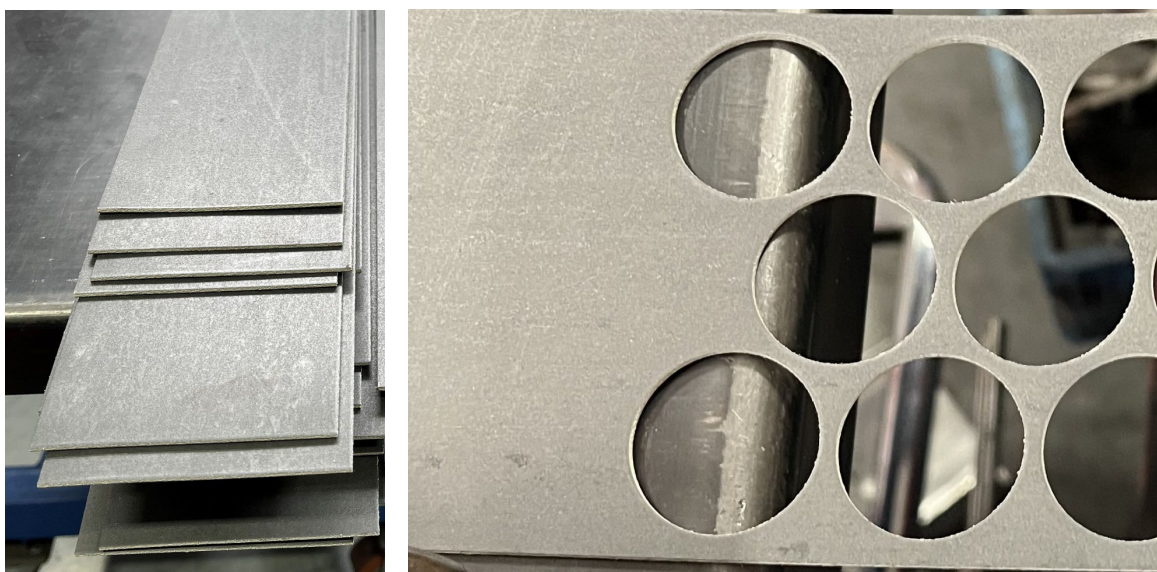
Nástroj je blokového charakteru tzn., že je společný pro více než jednu blokovou vložku, která udává tvar výrobkům. Proto je popis zaměřen především na konkrétní razník. Jedná se o razník z nástrojové oceli. Část razníku udávající tvar výrobku je geometrie mezikruží.



*Obr. 25: Razník*

### 7.1.3 Materiál

Výrobek je z materiálu Klingersil C4430-pografitovaný. Obecně je označován jako vláknitopryžový materiál vyvinutý pro těsnící účely. Konkrétně se tento kompozit skládá z aramidových a skelných vláken a jako pojivo je využito NBR. Materiál vstupuje do výrobního procesu jako polotovar o tvaru pásu s tloušťkou 2 mm.



*Obr. 26: Vlevo – vstupní pásy materiálu, vpravo – odpad z výroby*

### 7.1.4 Výrobek

Výstupem z výrobního procesu je výrobek s definovanou geometrií nástrojem – mezikruží. Tento výrobek slouží jako těsnící podložka. Nominální rozměry výrobku jsou:

Vnitřní průměr podložky  $d=21$  mm. Vnější průměr  $D=30$  mm.



Obr. 27: Výrobek

### 7.1.5 Snímání povrchu

Povrch byl snímán prostřednictvím profilometru Zygo New View 9000. Profilometr byl ovládán v prostředí softwaru MX od firmy Zygo corporation.



Obr. 28: Profilometr Zygo New View 9000 a program MX

## 7.2 Motiv experimentu

Jako stážista na oddělení kvality ve firmě KALINA industries s.r.o. se už přes dva roky potýkám s výrobkovou kvalitou, metrologií a aplikovanými metodami řízení kvality. Daný

výrobek a razník byl vybrán, protože v rámci této výroby byl pozorován rychlý vývoj opotřebení razníku, a zároveň pokles jakosti výrobků, což vedlo k časté údržbě nástroje. Razník se brousil po každých dvaceti až třiceti tisících vyrobených kusech za účelem vyhnutí se nespokojenosti zákazníka, či případné výrobě zmetků.



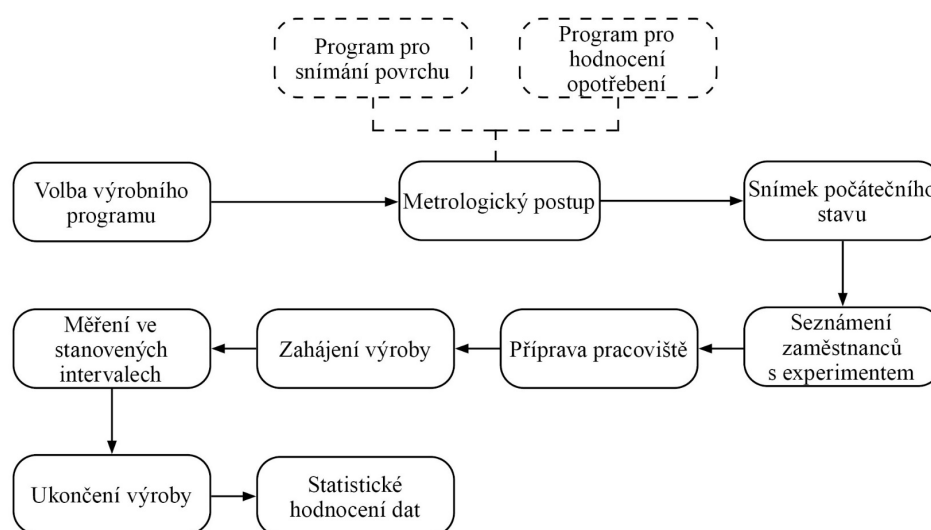
Obr. 29 Nedostatečná kvalita výrobku

Intervaly údržby byly nastavené stejně jako pro výrobu ze svitků z kalené pružinové oceli, což se vzhledem k poddajné povaze materiálu (kompozit – pryžová matrice, aramidová a skelná vlákna) nabízí k důkladnějšímu prozkoumání.

### 7.3 Metrologický postup

Před započítím experimentu byl vytvořen metrologický postup. V rámci metrologického postupu byl nastaven měřicí interval na jedno snímání povrchu po 10 tisících vyrobených kusech s měřícím rozsahem počtu kusů 50 tisíc. Pro zaručení opakovatelnosti, byl navrhnout postup pro vytyčení měřené oblasti, aby byl při každém měření snímán tentýž povrch. Zároveň byl v souvislosti s opakovatelností vytvořen program v softwaru MX pro snímání povrchu.

#### 7.3.1 Obecný postup – schéma



Obr. 30: Schéma experimentu



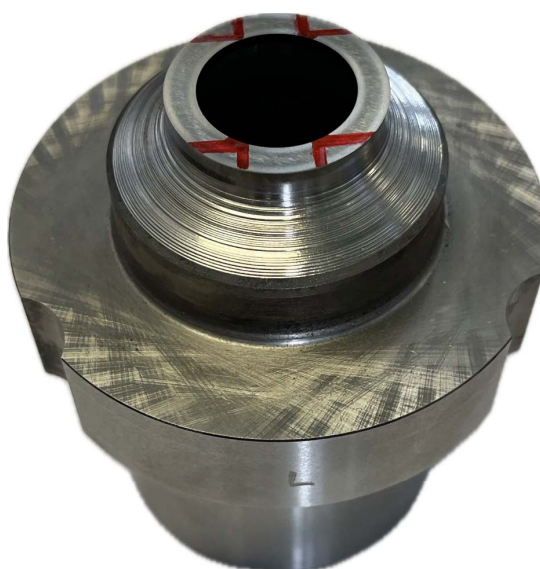
### 7.3.2 Měřené oblasti razníku

Razník byl pro účel měření rozdělená na dvě oblasti – levou a pravou. Levá i pravá strana byly označeny značkami L a P pomocí pneumatické přímé brusky viz Obr. 31. Značky definují orientaci umístění na pracovní stůl profilometru Zygo New View 9000.



*Obr. 31: Označení orientace levé (vlevo) a pravé (vpravo)*

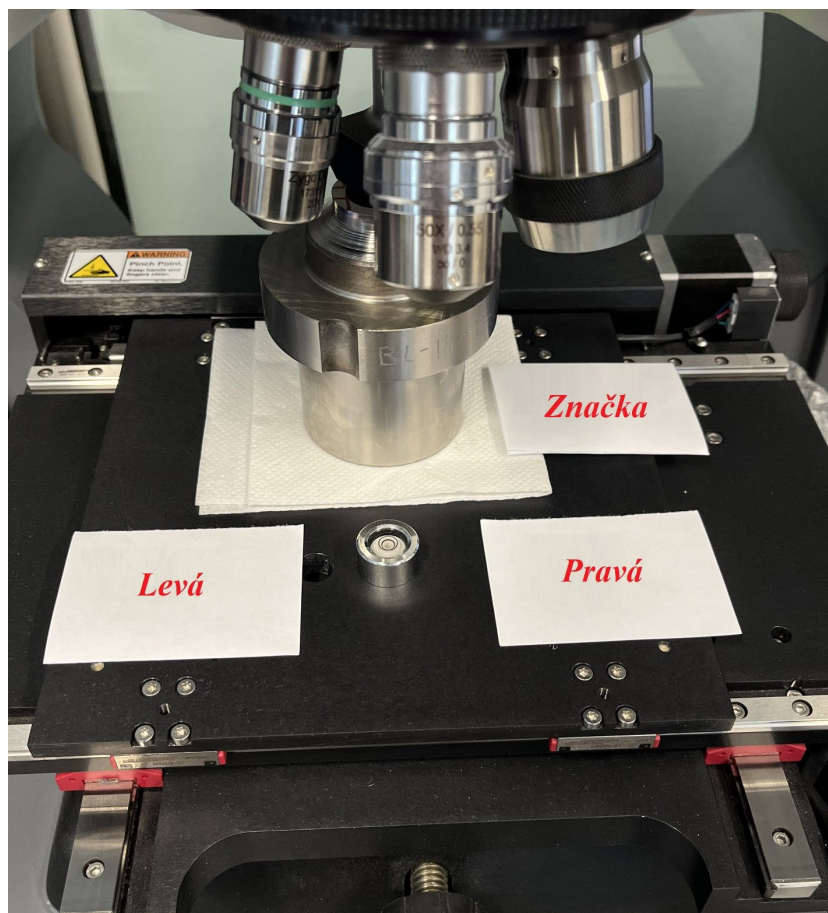
Zároveň slouží k vytyčení snímané oblasti povrchu. Pomyslným spojením levé a pravé značky vzniká přímka, ke které byla před každým měřením nalezena kolmá tečna kružnice totožné s hranou vnitřního průměru mezikruží – razníku viz Obr. 32.



*Obr. 32: Vytyčení oblastí pro snímání povrchu*

Tímto způsobem byla zaručena opakovatelnost měření.





Obr. 33: Orientace střížné vložky

### 7.3.3 Tvorba programu

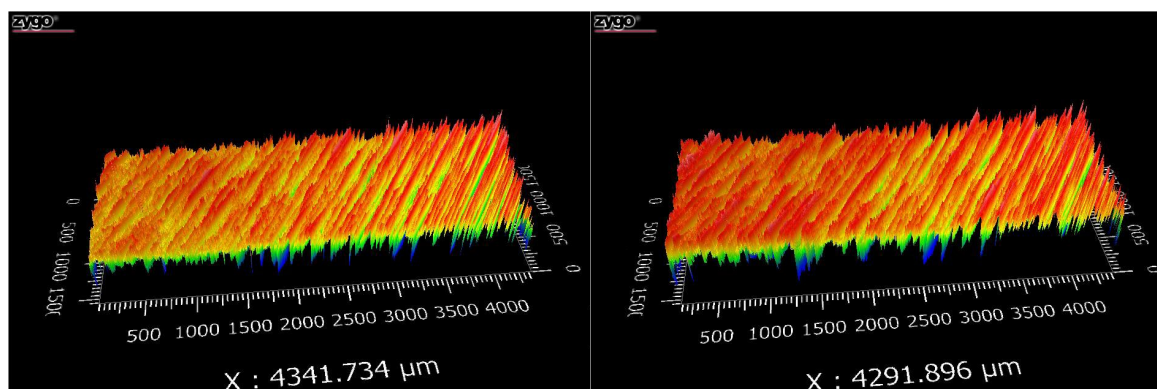
Před prvním měřením byl vytvořen program – „init-tool“ v softwaru Mx. V programu byla nastavena velikost snímané oblasti celkovým posuvem v X souřadnici, který byl  $\Delta x \cong 4,5 \text{ mm}$  vůči zvolenému počátku a rozsahem ve svislé ose  $y \cong 1,6 \text{ mm}$ . Tedy snímána byla oblast ve tvaru obdélníku o rozměrech  $4,5 \times 1,6 \text{ mm}$ . Hodnota X byla zvolena na základě rozdílu průměrů hran. Hodnota Y byla zvolena s ohledem na přiblížení a kruhový tvar střížné vložky. Pro spuštění programu je potřeba zvolit počátek a potvrdit konečnou souřadnici.

### 7.4 Sběr dat

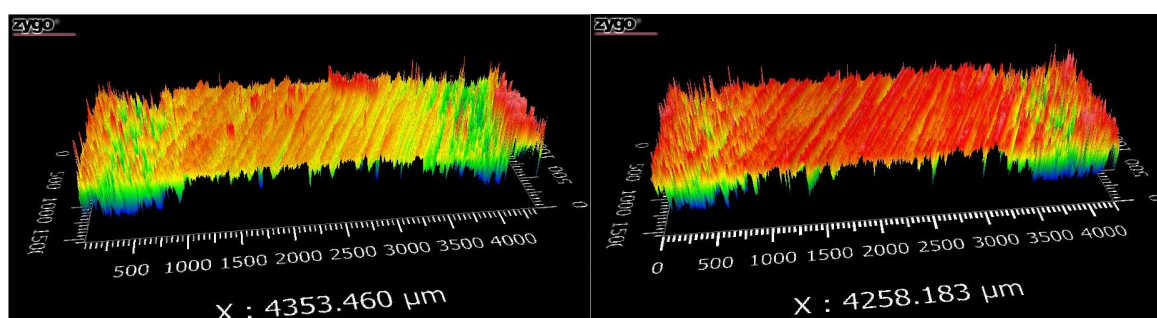
Před každým měřením byl povrch střížné vložky očištěn a odmaštěn, aby byl povrch čistý a měření co nejpřesnější. Následně byly vytyčeny snímané oblasti a střížná vložka umístěna ve správné orientaci na pracovní stůl profilometru. Po zatížení pracovního stolu profilometru střížnou vložkou byly vždy zkalibrovány osy X a Y. Ostření bylo řešeno pomocí automatické funkce – „Auto Focus“ a osvětlení pomocí automatické – „Auto LL“.

### 7.4.1 Snímky povrchu

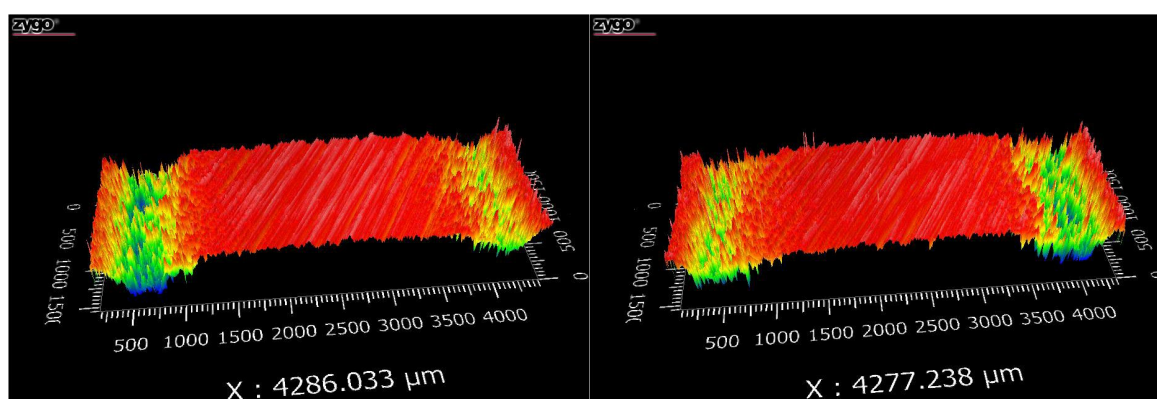
Každých 10 tisíc kusů byl snímán povrch střížné vložky. Obrázky vlevo jsou pro levou stranu střížné vložky. Obrázky vpravo jsou pro pravou stranu střížné vložky. Celkově se jedná o 12 snímků povrchu.



