VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LASEROVÉ ČIŠTĚNÍ TECHNICKÝCH MATERIÁLŮ

LASER CLEANING OF TECHNICAL MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Filip Čermák

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Filip Čermák**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Laserové čištění technických materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na technologii čištění pomocí laseru, která se řadí mezi nekonvenční technologie ve strojírenství. Teoretická část práce se bude zabývat charakteristikou technologií laserového čištění povrchu technických materiálů. Praktická část bude zaměřena na přípravu zkušebních vzorků, dokumentaci specificky připravených povrchů a měření změn (defektů), které nastanou po provedeném laserovém čištění povrchu. Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat a celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

Literární rešerše v oblasti nekonvenčních technologií – se zaměřením na laserové technologie v oblasti strojírenství.
Metody a možnosti čištění povrchů ve strojírenství.
Charakteristika společnosti Žluté lasery, s.r.o.
Praktická část – příprava testovacích vzorků, provedení zkoušek měření a jejich analýza.
Zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KUBÁTOVÁ, J., LUKEŠ, I. Laserové technologie opracování kovových materiálů. 1988. 36 s. ISSN 0322-8525.

SOCHOR, V. Lasery a koherentní svazky. 1.vyd Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1990. 196 s. ISBN 80-200-354-1.

BARCAL, J. Nekonvenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

BENKO, B., FOREDEREK, P., KOSEČEK, M., BIELAK, R. I. Laserové technológie. 1.vyd., Bratislava: Vydavatelstvo STU, 2000, edice 4859. ISBN 80-227-1425-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou vlivu laserového čištění na povrch základního materiálu, resp. na jeho texturu povrchu. Teoretická část práce je zaměřena na charakteristiku laserových technologií, přehled metod čištění povrchu v oblasti strojírenství a na představení společnosti ŽLUTÉ LASERY s.r.o., díky níž došlo ke vzniku a vypracování zadaného tématu. V praktické části zaměřené na experiment je rozebrána volba materiálů, výroba vzorků, dále výběr druhů nečistot a jejich aplikace na určené plochy. Hlavní částí je popis procesu laserového čištění, měření drsnosti a statistické vyhodnocení zkoumaných parametrů drsnosti povrchu (Ra, Rz, Rp, Rv, RSm, RPc, Sa, Sz, Sp, Sv, Spd a Spc). V závěru jsou zpracované výsledky zhodnoceny a prezentovány.

Klíčová slova

laser, laserové čištění, drsnost povrchu, čistota povrchu, nekonvenční technologie

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of the effect of laser cleaning on the surface of the base material, respectively on its surface texture. The theoretical part of the thesis is focused on the characteristics of laser technologies, an overview of surface cleaning methods in the field of mechanical engineering and the introduction of the company ŽLUTÉ LASERY s.r.o., that helped to create and process the assigned topic. In the practical part focused on the experiment is discussed the choice of materials, production of samples, selection of types of impurities and their application to designated areas. The main part is a description of the laser cleaning process, roughness measurement and statistical evaluation of the investigated surface roughness parameters (Ra, Rz, Rp, Rv, RSm, RPc, Sa, Sz, Sp, Sv, Spd and Spc). In the end, the processed results are evaluated and presented.

Key words

laser, laser cleaning, surface roughness, surface cleanliness, unconventional technology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERMÁK, Filip. *Laserové čištění technických materiálů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140246. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Laserové čištění technických materiálů vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

19. 5. 2022

datum

Bc. Filip Čermák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování a za svůj čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval zaměstnancům Katedry strojírenství na Fakultě vojenských technologií Univerzity obrany za poskytnutí laboratorního vybavení a odbornou asistenci během měření drsnosti a veškerých dalších úkonů spjatých s vypracováním této práce. Rovněž děkuji i společnosti ŽLUTÉ LASERY s.r.o. za zapůjčení laserového čistícího zařízení a spolupráci. V neposlední řadě děkuji své velké rodině za nekonečnou podporu a za umožnění studia na vysoké škole.

OBSAH

ÚVOD 9
1 PROBLEMATIKA ZADÁNÍ 10
1.1 Nekonvenční technologie obrábění 10
1.2 Technologie laseru 11
2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE V OBLASTI STROJÍRENSTVÍ 13
2.1 Svařování laserem 14
2.2 Obrábění pomocí laseru 15
2.2.1 Řezání laserem 15
2.2.2 Soustružení s využitím laseru 16
2.2.3 Vrtání pomocí laseru 17
2.3 Povrchová úprava materiálů pomocí laseru 17
2.3.1 Povrchové kalení 18
2.3.2 Povrchové natavování a glazování 18
2.3.3 Povrchové legování 19
3 ČISTOTA POVRCHU VE STROJÍRENSTVÍ 20
3.1 Odmaštění povrchu 20
3.2 Moření materiálů 21
3.3 Technologie omílání 22
3.4 Tryskání povrchu 23
3.5 Laserové čištění 25
3.5.1 Princip laserového čištění 25
3.5.2 Aplikace v průmyslu 26
4 PRAKTICKÁ ČÁST 28
4.1 Příprava vzorků 28
4.2 Očištění vzorků 31
4.3 Měření drsnosti 35
4.4 Vizuální zhodnocení a vyhodnocení naměřených dat 41
4.4.1 Shrnutí výsledků 56
4.4.2 Diskuze 58
ZÁVĚR 60
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 66
SEZNAM PŘÍLOH 68

ÚVOD

Vlastnosti povrchu jsou zásadní pro funkčnost každé součásti. Při výrobě je proto nutné směřovat svou pozornost na kvalitu povrchové vrstvy hotové součásti. V návaznosti na pracovní účel této součásti je důležité si položit otázku: „Jakého povrchového zpracování nebo povrchové úpravy má být dosaženo?“. Na tuto otázku je odpověď vcelku snadná a logická, jelikož konečná povrchová úprava musí být taková, aby plnohodnotně plnila veškeré potřebné funkce, jež jsou od zařízení požadovány, a zároveň zajistila co nejdelší životnost výrobku. Mezi klíčové aspekty povrchu patří jeho morfologie a čistota.

Morfologie neboli drsnost povrchu, je jedním z předních kritérií jakékoliv součásti a v posledních fázích výrobního procesu je této vlastnosti věnována téměř veškerá pozornost. Oproti tomu povrchové čistotě se výrobní postup věnuje již několikrát ve svém průběhu, kdy pro další zpracování polotovaru je nutné získat čistý povrch. Čistota povrchu však není pojem, který je řešen pouze v rámci výroby součásti, ale lidé se jím zaobírají i v rámci jejího životního cyklu, jelikož i v průběhu používání nastanou situace, kdy musí být materiál očištěn. Jako modelovou situaci si lze představit změnu barvy nátěru nebo jeho obnovu. V tomto případě se daný povrch musí zbavit předchozích úprav a povrchových znečištění, aby bylo možné nátěr znovu aplikovat.

Dokonale čistý a odmaštěný povrch je základem pro všechny povrchové úpravy, jelikož kvalita povrchových úprav je významně ovlivněna látkami, jež se vyskytují na povrchu materiálu. Mohou to být pozůstatky po předchozím průmyslovém zpracování nebo následky působení okolního prostředí na povrch materiálu. Pro další zpracování (např. kvalitní přilnavost nátěru, lepení nebo svařování) těchto materiálů je nutné zbavit jejich povrch přítomných nečistot. Třeba při již zmíněném svařování je významným prvotním krokem (předchází vlastnímu svařovacímu procesu) důkladné očištění svařovaných součástí, neboť čistota svarových ploch, spolu s dalšími svařovacími parametry, určuje výslednou kvalitu svaru. Svarové plochy mohou být znečištěny z předchozích operací (např. chladicí kapalinou či ochrannými prostředky) nebo povrchovými úpravami (např. fosfátováním). Tato znečištění jsou pro svařovací proces velice škodlivá a pro vznik kvalitního svarového spoje musí být odstraněna. Rovněž u výše zmíněného lepení je čistota lepených ploch, která zde představuje především jejich odmaštění, základem úspěchu dobré adheze lepidla k lepeným plochám, jenž významně ovlivňuje vytvoření lepeného spoje o vysoké jakosti. [1; 2; 3]

1 PROBLEMATIKA ZADÁNÍ

Všeobecná kvalita povrchu, kterou pro tuto studii představují čistota a drsnost, hraje velkou roli a je nutné na ni brát patřičné ohledy. Ve strojírenském průmyslu kvalitně očištěný nebo naopak výrazně znečištěný povrch součásti ovlivňuje spoustu dalších aspektů ve výrobním procesu. Stejně tak je tomu i v případě drsnosti povrchu. Problematikou čistoty a drsnosti povrchu, především odstranění nečistot z potřebných ploch s ohledem na ovlivnění drsnosti základního materiálu, se zabývá i tato diplomová práce, jejíž téma vzniklo ve spolupráci se společností ŽLUTÉ LASERY s.r.o.

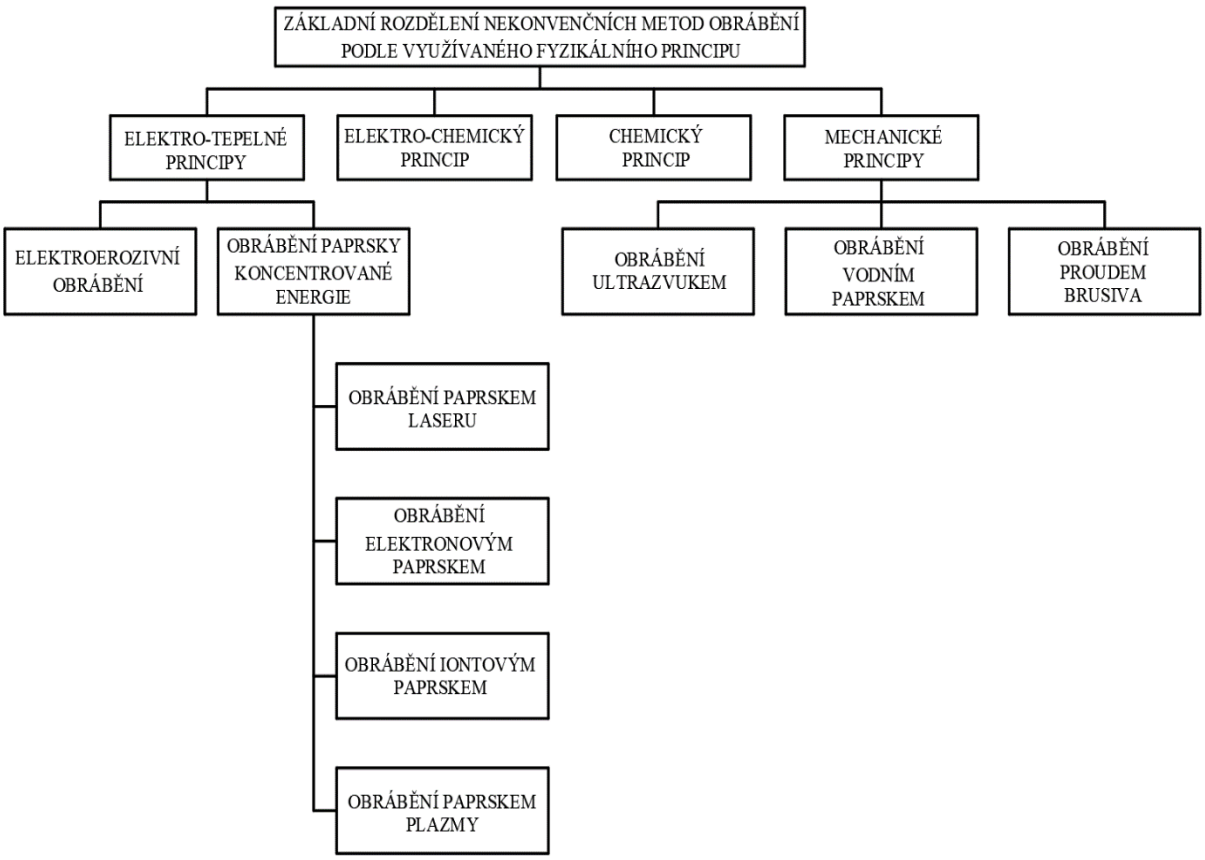
Společnost ŽLUTÉ LASERY s.r.o. (dále jen „ŽL“) je součástí společnosti BOTTLING PRINTING s.r.o. jejíž pracovní náplň je zaměřena na výrobu značících strojů a tiskáren. Společnost ŽL se rozhodla využít své 25leté zkušenosti z oblasti průmyslového značení a automatizace a zaměřila se na využití laserové technologie pro zpracování technických materiálů, přičemž největší důraz, z pohledu pracovní náplně, je kladen právě na značení pomocí laseru. V rámci aplikace této světelné technologie dále soustředí svou pracovní činnost na řezání a svařování převážně kovových materiálů. Společnost pro svou práci používá výhradně stroje a zařízení od čínského výrobce HGTECH, jež dokonce ve Wuhanu vybudoval vlastní univerzitu zaměřenou na vývoj laserové technologie. Nejen díky tomuto jsou zařízení značky HGTECH řazena mezi elitní skupinu laserových přístrojů. [4; 5; 6]

V rámci pokroku a uspokojení poptávky po kvalitně očištěném povrchu se společnost rozhodla zaměřit i na další možnosti využití laserového paprsku a momentálně do svého provozu zavádí novou laserovou technologii, která se zaobírá čištěním materiálu pomocí laserového paprsku. V souvislosti se zaváděním nové technologie vyvstaly na povrch otázky a požadavky týkající se provozu laserového zařízení při čištění materiálů. Hlavním cílem této diplomové práce je proto prozkoumání vlivu laserového paprsku na čištěný materiál (resp. na jeho drsnost povrchu) po procesu čištění. Dalším cílem diplomové práce je určit vhodné provozní parametry zařízení, při jejichž nastavení dojde k rychlému a kvalitnímu výsledku v podobě čisté plochy. Provozními parametry, které je nutné zohlednit při práci s čisticím zařízením na bázi laserového paprsku, a které je možné na ručním laserovém čisticím zařízení nastavit, jsou frekvence a výkon laseru. Diplomová práce má rovněž za cíl i několik literárních rešerší. Jedná se o průzkum z oblasti nekonvenčních technologií, se zaměřením především na laserové technologie ve strojírenství a rešerše ze současných metod a možností čištění povrchů ve strojírenském průmyslu.

Laserové technologie se v oblasti strojního průmyslu řadí převážně mezi nekonvenční technologie. Výjimku zde tvoří např. oblast laserů používaných v metrologii, které mohou sloužit pro měření vzdálenosti nebo teploty. Jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, tato diplomová práce řeší problematiku laserového čištění technických materiálů, což spadá pod oblast nekonvenčních technologií obrábění využívajících laser. Z tohoto důvodu je vhodné si nejdříve vysvětlit, co si představit pod zásadními pojmy této studie, a to nekonvenční technologie obrábění a laser.

1.1 Nekonvenční technologie obrábění

Nekonvenční metody obrábění, někdy též označovány jako fyzikální či progresivní metody obrábění, se od běžného třískového obrábění (konvenční způsob) odlišují především v tom, že pro úběr materiálu nevyužívají mechanickou práci a klasické nástroje, nýbrž využívají fyzikálních principů a přírodních zákonitostí o erozi materiálu (obr. 1). Nástroj je u těchto metod zastoupen např. různými typy hlav, elektrodou nebo tryskou, přičemž tento nástroj není v kontaktu s obráběným materiálem. [7; 8]



Obr. 1 Schéma rozdělení nekonvenčních metod obrábění dle fyzikálního principu [9].

