

Hodnocení povrchové jakosti laserového řezu

Bc. Jan Ferencz

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan Ferencz
Osobní číslo:	T20844
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Řízení jakosti
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Hodnocení povrchové jakosti laserového řezu

Zásady pro vypracování

1. Vypracování rešerše na zadané téma.
2. Proměření vyrobených vzorků s využitím 3D techniky scanování.
3. Nalezení vhodných statistických metodik pro popis technického povrchu po laserových řezech

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9.

FRIEDRICH, Václav, Pavel HRADECKÝ, Šárka MICHALCOVÁ a Marek POMP. *Vybrané statistické metody*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2018. ISBN 978-80-248-4108-3.

MOURALOVÁ, Kateřina. *Analýza vlivu vstupních faktorů na jakost povrchu a efektivitu technologie elektroerozivního drátového řezání pro různé kovové materiály a jejich tepelná zpracování: Analysis of the influence of input factors on surface quality and efficiency of wire electrical discharge machining for different metal materials and their heat treatment : zkrácená verze habilitační práce v oboru Strojírenská technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2018. ISBN 978-80-214-5641-9.

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

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

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 užit 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 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

Diplomová práce se zabývá hodnocením povrchové jakosti laserového řezu na vzorcích získaných při řezání na vláknovém laseru.

Teoretická část diplomové práce zahrnuje teoretický rozbor na téma laserových technologií, přičemž hlavní důraz je kladen na vznik a princip laserového záření, typy laserů a také na jejich aplikace ve strojírenství. Dále se věnuje problematice měření struktury povrchu, hodnocením jakosti a charakteristickým veličinám drsnosti povrchu.

Praktická část diplomové práce se zaměřuje na porovnání vlivu ochranného sklíčka čočky laseru na jakost laserového řezu při konstantních řezných parametrech na vzorcích vyhotovených ze dvou různých druhů korozivzdorných ocelí. Dále také zahrnuje přehledně zpracovaný metodologický postup pro měření zkušebních vzorků a s využitím vhodných statistických metod je zkoumána jakost povrchu po laserových řezech.

Klíčová slova: laser, laserové řezání, aplikace laserů, jakost povrchu, Taylor Hobson, regrese

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the evaluation of the surface quality of laser cutting on samples obtained by cutting on a fiber laser.

The theoretical part of the diploma thesis includes a theoretical analysis on the topic of laser technology, with the main emphasis on the origin and principle of laser radiation, types of lasers and their applications in mechanical engineering. Furthermore, it deals with the issue of measuring the surface structure, quality evaluation and characteristic values of surface roughness.

The practical part of the diploma thesis focuses on the comparison of the influence of the protective lens of the laser lens on the quality of laser cutting at constant cutting parameters on samples made of two different types of stainless steels. It also includes a clearly developed methodological procedure for the measurement of test samples and the surface quality after laser cutting is investigated using appropriate statistical methods.

Keywords: laser, laser cutting, laser application, surface quality, Taylor Hobson, regression

Zde bych rád poděkoval panu prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za jeho volný čas, který mi věnoval, za cenné rady, poznatky a pomoc, kterou mi poskytl během vypracování mé diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat paní Ing. Mileně Kubišové, Ph.D. za podporu a cenné rady, které mi během závěrečného ročníku poskytla. V neposlední řadě bych také chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu během mého studia.

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

OBSAH

I	TEORETICKÁ ČÁST	11
1	LASEROVÁ TECHNOLOGIE	12
1.1	PRINCIP LASERU	12
1.2	REZONÁTOR	13
1.3	SPONTÁNNÍ EMISE	13
1.4	STIMULOVANÁ EMISE	14
2	ROZDĚLENÍ LASERŮ	15
2.1	PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	15
2.1.1	Rubínový laser	15
2.1.2	Nd:YAG Laser	15
2.1.3	Vláknový laser (Fiber laser)	16
2.1.4	Kotoučový laser	16
2.1.5	Nd:sklo Laser	17
2.2	PLYNOVÉ LASERY	17
2.2.1	CO ₂ Laser	17
2.2.2	Axiální CO ₂ laser s pomalým prouděním plynu	18
2.2.3	Axiální CO ₂ laser s rychlým prouděním plynu	18
2.2.4	CO ₂ laser s příčným prouděním plynu	19
2.2.5	Helium-neonový laser	19
2.2.6	Excimerový laser	20
2.3	POLOVODIČOVÉ LASERY	20
2.3.1	Diodový laser	21
2.3.2	Injekční laser	21
2.4	KAPALINOVÉ LASERY	21
2.5	ROZDĚLENÍ PODLE ČERPÁNÍ ENERGIE	22
2.5.1	Optické čerpání energie	22
2.5.2	Čerpání energie elektrickým výbojem	22
2.5.3	Čerpání energie exotermickou reakcí	22
2.5.4	Čerpání energie pomocí tepla	23
2.5.5	Injekcí nosičů náboje	23
2.6	ROZDĚLENÍ LASERŮ PODLE ČASOVÉHO PROVOZU	23
2.6.1	Kontinuální provoz	23
2.6.2	Pulzní provoz	23
2.6.3	Kvazikontinuální provoz	24
2.7	DĚLENÍ DLE VLNOVÉ DÉLKY ZÁŘENÍ	24
2.8	ROZDĚLENÍ LASERŮ DLE DOSAHOVANÉHO VÝKONU	25
2.8.1	Lasery s nízkým výkonem	25
2.8.2	Lasery s vysokým výkonem	25
2.9	ROZDĚLENÍ Z HLEDISKA KONSTRUKCE	25

2.9.1	Lasery se stacionární hlavou	26
2.9.2	Lasery se stacionární hlavou a pohyblivým paprskem	26
2.9.3	Lasery se stacionárním stolem	26
3	APLIKACE LASERŮ VE STROJÍRENSTVÍ.....	27
3.1	ŘEZÁNÍ LASEREM	27
3.1.1	Tavné řezání laserem.....	28
3.1.2	Oxidační řezání laserem	28
3.1.3	Sublimační řezání laserem	28
3.1.4	Laseryvé řezání s podporou vzduchu	29
3.1.5	Jakost laseryvého řezu.....	30
3.2	SVAŘOVÁNÍ LASEREM	31
3.2.1	Hluboké svařování laserem	31
3.2.2	Kondukční svařování laserem	32
3.2.3	Laseryvé navařování	32
3.2.4	Hybridní laseryvé svařování	33
3.2.5	Laseryvé svařování plastů	33
3.3	VRTÁNÍ LASEREM.....	34
3.3.1	Laseryvé vrtání jedním pulzem	35
3.3.2	Nárazové vrtání laserem.....	35
3.3.3	Trepanační vrtání laserem	35
3.3.4	Spirálové vrtání laserem.....	35
3.4	LASERYVÉ ZNAČENÍ	36
3.4.1	Laseryvé gravírování.....	36
3.4.2	Laseryvé značení žíháním	36
3.4.3	Laseryvé značení leptáním	36
3.4.4	Laseryvé značení lepením	37
3.4.5	Laseryvé značení pěníním	37
3.5	LASERYVÉ KALENÍ	38
3.6	LASERYVÉ SOUSTRUŽENÍ	38
4	STRUKTURA POVRCHU.....	39
4.1	KVALITATIVNÍ METODA MĚŘENÍ POVRCHU	39
4.2	KVANTITATIVNÍ METODA MĚŘENÍ POVRCHU	39
4.3	BEZKONTAKTNÍ ZPŮSOB MĚŘENÍ POVRCHU	39
4.4	HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU PODLE NORMY ČSN EN ISO 4288 [54]	40
4.5	PARAMETRY STRUKTURY POVRCHU PODLE NORMY ČSN EN ISO 4287 [55]	41
4.5.1	Největší výška výstupku R_p	41
4.5.2	Největší hloubka prohlubně R_v	41
4.5.3	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti R_a	42
4.5.4	Největší výška profilu R_z	42
4.5.5	Střední vzdálenost výstupků R_{Sm}	43
4.5.6	Materiálový podíl drsnosti profilu R_{mr}	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	44

5	POPIS PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	45
5.1	O FIRMĚ LAC S.R.O.....	46
6	POPIS A POSTUP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	47
6.1	LASER LVD LYNX FL-3015.....	47
6.2	PŘÍPRAVA 3D MODELU A DXF SOUBORU	48
6.2.1	Tvorba řezného plánu.....	49
6.2.2	Vypálení řezného plánu.....	50
6.3	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	50
6.3.1	Vlastnosti a složení korozivzdorné oceli X5CrNi, 1.4301	51
6.3.2	Vlastnosti a složení žáruvzdorné oceli X15CrNiSi, 1.4828.....	51
6.4	POUŽITÉ ŘEZNÉ PARAMETRY	51
7	POPIS A POSTUP MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	53
7.1	TAYLOR+HOBSON TALYSURF CLI 500	53
7.2	PŘÍPRAVA A MĚŘENÍ NA PŘÍSTROJI TALYSURF CLI 500.....	54
7.3	ÚPRAVA DAT V SOFTWARE TALYMAP GOLD	55
8	VYHODNOCENÍ DAT VE STATISTICKÝCH SOFTWARECH.....	67
8.1	REGRESNÍ ANALÝZA.....	67
8.2	KVADRATICKÁ REGRESE V SOFTWARE MINITAB 17.....	67
8.3	VYHODNOCENÍ V SOFTWARE QC EXPERT 3.3.6.5	73
8.4	INTERPRETACE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	75
8.5	NEVÝZNAMNÉ REGRESNÍ PARAMETRY	84
8.5.1	Fisher-Snedecorův test významnosti modelu.....	84
	ZÁVĚR	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	87
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	93
	SEZNAM OBRÁZKŮ	95
	SEZNAM TABULEK.....	98
	SEZNAM PŘÍLOH.....	99

ÚVOD

Mou hlavní motivací při výběru tématu diplomové práce bylo rozšířit si obzory v oblasti laserových technologií a jejich aplikací ve strojírenství, jelikož se v tomto oboru pracovně pohybuji. Rovněž jsem si také chtěl vyzkoušet práci a měření na moderním bezkontaktním měřícím zařízení.

Dalším podstatným důvodem mého výběru bylo ověřit, jak zásadní je role ochranného sklíčka čočky laseru na výslednou kvalitu laserového řezu. Cílem tohoto experimentu bylo prozkoumat vliv sklíčka na jakost řezu, za účelem prodloužení intervalu jeho výměny a s tím spojené případné ušetření finančních prostředků.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části a to na část teoretickou a praktickou. V teoretické části je vypracována rešerše zaměřená na laserové technologie, dělení laserů podle typu aktivního prostředí, časového provozu, typu buzení, konstrukce a rovněž je podstatná část věnována aplikacím laserů ve strojírenství. Dále tato teoretická část obsahuje kapitoly zaměřující se na metody měření struktury povrchu a na jednotlivé charakteristické veličiny drsnosti povrchu.

Praktická část je zaměřena na popis výroby zkušebních vzorků, tvorbu řezného plánu pro laser a jeho vypálení. Dále bude vypracován metodologický postup pro měření zkušebních vzorků na přístroji Taylor+Hobson a také popis zpracování naměřených dat v statistických softwarech minitab 17 a QC expert. V závěru této části diplomové práce bude, s využitím vhodných statistických metod, zkoumána jakost povrchu po laserových řezech a pomocí regresních funkcí bude popsán vliv ochranného sklíčka na jakost povrchu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE

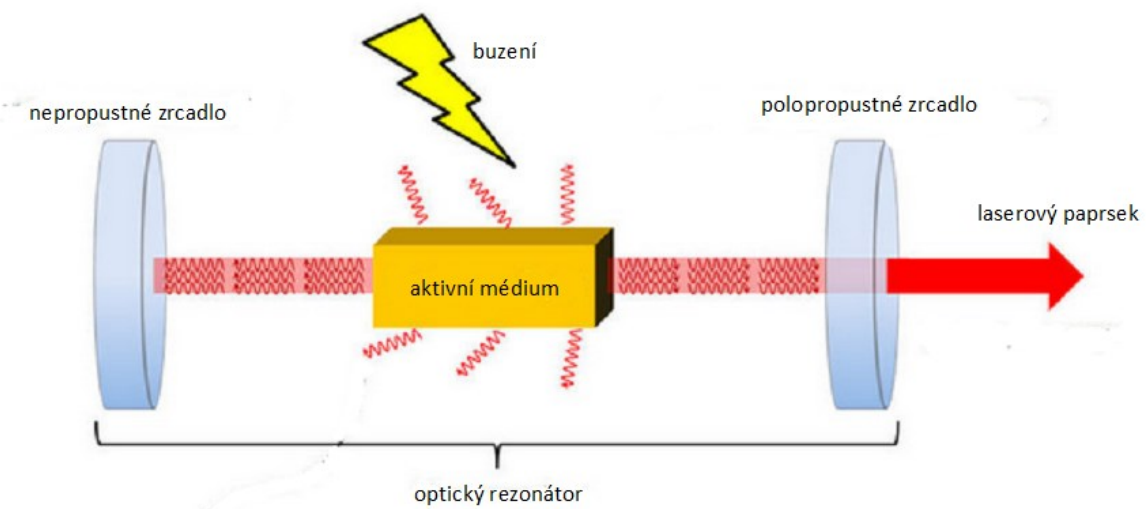
Laserová technologie bezpochyby patří k největším objevům minulého století. Pojem LASER vznikl spojením počátečních písmen anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation což v překladu znamená „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. První stavební kámen pro vznik laseru položil Albert Einstein, který jej v roce 1916 principiálně popsal ve své kvantové teorii záření. Dalším krokem vpřed bylo sestrojení předchůdce laseru tzv. maseru, který pracuje na stejném principu, avšak se zde nezesiluje světlo, nýbrž mikrovlnné záření. V roce 1954 Charles Hard Townes se svým studentem Jamesem Gordonem představil světu první funkční maser, za který dostal v roce 1964 Nobelovu cenu za fyziku. O šest let později v roce 1960 sestavil Theodore Harold Maiman první laser na světě, který jako aktivní prostředí používal krystal rubínu. Od tohoto okamžiku byla laserová technologie na vzestupu a o pouhý rok později provedl oftalmolog Charles J. Campbell historicky první úspěšnou operaci oční sítnice pomocí rubínového laseru. V dnešní době se tato technologie zcela běžně používá ve vědě, medicíně, chemickém průmyslu, farmacii, strojírenství a v mnoha dalších odvětvích. Co se strojírenství týče, tak nejčastější použití laseru je pro řezání, gravírování a svařování. Laserové řezání se řadí mezi nekonvenční technologie obrábění. Nekonvenční technologie na rozdíl od konvenčních využívají pro úběr materiálu tepelnou, elektrickou nebo chemickou energii, v místě obrábění nedochází k vzniku třísky, nevzniká zde řezný odpor a obrobek nepodléhá deformaci vlivem mechanického namáhání. Pojem obrobitelnost zde ztrácí svůj význam, jelikož při obrábění nezáleží na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, jako je tvrdost, pevnost, houževnatost, ale naopak záleží na fyzikálních vlastnostech a chemickém složení. Mezi tyto vlastnosti řadíme teplotu tavení materiálu, tepelnou a elektrickou vodivost apod. Laserové obrábění se řadí do tepelného dělení materiálu a mezi jeho výhody patří vysoká přesnost a řezná rychlost, kvalita řezu a možnost obrábět téměř jakýkoliv požadovaný tvar. [1], [2]

1.1 Princip laseru

Bílé světlo je světlo, které je tvořeno zářením celého viditelného spektra, tedy se jedná o záření o různých vlnových délkách a fázích s různým směrem šíření. Naopak laserové světlo je monochromatické a koherentní, což znamená, že vlnová délka tohoto světla má konstantní frekvenci vlnění.

1.2 Rezonátor

Laser se skládá ze zdroje energie a optického rezonátoru. Rezonátor je optická dutina tvořena dvojicí zrcadel, z nichž jedno je nepropustné a veškeré záření se od něj odrazí zpět. Druhé zrcadlo je polopropustné a část záření, které jím projde vytvoří svazek laseru tak jak ho známe. Dutina rezonátoru je vyplněna aktivním médiem, ve kterém probíhá stimulovaná emise záření. Aktivním prostředím se rozumí látka obsahující prvky, které lze buzením dostat do vyššího energetického stavu. Aktivní prostředí mohou tvořit plyny a jejich směsi, monokrystaly, polovodiče nebo volné elektrony. [3]



Obr. 1 Optický rezonátor [4]

1.3 Spontánní emise

Dodávaná energie excituje atomy aktivního média a dochází k buzení jejich elektronů ze základního do vyššího energetického stavu a dochází tzv. k inverzi populace. Elektron nacházející se ve vyšší energetické hladině má z důvodu nerovnovážného stavu tendenci dostat se zpět do své původní energetické hladiny. K tomuto přeskočení z vyšší hladiny do nižší dojde pouze u některých elektronů a u jiných nikoliv. Při tomto procesu dojde k nekoordinovanému vyzáření fotonů všemi směry. Tyto fotony mají různé fáze a vznikající záření je nekoherentní. [5]



Obr. 2 Spontánní emise [6]

1.4 Stimulovaná emise

Pokud foton ještě před spontánní emisí narazí do excitovaného elektronu, který je ve vyšší energetické hladině, dochází k jevu zvanému stimulovaná emise. Dojde k vyzáření fotonu a takto uvolněný foton má stejnou frekvenci i fázi jako foton původní. Aktivní médium umístěné mezi zrcadly přispívá ke zpětnému odrazu fotonů, což má za následek podporu stimulované emise a tok fotonů mezi zrcadly exponenciálně roste. Část fotonů poté opouští rezonátor přes polopropustné zrcadlo jako koherentní světelný svazek. [5]



Obr. 3 Stimulovaná emise [6]

2 ROZDĚLENÍ LASERŮ

Existuje mnoho druhů laserů a také mnoho kritérií, podle kterých můžeme lasery rozdělovat. Prvním z nich je dělení laserů podle aktivního prostředí.

2.1 Pevnolátkové lasery

Aktivní prostředí těchto laserů je tvořeno pevnou látkou v podobě krystalů, oxidů či skel. Tyto látky mohou být jak krystalické, tak amorfni a jsou obohaceny příměsí vhodných iontů. Těmito prvky je ovlivněna krystalická mřížka nebo amorfni matrice nosného materiálu. Tyto ionty jsou zdrojem stimulovaného záření. Pro tento typ laserů je typické optické buzení. [8]

2.1.1 Rubínový laser

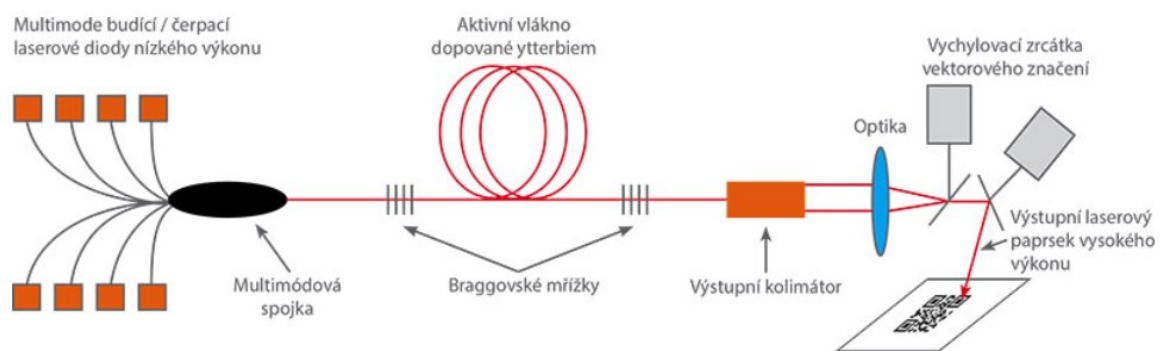
Rubínový laser je pevnolátkový laser pracující v pulsním režimu, ve kterém je aktivní prostředí tvořeno krystalem rubínu Al_2O_3 . Ten je dopován malým množstvím iontů chromu Cr^{3+} . Rubínový laser disponuje velmi dobrými tepelnými vlastnostmi a jako jeden z mála pevnolátkových laserů produkuje viditelné světlo o vlnové délce $0,6943 \mu\text{m}$. Jedná se o tříhladinový laser. K dosažení inverze populace je potřeba vybudit minimálně polovinu Cr^{3+} ze základního stavu. To vyžaduje poměrně vysoký čerpací výkon. Energie je čerpána absorpcí světla z výbojek. V dnešní době je již vytlačen Nd:YAG laserem. [8], [9], [13]

2.1.2 Nd:YAG Laser

Jedná se o nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru. Aktivní prostředí tvoří yttriohlinový granát (yttrium aluminium garnet – YAG) dopovaný ionty neodymu Nd. Produkovaný paprsek světla má vlnovou délku $1,064 \mu\text{m}$ a tento typ laseru může pracovat jak v pulzním tak v kontinuálním režimu. Výkon v kontinuálním režimu se pohybuje okolo 6 kW. V pulzním režimu lze dosáhnout špičkových výkonů kolem 10^9 W . Účinnost Nd:YAG laserů je na hranici 5 %, což sebou přináší velké nároky na chlazení, jelikož většina energie je přeměňována na teplo. Nedostatečné chlazení může způsobit prohnutí krystalu, který v tuto chvíli začne fungovat jako čočka a způsobí degradaci paprsku. Zdroj energie je tvořen výbojkami na bázi kryptonu. Dutina optického rezonátoru je volena tak, aby byla většina světla odražena do krystalu. Velkou výhodou tohoto druhu laseru je možnost vedení paprsku pomocí optického vlákna, což umožňuje jejich použití v robotizovaných pracovištích, např. v automobilovém průmyslu pro svařování. Nd:YAG lasery se uplatňují také v medicíně, kde se používají jako skalpel (kontinuální režim), nebo v oční mikrochirurgii (pulzní režim). [10]

2.1.3 Vlákenný laser (Fiber laser)

Aktivním prostředím vláknového laseru je optické vlákno, které plní funkci krystalu u ostatních pevnolátkových laserů. Délka vlákna se může pohybovat v řádech metrů a díky tomu je vedení laserového svazku velice snadné. Jádru optického vlákna může být dopováno kupříkladu erbiem, ytterbiem, nebo jejich kombinací. Může být použit také praseodym. Jedná se o prvky spadající do skupiny lanthanoidů. V jádru optického vlákna dochází ke generování záření, které má stejnou vlnovou délku jako v případě Nd:YAG laseru (1,064 μm), přičemž vlákno může mít kruhový, čtvercový, popřípadě obdélníkový průřez. Průřez vlákna určuje specifikaci laserového paprsku a tím pádem i použití konkrétního laseru. V optickém rezonátoru nenalezneme dvojici rovnoběžných zrcadel. Ty jsou nahrazeny tzv. Braggovskými mřížkami. Tyto mřížky jsou vlastně struktury, neboli zářezy v jádře optického vlákna. Díky absenci zrcadel je vláknový laser méně náchylný na mechanické poškození, teplotu a také je odolnější vůči vibracím. Jednoduchost konstrukce zajišťuje vysokou odolnost, spolehlivost a také intenzivní chlazení pomocí vzduchu, který působí na vlákno v celé jeho délce. Udávaná životnost v případě použití velkoplošných diod může být vyšší než 150 000 hodin. Účinnost vláknových laserů je velice vysoká, dosahuje zhruba 25 % a z tohoto důvodu jsou fiberové lasery vhodné k průmyslovému použití. [11], [13]



Obr. 4 Princip vláknového laseru [7]

2.1.4 Kotoučový laser

U kotoučových laserů je klasický krystal ve tvaru válce nahrazen tvarem tenkého kotouče o tloušťce v řádech desetin milimetrů. Průměr kotouče se může pohybovat okolo 100 mm. Buzení aktivního média je u kotoučových laserů realizováno pomocí mnohonásobného přechodu záření mezi laserovou diodou a reflektujícími vrstvami kotouče. Na kotouč je z jedné strany připojen kontaktní chladič, který odvádí teplo. Kombinace tenkého kotouče

krystalu a zároveň jeho poměrně velká teplosměnná plocha příznivě ovlivňuje intenzitu chlazení a také rovnoměrné rozložení teploty paprsku. Do výkonu okolo 1 kW je dostačující chlazení vzduchem. Jednoduchá konstrukce má příznivý vliv na kvalitu laserového záření, která se zvyšujícím se výkonem neklesá. Výkon kotoučových laserů může dosahovat až 16 kW, do budoucna teoreticky až 25 kW. Laserový svazek může být veden optickými vlákny stejně jako v případě vláknových laserů. [11]

2.1.5 Nd:sklo Laser

Lasery z neodymového skla jsou izotropní a mohou být vyráběny v různých velikostech a tvarech. Tepelná vodivost tohoto laseru je nižší než v případě klasického pevnolátkového laseru s krystalem. Optický rezonátor vybavený difrakčními mřížkami významně ovlivňuje zesílení laserového paprsku. Nd:sklo laser je vhodný pro použití zejména v pulzním režimu s malou frekvencí opakování. [12]

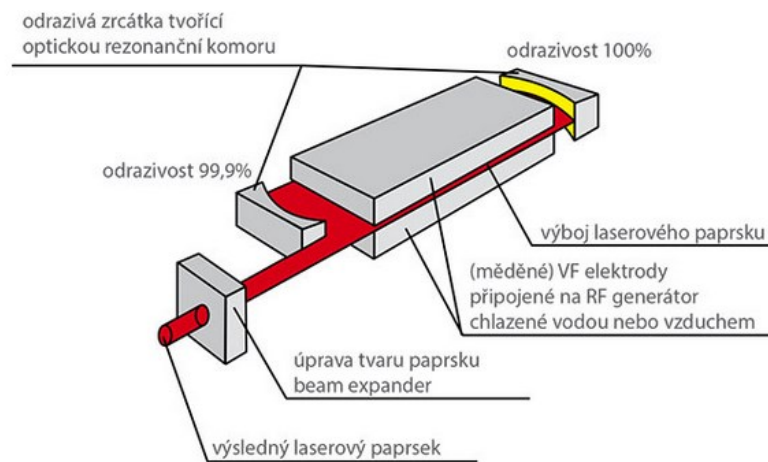
2.2 Plynové lasery

U plynových laserů se inverze populace dosahuje přivedením napětí přes keramickou, nebo skleněnou trubici, která obsahuje aktivní médium. Aktivním médiem je nízkotlaký plyn nebo směs plynů. Napětí které vzniká v trubici vytváří elektrický proud. Elektrony se srážejí s atomy plynu, čímž je excitují do vyšší energetické hladiny, které se říká horní laserová hladina. Spodní hladina se poté rozpadá zpět do základního stavu o poznání rychleji než hladina horní. Tím mezi nimi vzniká populační inverze. Vzhledem k rozmanitosti velkého množství plynových médií se laserový svazek plynového laseru pohybuje v rozsáhlém rozpětí vlnový délek. Plynové lasery mohou pracovat jak v pulzním, tak kontinuálním režimu. K nejpoužívanějším laserům této technologie patří CO₂ lasery. [14]

2.2.1 CO₂ Laser

Vzhledem k rozsáhlému rozpětí výkonů se jedná o jedny z nejpoužívanějších laserů napříč různými odvětvími. Kupříkladu v průmyslu mají své místo CO₂ lasery pro řezání, svařování i gravírování. Výkon těchto laserů může dosahovat až 20 kW. Lasery se středním výkonem v rozmezí od 0,5 kW do 6 kW se nejčastěji používají ve strojírenství pro řezání plechů až do tloušťky 25 mm. Výkonnější varianty laserů nad 6 kW poté nacházejí uplatnění při svařování v automatizované výrobě. Aktivní prostředí je tvořeno molekulami oxidu uhličitého. Buzení je vyvoláno elektrickým výbojem, jež zapálí směs plynů (CO₂, He, N₂). Vlnová délka paprsku je nejčastěji 10,6 μm nebo 9,3 μm. Účinnost CO₂ laserů se pohybuje v rozmezí

10 až 15 %. Podstatnou a největší nevýhodou je nemožnost vedení laserového paprsku pomocí optického vlákna, jako u určitých typů pevnolátkových laserů. Z části tento problém řeší umístění laseru na kloubový manipulátor, který umožňuje zkrácení optické cesty paprsku. [15], [16]



Obr. 5 Konstrukce CO₂ laseru [17]

2.2.2 Axiální CO₂ laser s pomalým prouděním plynu

Jedná se o nejstarší typ CO₂ laseru. Plyn proudí optickým rezonátorem velice pomalu a energie se do aktivního prostředí přivádí pomocí elektrického výboje, který může být stejnosměrný nebo střídavý. Směr výboje je rovnoběžný s osou optického rezonátoru a rovněž také s osou laserového paprsku. Dosahovaný výkon je zhruba 50 W na metr délky trubice, avšak celkový výstupní výkon je limitován chlazením optického rezonátoru. Výhodou je stabilní výkon na výstupu a kvalita laserového záření, což má za následek vysokou jakost řezu. Tento typ laseru se používá v pulsním i kontinuálním režimu. [13]

2.2.3 Axiální CO₂ laser s rychlým prouděním plynu

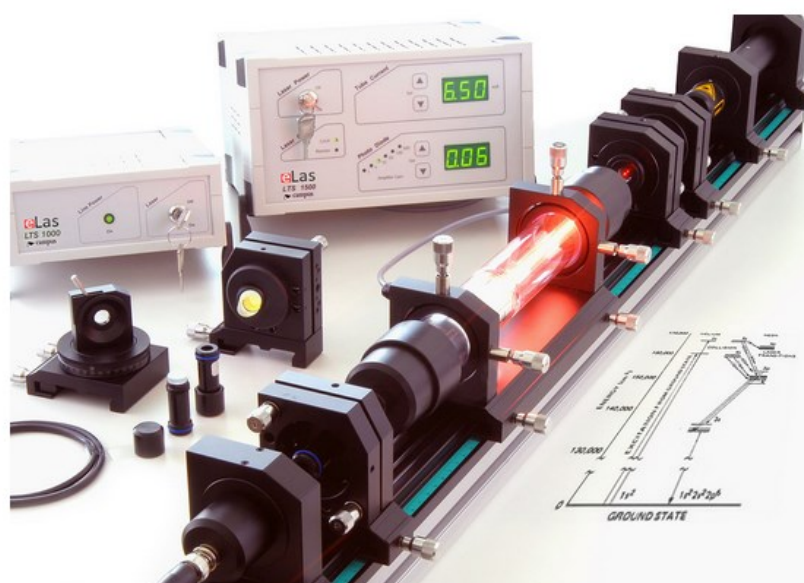
Jedná se o laser jednoduché konstrukce, kde proud plynu v optickém rezonátoru dosahuje vysoké rychlosti. Chlazení je realizováno mimo rezonátor. Dosahovaný výkon na metr délky trubice může být 500 až 1000 W. Výkon na výstupu může dosahovat až 5000 W. Stavba výstupního svazku je relativně dobrá, avšak poměrně často může dojít k fluktuaci struktury paprsku, což má za následek celkové zhoršení jeho kvality. Energie je přiváděna do aktivního prostředí pomocí výboje, který je obvykle stejnosměrný. Tento typ laseru může pracovat v obou režimech, jak pulsním, tak kontinuálním a využívají se převážně k řezání. [13]

2.2.4 CO₂ laser s příčným prouděním plynu

Tento typ laseru je velice kompaktní co se konstrukce týče. Každý z elementů, tj. laserový paprsek, elektrický výboj a proud plynu, se pohybuje jiným směrem. Na metr trubice připadá výkon o velikosti až 1000 W. Elektrický výboj nelze téměř vůbec řídit, tím pádem je možno provozovat laser pouze v kontinuálním režimu. Stavba svazku není příliš vhodná pro řezání. Z tohoto důvodu se tyto lasery používají převážně na svařování a také k tepelnému zpracování materiálů. Výstupní výkon může dosahovat hodnot až 5000 W. [13]

2.2.5 Helium-neonový laser

Helium-neonový laser může vyzařovat viditelné i infračervené světlo, avšak většina komerčně dostupných laserů pracuje s vlnovou délkou paprsku 0,6328 μm . Výkon těchto laserů nepřesahuje 100 mW a používají se tam, kde je potřeba nízkého výkonu. Aktivní prostředí je složeno směsí plynů a to helia a neonu obvykle v poměru 10:1. Energie je čerpána pomocí stejnosměrného výboje o napětí cca 10 kV. Délka trubice optického rezonátoru může být až dva metry a plyn v trubici je stlačen na určitý tlak. Početnější atomy hélia při elektrickém výboji absorbují více energie než atomy neonu a tím jsou excitovány do vyšší energetické hladiny. Přebytková energie těchto atomů je potom předávána atomům neonu a díky rezonančním srážkám jsou vybudeny do metastabilního stavu o téměř stejné energii jako atomy hélia. Tyto atomy se vrací do původního stavu a vzniká stimulovaná emise. Výsledné laserové záření je koherentní s malou divergencí. [18]



Obr. 6 Helium-neonový laser [19]

2.2.6 Excimerový laser

Aktivní prostředí excimerového laseru je tvořeno kombinací dvou plynů, zpravidla halogenu a vzácného plynu. Oba plyny jsou ve svém nízkoenergetickém stavu obecně stabilní. Buzení aktivního prostředí je aktivováno přivedením elektrického výboje o vysokém napětí. Plyny vytvoří sloučeninu ve stavu excitovaného plynu s vyšší energií. Pojem „excimer“ je zkratkou slovního spojení „excitovaný dimer“, jinak řečeno excitovaná molekula. Disociací této vysokoenergetické sloučeniny začne docházet k uvolňování fotonů a energie, která je rovna energii vazby molekuly vzácného plynu a halogenu. Vlnová délka produkovaného světla je závislá na složení plynů aktivního prostředí. Současné excimerové lasery co se plynu týče, hojně využívají argon a fluor a jejich vyzařovaná energie má vlnovou délku 0,193 μm . Výkon excimerových laserů se pohybuje v řádu stovek wattů a mají své pevné místo jak v průmyslovém odvětví, tak v medicíně. [20]