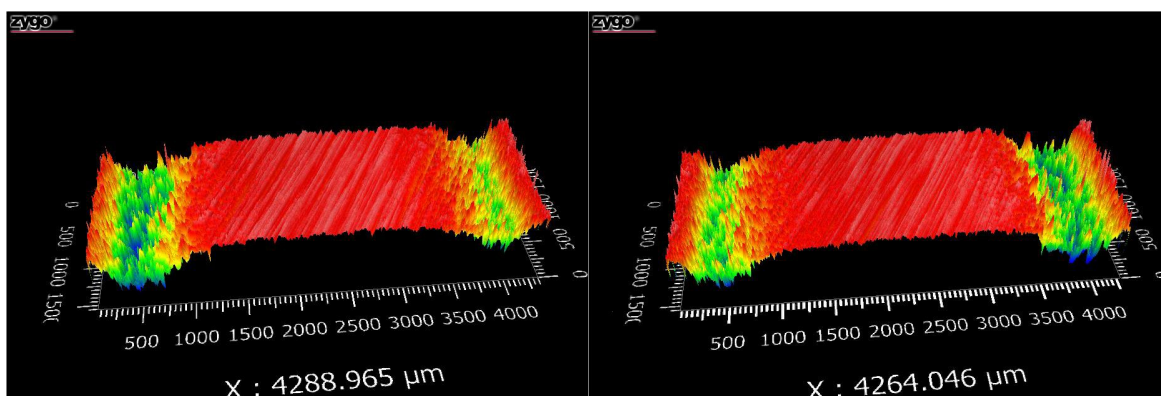
Obr. 34: Snímky povrchu – 0 kusů



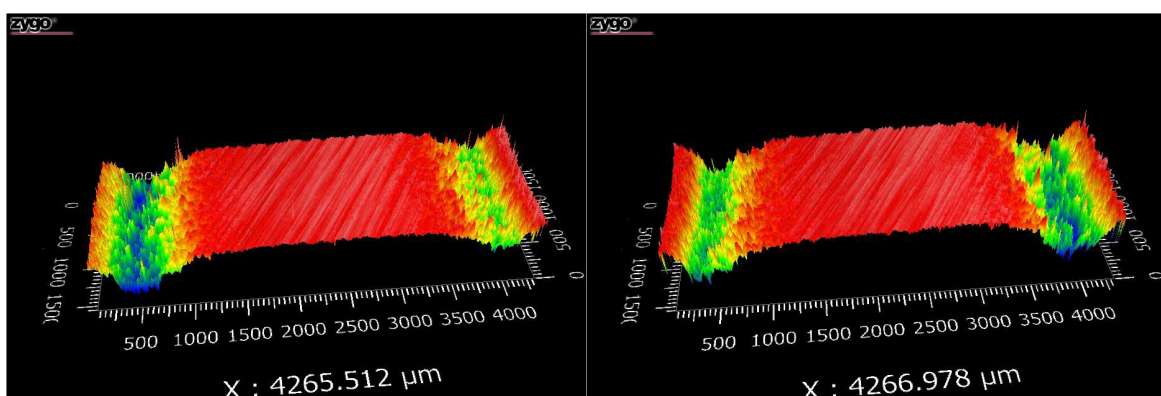
Obr. 35: Snímky povrchu – 10 tisíc kusů



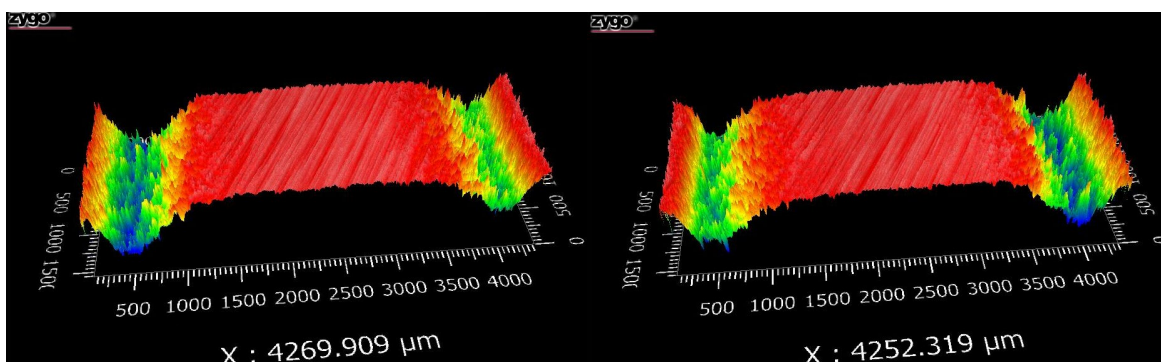
Obr. 36: Snímky povrchu – 20 tisíc kusů



*Obr. 37: Snímky povrchu – 30 tisíc kusů*



*Obr. 38: Snímky povrchu – 40 tisíc kusů*



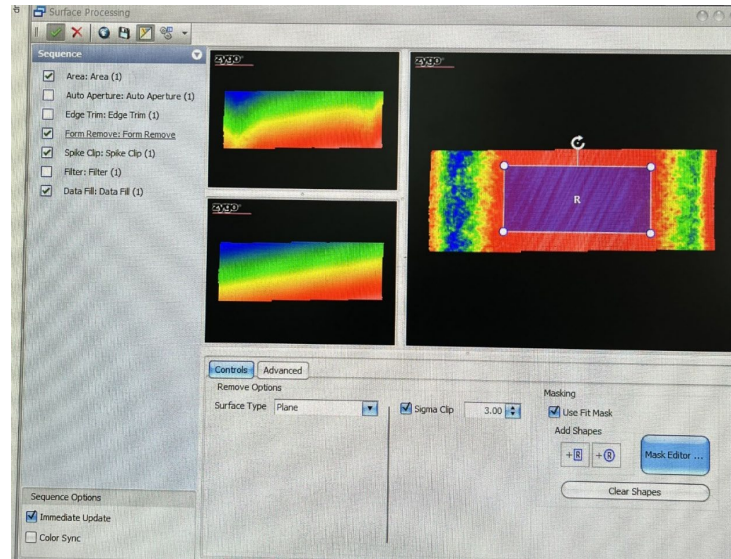
*Obr. 39: Snímky povrchu – 50 tisíc kusů*

Na výše uvedených snímcích povrchu lze pozorovat zvětšující se prohlubeň, o které je dále hovořeno jako o opotřebení dosedací plochy razníku.

#### 7.4.2 Řezy povrchem

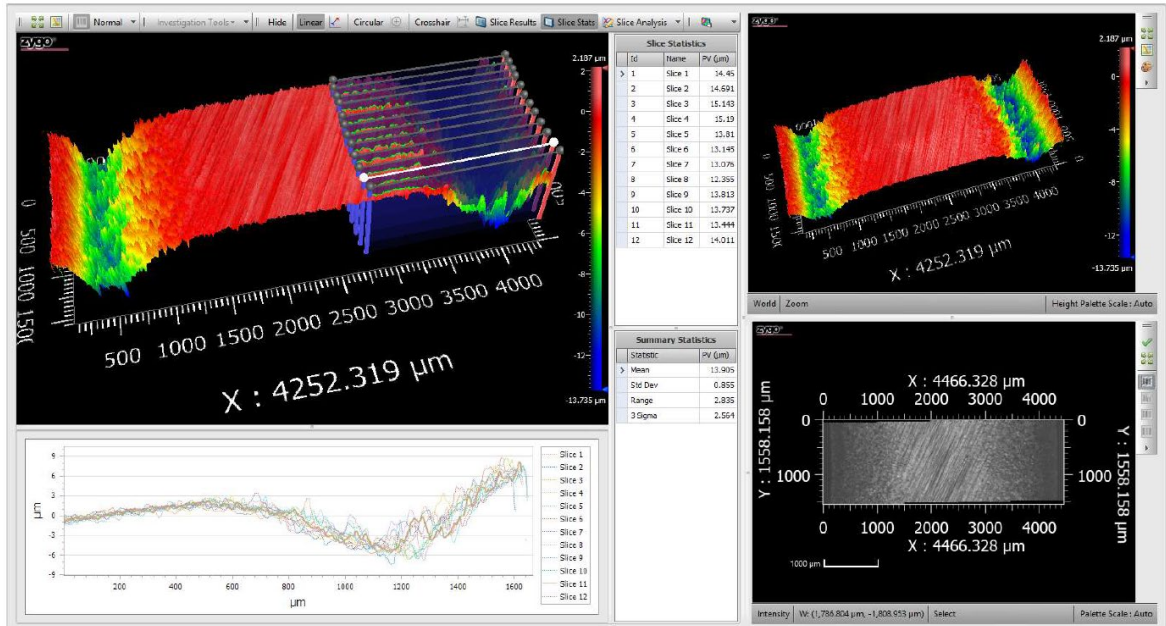
Po vytvoření snímků povrchu byly vytvořeny 2 programy pro analýzu těchto snímků. V prvním programu s názvem „result-left-in--right-out“ bylo nastaveno vyrovnaní dle neopotřebované oblasti povrchu viz Obr. 40.



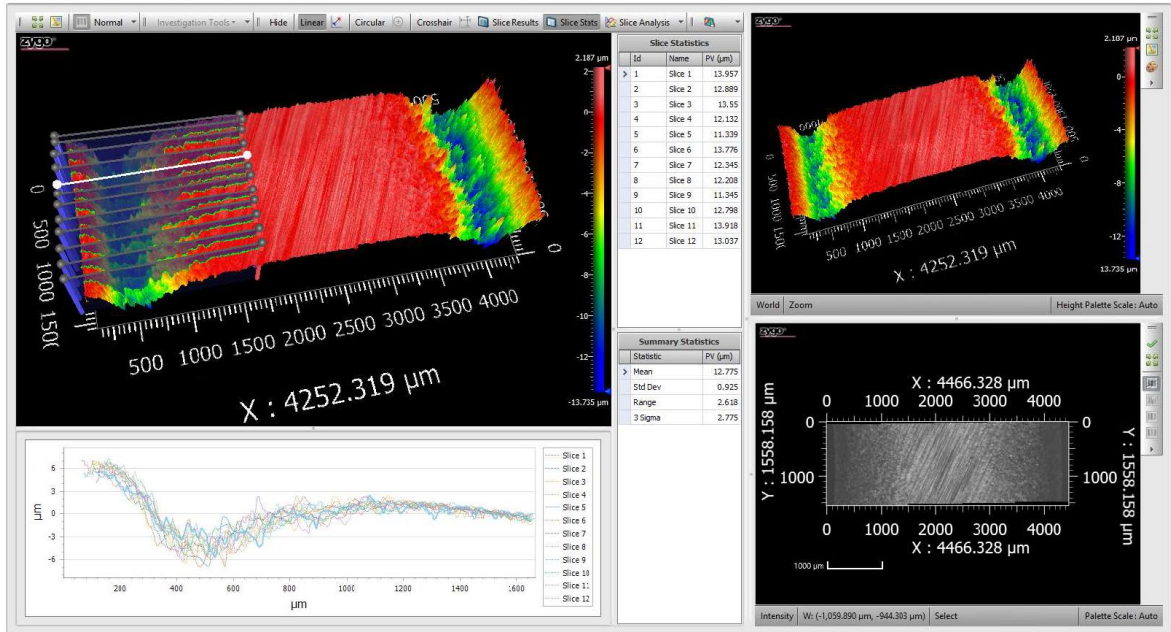


Obr. 40: Vyrovnání dle neopotřebené oblasti

Dále bylo v rámci programu nastaveno 12 řezů nahodile od sebe vzdálených. Těchto 12 řezů je vedeno v pravé polovině snímku povrchu. Druhý program nazvaný „result-left-out--right-in“ je totožně vyrovnaný. Na rozdíl od prvního je 12 řezů vedených v levé polovině snímků.



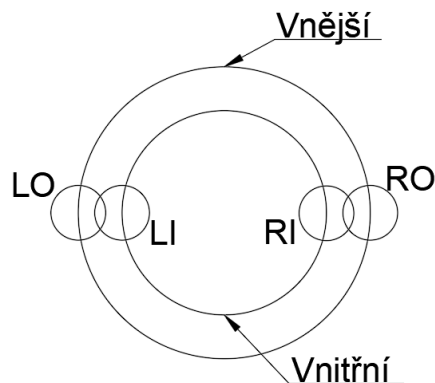
Obr. 41: Program "result-left-in--right-out"



Obr. 42: Program "result-left-out--right-in"

Jako parametr opotřebení byla zvolena hloubka vymílané prohlubně. Hodnota hloubky prohlubně je odečtena z parametru PV (Peak-to-Valley). Programy byly využity právě pro odečtení amplitudového parametru povrchu PV ze čtyř oblastí:

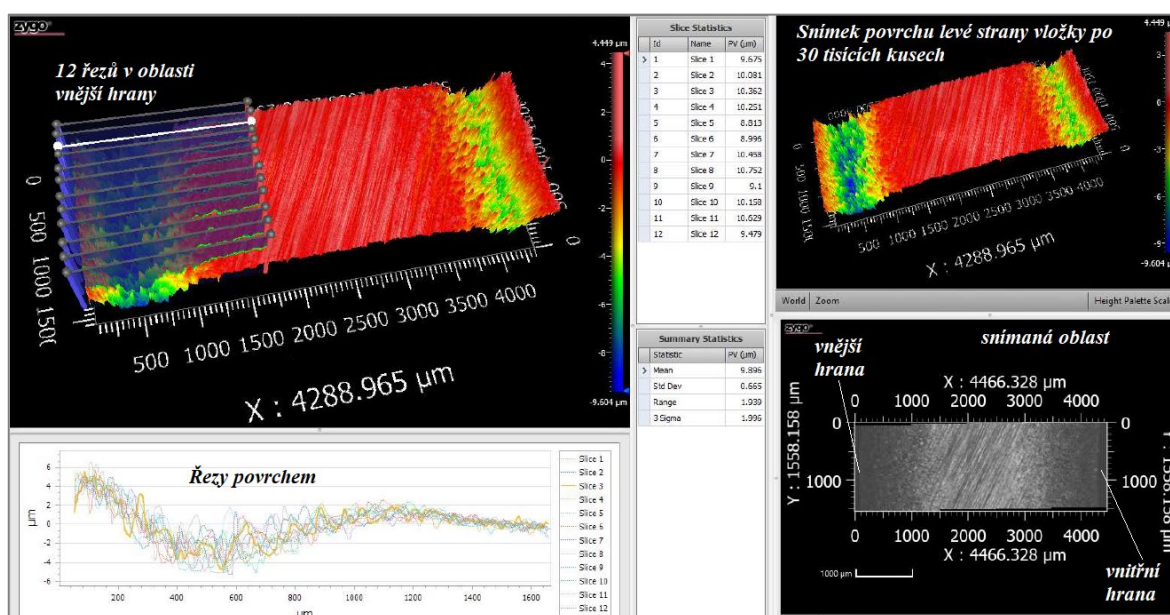
- LO – Left outer – levá strana střižné vložky, vnější hrana.
- LI – Left inner – levá strana střižné vložky, vnitřní hrana.
- RI – Right inner – pravá strana střižné vložky, vnitřní hrana.
- RO – Right outer – pravá strana střižné vložky, vnější hrana.



Obr. 43: Schéma – rozlišení oblastí

## 8 STATISTICKÉ HODNOCENÍ

Bylo provedeno statistické hodnocení opotřebení střížné vložky. Naměřená data ze čtyř oblastí pro 5 intervalů měření tvoří dohromady 20 výběrových souborů. V této kapitole bude ukázán vzorový postup pro jeden výběrový soubor. Pro tyto účely byl náhodně vybrán výběrový soubor „30LO“ z jehož názvu lze identifikovat, že se jedná o měření po vyrobených 30 tisících kusech „L“ – levé strany střížné vložky, „O“ – oblast vnější hrany.

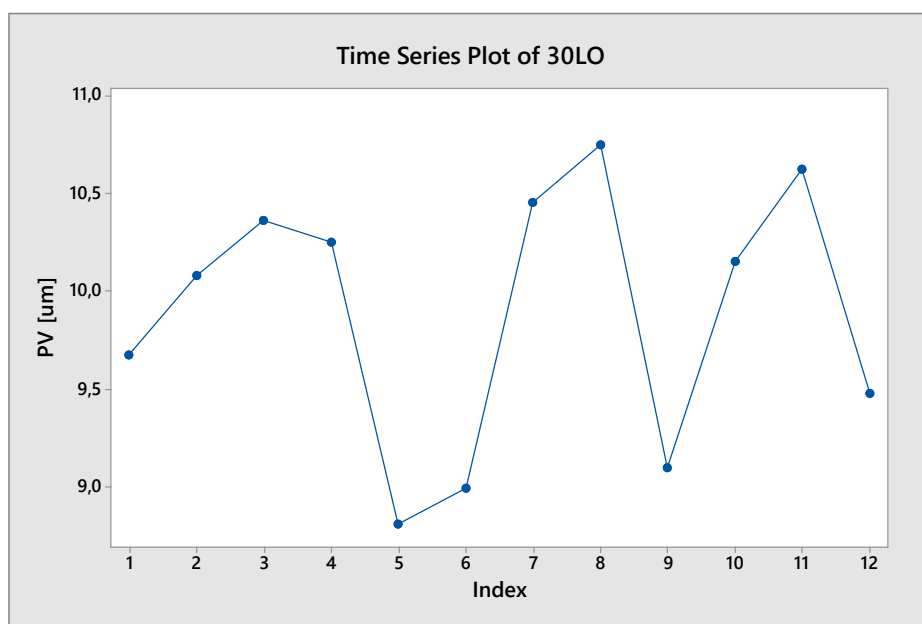


Obr. 44: Sběr dat 30LO s příslušnými řezy k hodnotám

### 8.1 EDA – explorační analýza dat

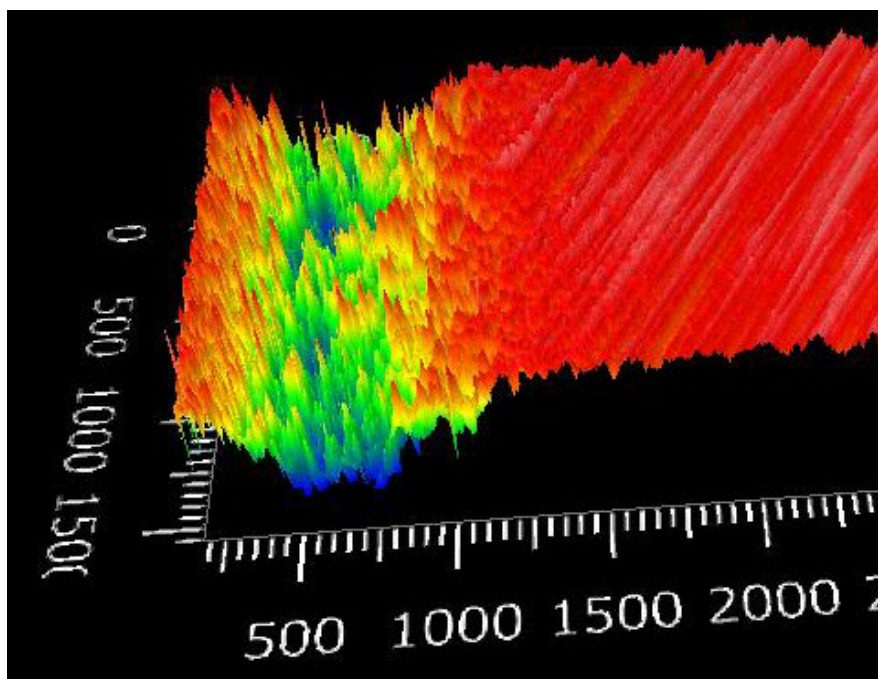
Výběrový soubor 30LO byl v prvním kroku podroben explorační analýze dat v softwaru Minitab 17 za účelem vizualizace dat, shrnutí hlavních charakteristik a případnému upozornění na hodnoty podezřelé z extrému či hrubou chybu.