U konvenčních způsobů třískového obrábění je obrobitelnost materiálů omezována mechanickými vlastnostmi, přesněji pevností a tvrdostí obráběných materiálů. Oproti tomu u nekonvenčních metod je obrobitelnost propojena hlavně s fyzikálními vlastnostmi, jako je např. teplota tavení, elektrická vodivost nebo chemické složení. Druh a vliv dané fyzikální vlastnosti závisí zejména na použité metodě. [7; 10]

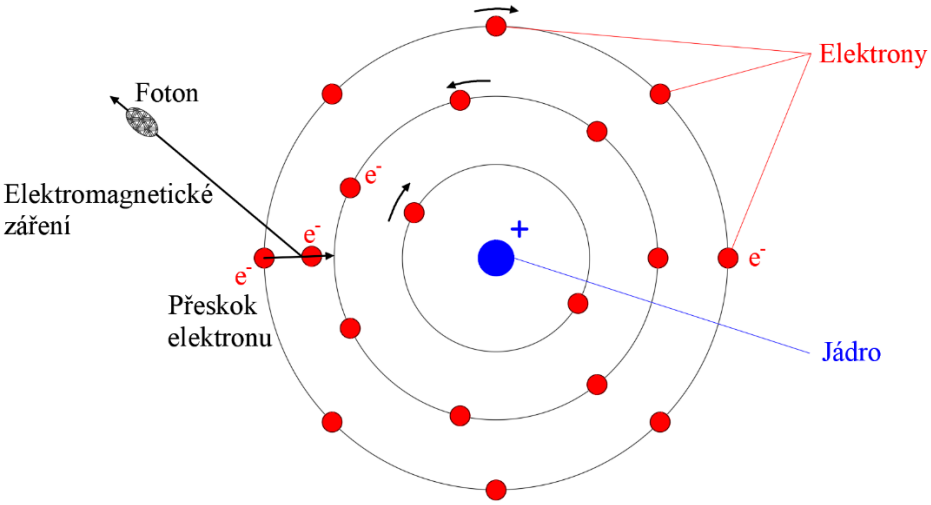
Všeobecně k rozmachu a výzkumu nekonvenčních metod přispěly v první řadě zejména požadavky armádního a kosmického průmyslu. Díky stoupajícím nárokům na geometrickou a rozměrovou přesnost výroby docházelo ke stálému zdokonalování těchto metod. Příznivý vliv na vývoj měly dále nároky na obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Zásluhou výzkumů a zdokonalování se pak následně tyto technologie velmi rychle rozšířily do různých odvětví strojírenské výroby. [8; 10]

1.2 Technologie laseru

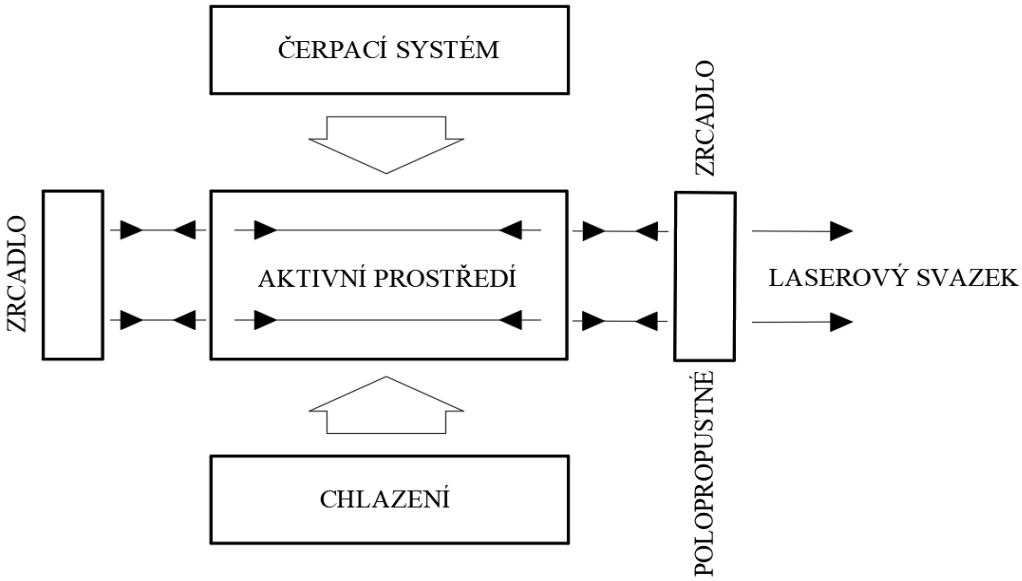
Slovo laser vzniklo jako zkratka jejíž původ je ve spojení počátečních písmen anglického názvu Light Amplification by means of Stimulated Emission of Radiation, což v překladu do češtiny znamená „zesílení světla pomocí stimulované emise záření“. Pojem stimulovaná emise záření popsal v roce 1917 jako první Albert Einstein, který se zabýval problematikou vzájemného působení mezi atomy a fotony. První funkční laser byl však vynalezen až v roce 1960 americkým fyzikem T. H. Maimanem. [11]

Princip a vlastní podstatu laseru lze vysvětlit na základě pojmů kvantové fyziky a zjednodušeného planetárního modelu atomu, viz obr. 2. U tohoto modelu okolo jádra s kladným nábojem krouží na uzavřených drahách záporně nabité elektrony, podléhající elektrostatickým silám. Každá dráha má svou energetickou hladinu, přičemž dráze vzdálenější od jádra přísluší větší množství energie než dráze, která je k jádru blíž. Laser využívá

indukovanou emisi, která je vyvolána dopadem záření na atom prvku. Toto záření přinutí elektron přijmout energii, díky které je schopný vystoupat do vyšší valenční vrstvy (dráhy). V rámci vyvážení sil v atomu je ale elektron přinucen vrátit se zpět na svou původní oběžnou dráhu. Při tomto přechodu vyzáří přijatou energii do prostoru v podobě monochromatického koherentního záření (foton). Stimulované záření spočívá v tom, že jeden foton srazí větší počet dalších elektronů a díky dalším srážkám se jejich počet dále zvyšuje. Tento proces probíhá v tzv. aktivním prostředí, umístěném do optického rezonátoru. Zjednodušené schéma laseru je vyobrazeno na obr. 3. [12; 13; 14]



Obr. 2 Schéma planetárního modelu atomu [15].

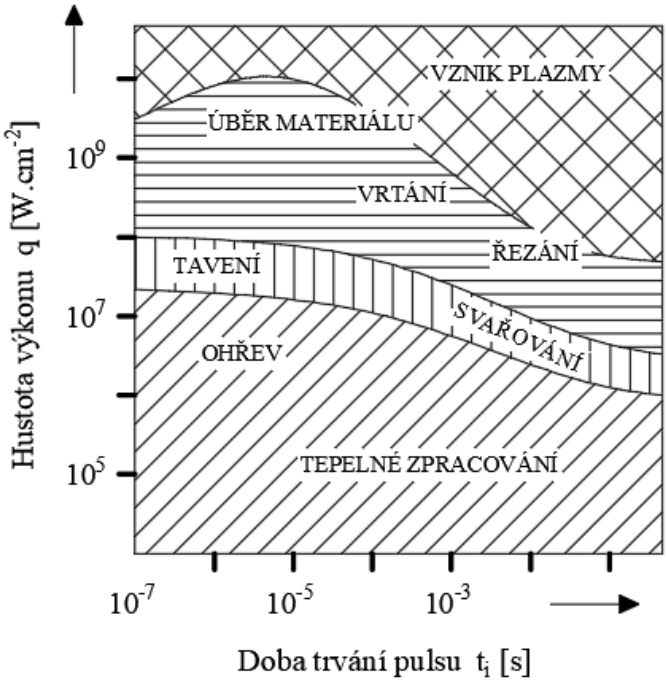


Obr. 3 Zjednodušené schéma laserového zařízení [16].

2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE V OBLASTI STROJÍRENSTVÍ

Lasery si od svého vzniku, díky své flexibilitě, našly uplatnění téměř v každém průmyslovém odvětví. Jejich využití pro technologické zpracování materiálu má mimo tichosti a čistoty provozu několik dalších podstatných výhod. Paprsek laseru vytváří na materiálu malou tepelně ovlivněnou oblast, úzkou řeznou mezeru a jeho působení na materiál je bez silového zatížení. Pomocí laseru je možné obrábět těžkoobrobitelné materiály při vysoké rychlosti obrábění a dále ho lze použít pro různé technologické účely, přičemž není nutná výměna pracovního nástroje. [12]

Lze tedy říci, že v dnešní době je opravdu snadné setkat se s některou laserovou technologií. Na lasery je možná narazit ku příkladu ve strojírenství (např. řezání, vrtání, svařování, pálení, značení a tepelné zpracování), ve zdravotnictví (např. oftalmologie, chirurgie a stomatologie), ve zbrojním průmyslu (např. zaměřovače), v metrologii (např. měření vzdáleností nebo množství škodlivých plynů a prašných částic v atmosféře) a ve výpočetní technice (např. CD-RW mechanika). Na obr. 4 je vyobrazen výčet aplikací laseru ve strojírenství v závislosti na hustotě výkonu a době trvání pulsu. [8; 13]



Obr. 4 Příklad technologií využívajících laser ve strojním průmyslu [12].

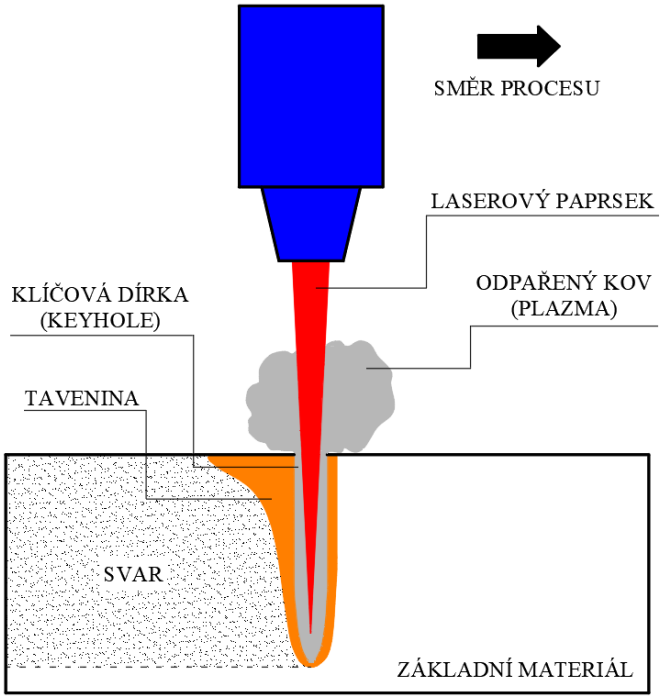
V současné době patří laserové technologie jednoznačně mezi nejprogresivnější procesy výroby. Neustále prochází a jistě i budou procházet vývojem a inovacemi, díky čemuž dojde k jejich dalšímu zapojení do různých nejen strojírenských odvětví. Některé způsoby využití laseru už nejsou brány pouze jako alternativa či nekonvenční metoda, ale nahlíží se na ně jako na první volbu při výběru zpracování materiálu. V tomto ohledu se mluví např. o řezání nebo značení pomocí laseru. Stále však existují výrobní procesy, u nichž si laserové technologie neustále hledají své místo, anebo takové, u kterých jsou zaběhlé technologie postupně nahrazovány laserovými. Zde je řeč např. o laserovém svařování, které pozvolna nahrazuje svařování pomocí paprsku plazmy. [17]

2.1 Svařování laserem

Svařování laserem se řadí mezi tavné způsoby svařování materiálů a patří mezi značně náročné aplikace laserového paprsku. Svarové spoje musí mimo dobrého formování splňovat i další požadavky, a to např. minimální deformace, celistvost spojů a požadavky na mechanické a fyzikálně metalurgické vlastnosti. Zároveň je zpravidla požadován co nejužší a nejhlubší závar při určitém výkonu. [16; 18]

Pro laserové svařování se používají plynové lasery s CO_2-N_2-H_2 o výkonu do 10 kW. V závislosti na intenzitě záření se dělí na tzv. nízkovýkonové a vysokovýkonové laserové svařování. U nízkovýkonového laserového svařování je výkon nižší než 1 kW a laserový svazek se fokusuje na intenzitu 105 až 106 $W.cm^{-2}$. Tento způsob je využíván pro svařování tenkých plechů a fólií do tloušťky 2 mm. Oproti tomu vysokovýkonové laserové svařování pracuje s výkonem od 2 kW do 10 kW a intenzitou 106 až 107 $W.cm^{-2}$. V závislosti na těchto parametrech dochází ke vzniku svarového spoje s velkým poměrem hloubky a šířky, díky čemuž je možné svařovat plechy o větší tloušťce a masivnější součástky. [16; 19]

Podstata laserového svařování je tzv. *keyhole*, což je otvor s mírně kuželovitým tvarem, jehož průměr téměř odpovídá průměru laserového paprsku (obr. 5). Jako produkt tavení, odpařování a sublimace vznikají páry a plyny roztaveného kovu. Při relativním pohybu laserového paprsku dochází na čelní straně paroplynového kanálu k tepelné interakci se základním materiálem. Z čelní strany se v důsledku dynamické rovnováhy mezi tlaky plynů a svarovým kovem přesouvá roztavený kov do zadní části. V zadní části se svarový kov hromadí a chladne. [18]



Obr. 5 Schéma laserového svařování [20].

Rychlost laserového svařování (zároveň i výrobní produktivita) je ve srovnání s klasickými obloukovými technologiemi podstatně vyšší. Díky *keyhole* je svar štíhlejší a hlubší, z čehož vyplývají i menší deformace vzniklého svařence. Toto jsou jednoznačně neopomenutelné přednosti laserového svařování. Nicméně v důsledku malé velikosti svaru vzniká horký svar a studené okolí. Následně kvůli velmi rychlému ochlazování svaru může docházet ke vzniku horkých trhlin či nežádoucích struktur ve svarovém kovu nebo v tepelně ovlivněné oblasti. Mezi nevýhody této metody se může řadit vyšší pořizovací cena zařízení, avšak díky shora uvedeným výhodám se tato investice rozhodně vyplatí. [21]

2.2 Obrábění pomocí laseru

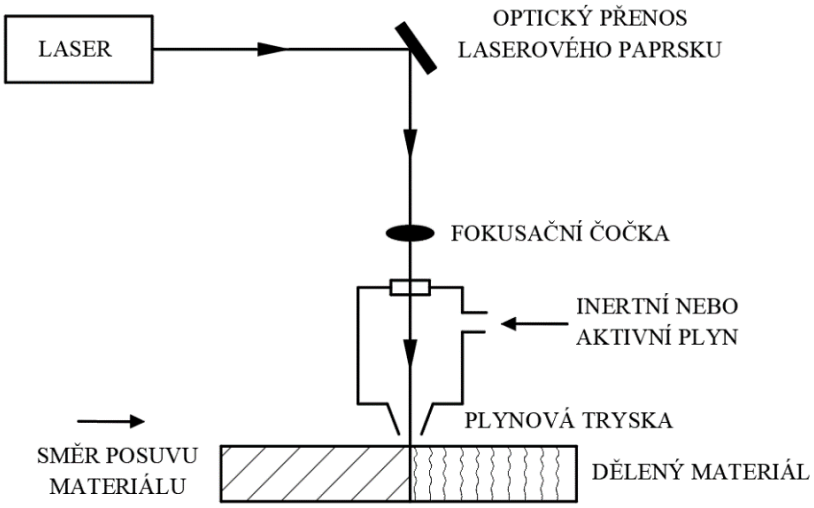
Při obrábění pomocí laserového paprsku (LBM) je pojem obrobitelnost materiálu prakticky bezvýznamný (podobně je tomu při obrábění paprskem plazmy). Laserový paprsek velice dobře proniká jak měkkými, snadno obrobitelnými materiály (papír, plast), tak materiály, jejichž obrobitelnost je podstatně horší (titanové slitiny, keramické materiály) – zde se ukazuje obrovská výhoda LBM, jelikož lze obrábět téměř všechny druhy materiálů. Z tohoto důvodu, je místo obrobitelnosti nutné stanovit jiná segregační kritéria, podle kterých lze posoudit vhodnost materiálu pro opracování pomocí metody LBM. Mezi tato hodnotící kritéria patří pohltivost, tepelná vodivost a odrazivost. Obrobitelnost materiálu laserem se s rostoucí pohltivostí zvyšuje, a naopak s rostoucí tepelnou vodivostí a odrazivostí klesá. [8]

U LBM je využívána fotonová eroze, která je výsledkem masivního tepelného působení na materiál obrobku. V případě, že bude záření obráběným materiálem dobře pohlcováno, dojde k procesu změny zářivé energie v energii tepelnou. Odolné materiály proti fotonové erozi jsou ty, které mají vysokou odrazivost nebo jsou čiré. Na poddajnosti obrobku vůči fotonové erozi závisí množství materiálu odstraňované laserovým paprskem o určité vlnové délce. Tato poddajnost je ovlivněna řadou vlastností obráběných materiálů, přičemž těmi rozhodujícími jsou tepelné vlastnosti materiálu (nejvíce tepelná vodivost). [12]

Hlavními představiteli metody laserového obrábění jsou bezesporu řezání, vrtání, soustružení a značení, neboť v tomto směru jde o nejrozšířenější způsoby využití laserového paprsku k obrábění různorodých materiálů. Byť se u všech těchto metod jedná o laserové obrábění, tak způsob funkce laseru a princip jeho činnosti při samotném obráběcím procesu není u každé z těchto metod stejný. Dle dané metody je laser využit jako hlavní pracovní nástroj, který přímo zajišťuje vlastní obrábění, nebo jako vedlejší nástroj, jež v procesu obrábění hraje pomocnou roli. [10; 12]

2.2.1 Řezání laserem

Řezání pomocí laseru dnes patří mezi nejrozšířenější technologie laserového zpracování materiálu. Laserem lze řezat širokou škálu materiálů, od papíru, dřeva, pryže a plastických hmot, až po kovové či keramické materiály. Laserové řezání se využívá buď pro přímé dělení materiálu, nebo pro vytvoření drážky s následným kontrolovaným lomem, což je využíváno u materiálů s vyšší křehkostí. [16; 18; 22]



Obr. 6 Schematické znázornění řezání materiálu pomocí laseru [10].