2.3 Polovodičové lasery

Jedná se o velice moderní průmyslové lasery, které jsou často označovány jako laserová dioda, jelikož pracují jako dioda, ve které dochází k přeměně elektrické energie na světelnou. Ke stimulované emisi dochází zářivou rekombinací párů nosičů náboje, tj. děr a elektronů v oblasti aktivního záření. Z tohoto důvodu je vlnová délka laserového záření určena především pásmovou mezerou polovodičového materiálu. Povrch krystalu polovodiče může mít dostatečnou odrazivost díky rozdílu indexu světelného lomu mezi polovodičem a vzduchem, což má za následek, že krystal může fungovat jako rezonanční dutina. Pokročilá technologie výroby polovodičů spolu s kompaktní konstrukcí laseru přináší mnoho výhod. Mezi tyto výhody patří vysoký výkon a vynikající účinnost laseru, která může být až 50 %. Nevýhodou je poněkud výrazná rozbíhavost laserového svazku a jeho vysoká citlivost na teplotu v aktivním prostředí. [21]



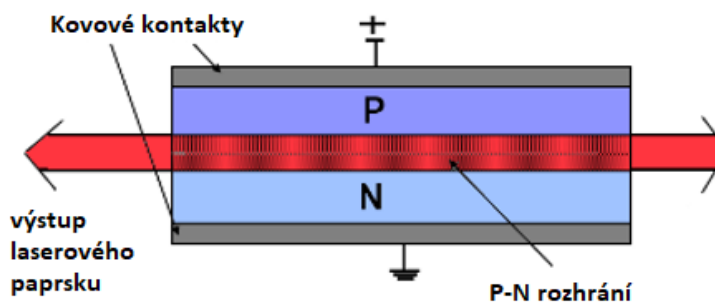
Obr. 7 Laserová dioda [22]

2.3.1 Diodový laser

Jedná se o laser, kde může být aktivní prostředí vybuzeno svazkem elektronů, fotony nebo elektrickým napětím. Toto aktivní prostředí je tvořeno skupinou polovodičů. Těmito polovodiči procházejí vysokou rychlostí elektrony, které vyvolávají přechod z pásu valenčního do vodivostního. Vlnová délka produkovaného laserového záření se pohybuje v rozmezí 0,808 až 0,940 μm . Výkon na výstupu může dosahovat hodnoty až 8 kW. U takto výkonných laserů má generovaný paprsek tvar obdélníku. Mezi hlavní výhody diodových laserů patří dlouhá životnost, nízké náklady na provoz a vysoká účinnost. Uplatnění nalezneme v průmyslu, kde se používají pro řezání, svařování a také v medicíně. [8]

2.3.2 Injekční laser

Klíčovým prvkem v případě injekčního laseru je PN přechod, což je mezník mezi polovodiči typu P a N. Během tohoto přechodu dochází k prostupu elektrického proudu pouze v jednom směru a jedná se o základní princip všech polovodičových součástek. Aktivní prostředí je buzeno elektricky. Optický rezonátor tvoří polovodiče s vybroušenými hranami. Laserový paprsek je emitován odrazem elektronů od zrcadel v dutině rezonátoru a jejich násobným přestupem v oblasti přechodu. [8]



Obr. 8 Schéma polovodičového laseru [23]

2.4 Kapalinové lasery

U kapalinových laserů je aktivní prostředí tvořeno roztoky organických barviv a tato barviva jsou dopována prvky ze skupiny lanthanoidů. Aktivní prostředí je buzeno opticky a díky různým druhům barviv lze dosahovat širokého spektra vlnových délek výsledného záření. Široká škála vlnových délek laserového záření nabízí jejich použití například ve spektroskopii a také v medicíně k léčení nádorových onemocnění. Co se nevýhod kapalinových laserů týče, nelze opomenout ne příliš vysokou životnost. Ta je totiž dána rychlou degradací aktivního prostředí působením světla a tepla. [8], [24]

2.5 Rozdělení podle čerpání energie

Čerpání energie, neboli také buzení aktivního prostředí, je proces, který je důležitý k dosažení inverze populace. V případě laserů tento čerpací proces udržuje vyšší populaci atomů na horní energetické hladině v komparaci s populací na dolní energetické hladině. Jedná se o způsob vybuzení částic z nižšího energetického stavu do vyššího. Nejčastěji používané metody čerpání energie jsou následující. [25]

2.5.1 Optické čerpání energie

K dosažení populační inverze se v tomto případě používá světlo. Buzení pomocí proudu fotonů se zpravidla používá u pevnolátkových laserů. Světelný paprsek dodává potřebnou energii pro vznik laserového záření. Obecně se pro optické čerpání energie využívá xenonových výbojek. Záblesk výbojky emituje elektrony do horní energetické hladiny a při jejich následném přechodu zpět do základní stavu dojde k vyzáření části energie ve formě laserového paprsku. Typickým příkladem laseru, jež využívá optického čerpání energie je rubínový a Nd:YAG laser. [25], [26]

2.5.2 Čerpání energie elektrickým výbojem

Tato metoda je hojně využívána u laserů, kde je aktivní prostředí tvořeno plynem. Z důvodu velice úzkého absorpčního pásma, je použití světelných výbojek nepoužitelné. Elektrický výboj je elektrický proud nebo tok elektronů v plynu nebo plazmatu. Výboj o vysokém napětí prochází aktivním prostředím s plynem nebo jiným médiem a vzniklé elektrické pole urychluje elektrony na vysokou rychlost, což má za následek vznik srážek těchto elektronů s neutrálními elektrony plynu. Takto dodaná energie excituje elektrony do vyšší energetické hladiny. Lasery využívající tento způsob čerpání jsou kupříkladu helium-neonové lasery nebo CO₂ lasery. [25]

2.5.3 Čerpání energie exotermickou reakcí

Čerpání energie pomocí exotermické reakce je využíváno rovněž u plynových laserů. Aktivní elektrony se dostávají do vyšší energetické hladiny pomocí příslušných exotermických reakcí probíhajících v aktivním prostředí. Kupříkladu $H_2 + F_2 \rightarrow 2HF$, při této chemické reakci spolu reagují molekuly vodíku (H₂) a fluoru (F₂). Následně dojde ke spojení těchto dvou molekul a vzniká molekula fluorovodíku (2HF) v excitovaném stavu a tudíž dochází k inverze populace. [25]

2.5.4 Čerpání energie pomocí tepla

V určitých případech může být dosaženo populační inverze také ohřevem laserového média. Aktivní prostředí je v první řadě ohřáto na vysokou teplotu a následně je velice rychle zchlazeno. Teplo v tomto případě slouží jako zdroj energie. [25], [26]

2.5.5 Injekcí nosičů náboje

Tento způsob buzení je používán u polovodičových laserů. Injekce minoritních nosičů náboje přes PN přechod vede k inverzi populace a ke vzniku laserového záření. [26]

2.6 Rozdělení laserů podle časového provozu

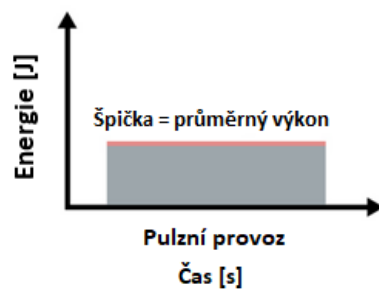
Lasery můžeme dále dělit podle jejich časového provozu. Ten lze jednoduše charakterizovat trváním nebo délkou vyzařování laserového paprsku.

2.6.1 Kontinuální provoz

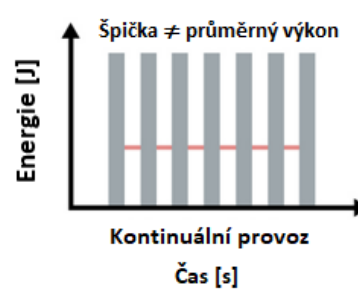
V kontinuálním provozu laseru dochází k neustálému čerpání energie ze zdroje. Výsledkem je laserový paprsek, jež působí nepřetržitě a po dlouhou dobu. Výstupní výkon kontinuálního laseru bývá zpravidla nižší a měří se ve wattech. Tyto lasery se používají tam, kde je potřeba nepřetržitého provozu, například v radiotelekomunikaci nebo v medicíně a to konkrétně v chirurgii. Za lasery s kontinuálním provozem se považují ty, u nichž je délka jednoho pulzu delší než 0,25 s. [27], [28]

2.6.2 Pulzní provoz

Lasery pracující v pulzním provozu nevyzařují světlo kontinuálně, ale ve formě pulzů (světelných záblesků). V závislosti na energii pulzu, délce jeho trvání, frekvenci a vlnové délce rozlišujeme jednak metody generování pulzů, ale také různé druhy pulzních laserů. Výstupní výkon těchto laserů je relativně vysoký a ve výkonových špičkách může dosahovat hodnot v řádech megawattů. Lasery s pulzním provozem jsou vhodné například k řezání nebo gravírování. [27], [28]



Obr. 9 Kontinuální provoz [29]



Obr. 10 Pulzní provoz [29]

2.6.3 Kvazikontinuální provoz

Kvazikontinuální provoz laseru znamená, že energie je čerpána pouze v určitých časových intervalech. Tyto intervaly jsou dostatečně krátké, tak aby došlo výrazným způsobem ke snížení tepelných účinků a tudíž nedocházelo k přehřívání komponentů laseru, avšak na druhou stranu jsou dostatečně dlouhé aby se proces záření blížil ustálenému stavu. Jinými slovy pracuje laser opticky v kontinuálním režimu s výkonovými špičkami. Takový druh laseru je tedy schopen provozu s poměrně vysokým výkonem na výstupu během omezených časových intervalů. [30]

2.7 Dělení dle vlnové délky záření

Laserové záření je formou elektromagnetického záření a lasery lze rozdělit také do skupin podle vlnové délky produkovaného záření. Energetická hladina fotonů, jež jsou vyzařovány v aktivním prostředí během stimulované emise, je nepřímo úměrná vlnové délce světla generovaného záření. Jinými slovy lze říci, že čím kratší je vlnová délka laserového záření, tím je vyšší energie fotonů. Vlnová délka může být ovlivněna způsobem čerpání energie a také provozem laseru v kontinuálním, pulzním či kvazikontinuálním režimu. Obecně platí, že vlnová délka záření určuje výkon laserového paprsku. Vlnovou délku a výkon paprsku rovněž také ovlivňuje použité aktivní prostředí. Vlnové délky od 10 nm do 400 nm produkují ultrafialové světlo (UV), které je lidskému oku neviditelné. Světlo o vlnové délce mezi 380 nm a 780 nm se běžně označuje jako „viditelné“ a nad 780 nm se jedná o záření infračervené (IR), které je rovněž pro člověka neviditelné. Pojem „laserové světlo“ se nicméně vztahuje na mnohem širší rozsah elektromagnetického spektra a to konkrétně na vše od 150 nm do 11 000 nm, tj. od ultrafialového záření až po vzdálené infračervené. [31]

Tab. 1 Stručný přehled rozdělení laserů [14]

Laser	Typ laseru	Vlnová délka [nm]	Spektrální oblast
ArF, KrF, XeCl	Plynový (excimerový)	193, 248, 308, 353	Ultrafialová
Dusíkový	Plynový	337	Ultrafialová
GaN	Polovodičový	410	Fialová
Helium-neonový	Plynový	632,8	Červená
Rubínový	Pevnolátkový	694,3	Červená
Nd:YAG	Pevnolátkový	1064	Infračervená
Ho:YAG	Pevnolátkový	2000-2100	Infračervená
CO ₂	Plynový	10600	Infračervená

2.8 Rozdělení laserů dle dosahovaného výkonu

Obecně neexistuje žádná přímá definice toho, co lze považovat u laserů za „vysoký výkon“, nicméně v kontextu laserových strojů se za tento pojem považuje výkon v řádech kilowattů. Zatímco v případě laserového displeje lze za vysoký výkon považovat již několik desítek wattů, v určitých oblastech, například u laserových ukazovátek, je za vysoký výkon považováno ukazovátko s výkonem několik set miliwattů.

2.8.1 Lasery s nízkým výkonem

Do této kategorie můžeme zařadit lasery o výkonu v řádu desítek až stovek wattů. Nejčastěji se jedná o lasery určené pro vrtání a řezání křehkých materiálů jako je například keramika, pro řezání dřeva a nekovových materiálů. [1]

2.8.2 Lasery s vysokým výkonem

Jedná se o lasery s výkonem v řádech kilowattů. Jejich vysoký výstupní výkon je potřebný pro řadu laserových aplikací. Mezi tyto aplikace patří laserové zpracování materiálu (svařování, řezání, vrtání, pájení, kalení, značení), dále jsou výkonné lasery potřeba v určitých lékařských aplikacích (chirurgie), ale uplatnění naleznou také ve vojenských aplikacích a ve vědě. [1]

2.9 Rozdělení z hlediska konstrukce

Z konstrukčního hlediska je potřeba zabezpečit přenos laserového paprsku ke zpracovávanému dílu. U laserů pro průmyslové využití rozlišujeme tyto druhy konstrukčního provedení.

2.9.1 Laser se stacionární hlavou

Jedná se o systém kde je hlava laseru uložena stacionárně a pohyb vykonává pouze pracovní stůl s obrobkem popřípadě s plechem. [24]

2.9.2 Laser se stacionární hlavou a pohyblivým paprskem

V případě této konstrukce se hlava nepohybuje, avšak pohyb paprsku je realizován pomocí zrcadel. Toto provedení je vhodné použít na místech s nedostatečným prostorem. [24]

2.9.3 Laser se stacionárním stolem

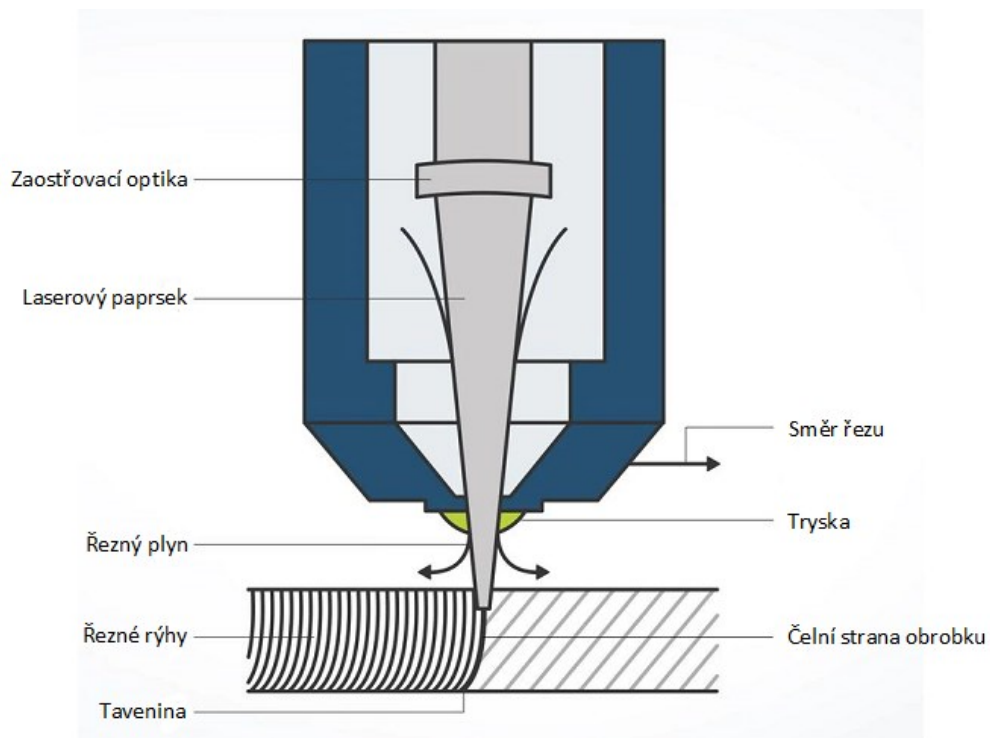
Laser tohoto typu je vybaven nepohyblivým stolem a pracovní pohyb vykonává hlava. [24]

3 APLIKACE LASERŮ VE STROJÍRENSTVÍ

Obrovský rozmach laserů napříč různými odvětvími započal téměř okamžitě po jeho vynalezení v 60. letech 20. století. Dnes se lasery používají téměř ve všech specializacích a své podstatné a nenahraditelné místo zaujímají rovněž také ve strojírenství. Mezi nezpochybnitelné výhody použití laserů ve strojírenství patří rozhodně jejich komplexnost, přesnost, výkon, rychlost a kvalita. Konkrétní možnosti použití laserů ve strojírenství jsou popsány v následujících kapitolách.

3.1 Řezání laserem

Jedním ze způsobů použití laserů je dělení materiálu. Laser lze použít pro řezání plechů, trubek, profilů nebo různých prostorových obrobků. Laserem lze řezat široké spektrum různých materiálů a to jednak uhlíkové i nerezové oceli, ale také dřevo, keramiku a další kovové i nekovové materiály. Podstatou laserového řezání je přivedení laserového paprsku s vysokou intenzitou do místa řezu, kde dochází k tavení a odpařování materiálu. Důležitým prvkem při řezání je také řezný plyn, který podporuje hoření a také slouží k vyfouknutí nataveného materiálu z místa řezu. Použitý řezný plyn přímo ovlivňuje typ řezání.



Obr. 11 Schéma laserového řezání [32]

3.1.1 Tavné řezání laserem

Priváděný laserový paprsek do místa řezu ohřívá materiál na vysokou teplotu, následně dochází k jeho natavení a přebytečný materiál je poté vyfouknut pryč pomocí plynu. Tavení materiálu je realizováno pouze pomocí energie laserového svazku, což zcela jednoznačně limituje řeznou rychlost. Při tavném řezání se používá jako řezný plyn dusík nebo argon. Jedná se o inertní plyny, tudíž nedochází k reakci mezi materiálem a plynem. Výjimku tvoří titan, u kterého je nutno při řezání použít argonu, jelikož za vysokých teplot silně reaguje s dusíkem. Řezný plyn je vháněn do řezné spáry pod vysokým tlakem až 30 barů. Specifickou vlastností těchto plynů je, že přímo ochlazují místo řezu a zabraňují oxidacím na řezné hraně. Tavné řezání lze použít v případě, kdy obrobky musí splňovat vysoké vizuální požadavky. Nevýhodou je náročnější zapichování u silnějších materiálů. Z tohoto důvodu určité typy laserových systémů umožňují k zapichnutí použít kyslík a následně přejít na řezání pomocí dusíku. [33]

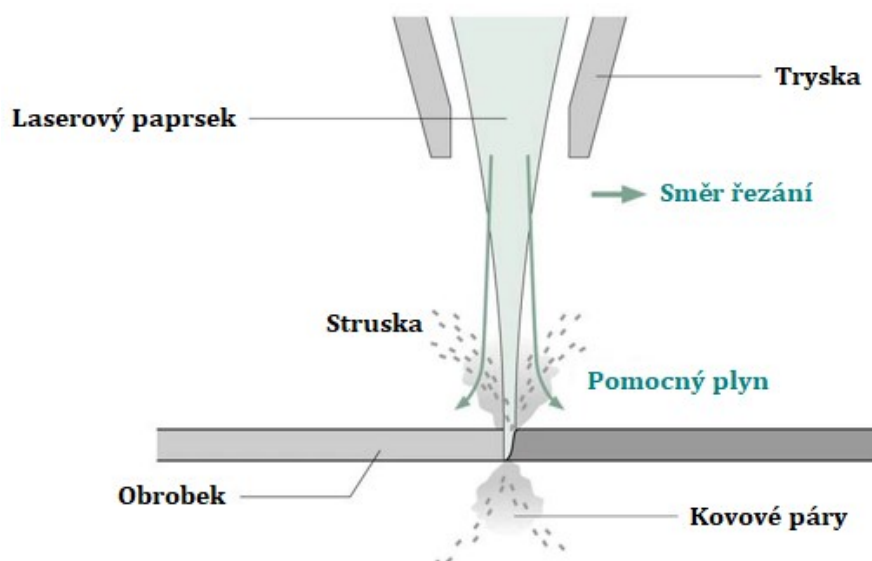
3.1.2 Oxidační řezání laserem

Oxidační řezání je charakteristické pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí, zpravidla se jedná o běžné konstrukční uhlíkové oceli. Řezání probíhá s podporou aktivního plynu – kyslíku. Při řezání kyslíkem se zahřátý materiál pomocí laserového paprsku vznítí a dojde k jeho odpaření. Exotermická reakce mezi kyslíkem a obrobkem vytváří dodatečnou energii ve formě tepla, která podporuje a zároveň urychluje řezací proces. Natavený oxid železitý v kapalném stavu má velmi nízkou viskozitu a je z místa řezu odváděn smykovou silou proudu kyslíku. Tlak kyslíku lze zvýšit za účelem zlepšení procesu odstraňování přebytečné taveniny. Toto zvýšení není omezeno chladícím účinkem plynu, nýbrž zvýšením bočního hoření z důvodu vyšší koncentrace kyslíku, což má za následek zhoršení kvality řezu se zvýšeným množstvím strusky. Maximální tlak kyslíku je závislý na tloušťce řezaného materiálu. Zatímco v případě tenkých materiálů do tloušťky 3 mm může tlak kyslíku dosahovat hodnot okolo 20 barů, při tloušťkách nad 20 mm je pracovní tlak sotva vyšší než 1 bar. Nevýhodou řezání kyslíkem je oxidace řezné hrany, což ve většině případů znamená nutnost následného dokončení povrchu obrobku. [34]

3.1.3 Sublimační řezání laserem

Podstatou sublimačního řezání je odpařování materiálu z místa řezu s pokud možno co nejmenším natavením materiálu. K tomu je zapotřebí velice vysoké intenzity laserového paprsku, kterého lze dosáhnout nastavením parametrů laseru a jeho optiky. V místě řezu

vznikají vlivem vysoké teploty kovové páry, které jsou z řezné spáry odvedeny pryč pomocným plynem. Pomocný plyn – dusík, argon nebo helium – slouží rovněž také k odstínění řezné plochy od okolního prostředí. Z tohoto důvodu se tlak plynu pohybuje v rozmezí 1 až 3 bary. Výsledný řez je bez otřepů a jeho povrch má vysokou jakost. Tento způsob řezání se téměř nepoužívá při zpracování plechů, avšak jeho použití je na místě v aplikacích, kde je potřeba velmi jemného řezání. Nejčastěji se sublimační řezání používá při zpracování fólií a textilií, kde není potřeba velkého množství energie, ale také u netavných materiálů, jako je například dřevo. [35]



Obr. 12 Schéma sublimačního řezání laserem [35]

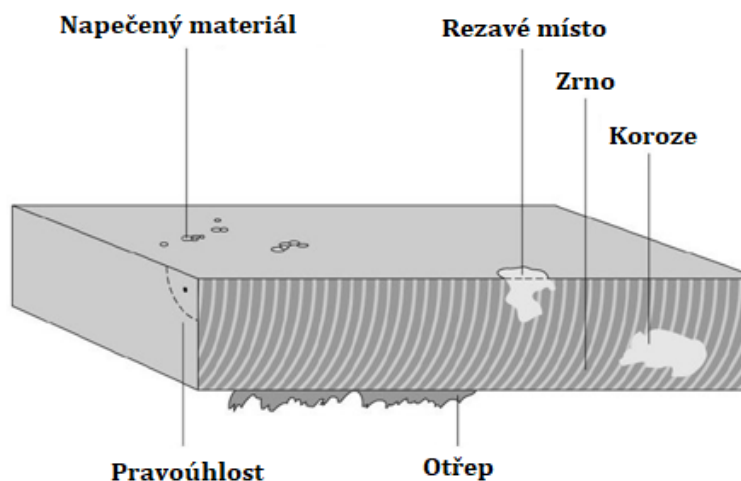
3.1.4 Laserové řezání s podporou vzduchu

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, vláknové a ani CO₂ lasery se při řezání nespolehají výhradně na energii světelného svazku. Řezací proces zahrnuje také asistenci přídavného plynu. Kyslík se z počátku jevil jako nejvhodnější plyn při řezání laserem a následně se zjistilo, že dusík výrazně ovlivňuje teplotu řezu a působí příznivě na kvalitu řezné hrany. Řezání laserem s podporou vzduchu je kombinací oxidačního a tavného řezání a dnes se ukazuje jako relativně efektivní a také velice úsporná alternativa, jelikož náklady na asistenční plyn, ať už se jedná o kyslík či dusík, může tvořit až 90 % celkových provozních nákladů laseru. Koneckonců vzduch je tvořen ze 78 % dusíkem, 21 % kyslíkem a zbylé 1 % tvoří ostatní plyny. Hlavní výhodou jsou nízké náklady na provoz laseru a co se nevýhod týče, nutno zmínit horší kvalitu řezné hrany, která je ovšem pro některá průmyslová odvětví stále více než uspokojivá. [36]

3.1.5 Jakost laserového řezu

Jako každému výrobnímu procesu, tak ani laserovému řezání se nevyhýbá vznik vad a defektů na řezné hraně. Jedná se zejména o pásma ovlivněná teplem, kuželovitost a kolmost řezu, dále otřepy, výmoly, praskliny, rýhy a geometrické nepravidelnosti. Seznam geometrických požadavků a úchylek na jakost povrchu laserového řezu definuje norma ČSN EN ISO 9013 (053401). Výsledná jakost řezu není závislá pouze na kvalitě, geometrii a metalurgických vlastnostech řezaného materiálu, ale je také ovlivněna následujícími parametry laseru:

- laserový paprsek
 - monochromaticnost, koherence, divergence, průměr, zaostření
- tvar a průměr trysky
- řezná rychlost
- použitý řezný plyn
 - kyslík, dusík, argon, vzduch, aj.
- tlak řezného plynu
- výkon laseru
- časový provoz
 - pulzní, kontinuální, kvazikontinuální
- stupeň polarizace [32]



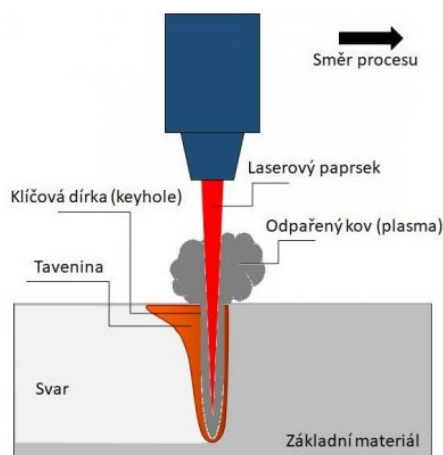
Obr. 13 Defekty řezné hrany [37]

3.2 Svařování laserem

Svařování je proces sloužící k vytvoření trvalého nerozebíratelného spoje dvou, popřípadě více součástí. Jedná se o základní proces téměř v každém průmyslovém odvětví a k trvalému spojení plastů, kovů, ocelí a slitin se využívá různých technik svařování. Laserové svařování se v posledních letech těší velké oblibě a ve velkém se používá zejména v automobilovém průmyslu, elektrotechnice a při stavbě lodí a letadel. Princip laserového svařování spočívá v soustředování vysokoenergetického laserového svazku do místa sváru. Energie takto zaostřeného paprsku taví materiál a vzniká nerozebíratelný spoj. V laserových svařovacích procesech hrají významnou roli svařovací plyny, jejich složení a čistota. Mezi hlavní přednosti laserového svařování patří vysoká rychlost a stabilita procesu, pravidelný svár, minimální teplotní deformace obrobku v okolí sváru a možnost svařování i konvenčně nesvařitelných materiálů. [38]

3.2.1 Hluboké svařování laserem

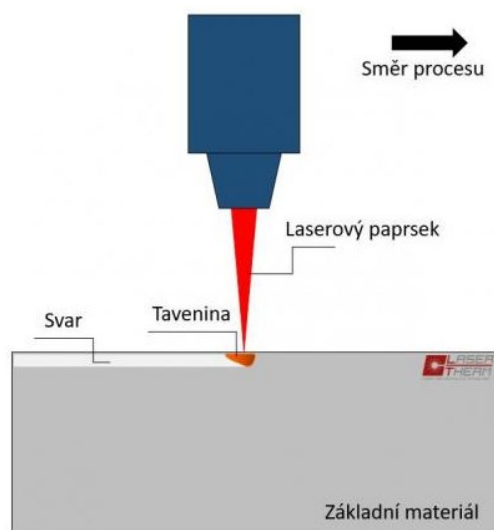
Hluboké svařování laserem je také známo jako svařování klíčovou dírkou. Laserem vytvořené sváry jsou ovlivněny tzv. „key hole“ efektem, což znamená, že paprsek proniká hluboko pod povrch materiálu a výsledné sváry jsou hluboké, úzké a jejich okolí není nijak výrazně tepelně ovlivněno. Pro svařování touto metodou je potřeba velmi vysokého výkonu, takřka 1 kW na mm². Zaostřený svazek fotonů taví materiál a zároveň vzniká pára (plasma), která tlakem částečně vypuzuje natavený materiál z místa sváru a absorbuje energii laseru. Vzniká úzký a hluboký otvor (key hole). Takto vytvořený svár má homogenní strukturu a jeho hloubka je až desetkrát větší než jeho šířka. Tato metoda je vyhledávána pro svou vysokou účinnost a rychlost svařování. [38], [39]



Obr. 14 Hluboké svařování laserem [39]

3.2.2 Kondukční svařování laserem

Kondukční svařování, často také známé pod pojmem svařování vedením tepla je založeno na principu tavení materiálu v požadovaném místě sváru. Množství energie laserového paprsku pohlcené materiálem se řídí především interakcí mezi paprskem a obrobkem. Kondukční svařování probíhá pouze na povrchu svařovaného materiálu a k tavení materiálu se obvykle využívá méně než 20 % celkové energie laserového paprsku, zatímco při svařování klíčovou dírkou se tento podíl využití energie zvyšuje až na 70 – 90 %. Při kondukčním svařování by nemělo docházet ke vzniku par, což má za následek stabilnější taveninu a kvalitnější povrch sváru, který je zaoblený, hladký a nevyžaduje další povrchovou úpravu. Energie je do svařovaného materiálu dodávána pouze prostupem tepla, tím pádem se výsledná hloubka sváru pohybuje od desetin až po jeden milimetr. Schopnost materiálu vést teplo ovlivňuje maximální hloubku sváru a jeho šířka je větší než jeho hloubka. Pro kondukční svařování je klíčové dostatečně rychlé odvádění tepla z místa svařování. Pokud tento postup není dodržen a teplota dosáhne kritické hodnoty, začne docházet k uvolňování kovových par a proces přejde do hlubokého svařování. [40], [41]



Obr. 15 Kondukční svařování laserem [39]

3.2.3 Laserové navařování

Při navařování dochází k nanesení přídavného materiálu ve formě drátu nebo prášku na povrch původního materiálu. Navařování se používá například k zušlechťování a modifikaci funkčních povrchů, zejména u strojů a jejich součástí, ale používá se také pro modifikaci či opravy stávajících výrobků. Navařování pomocí laseru může probíhat manuálně popřípadě automatizovaně, v závislosti na požadovaném úkonu. Při manuálním navařování

dochází k natavení přídavného materiálu – drátu laserovým paprskem. Ten zároveň natavuje i základní materiál, který následně ztuhne a vzniká svár. Finální tvar sváru vytváří svářeč, který drát vede a celý proces je chráněn před oxidací proudem inertního plynu argonu. Co se automatizovaného navařování týče, přídavný materiál může být tvořen opět drátem, avšak častěji se využívá kovového prášku, který je do místa požadovaného sváru přiváděn strojově a na povrch je nanášen ve vrstvách. V dalším kroku dochází k roztavení prášku i s původním materiálem a finální navařená vrstva je velice kvalitní, bez nežádoucích dutin a trhlin. [42]

3.2.4 Hybridní laserové svařování

Jedná se o svařování laserem v kombinaci s dalšími svařovacími metodami, nejčastěji s metodami MIG (svařování v ochranné atmosféře inertního plynu), MAG (svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu), popřípadě TIG (svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu). Kombinace laserového a obloukového zdroje skýtá mnoho výhod mezi které patří rychlost svařování, nižší nároky na obsluhu a také umožňuje díky vyšší energetické hustotě dosáhnout větší hloubky průvaru v porovnání s tradičním obloukovým svařováním. Podstatné zastoupení má hybridní svařování především v lodním průmyslu, kde se využívá ke svařování ocelových plátů, jež mohou dosahovat délek až několik desítek metrů. Mezery mezi těmito pláty bývají tak velké, že je téměř nemožné je překlenout pouze pomocí laserového paprsku, avšak jeho kombinace s metodou MIG toto svařování umožňuje. Laser dodává do místa sváru vysoký výkon a energii. Hořák následně překlene spáru a uzavře ji přídavným materiálem většinou ve formě drátu. Oproti konvenčním svařovacím metodám je hybridní laserové svařování rychlejší a díly se méně deformují. [43]