### 8.1.1 Time series plot – Diagram časového vývoje měření



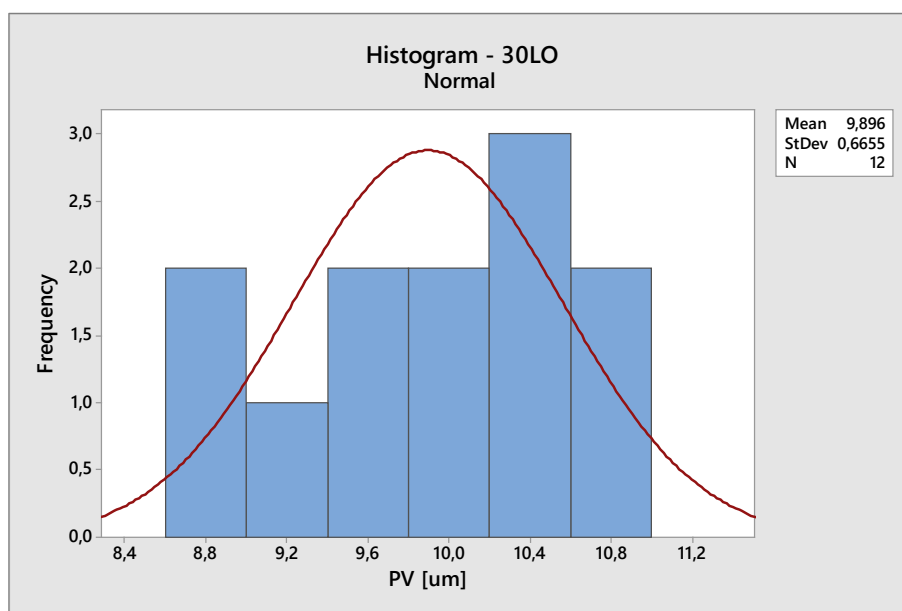
Obr. 45: Diagram časové řady – 30LO

V diagramu časové řady můžeme vidět hodnoty parametru PV z příslušných řezů od sebe ve svislé ose Y náhodně vzdálených. Zároveň tvar W, který by mohl v určitých případech naznačovat nežádoucí pravidelné kolísání měření. Vzhledem k povaze snímaného povrchu (viz Obr. 46) je takový vývoj měření opodstatněn. Nejnižší hodnota parametru PV se nachází pod 9,0  $\mu\text{m}$ . Nejvyšší hodnota se nachází pod hodnotou 11  $\mu\text{m}$ .



Obr. 46: Výřez příslušného snímku povrchu a oblasti

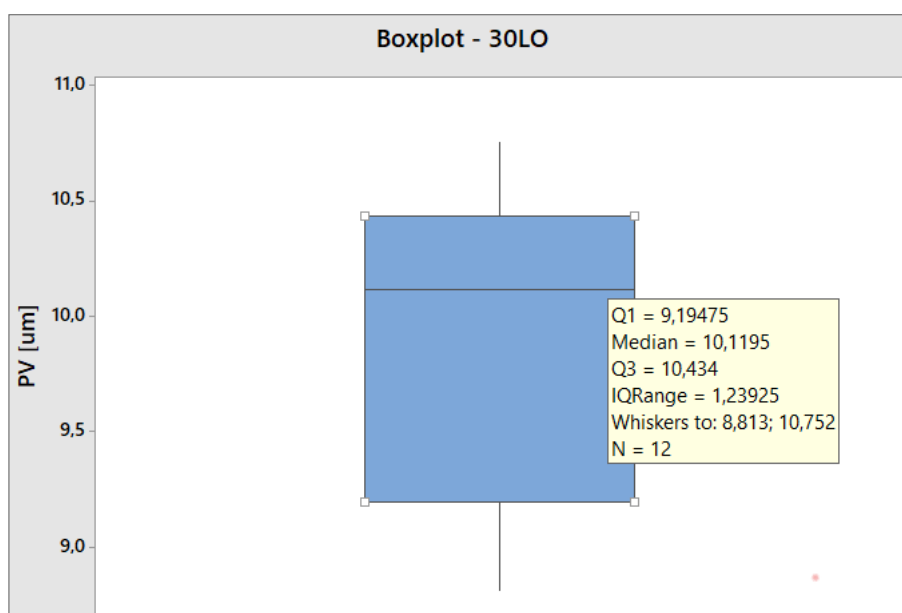
### 8.1.2 Histogram



Obr. 47: Histogram 30LO

Histogram zobrazuje rozložení proměnné PV v intervalech o velikosti 0,4  $\mu\text{m}$ . Pro srovnání je překryt křivkou normálního rozdělení. Aritmetický průměr byl vypočten  $\bar{x} = 9,896 \mu\text{m}$ .

### 8.1.3 Boxplot – Krabicový graf



Obr. 48: Boxplot – 30LO

Pomocí boxplotu je vizualizováno rozložení dat a je poskytován stručný přehled o tom, kde mají hodnoty tendenci se koncentrovat. Centrální box představuje mezikvartilové rozpětí (IQR), které zahrnuje prostředních 50 % dat. Spodní část boxu (Q1) je přibližně 9,19  $\mu\text{m}$ ,



což označuje první kvartil, a horní část boxu (Q3) je přibližně 10,43  $\mu\text{m}$ , což označuje třetí kvartil. Samotné IQR je přibližně 1,24  $\mu\text{m}$ . Medián (Q2) znázorněný čarou uvnitř rámečku, je přibližně 10,12  $\mu\text{m}$ . Tato hodnota rozděluje soubor dat na dvě stejné početné poloviny. Dále je ve žluté tabulce stanoveno minimum a maximum – 8,81  $\mu\text{m}$  a 10,75  $\mu\text{m}$ . Tento boxplot nezobrazuje žádné odlehlé hodnoty.

#### 8.1.4 Numerické výsledky

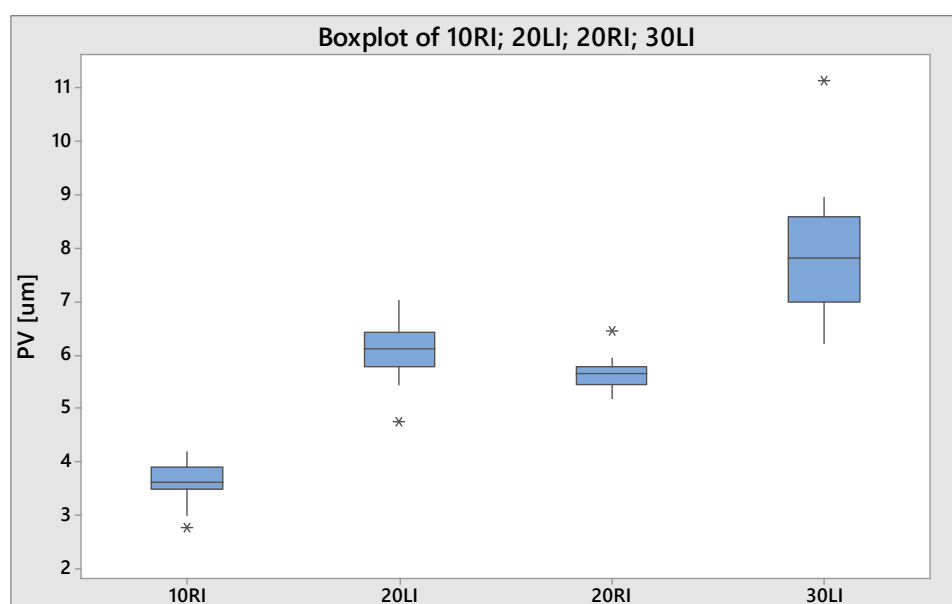
Tabulka 1: Numerické výsledky – 30LO

Proměnná	Ar. Průměr	Sm. Odch.	Variační koeficient
PV [ $\mu\text{m}$ ]	9,896 $\mu\text{m}$	0,665 $\mu\text{m}$	6,72 %

V dalším kroku byly spočteny v softwaru Minitab 17 bodové odhady střední hodnoty, směrodatné odchylky a variačního koeficientu. Na základě hodnoty variačního koeficientu  $v_x \leq 10 \%$  lze konstatovat, že bodový odhad střední hodnoty, respektive hodnota aritmetického průměru je relevantní.

#### 8.1.5 EDA – shrnutí

Pomocí metodiky EDA byla data vizualizována a bylo dosaženo uceleného přehledu o výběrovém souboru 30LO. V tomto případě nebyl detekován žádný trend ve vývoji měření, výrazná šikmost ani potenciálně odlehlá hodnota. Všech 20 výběrových souborů bylo podrobena metodice EDA. U čtyř výběrových souborů konkrétně: 10RI, 20LI, 20RI, 30LI byla v boxplotu indikována hodnota podezřelá z odlehlé hodnoty. Tyto soubory byly podrobeny testu normality a Grubbsově testu odlehlých hodnot viz Tabulka 2, Obr. 51-50.

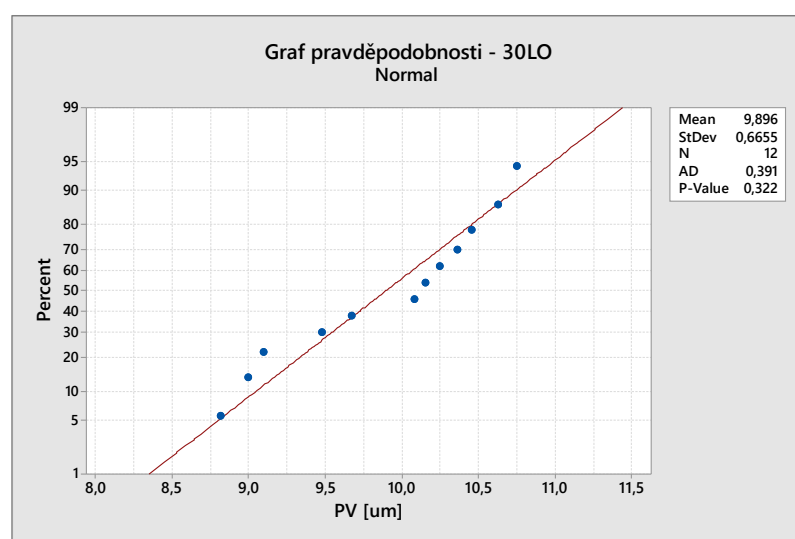


Obr. 49: Boxploty pro výběrové soubory zleva: 10RI, 20LI, 20RI, 30LI

## 8.2 Anderson-Darling test – testování normality

Výběrový soubor 30LO byl podroben Anderson-Darling testu normality. Zvolená hladina významnosti hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ . Byla stanovena nulová hypotéza a alternativní hypotéza:

- $H_0$ : data **pochází** ze základního souboru s normálním rozdělením  $N(\mu; \sigma^2)$
- $H_A$ : data **nepochází** ze základního souboru s normálním rozdělením  $N(\mu; \sigma^2)$



Obr. 50: Graf pravděpodobnosti, Anderson-Darling test

Hodnota  $p = 0,322$  přísluší k testu normality. Na základě hodnoty  $p > 0,05$  nezamítám nulovou hypotézu  $H_0$ .

AD (Anderson-Darlingova testovací hodnota): Hodnota AD je 0,391 popisuje, jak data odpovídají normálnímu rozdělení.

Bylo stanoveno, že výběrový soubor 30LO lze oprávněně považovat za data pocházející ze základního souboru s normálním rozdělením, jak napovídá rozložení dat vzhledem k teoretické normální přímce a s oporou ve výši  $p$ -hodnoty, respektive nezamítnutí nulové hypotézy  $H_0$ .

### 8.2.1 Výsledky testování normality

Všech 20 výběrových souborů bylo podrobeno Anderson-Darling testu normality. V následující tabulce jsou uvedeny výstupy z testů normality vyjádřené  $p$ -hodnotou. Na základě těchto  $p$ -hodnot nebyla ani u jednoho výběrového souboru zamítnuta nulová hypotéza  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Tabulka 2: p-hodnoty, Anderson-Darling test,  $\alpha = 0,05$ 

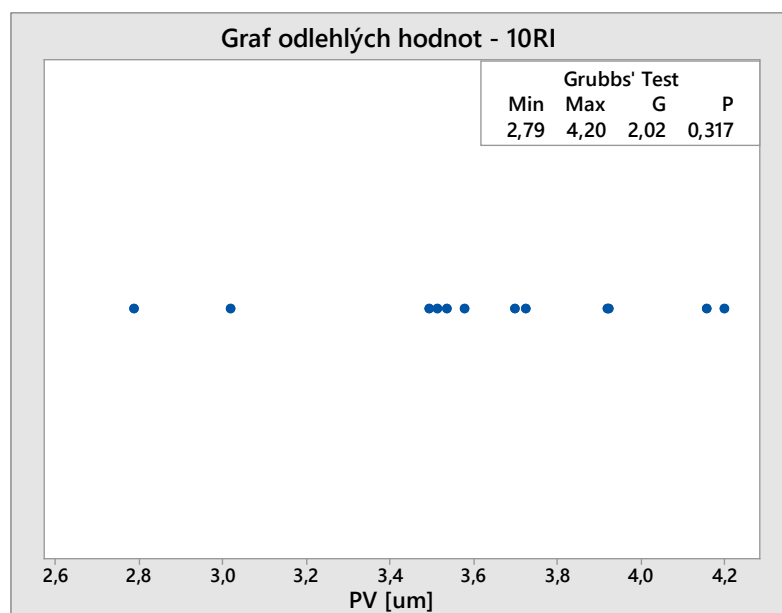
$1 - \alpha = 0,95$	LO	LI	RI	RO
n [10 <sup>3</sup> ks]	p-hodnota [-]			
10	0,901	0,781	0,401	0,253
20	0,318	0,545	0,183	0,515
30	0,322	0,386	0,875	0,237
40	0,145	0,655	0,161	0,361
50	0,552	0,283	0,621	0,850

### 8.3 Grubbsův test odlehlých hodnot

Výběrové soubory 10RI, 20LI, 20RI, 30LI byly na základě indikace potenciálního výskytu odlehlé hodnoty viz předešlý Obr. 49 testovány na výskyt odlehlých hodnot prostřednictvím Grubbsova testu na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Byla sestavena nulová a alternativní hypotéza.

- $H_0$ : MIN nebo MAX **není** odlehlá hodnota
- $H_A$ : MIN nebo MAX **je** odlehlá hodnota

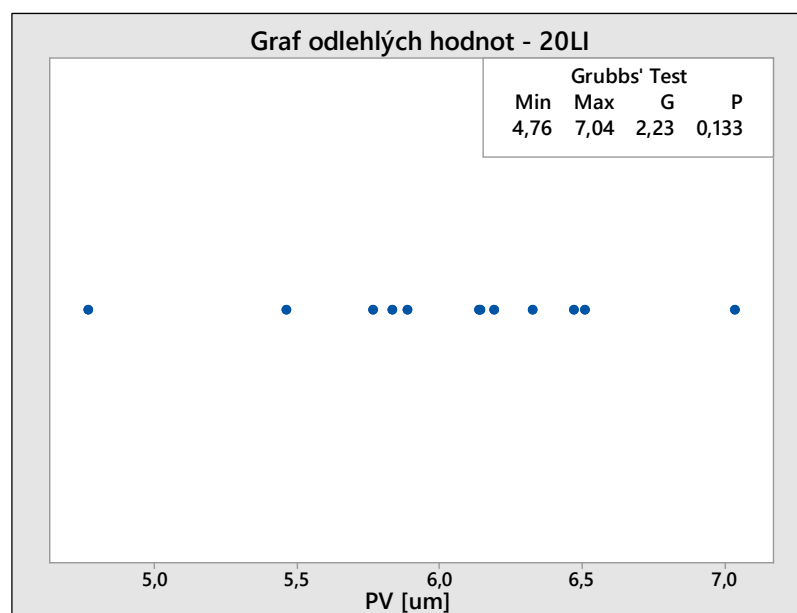
#### 8.3.1 Grubbsův test odlehlých hodnot – 10RI



Obr. 51: Graf odlehlých hodnot – 10RI

Na základě hodnoty  $p = 0,317 > 0,05$  nezamítám nulovou hypotézu  $H_0$  s možností omylu 5 %.

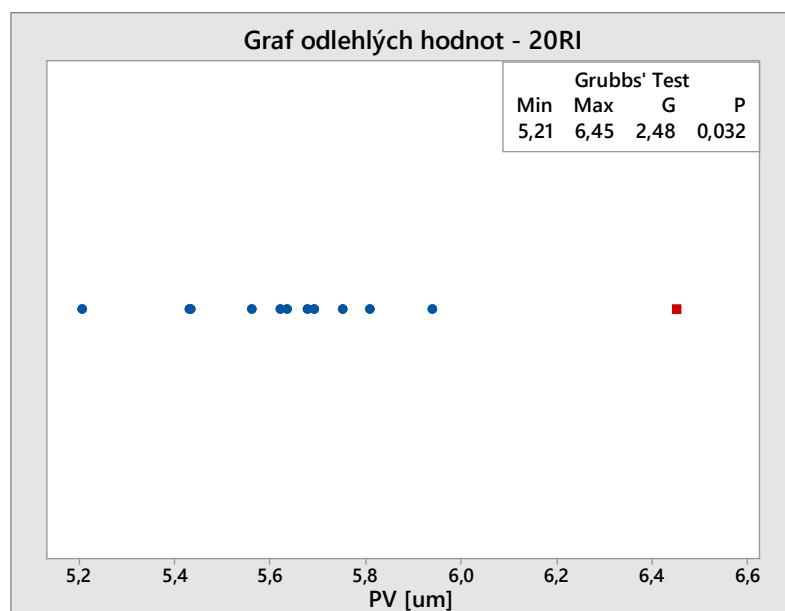
### 8.3.2 Grubbsův test odlehlých hodnot – 20LI



Obr. 52: Graf odlehlých hodnot – 20LI

Na základě hodnoty  $p = 0,133 > 0,05$  nezamítám nulovou hypotézu  $H_0$  s možností omylu 5 %.