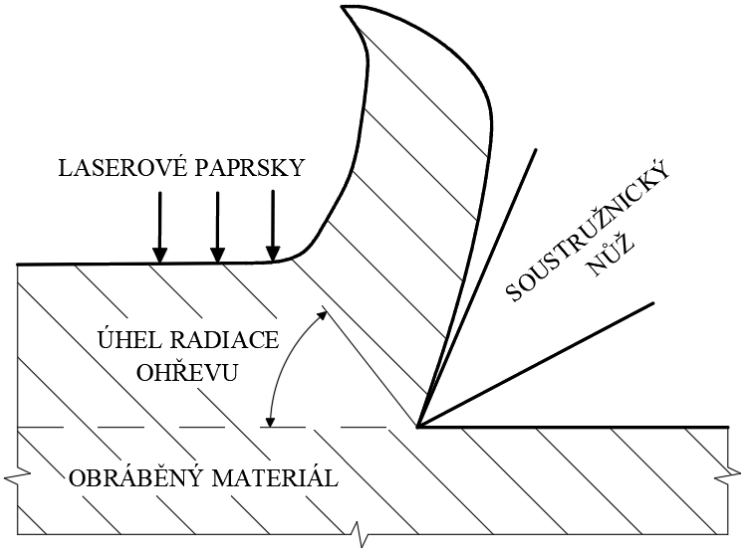
Základní princip procesu je v podstatě stejný jako u laserového svařování. Rozdíl mezi těmito metodami využití laserového paprsku je v tom, že u řezání kovových materiálů je do místa řezu přiváděn řezný plyn, který podporuje spalování řezaného materiálu a zároveň ho odstraňuje z místa řezu, viz obr. 6. Při řezání je tedy dělený materiál ozářen laserovým svazkem s dostatečnou intenzitou pro natavení a odpaření. Zaostřený paprsek, spolu s proudem plynu, dopadá na povrch materiálu, dojde k natavení a ke vzniku tzv. erozní fronty, která tvoří hranici mezi spárou a neporušeným materiálem obrobku. V zóně u erozní fronty je materiál ohříván jak uvolněným teplem z absorpce záření, tak i exotermickou reakcí kovu s dodávaným kyslíkem. Určitá část taveniny se vypaří a zbytek je pomocí tlaku plynu odstraněn ze spáry ven. [16; 19]

Laserové řezání materiálu se dělí na tři způsoby, a to na sublimační řezání, tavné řezání a řezání pálením. Sublimační řezání, kde je materiál odstraňován především odpařováním, se v současné době již moc nepoužívá. U tavného řezání je materiál obrobku roztaven a přídavným plynem odfukován z místa řezu ven. Tento způsob se vyznačuje neoxidovaným řezem (který je vhodný např. pro korozivzdorné oceli, hliník či pozinkované plechy) a finální řeznou plochou, která nevyžaduje dodatečné úpravy. Nevýhodou je zde menší řezná rychlost a otřepy na spodní hraně řezu. Při řezání pálením je využívána exotermická reakce mezi kovem a kyslíkem. Materiál zahřátý na zápalnou teplotu s přiváděným reaktivním plynem shoří v exotermické reakci a následně je natavený materiál z místa řezu odstraněn asistenčním plynem. [22]

2.2.2 Soustružení s využitím laseru

Soustružení materiálů s využitím laseru, jakožto nekonvenční technologie obrábění, lze dále rozdělit na tři metody, kterými jsou obrábění s předehřevem, odtavování materiálu obrobku z povrchu součásti a odřezávání materiálu různoběžnými paprsky laseru. [22]

Pro obrábění s předehřevem, neboli LAM (*Laser Assisted Machining*), jsou využívány CO_2 a Nd:YAG lasery. Paprsek laseru je nasměrován těsně před břit řezného nástroje (obr. 7). Zásluhou laserového paprsku dochází k ohřevu materiálu obrobku a tím ke změně jeho mechanických vlastností (snížení pevnosti a tvrdosti), díky čemuž je několikanásobně zlepšena obrobitelnost. Ve srovnání s obráběním bez předehřevu se zvyšuje kvalita obrobené plochy (drsnost povrchu podobná jako při broušení), trvanlivost ostří, snižuje se počet výměn nástrojů a dochází ke zlepšení ekonomiky provozu. [10; 13; 22]

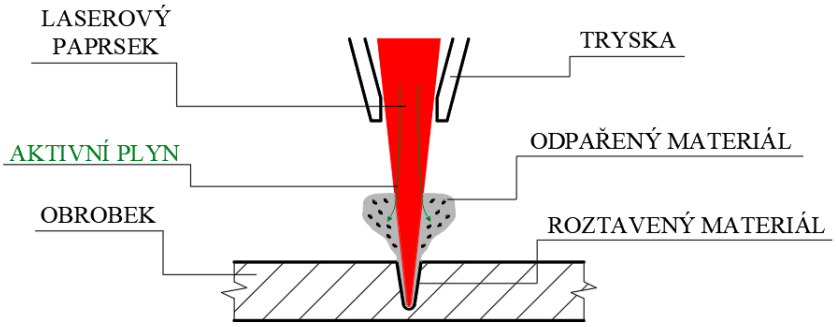


Obr. 7 Schéma soustružení s laserovým předehřevem obrobku [10].

Pomocí metody přímého obrábění s odtavováním materiálu obrobku je možné soustružit i frézovat. Princip spočívá v intenzivním přívodu tepla na povrch obrobku, který rotuje proti paprsku laseru. Paprsek je při obrábění vnějších ploch zaostřen kolmo k obráběné ploše obrobku. Úběr materiálu probíhá ve formě rýh o velmi malé tloušťce a šířce (desetiny milimetru). Působením tepla se materiál odtavuje a tlakem asistenčního plynu je odstraňován z místa řezu. [13; 22]

2.2.3 Vrtání pomocí laseru

Při vrtání pomocí paprsku laseru je materiál ozářen sérií pulsů, kde intenzita svazku musí být vyšší než u svařování či řezání. Z tohoto důvodu jsou využívány pulzní lasery s délkou pulzu menší než 1 ms. Princip laserového vrtání je založen na odstraňování materiálu odpařováním (podobně jako u laserového řezání). Během procesu vrtání je materiál z části odpařen a zbytek je v podobě taveniny vytlačován tlakem par (obr. 8). Využívá se zde mnohonásobného odrazu záření od stěn, pomocí kterého se laserový paprsek dostává až na dno vývrtu a s každým pulzem dochází k prohlubování vrtané díry. Díky tomuto efektu lze dosáhnout velkého poměru hloubky a průměru, a to až 50 : 1. [16; 23]



Obr. 8 Schéma principu laserového vrtání [24].

Pomocí laseru je možné vytvářet poměrně malé tvarové nebo kruhové otvory (průměry děr od 10 do 100 mm s hloubkou až 50 mm) i na místech, kde by to jinými metodami bylo obtížné, ba dokonce nemožné. Mezi další neopomenutelné přednosti laserového vrtání patří vysoká rychlost, bezdotykovost, přesnost a kvalita děr. U děr však platí, že čím je hlubší, tím více je její tvar odchýlen od geometrie paprsku. Laserem lze vrtat širokou škálu materiálů např. kovy, plasty, sklo, keramiku a další velmi tvrdé materiály. [16; 23]

Pro vrtání jsou používány lasery CO_2, Nd:YAG a excimerové. Volba vhodného typu laseru závisí na konkrétní aplikaci, zatímco hlavními měřítky jsou materiál, rozměry děr a rychlost vrtání. V průmyslu jsou především využívány Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 100 až 500 W, kde právě výkon laseru společně s tloušťkou vrtaného materiálu ovlivňují rychlost procesu. Představitelem praktické aplikace laseru je vrtání vstřikovacích trysek, proudových motorů a mazacích otvorů automobilových motorů a převodovek. [16; 23]

2.3 Povrchová úprava materiálů pomocí laseru

Různorodé vlastnosti laseru umožnily vznik technologických postupů, jež by bez laseru nebyly realizovatelné. Jedná se v prvé řadě o metody speciální povrchové úpravy kovových materiálů, u nichž je využívána schopnost laseru velmi rychle ohřát až natavit pouze povrch materiálu bez tepelného zásahu do jeho hlubších vrstev. Tímto způsobem lze na materiálu vytvořit povrchovou vrstvu s tloušťkou řádově 0,1 až 1 mm, která bude oproti zbytku materiálu disponovat lepšími užitnými vlastnostmi (především odolností proti otěru, tvrdostí a korozivzdorností). [16]

Mezi výhody laserových povrchových úprav materiálů patří bezesporu malé tepelné ovlivnění materiálu, rychlost, čistota a přesnost procesu a dále pak vysoké rozlišení, jež umožňuje opracování přesně definovaných malých ploch a tvarově složitých součástek. Vzhledem ke kvalitě opracovaného povrchu součásti nejsou nutné žádné dokončovací operace, což v mnoha ohledech jednoznačně urychlí celý výrobní proces. [16]

Metody laserového povrchového zpracování kovů lze rozdělit do několika skupin. Podle výsledné intenzity působícího záření na povrch jsou známy metody bez natavení povrchu, s natavením povrchu a s odpařením povrchu. Dle toho, zda je při procesu využíván nějaký přídavný materiál, lze povrchové zpracování kovů pomocí laseru rozdělit na další skupiny. Do první skupiny spadají metody, u kterých dochází k ozařování povrchu kovu již pokrytého vrstvou přídavného materiálu (nejčastěji v podobě prášku) nebo u kterých je přídavný materiál (např. reaktivní plyn či prášek) přiváděn na povrch až během procesu ozařování. Typické zástupce této skupiny představuje např. povrchové legování a povlakování. Druhou skupinu tvoří postupy úpravy povrchu ozářením materiálu bez dalších přídavných složek, do které patří např. povrchové kalení, povrchové natavování, mikrostrukturování, laserové čištění a glazování. [16; 18; 25]

2.3.1 Povrchové kalení

Jedná se o metodu, při níž se povrchová vrstva s tloušťkou 0,05 až 3 mm ohřeje pomocí laserového svazku na teplotu překrystalizace a následným rychlým ochlazením dojde k zakalení. Celý tento teplotní proces trvá přibližně 1 s. Zakalená povrchová vrstva se vyznačuje výrazně vyšší mikrotvrdostí, otěruvzdorností, homogenitou a jemným zrnem. Oproti konvenčním způsobům kalení (plamenem nebo indukčním ohřevem) má laser několik výhod. Hlavní výhodou je nižší energetický vstup, díky kterému je dosaženo minimální tepelně ovlivněné oblasti a rovněž i tepelné deformace jsou omezeny na minimum. [13; 16]

Posouzení vhodnosti materiálů pro kalení je stejné jako u konvenčních způsobů, tudíž lze říci, že pokud je ocel či litina kalitelná konvenčními způsoby, je možné ji kalit i laserem. Avšak kvůli vysoké rychlosti procesu je při laserovém kalení nutné klást velký důraz na výchozí strukturu kaleného materiálu, neboť vinou krátkého času pro difuzi uhlíku jsou pro laserové kalení přijatelnější oceli a litiny s homogenním rozložením uhlíku. Nejčastěji používané materiály jsou uhlíkové kalitelné oceli (např. oceli 12 050, 12 060 a 19 191), jejichž výhoda pro povrchové kalení spočívá v nízké ceně materiálu. [16; 18]

Po povrchovém kalení pomocí laserového paprsku je již další mechanické opracování minimální. Laserem opracovaná povrchová vrstva materiálu je složena z oblasti plně martenzitické, přechodové částečně martenzitické oblasti a nezakalené tepelně ovlivněné oblasti. U povrchu se často vyskytuje zbytkový austenit a pokud dojde k natavení povrchu, objevuje se zde přetavený materiál s dendritickou strukturou. Finální struktura a zároveň i rozsah oblastí jednotlivých fází jsou významně ovlivněny výchozí strukturou materiálu, jeho chemickým složením a průběhem ozařování. [16; 18]

2.3.2 Povrchové natavování a glazování

Vůči povrchovému kalení, kde teplota ozářeného povrchu nedosahuje teploty tavení, je u laserového povrchového natavování využívána intenzita laserového paprsku k natavení povrchu. Po natavení následuje rychlé ochlazení, tuhnutí a rekrystalizace povrchu. Výsledkem tohoto procesu, vzhledem k výchozímu materiálu, je vznik povrchové vrstvy s odlišnou krystalickou strukturou a vlastnostmi. Přetavený povrch se vyznačuje tvrdostí, korozivzdorností a hladkostí (drsnost menší než 25 μm), přičemž tyto a další vlastnosti jsou vázány na podmínky ozařování a chemické složení materiálu. K tomu, aby byla zajištěna určitá opakovatelnost

procesu natavování, je nutné povrch během ozařování laserem ofoukávat proudem inertního plynu. Inertní plyn je většinou přiváděn rovnoběžně s natavovaným povrchem, aby nedocházelo k deformaci tohoto povrchu, jejíž vznik by hrozil při ofukování ve směru souběžném s laserovým svazkem. [16]

Princip laserového glazování spočívá v ohřevu povrchu materiálu bez přídavných kovů v inertní atmosféře, tak jak je tomu i u povrchového natavování. Jedná se však o extrémní případ povrchového natavování, kdy je rychlost ochlazování tak velká, že nestačí proběhnout rekrystalizace a na povrchu materiálu dojde k vytvoření tenké vrstvy ve formě kovového skla s neobyčejnými mechanickými a antikorozními vlastnostmi. [13; 16]

2.3.3 Povrchové legování

Základ povrchového legování pomocí laseru spočívá v natavení povrchové vrstvy kovu společně s přídavnými legujícími prvky, které jsou již na povrchu přítomny nebo jsou na něj nanášeny v průběhu ozařování. V natavené povrchové vrstvě dochází vlivem difuze a turbulentního proudění taveniny k prostoupení legur do legovaného materiálu. Díky rychlému ochlazení vznikne tenká povrchová vrstva slitiny (od 0,05 do 5 mm). Velká rychlost procesu zároveň významně omezuje možnost vylučování legujících prvků a lze vytvořit slitiny s takovými koncentracemi příměsí, které by jinými způsoby nebylo možné získat. Vzniklý legovaný materiál se vyznačuje jemnozrnnou strukturou, homogenitou, odolností proti otěru, žárupevností a korozivzdorností. Díky vhodné volbě legujících prvků lze tyto vlastnosti kombinovat. Touto metodou lze legovat celé povrchy součástí nebo pouze jejich vybraná místa. [16; 18]

Jelikož je metoda povrchového legování laserem podobná metodě povrchového natavování, mají mnoho společných charakteristických rysů. Mezi tyto společné parametry patří např. způsob krystalizace taveniny, parametry světelného paprsku, použité zařízení a kvalita povrchu. Možností přidání legujících prvků je několik [18]:

- pokovování – galvanické a chemické se používá, pokud jsou legujícími prvky kovy, které lze snadno vyloučit elektrolyticky či chemicky (Cr, Ni…);
- nanášení povlaku práškového materiálu – legující prášek může být tvořen buď jednotlivými prvky (W, Cr, Ti, Co…) anebo jejich směsí;
- přidávání prášku do taveniny – zavedení prášku či směsi prášků (uvedených v předchozím bodě) do taveniny se uskutečňuje pomocí práškových podavačů.

3 ČISTOTA POVRCHU VE STROJÍRENSTVÍ

Metod a způsobů, jak zbavit povrch materiálu nečistot již bylo vynalezeno a objeveno mnoho. Tyto metody předběžných povrchových úprav lze rozdělit do několika základních skupin podle principu jejich čisticího procesu na [26]:

- chemické povrchové úpravy,
- mechanické povrchové úpravy,
- tepelné povrchové úpravy.