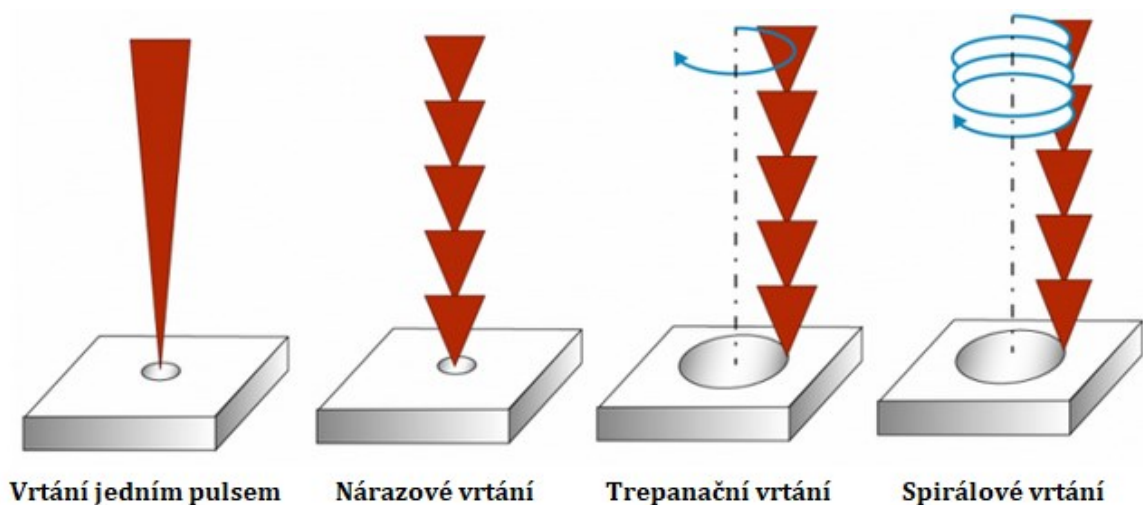
3.2.5 Laserové svařování plastů

Konvenční způsoby svařování plastů jsou dnes napříč obory vytlačovány do pozadí a jejich místo nahrazuje svařování laserem, které je šetrné vůči životnímu prostředí, jelikož při svařování nedochází ke generování zbytků, jako například u lepení. Koncepce této metody spočívá v průchodu zaostřeného laserového paprsku propustným materiálem na rozhraní mezi spojovanými díly. Laserový paprsek je přeměněn na teplo, které pohltí spodní absorbující díl a na rozmezí těchto dílů vzniká roztavený svár, kde se oba plasty spojí. Z důvodu dostatečného prostupu tepla jsou na sebe oba díly natlačeny pomocí přípravku, přičemž mezera mezi nimi by měla být menší než 150 μm . Po svaření je nutno nechat díly přitlačeny k sobě do doby, dokud nedojde ke ztuhnutí sváru. Proces laserového svařování

plastů je závislý na různých faktorech, mezi které patří propustnost světla, absorpce tepla a kompatibilita svařovaných dílců. Termoplasty jsou schopny propustit infračervené záření a z tohoto důvodu se používají lasery s vlnovou délkou 980 nm nebo 808 nm. Vzhledem k této propustnosti je nutno spodnímu dílu, který je zodpovědný za přeměnu světla na teplo, dodat požadované absorpční vlastnosti. Tohoto může být dosaženo použitím přísad, nejčastěji se používají saze, avšak i některé druhy pigmentů a plniv tyto vlastnosti příznivě ovlivňují. Co se kompatibility svařovaných materiálů týče, nejdůležitějším faktorem je použití plastů s podobnou teplotou tání. Tato metoda svařování je velice flexibilní, výsledné svary jsou kvalitní a jejich pevnost odpovídá pevnosti svařovaného materiálu. [42], [44]

3.3 Vrtání laserem

Princip laserového vrtání je založen na tavení a odpařování materiálu, které zajišťuje vysoce výkonný laserový paprsek působící na povrch obrobku v krátkých časových intervalech. Úběr materiálu je přímo úměrný energii pulzu. Během odpařování materiálu dochází k nárustu jeho objemu ve vrtaném otvoru a rovněž k prudkému zvýšení tlaku, který může dosahovat hodnot až 10^4 MPa a zároveň vypuzuje taveninu z místa obrábění. Specifickou metodu vrtání představují lasery s délkou pulzu v řádu pikosekund. Během této doby dochází k sublimaci – tedy k přímému odpaření materiálu, přičemž nedochází k tepelnému ovlivnění a natavení materiálu okolo vrtaného otvoru. Existují čtyři základní způsoby vrtání a jejich použití závisí na síle vrtaného materiálu, průměru otvoru a na požadavcích na jeho přesnost. Laserové vrtání obvykle probíhá v proudu asistenčního plynu, jenž chrání čočku laseru před uvolněnými parami a vymrštěnými úlomky. [45]



Obr. 16 Způsoby laserového vrtání [46]

3.3.1 Laserové vrtání jedním pulzem

Při jednopulzním laserovém vrtání se k vyhloubení otvoru používá vysokoenergetický laserový pulz. V případě vrtání do tenkého materiálu obvykle dochází k vyvrtání průchozího otvoru do průměru 1 mm. Vrtání jedním pulzem využívá laserové pulzy s délkou trvání od milisekund až po nanosekundy a jejichž energie může dosahovat desítek megajoulů. Obecně platí, že průměr a hloubka otvoru se zvětšuje s rostoucí energií laserového pulzu. Vrtání hlubokého otvoru s použitím metody jednoho pulzu má obvykle za následek jeho horší kvalitu v důsledku rozstříku nataveného materiálu. Naopak zkrácením doby laserového impulsu dochází ke zlepšení přesnosti a kvality vrtaného otvoru. [45]

3.3.2 Nárazové vrtání laserem

Při nárazovém vrtání se do stejného bodu namíří série stejných a krátkých laserových pulzů, které jsou schopny vrtat průchozí otvory i do relativně silných materiálů. K odstraňování materiálu dochází během jednotlivých pulzů, tudíž hloubka vrtaného otvoru se s počtem pulzů zvětšuje. Vrtání touto metodou umožňuje vytvoření hlubších a přesnějších děr než v případě jednopulzního vrtání. Jedná se o velice oblíbenou metodu, která se používá v mnoha strojírenských aplikacích, například pro vrtání děr ve spalovacích komorách nebo v lopatkách turbín. [45]

3.3.3 Trepanační vrtání laserem

Trepanační vrtání se využívá k vrtání otvorů velkých rozměrů pomocí laseru s vysokou opakovací frekvencí pulzu. V první fázi laser vyvrtá otvor metodou nárazového vrtání a následně dochází ke zvětšování otvoru sérií překrývajících se laserových pulzů, čehož je docíleno pohybem laseru nad obrobkem po stále se zvětšující kruhové dráze. Přebytný natavený materiál je následně vypuzován z vrtaného otvoru směrem dolů. Konstantní intenzita laserového paprsku umožňuje trepanačním způsobem vytvořit otvory libovolného tvaru a velikosti, kruhové i nekruhové a poměrně kvalitní. [45]

3.3.4 Spirálové vrtání laserem

Během vrtání se laser pohybuje nad obrobkem po kruhové dráze a s každou otáčkou se poloha ohniska spirálovitě snižuje, čímž dochází k postupnému prohlubování vrtaného otvoru. Natavený materiál je z pracovního prostoru odváděn proudem plynu a tlakem vzniklých par směrem vzhůru. Ohnisko laserového paprsku se vždy nachází na dně otvoru. Po vyvrtání otvoru laser ještě několikrát opíše jeho obvod a dochází k vyhlazení okrajů. [45]

3.4 Laserové značení

Laserové značení je proces, při kterém je díl nebo obrobek popisován popřípadě označován pomocí laserové technologie. Laserový paprsek o určité energii dopadá na povrch a dochází k reakci, která vede ke změně struktury materiálu. Mezi základní metody laserového značení patří laserové gravírování, žihání, leptání, lepení, pění a barvení. Změna struktury závisí především na vlnové délce, výkonu a délce pulzu. Výběr vhodné značící metody závisí na druhu materiálu a kvalitativních požadavcích na příslušný produkt. [47]

3.4.1 Laserové gravírování

Při laserovém gravírování dochází vlivem odpařování a tavení k úběru materiálu. Tím se na povrchu vytvoří prohlubeň – gravura ve tvaru písmena U. Jelikož je materiál odstraňován pouze do velmi malé hloubky, obvykle od 10 do 50 μm , nedochází téměř k žádnému poškození značeného dílu ve srovnání např. s leptáním. Při gravírování dochází rovněž k reakci materiálu se vzduchem, jež má za následek změnu barvy a výsledné zvýraznění značky. Gravírovat lze nepřeberné množství materiálů, kupříkladu kovy, plasty, keramiku, aj. Ve srovnání s konvenčními metodami se jedná o velice jednoduchou, levnou, šetrnou a odolnou značící metodu. [47]

3.4.2 Laserové značení žiháním

Laserové značení žiháním patří mezi speciální metody pro leptání kovů. Při generování popisku laser zahřívá lokálně povrch materiálu téměř k bodu tání, což vede k procesu oxidace a vzniku popouštěcích barev. Takto vytvořené značení je kontrastní, kvalitní a odolné proti otěru. Oproti jiným značícím metodám je značení žiháním považováno za neinvazivní, jelikož nijak zásadně nenarušuje vlastnosti značeného materiálu a nevede ke vzniku koroze. Metodu lze realizovat pouze u kovů, u kterých dochází ke změně barvy povrchu vlivem tepla a kyslíku. Popisovat lze povrchy o drsnosti až 12,7 μm a značku nelze odstranit třením povrchu. [47]

3.4.3 Laserové značení leptáním

Laserové značení leptáním je podobné laserovému gravírování s tím rozdílem, že při leptání je vyžadovaná energie laserového paprsku na plochu menší a jednotlivé pulzy jsou od sebe vzdálenější. Paprsek laseru dopadá na povrch a přestože většina jeho energie je materiálem odražena, část energie je pohlcena a přeměněna na teplo. Aby došlo k naleptání povrchu, musí značený materiál pohltnout právě tolik energie, aby došlo k jeho natavení a vzniku

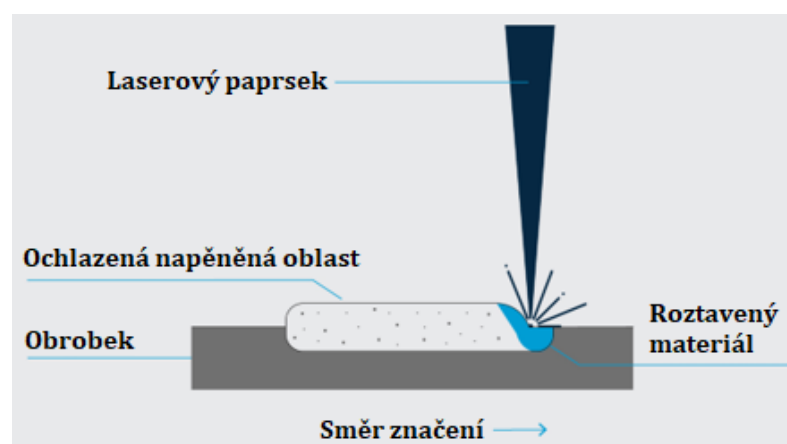
struktury. Leptáním lze vytvořit kontrastní černé a bílé značky a jedná se tak o velice účinný proces trvalého značení. Uvedená metoda je vhodná v případech, kdy potřebujeme začlenit laserové značení před neabrazivní úpravy povrchu. Mezi hlavní výhody patří rychlost popisování a dlouhodobá odolnost. [47]

3.4.4 Laserové značení lepením

Jedná se o značící proces, kterým lze vytvářet značky na různých površích, včetně kovů, keramiky a skla, aniž by došlo k porušení povrchu. Při laserovém značení lepením je popisek vytvořen pomocí přídavného materiálu, který je se základním materiálem spojen vlivem generovaného tepla laserovým paprskem. Přídavný materiál může představovat skleněný prášek, drcený kov nebo pigmenty smíchané obvykle s vodou. Na povrch je lze aplikovat štětcem, případně nástřikem. Laserové lepení představuje aditivní proces, který se vyznačuje vysokou kvalitou a rozmanitostí při značení dílců a součástí, při zachování maximální možné přesnosti. [47]

3.4.5 Laserové značení pěněním

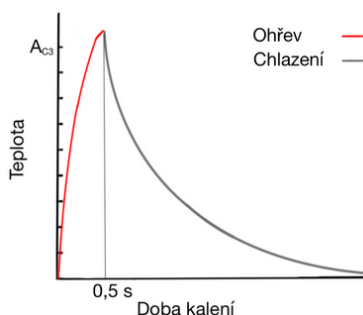
Jedná se o značící metodu, při níž se laser využívá k vytvoření popisku na tmavém plastovém materiálu. Během procesu reaguje povrch značeného dílu na teplo laseru a vytváří plynové bubliny, které se následně ochlazují a dostávají se pod povrch materiálu. Laserem zasažená místa se v důsledku zvětšeného objemu jeví jako vyvýšená a díky rozdílnému indexu lomu světla se vypěněné části liší od okolní plochy. Výsledné zbarvení povrchu závisí na složení značeného plastu a na typu použitých přísad, tudíž je vhodné otestovat chování daného materiálu na zkušebním vzorku. Výhodou této technologie je rychlost značení bez nutnosti používat přídavný materiál, životnost popisku a dobrá odolnost proti otěru. [48]



Obr. 17 Schéma laserového značení pěněním [49]

3.5 Laserové kalení

Metodou laserového kalení lze dosáhnout velmi tvrdých, otěruvzdorných povrchových vrstev se zvýšenou odolností proti opotřebení, přičemž tloušťka prokalené vrstvy může dosahovat až 1,5 mm. Při kalení laserem se využívá vláknových, popřípadě vysoce výkonných diodových laserů, které svou energii soustřeďují na požadovanou oblast. Laserový paprsek se pohybuje nad kalenou součástí a dochází k okamžitému zahřátí povrchu nad austenitizační teplotu rychlostí zhruba $1000 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. Kalicí proces je nastartován následným ochlazováním, během kterého je nakumulované teplo odváděno pouze samotným materiálem bez nutnosti přítomnosti chladicího média. Výsledkem tohoto procesu je vznik martenzitické struktury a vytvrzení povrchu materiálu. Oproti konvenčnímu způsobu nabízí laserové kalení určité výhody, kupříkladu schopnost kalit pouze v konkrétní oblasti bez tepelného ovlivnění okolí v důsledku přesné distribuce laserové energie. Rovněž nelze opomenout vysokou kalicí přesnost, nižší riziko deformace, eliminaci vzniku trhlin a eventuálně také robotizaci kalicího pracoviště. [50]



Obr. 18 Průběh laserového kalení [52]

3.6 Laserové soustružení

Soustružení pomocí ultrakrátkého pulzního laseru umožňuje obrábět díly o velmi malých průměrech o velikosti až $50 \mu\text{m}$. Úběr materiálu je bezkontaktní, nikoliv mechanický, tudíž na obrobek nepůsobí žádné síly a nedochází tak k jeho deformaci. Možnost dávkování jednotlivých laserových pulzů umožňuje regulovat tepelný příkon, díky čemuž nedochází k nadměrnému zahřívání a pnutí v obrobku. Laserem lze obrábět širokou škálu materiálů, např. kovy (železné, neželezné), keramiku, sklo, kompozity, plasty aj. Obrobený povrch je velice kvalitní s drsností menší než $1 \mu\text{m}$. Při použití pětiosého stroje lze laserové soustružení zařadit do kompletního řetězce laserových operací, což znamená, že obrobek lze řezat, gravírovat, vrtat nebo soustružit bez nutnosti jakéhokoliv opětovného upínání. [51]

4 STRUKTURA POVRCHU

Strukturou povrchu je myšlena opakující se geometrická odchylka povrchu od jeho nominálního tvaru. Struktura povrchu jako taková je tvořena základním profilem, drsností a vlnitostí povrchu. Drsnost povrchu spadá do kategorie mikronerovností a je způsobena použitou obráběcí metodou. Oproti tomu makronerovnosti, známé také jako vlnitost povrchu, mohou být způsobeny vibrační soustavou stroj – nástroj – obrobek. V praxi se parametry drsnosti a vlnitosti navzájem překrývají a je potřeba je od sebe oddělit (odfiltrovat). Nelze rovněž opomenout, že celkovou strukturu tvoří také různé druhy vad vyskytující se na povrchu. Mezi tyto vady patří praskliny, trhliny, rýhy, vyvýšeniny, otřepy aj. Povrch materiálů můžeme měřit dvěma základními metodami (kvalitativní a kvantitativní) a dvěma základními způsoby (kontaktně a bezkontaktně), přičemž tyto způsoby zažívají stálý rozvoj v důsledku neustále se zvyšujících požadavků na výslednou kvalitu struktury povrchu. [53]

4.1 Kvalitativní metoda měření povrchu

Jedná se o takzvaně porovnávací metodu měření, při které je měřený reálný povrch porovnáván se vzorkem. K tomu jsou dodnes využívány povrchové vzorkovnice a komparační mikroskopy. Jedná se o poměrně zastaralou a také velice náročnou měřicí metodu, jelikož výsledek měření struktury povrchu závisí na schopnostech člověka, který měření provádí. [53], [54]

4.2 Kvantitativní metoda měření povrchu

Kvantitativní metoda měření povrchu, známá také jako parametrická metoda, využívá k měření struktury povrchu matematické popisu. K měření struktury povrchu touto metodou se používají optické přístroje známé jako profilometry, nesprávně označované jako „drsnoměry“. Přístroji tohoto typu lze kromě drsnosti měřit také vlnitost a tvar. [53], [54]

4.3 Bezkontaktní způsob měření povrchu

Bezkontaktní způsob měření se dnes využívá v laboratořích a také ve vědecké praxi. K tomuto způsobu měření se využívá přístrojů, které jsou vybaveny bezkontaktním snímačem. Nejčastěji se využívá CLA (Chromatic Length Aberration) snímač. Princip CLA snímače spočívá v rozkladu bílého světla a následně jeho usměrnění na měřený povrch. Optika rozloží světlo na různé vlnové délky, přičemž v jednotlivých bodech povrchu je

zaostřena pouze konkrétní vlnová délka. Takto rozložené světlo se následně odráží od měřeného povrchu a spektrometr odkloní světlo na maticový senzor, ve kterém dochází k přiřazení prostorové polohy každému měřenému bodu. Tato data jsou následně zpracována pomocí výpočetní techniky a vyhodnocena v softwarech, které umožňují také zobrazení naměřených dat ve 3D. CLA snímač může být nahrazen také snímačem laserovým, ten však není tak přesný a má menší rozlišitelnost. [53], [54]

výhody bezkontaktního způsobu měření povrchu:

- možnost snímat povrch v obou směrech
- nedochází k poškození měřidel
- schopnost měřit adhezní a měkké materiály
- měření není omezeno průměrem snímacího hrotu
- bezpečný přechod snímače na oblastmi mimo měřený rozsah

nevýhody bezkontaktního způsobu měření povrchu:

- riziko ztráty naměřených dat
- výsledek měření je citlivý na okolní prostředí a zejména na vibrace

4.4 Hodnocení struktury povrchu podle normy ČSN EN ISO 4288 [54]

- Vyhodnocení měřené plochy se provádí podle hodnot získaných z přístroje pro měření struktury povrchu (kontaktně nebo bezkontaktně) na sledované ploše.
- V případě homogenní struktury povrchu měřeného vzorku budou naměřené hodnoty parametrů použity pro porovnání s hodnotami, které jsou uvedeny v technické dokumentaci.
- V případě heterogenní struktury povrchu měřeného vzorku budou jednotlivé parametry vyhodnoceny na každé ploše odděleně a v souladu s požadavky v technické dokumentaci.
- V případě, že není specifikován směr měření, je měření provedeno ve směru kolmém k poloze povrchu. Tento směr odpovídá nejvyšším hodnotám parametrů drsnosti povrchu.
- Měření struktury povrchu se provádí vždy na té části povrchu, u které můžeme očekávat kritické hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti povrchu.

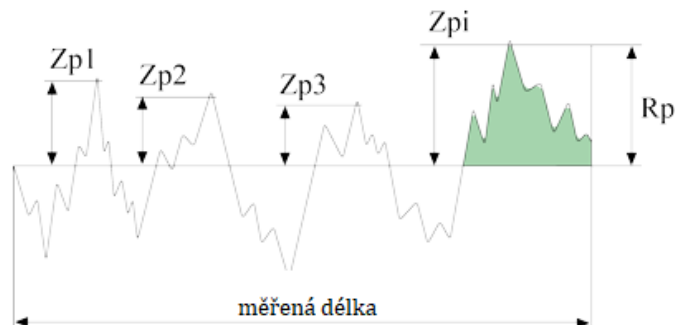
4.5 Parametry struktury povrchu podle normy ČSN EN ISO 4287 [55]

Norma ČSN EN ISO 4287 stanovuje termíny, definice a parametry pro posuzování struktury povrchu (drsnosti, vlnitosti a základního profilu) pomocí profilové metody. Tyto parametry dále dělíme do tří základních skupin:

- parametry P – jsou parametry vypočítané ze základního profilu
- parametry R – jsou parametry drsnosti vypočítané z profilu drsnosti
- parametry W – jsou parametry vlnitosti vypočítané z profilu vlnitosti

4.5.1 Největší výška výstupku R_p

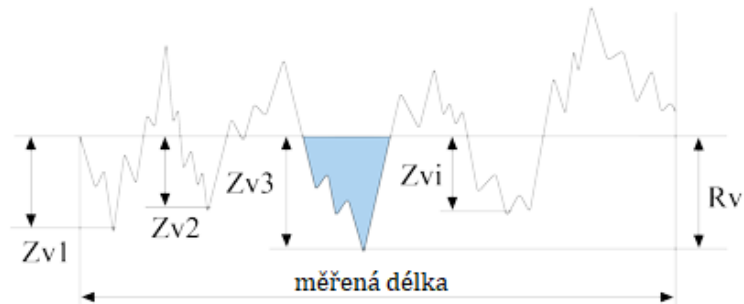
Parametr R_p se řadí do kategorie výškových parametrů a představuje největší výšku výstupku v celém rozsahu základní délky profilu. Výstupky tvoří stykovou plochu povrchu a hrají významnou roli při vyhodnocování procesů opotřebení a tření. Rozměry výstupků se s opotřebením mění a měření struktury povrchu nemusí obsahovat skutečné reálné extrémy povrchu. Z tohoto důvodu budou při opakovaném měření hodnoty parametru R_p pravděpodobně rozdílné. [56]



Obr. 19 Největší výška výstupku R_p [57]

4.5.2 Největší hloubka prohlubně R_v

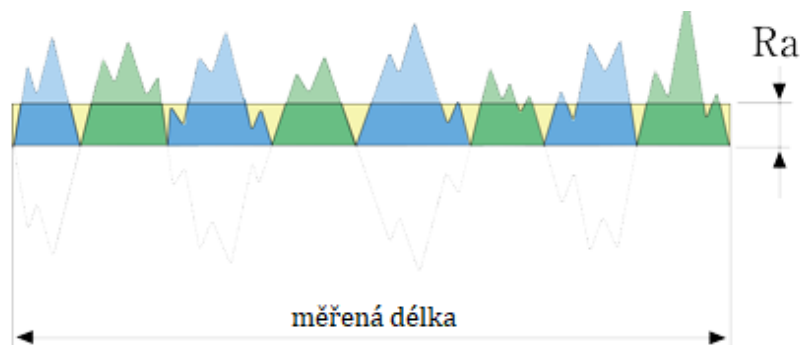
Parametr R_v spadá také do kategorie výškových parametrů a znázorňuje největší hloubku prohlubně v celém rozsahu základní délky profilu. Prohlubně povrchu jsou důležité v aplikacích, kde je potřeba udržení maziva na povrchu materiálu. O prohlubních tedy lze tvrdit, že v určitých případech jsou žádoucí avšak jsou také nejčastějším místem vzniku koroze a trhlin. Stejně jako v případě parametru R_p i zde platí, že největší hloubka prohlubně nemusí být zachycena jedním měřením, tudíž hodnota R_v se bude s největší pravděpodobností při opakovaném měření měnit. [56]



Obr. 20 Největší hloubka prohlubně R_v [57]

4.5.3 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti R_a

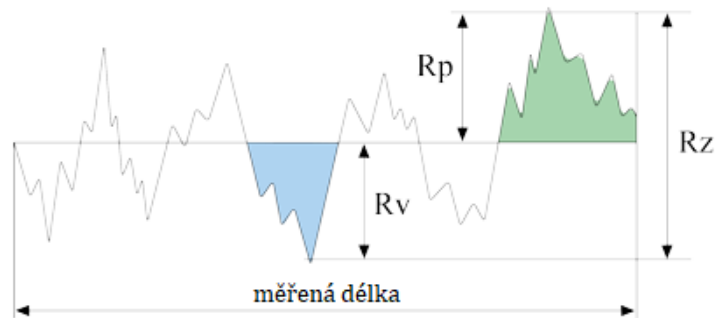
Výškový parametr R_a představuje průměrnou aritmetickou úchylku profilu od centrální čáry v celém rozsahu základní délky profilu. Tento parametr je nejčastěji využíván pro popis dokončeného povrchu a v minulosti byl definován také jako průměrná střední čára (CLA). Parametr R_a je vhodný pro řízení či regulaci výrobního procesu. Nutno podotknout, že se jedná pouze o statistickou hodnotu, tudíž její použití při vyhodnocování drsnosti povrchu nemusí být vždy efektivní. Kupříkladu dva povrchy, které mají stejnou hodnotu R_a , mohou mít různý tvar povrchu a také mohou vykazovat různé chování z pohledu živnosti, popřípadě funkčnosti součásti. I přes uvedené nedostatky je parametr R_a nejpoužívanější pro hodnocení drsnosti povrchu. [56]



Obr. 21 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti R_a [57]

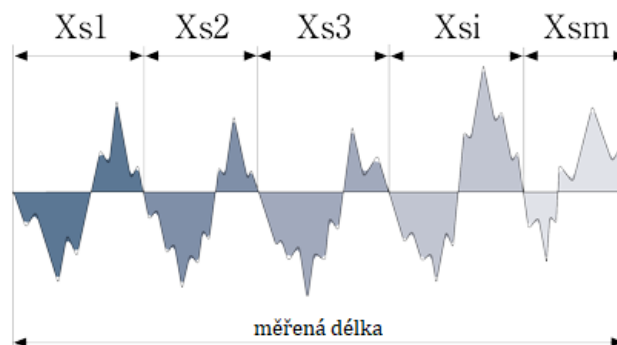
4.5.4 Největší výška profilu R_z

Parametr R_z představuje největší výšku profilu. Jedná se o součet největšího výstupku R_p a největší prohlubně R_v v celém rozsahu základní délky. Tento parametr charakterizuje celkový vzhled povrchu, hloubku rýh, jejich směr apod. Jinak řečeno, je souborem nerovností skutečného povrchu měřené součásti v určitém délkovém úseku. [56]

Obr. 22 Největší výška profilu R_z [57]

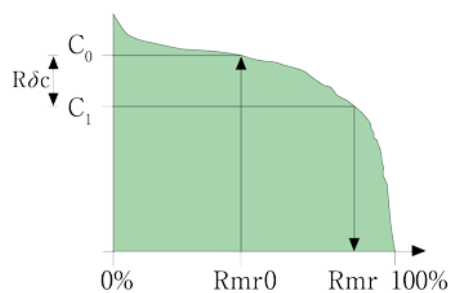
4.5.5 Střední vzdálenost výstupků R_{Sm}

Výškový parametr R_{Sm} reprezentuje střední vzdálenost mezi výstupky profilu v celém rozsahu základní délky. Nejvyšší bod profilu tvoří vrchol mezi průsečíky se střední čarou. Obecná definice parametru S_m je střední hodnota vzdálenosti mezi elementy profilu. Využití tohoto parametru lze použít k rozlišení jemného a hrubého povrchu. Minimální rozlišovací výška pro parametr R_{Sm} je 10% hodnoty R_z . [56]

Obr. 23 Střední vzdálenost výstupků R_{Sm} [57]

4.5.6 Materiálový podíl drsnosti profilu R_{mr}

Parametr R_{mr} vyjádřený v procentech udává poměr materiálem zaplněné délky vůči celkové měřené délce v hladině řezu c . Hladina řezu c je odstup řezné čáry ku zvolené vztažné čáře. Materiálový podíl v závislosti na hladině řezu c vyjadřuje podílová křivka materiálu tzv. Abbottova křivka. [56]

Obr. 24 Materiálový podíl R_{mr} [57]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POPIS PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce je porovnat vliv ochranného sklíčka čočky laseru na jakost povrchu laserového řezu. Byly zhotoveny dvě sady zkušebních vzorků z nerezové a žáruvzdorné oceli, přičemž první sada vzorků byla pálena s ochranným sklíčkem po 120 hodinách provozu a druhá sada byla pálena neprodleně po jeho výměně. Výroba zkušebních těles o rozměrech 100x20x8 mm probíhala na fiberovém laseru LVD LYNX FL-3015 ve firmě LAC s.r.o. v Židlochovicích. Každý vzorek byl opatřen popisovým gravírem tak, aby nedošlo k záměně vzorků vyrobených před a po výměně ochranného sklíčka, přičemž vzorky označené malými písmeny znázorňují sadu před výměnou. Takto vyrobené vzorky byly následně měřeny na přístroji Taylor+Hobson | Talysurf CLI 500 na půdě technologické fakulty UTB. Výsledkem tohoto měření jsou nasnímané povrchy jednotlivých vzorků. Tyto skeny bylo potřeba následně upravit v softwaru Talymap GOLD tak, aby byly vhodné k dalšímu použití a mohlo dojít k jejich převedení do softwaru pro statistické vyhodnocení. Takto převedená a upravená data byla následně statisticky vyhodnocována v softwaru minitab 17 a QC Expert 3.3.6.5. Byly vytvořeny grafy kvadratických regresí v minitabu pro parametry R_p , R_v , R_z a R_a a to pro vzorky obou ocelí před i po výměně ochranného sklíčka čočky laseru. Následně došlo k ověření významnosti jednotlivých regresních parametrů všech vytvořených regresí v softwaru QC Expert. Toto statistické vyhodnocení námi získaných dat nám umožnilo ve výsledku porovnat vliv ochranného sklíčka na jakost laserového řezu. Tyto dosažené výsledky jsou interpretovány v tabulkách 7,10,13 a 16.



Obr. 25 Ochranné sklíčko čočky po 120 hodinách provozu



Obr. 26 Nové ochranné sklíčko čočky

5.1 O firmě LAC s.r.o.

Firma LAC s.r.o. specializující se původně na výrobu pecí a sušáren byla založena v roce 1992 panem Jiřím Crhákem a inženýrem Radimem Ledlem, dvěma kamarády, kteří začínali v garáži a první pec jim explodovala po pár hodinách provozu. V roce 1995 se původní a již nedostačující výrobní prostory v Rajhradě přesouvají do výrobní haly ve Vojkovicích. Ve stejném roce se rovněž rozjíždí výroba žárobetonových tvarovek, jelikož na trhu neexistoval dostatečně kvalitní materiál potřebný pro výrobu jejich pecí. V roce 1996 zaznamenaly žárobetonové tvarovky obrovský úspěch a zaplnily díru na trhu. Po tomto úspěchu výrobní hala ve Vojkovicích přestávala stačit a tudíž došlo k přestěhování žárobetonů do Hrušovan nad Jevišovkou. Průmyslovým pecím a sušárnám se rovněž velice dařilo a proto se v roce 2002 stěhují do Hrušovan u Brna. V roce 2003 provozovnu v Hrušovanech nad Jevišovkou zachvátil požár, který zničil výrobní zařízení, výrobní halu a také formy na žárobetonové tvarovky. I přes toto těžké období se firma dokázala přenést a v krátkém čase najet zpět na výrobní tempo. V roce 2005 se žárobetonové tvarovky stěhují do nově zrekonstruované starší haly opět v Hrušovanech nad Jevišovkou. Rok 2012 přinesl novinku v podobě energeticky efektivní udržovací pece PTE, která umožnila zákazníkům snížit náklady a firmě ustát ekonomickou krizi. V roce 2013 Jiří Crhák a Ing. Radim Ledl představují novinku v podobě zahradních pecí Amphora, které vznikají v obou provozovnách. Rok 2014 přinesl spolupráci s externími společnostmi, pro které firma vyrábí a montuje své největší pece, sušárny a celé technologické linky zejména pro automobilový průmysl. V roce 2016 se firma umísťuje na 87. místě v žebříčku 100 nejlepších českých firem a na trh rovněž uvádí zpopelňovací pec LZ a vylepšenou sušárnu SV Mk.II s lepší cirkulací vzduchu. Průmyslové pece a sušárny se v roce 2018 z Hrušovan u Brna stěhují do nově vybudovaných prostor v Židlochovicích. K roku 2022 má firma za sebou téměř 20 000 vyrobených pecí, přes 50 000 různých tvarů žárobetonových tvarovek a dodává produkty do 35 zemí světa. [58]



Obr. 27 Provozovna průmyslových pecí a sušáren v Židlochovicích [59]

6 POPIS A POSTUP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

V následujících kapitolách je popsána výroba zkušebních tělísek, včetně popisu použitých technologií, materiálů, softwarů a laseru na kterém výroba probíhala. V první řadě bylo potřeba vytvořit 3D modely jednotlivých vzorků, ze kterých se následně vygeneroval DXF soubor kompatibilní s programem JETCAM expert pro tvorbu řezného plánu. Po vytvoření řezného plánu a vygenerování NC kódu bylo možno přikročit k samotné výrobě vzorků. Takto vyrobené vzorky byly poté uloženy do krabiček, aby nedošlo k poškození řezané hrany a tudíž k případnému zkreslení následujícího měření.

6.1 Laser LVD LYNX FL-3015

Jedná se o nákladově efektivní fiberový laser určený k řezání železných i neželezných materiálů včetně mosazi a mědi. Řezná rychlost laseru s využitím technologie optického vlákna je v porovnání s klasickými CO2 lasery až třikrát vyšší a použitý laserový zdroj od předního světového výrobce IPG Photonics, s velice dlouhou životností diod, je téměř bezúdržbový. Tyto klíčové vlastnosti mají za následek nízké provozní náklady a dlouhou dobu provozuschopnosti. Laser je vybaven dvěma stoly s možností automatické výměny pro maximální zefektivnění výroby. Laserová hlava Precitec ProCutter poskytuje snadné nastavení ohniska do požadované polohy a její prostá konstrukce umožňuje jednoduchou a rychlou výměnu ochranného sklíčka čočky. Ovládání laseru je zajištěno skrz patnáctipalcovou dotykovou obrazovku s grafickým rozhráním Touch-L, které je intuitivní a přívětivé. [60]



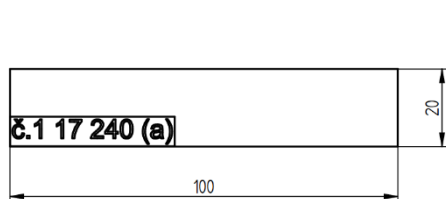
Obr. 28 LVD LYNX FL-3015 [60]

Tab. 2 Parametry laseru LVD LYNX FL-3015 [60]

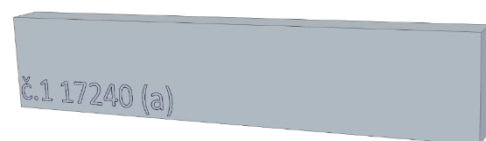
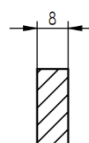
Specifikace stroje	
maximální možný formát plechu	3000x1500 mm
délka osy X	3080 mm
délka osy Y	1560 mm
délka osy Z pro horní stůl	80 mm
délka osy Z pro spodní stůl	240 mm
maximální váha plechu	725 kg
čas výměny stolů	26 s
rychlost repozice os X-Y	140 m/min
Rozměry stroje	
délka	10700 mm
šířka	6200 mm
výška	2500 mm
celková váha stroje	12500 kg
Specifikace laseru	
typ zdroje	IPG YLS
výkon	3 kW
Maximální tloušťka řezaného materiálu	
uhlíková ocel	15 mm
korozivzdorná ocel	12 mm
hliník	12 mm
měď	6 mm
mosaz	6 mm

6.2 Příprava 3D modelu a DXF souboru

3D modely jednotlivých zkušebních vzorků byly nakresleny v CAD softwaru Solid Edge ST10. Jelikož se vyráběly čtyři sady vzorků po deseti kusech, bylo nutno vytvořit čtyřicet různých modelů, každý s jiným číselným a písemným označením. Následně proběhl export jednotlivých modelů do formátu DXF, který je nezbytný pro následující tvorbu řezného plánu pro laser.