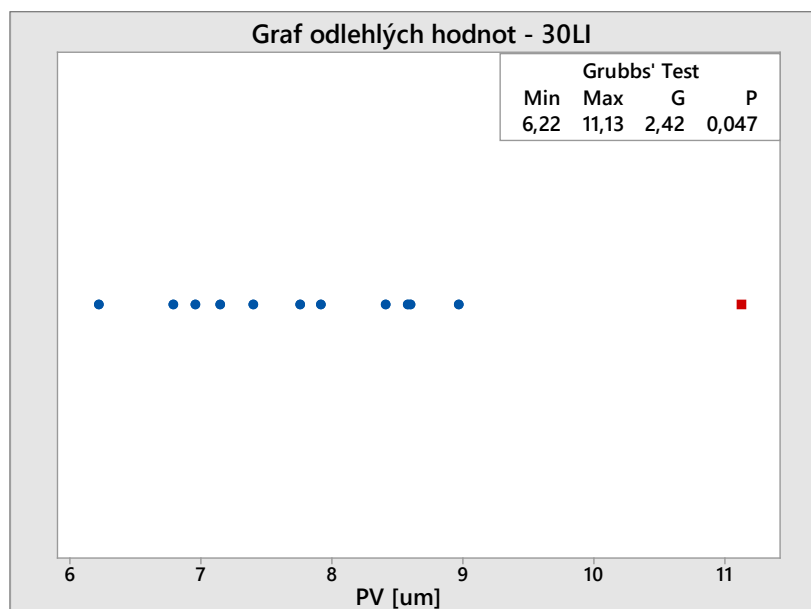
### 8.3.3 Grubbsův test odlehlých hodnot – 20RI



Obr. 53: Graf odlehlých hodnot – 20RI

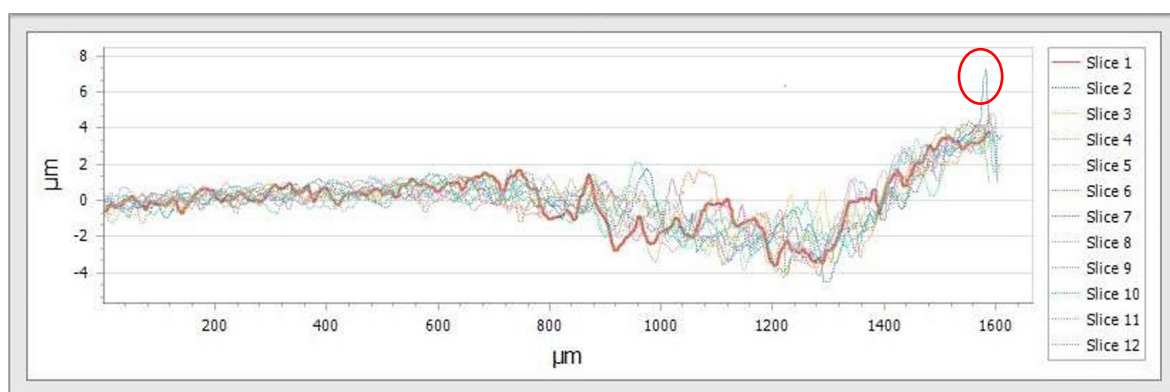
Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  dle hodnoty  $p = 0,032 < 0,05$  zamítám nulovou hypotézu  $H_0$  v prospěch hypotézy alternativní. Maximální hodnota byla ze souboru vyřazena.

### 8.3.4 Grubbsův test odlehlých hodnot – 30LI



Obr. 54: Graf odlehlých hodnot – 30LI

Na základě hodnoty  $p = 0,047 < 0,05$  zamítám nulovou hypotézu  $H_0$  ve prospěch hypotézy alternativní s možností omylu 5 %. Maximální hodnota výběrového souboru 30LI byla vyřazena. Níže na Obr. 55 je označena červeným oválem.



Obr. 55: Odlehlá hodnota v řezech povrchem – 30LI

## 8.4 Soubory dat pro průběh opotřebení

Z naměřených dat byly po explorační datové analýze, testování normality a odlehlých hodnot vytvořeny 4 soubory dat, které budou sloužit jako vstupní data pro analýzu průběhu opotřebení.

### 8.4.1 Aritmetické průměry výběrových souborů

Aritmetické průměry všech 20 výběrových souborů byly podloženy variačním koeficientem v následujících tabulkách.

Tabulka 3: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 10 tisíc kusů

10 tisíc kusů	LO	LI	RI	RO
$\bar{x}_{PV}$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,397	4,305	3,629	4,034
$v_x$ [%]	7,862	16,350	11,502	4,512

Tabulka 4: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 20 tisíc kusů

20 tisíc kusů	LO	LI	RI	RO
$\bar{x}_{PV}$ [ $\mu\text{m}$ ]	7,564	6,044	5,614	7,339
$v_x$ [%]	3,311	9,501	3,600	5,770

Tabulka 5: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 30 tisíc kusů

30 tisíc kusů	LO	LI	RI	RO
$\bar{x}_{PV}$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,896	7,703	8,244	9,859
$v_x$ [%]	6,724	11,411	6,860	10,628

Tabulka 6: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 40 tisíc kusů

40 tisíc kusů	LO	LI	RI	RO
$\bar{x}_{PV}$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,007	10,358	10,284	12,470
$v_x$ [%]	9,732	7,657	9,181	8,888

Tabulka 7: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 50 tisíc kusů

50 tisíc kusů	LO	LI	RI	RO
$\bar{x}_{PV}$ [ $\mu\text{m}$ ]	14,035	12,032	12,071	13,905
$v_x$ [%]	7,624	3,828	4,540	6,146

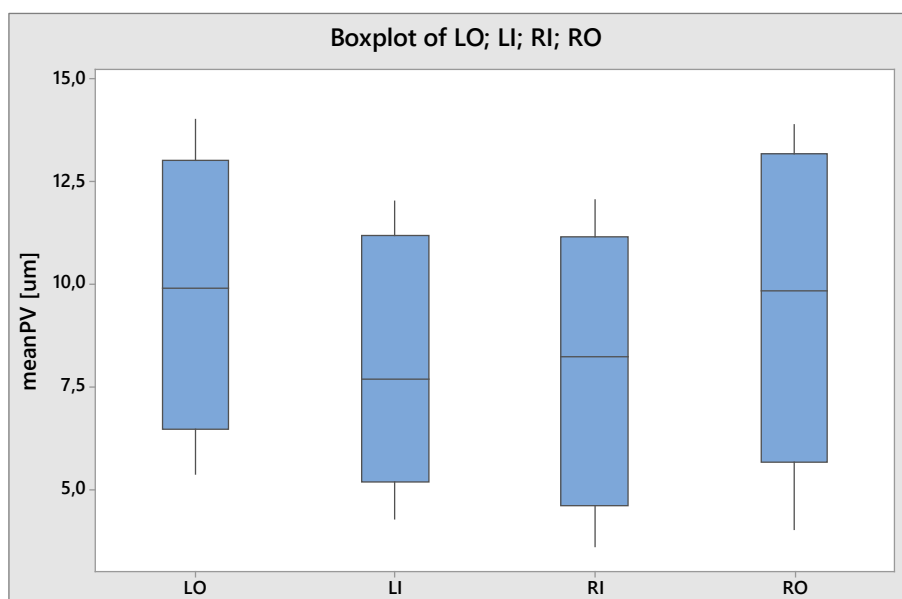
Vzhledem k hodnotám jednotlivých variačních koeficientů, které jsou ve všech případech menší než 20 % byly všechny tyto průměry využity při regresní analýze vývoje opotřebení.

### 8.4.2 Soubory dat pro regresní analýzu

Tabulka 8: Soubory dat – LO, LI, RI, RO

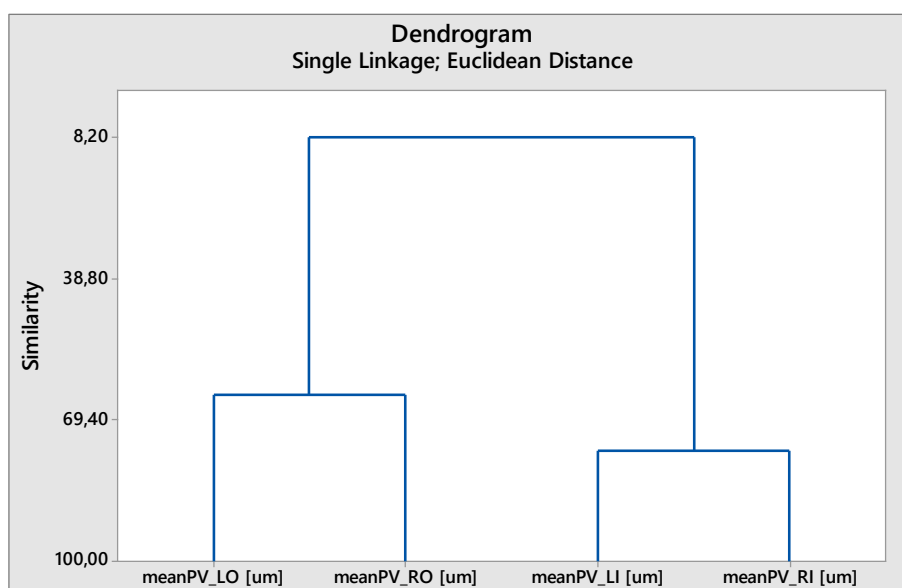
	LO	LI	RI	RO
$y$ [ks]	$y_{\bar{x}_{PV}}$ [ $\mu\text{m}$ ]			
10000	5,397	4,305	3,629	4,034
20000	7,564	6,044	5,614	7,339
30000	9,896	7,703	8,244	9,859
40000	12,007	10,358	10,284	12,470
50000	14,035	12,032	12,071	13,905

Soubory dat byly vizualizovány prostřednictvím boxplotu.



Obr. 56: Boxplot – LO, LI, RI, RO

Zde si lze všimnout vizuální podobnosti rozložení dat mezi soubory z oblasti vnější hrany (LO, RO), a také mezi soubory dat z oblasti vnitřní hrany (LI, RI).



Obr. 57: Dendrogram – podobnost souborů dat

Dendrogram demonstruje 64% podobnost mezi soubory z oblasti vnější hrany razníku. Podobnost mezi soubory z oblasti vnitřní hrany byla prostřednictvím dendrogramu vyjádřena na 76 %. Naopak soubory z oblasti vnější hrany se příliš nepodobají souborům z oblasti vnitřní hrany. Podobnost vývoje opotřebení byla dále prošetřena na straně 68 s využitím regresních modelů jednotlivých souborů dat.

## 8.5 Regresní analýza

Průběh opotřebení střižné vložky v jednotlivých oblastech byl hodnocen pomocí metod regresní analýzy konkrétně lineární regrese.

### 8.5.1 Regresní model – oblast LO

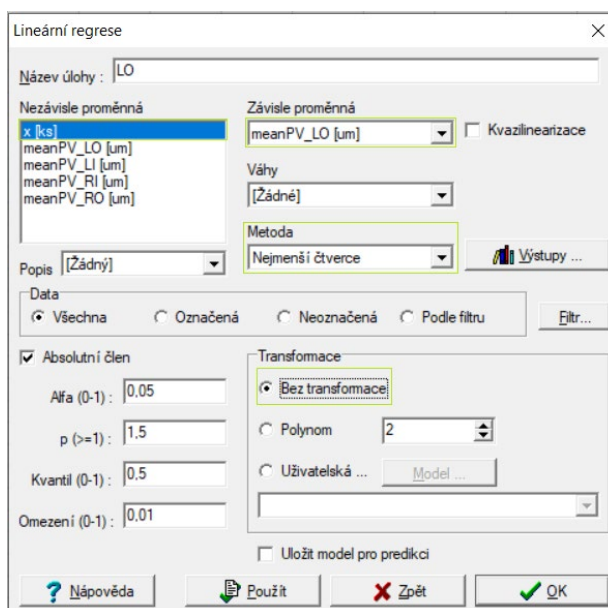
Pro data z Tabulka 2 Tabulka 9 byla vypočtena hodnota Pearsonova korelačního koeficientu  $r \approx 1$ . Tím je indikována velmi silná kladná korelace, přímá závislost a téměř dokonalá lineární závislost. V prvním kroku regresní analýzy byly stanoveny nezávislá a závislá proměnná. Jako nezávislá proměnná byl stanoven počet vyrobených kusů. Jako závislá proměnná byl stanoven aritmetický průměr naměřeného parametru PV a je vyjádřen v jednotkách  $\mu\text{m}$ . Na další straně byl popsán postup při regresní analýze souboru dat z oblasti LO.

Tabulka 9: Nezávislá a závislá proměnná – LO

LO	
x [ks]	$y_{\bar{x}_{PV}}$ [ $\mu\text{m}$ ]
10000	5,397
20000	7,564
30000	9,896
40000	12,007
50000	14,035

Stanovené kritérium optimality:  $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow \text{MIN}$ , tj. součet kvadrátů reziduí je minimální.

Regresní model byl nalezen a podroben kritice v softwaru QC Expert



Obr. 58: Nastavení „Lineární regrese“ QC Expert



Data byla testována na normalitu reziduí. Nulová hypotéza zní:

$H_0: \varepsilon_i \in N(\mu_\varepsilon, \sigma_\varepsilon^2)$ , tj. rezidua pochází ze základního souboru s normálním rozdělením.

$H_A: \varepsilon_i \notin N(\mu_\varepsilon, \sigma_\varepsilon^2)$ , tj. rezidua nepochází ze základního souboru s normálním rozdělením.

Jarque-Berrův test normality	
Hodnota kritéria JB :	0,52381
Kvantil $\chi^2(1-\alpha, 2)$ :	5,99146
Pravděpodobnost :	0,76959
Závěr :	Rezidua mají normální rozdělení.

*Obr. 59: Testování reziduí – přímková regrese LO*

Nulová hypotéza  $H_0$  byla nezamítnuta. S pravděpodobností 95 % pochází rezidua ze základního souboru s normálním rozdělením.

Data byla testována na heteroskedasticitu. Nulová hypotéza zní:

$H_0: \forall \sigma_{\varepsilon i}^2 = \sigma_\varepsilon^2$ , tj. rozptyl reziduí v každé  $i$ -té podmnožině dat a  $\sigma_\varepsilon^2$  je stejný

$H_A: \sigma_{\varepsilon i}^2 \neq \sigma_\varepsilon^2$  tj. alespoň jedna  $i$ -tá podmnožina má jiný rozptyl

Cook-Weisbergův test heteroskedasticity	
Hodnota kritéria CW :	0,11024
Kvantil $\chi^2(1-\alpha, 1)$ :	3,84146
Pravděpodobnost :	0,73987
Závěr :	Rezidua vykazují homoskedasticitu.

*Obr. 60: Test homoskedasticity reziduí*

Nulová hypotéza nebyla zamítnuta, tedy závěrem testu je homoskedasticita reziduí – homogenita rozptylu reziduí, což je základní předpoklad pro aplikaci metody nejmenších čtverců pro odhad regresní koeficientů funkce.

Celkový regresní model byl testován prostřednictvím Fisher-Snedecorova testu, zda je model jako celek statisticky významný. Nulová hypotéza zní:

$H_0: \forall \beta_j = 0$  tj. všechny regresní koeficienty jsou nulové, model není významný

$H_A: \beta_j \neq 0$  tj. alespoň jeden  $j$ -tý regresní koeficient není nulový, model je významný

Fisher-Snedecorův test významnosti modelu	
Hodnota kritéria F :	4684,769526
Kvantil F (1- $\alpha$ , m-1, n-m) :	19,0
Pravděpodobnost :	0,000213
Závěr :	Model je významný

*Obr. 61: Test významnosti celkového modelu*

Nulová hypotéza byla zamítnuta na základě hodnoty kritéria  $F > F_{0,95}$ . Alespoň jeden regresní koeficient není statisticky nevýznamný.

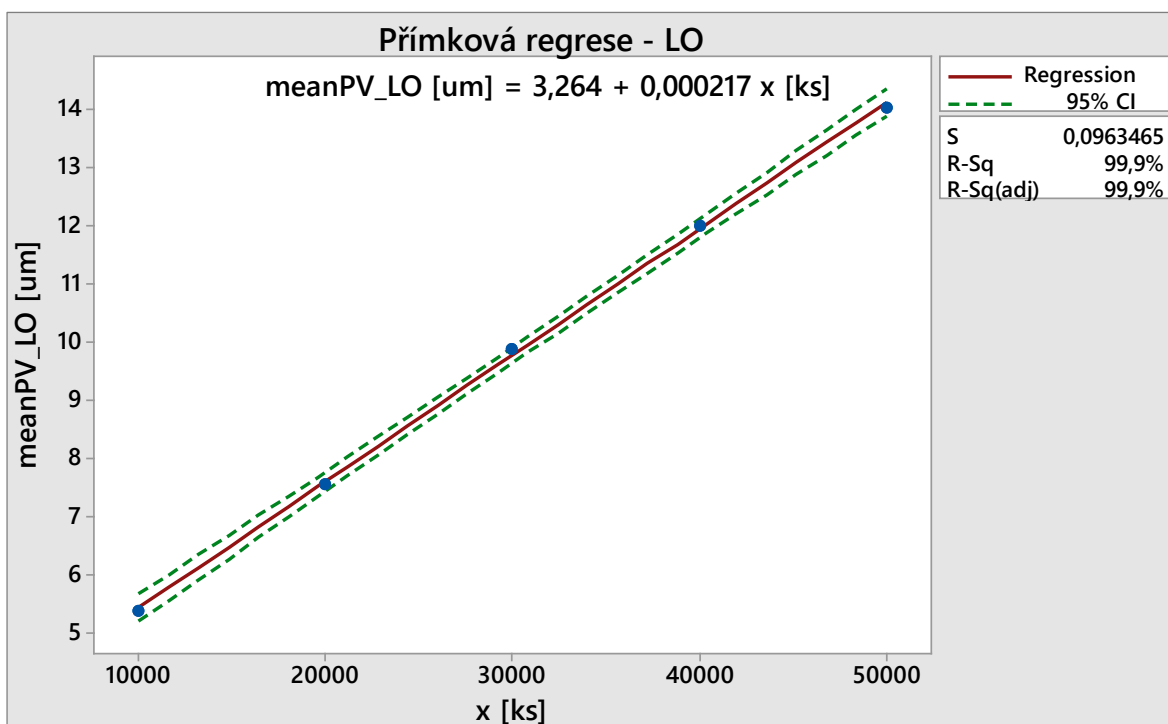
Dále byly nalezeny regresní koeficienty, které byly podrobeny testu významnosti.