Chemické úpravy povrchu nijak významně neovlivňují rozměry součásti (jako třeba třískové obrábění), ale jejich přednostní význam spočívá v odstraňování nečistot z povrchu materiálu, který bude následně podléhat dalším úpravám. Při těchto metodách je využíváno chemických reakcí, vznikajících mezi působícím činidlem a nečistotami na povrchu nebo přímo se základním materiálem. [26]

Další skupinou metod čištění povrchu a povrchových úprav je čištění založené na mechanickém principu. Pomocí mechanických úprav povrchu součástí je dosaženo požadované jakosti povrchu, která je hodnocena především povrchovou drsností. Jejich hlavním cílem je především očistit povrch od nečistot, zajistit přilnavost následujících vrstev, zvýšit protikorozní odolnost a v neposlední řadě vytvořit vzhledově přijatelný povrch a zlepšit jeho mechanické vlastnosti. [26; 27]

Při čištění materiálů pomocí tepelných účinků je využíván převážně koncentrovaný zdroj tepla, který působí na povrch čištěného materiálu. Díky tomuto teplu je z povrchu součásti odpařována malá vrstva materiálu, jenž obsahuje nečistoty ulpěné v povrchové vrstvě součásti. Mezi tato znečištění se řadí např. mastnota, koroze nebo staré nátěry. Nejpoužívanějšími a nejrozšířenějšími metodami tepelného čistění materiálů jsou např. laserové čištění, čištění plazmou či termické odlakování. [28; 29]

Pro dosažení požadované kvality povrchu součásti vzhledem k jeho čištění a odmaštění je nutné zohlednit několik základních vstupních faktorů. Mezi tato kritéria se řadí samotný způsob a technologie čištění, volba vhodného čisticího a odmašťovacího přípravku a potřebný čas pro dosažení požadované kvality povrchu. [2]

Mezi nejpoužívanější a nejrozšířenější způsoby povrchového čištění či opracování materiálů se řadí např. moření, odmašťování, broušení, tryskání, omílání a laserové čištění. Každá ze zmíněných metod má určité výhody pro konkrétní průmyslové odvětví a pro odstranění určitého typu nečistoty, ať už se jedná o mastnotu, otřepy, korozi, prach či jiné znečištění. V případě broušení se však nejedná zcela o čistící technologii, ale pouze o způsob povrchového opracování materiálu, jelikož při broušení dochází k abrazivnímu úběru materiálu obrobku zrny brusiva. Pomocí této technologie lze odstranit z povrchu velké množství nečistot (především korozi) a velikost úběru může být teoreticky libovolně velká, avšak právě kvůli relativně velkému úběru materiálu z povrchu obrobku se broušení nevyužívá přímo pro čištění povrchu od nečistot (zejména těch malých či mikroskopických – prach a mastnota), nýbrž pro jeho úpravu či dokončení v rámci procesu výroby (např. zlepšení drsnosti povrchu). [30]

3.1 Odmaštění povrchu

Strojírenství a odmašťování jsou pojmy, které k sobě neodmyslitelně patří. Při pohledu na neustále rostoucí nároky na kvalitu, ekologii a v neposlední řadě též na ekonomickou stránku provozu je odmašťování významným prvkem pro dosažení kvalitního výsledku a v některých operacích je přímo klíčovou fází. [31]

Samotné odmašťování je pojem pro odstraňování všech druhů ulpěných nečistot z povrchu. Ulpěné nečistoty jsou k povrchu kovového materiálu vázány převážně adhezními silami. Do skupiny těchto nečistot patří především zbytky mastných látek, látky tukového charakteru (např. pozůstatky konzervačních prostředků, obráběcích a chladicích emulzí nebo řezných olejů), kovové nečistoty (např. kovový prach a třísky z předchozího mechanického opracování) a nerozpustné anorganické produkty (např. atmosférický prach, zbytky brusiv a leštících prostředků). Cílem procesu odmaštění je uvolnění těchto nečistot z povrchu, jejich převedení do roztoku či emulze a na závěr zabránění jejich opětovnému vyloučení na kovový povrch. [26]

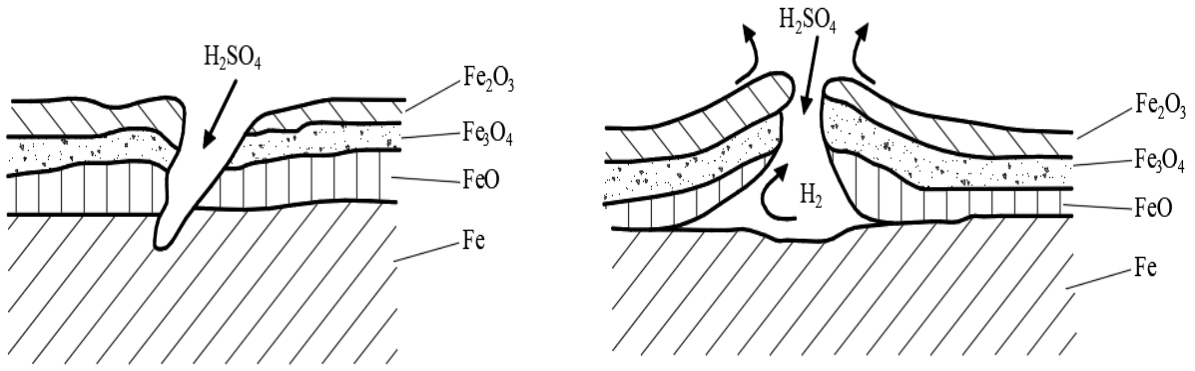
V závislosti na druhu probíhajících pochodů lze technologii odmašťování rozdělit na odmašťování v organických rozpouštědlech, odmašťování ve vodných alkalických roztocích, odmašťování pomocí ultrazvuku nebo páry a na odmašťování vodnými tenzidovými prostředky označované jako saponáty. Nejjednodušší metoda odmašťování s vysokou čistící mohutností při relativní jednoduchosti procesu je odmašťování v organických rozpouštědlech. Hlavním úkolem rozpouštědel je převedení filmotvorné složky do roztoku, což je směs dvou nebo více substancí mající jednotné chemické a fyzikální vlastnosti v celém objemu. Tento způsob však nelze použít na vlhké povrchy a nelze s ním odstranit heteropolární nečistoty (např. pot nebo otisky prstů). Další nevýhodou je obtížná likvidace použitých rozpustidel. Mezi nejznámější čistidla se řadí petrolej a benzín. Petrolej je však vhodný pouze pro hrubé (předběžné) čištění, neboť i po odmaštění zůstává povrch slabě mastný a je nutné ho dočistit jinými způsoby. Benzín je kvůli své hořlavosti používán pouze v malém množství pro ruční čištění. [26; 32; 33]

Při odmašťování alkalickými roztoky lze odstranit i heteropolární nečistoty, které jsou ve vodě nerozpustné. Rostlinné i živočišné tuky a oleje jsou při odmašťování chemicky přeměněny – dojde k jejich zmýdelnění. Oproti tomu mastné látky minerálního původu jsou chemicky odolnější a jejich odstranění je možné pouze působením některých přísad v odmašťovací lázni, díky nimž se rozptylují do roztoku – emulgují. Účinnost procesu odmašťování v alkalických roztocích lze zvýšit pomocí elektrického proudu, kdy elektrolýzou dojde k rozkladu látek alkalického roztoku. Elektrolytické odmašťování lze rozdělit dle způsobu zapojení čištěného předmětu v lázni na katodické, anodické a katodicko-anodické. Při tomto procesu se na katodě vylučuje vodík a alkalický kov, který se kvůli své nestálosti ihned slučuje s vodou na alkalický hydroxid. Pokud je čištěný předmět katodou, odmašťování je zintenzivněno chemickým působením koncentrovaného hydroxidu a odtrháváním mastnot pomocí vznikajících bublinek vodíku. Nevýhodu zde představuje možnost difuze vodíku do povrchu materiálu, s čímž je spojené nebezpečí vzniku vodíkové křehkosti. Difuzi vodíku lze předejít zapojením předmětu na anodu, díky čemuž dojde k rozpouštění kovů a vylučování kyslíku, který zintenzivňuje proces odmašťování. [26]

3.2 Moření materiálů

Moření se řadí mezi základní a nejrozšířenější postupy povrchové úpravy ocelí soustředící se výlučně na odstranění vlastních nečistot (anorganických sloučenin), které jsou k povrchu kovu vázány chemicky (chemisorpcí), čímž vytvářejí s povrchem kovu chemickou vazbu. Jedná se o korozní nečistoty vznikající na povrchu kovu v důsledku interakce povrchu s okolním prostředím nebo v důsledku chemické reakce při tepelném zpracování. Tyto nečistoty představují např. okuje (skládající se z oxidů kovu při již zmíněném tepelném zpracování) nebo rez (vzniká pomalým působením atmosférické vlhkosti na povrch materiálu). Při výrobě ocelí je moření zařazeno před nebo po tvářecích procesech (např. válcování za tepla či za studena nebo tažení). Dále často navazuje na žíhání bez ochranné atmosféry a zároveň je základem chemických předúprav povrchu ocelí před nanášením různých povlaků. [26; 34]

K moření uhlíkatých, nelegovaných ocelí se nejčastěji používají minerální kyseliny, především kyselina solná (HCl) a kyselina sírová (H_2SO_4). Mechanismy moření při odstraňování okují v kyselině sírové jsou vyobrazeny na obr. 9. V ostatních případech se jako mořicí médium využívá kyselina dusičná, fluorovodíková nebo i směsi kyselin. Pro moření zinku a hliníku lze použít alkalické roztoky. [26; 34]



a) postup odleptávání b) postup odlupování

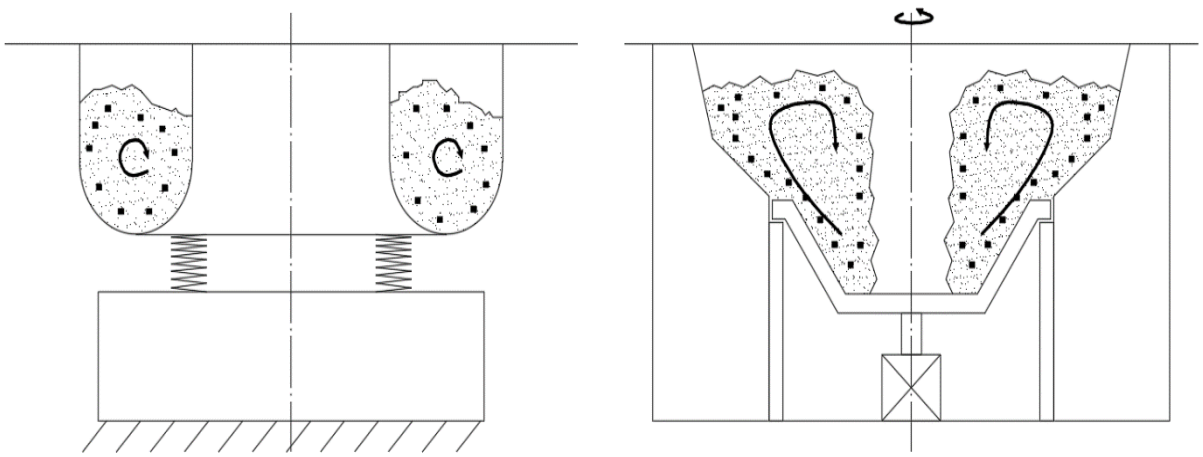
Obr. 9 Schéma rozpouštění a odlupování okují kyselinou sírovou [26].

Mezi parametry ovlivňující kvalitu a rychlost moření patří chemické složení kovu, předcházející technologická operace, použitá anorganická kyselina, teplota anorganické kyseliny a použití mořícího inhibitoru, který představuje směs látek, jež se za různých podmínek vzájemně doplňují v inhibičních schopnostech. Během moření se mimo okujové a korozní vrstvy rozpouští i kovová matrice, v důsledku čehož se zvyšuje spotřeba kyseliny, náklady na zpracování odpadu a zároveň roste nebezpečí difuze vodíku do kovové matrice. Právě z tohoto důvodu se do mořicích kyselin přidávají tzv. inhibitory moření, díky nimž dochází k redukci působení mořicí kyseliny na základní materiál mořeného tělesa a k zabránění vzniku vodíkové křehkosti. Jinými slovy jsou mořicí inhibitory látky podporující rozpouštění oxidů bez zvyšování rozpustnosti kovů. Ochranné působení inhibitorů závisí na jejich koncentraci a složení, dále na koncentraci a teplotě mořicí kyseliny a na složení materiálu určeného k moření. [34; 35]

3.3 Technologie omílání

Omílání je způsob mechanické úpravy povrchu, jehož princip spočívá v úběru materiálu a jeho vyhlazování vlivem vzájemného působení omílaných součástí s omílacími prostředky. Tato technologie povrchové úpravy je vhodná především pro hromadnou a velkosériovou výrobu, kde dochází k úpravě velkého množství menších dílců. Pomocí omílání je možné řešit nepřeberné množství technologických požadavků, jako je např. odstraňování otřepů, okují či rzi, zaoblování hran, vyhlazování a leštění povrchu, moření, odmašťování a čištění. [26; 36]

Volba stroje závisí na velikosti omílaných součástí, jejich počtu, tvaru a na požadované intenzitě omílání. Dle použitého strojního zařízení se omílací proces dělí na rotační, vibrační a odstředivý, viz obr. 10. V závislosti na druhu operace jsou zvoleny omílací prostředky i chemické prostředky. Velikostí zrna i druhem pojiva tohoto prostředku lze regulovat rychlost ubírání materiálu ze součástí a jejich povrchovou drsnost. Omílací prostředky jsou nejčastěji vyráběny z umělého korundu, kovu nebo i z přírodních materiálů, nicméně tyto organické materiály mají oproti předcházejícím nižší životnost. Proces je obohacen i o chemické prostředky, které mají za úkol zkvalitnění procesu v podobě čištění (jak omílaných součástek, tak i omílacích prostředků), zlepšení brousicího účinku a vytvoření protikorozní ochrany během a po omílání. [26; 36]



a) vibrační omílání b) odstředivé omílání

Obr. 10 Schémata omílacích strojů [26].

Technologií omílání lze odstranit velké množství nečistot z povrchu materiálu. Nejedná se však pouze o odstranění vrstvy rzi, okují nebo otřepů, ale pomocí omílání je možné odstranit i nežádoucí zabarvení po předchozích tepelných zpracováních. Konvenčními sloučeninami, jež jsou pH-neutrální, nelze často těchto požadovaných cílů dosáhnout a z tohoto důvodu je nutné využít speciální zásadité nebo kyselé sloučeniny (dojde k moření během omílacího procesu). Po použití kyselých sloučenin však musí být do procesu omílání zařazen intenzivní proplach čistou vodou do té doby, dokud vzorky z oplachu nereagují neutrálně. Po této neutralizaci následuje ještě pasivace z důvodu ochrany ocelových dílů proti korozi a ochrany součástí z barevných kovů proti ztmavnutí a zašlosti. S využitím určitých speciálních sloučenin lze moření a pasivaci spojit do jedné operace, jelikož použité látky mají vícenásobný účinek. [36]

3.4 Tryskání povrchu

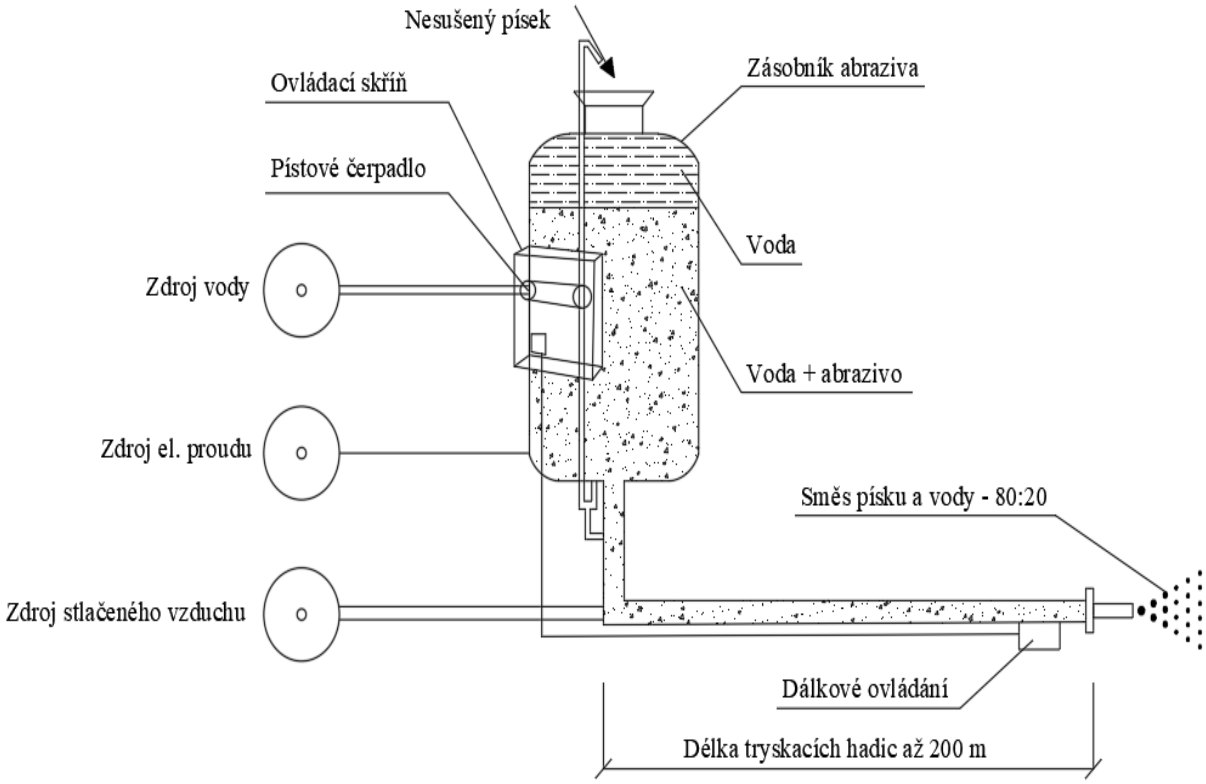
Princip technologie tryskání spočívá ve vrhání či metání drobných těles (převážně zrnitá) z různých materiálů na povrch čištěné součásti. Těmto tělesům je kinetická energie udílena pomocí stlačeného vzduchu, tlaku vody, metacího kola nebo kombinací tlaku vzduchu s tlakem vody. Práce, kterou urychlená tělesa vykonávají na povrchu otryskávaného materiálu závisí na kinetické energii těchto těles, dále na jejich tvaru a tvrdosti. Vrhaná ostrá tvrdá zrna působí na materiál podle úhlu dopadu a díky své ostrosti vysekávají z povrchu částice kovu, zatímco zbavují předmět nečistot. Zdrsnění otryskaného povrchu je spjaté s jeho velikostí a materiálovým a chemickým složením. Při vrhání tupých zrn naopak nedochází k úběru materiálu, ale k jeho otloukání, čímž je na jeho povrchu vytvořeno velké množství malých důlků. Tato povrchová vrstva je tedy nejen očištěna, ale zároveň i zpevněna. Nejpoužívanějšími otryskávacími materiály jsou litinová drť a broky, křemičitý písek, sekaný drát, brusiva (karbid křemíku, korund), suchý led a umělé nebo speciální materiály (plastické hmoty, skleněné kuličky). [26; 37]