Obr. 29 2D náčrt vzorku



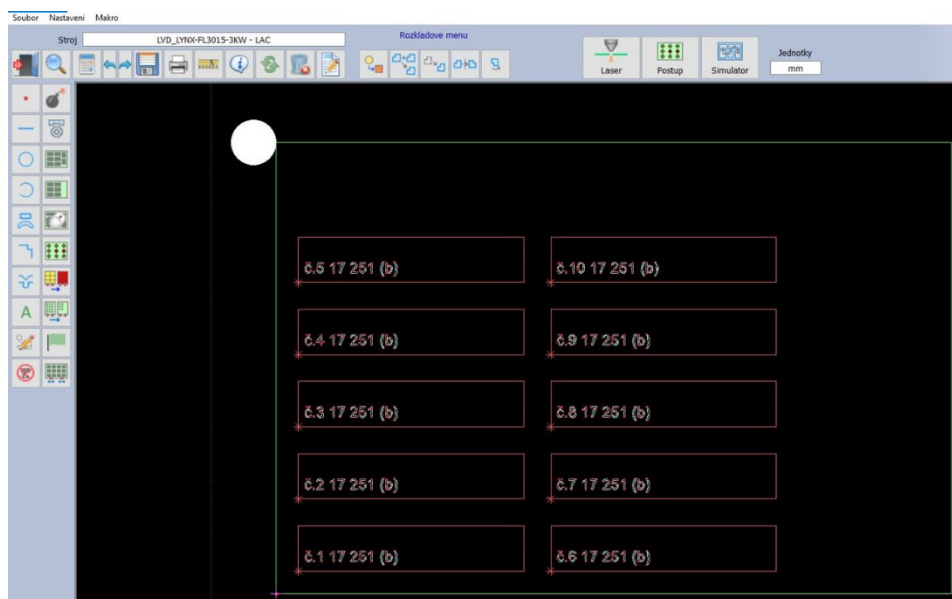
Obr. 30 3D model vzorku

6.2.1 Tvorba řezného plánu

Aby mohly být vzorky vypáleny na laseru je potřeba v první řadě vytvořit řezný plán. Ten vytváří technolog laseru na počítači a zároveň při jeho tvorbě určuje další řadu nezbytně nutných parametrů. Řezný plán na zkušební vzorky byl zpracován v softwaru JETCAM Expert.

Postup tvorby řezného plánu:

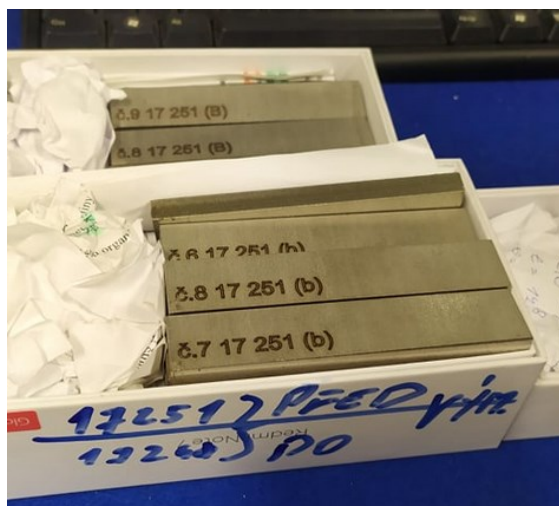
- Nahrání dílu ve formátu DXF do softwaru JETCAM Expert
- Definice materiálu, tloušťky a skladového čísla položky
- Vytvoření nového řezného plánu
- Definice názvu, materiálu, tloušťky a rozměru plechu
- Umístění dílu do tabule (ručně, automaticky)
- Nadefinování mikromůstků a popisových štítků u jednotlivých dílů
- Obložení dílu do požadované vrstvy pro určitý stroj
- Vytvoření odřezu pro oddělení zbytku od odpalu
- Určení směru řezání
- Zadání čísla CNC programu a jeho uložení na síť
- Tisk řezného plánu pro operátora laseru



Obr. 31 Tvorba řezného plánu v softwaru JETCAM Expert

6.2.2 Vypálení řezného plánu

Operátor laseru obdrží od technologa vytištěný řezný plán na základě kterého se dozví potřebné informace pro vypálení požadovaných dílů. Řezný plán obsahuje informace o formátu plechu popřípadě rozměru zbytku, číslo řezného plánu, číslo programu, strojní čas, využití materiálu, materiál, tloušťku a informace o jednotlivých položkách (skladové číslo, rozměry, požadovaný počet kusů, typ zakázky). Manipulant naloží na rošt laseru plech o požadovaných rozměrech, uzavře světelnou závorku a zajede s roštem do pracovního prostoru laseru. Operátor nahraje podle čísla na tiskopisu řezný plán do laseru, vybere příslušnou technologii pro pálení daného materiálu a potvrdí na grafickém rozhraní rozměr plechu. Následuje výměna trysky pro konkrétní materiál a její profouknutí dusíkem (v případě, že předchozí řezný plán byl pálen s asistencí kyslíku). Na obrazovce je potřeba potvrdit výměnu trysky a poté je na řadě spuštění programu. Laser zaměří rozměry vloženého plechu a poté přejde prvně k vygravírování všech popisových značek popřípadě značících čar a následně přikročí k pálení jednotlivých dílů. Jakmile je řezný plán dokončen, operátor opětovně vyjede s plechem ven ze stroje, kde z něj manipulant vyskládá jednotlivé díly. Odpal plechu je poté vyhozen a zbytek zaevidován pro další použití.



Obr. 32 Vypálené vzorky

6.3 Charakteristika použitých materiálů

Zkušební vzorky jsou vyrobeny z korozi-vzdorné oceli X5CrNi, 1.4301 (dle neplatného označování ČSN 17 240) a z žáruvzdorné oceli X15CrNiSi, 1.4828 (dle neplatného označování ČSN 17 251) dodané ve formě plechů o rozměrech 8x2000x1000 mm. Zmíněné oceli se rovněž dodávají také ve formě trubek, tyčí, profilů a pásovin.

6.3.1 Vlastnosti a složení korozivzdorné oceli X5CrNi, 1.4301

Jedná se o legovanou, ušlechtilou, nemagnetickou, austenitickou ocel, která je hojně využívaná pro svou odolnost vůči korozi a dobrou svařitelnost a to zejména ve strojírenství, chemickém a potravinářském průmyslu. Rovněž se tato nerezová ocel využívá na součástky, u kterých je vyžadovaná vysoká čistota výsledného produktu. Maximální schválená teplota, do které je vhodné tuto ocel bezpečně použít je 350 °C. [61]

Tab. 3 Chemické složení oceli X5CrNi, 1.4301 [62]

Chemický prvek	Obsah [%]
C (uhlík)	max 0,07
Cr (chrom)	17,0-19,5
Ni (nikl)	8,0-10,5
N (dusík)	max 0,11

6.3.2 Vlastnosti a složení žáruvzdorné oceli X15CrNiSi, 1.4828

Ocel X15CrNiSi, 1.4828 je legovaná, ušlechtilá, austenitická, žáruvzdorná ocel odolná proti horkým spalinám a plynům až do teplot okolo 1000 °C. Z tohoto důvodu je vhodná pro použití na součásti průmyslových pecí a kotlů. Ocel je rovněž velice odolná v prostředích s nízkým obsahem kyslíku a je dobře svařitelná různými svářecími postupy. Tvářením za studena lze u této oceli dosáhnout slabé magnetičnosti. [63]

Tab. 4 Chemické složení oceli X15CrNiSi, 1.4828 [62]

Chemický prvek	Obsah [%]
C (uhlík)	max 0,20
Cr (chrom)	19,0-21,0
Ni (nikl)	11,0-13,0
N (dusík)	max 0,11

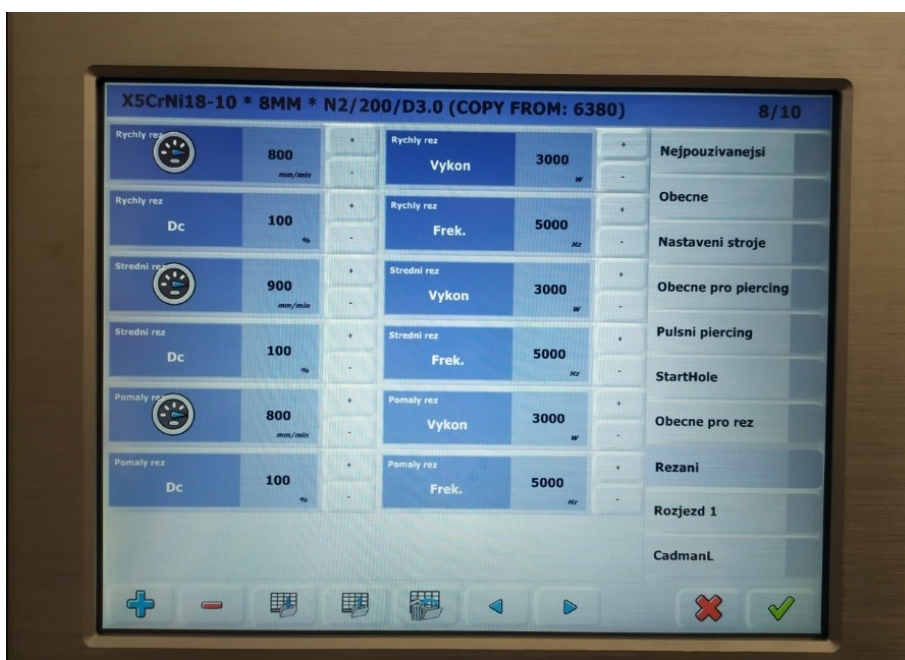
6.4 Použité řezné parametry

Řezné parametry mají významný vliv na vzhled a kvalitu řezu. Mezi parametry, jež nejzásadnějším způsobem ovlivňují výslednou jakost řezu, patří výkon, řezná rychlost, tlak plynu, vzdálenost ohniska a průměr použité trysky. Každý parametr ovlivní laserový řez ojedinelým způsobem. Kupříkladu nízká řezná rychlost může způsobovat „vytrhávání“ materiálu na spodní straně výrobku, zatímco nízko umístěné ohnisko bude mít za následek vznik otřepů. Zkušební vzorky byly páleny používanou, otestovanou a odladěnou

technologií firmy LAC s.r.o. Parametry těchto technologií jsou popsány v následující tabulce. Pozn. Tyto oceli budou pro potřeby této diplomové práce nadále označovány interním značením jako 17 240 a 17 251.

Tab. 5 Použité řezné parametry

Parametry řezu 17 240 – tloušťka 8 mm	
průměr trysky	3 mm
ohnisková vzdálenost	- 8 mm
tlak plynu	15 bar
výkon	3000 W
řezná rychlost – rychlý řez	800 mm/min
řezná rychlost – střední řez	900 mm/min
řezná rychlost – pomalý řez	800 mm/min
frekvence	5000 Hz
Parametry řezu 17 251 – tloušťka 8 mm	
průměr trysky	3,5 mm
ohnisková vzdálenost	- 8 mm
tlak plynu	15 bar
výkon	3000 W
řezná rychlost – rychlý řez	900 mm/min
řezná rychlost – střední řez	800 mm/min
řezná rychlost – pomalý řez	700 mm/min
frekvence	5000 Hz



Obr. 33 Technologie 6380 pro ocel 17 240 tloušťky 8 mm

7 POPIS A POSTUP MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

V následujících kapitolách je popsán postup měření zkušebních vzorků a také popis použitého měřicí přístroje Taylor+Hobson.

7.1 Taylor+Hobson | Talysurf CLI 500

Jedná se o vysoce účinný 3D bezkontaktní systém pro měření povrchu s CLA konfokální hlavou vyráběný britskou společností Taylor+Hobson, jež se specializuje na výrobu metrologických přístrojů. Tento přístroj je vybaven systémem CLI, který umožňuje měření struktury povrchu ve třech osách. Hlavní výhodou přístroje Talysurf CLI 500 je praktické spojení 2D a 3D prostorového hodnocení do jednoho zařízení. Jedná se o nejmenší provedení tohoto přístroje, což představuje číslovka v jeho názvu. Tato konkrétní řada vyniká především svými kompaktními rozměry a ekonomickou efektivností. Přístroj je vhodný především k měření součástí menších rozměrů a hmotností.

Tab. 6 Technické specifikace přístroje Talysurf CLI 500

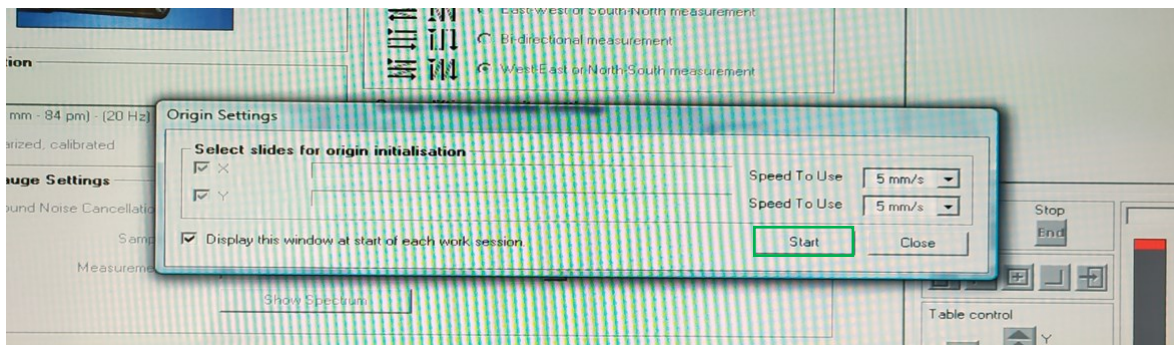
celkové rozměry	500 x 310 x 450 mm
rozměry pracovního prostoru	50 x 50 x 50 mm
hmotnost	55 kg
nosnost	10 kg
osové rozlišení	0,5 μm
software	Talymap GOLD



Obr. 34 Měření vzorků na přístroji Talysurf CLI 500

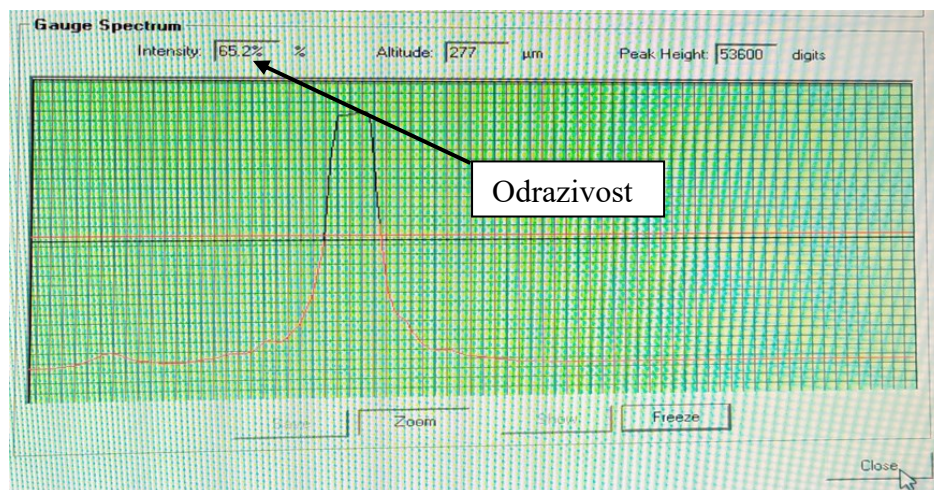
7.2 Příprava a měření na přístroji Talysurf CLI 500

V prvé řadě je potřeba ustavit měřený vzorek do pracovního prostoru přístroje. Aby nedošlo k poškození zařízení, je vhodné vzorek položit na kus papíru či na podložku. Jakmile je vzorek ustaven, spustí se zdroj měřicího přístroje a rovněž také software Talymap GOLD na počítači. Před samotným měřením je nutno přístroj zkalibrovat kliknutím na tlačítko „Start“.



Obr. 35 Kalibrace přístroje Talysurf CLI 500

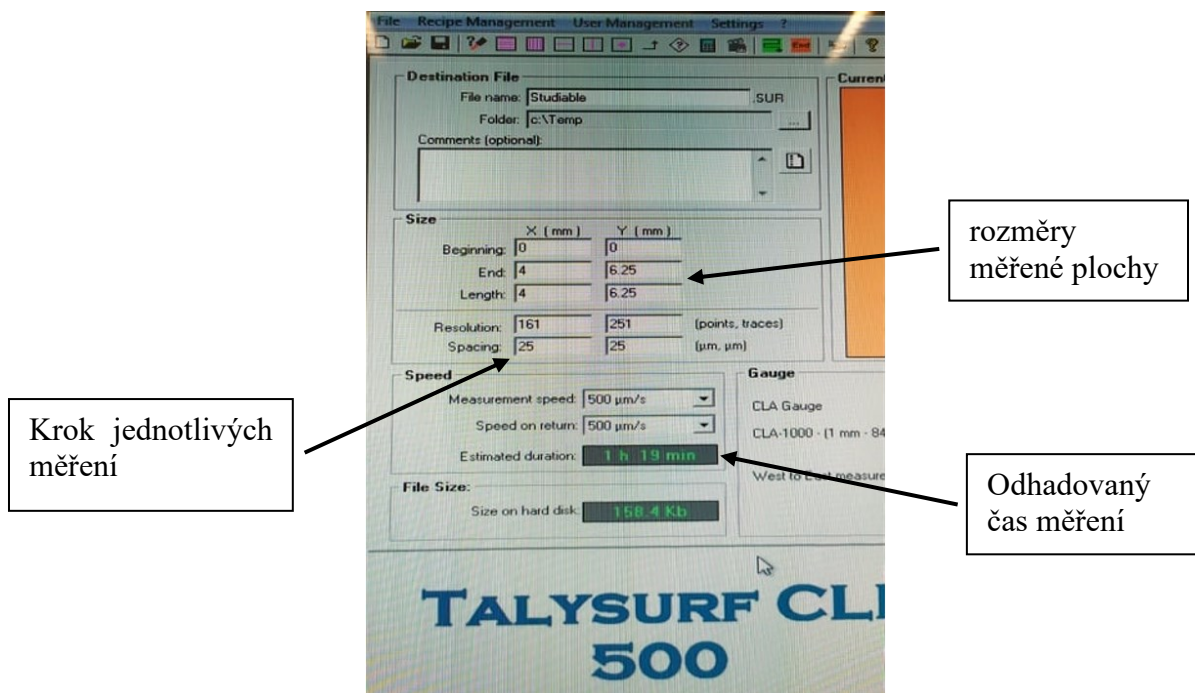
Jakmile je kalibrace dokončena, je přikročeno k dalšímu kroku a tím je nastavení odrazivosti. Odrazivost by neměla přesáhnout hodnotu 70 % a zároveň by neměla být nižší než 40 %. V případě našeho měření byla hodnota odrazivosti ustálena a nastavena na hodnotu 65,2 %.



Obr. 36 Nastavení odrazivosti v softwaru Talymap GOLD

Po nastavení odrazivosti lze přejít k nastavení parametrů samotného měření. Byla zvolena velikost měřené plochy o rozměrech 6,25 x 4 mm. Měření probíhalo ve směru podélném s osou x a záznam jednotlivých hodnot probíhal v krocích o velikosti 25 μm. Po nastavení těchto parametrů Software Talymap GOLD provede odhad měřicího času. Měření jednoho vzorku trvalo přibližně 80 minut a odhad programu je tudíž správný. Kliknutím na tlačítko „Scan“ je zahájeno snímání. Tímto způsobem byl změřen jeden vzorek z každé sady. Vzorek

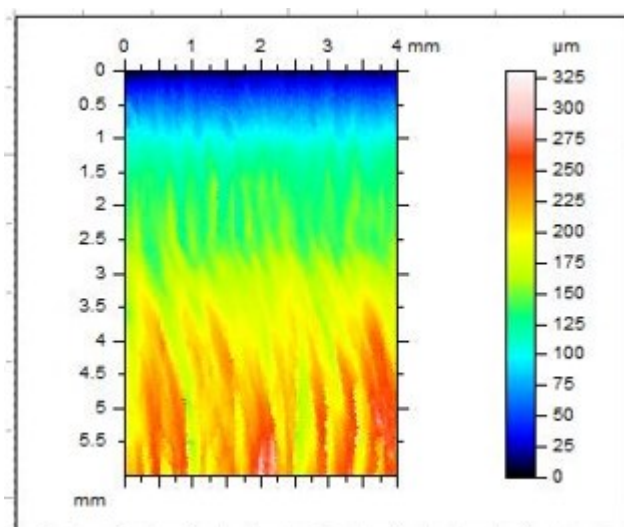
z oceli 17 240 před výměnou a po výměně a rovněž vzorek z oceli 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka čočky laseru.



Obr. 37 Nastavení parametrů měření

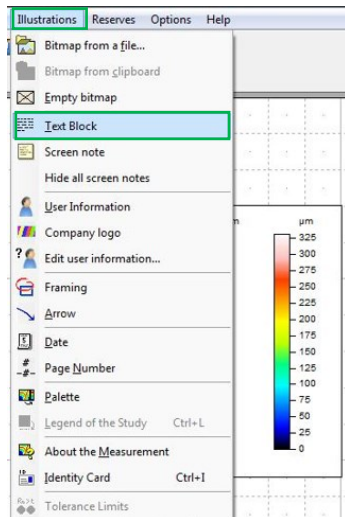
7.3 Úprava dat v softwaru Talymap GOLD

Jakmile je scanování dokončeno, výsledkem je snímek povrchu, který je znázorněn na obrázku 38. Jedná se o prvotní scan bez úprav. Následně je nutno provést několik důležitých kroků, jejichž výsledkem bude získání a převedení dat do softwaru minitab 17 pro jejich následné statistické vyhodnocení.

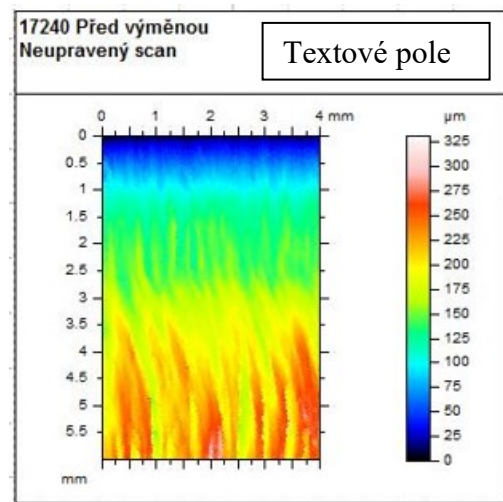


Obr. 38 Nasnímaný povrch vzorku

Prvním krokem je označení jednotlivých snímků textovým polem pro snazší orientaci během procesu úprav. V záložce „illustrations“ vybereme položku „text block“, čímž přidáme do pracovního listu textové pole. Do tohoto pole následně vložíme dle uvážení požadovaný text a umístíme jej na požadovanou pozici.

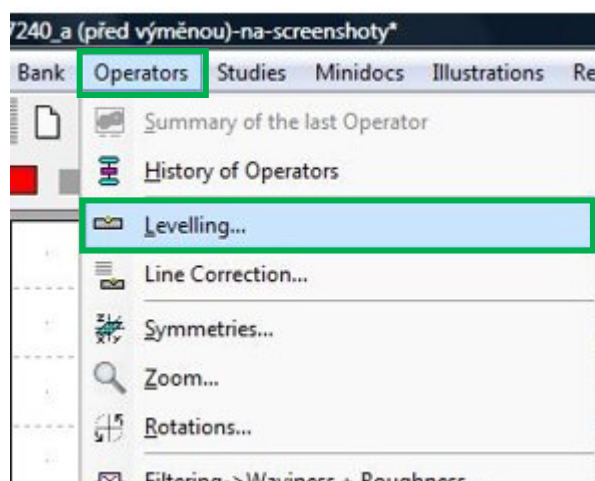


Obr. 40 Tvorba textového pole



Obr. 39 Neupravený scan opatřen textovým polem

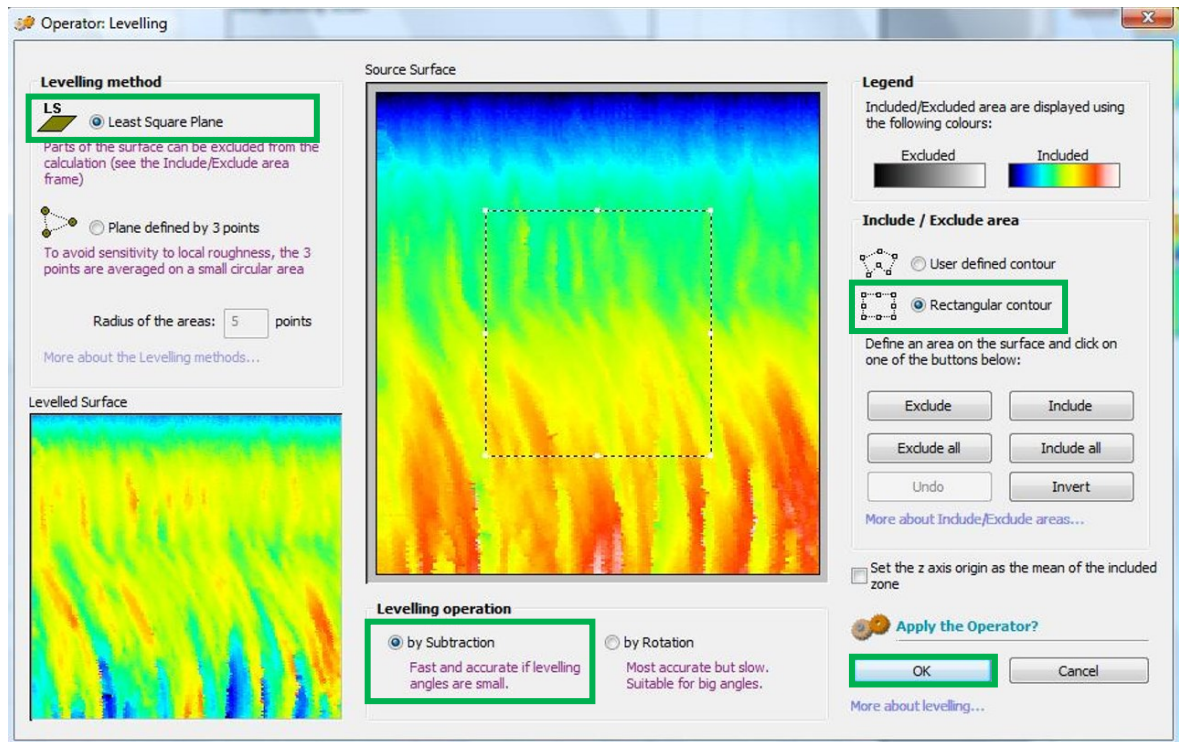
Jelikož nevíme, jaký směr a úhel má nascanovaný povrch, je nutno tento povrch takzvaně „vyrovnat“ nebo také jinak řečeno odfiltrovat. Vyrovnání povrchu provedeme kliknutím na záložku „operators“, zde vybereme funkci „levelling“.



Obr. 41 Postup odfiltrování povrchu

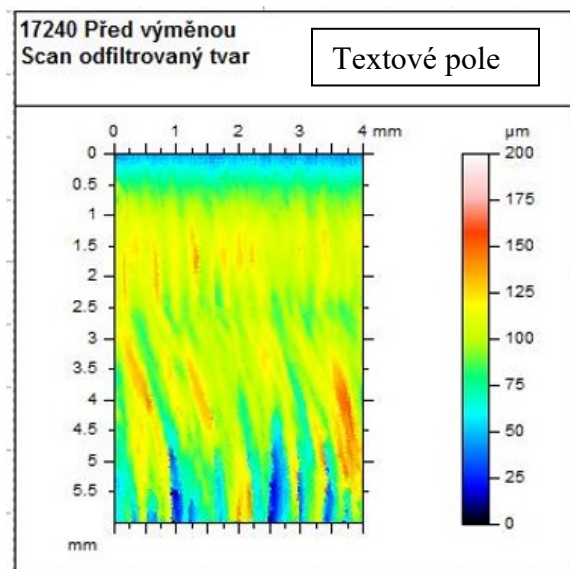
Funkce „levelling“ vyvolá následující dialogové okno. Zde je potřeba zaškrtnout volbu „Least Square Plane“, což znamená vyrovnání povrchu s využitím metody nejmenších čtverců. Následně zvolíme volbu „by subtraction“, která je rychlá, přesná a vhodná pro

vyrovnání povrchu skloněného o malý úhel. V poslední řadě vybereme možnost „rectangular contour“, jež nám definuje tvar vyrovnané plochy a poté stiskneme tlačítko „OK“.



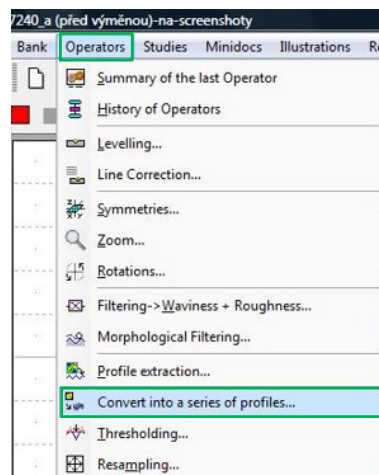
Obr. 42 Nastavení odfiltrování povrchu

Výsledkem je snímek s odfiltrovaným tvarem povrchu, který si opět označíme textovým polem pro lepší přehlednost.



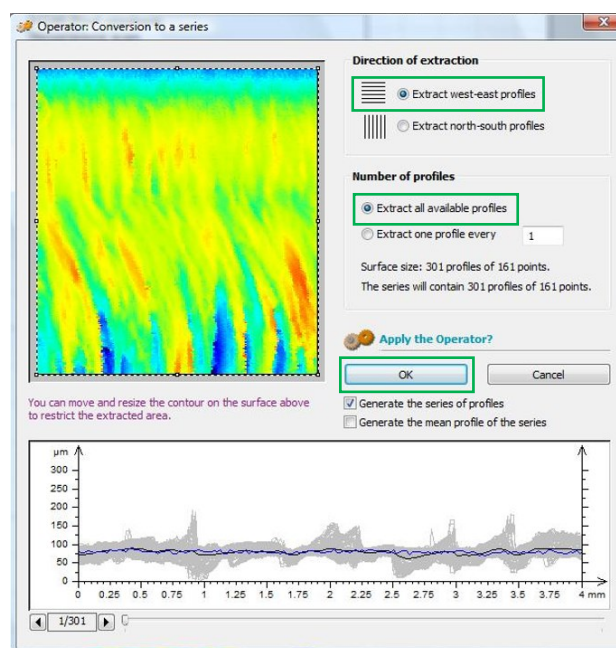
Obr. 43 Odfiltrovaný scan opatřen textovým polem

Dalším krokem je vytvoření grafu, k čemuž použijeme scan s odfiltrovaným tvarem povrchu. Klikneme na snímek levým tlačítkem myši, čímž se označí modrým rámečkem. Následně přejdeme do záložky „operators“ a zvolíme funkci „convert into a series of profiles“, což v překladu znamená konverze do řady profilů. Zjednodušeně řečeno nám tato funkce umožní „rozřezat“ nascanovaný povrch.



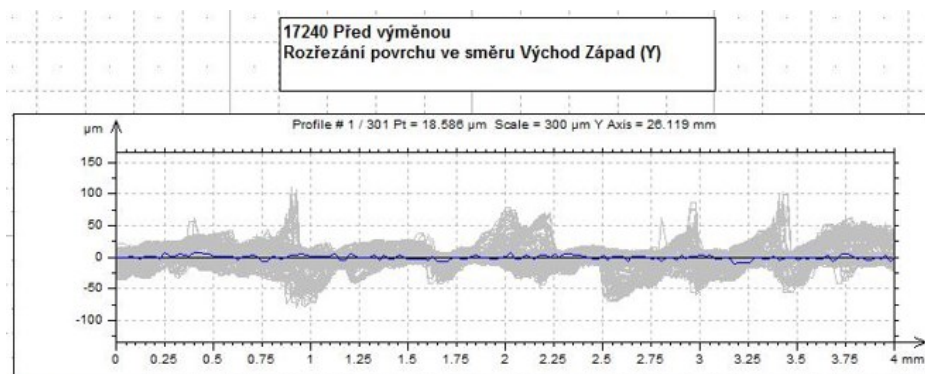
Obr. 44 Postup tvorby grafu

Ve vyvolaném dialogovém okně můžeme vidět, že nasnímaný povrch má 301 různých profilů. Zvolíme směr, ve kterém má dojít k „rozřezání“ na jednotlivé profily. Pro rozdělení povrchu ve směru osy y zvolíme volbu „extract west-east profiles“, což znamená, že bude povrch rozdělen ve směru východ-západ popřípadě západ-východ. Zvolíme „extract all available profiles“, čímž vybereme všech 301 profilů a klikneme na tlačítko „OK“.



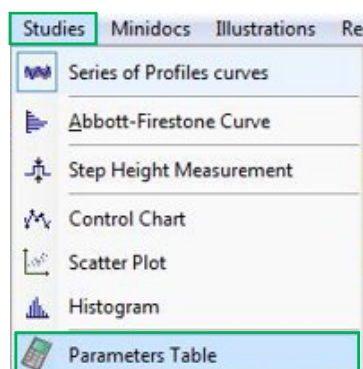
Obr. 45 Nastavení tvorby grafu

Výsledkem je následující graf znázorňující rozřezání povrchu ve směru východ – západ.