$H_0: \beta_j = 0$ ; tj. j-tý regresní koeficient je nevýznamný

$H_A: \beta_j \neq 0$ ; tj. j-tý regresní koeficient není nevýznamný

Odhady parametrů						
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	3,2641	0,101069	Významný	0,000065	2,942455	3,585745
x [ks]	0,000217	0,000003	Významný	0,000006	0,000207	0,000227

Obr. 62: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese LO  
 Statistická nevýznamnost odhadů regresních koeficientů byla zamítnuta. Toto tvrzení podporuje i Sillenovo pravidlo. Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  byl stanoven odhad intervalu spolehlivosti směrnice regresní přímky  $\beta_1 \in \langle 0,000207; 0,000227 \rangle$  a absolutního členu přímky  $\beta_2 \in \langle 2,942455; 3,585745 \rangle$ .



Obr. 63: Lineární regrese přímková – LO

Tabulka 10: Statistické charakteristiky regrese – LO

Vícenásobný korelační koeficient R	0,999893
Koeficient determinace $R^2$	0,999787
Predikovaný korelační koeficient $R_P$	0,99461
Střední kvadratická chyba predikce MEP	0,025475
Akaikeho informační kritérium, AIC	-25,036716
Reziduální součet čtverců, RSC	0,010073

V rámci regresní analýzy průběhu opotřebení v oblasti LO bylo testováno i proložení parabolickou a kubickou funkcí. Statistická nevýznamnost regresních koeficientů je v obou případech alespoň pro jeden z koeficientů nezamítnuta viz Obr. 64 a Obr. 65.

Odhady parametrů				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost
Abs	3,0146	0,152209	Významný	0,00254
x [ks]	0,000239	0,000012	Významný	0,002355
x [ks]^2	-3,564285714E-010	1,896699604E-010	Nevýznamný	0,200983

Obr. 64: Odhady parametrů, test významnosti regresních koef., kvadratická regrese LO

Odhady parametrů				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost
Abs	3,3618	0,308099	Nevýznamný	0,058182
x [ks]	0,00019	0,00004	Nevýznamný	0,133107
x [ks]^2	1,503571429E-009	1,494801741E-009	Nevýznamný	0,498138
x [ks]^3	-2,066666667E-014	1,650444865E-014	Nevýznamný	0,429011

Obr. 65: Odhady parametrů, test významnosti regresních koeficientů, kubická regrese LO  
S ohledem na nezamítnutí statistické nevýznamnosti regresních koeficientů byly tyto dva regresní modely shledány nevhodné pro vyjádření vztahu mezi závislou a nezávislou proměnnou.

Jako optimální regresní model byla zvolena lineární funkce (Obr. 63). Její předpis:

$$\text{meanPV}_{LO} = 0,000217 \cdot x + 3,2641 \quad (8.1)$$

## 8.5.2 Regresní model – oblast LI

Tabulka 11: Nezávislá a závislá proměnná – LI

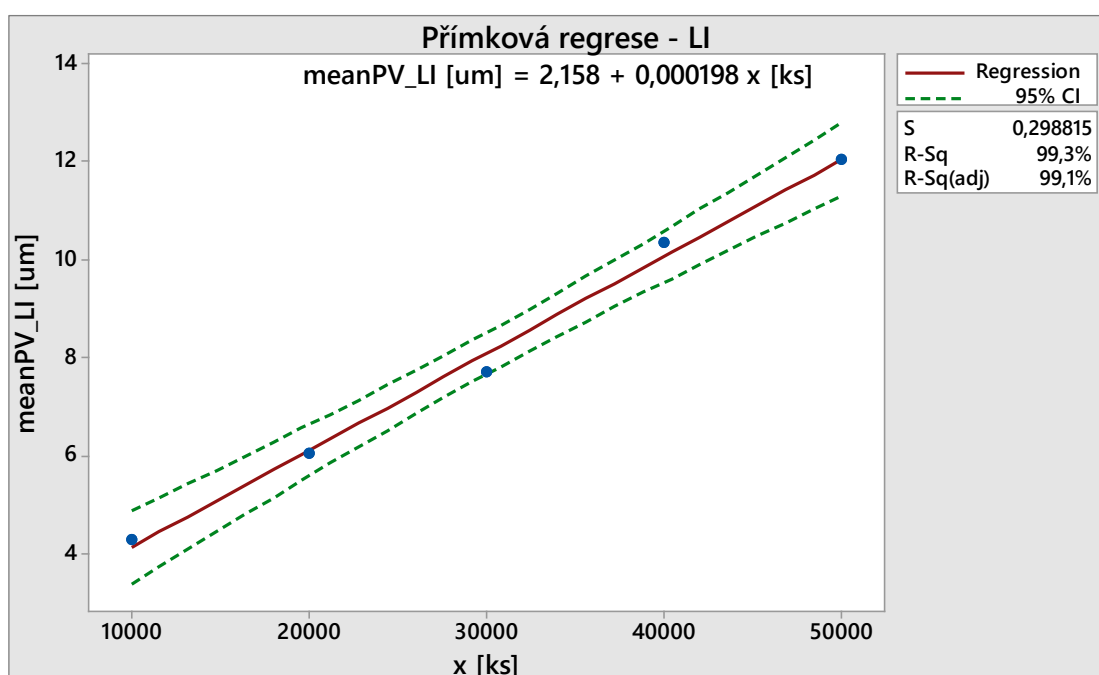
LI	
x [ks]	$y_{\bar{x}, PV} [\mu m]$
10000	4,305
20000	6,044
30000	7,703
40000	10,358
50000	12,032

Prostřednictvím metod lineární regrese byl stejným postupem (viz 8.5.1) vyšetřen průběh opotřebení v oblasti LI během výroby, respektive závislost parametru PV na počtu vyrobených kusů. Regresní model přímkový je statisticky významný. Rezidua vykazují homoskedasticitu a pochází ze základního souboru s normálním rozdělením. Odhady regresních koeficientů byly podrobeny testu významnosti. Nevýznamnost jednotlivých odhadů regresních koeficientů byla zamítnuta s pravděpodobností  $1 - \alpha = 0,95$ , tedy

všechny odhady regresních koeficientů jsou významné. Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  byl stanoven odhad intervalu spolehlivosti směrnice regresní přímky  $\beta_1 \in \langle 0,000168; 0,000228 \rangle$  a absolutního členu přímky  $\beta_2 \in \langle 1,160563; 3,155437 \rangle$  viz Obr. 66 níže.

Odhady parametrů						
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	2,158	0,313418	Významný	0,006276	1,160563	3,155437
x [ks]	0,000198	0,000009	Významný	0,000239	0,000168	0,000228

Obr. 66: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese LI



Obr. 67: Lineární regrese přímková – LI

Tabulka 12: Statistické charakteristiky regrese – LI

Vícenásobný korelační koeficient R	0,99659
Koeficient determinace $R^2$	0,993191
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,969831
Střední kvadratická chyba predikce MEP	0,119609
Akaikeho informační kritérium, AIC	-10,632845
Reziduální součet čtverců, RSC	0,267903

Opatřebení v oblasti LI v závislosti na počtu vyrobených kusů bylo vyšetřeno i kvadratickou a kubickou regresí. Na základě testu významnosti celkového modelu byly obě nulové hypotézy nezamítnuty – všechny regresní koeficienty kvadratické a kubické funkce jsou statisticky nevýznamné. Tedy kvadratická i kubická regrese byly shledány nevhodné pro vyjádření vztahu mezi závislou a nezávislou proměnnou.

Jako optimální regresní model byla stanovena lineární funkce s předpisem:

$$\text{meanPV}_{LI} = 0,000198 \cdot x + 2,158 \quad (8.2)$$

### 8.5.3 Regresní model – oblast RI

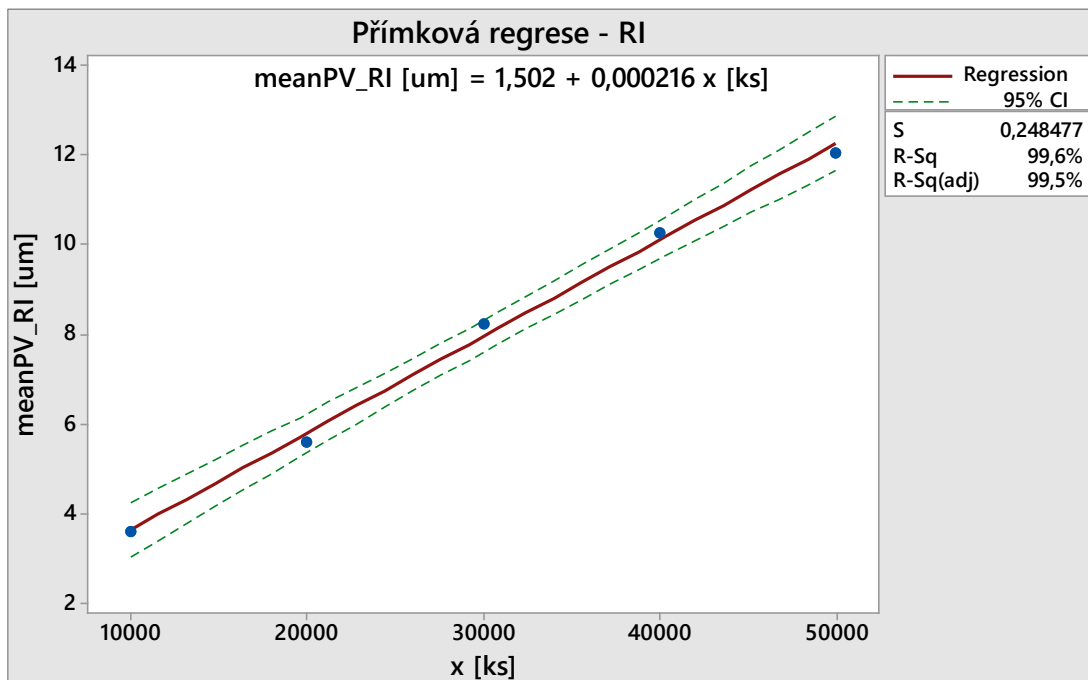
Tabulka 13: Nezávislá a závislá proměnná – RI

RI	
x [ks]	$y_{\bar{x}, PV} [\mu m]$
10000	3,629
20000	5,614
30000	8,244
40000	10,284
50000	12,071

Bylo využito metod lineární regrese (viz 8.5.1) pro aproximaci vztahu opotřebení v oblasti RI k počtu vyrobených kusů. Regresní model přímkový je statisticky významný. Rezidua vykazují homoskedasticitu a pochází ze základního souboru s normálním rozdělením. Odhady regresních koeficientů byly podrobeny testu významnosti. Nevýznamnost jednotlivých odhadů regresních koeficientů byla zamítnuta s pravděpodobností 95 %, tedy všechny odhady regresních koeficientů jsou významné. Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  byl stanoven odhad intervalu spolehlivosti regresního koeficientu  $\beta_1 \in \langle 0,000191; 0,000241 \rangle$  a regresního koeficientu  $\beta_2 \in \langle 0,672474; 2,331926 \rangle$ .

Odhady parametrů						
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	1,5022	0,26072	Významný	0,01039	0,672474	2,331926
x [ks]	0,000216	0,000008	Významný	0,000106	0,000191	0,000241

Obr. 68: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese RI



Obr. 69: Lineární regrese přímková – RI

Tabulka 14: Statistické charakteristiky regrese – RI

Vícenásobný korelační koeficient R	0,998011
Koeficient determinace R <sup>2</sup>	0,996025
Predikovaný korelační koeficient R <sub>p</sub>	0,977492
Střední kvadratická chyba predikce MEP	0,105581
Akaikeho informační kritérium, AIC	-12,473776
Reziduální součet čtverců, RSC	0,185386

Jiné modely lineární regrese (kvadratická, kubická) byly shledány na základě nevýznamnosti regresních koeficientů nevhodné.

Předpis optimální funkce zní:

$$\text{meanPV\_RI} = 0,000216 \cdot x + 1,5022 \quad (8.3)$$

#### 8.5.4 Regresní křivka – oblast RO

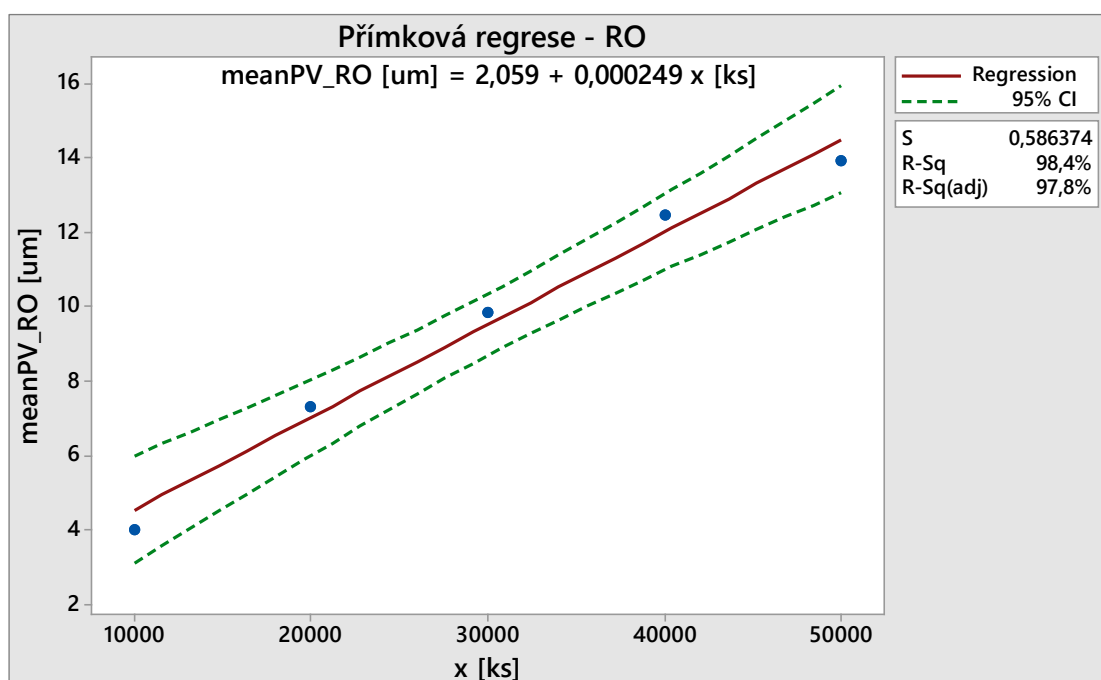
Tabulka 15: Nezávislá a závislá proměnná – RO

RO	
x [ks]	y <sub>x̄, PV</sub> [μm]
10000	4,034
20000	7,339
30000	9,859
40000	12,470
50000	13,905

Pomocí metod lineární regrese byl jako u předešlých souborů dat vyšetřen průběh opotřebení v oblasti RO během výroby. Regresní model přímkový je statisticky významný. Rezidua vykazují homoskedasticitu a pochází ze základního souboru s normálním rozdělením. Odhady regresních koeficientů byly podrobeny testu významnosti. Nevýznamnost odhadů regresních koeficientů byla zamítnuta na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ , tedy všechny regresní koeficienty jsou významné. S pravděpodobností  $1 - \alpha = 0,95$  byl stanoven konfidenční interval směrnice regresní přímky  $\beta_1 \in \langle 0,000019; 0,000308 \rangle$  a absolutního členu přímky  $\beta_2 \in \langle 0,101861; 4,017139 \rangle$ .

Odhady parametrů						
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	2,0595	0,615136	Významný	0,044123	0,101861	4,017139
x [ks]	0,000249	0,000019	Významný	0,000896	0,00019	0,000308

Obr. 70: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese RO



Obr. 71: Lineární regrese přímková – RO

Tabulka 16: Statistické charakteristiky regrese – RO

Vícenásobný korelační koeficient R	0,991763
Koeficient determinace $R^2$	0,983593
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,858238
Střední kvadratická chyba predikce MEP	0,925724
Akaikeho informační kritérium, AIC	-3,889792
Reziduální součet čtverců, RSC	1,03198

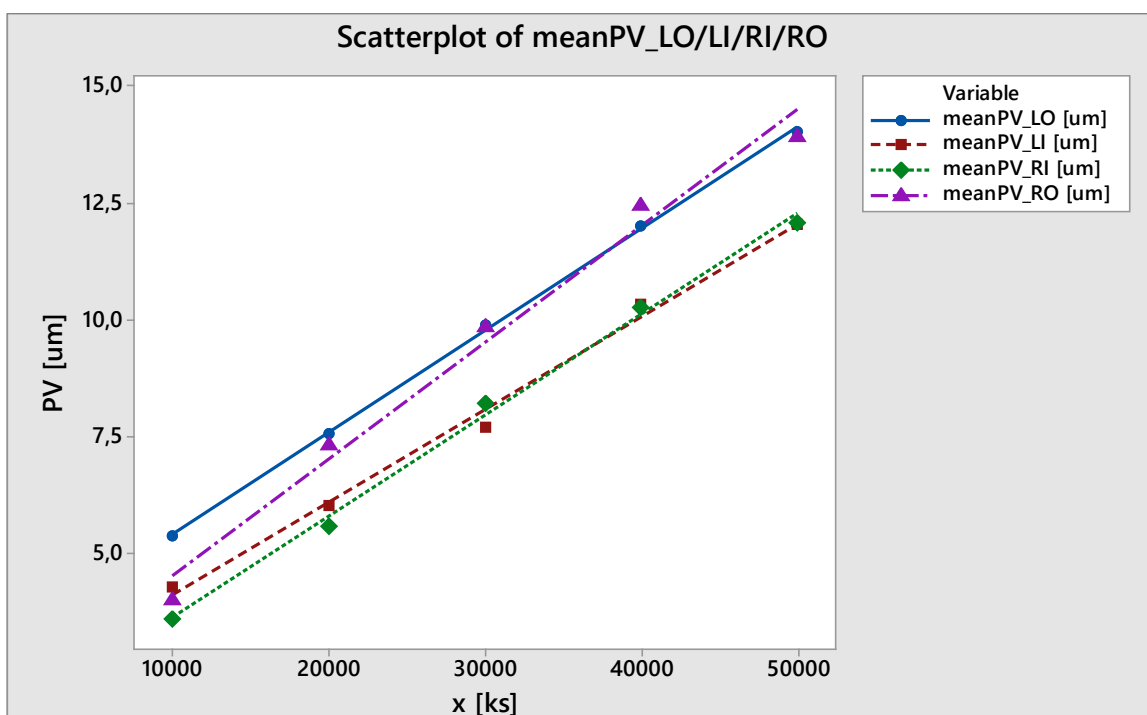
Jiné modely lineární regrese (kvadratická, kubická) byly shledány na základě nevýznamnosti regresních koeficientů nevhodné. Vztah byl modelován prostou lineární regresí, tedy vztah mezi závislou a nezávislou proměnnou byl aproximován přímkou.