Cílem tryskání je očištění materiálu od korozních produktů, oxidů, písku, grafitu, okují, starých nátěrů a dalších nečistot. Dále je pomocí tryskání docíleno požadované drsnosti povrchu upravovaného výrobku. Jedná se o důležitou operaci nezanedbatelnou v technologickém postupu při povrchových úpravách, jakou jsou žárové nástřiky nebo aplikace nátěrových hmot. Pomocí tryskání jsou z povrchu materiálu odstraněny oxidy a produkty koroze, přičemž dojde ke zdrsnění plochy pro mechanické zakotvení povlaku či nátěru. V důsledku tohoto zdrsnění dojde ke zvětšení kontaktní plochy mezi povlakem a základním materiálem, díky čemuž je zvýšena adhezní přilnavost povlaku. Hodnotu neboli stupeň otryskání lze zvolit dle normy

ČSN EN ISO 8501-1, která se zabývá přípravou ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků. [26; 37]

Kvalitu otryskané plochy nejvíce ovlivňuje vzdálenost trysky od povrchu otryskávaného materiálu, náklon trysky, konstantní rychlost a v neposlední řadě směr a styl tryskání. Velikost výkonu tryskání, který je označován jako tzv. úběr, lze regulovat pomocí několika provozních parametrů např. úhlem natočení, vzdáleností a velikostí trysky, velikostí zrna, tlakem a druhem otryskávaného materiálu. [37]

Tak jako všechny technologie i tryskání prochází určitým vývojem a inovací, které zajišťují zlepšení a zkvalitnění provozu. Mezi tyto inovace lze zařadit např. tryskání zvlhčeným abrazivem a suchým ledem. U technologie tryskání zvlhčeným abrazivem (obr. 11) je v tlakové nádobě namíchána směs písku a vody v poměru 80 : 20. Ve srovnání s tryskáním suchým pískem, je díky tomuto poměru snížená prašnost metody až o 95 %, což umožňuje tuto technologii použít na volném prostranství (bez budování konstrukcí zabraňujících úletu prachu) nebo v interiérech. U technologie tryskání suchým ledem je největší inovativní posun ve vyřešení odpadového materiálu z čisticího média, jelikož po dopadu na otryskávaný povrch dochází u suchého ledu k sublimaci. Tato metoda je poměrně univerzální a z tohoto důvodu je využívána v mnoha průmyslových odvětvích (např. automobilový, letecký, plastikářský a slévárenský průmysl). [38; 39]



Obr. 11 Schéma zařízení pro tryskání zvlhčeným abrazivem [39].

3.5 Laserové čištění

Dlouhodobě rozšířené téma je hledání efektivních čistících technologií, pomocí kterých lze zvýšit produktivitu práce či výroby, získat kvalitnější povrch součásti a v neposlední řadě i snížit náklady na provoz. Zdroje laserového záření začaly nacházet své uplatnění v oboru povrchových úprav (především při odstraňování povrchových vrstev kovů) již od konce osmdesátých let. V tomto období se začaly aplikovat lasery s nanosekundovými délkami pulzů a bylo zjištěno, že díky velice krátkému působení laserového svazku na materiál dochází k malému tepelnému ovlivnění tohoto materiálu a ke zkvalitnění jeho plochy, čímž lze vynechat jinak nezbytné finální dokončovací operace. Konkrétně se převážně jednalo o pevnolátkové laserové systémy Nd:YAG čerpané lampami, jež v polovině devadesátých let dosahovaly průměrného výkonu 100 W při délce pulzu 100 ns, díky čemuž v konečném důsledku došlo ke zvýšení účinnosti a rychlosti procesu. [40; 41]

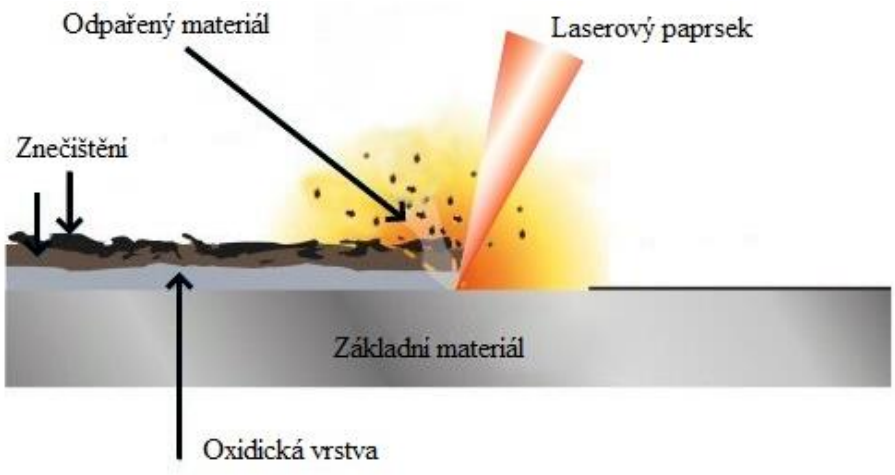
Novodobé výrobní procesy pro technicky modernější zařízení neustále vyžadují kvalitnější a preciznější postupy. V technologii povrchových úprav se zvyšuje potřeba odstraňování velmi drobných částic nebo filmů kontaminantů z různých povrchů materiálů. Technika pro odstraňování submikronových částic, které mohou k povrchu přilnout relativně velkou silou, musí být schopná tyto částice kvalitně odstranit, ale zároveň nesmí poškodit čištěný povrch. Použití bezkontaktní metody čištění povrchu v podobě paprsku fotonů se v průmyslovém prostředí stalo předmětem velkého zájmu. [42]

Čištění materiálů pomocí paprsku laseru je přelomovou technologií, a to především z hlediska poměru nákladů a kvality s ověřenou a prokazatelnou dlouhodobou stabilitou. Díky této metodě lze ušetřit až 90 % nákladů (v porovnání s ostatními dostupnými technologiemi čištění povrchu). Je prokázáno, že investice do této technologie se vrátí za rok z ušetřených financí na provozní náklady spojené s čištěním. Zároveň se jedná o velice efektivní a ekologickou technologii, která je již laureátem několika významných enviromentálních ocenění. Povrchy, jež bylo nutné čistit v několika dlouhých cyklech, jsou laserem čištěny bezkontaktně a ohleduplně k čištěnému materiálu, a to vše jen na jeden průchod laserového paprsku. Díky své jednoduché integraci lze i povrch rozměrnějších součástí efektivně opracovat vysokou rychlostí. [40; 41; 43]

Laserové čištění představuje vůči konvenčním čistícím technologiím efektivnější, ekologičtější a ekonomičtější alternativu. Ekologický proces laseru spočívá v tom, že nejsou vyžadována žádná aditiva v podobě abraziv či chemikálií, tudíž nevzniká ani potřeba řešit jejich skladování, manipulaci a ekologickou likvidaci. Laserové zařízení však skýtá ještě další výhodu v podobě snadné a rychlé implementace veškeré laserové jednotky do výrobní linky a možnosti okamžitě začít zařízení využívat. [41; 43]

3.5.1 Princip laserového čištění

Čištění materiálů laserem funguje díky laserové ablaci, ke které dochází při odstranění vrstvy materiálu či povlaku (nečistot) laserovým paprskem, viz obr. 12. Jedná se o fototermální jev, jenž se projevuje postupným rozbíjením jednotlivých molekulárních vazeb a následným odstraňováním materiálu vlivem zahřívání způsobeným absorpcí záření. Odstraňování nežádoucí vrstvy materiálu je doprovázeno odpařováním, tavením a fázovou explozí. Pokud ablace vznikne v důsledku vysoké intenzity záření, dojde na povrchu k výbuchům a odlétávání částic materiálu (vlivem fázové exploze) nejen v plynném, ale i v kapalném skupenství. Výsledkem tohoto procesu je odpaření vrstvy materiálu. Avšak kromě odpařovacího jevu a fázové exploze vzniká i plazma, která snižuje intenzitu záření dopadajícího na ozařovaný povrch. [44; 45]



Obr. 12 Princip laserového čištění [45].

Každý materiál má odlišné vlastnosti, tudíž i různé molekulární vazby a tím i specifický ablační práh. Z důvodu zajištění úspěšného odstranění nečistot z daného materiálu, musí laserový paprsek přenést vyšší energii, než je ablační práh těchto nečistot. Základní materiál má zpravidla mnohem vyšší ablační práh než nečistoty na něm ulpěné, díky čemuž dochází pouze k odstranění nečistot a povrch čištěné součásti zůstane nedotčen. [45]

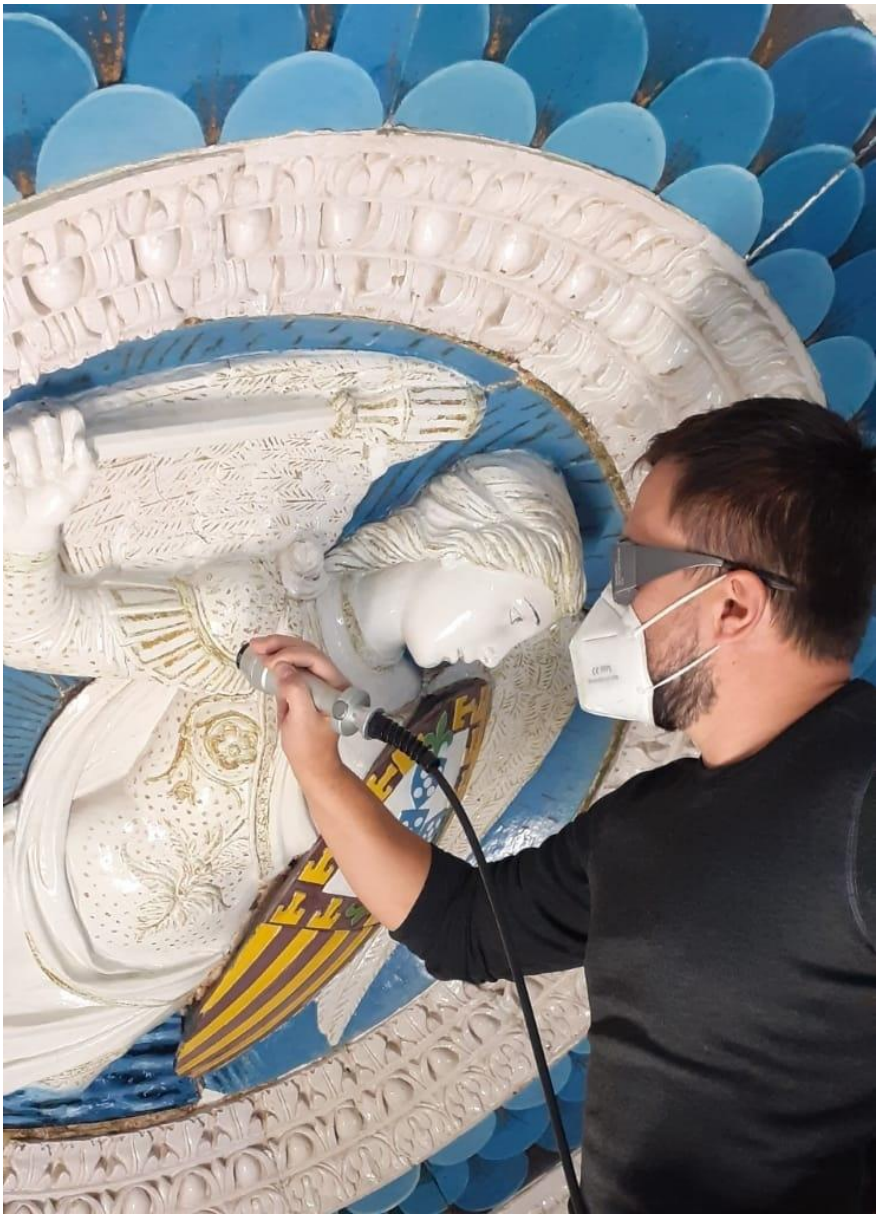
Účinnost laserového čištění lze zvýšit několika jednoduchými způsoby. Prvním z nich je úhel dopadu laserového paprsku na čištěný povrch. V případě paprsku skloněného pod ostrým úhlem je termoelastické napětí způsobené laserovým zářením značně vyšší než při kolmém úhlu paprsku k materiálu. Ostrý úhel tedy zajistí snazší odtržení kontaminační částice od čištěného povrchu. Dalším způsobem zvýšení účinnosti procesu je nanesení kapalného filmu na znečištěný povrch, tzv. čištění parním laserem. Režim tohoto způsobu čištění je velmi účinný pro odstranění částic velikosti mikronů až submikronů. Principem je rychlé přehřátí následované rychlým explozivním odpařením kapalného filmu, nejčastěji tvořeného směsí vody a ethanolu nebo isopropanolu. Akustický tlakový pulz o velké síle je projevem exploze, která je zodpovědná za odstranění částic znečišťujících povrch materiálu. [42; 46]

3.5.2 Aplikace v průmyslu

Laserové čištění díky svým výhodám, jako jsou ekologičnost, rychlá investiční návratnost, flexibilita, rychlost a kvalita procesu čištění, nachází využití v mnoha průmyslových oblastech. Metoda je hojně využívána např. pro odstraňování barev a laků (obr. 13), přípravu pro povrchové úpravy, odmašťování povrchů před pájením nebo svařováním, pro konečnou úpravu svarů a v potravinářském průmyslu kupříkladu pro čištění olejových nánosů. [40; 43]

Obr. 13 Rozdíl mezi očištěnou (vpravo) a neočištěnou (vlevo) plochou [40].

Technologii laserového čištění lze uplatnit i při čištění nekovových materiálů, ať už se jedná o syntetické či přírodní povrchy. Vzhledem ke své šetrnosti k základnímu materiálu je tato metoda využívána i při restaurování nebo konzervování uměleckých děl, kamenných fasád a bronzových či pískovcových soch. Čištění pomocí laserového paprsku tak nalezlo uplatnění např. při opravách městských památek, které byly poškozeny projevy vandalismu v podobě graffiti. Na obrázku č. 14 je zachycena renovace uměleckého díla v bazilice San Miniato al Monte ve Florencii. [40; 47; 48]



Obr. 14 Renovace uměleckého díla pomocí laseru [48].

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Hlavním cílem této diplomové práce je studie vlivu světelného paprsku laserového zařízení na čištěný materiál (resp. na jeho drsnost povrchu) při procesu čištění. V rámci práce s laserovou čističkou byl vznesen požadavek na určení provozních parametrů, při jejichž nastavení dojde k rychlému a kvalitnímu výsledku v podobě čisté plochy. Provozními parametry, které byly zkoumány, jsou výkon a frekvence laseru.

V této části diplomové práce bude představen postup prací se vzorky a následné vyhodnocení naměřených dat. Pro provedení experimentální studie bylo nutné vzorky připravit, očistit pomocí laserového paprsku, změřit drsnost jejich povrchu a následně vyhodnotit naměřená data. Tyto jednotlivé kroky jsou podrobně popsány v následujících podkapitolách 4.1 až 4.4.

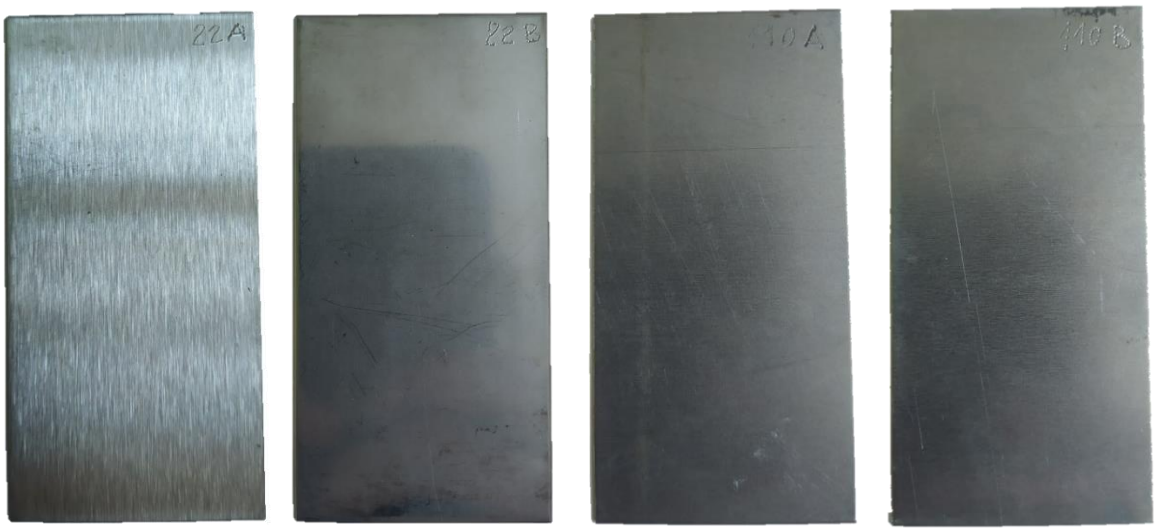
Dle požadavků společnosti ŽL bylo testování provedeno na dvou materiálech, a to na korozivzdorné oceli 17 241 a na uhlíkové oceli 11 443. Důvodem pro volbu těchto materiálů byla skutečnost, že se s nimi nejčastěji pracuje ve výrobním procesu společnosti. Zároveň se jedná o materiály odlišné co do chemického složení a mechanických vlastností.