Obr. 46 Graf znázorňující „rozřezání“ povrchu ve směru východ-západ

Nyní můžeme přikročit k vytažení jednotlivých dat a parametrů. Dvojitým poklepáním levého tlačítka myši označíme graf a v nabídce „studies“ zvolíme funkci „parameters table“.



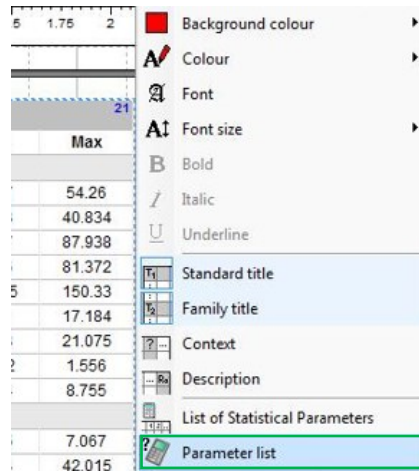
Obr. 47 Vyvolání tabulky

Tímto zobrazíme následující tabulku, která obsahuje informace o parametrech naskenovaného povrchu, ale také hodnoty aritmetických průměrů a směrodatných odchylek. Jelikož nemáme v plánu pracovat se všemi daty zobrazenými v tabulce, je potřeba navolit, aby se v tabulce zobrazovala pouze data důležitá pro naše účely.

ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rp	µm	16.371	10.02	3.817	54.26
Rv	µm	15.763	9.738	4.213	40.834
Rz	µm	32.135	19.38	8.697	87.938
Rc	µm	25.226	17.401	5.316	81.372
Rt	µm	45.727	31.391	10.795	150.33
Ra	µm	7.061	4.181	1.67	17.184
Rq	µm	8.538	5.043	2.113	21.075
Rsk		0.011	0.46	-0.992	1.556
Rku		3.468	1.171	1.914	8.755
Material Ratio parameters - Roughness profile					
Rmr	%	1.37	0.954	0.775	7.067
Rdc	µm	16.206	10.86	3.464	42.015

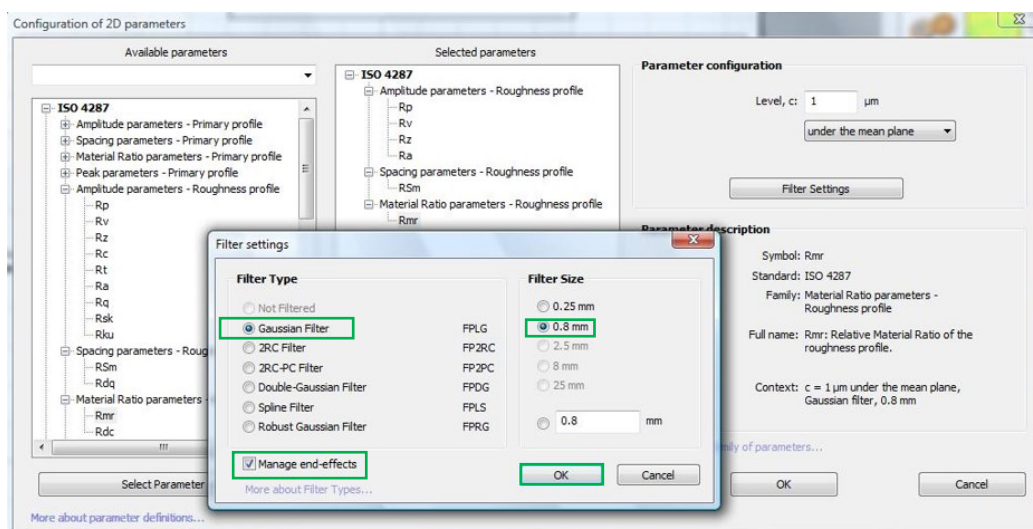
Obr. 48 Tabulka s údaji o naskanovaném povrchu

Toho docílíme tak, že klikneme na tabulku pravým tlačítkem myši a v zobrazené tabulce vybereme záložku „parameter list“. Tento příkaz vyvolá dialogové okno obsahující nastavení veškerých parametrů.



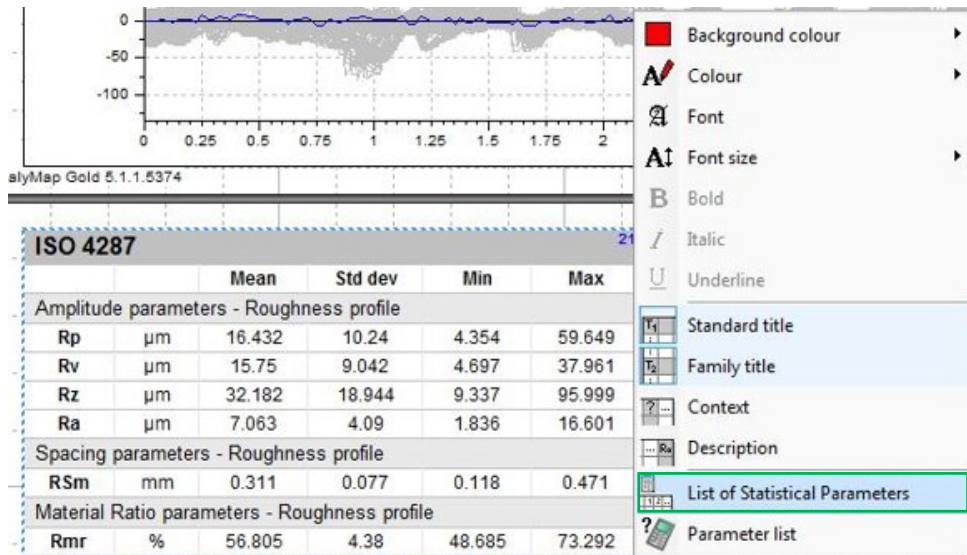
Obr. 49 Vyvolání editace tabulky

V tomto prostředí můžeme libovolně určit, které parametry chceme aby se v tabulce zobrazovaly a které nikoliv. Pro nás nepotřebné parametry odmažeme kliknutím na příslušný řádek a následným stisknutím klávesy „delete“ na klávesnici. Pro přidání a zobrazení požadovaného parametru z menu v levém sloupci postačí na příslušný řádek poklepat dvojným stisknutím levého tlačítka myši. V našem případě jsme si ponechali parametry R_p , R_v , R_z , R_a , R_{Sm} a R_{mr} . V nastavení parametrů vybereme možnost „under the mean plane“ a hodnotu nastavíme na $1\ \mu\text{m}$. V nastavení filtrů vybereme „gaussian filter“, velikost filtru zvolíme $0.8\ \text{mm}$ a v levém dolním rohu zaškrtneme „manage end-effects“, čímž zajistíme zobrazení dat i z oblasti začátku a konce scanované plochy.



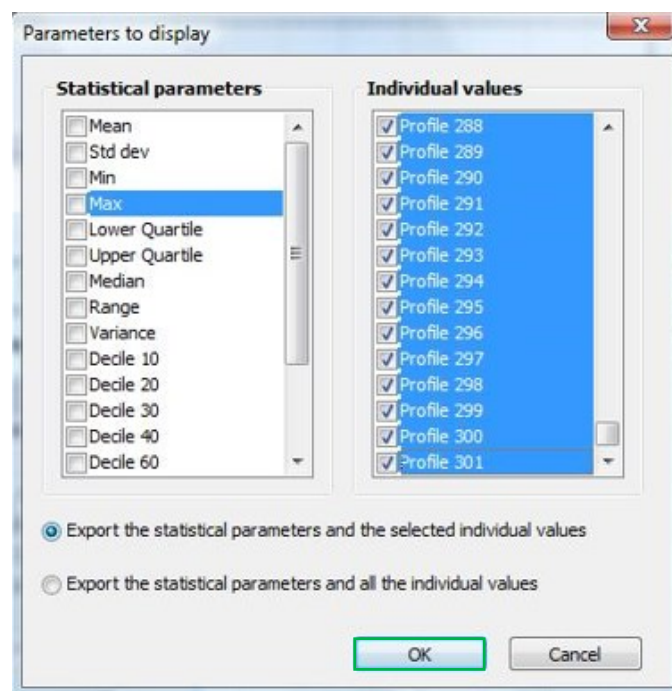
Obr. 50 Konfigurace filtrů a nastavení zobrazení údajů v tabulce

Zobrazí se nám tabulka s námi požadovanými parametry a nyní přikročíme k zobrazení hodnot příslušících k jednotlivým profilům. Pravým tlačítkem myši klikneme na tabulku a zvolíme možnost „list of statistical parameters“.



Obr. 51 Vyvolání listu se statistickými parametry

Ve vyvolaném okně v levém sloupci postupně odškrtneme položky „mean, std dev, min, max“, čímž zajistíme, aby se nám tyto parametry nezobrazovaly. V pravém sloupci označíme pomocí kombinace kláves CTRL + A všechny položky profilů. Ujistíme se, že je vybraných všech 301 profilů a potvrdíme možností „OK“.



Obr. 52 Nastavení zobrazení údajů v listu se statistickými parametry

V zobrazené tabulce lze vidět, že sloupce představují jednotlivé profily a v řádcích jsou zobrazeny námi navolené parametry reprezentující strukturu povrchu. Nyní je potřeba tato data z této tabulky převést tak, abychom je mohli následně použít a zpracovat v softwaru minitab 17. Toho lze docílit pouze jediným způsobem a tím je jejich převedení do některého z textových editorů. Označíme si tedy tabulku levým tlačítkem myši, jakmile je výběr tabulky aktivní pomocí kombinace kláves „CTRL + C“ provedeme zkopírování zobrazených dat. Nyní si otevřeme poznámkový blok a prostřednictvím další klávesové zkratky „CTRL+ V“ nakopírovaná data do bloku vložíme a soubor uložíme. Takto uložená data budeme moci v pozdější fázi, pomocí stejných klávesových zkratk, jednoduše překopírovat do minitabu.

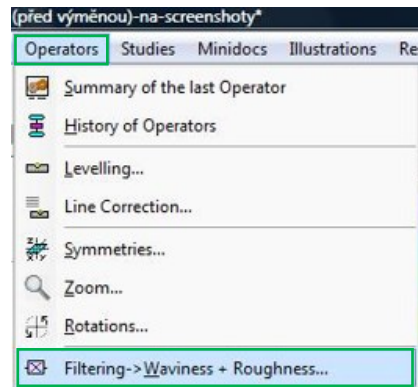
The screenshot shows the Talymap GOLD interface. On the left, a table displays ISO 4287 parameters for 10 profiles. On the right, a list of surface profiles is visible. In the foreground, a Notepad window titled 'Bez názvu - Poznámkový blok' contains the copied data from the table.

ISO 4287	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Amplitude parameters - Roughness profile											
Rp	μm	4.886	4.354	4.38	4.376	4.357	4.463	4.899	5.197	5.796	5.082
Rv	μm	5.091	5.408	6.098	5.513	4.98	5.745	5.915	4.956	5.055	4.826
Rz	μm	9.977	9.762	10.479	9.889	9.337	10.207	10.814	10.153	10.852	9.908
Ra	μm	1.883	2.235	1.836	1.974	1.909	1.906	1.918	1.985	2.063	2.11
Spacing parameters - Roughness profile											
RSm	mm	0.152	0.151	0.17	0.156	0.141	0.143	0.125	0.118	0.135	0.135
Material Ratio parameters - Roughness profile											
Rmr	%	72.164	65.217	73.292	65.905	60.248	65.839	66.831	61.491	63.354	62.733

ISO 4287	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217
7.435	8.677	8.191	7.716	6.835	7.448	8.114	7.353	7.948	8.66	7.936	8.293	8.293
8.293	17.073	18.789	17.552	17.207	18.185	17.911	17.535	17.588	17.633	17.457	18.293	18.293
6.935	5.668	6.799	6.968	6.835	6.579	6.546	6.113	7.158	7.462	6.835	6.935	6.935
0.066	19.523	19.853	19.747	19.253	19.831	20.289	21.391	22.788	23.308	23.814	23.066	23.066
7	13.23	15.595	13.604	15.27	14.794	15.125	14.997	17.451	15.984	17.77	17.451	17.451
.388	37.539	38.02	37.522	37.653	37.156	37.31	37.839	38.884	39.491	37.304	38.884	38.884
2.886	3.009	2.998	3.122	3.391	3.171	3.176	3.251	3.258	3.105	3.442	3.009	3.009
10.53	10.623	10.456	10.629	10.876	11.249	11.773	11.974	11.773	12.229	12.357	12.229	12.229
2	0.217	0.239	0.261	0.238	0.256	0.237	0.24	0.212	0.233	0.198	0.217	0.217
4	0.436	0.386	0.432	0.434	0.471	0.438	0.447	0.355	0.353	0.352	0.436	0.436
63.354	59.627	59.627	64.596	61.491	66.387	61.491	66.46	68.323	66.531	65.839	63.354	63.354
416	53.81	55.28	54.037	52.793	54.658	54.212	52.795	52.227	54.037	54.037	53.81	53.81

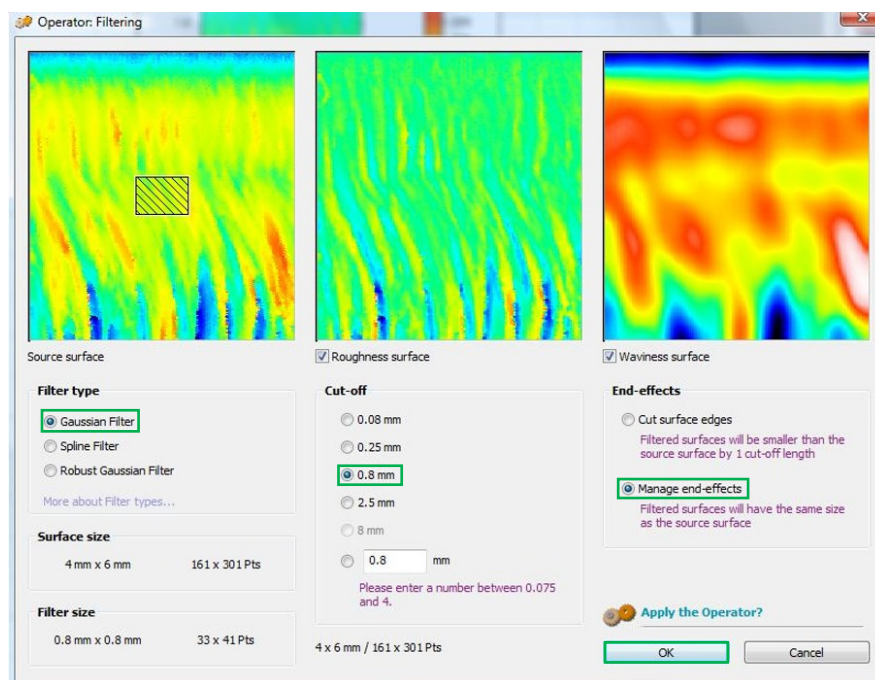
Obr. 53 Kopírování dat ze softwaru Talymap GOLD do textového editoru

Nyní přikročíme k vytvoření snímků vlnitosti a drsnosti povrchu. Do modrého rámečku si označíme scan s odfiltrovaným tvarem povrchu, který jsme si vytvořili na začátku. V záložce „operators“ potvrdíme možnost „filtering -> waviness + roughness“.



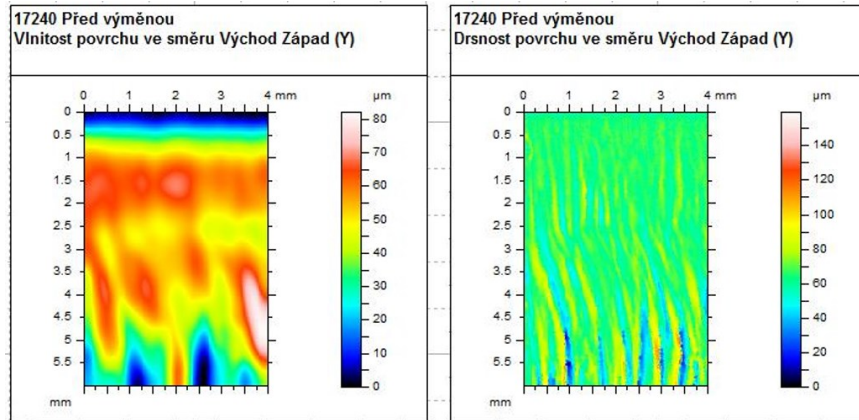
Obr. 54 Tvorba snímků vlnitosti a drsnosti povrchu

Ve vyvolaném dialogovém okně vybereme možnost „gaussian filter“ a zaškrtneme volbu jak drsnosti, tak vlnitosti profilu. Velikost filtru zvolíme opět 0,8 mm a nesmíme rovněž zapomenout na zaškrtnutí položky „manage end-effects“, čímž zajistíme zobrazení dat po celé délce nascanované plochy. Nakonec klikneme na tlačítko „OK“ a potvrdíme výběr.



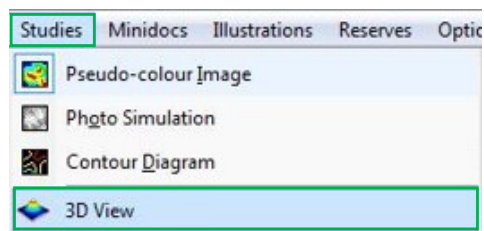
Obr. 55 Nastavení filtru vlnitosti a drsnosti povrchu

Po potvrzení dialogového okna se nám vygenerují dva separátní 2D snímky, kdy jeden z nich představuje vlnitost a druhý drsnost bez ohledu na původní tvar nascanované plochy. Jelikož je struktura povrchu tvořena drsností i vlnitostí, přičemž tyto nerovnosti se navzájem překrývají, je potřeba tyto parametry od sebe oddělit (odfiltrovat). Pomocí textového pole si oba snímky pro lepší přehlednost popíšeme. Vlnitost a drsnost povrchu na zobrazených snímcích je prezentována ve směru východ-západ.



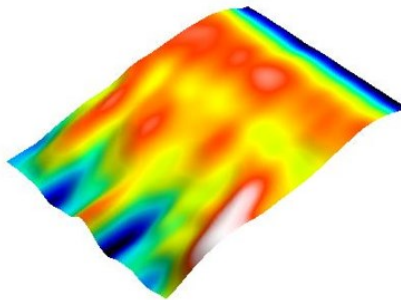
Obr. 56 Vlnitost a drsnost povrchu ve směru východ-západ

Nyní převedeme snímky z 2D do 3D. V první řadě zaklikneme snímek vlnitosti tak, aby rámeček kolem něj zmodral. Poté v horní liště otevřeme kartu „studies“ a zvolíme možnost „3D view“, čímž vytvoříme trojrozměrný snímek vlnitosti. Jelikož nejde oba snímky převést najednou, je nutno tento postup opakovat rovněž také pro drsnost.

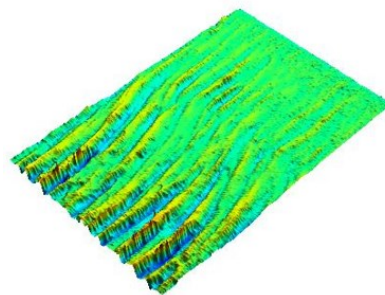


Obr. 57 Převod snímků z 2D do 3D

Výsledkem tohoto kroku jsou vytvořené a oddělené trojrozměrné snímky vlnitosti a drsnosti povrchu. Zobrazené snímky jsou prozatím nevypovídající, bez souřadného systému, měřítka a barevné škály.

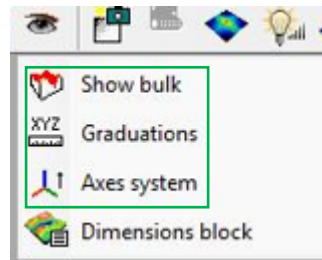


Obr. 58 3D snímek vlnitosti povrchu



Obr. 59 3D snímek drsnosti povrchu

Pro zobrazení těchto údajů klikneme na ikonu oka a zvolíme možnosti „show bulk“, „graduations“ a „axes system“.



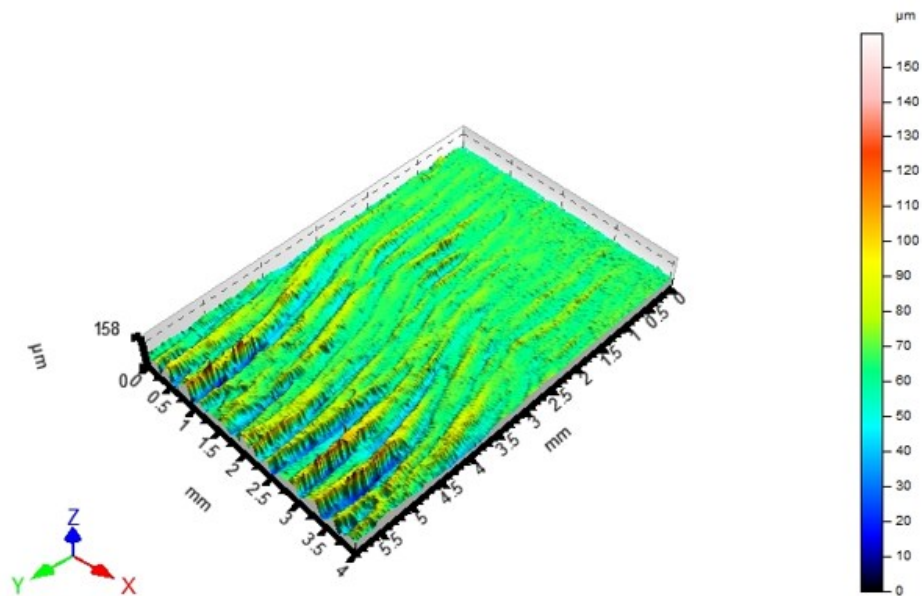
Obr. 60 Zobrazení měřítka, os a souřadného systému

Zobrazení barevné škály aktivujeme kliknutím na ikonu „reserve with a colour scale“.

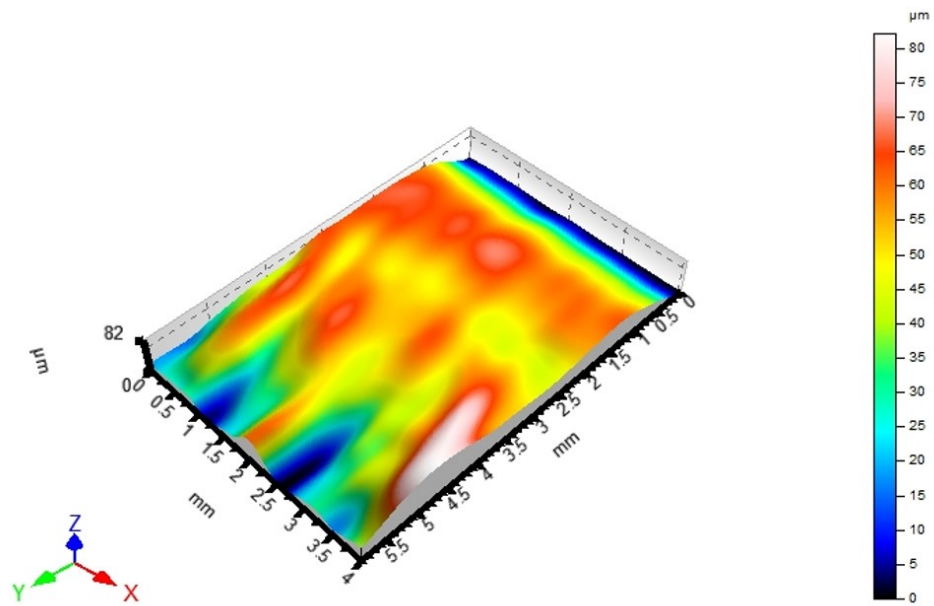


Obr. 61 Zobrazení barevné škály

Výsledkem jsou kompletní, oddělené trojrozměrné snímky drsnosti a vlnitosti včetně popisků jednotlivých os, měřítka, souřadného systému a reprezentující barevné škály.



Obr. 62 Finální podoba upraveného snímku drsnosti povrchu



Obr. 63 Finální podoba upraveného snímku vlnitosti povrchu

8 VYHODNOCENÍ DAT VE STATISTICKÝCH SOFTWARECH

Naměřená a získaná data nyní vyhodnotíme ve statistických softwarech Minitab 17 a QC Expert 3.3.6.5. Všechny znázorněné grafy jsou vytvořeny na základě 301 naměřených hodnot v případě oceli 17 240 a 210 naměřených hodnot u oceli 17 251. Prioritním cílem během vyhodnocení těchto dat bude porovnat vliv ochranného sklíčka čočky laseru na jakost řezu s využitím regresní analýzy.

8.1 Regresní analýza

Regresní analýzou je myšleno souhrnné označení statistických metod, které nám umožňují vyšetřit funkční vztah mezi závislou a nezávislou proměnnou. Tato analýza nám pomůže pochopit, jak se budou měnit hodnoty závislé proměnné v souvislosti s proměnnou nezávislou. Cílem regresní analýzy je najít a stanovit nejvhodnější regresní model, což znamená nalézt optimální matematickou rovnici, která bude co nejspíšeji popisovat zkoumanou závislost.

8.2 Kvadratická regrese v softwaru minitab 17

V prvé řadě je nutno do softwaru minitab 17 překopírovat naměřená data. V poznámkovém bloku je data potřeba upravit tak, aby bylo možno je použít k dalšímu statistickému vyhodnocení v minitabu. Data v poznámkovém bloku tedy přehledně seřadíme, vymažeme nepřehledné mezery a znaky. Rovněž je také potřeba všechny desetinné tečky nahradit za desetinné čárky. Tímto způsobem je potřeba upravit všechny vytvořené textové soubory pro oceli 17 240 a 17 251 před a po výměně.

*17240-pred-vymenou_pro_transfer.txt - Poznámkový blok

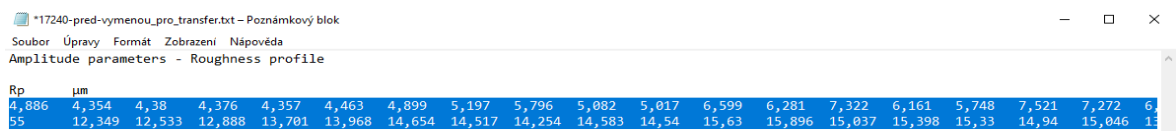
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda

Amplitude parameters - Roughness profile

Rp	μm																			
4,886	4,354	4,38	4,376	4,357	4,463	4,899	5,197	5,796	5,082	5,017	6,599	6,281	7,322	6,161	5,748	7,521	7,272	6,		
55	12,349	12,533	12,888	13,701	13,968	14,654	14,517	14,254	14,583	14,54	15,63	15,896	15,037	15,398	15,33	14,94	15,046	1,		
Rv	μm																			
5,091	5,408	6,098	5,513	4,98	5,745	5,915	4,956	5,055	4,826	4,723	5,774	6,114	5,63	5,558	7,225	6,904	6,215	5,		
11,045	11,342	11,769	11,297	11,396	11,184	11,469	11,57	12,549	12,863	12,964	13,404	13,711	15,139	15,909	15,393	17,664	16,648	17		
Rz	μm																			
9,977	9,762	10,479	9,889	9,337	10,207	10,814	10,153	10,852	9,908	9,74	12,373	12,396	12,952	11,719	12,973	14,425	13,487	11		
5	22,244	22,72	22,174	21,319	21,154	21,483	21,878	21,849	21,97	22,398	22,379	23,394	23,875	24,658	24,998	25,364	25,838	25		
1,22	75,006																			
Ra	μm																			
1,883	2,235	1,836	1,974	1,909	1,906	1,918	1,985	2,063	2,11	1,992	2,383	2,267	2,399	2,388	2,422	2,591	2,78	2,		
7,26	7,094	7,406	7,352	7,737	7,221	7,366	7,522	7,056	7,056	7,131	7,331	6,995	6,916	7,183	7,306	7,033	6,943	6,		
Spacing parameters - Roughness profile																				
0,152	0,151	0,17	0,156	0,141	0,143	0,125	0,118	0,135	0,135	0,153	0,156	0,16	0,14	0,151	0,131	0,192	0,18	0,		
8	0,378	0,36	0,394	0,394	0,396	0,4	0,399	0,358	0,331	0,325	0,299	0,298	0,377	0,372	0,38	0,396	0,383	0,		
Material Ratio parameters - Roughness profile																				
72,164	65,217	73,292	65,905	60,248	65,839	66,831	61,491	63,354	62,733	66,46	66,692	66,46	65,057	60,87	62,026	62,733	61,491	64		
7	58,078	57,362	58,385	57,764	54,658	57,764	55,28	56,522	57,764	59,006	60,248	57,143	57,143	52,795	54,037	55,901	53,416	52		
,553	52,862	50,932	53,416																	

Obr. 64 Upravená data připravená pro použití v softwaru minitab 17

Takto upravená data nyní můžeme překopírovat do minitabu. Jednotlivé parametry se do minitabu převáděly postupně tak, aby nedošlo k jejich záměně. Levým tlačítkem myši si označíme celý řádek s daty jednoho parametru a zkopírujeme jej pomocí klávesové zkratky CTRL + C.



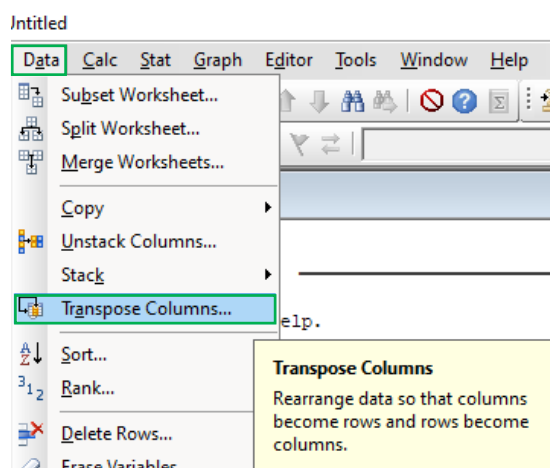
Obr. 65 Označení dat v poznámkovém bloku

Otevřeme si software minitab 17, uložíme si jej pod námi zvoleným názvem a zkopírovaná data vložíme do worksheetu.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
1	4,886	4,354	4,38	4,376	4,357	4,463	4,899	5,197	5,796	5,082	5,017	6,599	6,281	7,322	6,161	5,748	
2																	
3																	

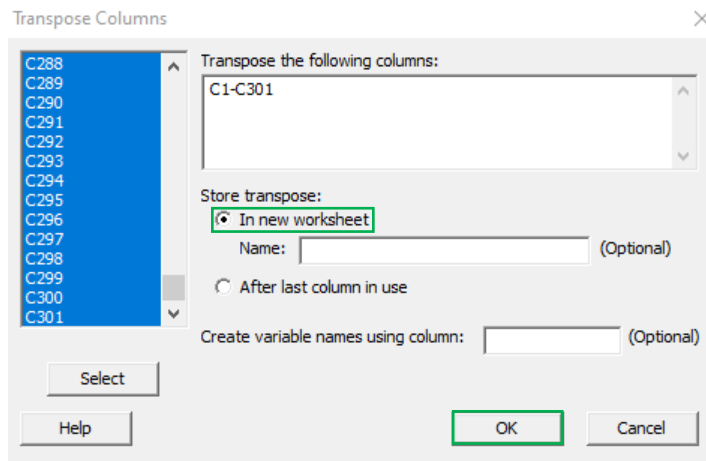
Obr. 66 Vložení dat do nového worksheetu

Zkopírovaná data nyní potřebujeme přetransformovat tak, aby se nám zobrazovala místo řádku ve sloupci. Přejdeme tedy v minitabu do záložky „data“, kde zvolíme možnost „Transpose Columns“.



Obr. 67 Transformace řádků na sloupce

Ve vyvolaném dialogovém okně nyní v levém sloupci označíme všechny řádky od C1 až po C 301 a volbu potvrdíme tlačítkem „select“. Následně zaškrtneme volbu „in new worksheet“ a kliknutím na tlačítko „OK“ potvrdíme transformaci dat do sloupce.



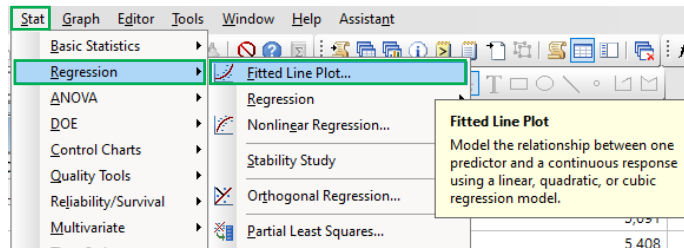
Obr. 68 Označení řádků pro transformaci

Po potvrzení dialogového okna se otevře nový worksheet s daty přetransformovanými do sloupce. Takto vložíme do minitabu všechna data z poznámkového bloku pro všechny parametry a jednotlivé sloupce si popíšeme pro lepší přehlednost. Pro vytvoření kvadratické regrese budeme rovněž také potřebovat vytvořit sloupec, který nám bude prezentovat polohu řezu. Do volného sloupce tedy zapíšeme hodnoty ve tvaru 0,00; 0,025; 0,05 a poté je označíme myší. V pravém dolním rohu uchopíme ikonu křížku a táhneme směrem dolů až na řádek číslo 301. Tím se nám vytvoří posloupná řada, přičemž krok mezi jednotlivými hodnotami je 0,025 mm. Stejný postup opakujeme pro druhý sloupec, zde ovšem protáhneme hodnoty pouze do řádku 210.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Rp_17240_pred_vymenou(um)	Rp_17240_po_vymene(um)	Poloha řezu (mm)	Rv_17240_pred_vymenou(um)	Rv_17240_po_vymene(um)	Poloha řezu_210 (mm)	Rz_17240_pred_vymenou(um)
1	4,886	5,078	0,000	5,091	6,250	0,000	9,977
2	4,354	6,457	0,025	5,408	8,148	0,025	9,762
3	4,380	6,156	0,050	6,098	6,290	0,050	10,479
4	4,376	5,363	0,075	5,513	6,199	0,075	9,889
5	4,357	5,469	0,100	4,980	6,768	0,100	9,337
6	4,463	6,572	0,125	5,745	7,502	0,125	10,207
7	4,899	5,944	0,150	5,915	7,585	0,150	10,814
8	5,197	5,745	0,175	4,956	8,421	0,175	10,153
9	5,796	4,895	0,200	5,055	7,294	0,200	10,852
10	5,082	6,166	0,225	4,826	6,929	0,225	9,908
11	5,017	5,941	0,250	4,723	8,605	0,250	9,740
12	6,599	7,371	0,275	5,774	6,721	0,275	12,373
13	6,281	6,211	0,300	6,114	5,178	0,300	12,396
14	7,322	5,340	0,325	5,630	6,237	0,325	12,952
15	6,161	5,385	0,350	5,558	6,961	0,350	11,719

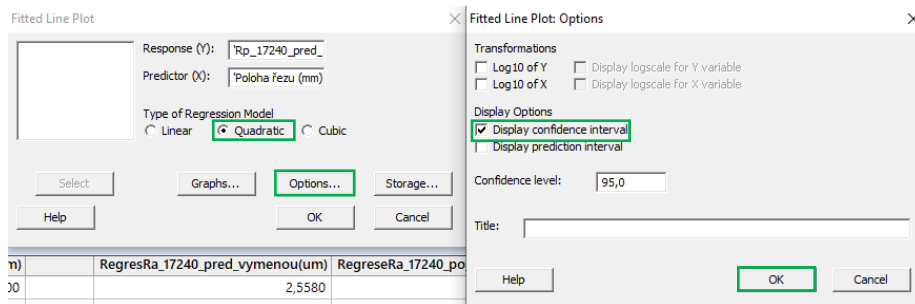
Obr. 69 Transformovaná data do sloupců

Jakmile máme takto nachystaná a popsaná data, můžeme přikročit k vytvoření grafu kvadratické regrese. V záložce panelů v horní liště přejdeme na záložku „stat“, dále vybereme položku „regression“ a zvolíme možnost „fitted line plot“, čímž vyvoláme dialogové okno s nastavením jednotlivých parametrů.