Předpis optimální funkce zní:

$$\text{meanPV}_{RO} = 0,000249 \cdot x + 2,0595 \quad (8.4)$$

## 8.6 Porovnání regresí

Vzhledem k demonstrovaným podobnostem souborů dat v dendrogramu na straně 59 byly regresní koeficienty jednotlivých regresí testovány prostřednictvím Chow testu. Pro vizualizaci byl vytvořen korelační diagram s proložením dat příslušnou přímkou.



Obr. 72: Korelační diagram LO, LI, RI, RO s proložením příslušnou přímkou

### 8.6.1 Chow test – LO a RO

Regresní koeficienty jsou testovány na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

$$\text{meanPV}_{LO} = 0,000217 \cdot x + 3,2641 \quad (8.1)$$

$$\text{meanPV}_{RO} = 0,000249 \cdot x + 2,0595 \quad (8.4)$$

Hypotéza nulová a alternativní zní:



$H_0: \beta_{RO} = \beta_{LO}$ , tj. regresní koeficienty RO a LO jsou stejné

$H_A: \beta_{RO} \neq \beta_{LO}$ , tj. regresní koeficienty RO a LO nejsou stejné

Tabulka 17: Reziduální součty čtverců – LO, RO, LO+RO

	LO	RO	LO+RO
RSC	0,027859	1,03198	1,724151

Kritéria pro test v případě platnosti homoskedasticity reziduí:

$$F_{0,95} = 5,318$$

$$F_{\text{ChowTest}} = 1,880$$

Na základě  $F_{\text{ChowTest}} < F_{0,95}$  nebyla zamítnuta nulová hypotéza. Rozdíly mezi regresními křivkami pro oblast LO a RO jsou pouze nahodilé. V návaznosti na to lze s 95 % pravděpodobností říct, že rozdíl mezi opotřebením na levé a pravé straně střižníku je statisticky nevýznamný.

### 8.6.2 Chow test – LI a RI

Předpisy funkcí zní:

$$\text{meanPV}_{LI} = 0,000198 \cdot x + 2,158 \quad (8.2)$$

$$\text{meanPV}_{RI} = 0,000216 \cdot x + 1,5022 \quad (8.3)$$

Hypotéza nulová a alternativní zní:

$H_0: \beta_{LI} = \beta_{RI}$ , tj. regresní koeficienty LI a RI jsou stejné

$H_A: \beta_{LI} \neq \beta_{RI}$ , tj. regresní koeficienty LI a RI nejsou stejné

Tabulka 18: Reziduální součty čtverců – LI, RI, LI+RI

	LI	RI	LI+RI
RSC	0,2679	0,1854	0,64878

Kritéria pro test v případě platnosti homoskedasticity reziduí:

$$F_{0,95} = 5,318; \text{ kde } (m = 2; n - 2m = 6)$$

$$F_{\text{ChowTest}} = 1,2938$$

Na základě  $F_{ChowTest} < F_{0,95}$  nebyla zamítnuta nulová hypotéza. Rozdíly mezi regresními křivkami pro oblast LI a RI jsou způsobeny pouze náhodnou chybou. Ve spojitosti s tím, tvrdím s 95 % pravděpodobností, že rozdíl mezi opotřebením na levé a pravé straně střížníku je pouze náhodný, statisticky nevýznamný.

### 8.6.3 Chow test – LO a LI

Předpisy funkcí zní:

$$meanPV_{LO} = 0,000217 \cdot x + 3,2641 \quad (8.1)$$

$$meanPV_{LI} = 0,000198 \cdot x + 2,158 \quad (8.2)$$

Hypotéza nulová a alternativní zní:

$H_0: \beta_{LO} = \beta_{LI}$ , tj. regresní koeficienty LO a LI jsou stejné

$H_A: \beta_{LO} \neq \beta_{LI}$ , tj. regresní koeficienty LO a LI nejsou stejné

Tabulka 19: Reziduální součty čtverců – LI, RI, LI+RI

	LO	LI	LO+LI
RSC	0,02786	0,2679	7,6382

Kritéria pro test v případě platnosti homoskedasticity reziduí:

$$F_{0,95} = 5,318; \text{ kde } (m = 2; n - 2m = 6)$$

$$F_{ChowTest} = 70,19574$$

Na základě  $F_{ChowTest} > F_{0,95}$  byla zamítnuta nulová hypotéza ve prospěch hypotézy alternativní. Rozdíly mezi regresními křivkami pro oblast LO a LI nejsou nahodilé. V návaznosti na to lze říct, rozdíl mezi opotřebením u vnitřní a vnější hrany je statisticky významný.

### 8.6.4 Chow test – RO a RI

Předpisy funkcí zní:

$$meanPV_{RO} = 0,000249 \cdot x + 2,0595 \quad (8.4)$$

$$meanPV_{RI} = 0,000216 \cdot x + 1,5022 \quad (8.3)$$

Hypotéza nulová a alternativní zní:

$H_0: \beta_{RO} = \beta_{RI}$ , tj. regresní koeficienty RO a RI jsou stejné

$H_A: \beta_{RO} \neq \beta_{RI}$ , tj. regresní koeficienty RO a RI nejsou stejné

Tabulka 20: Reziduální součty čtverců – RO, RI, RO+RI

	RO	RI	RO+RI
RSC	1,03198	0,1854	7,79768

Kritéria pro test v případě platnosti homoskedasticity reziduí:

$$F_{0,95} = 5,318; \text{ kde } (m = 2; n - 2m = 6)$$

$$F_{ChowTest} = 16,21$$

Na základě  $F_{ChowTest} > F_{0,95}$  byla zamítnuta nulová hypotéza ve prospěch hypotézy alternativní. Rozdíly mezi regresními křivkami pro oblast RO a RI nejsou pouze náhodné. V návaznosti na to lze říct, rozdíl mezi průběhem opotřebení u vnitřní a vnější hrany je s 95 % pravděpodobností statisticky významný.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo nalézt vhodnou statistickou metodu pro hodnocení opotřebení razníku a s ohledem na průběh opotřebení navrhnout interval broušení a údržby. Razník byl vystaven opotřebení prostřednictvím výroby padesáti tisíc kusů v rámci, které byl v intervalu každých deseti tisíc kusů snímán povrch ve čtyřech vždy stejných oblastech dosedací plochy razníku. Jako míra opotřebení byl zvolen s ohledem na typ opotřebení amplitudový parametr drsnosti povrchu *PV*. Data byla vyšetřena metodikou EDA za účelem průzkumu, vizualizace a shrnutí základních charakteristik. Následně byla data podrobena testu normality, který potvrdil původ všech výběrových souborů ze základních souborů s normálním rozdělením a 2 odlehlé hodnoty na základě Grubbsova testu odlehlých hodnot byly vyřazeny ze souboru. Všechny statistické testy byly provedeny na hladině významnosti 5 %. Aritmetické průměry výběrových souborů byly na základě hodnot variačních koeficientů ve všech případech menších než 17 % shledány relevantní a použity pro sestavení 4 souborů dat. Tyto soubory LO, LI, RI, RO obsahující míru opotřebení v příslušné oblasti povrchu byly hodnoceny prostřednictvím metod regresní analýzy.

Regresní analýza byla provedena v softwaru QCExpert. Nalezené lineární regresní modely byly podrobeny kritice regresního tripletu. Kvadratická i kubická funkce byly na základě nevýznamnosti regresních koeficientů shledány nevhodné pro vyjádření závislosti. Závislost parametru *PV* na množství vyrobených kusů byla aproximována optimální funkcí – přímkou, tedy v intervalu od deseti tisíc až do padesáti tisíc lze tvrdit, že míra opotřebení v průběhu snímané výroby se vyvíjí lineárně viz rovnice (8.1), (8.2), (8.3) a (8.4). V souvislosti s dendrogramem demonstrovanou podobností opotřebení v oblastech LO, RO a LI, RI byly regresní koeficienty příslušných přímkových modelů podrobeny Chow testu. Tímto způsobem bylo s pravděpodobností 95 % dokázáno, že se vývoj opotřebení statisticky významně liší v oblasti vnější a vnitřní hrany dosedací plochy razníku. Zároveň bylo dokázáno, že vývoj opotřebení se liší statisticky nevýznamně v případě oblasti vnitřní hrany dosedací plochy razníku na levé a pravé straně, stejně tak v případě vnější hrany.

Z experimentu vyplynulo, že největší vliv na opotřebení povrchu výrobků má zanášení dosedací plochy razníku a matrice reziduem ze vstupního materiálu. Protože během měřících intervalů byl z nástroje razník vyjmut a očištěn pro účely měření povrchu, nedošlo pak k významnému odírání povrchu výrobků.

Na základě těchto zjištění s ohledem na výsledné regresní modely a lineární závislost doporučuji brousit nástroj nejdříve po padesáti tisících kusech na rozdíl od původních dvaceti až třiceti tisíc. A to pod podmínkou zavedení intervalu čištění razníku a matrice od reziduí ze vstupního materiálu v průběhu výroby. Nastavení intervalu čištění doporučuji na jedno čištění po deseti až patnácti tisících vyrobených kusech v závislosti na povaze šarže materiálu. Přínosem práce pro firmu byl jednoznačně návrh pro zvýšení dílčí životnosti nástroje na dvojnásobek, který by měl zajistit alespoň poloviční výskyt dlouhých prostojů za účelem broušení nástroje.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FABÍK, Richard, 2012. Tváření kovů: učební text: studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita [cit. 2024-02-17]. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [2] HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL, c2007. Metal forming: mechanics and metallurgy. 3rd ed. New York: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-88121-0.
- [3] NOVOTNÝ, Jiří et al., 2006. Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy). Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 978-80-0102-351-8.
- [4] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA, 2006. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2374-9.
- [5] LIDMILA, Zdeněk, 2008. Teorie a technologie tváření I. Brno: Univerzita obrany. ISBN 978-807-2315-796.
- [6] Lenfeld, Petr. Technologie II : tváření kovů, zpracování plastů. 2005. [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/06.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm).
- [7] BOLJANOVIC, Vukota, 2004. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. Spojené státy americké: Industrial Press. ISBN 978-0-8311-3492-1.
- [8] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ, 2007. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 4., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-.
- [9] BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK, 2014. TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ. Západočeská univerzita. ISBN 978-80-261-0449-0
- [10] BOBČÍK, Ladislav, 1983. Střížné nástroje pro maloseriovou výrobu. Praha: SNTL. *(Obrázek)*
- [11] SUCHY, Ivana, c2006. Handbook of die design: processes – machines – tools. 2nd ed. New York: McGraw-Hill. McGraw-Hill handbooks. ISBN 00-714-6271-6.
- [12] HEINZ, TSCHÄTSCH, 2006. Metal forming practise: processes - machines - tools. 2ed. Germany: Springer Berlin Heidelberg New York. ISBN 978-3-540-33216-9.

- [13] DANIEL, Josef et al., 2020. Comparison of Lifetime of the PVD Coatings in Laboratory Dynamic Impact Test and Industrial Fine Blanking Process. *Materials* [online]. [cit. 2024-02-26]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13092154
- [14] LIND, Liina, Priidu PEETSALU a Fjodor SERGEJEV, 2015. Wear of different PVD coatings at industrial fine-blanking field tests. *Materials Science* [online]., 343-348 [cit. 2024-02-26]. ISSN 2029-7289. Dostupné z: doi:10.5755/j01.ms.21.3.7249
- [15] CLAUS, Guy, Martin WEBER a Demmler MATTHIAS, 2017. Increase of Lifetime for Fine Blanking Tools. *Procedia Engineering* [online]. 183, 45-52. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.04.009
- [16] LINDVALL, Fredrik W., 2014. Adhesive wear testing and modelling of tool steels sliding against sheet metals. *Universitetstryckeriet, Karlstad. Disertační. Karlstad University.*
- [17] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ, 2012. *Kompndium statistického zpracování dat.* Praha: Karolinum. ISBN 978-80-246-2196-8.
- [18] FREEDMAN, David, 2005 *Statistical Models: Theory and Practice.* Cambridge: Cambridge University Press,. ISBN 9781139165495. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139165495
- [19] STEWART, James, Daniel K. CLEGG a Saleem WATSON, 2020 *Calculus: early transcendentals.* Cengage Learning, 1308 s. 978-0-495-01166-8.
- [20] MONTGOMERY, Douglas C., Elizabeth A. PECK a G. Geoffrey VINING, 2012. *Introduction to Linear Regression Analysis 5th Edition.* 1. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 672 s. ISBN 978-0470542811..
- [21] Lineární regrese, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2023-08-14]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Line%C3%A1rn%C3%AD\\_regrese](https://cs.wikipedia.org/wiki/Line%C3%A1rn%C3%AD_regrese) (Obrázek)
- [22] RNDr. Marie Budíková, Dr. a kol, 2016 *Statistika a pravděpodobnost: 6. Regresní analýza,* <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/ps15/statistika/web/pages/regres-anal.html> (Obrázek)
- [23] ZVÁRA, Karel, 2008. *Regrese.* Praha: Matfyzpress. ISBN 978-80-7378-041-8.

- [24] WHITEHOUSE, D. J., c2011 Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press,. ISBN 978-1-4200-8201-2.
- [25] ČSN EN ISO 21920-2 (014457). Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 2022.
- [26] AGGARWAL, Charu C., 2018. Neural networks and deep learning: a textbook. Cham: Springer. 978-3-031-29641-3
- [27] GRAUPE, Daniel, 2016 Deep learning neural networks: design and case studies. Singapore: World scientific,. ISBN 978-981-3146-44-0.
- [28] HU, Xueheng, Shuhuan WEN a H.K. LAM, 2023. Improvement accuracy in deep learning: An increasing neurons distance approach with the penalty term of loss function. Information Sciences [online]. 644, [ISSN 00200255. Dostupné z: doi:10.1016/j.ins.2023.119268
- [29] MURALIKRISHNAN, B a J RAJA, 2009. Computational surface and roundness metrology. London: Springer-Verlag. ISBN 978-1-84800-296-8.
- [30] WHITEHOUSE, D., 2006. Surfaces and their measurement. Derby, 2006. ISBN 1-9039-9660-0.
- [31] HOLČÍK, Jiří a Martin KOMENDA, 2015. Koncept umělých neuronových sítí. In: Matematická biologie: e-learningová učebnice [online]. Brno: Masarykova univerzita ISBN 978-80-210-8095-9. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--umela-inteligence--neuronove-site-jednotlivy-neuron--uvod-do-neuronovych-siti--koncept-umele-neuronove-site> (Obrázek)
- [32] TWARDOWSKI, Paweł et al., 2021. Identification of tool wear using acoustic emission signal and machine learning methods. Precision Engineering [online]. 72, 738-744, ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2021.07.019
- [33] SHANBHAG, Vignesh V. et al., 2018. Investigating galling wear behaviour in sheet metal stamping using acoustic emissions. Wear [online]. 414-415, 31-42, ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2018.07.003
- [34] BADGUJAR, Tushar Y., Rahul N. CHANDORE a Vijay P. WANI, 2019. Detection of Punch Wear in Stamping Process Using Acoustic Emission. Advances in Industrial and Production Engineering [online]. Singapore: Springer Singapore, 563-572, Lecture Notes in



Mechanical Engineering. ISBN 978-981-13-6411-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-13-6412-9\_55

[35] WANG, Miao et al., 2022. Intelligent prediction of wear location and mechanism using image identification based on improved Faster R-CNN model. Tribology International [online]. 169, ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2022.107466

[36] MOLITOR, Dirk Alexander et al., 2022. Towards high-performance deep learning models in tool wear classification with generative adversarial networks. Journal of Materials Processing Technology [online]. 302. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117484

[37] NAKADA, Nobuo et al., 2016. Quantification of Large Deformation with Punching in Dual Phase Steel and Change of its Microstructure –Part II: Local Strain Mapping of Dual Phase Steel by a Combination Technique of Electron Backscatter Diffraction and Digital Image Correlation Methods. ISIJ International [online]. 56(11), 2077-2083. ISSN 0915-1559. Dostupné z: doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-310

[38] KUBEC, Vaclav, Michal DUCHEK a Miroslav URBANEK, 2016. METHODOLOGY OF EVALUTATION OF TOOL WEAR USING FINITE ELEMENT METHOD. MM Science Journal [online]. 2016(05), 1407-1410. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2016\_11\_2016133