Ocel s označením 17 241 je jednou z nejvíce používaných korozivzdorných ocelí. Jedná se o austenitickou chrom-niklovou ocel, která je též označována jako potravinářská. Toto označení si vysloužila díky své odolnosti vůči vodě a slabým kyselinám. Dalšími výhodami jsou její vlastnosti v podobě snadné svařitelnosti, leštitelnosti a kujnosti. Zastoupení v průmyslovém odvětví nachází ve farmacii, chemickém a papírenském průmyslu, ale především v potravinářství, jak už napovídá její název „potravinářská ocel“. Zde je zpracovávána např. na různé druhy vybavení v pivovarnickém odvětví, tukovém průmyslu nebo na jatkách. [49; 50]

Ocel s označením 11 443 je nelegovanou konstrukční ocelí obvyklé jakosti. Jedná se o ocel vhodnou ke svařování se zaručenou svařitelností, jež se využívá např. pro výrobu mírně namáhaných hřídelů, ozubených kol a zápustkových výkovků. [51]

4.1 Příprava vzorků

Testovací vzorky o rozměrech 80 x 40 mm byly vyrobeny z tabule plechu o tloušťce 1 mm, a to pomocí technologie stříhání. Testovací sada vzorků čítala 18 kusů od každého ze dvou výše zmíněných materiálů. Celkem tedy bylo vyrobeno 36 kusů plíšků. Rozpoznání v testovací sadě bylo zajištěno pomocí označení v podobě vyrytí číslice a písmena do pravého horním rohu u každého vzorku, viz obr. 15.



Obr. 15 Příklad vyrobených a označených vzorků.

Následně byl jeden vzorek od každého materiálu podroben analýze chemického složení, z důvodu ověření vstupních dat od prodejce. K tomuto účelu byly využity přístroje od distributora BAS Rudice spol. s r.o., a to ruční spektrometr a analyzátor kovů řady DELTA a stolní jiskrový opticko-emisní spektrometr Q4 TASMAN.

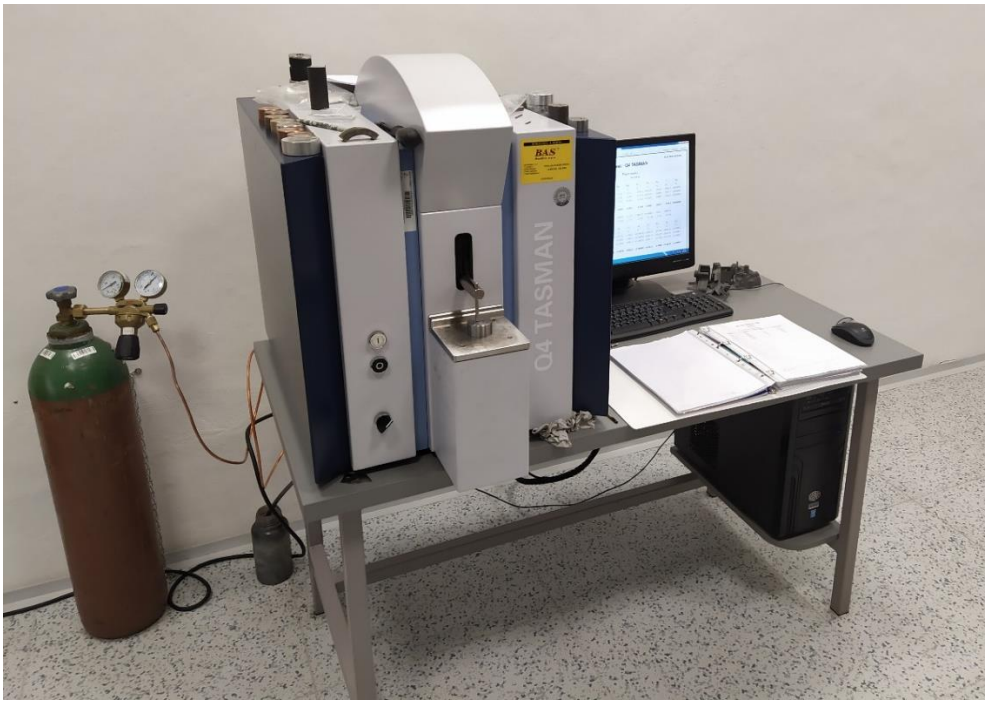
Prvním použitým spektrometrem byl analyzátor kovů DELTA od společnosti Innov-X Systems Inc. (obr. 16). Pomocí tohoto přístroje je možné provést chemickou analýzu kovů nedestruktivním způsobem, přičemž nezáleží na velikosti či tvaru zkoumaného tělesa a zároveň není potřeba provést jeho jakoukoliv povrchovou úpravu, která by předcházela samotnému měření. Mezi schopnosti DELTA přístrojů patří rozpoznání široké škály prvků (např. Ti, V, Cr, Al, Mn, Mg, Si, Pb) s obrovskou přesností a rychlostí. Naměřená data lze pak pomocí USB nebo Bluetooth přenést do počítače, kde dojde k jejich následnému zpracování. Bateriové napájení u ručního zařízení zajišťuje prakticky neomezenou mobilitu, která je při použití zařízení v terénu velkou výhodou. Mezi další výhody spektrometrů skupiny DELTA se řadí jejich voděvzdornost a úplná prachotěsnost. Právě díky svým vlastnostem jsou tyto spektrometry používány v mnoha odvětvích, např. ve sběrných surovinách, kde se využívají ke třídění kovových materiálů, dále jsou používány v laboratořích pro rychlou analýzu chemického složení kovů a v neposlední řadě je lze využít i k analýze půdy. [52]

Obr. 16 Spektrometr řady DELTA od BAS Rudice spol. s r.o.

Spektrometr Q4 TASMAN byl druhým využitým zařízením pro analýzu chemického složení u použitých vzorků. Tento spektrometr byl použit především pro ověření získaných dat ze spektrometru řady DELTA, kterým byla provedena prvotní chemická analýza, jelikož Q4 TASMAN umožňuje provést detailnější a přesnější rozbor chemického složení.

Stolní zařízení Q4 TASMAN (obr. 17) je opticko-emisní spektrometr používaný k analýze chemického složení kovových materiálů, jehož výrobcem je společnost Bruker s.r.o. Jedná se o jiskrový typ spektrometru, který k rozboru chemického složení vzorku využívá elektrické výboje, jež probíhají v jeho jiskřišti mezi elektrodami. Tento přístroj se pyšní velice dobrou stabilitou a přesností měření pro všechny prvky, odolností vůči prašnosti nebo změnám okolní

teploty a tlaku, které by u jiných zařízení zapříčinily zkreslení výsledků. Zařízení pro svou činnost vyžaduje přívod argonového plynu, avšak díky neustálým inovacím byla jeho spotřeba oproti jiným zařízením podobného typu extrémně snížena. Chemická složení zkoumaných materiálů jsou uvedena v přílohách 1 a 2. [53]



Obr. 17 Spektrometr Q4 TASMAN od BAS Rudice spol. s r.o.

Pro provedení experimentu bylo nutné vzorky rozdělit do určitých skupin a připravit na samotný proces laserového čištění. Dle domluvy se společností ŽL bylo stanoveno, že vzorky budou podrobeny dvěma druhům znečištění a proces čištění s následujícím zkoumáním drsnosti povrchu bude proveden pouze na pohledové straně plíšků označené písmenem „B“. Za zástupce znečištění byly zvoleny jedny z nejběžnějších nečistot, jež mohou být v průmyslové praxi odstraňovány, a to barevný nátěr a dílenské znečištění. Pod termínem dílenské znečištění si lze představit běžná znečištění z dílny, jako jsou např. mastnota, prach, piliny, kovové třísky a pozůstatky jiných materiálů. První krok v utváření skupin vzorků tedy spočíval v rozdělení plíšků dle druhu znečištění, čímž vznikly v rámci každého materiálu dvě skupiny.

Barevného znečištění bylo dosaženo pomocí akrylové barvy ve spreji s kovově zlatým efektem (více údajů o použité barvě viz příloha 3). Tato barva je bezolovnatá s vysokou krycí schopností a odolností proti povětrnostním vlivům. Její aplikace na plochy vzorků byla provedena v souladu s návodem uvedeným na obalu lahve, čímž byly dodrženy všechny důležité podmínky stanovené výrobcem. Postup nanášení barevné vrstvy spočíval v důkladném očištění potřebných ploch (především od prachu a mastnoty), protřesením dózy s barvou po dobu dvou minut a jejím následným nanesením na vzorky ze vzdálenosti v rozmezí 25 až 30 cm. Celý proces aplikace barevného nátěru byl prováděn v závětří, aby nedocházelo k odfouknutí barvy, při teplotě okolí 18 °C. Po znečištění byly plíšky na 48 hodin přesunuty do uzavřené místnosti, kde při pokojové teplotě cca 22 °C probíhal proces sušení. Posledním krokem v přípravě vzorků v rámci tohoto znečištění bylo jejich zabalení do papírových ubrousků, které při převozu vzorků chránily natřené plochy proti otěru.

Aplikace dílenského znečištění na vzorky spočívala v zamaštění a zašpinění daných ploch na plíšcích. Pro nanesení mastnoty byl použit starý kus bavlněné látky, která byla namočena do motorového oleje 10W-40 (více informací o použitém oleji viz příloha 4). Takto potřísněnou

látkou byly krajní plochy plíšků otírány, čímž docházelo k jejich zamaštění. K zajištění alespoň přibližně stejného znečištění na všech plochách plíšků, byla látka před každým použitím opětovně kontaminována. Po zamaštění byl na plochy pomocí pracovních rukavic proveden nános prachu, dřevěných pilin a kovových třísek.

Vzhledem k tomu, že na vzorcích měla být zkoumána změna drsnosti povrchu po očištění laserem, bylo nutné rozdělit plochy na plíšcích tak, aby jedna z nich zůstala zachována ve své původní kvalitě (tato plocha sloužila pro porovnání s těmi očištěnými) a zbylá část plíšku mohla podlehnout znečištění. Bylo stanoveno, že plíšky budou rozděleny na třetiny, přičemž prostřední část zůstane ponechána s původní drsností a nebude ničím znečištěna a ani čištěna laserem. K tomuto účelu byla využita papírová lepicí páska, která měla za úkol ochránit prostřední část plíšku před působením nečistot a zároveň vytvořila hranice mezi čistou plochou a těmi znečištěnými (obr. 18).

Obr. 18 Vzorek připravený na nános nečistot.

V rámci každého druhu znečištění bylo nutné vzorky dále rozdělit na skupiny podle nastavených parametrů na laserovém čisticím zařízení, kterými byly výkon a frekvence laseru. V každé z těchto skupin byly vždy tři plíšky od jednoho typu znečištění. Celkově tak byly vzorky rozděleny do třech skupin se dvanácti plíšky, viz tab. 1.

Tab. 1 Rozdělení vzorků do skupin dle znečištění.

	Uhlíková ocel 11 443		**Korozivzdorná ocel 17 241**	
	Znečištění barvou	Dílenské znečištění	Znečištění barvou	Dílenské znečištění
	číslo vzorku	číslo vzorku	číslo vzorku	číslo vzorku
Skupina 1	114	117	1	15
	115	119	2	16
	116	121	3	17
Skupina 2	106	107	4	19
	113	108	5	20
	124	112	6	21
Skupina 3	109	118	7	22
	110	120	8	23
	111	122	9	24

4.2 Očištění vzorků

Čištění připravených vzorků bylo provedeno pomocí ručního laserového čistícího zařízení LSF500C značky HGTECH. Tento stroj se skládá z několika součástí, kde převážná většina z nich je uložena v mobilní skříni vybavené ovládacím panelem. Mobilita skříně je zajištěna

ustavením na kolečkách, díky čemuž je možné zařízení dopravit téměř kamkoliv. V této skříni se nachází zdroj laserového záření RFL-P200 a vodní chlazení CW-5200, viz obr. 19. Při práci s laserem bylo nutné dodržovat určité bezpečnostní zásady jako např. nošení ochranných brýlí a nezasahování tělem do trajektorie laserového paprsku. Vzhledem k tomu, že tento typ laseru není vybaven přídavným odsávacím zařízením, které by odstranilo z ovzduší vzniklé zplodiny z procesu čištění, bylo nutné používat ochranu dýchacích cest a pracoviště muselo být neustále odvětráváno.

Obr. 19 Pohled do otevřené skříně laserového čisticího zařízení.

Před samotným čištěním bylo nejprve provedeno odladění vstupních parametrů (výkon a frekvence laserového zařízení). Na laserovém přístroji bylo možné nastavit rozsah frekvence od 10 do 50 kHz při výkonu laseru od 10 do 100 % z možného maximální výkonu zařízení, který zde činil 200 W. Jeden z požadavků společnosti ŽL spočíval v nalezení optimálního výkonu při nastavení hodnoty frekvence na 30 kHz. Odladění bylo provedeno na několika pokusných vzorcích, které obsahovaly zkoumané znečištění. Při čištění pokusných vzorků byl zjištěn minimální přípustný výkon potřebný pro kvalitní odstranění povrchových nečistot, který pro oba druhy znečištění činil 40 % maximálního výkonu zařízení, tedy 80 W. Při nižších hodnotách výkonu laseru nebyl povrch dostatečně očištěn, kdy u dílenského znečištění byl povrch neustále mastný a v případě barvy nedošlo k jejímu plnému odstranění, viz obr. 20 (vlevo). Při zkušebním čištění barevného znečištění se dále vyskytl problém při nastavení vyšších výkonů laseru spočívající ve vzniku kapek, které se následně napekly na povrch vzorku a musely být manuálně odstraněny. Tento nedostatek byl pozorován pouze při velmi nízkých posuvech a u vzorků, kde došlo k nedokonalému nanesení barevného nátěru, viz obr. 20 (vpravo).

Obr. 20 Nedokonale očištěné povrchy.

Čištění probíhalo až do chvíle, kdy došlo k přijatelnému očištění ploch. U barevného nátěru bylo snadné poznat, kdy je plocha kvalitně dočištěna, ale u dílenského znečištění to bylo podstatně těžší, jelikož kovové třísky častokrát nebyly ze zkoumaného povrchu odstraněny, nýbrž došlo pouze k jejich spálení. Roli referenčního prvku pro očištěný povrch zde tedy zaujímala mastnota, přičemž plochy byly považovány za dočištěné, jakmile byla mastnota zcela odstraněna. Spálené kovové třísky a případné jiné zbytky materiálů byly po laserovém čištění setřeny pomocí hadru.

Pro zajištění pevného ustavení vzorku a zároveň ochrany střední části před laserovým paprskem byl využit papírový ubrousek a kovové těžítko, viz obr. 21. Papírový ubrousek sloužil jako ochrana ploch plíšku před poškozením (poškrábáním) od kovového těžítka a zároveň od kovových třísek, které obsahovalo dílenské znečištění. Po několika pokusech bylo zjištěno, že čistý papírový ubrousek odolává laserovému paprsku při jakémkoliv nastavení výkonu s frekvencí 30 kHz. Pokud ubrousek obsahoval nějaké znečištění, bylo laserem odstraněno a vlivem působení tepla na nečistoty došlo ke vzplanutí ubrousku, z tohoto důvodu musel být ubrousek neustále měněn za nový nebo byl o kousek přehnut tak, aby na povrchu byla pouze jeho čistá část.

Obr. 21 Vzorek připravený na laserové čištění.

Po odladění vstupních parametrů bylo provedeno laserové čištění na zkoumaných vzorcích. Čištění probíhalo pod sklonem laserové hlavy přibližně 45° s uvedenými nastavenými parametry výkonu a frekvence, viz tab. 2. Počet průchodů laserového paprsku a průměrný čas čištění dané plochy vycházel z předchozího odladění parametrů. V uvedené tabulce (tab. 2) lze vidět, že počet průchodů a průměrný čas čištění se se zvyšujícím výkonem zmenšovaly. Rovněž lze pozorovat, že pro odstranění barevného nátěru bylo potřeba delší působení laserového paprsku než při odstraňování dílenského znečištění. Toto platilo až do nastavení 90 % výkonu, kde byly oba druhy znečištění odstraněny na první průchod laserového paprsku.

Tab. 2 Přehled nastavených parametrů při laserovém čištění a výstupů z čistící operace.