Obr. 70 Regresní funkce v softwaru minitab

V nastavení funkce „fitted line plot“ zvolíme jako nezávislou proměnnou polohu řezu a jako závislou proměnnou vybereme jeden ze zvolených parametrů (Rp, Rv, Rz, Ra). Zaškrtneme typ regresního modelu „quadratic“ a v záložce „options“ vybereme možnost zobrazení konfidenčního intervalu. Hodnotu konfidenční úrovně zvolíme $1 - \alpha = 0,95$. Všechna okna nyní potvrdíme kliknutím na tlačítko „OK“.



Obr. 71 Nastavení parametrů regrese

Výsledkem je lineární regresní model s konfidenční úrovní $1 - \alpha = 0,95$. Tento model je lineární v parametrech, avšak popisuje nelineární závislost mezi jednotlivými proměnnými. Z grafu regrese na obrázku 72 je vidět, že funkce má tvar paraboly a hodnota směrodatné odchylky reziduí je $3,92 \mu\text{m}$. Hodnota regresního rabatu je $85,5 \%$. Regresní rabat nám v procentech vyjadřuje jak moc použitá funkce charakterizuje vyhodnocovaná data.

Rovnice kvadratické regrese, která vyjadřuje závislost parametru Rp na šířce řezu s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ je:

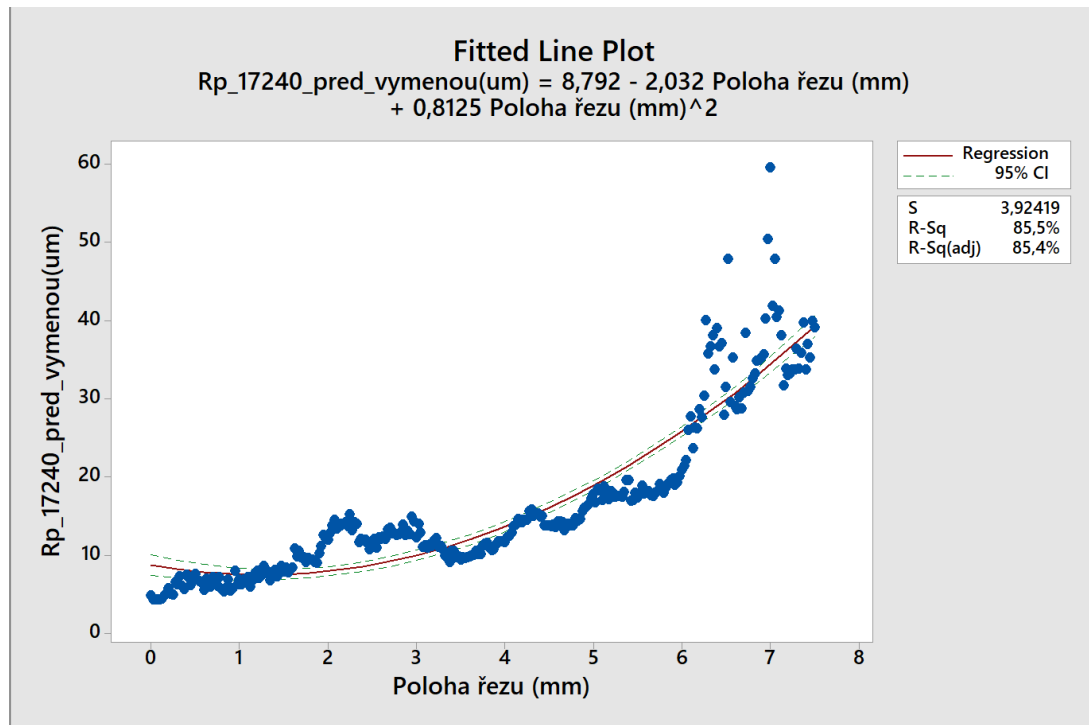
$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 \quad (1)$$

$$y = 8,792 - 2,032 \cdot (\text{šířka řezu}) + 0,8125 \cdot (\text{šířka řezu})^2 \quad (2)$$

Kde: b_0, b_1, b_2 jsou odhady regresních koeficientů

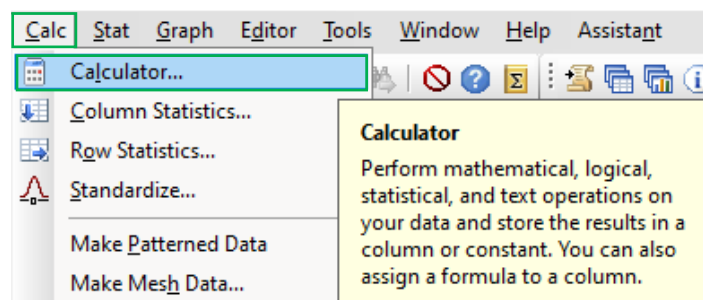
x nezávislá proměnná – poloha řezu [mm]

y závislá proměnná – parametr Rp [μm]



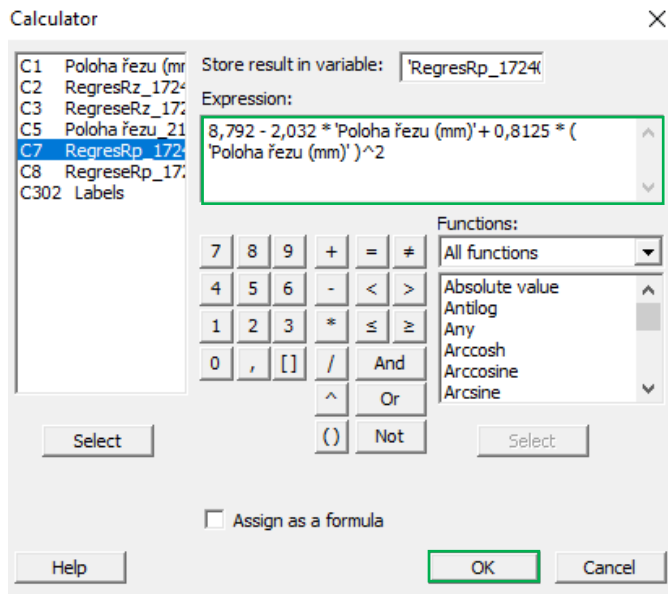
Obr. 72 Kvadratická regrese

V tuto chvíli můžeme přikročit k výpočtu regresních hodnot. Do prázdného worksheetu si přepokopírujeme sloupec „poloha řezu“ a rovněž si popíšeme dva prázdné sloupečky, do kterých se posléze propíší vypočítané regresní hodnoty. V minitabu si otevřeme kalkulačku kliknutím na záložku „calc“ a následně vybereme „calculator“.



Obr. 73 Vyvolání kalkulátoru

Ve vyvolaném okně kalkulátoru vybereme do okénka „store result in variable“ sloupec, do kterého chceme aby se nám propsaly naše vypočtené hodnoty. V našem případě zvolíme sloupec C7. Do okénka „expression“ přepokopírujeme rovnici funkce kvadratické regrese a upravíme ji do tvaru: $8,792 - 2,032 * 'Poloha řezu (mm)' + 0,8125 * ('Poloha řezu (mm)')^2$. Následně klikneme na tlačítko „OK“ a do námi zvoleného sloupce C7 se nám nahrají vypočítané regresní hodnoty.

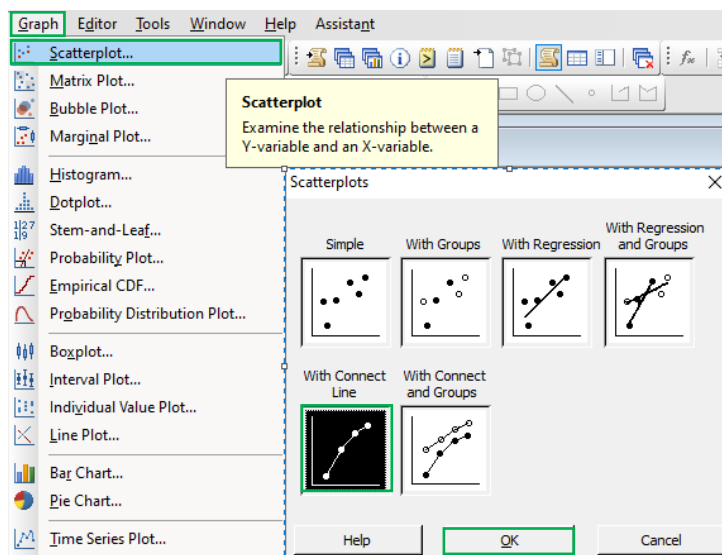


Obr. 74 Rovnice funkce kvadratické regrese

C7	
RegresRp_17240_pred_vymenou(um)	
	8,0421
	8,0101
	7,9791
	7,9491
	7,9202
	7,8922
	7,8653
	7,8394
	7,8145
	7,7906
	7,7677
	7,7459
	7,7250

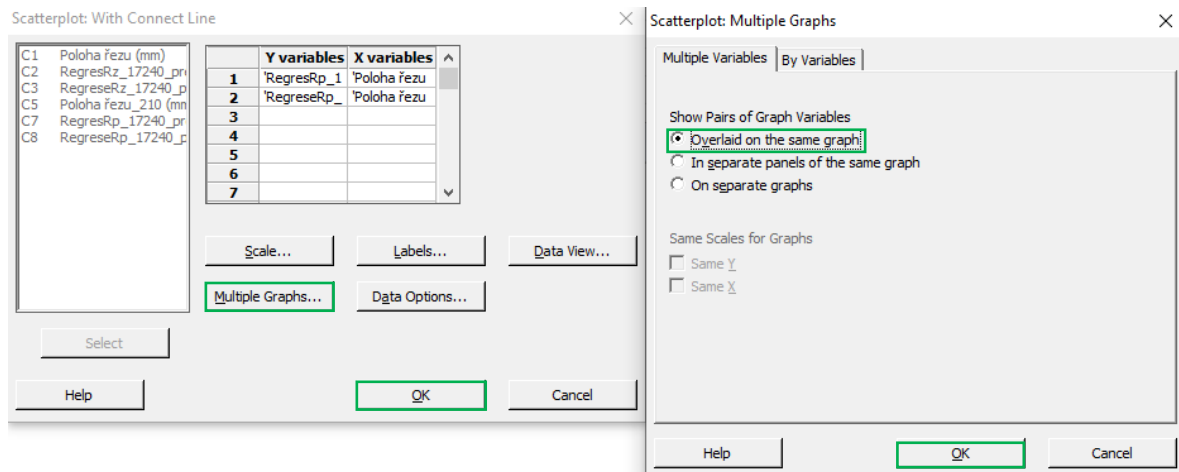
Obr. 75 Regresní hodnoty

Stejný postup budeme opakovat rovněž také pro regresi parametru Rp po výměně ochranného sklíčka. Takto spočítané regresní hodnoty můžeme nyní vyobrazit v jednom grafu a následně je mezi sebou porovnat. V záložce „graph“ vybereme možnost „scatterplot“ a zvolíme možnost „with connect line“.



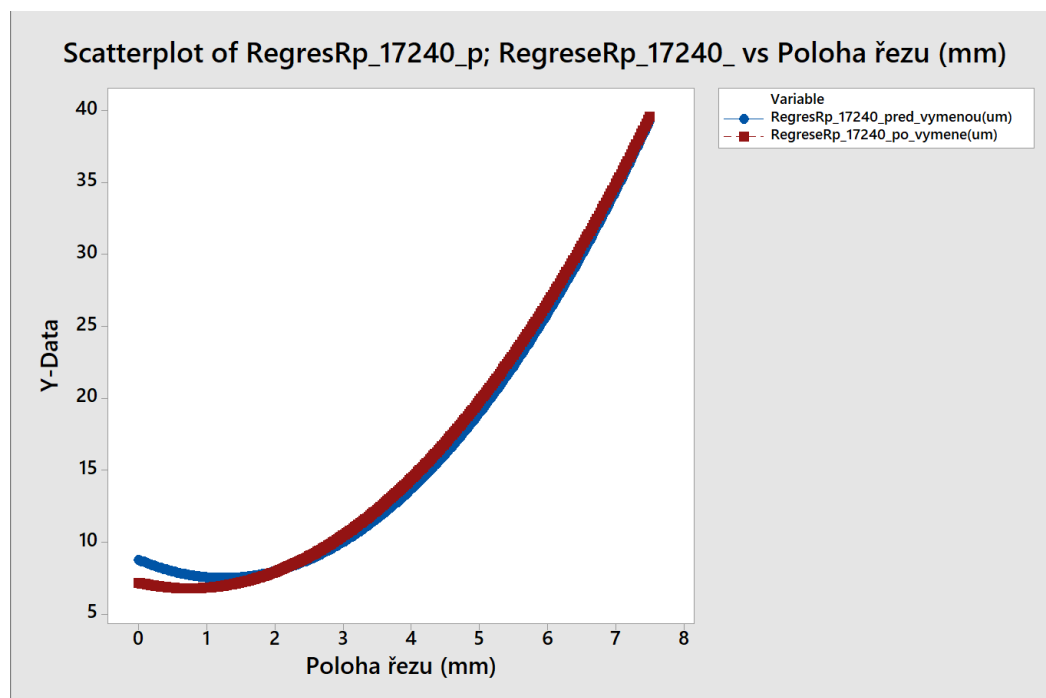
Obr. 76 Graf rozptylu jednotlivých regresi

V následujícím dialogovém okně vybereme do sloupce „Y variables“ buňky se spočtenými regresními hodnotami a do sloupce „X variables“ vybereme polohu řezu. V kolonce „multiple graphs“ zaškrtneme „overlaid on the same graph“, čímž zajistíme, že se nám oba grafy zobrazí v jednom okně a navzájem se překryjí. Nakonec klikneme na tlačítko „OK“.



Obr. 77 Nastavení parametrů rozptylového grafu

Výsledkem je rozptylový graf spočtených hodnot parametru Rp před a po výměně ochranného sklíčka čočky laseru. Tyto rozptylové grafy byly vytvořeny pro parametry Rp, Rv, Rz, Ra a to jak pro ocel 17 240, tak rovněž také pro ocel 17 251.

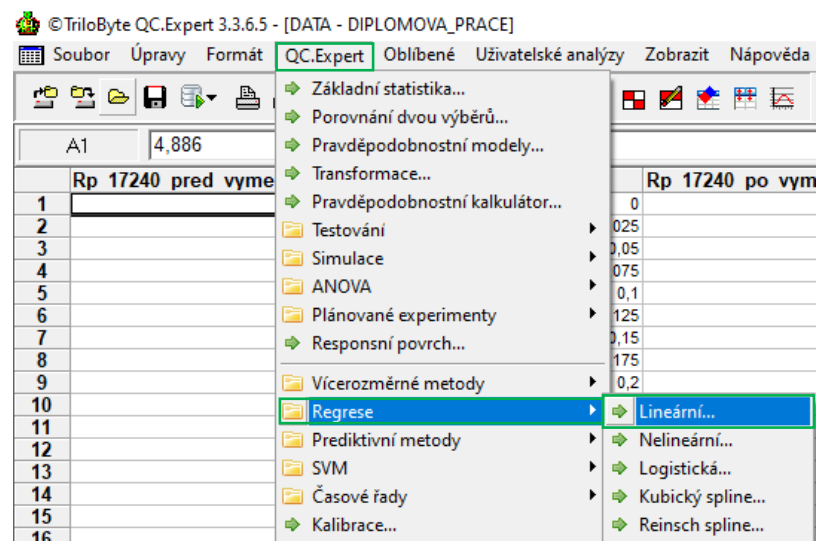


Obr. 78 Rozptylový graf vypočítaných hodnot jednotlivých regresí

8.3 Vyhodnocení v softwaru QC Expert 3.3.6.5

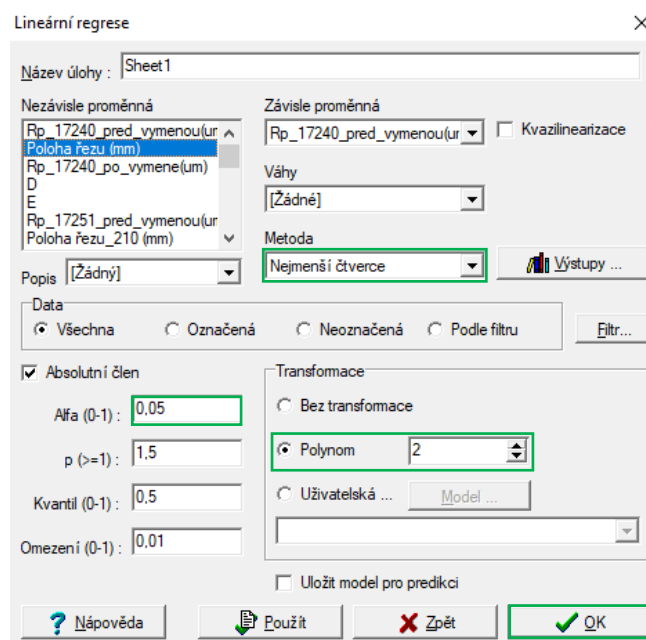
Pro potvrzení správnosti kvadratického regresního modelu použijeme software QC Expert, ve kterém rovněž provedeme regresní analýzu a ověříme si významnost odhadů regresních koeficientů. V první řadě si z minitabu překopírujeme data do QC Expertu. Používat budeme

úplně stejná data jako v případě minitabu. Nyní v záložce „QC.Expert“ vybereme funkci „regrese“ a zvolíme regresi „lineární“.



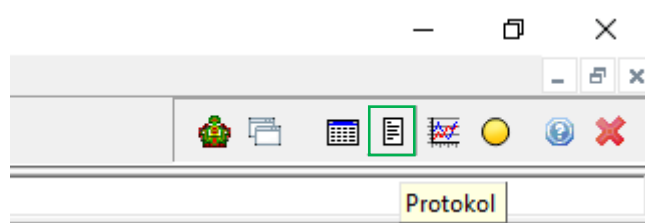
Obr. 79 Regresní funkce v softwaru QC Expert

Otevře se nám dialogové okno, ve kterém můžeme nastavit jednotlivé parametry regrese. Jako nezávislou proměnou zvolíme polohu řezu a závislou proměnou bude představovat parametr Rp pro ocel 17 240 před výměnou ochranného sklíčka. Pro regresní model vybereme metodu nejmenších čtverců a kritérium α nastavíme na 0,05, což znamená, že hodnota konfidenční úrovně je $1 - \alpha = 0,95$. Jelikož ověřujeme, že námi zvolená funkce ve tvaru paraboly je správná, pro transformaci zvolíme polynom druhého stupně a dialogové okno potvrdíme kliknutím na tlačítko „OK“.



Obr. 80 Dialogové okno s parametry regresní funkce

Po předchozím potvrzení dialogového okna software QC Expert vytvoří graf regresní křivky, grafy reziduí a vlivných dat. Pro nás důležitý je ovšem vytvořený protokol, který otevřeme v pravém horním rohu kliknutím na jeho ikonu.



Obr. 81 Vyzvolání protokolu

V zobrazeném protokolu můžeme vidět významnost jednotlivých regresních parametrů a jejich směrodatné odchylky. Jak je z tabulky patrné, všechny tři parametry jsou významné, tudíž má smysl využít tento typ regresního modelu. Vygenerovaný protokol softwarem QC Expert nám také poskytuje náhled na statistické charakteristiky regrese.

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	8,792264073	0,6740750948	Významný
Poloha řezu (mm)	-2,031977618	0,4152094165	Významný
Poloha řezu (mm) ²	0,8125026175	0,05359219712	Významný

Statistické charakteristiky regrese

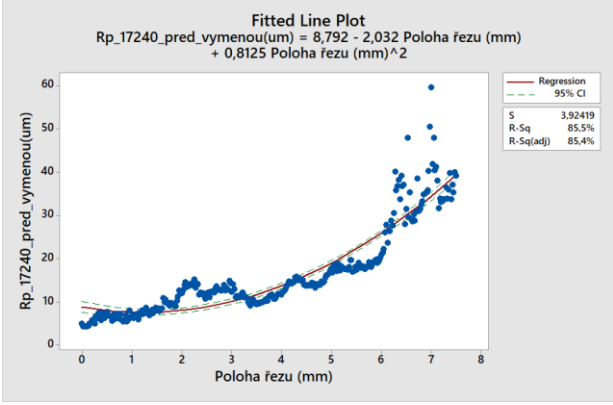
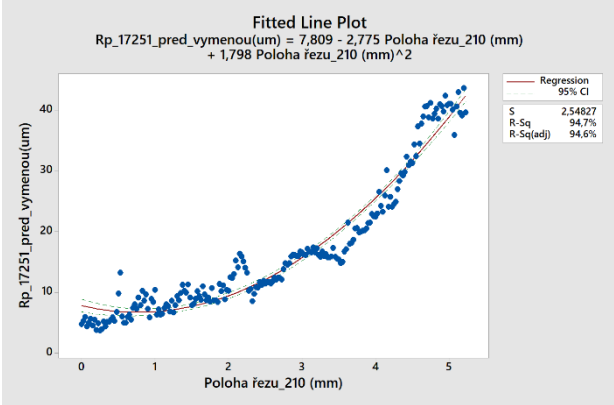
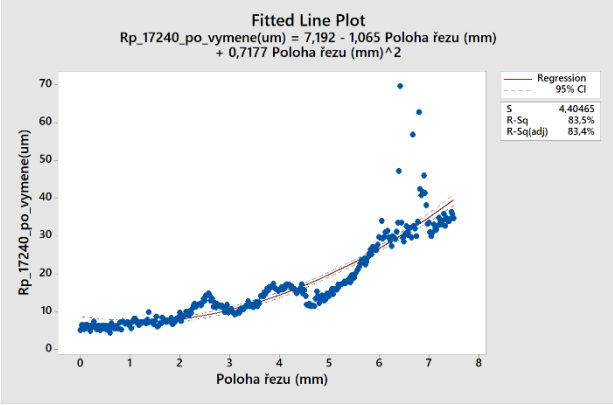
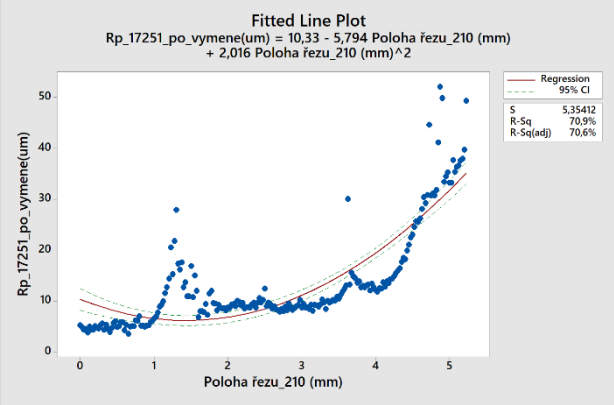
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9244471083
Koeficient determinace R ² :	0,854602456
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,7246020642
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	15,59878769
Akaikeho informační kritérium :	826,0146295

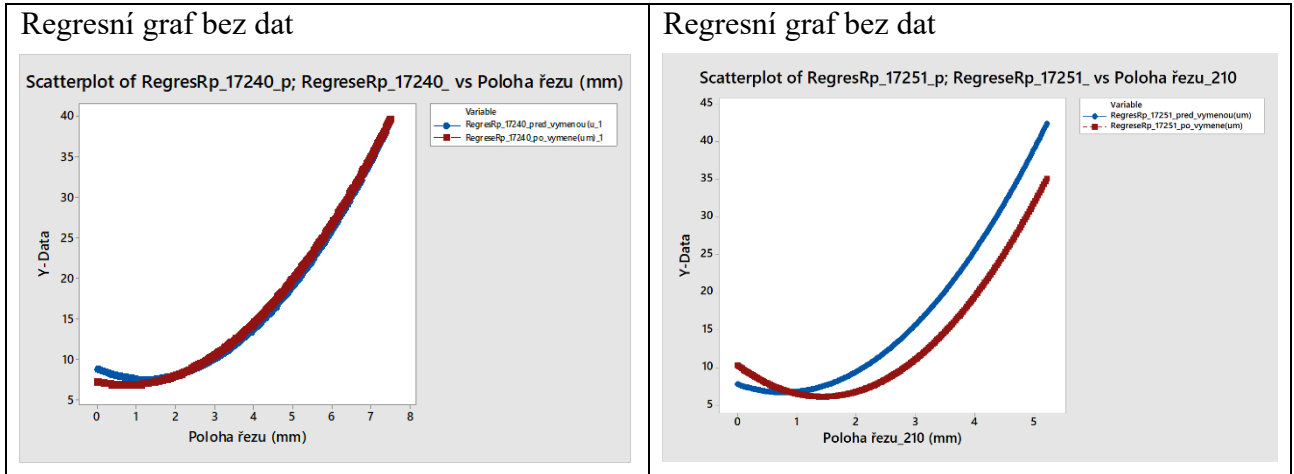
Obr. 82 Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese

8.4 Interpretace dosažených výsledků

Dle výše popsaného postupu byly provedeny regrese pro všechny parametry Rp, Rv, Rz a Ra a to pro ocel 17 240 a 17251 před a po výměně ochranného sklička. Výsledky těchto regresí jsou přiloženy v tabulkách 7,10,13 a 16 a to včetně grafů jednotlivých regresí, výpisů z protokolů s významností jednotlivých regresních parametrů a dodaných regresních statistických charakteristik.

Tab. 7 Kvadratické regrese parametru Rp včetně statistických charakteristik

Ocel 17 240 pro parametr Rp	Ocel 17 251 pro parametr Rp																																																				
<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p>Fitted Line Plot $Rp_{17240_pred_vymenou}(um) = 8,792 - 2,032 Poloha\ řezu\ (mm) + 0,8125 Poloha\ řezu\ (mm)^2$</p> <p>Regression 95% CI</p> <table border="1"> <tr><td>S</td><td>3,92419</td></tr> <tr><td>R-Sq</td><td>85,5%</td></tr> <tr><td>R-Sq(adj)</td><td>85,4%</td></tr> </table>	S	3,92419	R-Sq	85,5%	R-Sq(adj)	85,4%	<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p>Fitted Line Plot $Rp_{17251_pred_vymenou}(um) = 7,809 - 2,775 Poloha\ řezu_{210}\ (mm) + 1,798 Poloha\ řezu_{210}\ (mm)^2$</p> <p>Regression 95% CI</p> <table border="1"> <tr><td>S</td><td>2,54827</td></tr> <tr><td>R-Sq</td><td>94,7%</td></tr> <tr><td>R-Sq(adj)</td><td>94,6%</td></tr> </table>	S	2,54827	R-Sq	94,7%	R-Sq(adj)	94,6%																																								
S	3,92419																																																				
R-Sq	85,5%																																																				
R-Sq(adj)	85,4%																																																				
S	2,54827																																																				
R-Sq	94,7%																																																				
R-Sq(adj)	94,6%																																																				
<p>$y = 8,792 - 2,032x + 0,8125x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>8,792264073</td> <td>0,6740750948</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>-2,031977618</td> <td>0,4152094165</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>0,8125026175</td> <td>0,05359219172</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tr><td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td><td>0,9244471083</td></tr> <tr><td>Koeficient determinace R² :</td><td>0,854602456</td></tr> <tr><td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td><td>0,7246020642</td></tr> <tr><td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td><td>15,59878769</td></tr> <tr><td>Akaikeho informační kritérium :</td><td>826,0146295</td></tr> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	8,792264073	0,6740750948	Významný	Poloha řezu (mm)	-2,031977618	0,4152094165	Významný	Poloha řezu (mm) ²	0,8125026175	0,05359219172	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9244471083	Koeficient determinace R ² :	0,854602456	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,7246020642	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	15,59878769	Akaikeho informační kritérium :	826,0146295	<p>$y = 7,809 - 2,775x + 1,798x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>7,808667641</td> <td>0,5225575328</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-2,774533164</td> <td>0,4620699787</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>1,79802775</td> <td>0,08560087299</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tr><td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td><td>0,973124282</td></tr> <tr><td>Koeficient determinace R² :</td><td>0,9469708682</td></tr> <tr><td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td><td>0,8936322703</td></tr> <tr><td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td><td>6,60003504</td></tr> <tr><td>Akaikeho informační kritérium :</td><td>395,8526669</td></tr> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	7,808667641	0,5225575328	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-2,774533164	0,4620699787	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	1,79802775	0,08560087299	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,973124282	Koeficient determinace R ² :	0,9469708682	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,8936322703	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	6,60003504	Akaikeho informační kritérium :	395,8526669
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	8,792264073	0,6740750948	Významný																																																		
Poloha řezu (mm)	-2,031977618	0,4152094165	Významný																																																		
Poloha řezu (mm) ²	0,8125026175	0,05359219172	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9244471083																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,854602456																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,7246020642																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	15,59878769																																																				
Akaikeho informační kritérium :	826,0146295																																																				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	7,808667641	0,5225575328	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm)	-2,774533164	0,4620699787	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm) ²	1,79802775	0,08560087299	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,973124282																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9469708682																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,8936322703																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	6,60003504																																																				
Akaikeho informační kritérium :	395,8526669																																																				
<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p>Fitted Line Plot $Rp_{17240_po_vymene}(um) = 7,192 - 1,065 Poloha\ řezu\ (mm) + 0,7177 Poloha\ řezu\ (mm)^2$</p> <p>Regression 95% CI</p> <table border="1"> <tr><td>S</td><td>4,40465</td></tr> <tr><td>R-Sq</td><td>83,5%</td></tr> <tr><td>R-Sq(adj)</td><td>83,4%</td></tr> </table>	S	4,40465	R-Sq	83,5%	R-Sq(adj)	83,4%	<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p>Fitted Line Plot $Rp_{17251_po_vymene}(um) = 10,33 - 5,794 Poloha\ řezu_{210}\ (mm) + 2,016 Poloha\ řezu_{210}\ (mm)^2$</p> <p>Regression 95% CI</p> <table border="1"> <tr><td>S</td><td>5,35412</td></tr> <tr><td>R-Sq</td><td>70,9%</td></tr> <tr><td>R-Sq(adj)</td><td>70,6%</td></tr> </table>	S	5,35412	R-Sq	70,9%	R-Sq(adj)	70,6%																																								
S	4,40465																																																				
R-Sq	83,5%																																																				
R-Sq(adj)	83,4%																																																				
S	5,35412																																																				
R-Sq	70,9%																																																				
R-Sq(adj)	70,6%																																																				
<p>$y = 7,192 - 1,065x + 0,7177x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>7,192499866</td> <td>0,7566062279</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>-1,06543294</td> <td>0,4660460427</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>0,7176820862</td> <td>0,06015381731</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tr><td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td><td>0,9137222033</td></tr> <tr><td>Koeficient determinace R² :</td><td>0,8348882648</td></tr> <tr><td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td><td>0,6909683652</td></tr> <tr><td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td><td>19,63137516</td></tr> <tr><td>Akaikeho informační kritérium :</td><td>895,5464857</td></tr> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	7,192499866	0,7566062279	Významný	Poloha řezu (mm)	-1,06543294	0,4660460427	Významný	Poloha řezu (mm) ²	0,7176820862	0,06015381731	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9137222033	Koeficient determinace R ² :	0,8348882648	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,6909683652	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	19,63137516	Akaikeho informační kritérium :	895,5464857	<p>$y = 10,33 - 5,794x + 2,016x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>10,32912989</td> <td>1,097935384</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-5,793747754</td> <td>0,9708461707</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>2,016205931</td> <td>0,1798543155</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tr><td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td><td>0,8419016427</td></tr> <tr><td>Koeficient determinace R² :</td><td>0,708798376</td></tr> <tr><td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td><td>0,4891193182</td></tr> <tr><td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td><td>29,17192653</td></tr> <tr><td>Akaikeho informační kritérium :</td><td>707,6823739</td></tr> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	10,32912989	1,097935384	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-5,793747754	0,9708461707	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	2,016205931	0,1798543155	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,8419016427	Koeficient determinace R ² :	0,708798376	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,4891193182	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	29,17192653	Akaikeho informační kritérium :	707,6823739
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	7,192499866	0,7566062279	Významný																																																		
Poloha řezu (mm)	-1,06543294	0,4660460427	Významný																																																		
Poloha řezu (mm) ²	0,7176820862	0,06015381731	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9137222033																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,8348882648																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,6909683652																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	19,63137516																																																				
Akaikeho informační kritérium :	895,5464857																																																				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	10,32912989	1,097935384	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm)	-5,793747754	0,9708461707	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm) ²	2,016205931	0,1798543155	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,8419016427																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,708798376																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,4891193182																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	29,17192653																																																				
Akaikeho informační kritérium :	707,6823739																																																				