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PV – Peak to Valley

PVD – Nanášení povlaku z pevné fáze

mm – milimetr

$\mu\text{m}$  – mikrometr

2D – dvourozměrný prostor

3D – trojrozměrný prostor

DIC – Digitální obrazová korelace

NN – Neuronové sítě

DL – Hluboké učení

AE – Akustická emise

IoT – Internet věcí

ČSN – Česká státní norma

ISO – Mezinárodní organizace pro normalizaci

EN – Evropská norma

EDA – Exploratorní datová analýza, Explorační analýza dat

$H_0$  – Nulová hypotéza

$H_a$  – Alternativní hypotéza

$\alpha$  – Hladina významnosti

n – četnost souboru dat

$\bar{x}$  – Aritmetický průměr výběrového souboru

$\mu$  – Střední hodnota základního souboru

$\sigma$  – Směrodatná odchylka základního souboru

s – odhad směrodatné odchylky

$\sigma^2$  – Rozptyl základního souboru

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Fáze stříhu [7].....	16
Obr. 2 Střížné fáze na příkladu děrování [7] .....	16
Obr. 3: Velikost střížné síly v závislosti na poloze razníku v tloušťce materiálu [4].....	17
Obr. 4: Schéma střížná vůle, střížná mezera [10] .....	17
Obr. 5: Schéma střížné vůle pro případ děrování, c-střížná mezera, $d_p$ -průměr razníku, $D_m$ -průměr raznice, $\alpha$ -úhel zkosení [4] .....	18
Obr. 6: Kvalita střížné plochy v závislosti na velikosti střížné mezery – $m_s$ , $s$ – tloušťka materiálu [6].....	19
Obr. 7: Nehomogenní povrch střížné plochy dle fází stříhu [8] .....	20
Obr. 8: 1 – pásmo pružné deformace, 2 – pásmo utržení, 3 – pásmo plastické deformace, 4 – pásmo vytlačení [6].....	20
Obr. 9: Jednoduchý střížný nástroj [6].....	21
Obr. 10: Postupový střížný nástroj [6].....	22
Obr. 11: Obecné schéma střížného nástroje [4] .....	24
Obr. 12: Typy geometrie razníků: a) ploché, b) konkávní, c) zkosené, d) vnitřní dvojité zkosení, e) vnější dvojité zkosení [4].....	24
Obr. 13: Opatření pracovních částí stříhadla [10].....	26
Obr. 14: Opatření způsobené převážně a) abrazí, b) adhezí [16] .....	27
Obr. 15: Filtry struktury povrchu, parametry drsnosti, vlnitosti [30].....	28
Obr. 16: Příklad signálu AE, a) jeden zdvih, b) signál v čase lisování, c) peak – dochází k opotřebení [33].....	30
Obr. 17: Neuronová síť 4-5-1 [30].....	31
Obr. 18: Proložení bodů přímkou [9].....	33
Obr. 19 Metoda nejmenších čtverců [22] .....	34
Obr. 20: Nelineární data proložena lineární funkcí [20].....	35
Obr. 21: Logaritmická funkce inverzní k exponenciální funkci [4] .....	36
Obr. 22: 4 příklady logaritmické funkce [19] .....	37
Obr. 23: Logaritmická funkce o základu a) $a < 1$ ; b) $a > 1$ .....	37
Obr. 24: Výstředníkový lis LEN 40C .....	40
Obr. 25: Razník.....	41
Obr. 26: Vlevo – vstupní pásky materiálu, vpravo – odpad z výroby .....	41
Obr. 27: Výrobek .....	42
Obr. 28: Profilometr Zygo New View 9000 a program MX .....	42
Obr. 29 Nedostatečná kvalita výrobku .....	43
Obr. 30: Schéma experimentu .....	43

Obr. 31: Označení orientace levé (vlevo) a pravé (vpravo).....	44
Obr. 32: Vytyčení oblastí pro snímání povrchu.....	44
Obr. 33: Orientace střížné vložky .....	45
Obr. 34: Snímky povrchu – 0 kusů .....	46
Obr. 35: Snímky povrchu – 10 tisíc kusů .....	46
Obr. 36: Snímky povrchu– 20 tisíc kusů .....	46
Obr. 37: Snímky povrchu – 30 tisíc kusů .....	47
Obr. 38: Snímky povrchu – 40 tisíc kusů .....	47
Obr. 39: Snímky povrchu – 50 tisíc kusů .....	47
Obr. 40: Vyrovnání dle neopotřeбенé oblasti.....	48
Obr. 41: Program "result-left-in--right-out" .....	48
Obr. 42: Program "result-left-out--right-in" .....	49
Obr. 43: Schéma – rozlišení oblastí .....	49
Obr. 44: Sběr dat 30LO s příslušnými řezy k hodnotám .....	50
Obr. 45: Diagram časové řady – 30LO.....	51
Obr. 46: Výřez příslušného snímku povrchu a oblasti.....	51
Obr. 47: Histogram 30LO.....	52
Obr. 48: Boxplot - 30LO.....	52
Obr. 49: Boxploty pro výběrové soubory zleva: 10RI, 20LI, 20RI, 30LI.....	53
Obr. 50: Graf pravděpodobnosti, Anderson-Darling test .....	54
Obr. 51: Graf odlehlých hodnot – 10RI.....	55
Obr. 52: Graf odlehlých hodnot – 20LI .....	56
Obr. 53: Graf odlehlých hodnot – 20RI.....	56
Obr. 54: Graf odlehlých hodnot – 30LI .....	57
Obr. 55: Odlehlá hodnota v řezech povrchem – 30LI .....	57
Obr. 56: Boxplot – LO, LI, RI, RO.....	59
Obr. 57: Dendrogram – podobnost souborů dat .....	59
Obr. 58: Nastavení „Lineární regrese“ QC Expert .....	60
Obr. 59: Testování reziduí – přímková regrese LO .....	61
Obr. 60: Test homoskedasticity reziduí .....	61
Obr. 61: Test významnosti celkového modelu .....	61
Obr. 62: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese LO.....	62
Obr. 63: Lineární regrese přímková – LO .....	62
Obr. 64: Odhady parametrů, test významnosti regresních koef., kvadratická regrese LO ..	63

Obr. 65: Odhady parametrů, test významnosti regresních koeficientů, kubická regrese LO .....	63
Obr. 66: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese LI .	64
Obr. 67: Lineární regrese přímková – LI.....	64
Obr. 68: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese RI .	65
Obr. 69: Lineární regrese přímková – RI.....	66
Obr. 70: Odhady parametrů, významnost odhadů regr. koeficientů, přímková regrese RO	67
Obr. 71: Lineární regrese přímková – RO .....	67
Obr. 72: Korelační diagram LO, LI, RI,RO s proložením příslušnou přímkou.....	68

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Numerické výsledky – 30LO.....	53
Tabulka 2: p-hodnoty, Anderson-Darling test, $\alpha = 0,05$ .....	55
Tabulka 3: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 10 tisíc kusů.....	58
Tabulka 4: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 20 tisíc kusů.....	58
Tabulka 5: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 30 tisíc kusů.....	58
Tabulka 6: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 40 tisíc kusů.....	58
Tabulka 7: Ar. Průměr a var. koeficient dle oblastí – 50 tisíc kusů.....	58
Tabulka 8: Soubory dat – LO, LI, RI, RO .....	58
Tabulka 9: Nezávislá a závislá proměnná – LO .....	60
Tabulka 10: Statistické charakteristiky regrese - LO.....	62
Tabulka 11: Nezávislá a závislá proměnná – LI.....	63
Tabulka 12: Statistické charakteristiky regrese – LI .....	64
Tabulka 13: Nezávislá a závislá proměnná – RI.....	65
Tabulka 14: Statistické charakteristiky regrese - RI.....	66
Tabulka 15: Nezávislá a závislá proměnná – RO .....	66
Tabulka 16: Statistické charakteristiky regrese – RO.....	67
Tabulka 17: Reziduální součty čtverců – LO, RO, LO+RO.....	69
Tabulka 18: Reziduální součty čtverců – LI, RI, LI+RI.....	69
Tabulka 19: Reziduální součty čtverců – LI, RI, LI+RI.....	70
Tabulka 20: Reziduální součty čtverců – RO, RI, RO+RI .....	71

## **SEZNAM PŘÍLOH**

P I: Měření po 10 tisících kusech

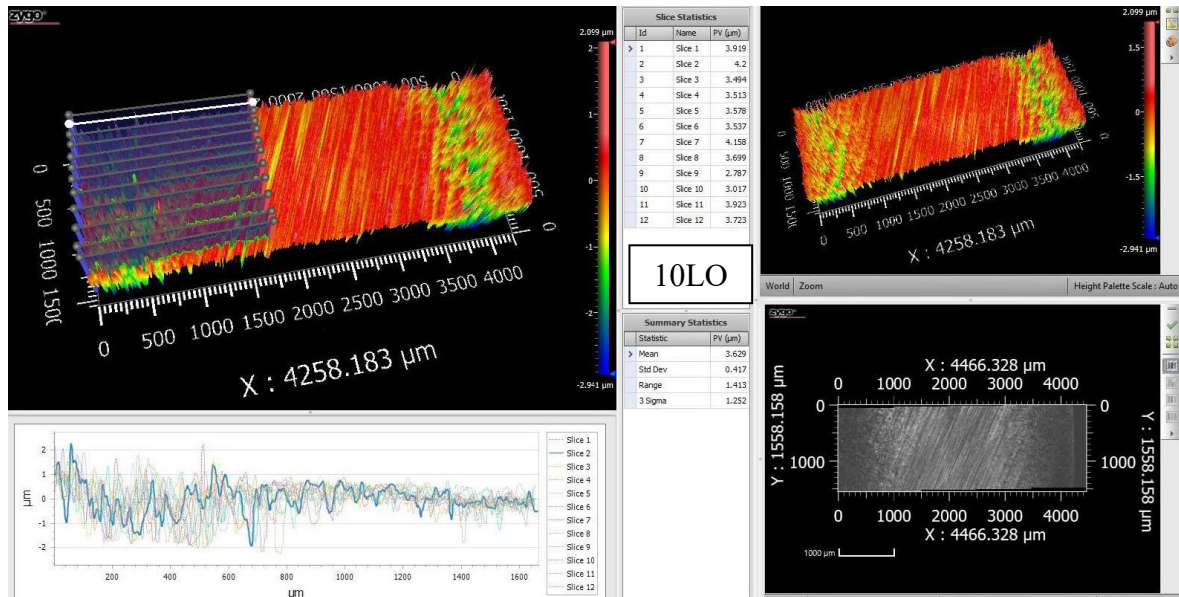
P II: Měření po 20 tisících kusech

P III: Měření po 30 tisících kusech

P IV: Měření po 40 tisících kusech

P V: Měření po 50 tisících kusech

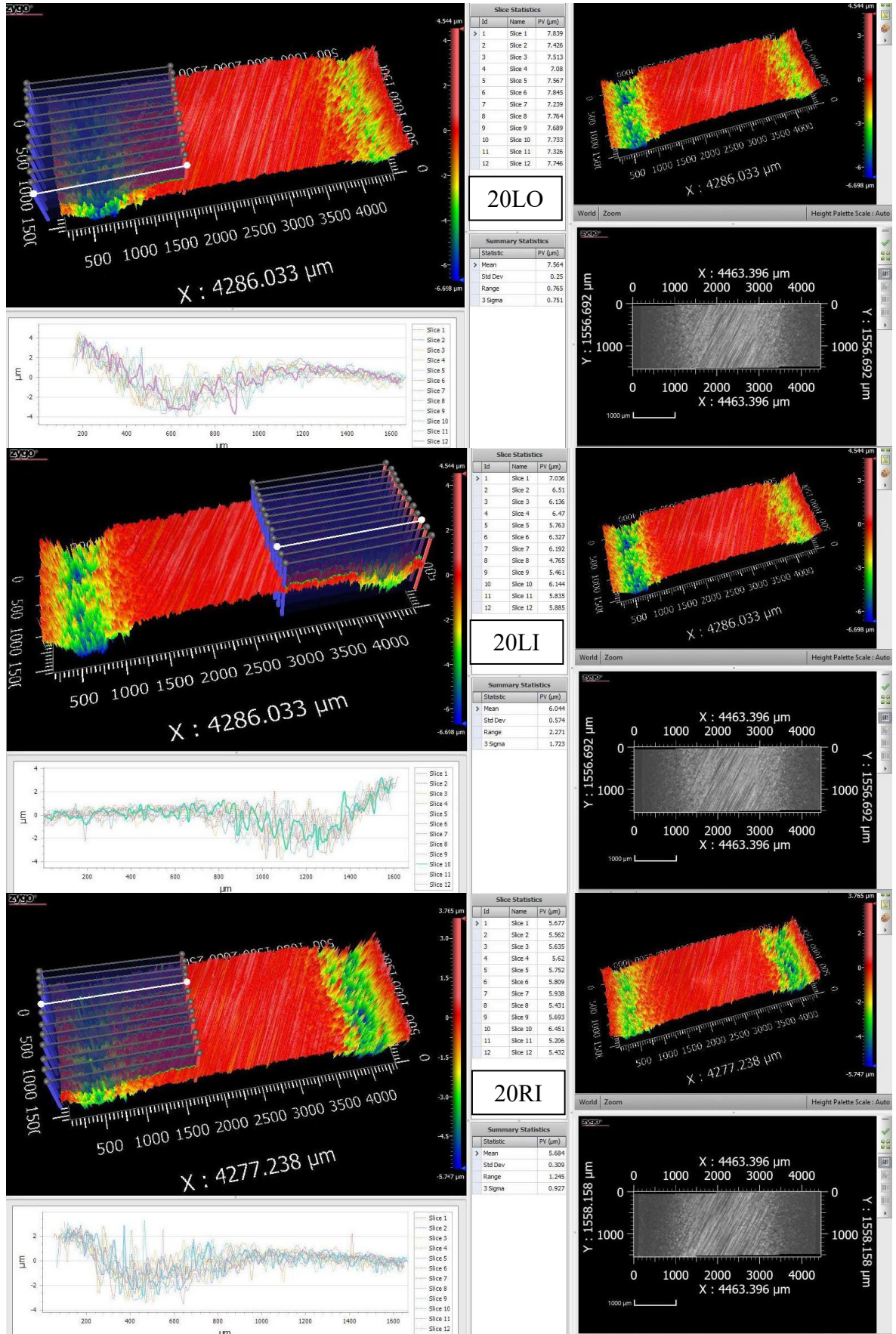
## PŘÍLOHA P I: MĚŘENÍ PO 10 TISÍCÍCH KUSECH

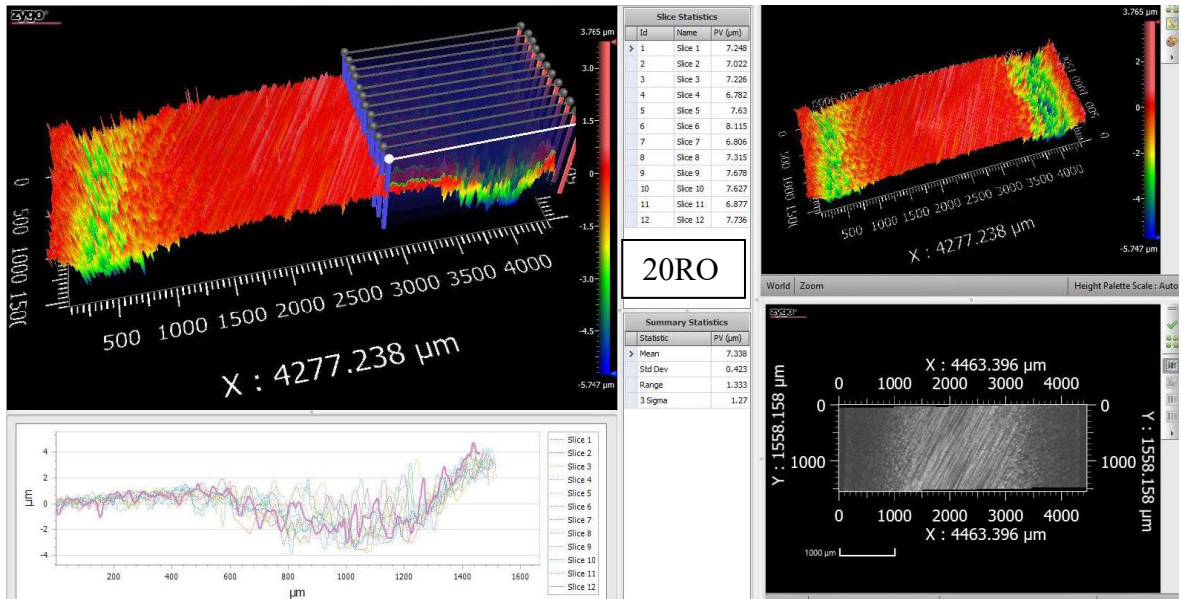


10 000 ks	LO	LI	RI	RO
řez [-]	PV [μm]			
1	5,413	4,473	3,919	4,163
2	5,567	4,851	4,200	4,216
3	5,247	4,057	3,494	4,111
4	5,007	3,931	3,513	4,110
5	5,397	4,456	3,578	4,246
6	5,791	3,268	3,537	3,934
7	5,884	5,536	4,158	3,646
8	6,008	4,329	3,699	3,933
9	4,986	5,391	2,787	3,865
10	5,126	4,183	3,017	4,214
11	4,592	3,378	3,923	4,087
12	5,744	3,802	3,723	3,881