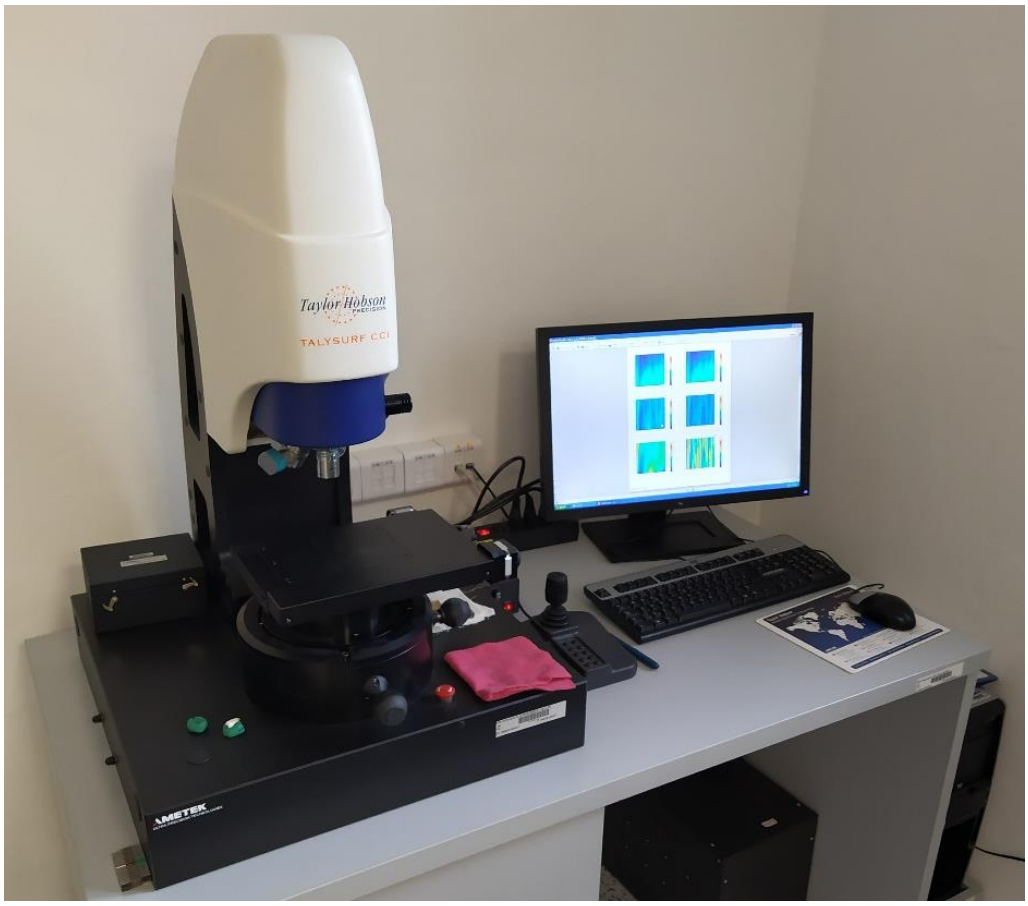
Barva				Dílenské znečištění			
Nastavené parametry		Časové a pohybové výstupy		Nastavené parametry		Časové a pohybové výstupy	
Výkon	Frekvence	Počet průchodů	Průměrný čas čištění laserem	Výkon	Frekvence	Počet průchodů	Průměrný čas čištění laserem
80 W	30 kHz	14	60 s	80 W	30 kHz	10	40 s
120 W	30 kHz	5	25 s	120 W	30 kHz	3	15 s
180 W	30 kHz	1	2 s	180 W	30 kHz	1	2 s

V posledním úseku čistící fáze experimentu bylo nutné provést dočištění laserem očištěných vzorků, jelikož do laboratorních přístrojů pro měření drsnosti mohou být vloženy pouze vzorky zcela bez jakéhokoliv znečištění, aby nedocházelo ke zkreslení měřených dat. Pro dočištění všech vzorků před samotným měřením drsnosti byl využit ultrazvukový čisticí přístroj od společnosti Chromservis s.r.o. (obr. 22). K dočištění vzorků v ultrazvukové čističce bylo využito skleněné kádinky a technického lihu. Kádinka byla z jedné čtvrtiny naplněna technickým lihem, následně byl do ní umístěn vždy pouze jeden plíšek určený k dočištění, přičemž námi zkoumaná strana na plíšku (strana B) byla otočena směrem vzhůru. Technický líh zde tvoří médium pro přenos ultrazvukových vln a zároveň zajistí odmaštění vložených vzorků. Kádinka se vzorkem a technickým lihem byla následně umístěna do ultrazvukového čisticího přístroje. Na tomto zařízení byla nastavena teplota 60 °C a časový odpočet na 10 minut. Po uplynutí nastaveného času byl vzorek pomocí kleští vyjmut z kádinky, položen na látkovou podložku a osušen proudem vzduchu z horkovzdušné pistole. Takto dočištěné a osušené vzorky mohly pokračovat do další fáze experimentu, kterou představuje měření drsnosti povrchu na zkoumaných plochách.

Obr. 22 Ultrazvuková čistička pro dočištění vzorků.

4.3 Měření drsnosti

Zjišťování parametrů drsnosti povrchu bylo provedeno kvantitativní metodou na bezdotykovém profilometrickém zařízení Talysurf CCI od společnosti Taylor Hobson (obr. 23), které pracuje na principu koherenční korelační interferometrie (CCI). Tato metoda je založena na rozboru křížové koherence dvou světelných paprsků o nízké koherenci, kde se jeden z nich odráží od měřeného objektu a ten druhý od referenčního zrcadla. Podle místa odrazu se paprsky nazývají měřicí a referenční. K vytvoření interferenčního obrazce s vysokým kontrastem dojde v případě, že si optické délky drah obou paprsků budou rovny. [54; 55]



Obr. 23 Přístroj Talysurf CCI.

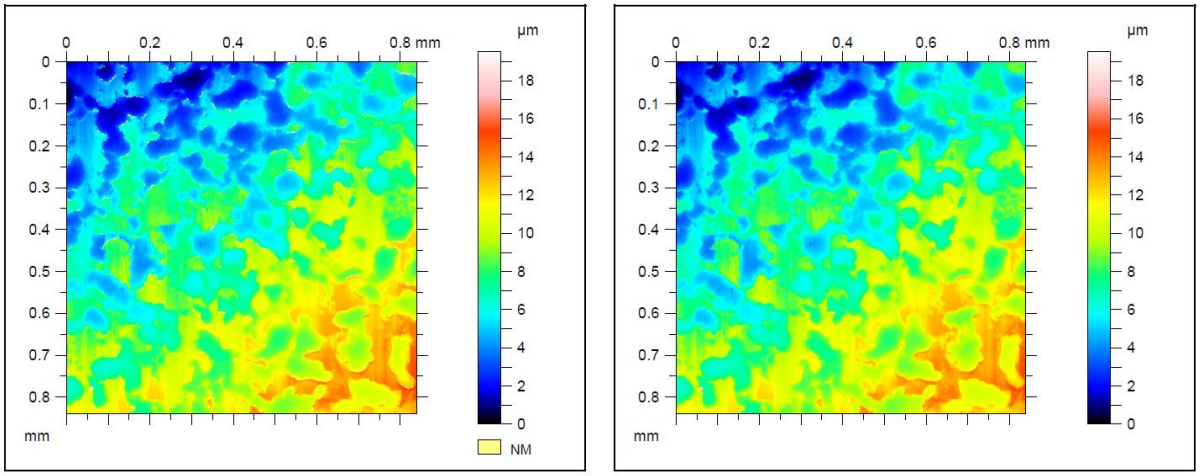
Jedná se o pokročilý typ měřicího interferometru, jež využívá inovativní korelační algoritmus. Díky své flexibilitě, která je zajištěna v první řadě možností měřit širokou škálu povrchů (leštěné nebo drsné, zakřivené, ploché nebo stupňovité s prakticky libovolnou odrazivostí) z různých materiálů (např. kovy, polymery a skla) a v druhé řadě díky automatizovanému stolku a automatickým měřicím postupům, nalézá využití v mnoha aplikacích vyžadujících vysoce přesnou nejen 2D, ale i 3D profilovou analýzu. Software pro analýzu povrchu TalyMap nachází uplatnění ve výzkumných laboratořích a průmyslových zařízeních po celém světě, ať už se jedná o letecký, automobilový či lékařský průmysl. [56]

Měření drsnosti ve výše zmíněném přístroji bylo provedeno v několika krocích, přičemž byly dodrženy podmínky pro měření drsnosti povrchu vyplývající z normy ČSN EN ISO 4288. Tato norma stanovuje metodiku měření, při jejímž dodržení je možné získat relevantní výsledky. Dále bylo zvoleno, které 2D a 3D parametry popisující drsnost povrchu budou měřeny, přičemž pro 2D byla využita norma ČSN EN ISO 4287 a pro 3D normy ČSN EN ISO 25178-2 a EUR 15178N. [57]

Testovací vzorky byly vždy postupně ustaveny na pracovním stolku zařízení Talysurf CCI tak, aby jejich zkoumaná strana byla směrem vzhůru k objektivu přístroje, na kterém bylo použito dvacetinásobné zvětšení. Poté došlo k nastavení přístroje a jeho zaměření na požadovanou plochu na plíšku. Následovalo změření profilových parametrů, se kterými se následně pracovalo v softwaru přístroje. Postup zjištění a vyhodnocení textury povrchu bude nyní představen na vzorku z oceli 11 443 s číslem 124, přesněji na jeho levé straně, avšak tyto vyhodnocovací kroky byly u všech vzorků provedeny shodně.

Prvním získaným snímkem byla vizualizace analyzované plochy (obr. 24) o rozměrech 0,8 x 0,8 mm s hrubými daty bez jakýchkoliv korekcí s přítomností neměřených bodů. Neměřené body vznikají tak, že během snímání interferenčním snímačem (interferometrem) dojde k tomu, že signál, který by se měl odrazit zpět do snímače, se neodrazí tak, jak by měl. Příčin vzniku deformovaného signálu a tím i jeho špatného odrazu od povrchu může být několik. Těmi nejčastějšími může být přítomnost nečistot na snímaném povrchu nebo skutečnost, že světlo dopadá na plochu pod úhlem, který způsobí, že odraz jde mimo samotný optický snímač.

Jelikož neměřené body představují ve své podstatě díru ve zkoumané ploše, je nutné je něčím nahradit. Druhým krokem ve vyhodnocovací fázi tedy bylo jejich numerické odstranění (obr. 24). Zde přístroj matematicky vezme pixely, které jsou v okolí neměřeného bodu, a spojí je přes neměřenou plochu tak, že doplní nejpravděpodobnější tvar plochy.

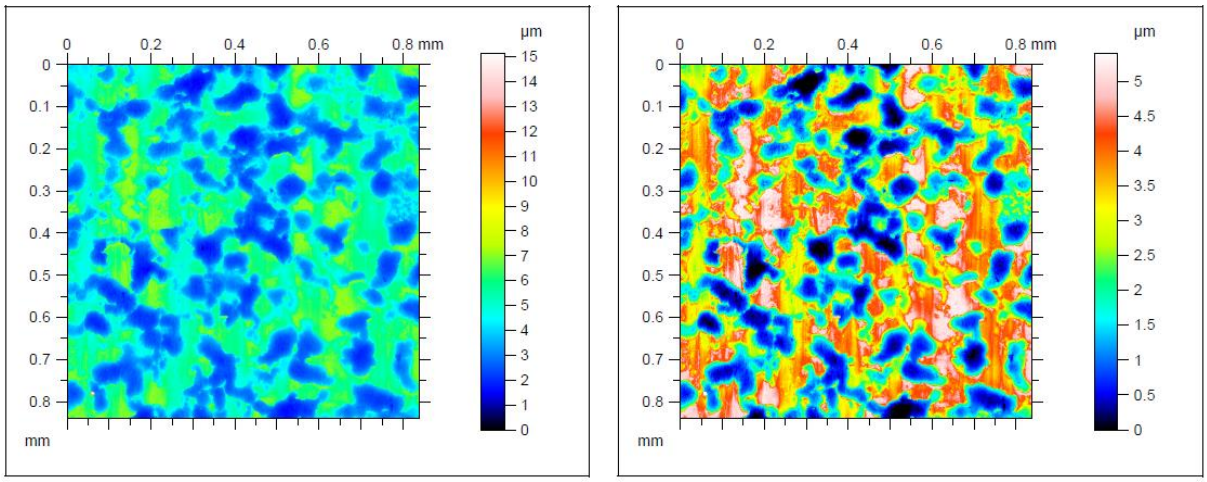


a) analyzovaná plocha (hrubá data) b) odstranění neměřených bodů

Obr. 24 Vyhodnocení drsnosti povrchu – analyzovaná plocha a odstranění neměřených bodů.

Po odstranění neměřených bodů následovalo vyrovnání plochy (obr. 25), neboť každá plocha má jistou tvarovou úchylku a pro kvalitní rozbor textury povrchu je optimální zcela rovinná plocha. Pomocí metody nejmenších čtverců došlo v tomto kroku ke zmíněnému vyrovnání plochy, a to odstraněním tvarové úchylky nebo zešikmením vzorku na hodnocené ploše. Výsledkem tohoto postupu byla téměř dokonalá rovina vůči snímacímu aparátu.

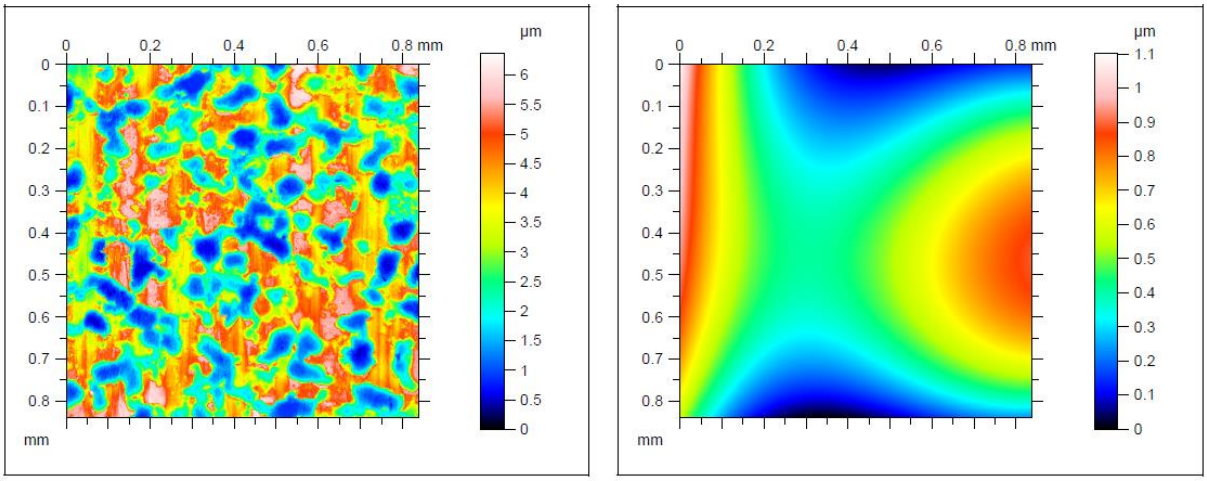
Čtvrtým krokem v pořadí byl tzv. *thresholding* (obr. 25), jež slouží pro definování hladiny informací, které budou z dané plochy snímány. Provádí se z toho důvodu, že se na měřené ploše s určitou texturou mohou nacházet jisté vady či nečistoty, a právě tyto nedokonalosti by mohly zapříčinit zkreslení výstupních hodnot. Norma uvádí, že maximální ořez pro vznik využívané hladiny informací může být 2 %, přičemž v tomto případě bylo zvoleno pouze 0,5 %. Zkoumaný profil, jež obsahuje dominantní výstupky a prohlubně, byl pomocí funkce *thresholding* omezen o 0,5 % (0,25 % shora a 0,25 % zdola). Vlivem omezení došlo k získání konzistentního jádra bez dominantních úchylek, které by zkreslovaly celkový výsledek měření. [57]



a) vyrovnání plochy b) *thresholding*

Obr. 25 Vyhodnocení drsnosti povrchu – vyrovnání plochy a *thresholding*.

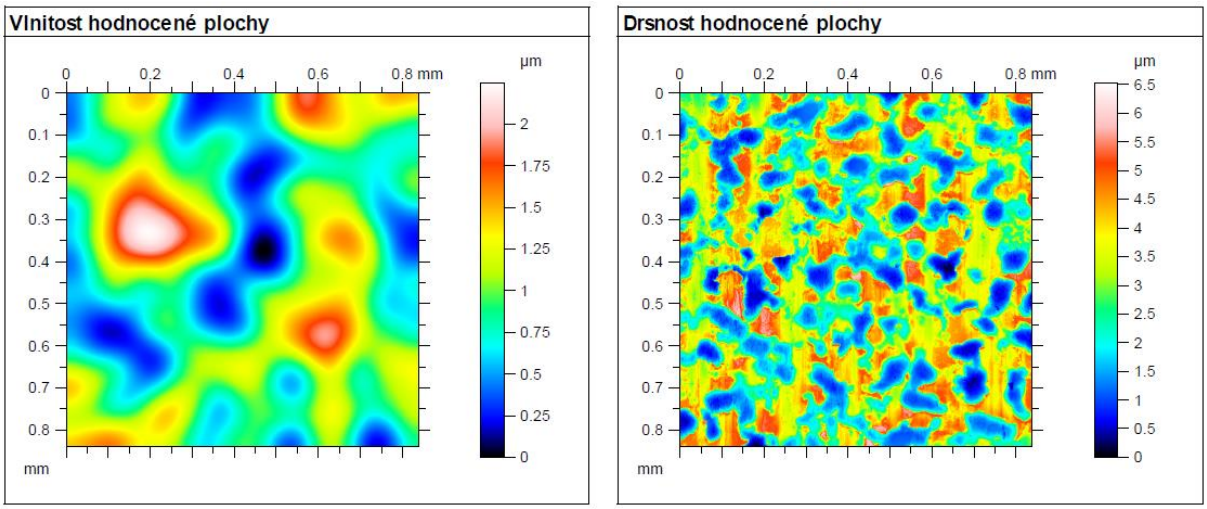
Vzhledem k tomu, že ani po provedené vyrovnávací operaci plochy nebyly odstraněny veškeré tvarové úchylky, bylo dalším krokem jejich odstranění pomocí polynomu třetího řádu (obr. 26). Zde je řeč o velmi malých úchylkách, jež jsou např. řádově větší než vlnitost a o dva řády větší než drsnost. Dle normy lze pro korekci tvarových úchylek použít polynom maximálně řádu jedenáct, ale s touto hodnotou již dochází k velkému zkreslení výsledků. S vyšším polynomem dochází v softwaru ke komplikovanějšímu výpočtu při odstranění tvaru, a i tento získaný samotný tvar je složitější. Tvar, jež je odstraněn tímto polynomem, lze vidět na obr. 26. Jelikož se jednalo o rovinné a tvarově nekomplikované vzorky, nachází se odstraněný tvar ve velmi nízkých hodnotách, převážně v desetinách mikrometru. [57]



a) odstranění tvaru polynomem třetího řádu b) samotný tvar

Obr. 26 Vyhodnocení drsnosti povrchu – odstranění tvaru a samotný tvar.