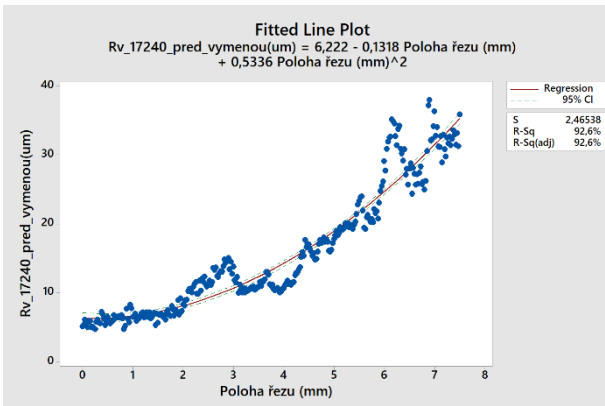
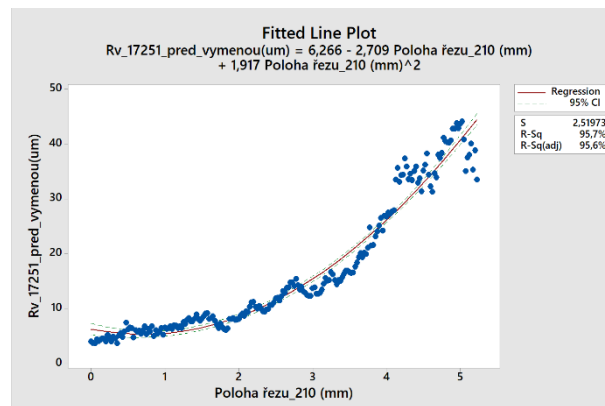
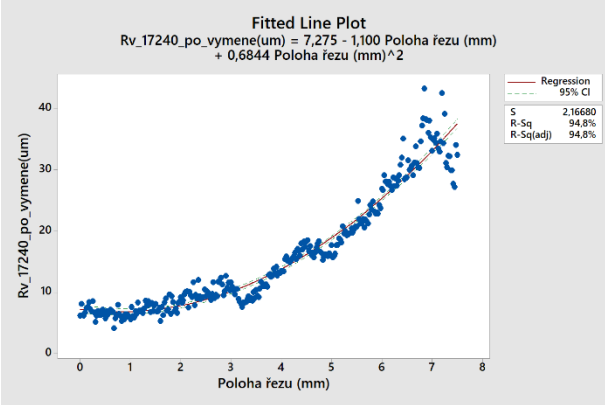
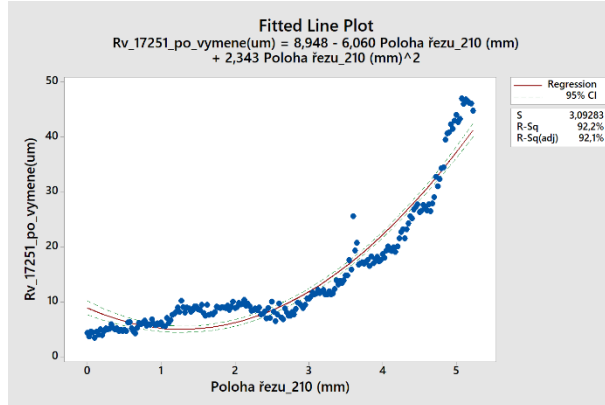
Tab. 8 Hodnota parametru Rp v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklíčka

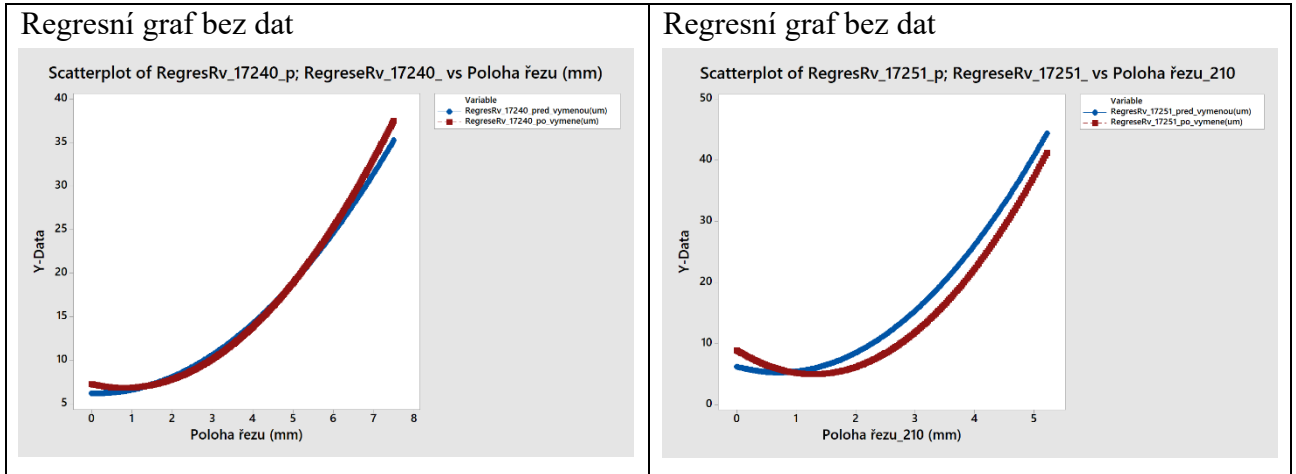
Poloha řezu [mm]	Rp _{17240před} [μm]	Rp _{17240po} [μm]
1	7,6	6,8
2	8,0	7,9
3	10,0	10,5
4	13,7	14,4
5	19,0	19,8
6	25,9	26,6
7	34,4	34,9

Tab. 9 Hodnota parametru Rp v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka

Poloha řezu [mm]	Rp _{17251před} [μm]	Rp _{17251po} [μm]
1	6,8	6,6
2	9,5	6,8
3	15,7	11,1
4	25,5	19,4
5	38,9	31,8

Tab. 10 Kvadratické regrese parametru Rv včetně statistických charakteristik

Ocel 17 240 pro parametr Rv	Ocel 17 251 pro parametr Rv																																																				
<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 6,222 - 0,1318x + 0,5336x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>6,222479158</td> <td>0,4234891255</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>-0,1317884124</td> <td>0,2608562073</td> <td>Nevýznamný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>0,5335790859</td> <td>0,03366941289</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,9624983841</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,9264031395</td> </tr> <tr> <td>Předikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,8556837885</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>6,129637942</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>546,1967909</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	6,222479158	0,4234891255	Významný	Poloha řezu (mm)	-0,1317884124	0,2608562073	Nevýznamný	Poloha řezu (mm) ²	0,5335790859	0,03366941289	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9624983841	Koeficient determinace R ² :	0,9264031395	Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,8556837885	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	6,129637942	Akaikeho informační kritérium :	546,1967909	<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 6,266 - 2,709x + 1,917x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>6,26595293</td> <td>0,5167045443</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-2,709328086</td> <td>0,4568944907</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>1,916797377</td> <td>0,08464208684</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,9780837269</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,9566477768</td> </tr> <tr> <td>Předikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,9118390333</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>6,510260626</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>391,1218464</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	6,26595293	0,5167045443	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-2,709328086	0,4568944907	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	1,916797377	0,08464208684	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9780837269	Koeficient determinace R ² :	0,9566477768	Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,9118390333	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	6,510260626	Akaikeho informační kritérium :	391,1218464
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	6,222479158	0,4234891255	Významný																																																		
Poloha řezu (mm)	-0,1317884124	0,2608562073	Nevýznamný																																																		
Poloha řezu (mm) ²	0,5335790859	0,03366941289	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9624983841																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9264031395																																																				
Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,8556837885																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	6,129637942																																																				
Akaikeho informační kritérium :	546,1967909																																																				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	6,26595293	0,5167045443	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm)	-2,709328086	0,4568944907	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm) ²	1,916797377	0,08464208684	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9780837269																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9566477768																																																				
Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,9118390333																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	6,510260626																																																				
Akaikeho informační kritérium :	391,1218464																																																				
<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 7,275 - 1,100x + 0,6844x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>7,27488414</td> <td>0,3722016338</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>-1,100445617</td> <td>0,2292646983</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>0,684392876</td> <td>0,02959181177</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,97375237</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,948193678</td> </tr> <tr> <td>Předikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,8959490765</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>4,796091469</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>468,4833454</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	7,27488414	0,3722016338	Významný	Poloha řezu (mm)	-1,100445617	0,2292646983	Významný	Poloha řezu (mm) ²	0,684392876	0,02959181177	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,97375237	Koeficient determinace R ² :	0,948193678	Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,8959490765	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	4,796091469	Akaikeho informační kritérium :	468,4833454	<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 8,948 - 6,060x + 2,343x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>8,948085675</td> <td>0,6342259381</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-6,060292685</td> <td>0,5608124413</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>2,343451381</td> <td>0,1038934291</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,9600607146</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,9217165758</td> </tr> <tr> <td>Předikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,8438473551</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>9,802896741</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>477,194139</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	8,948085675	0,6342259381	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-6,060292685	0,5608124413	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	2,343451381	0,1038934291	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9600607146	Koeficient determinace R ² :	0,9217165758	Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,8438473551	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	9,802896741	Akaikeho informační kritérium :	477,194139
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	7,27488414	0,3722016338	Významný																																																		
Poloha řezu (mm)	-1,100445617	0,2292646983	Významný																																																		
Poloha řezu (mm) ²	0,684392876	0,02959181177	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,97375237																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,948193678																																																				
Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,8959490765																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	4,796091469																																																				
Akaikeho informační kritérium :	468,4833454																																																				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	8,948085675	0,6342259381	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm)	-6,060292685	0,5608124413	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm) ²	2,343451381	0,1038934291	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9600607146																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9217165758																																																				
Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,8438473551																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	9,802896741																																																				
Akaikeho informační kritérium :	477,194139																																																				



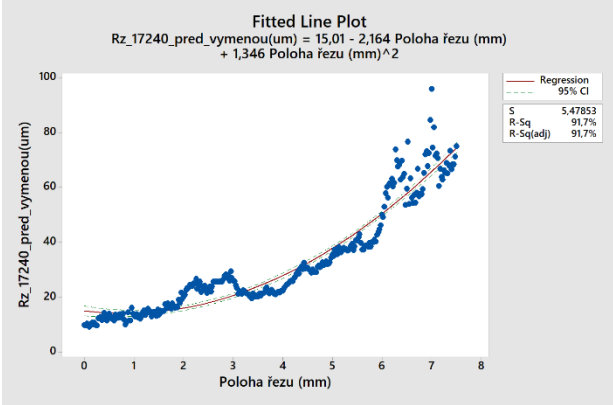
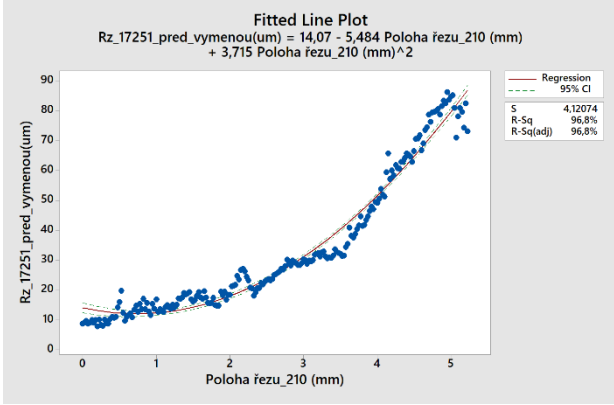
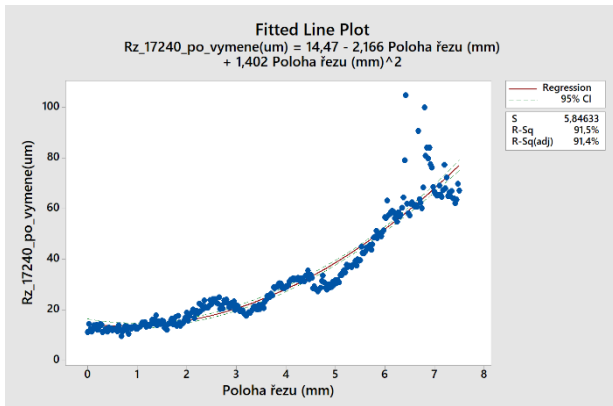
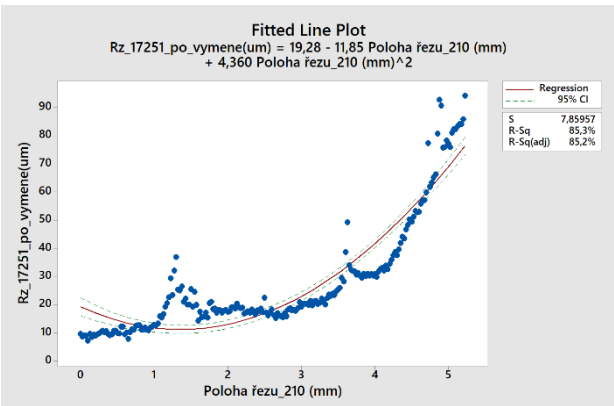
Tab. 11 Hodnota parametru Rv v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklíčka

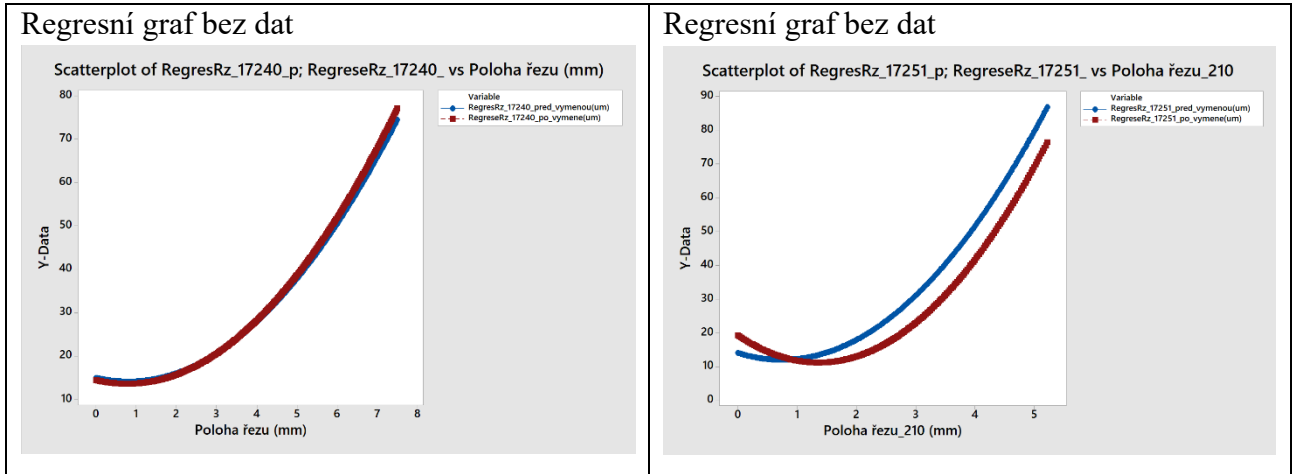
Poloha řezu [mm]	Rv _{17240před} [μm]	Rv _{17240po} [μm]
1	6,6	6,9
2	8,1	7,8
3	10,6	10,1
4	14,2	13,8
5	18,9	18,9
6	24,6	25,3
7	31,5	33,1

Tab. 12 Hodnota parametru Rv v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka

Poloha řezu [mm]	Rv _{17251před} [μm]	Rv _{17251po} [μm]
1	5,5	5,2
2	8,5	6,2
3	15,4	11,9
4	26,1	22,2
5	40,7	37,2

Tab. 13 Kvadratické regrese parametru Rz včetně statistických charakteristik

Ocel 17 240 pro parametr Rz	Ocel 17 251 pro parametr Rz																																
<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 15,01 - 2,164x + 1,346x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>15,01475108</td> <td>0,9410719988</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>-2,163766209</td> <td>0,5796712541</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>1,346081852</td> <td>0,07481972921</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <p>Vícenásobný korelační koeficient R : 0,9577041818 Koeficient determinace R² : 0,9171972998 Predikovaný korelační koeficient Rp : 0,8379547017 Střední kvadratická chyba predikce MEP : 30,36063346 Akaikeho informační kritérium : 1026,888863</p>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	15,01475108	0,9410719988	Významný	Poloha řezu (mm)	-2,163766209	0,5796712541	Významný	Poloha řezu (mm) ²	1,346081852	0,07481972921	Významný	<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 14,07 - 5,484x + 3,715x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>14,07459943</td> <td>0,845013058</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-5,483895378</td> <td>0,7472003391</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>3,714835131</td> <td>0,138422759</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <p>Vícenásobný korelační koeficient R : 0,9837872071 Koeficient determinace R² : 0,9678372689 Predikovaný korelační koeficient Rp : 0,9343753605 Střední kvadratická chyba predikce MEP : 17,36568665 Akaikeho informační kritérium : 597,7118035</p>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	14,07459943	0,845013058	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-5,483895378	0,7472003391	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	3,714835131	0,138422759	Významný
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																														
Abs	15,01475108	0,9410719988	Významný																														
Poloha řezu (mm)	-2,163766209	0,5796712541	Významný																														
Poloha řezu (mm) ²	1,346081852	0,07481972921	Významný																														
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																														
Abs	14,07459943	0,845013058	Významný																														
Poloha řezu_210 (mm)	-5,483895378	0,7472003391	Významný																														
Poloha řezu_210 (mm) ²	3,714835131	0,138422759	Významný																														
<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 14,47 - 2,166x + 1,402x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>14,46733529</td> <td>1,004251263</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>-2,16584865</td> <td>0,618587727</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>1,402072115</td> <td>0,07984278314</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <p>Vícenásobný korelační koeficient R : 0,9565260048 Koeficient determinace R² : 0,9149419979 Predikovaný korelační koeficient Rp : 0,833082419 Střední kvadratická chyba predikce MEP : 34,66837977 Akaikeho informační kritérium : 1066,005547</p>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	14,46733529	1,004251263	Významný	Poloha řezu (mm)	-2,16584865	0,618587727	Významný	Poloha řezu (mm) ²	1,402072115	0,07984278314	Významný	<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 19,28 - 11,85x + 4,360x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>19,2772174</td> <td>1,611712287</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-11,85404626</td> <td>1,425151902</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>4,359665564</td> <td>0,2640168213</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <p>Vícenásobný korelační koeficient R : 0,9237769263 Koeficient determinace R² : 0,8533638096 Predikovaný korelační koeficient Rp : 0,7196394923 Střední kvadratická chyba predikce MEP : 62,98665266 Akaikeho informační kritérium : 868,9059462</p>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	19,2772174	1,611712287	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-11,85404626	1,425151902	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	4,359665564	0,2640168213	Významný
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																														
Abs	14,46733529	1,004251263	Významný																														
Poloha řezu (mm)	-2,16584865	0,618587727	Významný																														
Poloha řezu (mm) ²	1,402072115	0,07984278314	Významný																														
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																														
Abs	19,2772174	1,611712287	Významný																														
Poloha řezu_210 (mm)	-11,85404626	1,425151902	Významný																														
Poloha řezu_210 (mm) ²	4,359665564	0,2640168213	Významný																														



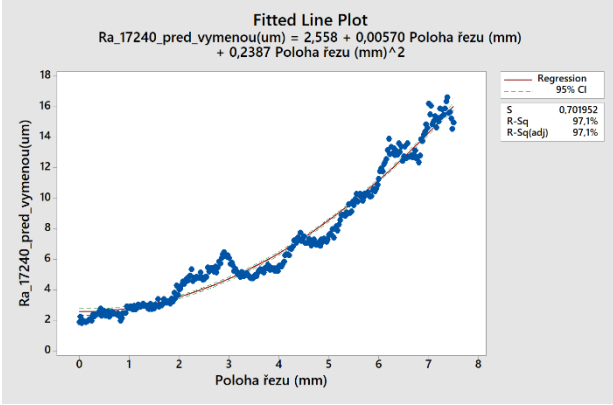
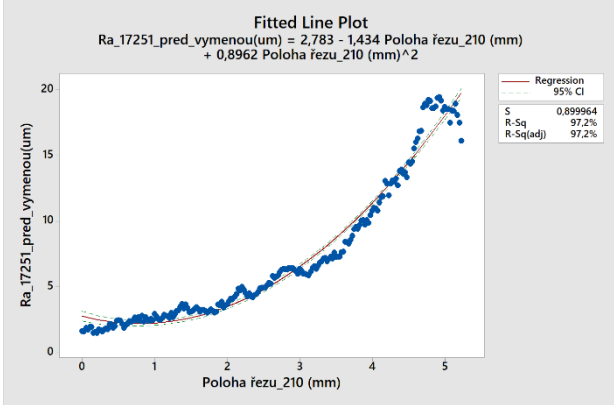
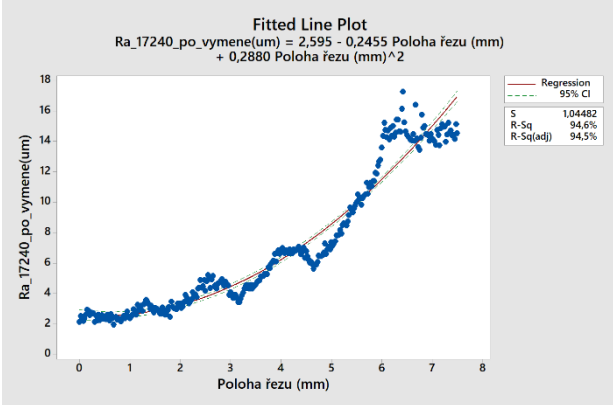
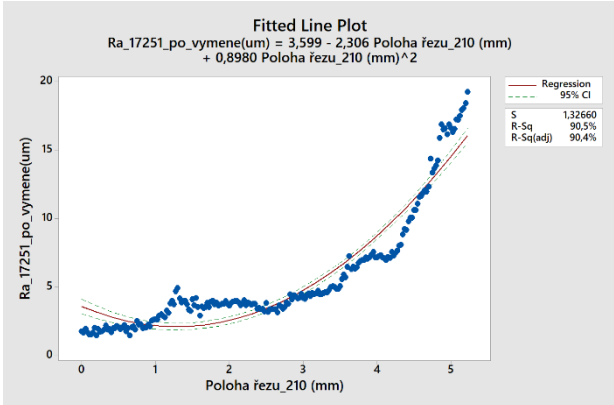
Tab. 14 Hodnota parametru Rz v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklíčka

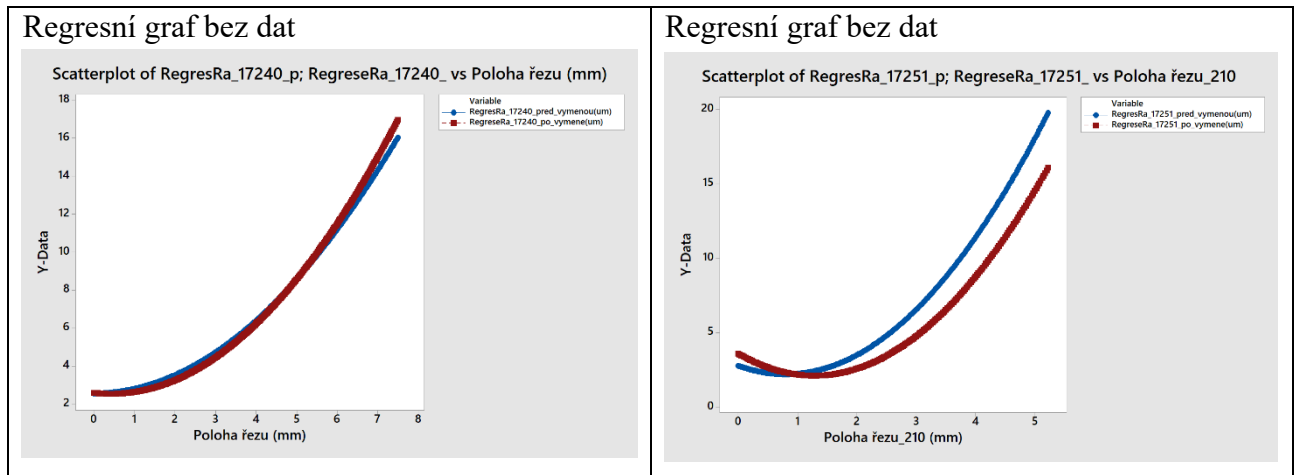
Poloha řezu [mm]	Rz _{17240před} [μm]	Rz _{17240po} [μm]
1	14,2	13,7
2	16,0	15,8
3	20,6	20,6
4	27,9	28,2
5	37,9	38,7
6	50,5	52,0
7	65,8	68,0

Tab. 15 Hodnota parametru Rz v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka

Poloha řezu [mm]	Rz _{17251před} [μm]	Rz _{17251po} [μm]
1	12,3	11,8
2	18,0	13,0
3	31,1	23,0
4	51,6	41,6
5	79,5	69,0

Tab. 16 Kvadratické regrese parametru Ra včetně statistických charakteristik

Ocel 17 240 pro parametr Ra	Ocel 17 251 pro parametr Ra																																																				
<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 2,558 - 0,0057x + 0,2387x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>2,557852013</td> <td>0,1205774769</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>0,005696069976</td> <td>0,07427199763</td> <td>Nevýznamný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>0,2387443483</td> <td>0,00958648667</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,9853116459</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,9708390396</td> </tr> <tr> <td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,9414588502</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>0,4970435715</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>-210,0568763</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	2,557852013	0,1205774769	Významný	Poloha řezu (mm)	0,005696069976	0,07427199763	Nevýznamný	Poloha řezu (mm) ²	0,2387443483	0,00958648667	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9853116459	Koeficient determinace R ² :	0,9708390396	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,9414588502	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,4970435715	Akaikeho informační kritérium :	-210,0568763	<p>Regrese před výměnou s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 2,783 - 1,434x + 0,8962x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>2,783153464</td> <td>0,1845498793</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-1,433869795</td> <td>0,1631876941</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>0,8961738286</td> <td>0,03023137126</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,9858578529</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,9719157062</td> </tr> <tr> <td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,9423892766</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>0,8310094553</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>-41,28976451</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	2,783153464	0,1845498793	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-1,433869795	0,1631876941	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	0,8961738286	0,03023137126	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9858578529	Koeficient determinace R ² :	0,9719157062	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,9423892766	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,8310094553	Akaikeho informační kritérium :	-41,28976451
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	2,557852013	0,1205774769	Významný																																																		
Poloha řezu (mm)	0,005696069976	0,07427199763	Nevýznamný																																																		
Poloha řezu (mm) ²	0,2387443483	0,00958648667	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9853116459																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9708390396																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,9414588502																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,4970435715																																																				
Akaikeho informační kritérium :	-210,0568763																																																				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	2,783153464	0,1845498793	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm)	-1,433869795	0,1631876941	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm) ²	0,8961738286	0,03023137126	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,9858578529																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9719157062																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,9423892766																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,8310094553																																																				
Akaikeho informační kritérium :	-41,28976451																																																				
<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 2,595 - 0,2455x + 0,2880x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>2,595432813</td> <td>0,1794727681</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)</td> <td>-0,2455111565</td> <td>0,110549676</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu (mm)²</td> <td>0,2879723059</td> <td>0,01426894427</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,972395338</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,9455526934</td> </tr> <tr> <td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,8918301105</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>1,104284834</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>29,37717245</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	2,595432813	0,1794727681	Významný	Poloha řezu (mm)	-0,2455111565	0,110549676	Významný	Poloha řezu (mm) ²	0,2879723059	0,01426894427	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,972395338	Koeficient determinace R ² :	0,9455526934	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,8918301105	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	1,104284834	Akaikeho informační kritérium :	29,37717245	<p>Regrese po výměně s naměřenými daty</p>  <p style="text-align: center;">$y = 3,599 - 2,306x + 0,8980x^2$</p> <p>Odhady parametrů</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proměnná</th> <th>Odhad</th> <th>Směr.Odch.</th> <th>Závěr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abs</td> <td>3,599410746</td> <td>0,2720367605</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)</td> <td>-2,305816571</td> <td>0,2405477143</td> <td>Významný</td> </tr> <tr> <td>Poloha řezu_210 (mm)²</td> <td>0,8980315975</td> <td>0,0445627184</td> <td>Významný</td> </tr> </tbody> </table> <p>Statistické charakteristiky regrese</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Vícenásobný korelační koeficient R :</td> <td>0,951199702</td> </tr> <tr> <td>Koeficient determinace R² :</td> <td>0,9047808731</td> </tr> <tr> <td>Predikovaný korelační koeficient Rp :</td> <td>0,8122666295</td> </tr> <tr> <td>Střední kvadratická chyba predikce MEP :</td> <td>1,798892909</td> </tr> <tr> <td>Akaikeho informační kritérium :</td> <td>121,6775563</td> </tr> </tbody> </table>	Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Abs	3,599410746	0,2720367605	Významný	Poloha řezu_210 (mm)	-2,305816571	0,2405477143	Významný	Poloha řezu_210 (mm) ²	0,8980315975	0,0445627184	Významný	Vícenásobný korelační koeficient R :	0,951199702	Koeficient determinace R ² :	0,9047808731	Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,8122666295	Střední kvadratická chyba predikce MEP :	1,798892909	Akaikeho informační kritérium :	121,6775563
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	2,595432813	0,1794727681	Významný																																																		
Poloha řezu (mm)	-0,2455111565	0,110549676	Významný																																																		
Poloha řezu (mm) ²	0,2879723059	0,01426894427	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,972395338																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9455526934																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,8918301105																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	1,104284834																																																				
Akaikeho informační kritérium :	29,37717245																																																				
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr																																																		
Abs	3,599410746	0,2720367605	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm)	-2,305816571	0,2405477143	Významný																																																		
Poloha řezu_210 (mm) ²	0,8980315975	0,0445627184	Významný																																																		
Vícenásobný korelační koeficient R :	0,951199702																																																				
Koeficient determinace R ² :	0,9047808731																																																				
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,8122666295																																																				
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	1,798892909																																																				
Akaikeho informační kritérium :	121,6775563																																																				



Tab. 17 Hodnota parametru Ra v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklička

Poloha řezu [mm]	Ra _{17240před} [μm]	Ra _{17240po} [μm]
1	2,8	2,6
2	3,5	3,3
3	4,7	4,5
4	6,4	6,2
5	8,5	8,6
6	11,1	11,5
7	14,2	15

Tab. 18 Hodnota parametru Ra v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklička

Poloha řezu [mm]	Ra _{17251před} [μm]	Ra _{17251po} [μm]
1	2,2	2,2
2	3,5	2,6
3	6,5	4,8
4	11,4	8,7
5	18,0	14,5

8.5 Nevýznamné regresní parametry

V tabulce 10 a 16 můžeme vidět, že v případě parametru R_v a R_a u oceli 17 240 před výměnou ochranného sklíčka vyšel jeden z regresních parametrů jako statisticky nevýznamný. V případě, že je testovaný odhad regresního parametru vyhodnocen jako statisticky nevýznamný, znamená to, že nijak zásadně nepřispívá ke zpřesnění odhadu závislé proměnné a tudíž je jeho přítomnost v regresním modelu zbytečná. Situace s nevýznamným regresním parametrem se dá ošetřit buď zvýšením hladiny významnosti α , nebo proložením zkoumaných hodnot polynomem vyššího stupně.

8.5.1 Fisher-Snedecorův test významnosti modelu

Pro ověření významnosti regresního modelu u parametrů R_v a R_a u oceli 17 240 před výměnou využijeme Fisher-Snedecorův test, pomocí kterého jsme schopni ověřit, zda je námi navržený model významný či nikoliv.

Tab. 19 Fisher-Snedecorův test významnosti modelu – parametr R_v

Hodnota kritéria F	1875,54
Závěr	Model je významný

Tab. 20 Fisher-Snedecorův test významnosti modelu – parametr R_a

Hodnota kritéria F	4960,57
Závěr	Model je významný

Z tabulek 19 a 20 je patrné, že testy prokázaly významnost jednotlivých modelů a to i přesto, že jeden z odhadů regresních parametrů byl vyhodnocen jako statisticky nevýznamný. Z tohoto důvodu je tedy vhodné námi navržené modely použít.

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce bylo cílem zpracovat rešeršní rozbor na téma laserových technologií. Na úvod byl nastíněn princip spontánní a stimulované emise záření, které jsou nezbytné pro pochopení dané problematiky. Následně bylo zpracováno rozdělení laserů do kategorií a to podle typu aktivního prostředí, časového provozu, způsobu čerpání energie, výkonu a také dle konstrukce. Na závěr teoretické části byla okrajově zmíněna oblast zabývající se strukturou povrchu, metodami měření struktury povrchu a charakteristickými parametry drsnosti.

Druhá část diplomové práce je zaměřena na část praktickou, ve které bylo hlavním cílem porovnat vliv ochranného sklíčka čočky laseru na jakost laserového řezu u ocelí 17 240 a 17 251 o tloušťce 8 mm, přičemž první sada vzorků byla zhotovena se sklíčkem po 120 hodinách provozu a druhá sada byla vyrobena neprodleně po jeho výměně. V této části je popsán postup výroby zkušebních vzorků a to od prvotního náčrtu součásti v CAD softwaru, až po tvorbu řezného plánu pro laser a jeho následné vypálení. Dále byl zpracován podrobný metodologický postup pro měření zkušební vzorků na přístroji Taylor+Hobson. Tento postup rovněž zahrnuje popis zpracování naměřených dat ve statistických softwarech minitab 17 a QC Expert 3.3.6.5.

V závěru praktické části bylo zpracováno vyhodnocení jednotlivých snímků povrchu, které byly získány pomocí bezkontaktního měřicího přístroje. Výsledkem experimentu je nalezení optimální funkce popisující vliv ochranného sklíčka na strukturu povrchu, v závislosti na poloze řezu při konstantních řezných parametrech. Statistickým vyhodnocením byla nalezena kvadratická regrese, která tento vliv popisuje s určitou pravděpodobností. Z regresních grafů je patrné, že v případě oceli 17 240 měla výměna ochranného sklíčka pouze nepatrný vliv na strukturu povrchu a to v případě všech vyhodnocovaných parametrů R_p , R_v , R_a a R_z . Naopak v případě oceli 17 251 je vliv sklíčka již zřetelný, jelikož testované parametry po výměně vykazují nižší hodnoty, přičemž nejpatrnější rozdíl je zřetelný v největší hloubce řezu, kde se dostáváme na samotný limit použitého laseru. Celkové vyšší hodnoty testovaných parametrů a méně kvalitní struktura povrchu u oceli 17 251 je způsobena přítomností křemíku a tudíž rozdílným chemickým složením, které má za následek horší obrobitelnost než v případě oceli 17 240.