# PŘÍLOHA P II: MĚŘENÍ PO 20 TISÍCÍCH KUSECH

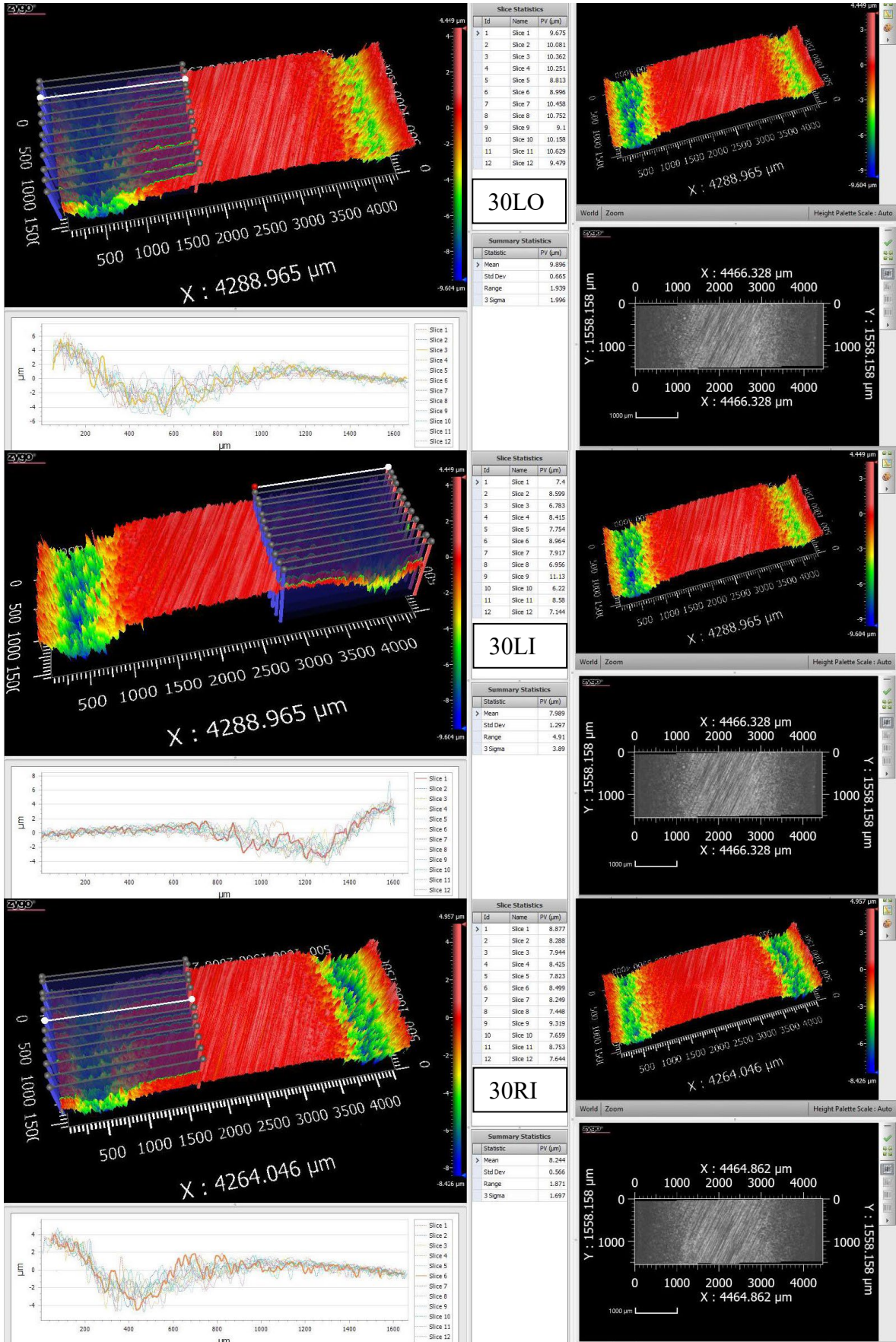


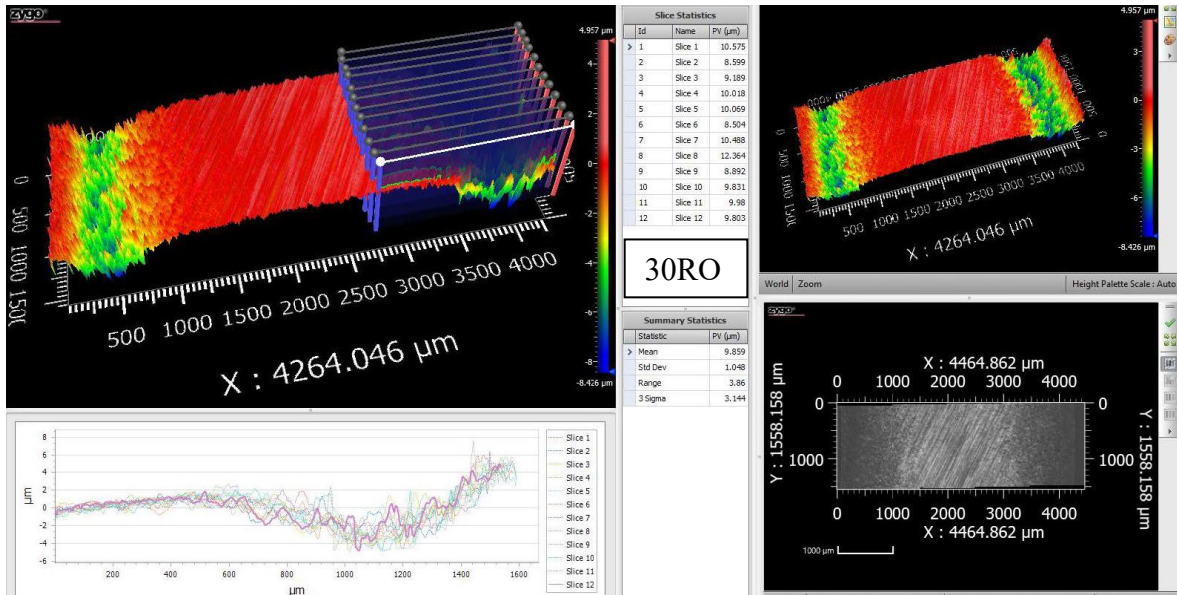


20 000 ks	LO	LI	RI	RO
řez [-]	PV [μm]			
1	7,839	7,036	5,677	7,248
2	7,426	6,510	5,562	7,022
3	7,513	6,136	5,635	7,226
4	7,080	6,470	5,620	6,782
5	7,567	5,763	5,752	7,630
6	7,845	6,327	5,809	8,115
7	7,239	6,192	5,938	6,806
8	7,764	4,765	5,431	7,315
9	7,689	5,461	5,693	7,678
10	7,733	6,144	6,451	7,627
11	7,326	5,835	5,206	6,877
12	7,746	5,885	5,432	7,736



# PŘÍLOHA P III: MĚŘENÍ PO 30 TISÍCÍCH KUSECH

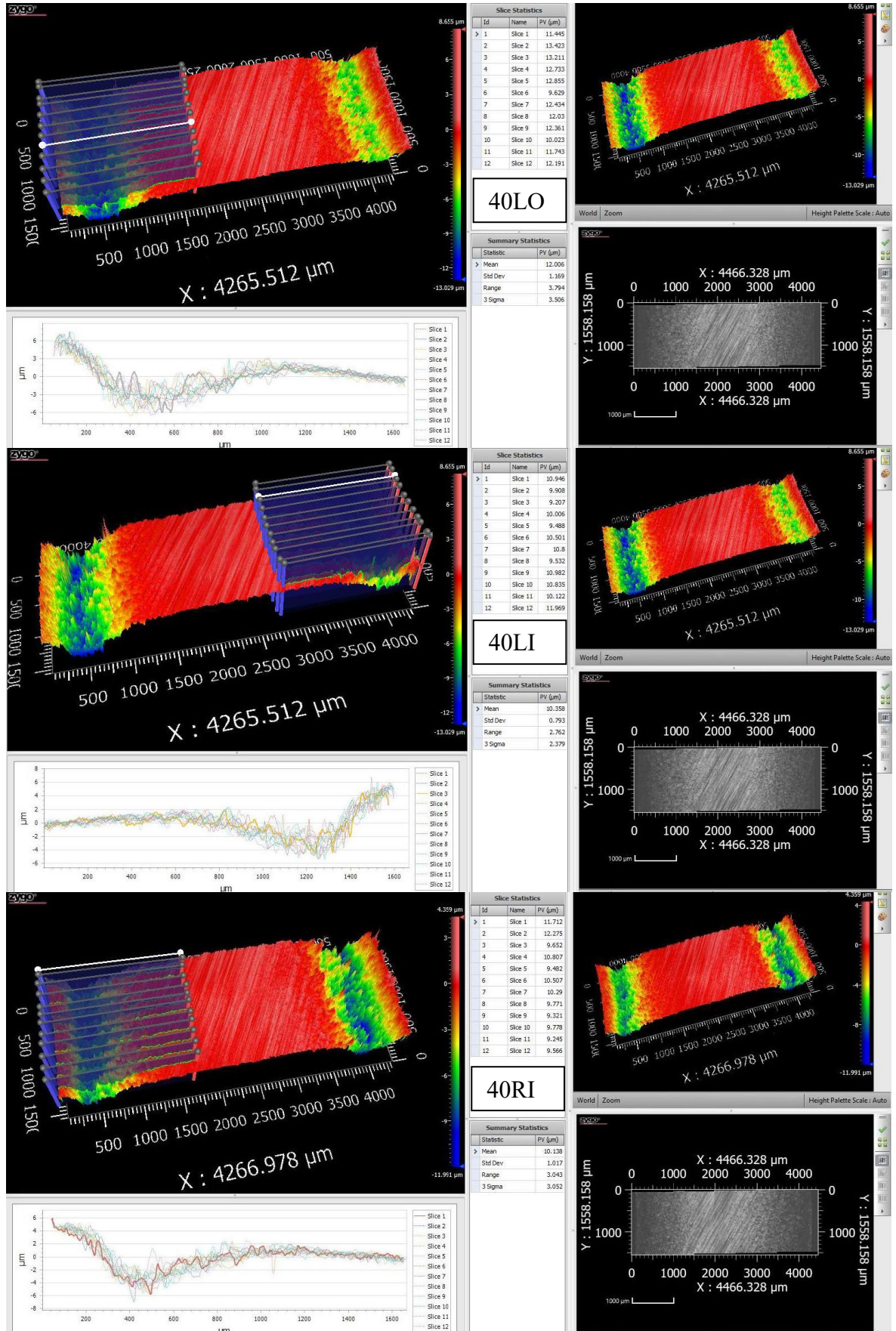


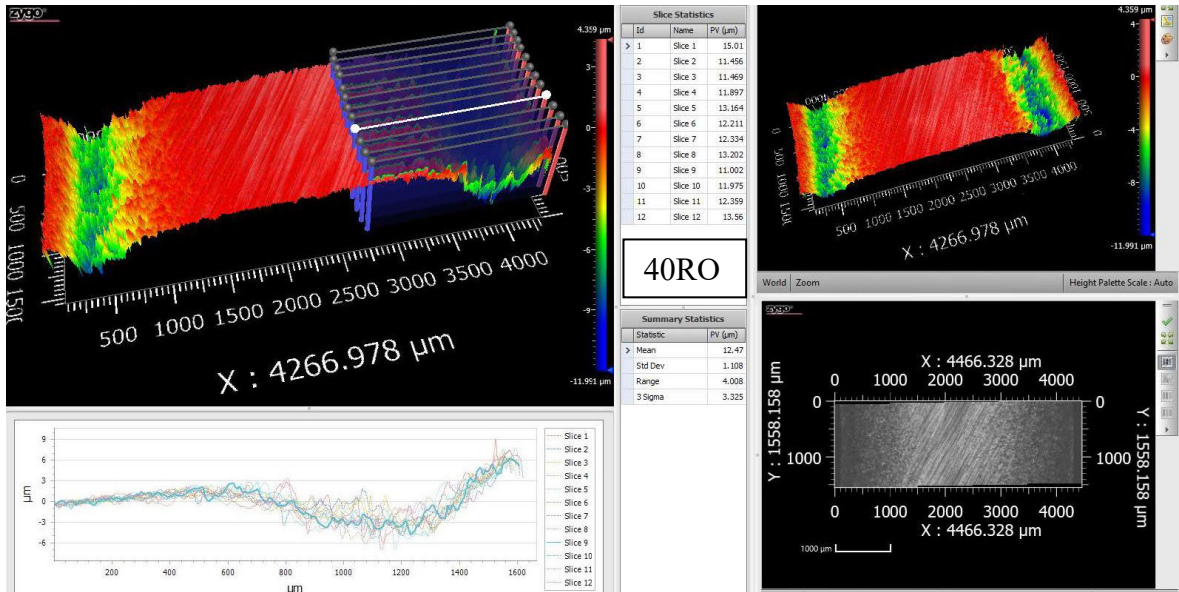


30 000 ks	LO	LI	RI	RO
řez [-]	PV [ $\mu\text{m}$ ]			
1	9,675	7,400	8,877	10,575
2	10,081	8,599	8,288	8,599
3	10,362	6,783	7,944	9,189
4	10,251	8,415	8,425	10,018
5	8,813	7,754	7,823	10,069
6	8,996	8,964	8,499	8,504
7	10,458	7,917	8,249	10,488
8	10,752	6,956	7,448	12,364
9	9,100	11,130	9,319	8,892
10	10,158	6,220	7,659	9,831
11	10,629	8,580	8,753	9,980
12	9,479	7,144	7,644	9,803



# PŘÍLOHA P IV: MĚŘENÍ PO 40 TISÍCÍCH KUSECH

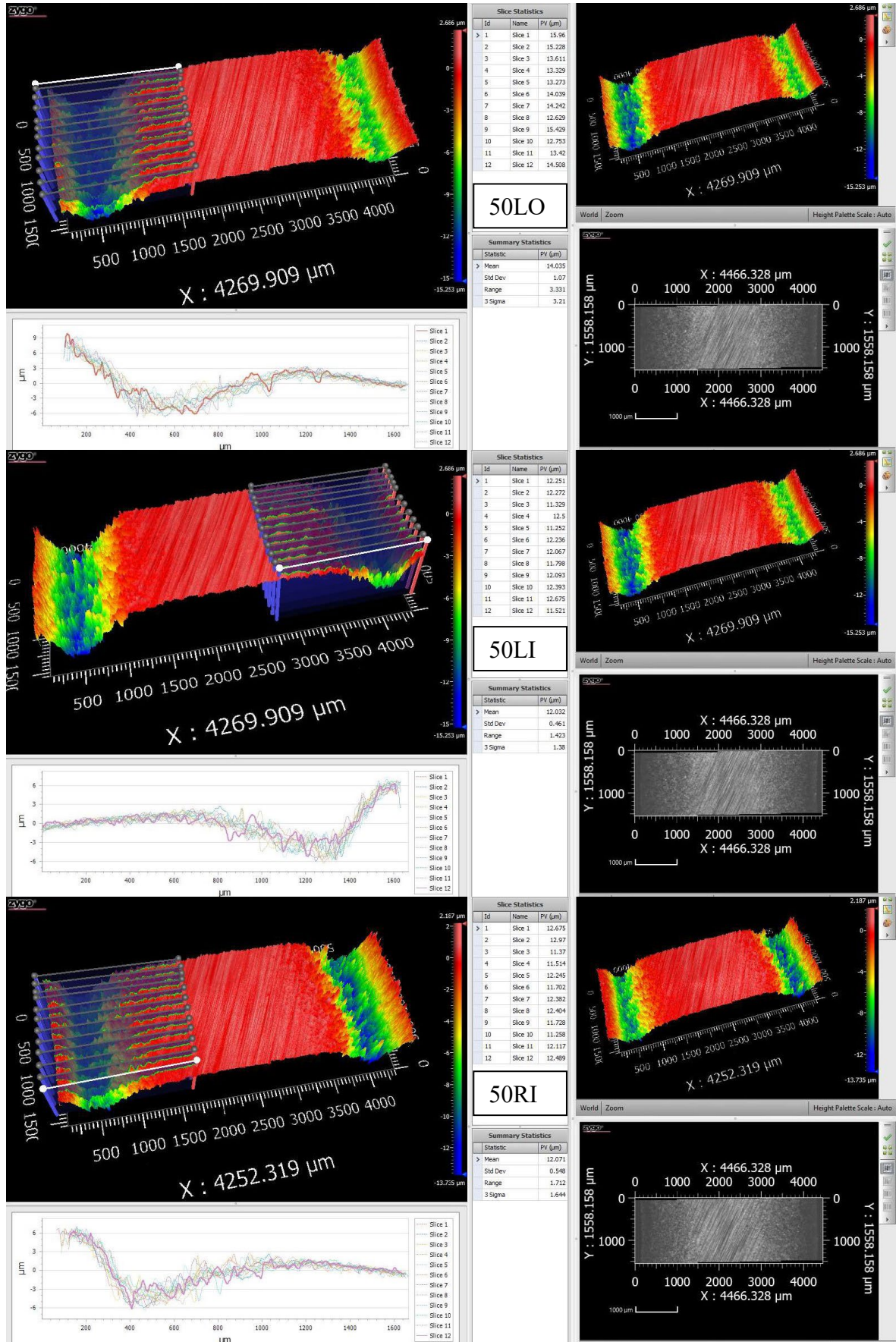


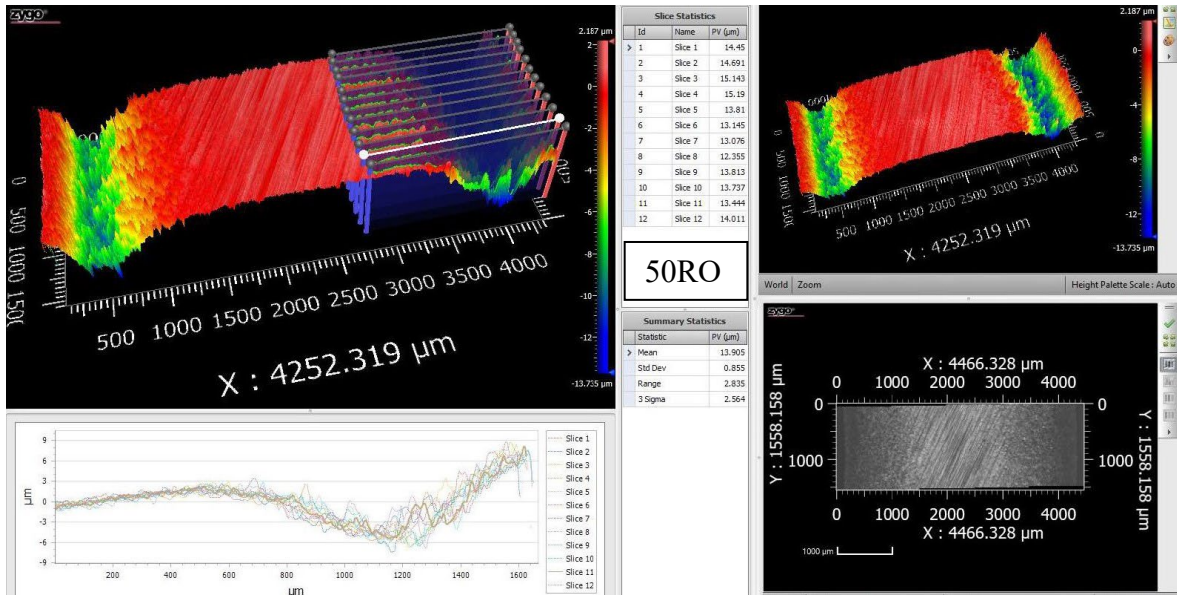


40 000 ks	LO	LI	RI	RO
řez [-]	PV [µm]			
1	11,445	10,946	11,712	15,010
2	13,423	9,908	12,275	11,456
3	13,211	9,207	9,652	11,469
4	12,733	10,006	10,807	11,897
5	12,855	9,488	10,482	13,164
6	9,629	10,501	10,507	12,211
7	12,434	10,800	10,290	12,334
8	12,030	9,532	9,771	13,202
9	12,361	10,982	9,321	11,002
10	10,023	10,835	9,778	11,975
11	11,743	10,122	9,245	12,359
12	12,191	11,969	9,566	13,560



# PŘÍLOHA P V: MĚŘENÍ PO 50 TISÍCÍCH KUSECH





50 000 ks	LO	LI	RI	RO
řez [-]	PV [μm]			
1	15,960	12,251	12,675	14,450
2	15,228	12,272	12,970	14,691
3	13,611	11,329	11,370	15,143
4	13,329	12,500	11,514	15,190
5	13,273	11,252	12,245	13,810
6	14,039	12,236	11,702	13,145
7	14,242	12,067	12,382	13,076
8	12,629	11,798	12,404	12,355
9	15,429	12,093	11,728	13,813
10	12,753	12,393	11,258	13,737
11	13,420	12,675	12,117	13,444
12	14,508	11,521	12,489	14,011