Bylo statisticky prokázáno, že výměna ochranného sklíčka po 120 hodinách provozu je neohospodárná a zbytečná. Z tohoto důvodu by tudíž bylo vhodné tento interval výměny

prodloužit. Do úvahy je nutno také vzít fakt, že ve firmě, ve které experiment probíhal se ocel 17 251 v těchto tloušťkách zpracovává pomocí laseru pouze ojediněle. Časová náročnost výměny ochranného sklíčka se pohybuje okolo jedné hodiny v závislosti na zručnosti obsluhy, přičemž odstavení laseru na tuto dobu znamená ztrátu zisku v řádech desítek tisíc korun.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] HECHT, Jeff. Short history of laser development. *Optical Engineering* [online]. 2010, 49(9), 1-23 [cit. 2021-10-31]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3483597>
- [3] Laser: instrument. *Britannica* [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/laser/History>
- [4] New materials and device architectures for organic solid-state lasers. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/278637278_New_materials_and_device_architectures_for_organic_solid-state_lasers
- [5] Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. *Lasery a Optika* [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [6] LASER: Principles of working of a laser. *Physics and radio electronics* [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/principlesofworkingofalaser.html>
- [7] Princip vláknového - FIBER LASERU. *Leonardo technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [8] Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>
- [9] Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>
- [10] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red. *Leonardo technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [11] Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser>

- [12] Neodymium Glass Lasers - Properties and Applications. *AZO Optics* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=498>
- [13] Technologické lasery. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
- [14] Types of Lasers. *Mks Newport* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.newport.com/n/laser-types>
- [15] Lasery pro průmysl. *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>
- [16] GOLYSHEV, A. A., A. G. MALIKOV, A. M. ORISHICH a V. B. SHULYAT'EV. High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO₂ lasers. *Quantum Electronics* [online]. 2014, 44(3), 233-238 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2014v044n03ABEH015320/pdf>
- [17] Princip CO₂ laseru. *Leonardo technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [18] ESPINOZA, Kricia Ruano. HELIUM NEON LASERS. *Department of Chemistry. Willamette University*, 2017, 1-16.
- [19] CA-1200/1201/1202 He-Ne Laser Full / Basic / Extended Version. *ELas: educational Lasers* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.e-las.com/products/laser-basics/ca-12000102-he-ne-laser/>
- [20] PIDRO, Ajla, Alma BISCEVIC, Melisa Ahmedbegovic PJANO, Ivana MRAVICIC a Maja BOHAC. Excimer Lasers in Refractive Surgery. *Acta Inform Med* [online]. 2019, 2019(27), 278-283 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7004285/>
- [21] MROZIEWICZ, Bohdan; BUGAJSKI, Maciej; NAKWASKI, Włodzimierz. *Physics of semiconductor lasers*. Elsevier, 2017.
- [22] 3D Sensing & Imaging with Laser Diodes: Electronics, Automotive & Industrial. *IDTechEx* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: https://www.idtechex.com/zh/webinar/3d-sensing-and-imaging-with-laser-diodes-electronics-automotive-and-industrial/223?fbclid=IwAR3QF3ON3qHwbywL1Kb_rf-YImYK6SK0Z7-zZCBM-2Y6OEipi7iDMzm46_g
- [23] Semiconductor Lasers. *DAEnotes* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.daenotes.com/electronics/microwave-radar/semiconductor-laser>

- [24] Rozdělení laserů. *LASCAM: Laserové a optické technologie pro průmysl a vědu* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [25] What is Pumping and its types?. *Goseeko* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.goseeko.com/blog/what-is-pumping-and-its-types/>
- [26] BACHELARD, Nicolas, Sylvain GIGAN, Xavier NOBLIN a Patrick SEBBAH. Adaptive pumping for spectral control of random lasers. *Nature Physics* [online]. 2014, 10, 426-431 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/nphys2939>
- [27] What is difference between continuous laser and pulse laser?-Karina. *XTLaser* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.xtlaser.com/what-is-difference-between-continuous-laser-and-pulsed-laser/>
- [28] MAHARJAN, Niroj, Wei ZHOU, Yu ZHOU, Yingchun GUAN a Naien WU. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2019, 366, 311-320 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897219302956?via%3Dihub>
- [29] Continuous Wave ("CW") Laser vs a Pulsed Laser. *Laser Safety Industries* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://lasersafetyindustries.com/laser-safety-buyers-guide/continuous-wave-cw-laser-vs-a-pulsed-laser/>
- [30] LUTEY, Adrian H. A., Alessandro ASCARI a Luca ROMOLI. Long-pulse quasi-CW laser cutting of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, 94, 155-162 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0913-x>
- [31] WEBER, Marvin J. *Handbook of Laser Wavelengths* [online]. California: CRC Press, 1999 [cit. 2022-02-17]. ISBN 0-8493-3508-6. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315219639/handbook-laser-wavelengths-marvin-weber>
- [32] Laserové řezání jako bezkontaktní proces oddělování. *TRUMPF* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/
- [33] Fusion cutting. *TRUMPF* [online]. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/laser-cutting/fusion-cutting/
- [34] Laser Cutting with Oxygen. *Industrial Gases* [online]. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: https://www.linde-gas.com/en/processes/cutting_joining_and_heating/cutting/laser_cutting/laser_cutting_with_oxygen/index.html

- [35] Sublimation cutting: High-quality edges for precision cutting. *TRUMPF* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/laser-cutting/sublimation-cutting/
- [36] Something in the Air: Three Things You Should Know About Air-Assist Laser Cutting. *CINCINNATI* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.e-ci.com/three-things-you-should-know-about-air-assist-laser-cutting>
- [37] Basics of Laser Cutting (Knowledge You Must Know). *MACHINEMFG* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.machinemfg.com/laser-cutting-basics/>
- [38] SVENUNGSSON, Josefine, Isabelle CHOQUET a Alexander F.H. KAPLAN. Laser Welding Process – A Review of Keyhole Welding Modelling. *Physics Procedia* [online]. 2015, 78, 182-191 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215015321>
- [39] Laserové svařování. *Laser Therm: Lasery pro průmyslové technologie* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
- [40] AYOOLA, W.A., W.J. SUDER a S.W. WILLIAMS. Parameters controlling weld bead profile in conduction laser welding. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, 249, 522-530 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361730256X>
- [41] TORKAMANY, M.J., F. Malek GHAINI, R. POURSALEHI a A.F.H. KAPLAN. Combination of laser keyhole and conduction welding: Dissimilar laser welding of niobium and Ti-6Al-4V. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2016, 79, 9-15 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816615002468>
- [42] Laser welding. *TRUMPF* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_CN/solutions/anwendungen/laser-welding/
- [43] LIU, Fuyun, Caiwang TAN, Xiangtao GONG, Laijun WU, Bo CHEN, Xiaoguo SONG, Jicai FENG a . A comparative study on microstructure and mechanical properties of HG785D steel joint produced by hybrid laser-MAG welding and laser welding. *Optics & Laser Technology* [online]. 2020, 128 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399219315828>
- [44] How Does Laser Plastic Welding Work?. *LPKF: Laser and Electronics* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: https://www.lpkfusa.com/products/laser_plastic_welding/learn_about_laser_plastic_welding/

- [45] NATH, A. K. Laser Machining and Surface Treatment. *Comprehensive Materials Processing* [online]. 2014, 9, 115-175 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/laser-drilling>
- [46] How does Laser Drilling Work in PCBs?. *SIERRA CIRCUITS* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/how-does-laser-drilling-work-pcbs/>
- [47] LAZOV, Lyubomir, Hristina DENEVA a Pavels NARICA. Laser Marking Methods. *Environment Technology Resources: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* [online]. 2015, 1, 108-115 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281192318_Laser_Marking_Methods
- [48] Laser marking: Foaming. *ACSYS: Lasertechnik* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.acsys.de/en/laser-marking/foaming.html>
- [49] Laser engraving of plastic: Precise and long-lasting. *Mobil-Mark: mobile laser marking* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.mobil-mark.de/en/applications/laser-engraving-of-plastic/>
- [50] Laser surface hardening. *Laser Therm: Lasers for industrial technologies* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/eng/technologies/laser-technologies/laser-hardening>
- [51] ZETTL, Julian, Maximilian KLAR, Stefan RUNG, Cemal ESEN a Ralf HELLMANN. Laser turning with ultrashort laser pulses. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, 68, 1562-1568 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521004382>
- [52] Kalení efektivně a ekologicky pomocí laseru. *LASCAM: Laserové a optické technologie pro průmysl a vědu* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/kaleni-laserem/>
- [53] Měření drsnosti: Profily povrchu a parametry profilu povrchu. *M&B Calibr: ... s námi napříč metrologií* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [54] Měření drsnosti povrchu. *ELUC* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>
- [55] ČSN EN ISO 4287 (014450) Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. *Technor: Technické normy ČSN* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-4287-014450-160147.html>

- [56] Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu>
- [57] Surface Roughness Measurement—Parameters: Profile Method (Linear Roughness) Parameters. In: *Evident* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/ru/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>
- [58] Jak šel čas s LAC. *LAC: Art of heating* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/o-nas/historie-spolecnosti>
- [59] O nás. In: *LAC: Art of heating* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/o-nas>
- [60] Nákladově efektivní řezání: Lynx FL. In: *Newtech* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.newtech.cz/zpracovani-plechu/lvd/cnc-laserove-stroje/lynx-fl>
- [61] Charakteristika nerezových ocelí. *Königfrankstahl* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <http://www.koenigfrankstahl.cz/?menu=234>
- [62] Přehled jakostí korozivzdorných ocelí s chemickým složením. *DALTEK* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://www.daltek.cz/nerez/technicka_podpora_normy/20_prehled_jakosti.html
- [63] 1.4828 je ocel žáruvzdorná, legovaná ušlechtilá ocel, austenitická. *AK 1324 s.r.o.* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.ak1324.cz/jakost-1-4828/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	stupeň Celsia
2D	dvourozměrný prostor
2HF	fluorovodík
3D	trojrozměrný prostor
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
ArF	argon-fluoridový
b _i	odhady regresních parametrů
C	uhlík
c	hladina řezu
CLA	chromatic Lenght Aberration
CO ₂	oxid uhličitý
Cr	chrom
F	fluor
GaN	nitrid galia
H	vodík
He	helium
Ho	holmium
K	kelvin
Krf	krypton-fluoridový
N	dusík
NC	numerical control
Nd	neodym
Ni	nikl
P	parametr vypočítaný ze základního profilu
R	parametr vypočítaný z profilu drsnosti

Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rmr	materiálový podíl drsnosti profilu Rmr
Rp	největší výška výstupku
RSm	střední vzdálenost výstupků
Rv	největší hloubka prohlubně
Rz	největší výška profilu
Sm	střední hodnota vzdálenosti mezi elementy profilu
UTB	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
XeCl	xenon monochlorid
YAG	yttrium aluminium garnet (yttriohlinitý granát)
α	alfa
W	parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Optický rezonátor [4]</i>	13
<i>Obr. 2 Spontánní emise [6]</i>	14
<i>Obr. 3 Stimulovaná emise [6]</i>	14
<i>Obr. 4 Princip vláknového laseru [7]</i>	16
<i>Obr. 5 Konstrukce CO₂ laseru [17]</i>	18
<i>Obr. 6 Helium-neonový laser [19]</i>	19
<i>Obr. 7 Laserová dioda [22]</i>	20
<i>Obr. 8 Schéma polovodičového laseru [23]</i>	21
<i>Obr. 9 Kontinuální provoz [29]</i>	24
<i>Obr. 10 Pulzní provoz [29]</i>	24
<i>Obr. 11 Schéma laserového řezání [32]</i>	27
<i>Obr. 12 Schéma sublimačního řezání laserem [35]</i>	29
<i>Obr. 13 Defekty řezné hrany [37]</i>	30
<i>Obr. 14 Hluboké svařování laserem [39]</i>	31
<i>Obr. 15 Kondukční svařování laserem [39]</i>	32
<i>Obr. 16 Způsoby laserového vrtání [46]</i>	34
<i>Obr. 17 Schéma laserového značení pěněním [49]</i>	37
<i>Obr. 18 Průběh laserového kalení [52]</i>	38
<i>Obr. 19 Největší výška výstupku Rp [57]</i>	41
<i>Obr. 20 Největší hloubka prohlubně Rv [57]</i>	42
<i>Obr. 21 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti Ra [57]</i>	42
<i>Obr. 22 Největší výška profilu Rz [57]</i>	43
<i>Obr. 23 Střední vzdálenost výstupků RSm [57]</i>	43
<i>Obr. 24 Materiálový podíl Rmr [57]</i>	43
<i>Obr. 25 Ochranné sklíčko čočky po 120 hodinách provozu</i>	45
<i>Obr. 26 Nové ochranné sklíčko čočky</i>	45
<i>Obr. 27 Provozovna průmyslových pecí a sušáren v Židlochovicích [59]</i>	46
<i>Obr. 28 LVD LYNX FL-3015 [60]</i>	47
<i>Obr. 29 2D náčrt vzorku</i>	48
<i>Obr. 30 3D model vzorku</i>	48
<i>Obr. 31 Tvorba řezného plánu v softwaru JETCAM Expert</i>	49
<i>Obr. 32 Vypálené vzorky</i>	50
<i>Obr. 33 Technologie 6380 pro ocel 17 240 tloušťky 8 mm</i>	52
<i>Obr. 34 Měření vzorků na přístroji Talysurf CLI 500</i>	53

<i>Obr. 35 Kalibrace přístroje Talysurf CLI 500.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 36 Nastavení odrazivosti v softwaru Talymap GOLD.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37 Nastavení parametrů měření</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 38 Nasnímaný povrch vzorku</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 39 Neupravený scan opatřen textovým polem</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 40 Tvorba textového pole</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 41 Postup odfiltrování povrchu</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 42 Nastavení odfiltrování povrchu</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 43 Odfiltrovaný scan opatřen textovým polem.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 44 Postup tvorby grafu</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 45 Nastavení tvorby grafu</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 46 Graf znázorňující „rozřezání“ povrchu ve směru východ-západ</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 47 Vyvolání tabulky</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 48 Tabulka s údaji o nascanovaném povrchu</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 49 Vyvolání editace tabulky</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 50 Konfigurace filtrů a nastavení zobrazení údajů v tabulce</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 51 Vyvolání listu se statistickými parametry.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 52 Nastavení zobrazení údajů v listu se statistickými parametry.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 53 Kopírování dat ze softwaru Talymap GOLD do textového editoru.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 54 Tvorba snímků vlnitosti a drsnosti povrchu</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 55 Nastavení filtru vlnitosti a drsnosti povrchu</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 56 Vlnitost a drsnost povrchu ve směru východ-západ</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 57 Převod snímků z 2D do 3D.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 58 3D snímek vlnitosti povrchu</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 59 3D snímek drsnosti povrchu</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 60 Zobrazení měřítka, os a souřadného systému</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 61 Zobrazení barevné škály.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 62 Finální podoba upraveného snímku drsnosti povrchu</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 63 Finální podoba upraveného snímku vlnitosti povrchu</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 64 Upravená data připravená pro použití v softwaru minitab 17.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 65 Označení dat v poznámkovém bloku</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 66 Vložení dat do nového worksheetu</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 67 Transformace řádků na sloupce</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 68 Označení řádků pro transformaci</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 69 Transformovaná data do sloupců.....</i>	<i>69</i>

<i>Obr. 70 Regresní funkce v softwaru minitab</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 71 Nastavení parametrů regrese</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 72 Kvadratická regrese</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 73 Vyvolání kalkulátoru</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 74 Rovnice funkce kvadratické regrese</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 75 Regresní hodnoty</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 76 Graf rozptylu jednotlivých regresí</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 77 Nastavení parametrů rozptylového grafu</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 78 Rozptylový graf vypočítaných hodnot jednotlivých regresí</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 79 Regresní funkce v softwaru QC Expert</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 80 Dialogové okno s parametry regresní funkce</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 81 Vyvolání protokolu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 82 Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese</i>	<i>75</i>

SEZNAM TABULEK

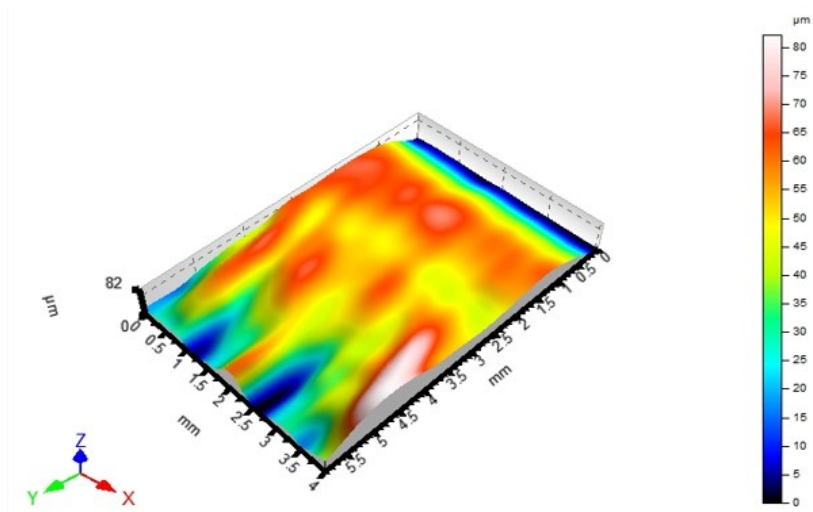
<i>Tab. 1 Stručný přehled rozdělení laserů [14]</i>	25
<i>Tab. 2 Parametry laseru LVD LYNX FL-3015 [60]</i>	48
<i>Tab. 3 Chemické složení oceli X5CrNi, 1.4301 [62]</i>	51
<i>Tab. 4 Chemické složení oceli X15CrNiSi, 1.4828 [62]</i>	51
<i>Tab. 5 Použité řezné parametry</i>	52
<i>Tab. 6 Technické specifikace přístroje Talysurf CLI 500</i>	53
<i>Tab. 7 Kvadratické regrese parametru R_p včetně statistických charakteristik</i>	76
<i>Tab. 8 Hodnota parametru R_p v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	77
<i>Tab. 9 Hodnota parametru R_p v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	77
<i>Tab. 10 Kvadratické regrese parametru R_v včetně statistických charakteristik</i>	78
<i>Tab. 11 Hodnota parametru R_v v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	79
<i>Tab. 12 Hodnota parametru R_v v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	79
<i>Tab. 13 Kvadratické regrese parametru R_z včetně statistických charakteristik</i>	80
<i>Tab. 14 Hodnota parametru R_z v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	81
<i>Tab. 15 Hodnota parametru R_z v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	81
<i>Tab. 16 Kvadratické regrese parametru R_a včetně statistických charakteristik</i>	82
<i>Tab. 17 Hodnota parametru R_a v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 240 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	83
<i>Tab. 18 Hodnota parametru R_a v závislosti na poloze řezu pro ocel 17 251 před a po výměně ochranného sklíčka</i>	83
<i>Tab. 19 Fisher-Snedecorův test významnosti modelu – parametr R_v</i>	84
<i>Tab. 20 Fisher-Snedecorův test významnosti modelu – parametr R_a</i>	84

SEZNAM PŘÍLOH

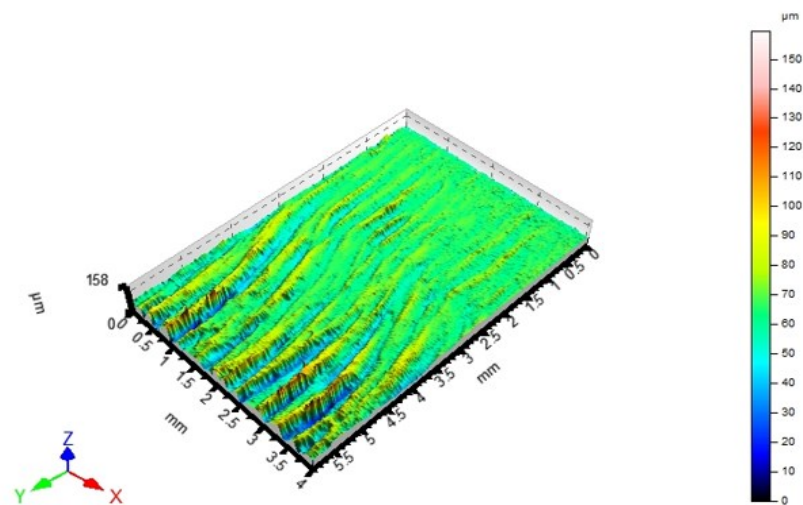
Příloha P I: Nasnímaná data přístrojem Talysurf CLI 500

PŘÍLOHA P I: NASNÍMANÁ DATA PŘÍSTROJEM TALYSURF CLI

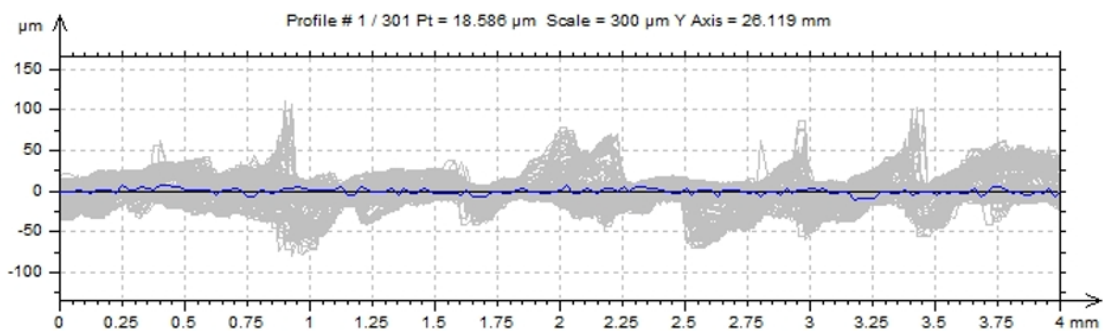
500



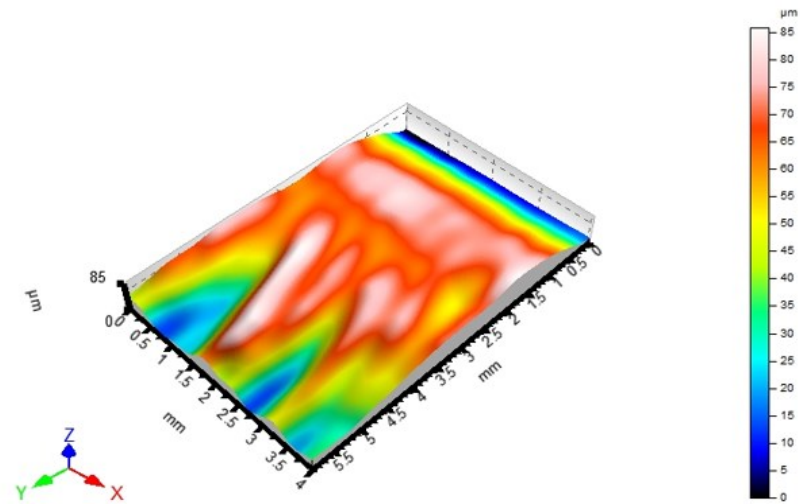
Vlnitost povrchu oceli 17 240 před výměnou sklička



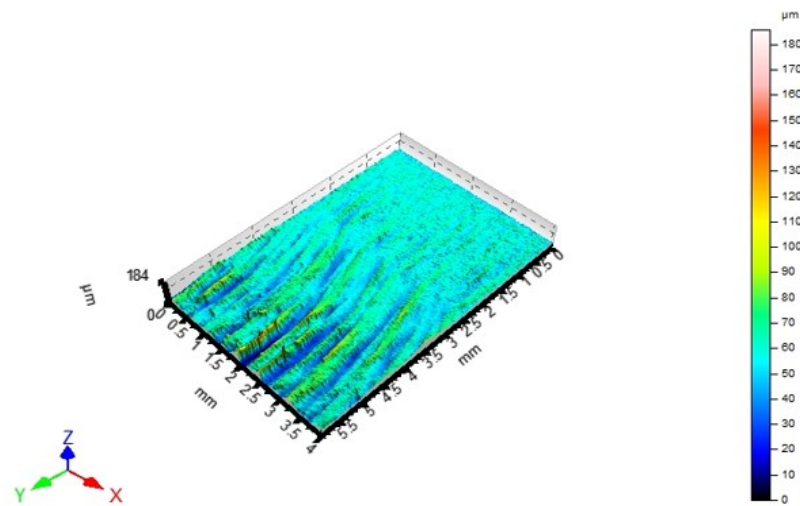
Drsnost povrchu oceli 17 240 před výměnou sklička



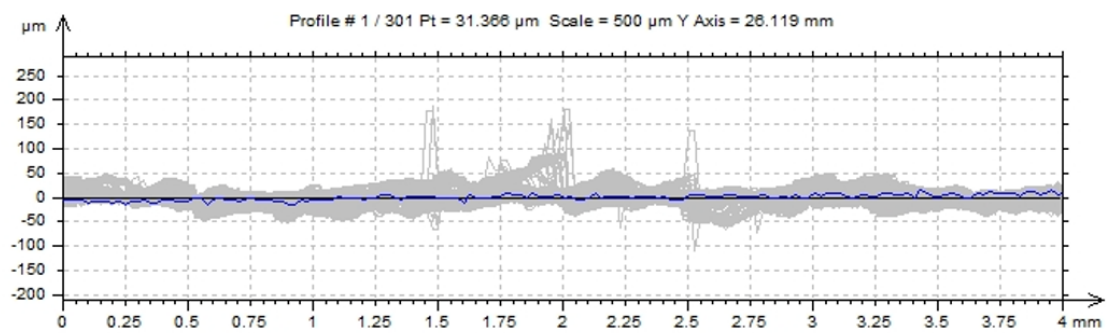
„Rozřezání“ povrchu ve směru východ-západ - ocel 17 240 před výměnou sklička



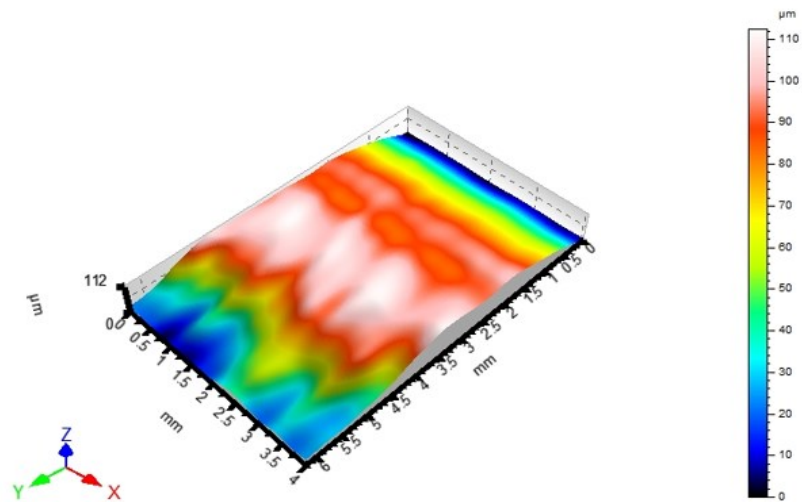
Vlnitost povrchu oceli 17 240 po výměně sklíčka



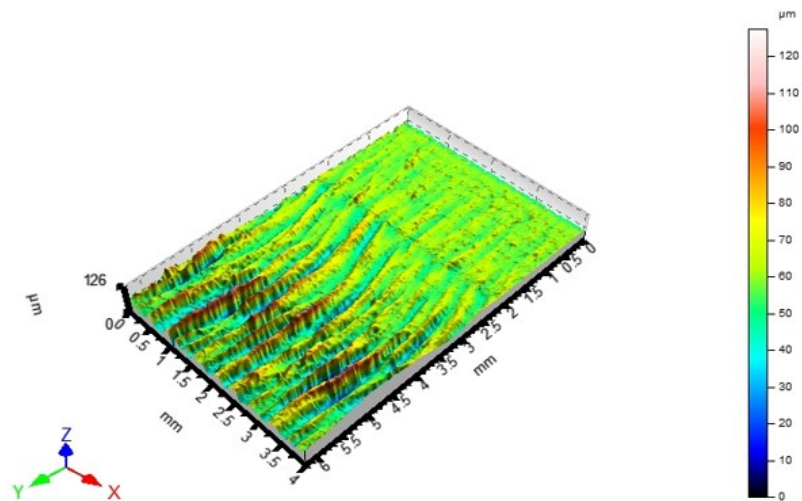
Drsnost povrchu oceli 17 240 po výměně sklíčka



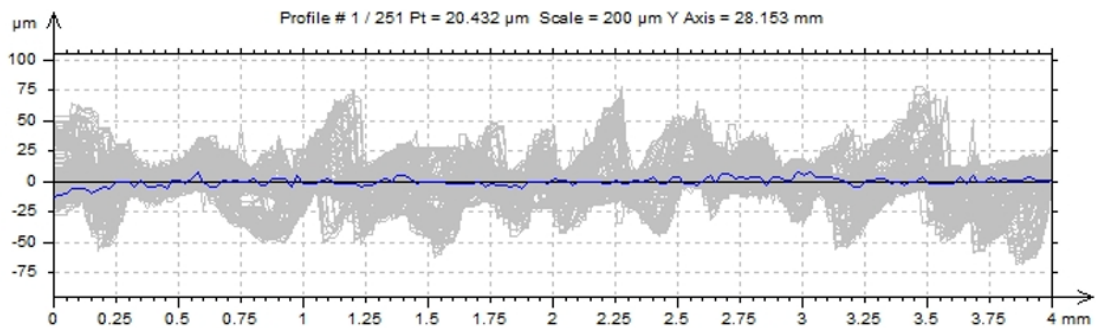
„Rozřezání“ povrch ve směru východ-západ – ocel 17 240 po výměně sklíčka



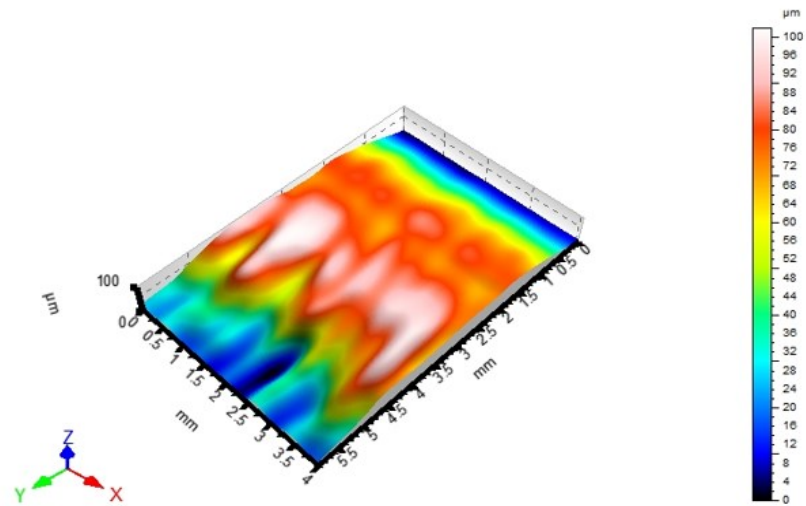
Vlnitost povrchu oceli 17 251 před výměnou sklíčka



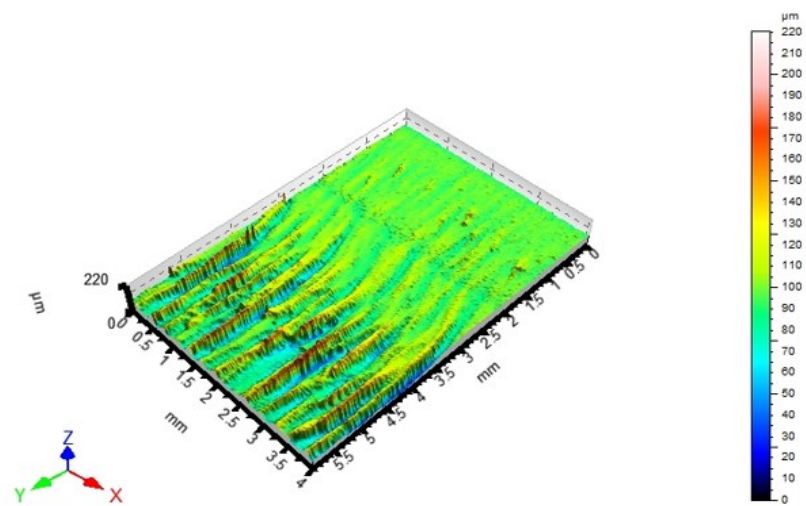
Drsnost povrchu oceli 17 251 před výměnou sklíčka



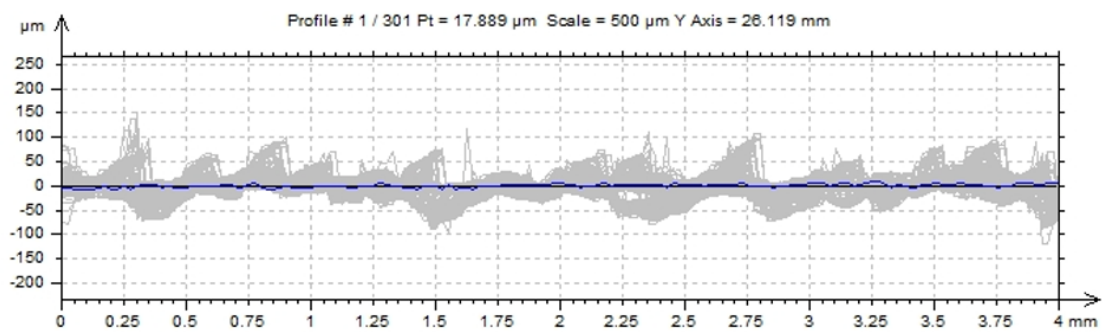
„Rozřezání“ povrchu ve směru východ-západ - ocel 17 251 před výměnou sklíčka



Vlnitost povrchu oceli 17 251 po výměně sklíčka



Drsnost povrchu oceli 17 251 po výměně sklíčka



„Rozřezání“ povrchu ve směru východ-západ - ocel 17 251 po výměně sklíčka