Po tvarové korekci byla již plocha připravena na vlastní vyhodnocení drsnosti povrchu, kterému však ještě zpravidla předchází filtrace. V tomto experimentu byla provedena filtrace pomocí Gaussova filtru, cut-off 0,25 mm. Díky této selekci došlo k oddělení vlnitosti a drsnosti hodnocené plochy. Na následujícím obr. 27 lze vidět právě již oddělenou vlnitost a drsnost.



a) vlnitost hodnocené plochy b) drsnost hodnocené plochy

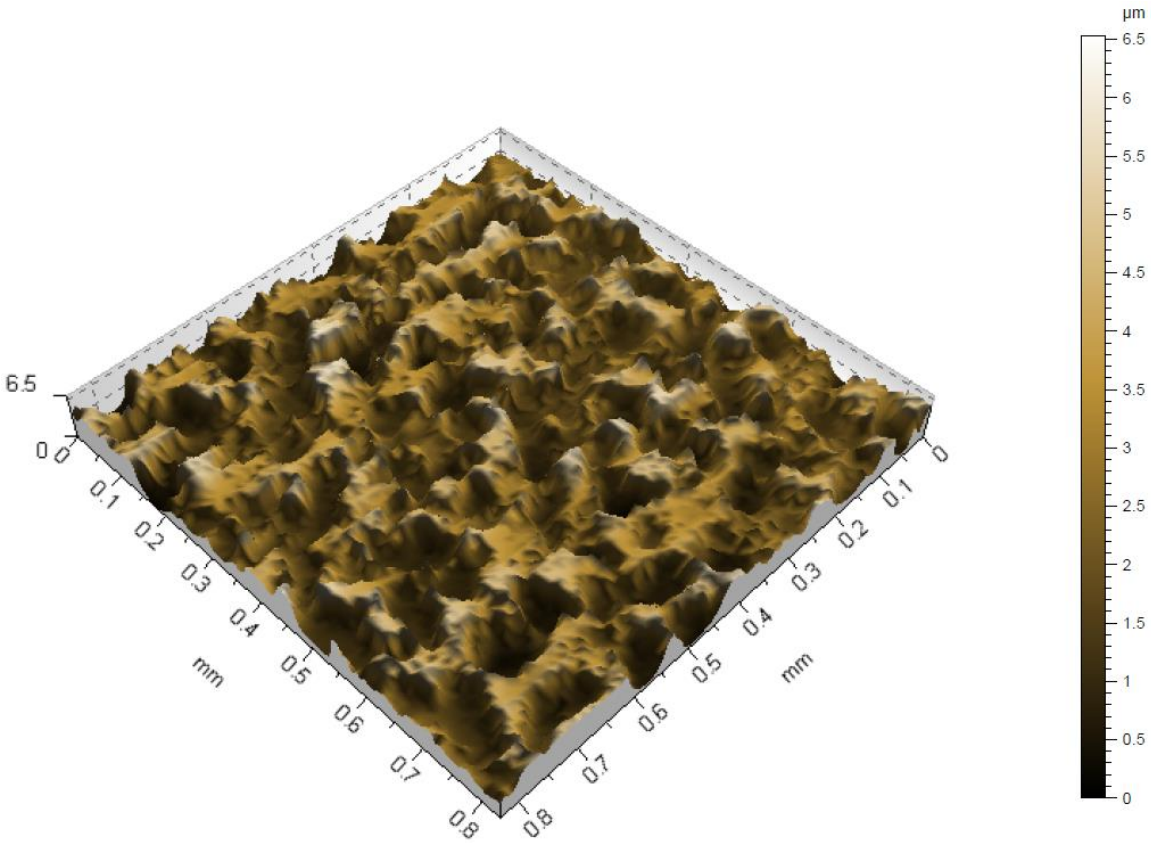
Obr. 27 Vyhodnocení drsnosti povrchu – vlnitost a drsnost hodnocené plochy.

Na zkoumané části vzorku o rozměrech 0,8 x 0,8 mm bylo po všech přípravných krocích nejdříve provedeno vyhodnocení 3D parametrů drsnosti povrchu. Zvětšená vizualizace této plochy je vyobrazena na obr. 28. Posuzované 3D parametry byly vybrány ze dvou již uvedených norem a jejich naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3. Přehled a charakteristika vybraných 3D parametrů [58]:

- EUR 15178N
  - Sa = aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu, což je aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř dané plochy;
  - Sz = maximální výška omezené stupnice povrchu, což je součet maximální hodnoty výšky výstupku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř dané plochy.
- ISO 25178
  - Sp = maximální výška výstupku omezené stupnice povrchu, což je v podstatě největší hodnota výšky píku uvnitř zadané plochy;
  - Sv = maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu, tzn. hloubka prohlubně uvnitř určené plochy zmenšená o její nejmenší hodnotu;
  - Spd = hustota píku, udává počet výstupků na jednotku plochy;
  - Spc = aritmetický průměr zakřivení píku.

Tab. 3 Naměřené 3D parametry textury povrchu.

	Sa [µm]	**Sz [µm]**	**Sp [µm]**	**Sv [µm]**	**Spd [mm^{-2}]**	**Spc [mm^{-1}]**
Naměřená hodnota	1,098	6,174	3,602	2,929	2450	1040



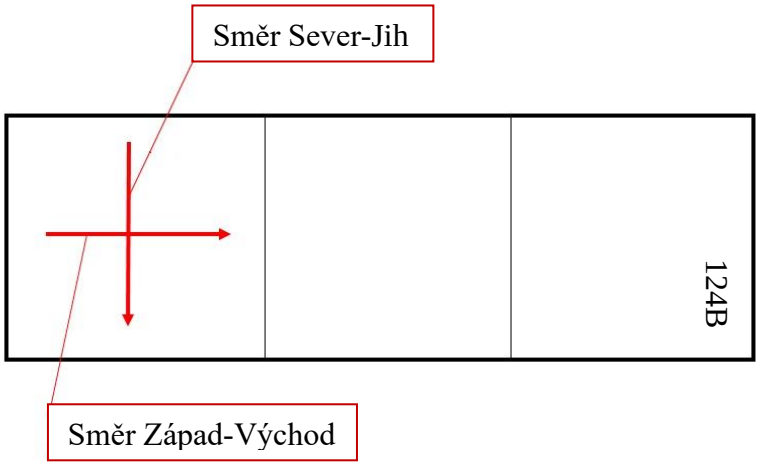
Obr. 28 Vyobrazení 3D textury povrchu levé strany vzorku s číslem 124.

Vyhodnocení 2D parametrů drsnosti bylo provedeno rovněž na filtrované ploše 0,8 x 0,8 mm pomocí Gaussova filtru a hodnoty cut-off 0,25 mm. Zde však nastala odchylka od normy ČSN EN ISO 4288, jež uvádí doporučené hodnoty cut-off, základní délky a vyhodnocované délky vždy s poměrem pěti základních délek na délku vyhodnocovanou. Tudíž, při základní délce 0,25 mm norma doporučuje velikost vyhodnocované délky 1,25 mm. V tomto experimentu byla provedena filtrace pouze ze tří základních délek, z čehož vyplývá hodnota vyhodnocované délky pouze 0,75 mm. Avšak zásadní vliv na posuzování drsnosti povrchu má především opakovatelnost měření, proto i v tomto případě, kdy nebyla dodržena normou doporučená hodnota vyhodnocované délky, budou výsledky správné, neboť bylo měření několikrát opakováno, přesněji řečeno byly parametry vyhodnoceny ze série 1024 profilů.

Vzhledem k tomu, že norma ČSN EN ISO 4288 stanovuje, že drsnost povrchu má být měřena kolmo na směr největších nerovností, byly profily měřeny ve dvou na sebe kolmých směrech (Západ-Východ a Sever-Jih). Schematické znázornění směrů, ve kterých byla měřena drsnost povrchu, je vyobrazeno na obr. 29. Díky měření ve dvou různých orientacích lze charakterizovat i změny povrchové struktury způsobené rychlostí posuvu laseru, který se během čištění pohyboval po dráze Sever-Jih. Hodnocené 2D parametry drsnosti v obou směrech jsou definovány normou ČSN EN ISO 4287 [57; 59]:

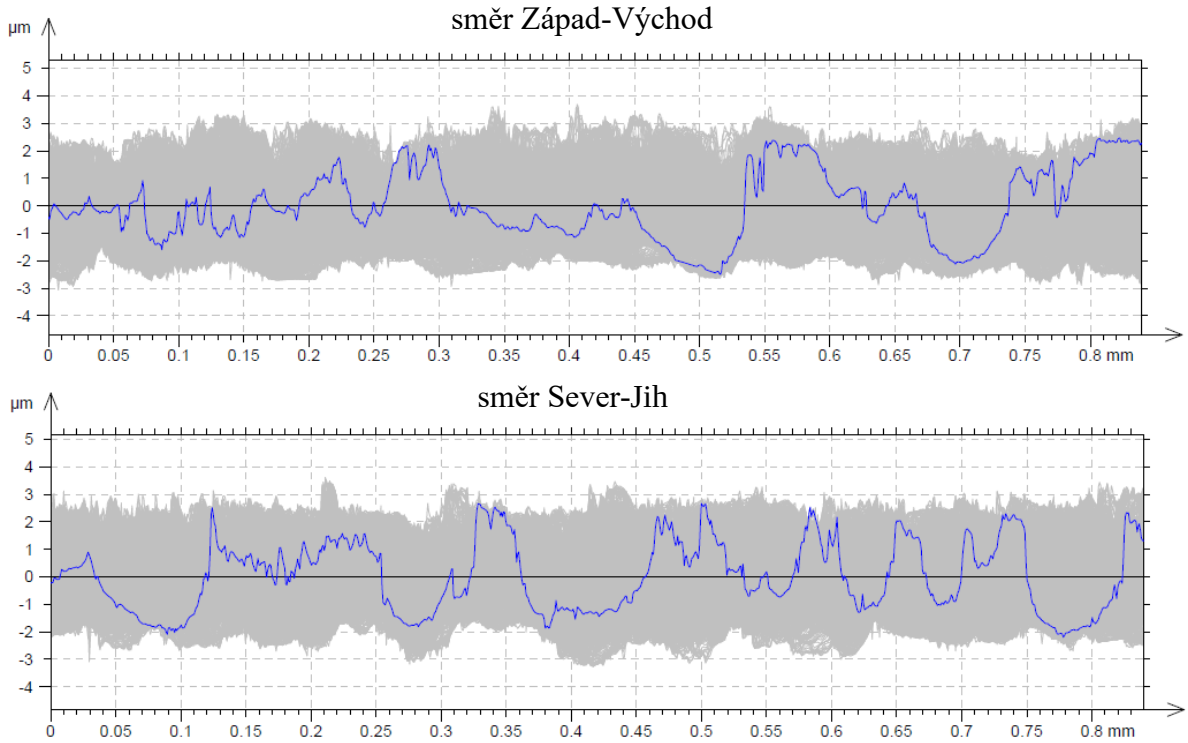
- Ra = průměrná aritmetická úchylka profilu představuje aritmetický průměr absolutních hodnot filtrovaného profilu v rozsahu základní délky;
- Rz = největší výška profilu představuje součet nejvyššího výstupku a nejhlubší prohlubně v rozsahu základní délky;
- Rp = největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky;
- Rv = největší hloubka prohlubně profilu v rozsahu základní délky;

- RSm = průměrná šířka prvků profilu je délkovým parametrem a představuje aritmetický průměr šířek prvků profilu v rozsahu základní délky;
- RPc = počet výstupků je délkovým parametrem, který představuje součet výstupků na základní délce.



Obr. 29 Schematické znázornění směrů, ve kterých byla měřena drsnost povrchu.

Jak již bylo výše řečeno, 2D parametry byly vyhodnoceny ze série 1024 profilů. Z těchto dat software TalyMap vypočetl aritmetický průměr a střední směrodatnou odchylku. V rámci výstupních dat byly rovněž ještě vygenerovány maximální a minimální naměřené hodnoty pro každý zkoumaný parametr drsnosti. Vykreslená textura posuzovaného povrchu ze série 1024 profilů je pro oba směry měření vyobrazena na obr. 30, získané hodnoty pro levou stranu vzorku 124 jsou uvedeny v tab. 4. Výsledné hodnoty ze softwaru TalyMap pro zástupce čištěných materiálů, druhů znečištění a nastavovaných parametrů jsou obsahem přílohy č. 5, která je nedílnou součástí této diplomové práce.



Obr. 30 Vykreslení textury povrchu ze série 1024 profilů.

Tab. 4 Vypočtené a naměřené hodnoty na zkoumané ploše vzorku č. 124.

SMĚR ZÁPAD-VÝCHOD						
	Ra [µm]	**Rz [µm]**	**Rp [µm]**	**Rv [µm]**	**RSm [mm]**	**RPc [mm^{-1}]**
Aritmetický průměr	0,8429	3,7940	2,1150	1,6790	0,06124	10,940
Střední směrodatná odchylka	0,1379	0,4413	0,3406	0,2456	0,01626	2,121
Minimum	0,5596	2,6180	1,1520	0,9612	0,02504	5,088
Maximum	1,4100	4,9120	3,0880	2,5690	0,11730	16,960
SMĚR SEVER-JIH						
	Ra [µm]	**Rz [µm]**	**Rp [µm]**	**Rv [µm]**	**RSm [mm]**	**RPc [mm^{-1}]**
Aritmetický průměr	0,8557	3,8720	2,1050	1,7670	0,06649	10,450
Střední směrodatná odchylka	0,1860	0,5540	0,4183	0,3355	0,02009	2,295
Minimum	0,4025	2,4620	0,9932	1,0430	0,02257	3,390
Maximum	1,3280	5,2890	3,3610	2,9750	0,14060	20,340

4.4 Vizuální zhodnocení a vyhodnocení naměřených dat

Po provedeném laserovém očištění dříve, než došlo k přesunu vzorků na dočištění ultrazvukem s následným měřením drsnosti, byly čištěné plochy vzorků podrobeny vizuálnímu hodnocení. Jednalo se o první fázi v procesu vyhodnocení vzorků. Zrakový způsob klasifikace je poměrně subjektivní metodou, jelikož výsledek recenze očištěných ploch bude u každého pozorovatele odlišný dle jeho citu, vnímání drobností nebo nastavených standardů. Z tohoto důvodu je nutné, aby všechny vzorky byly hodnoceny pouze jednou osobou. Jedná se opravdu o zásadní podmínku vizuální kritiky, jež byla v rámci celého experimentu dodržena.

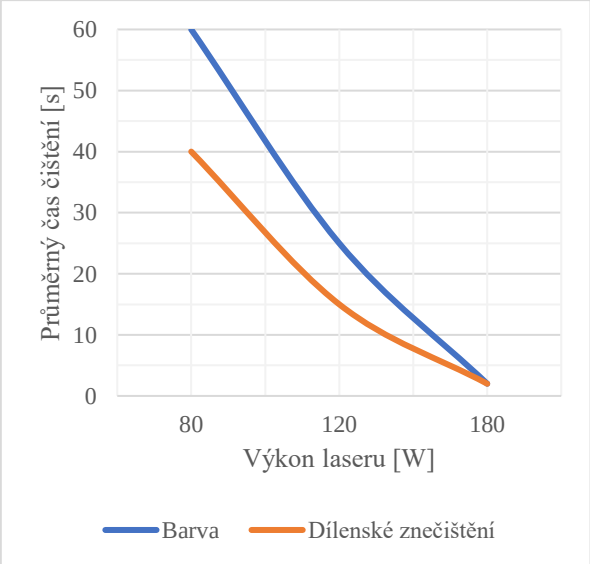
Posuzovány byly všechny vzorky samostatně a následně v rámci každého uskupení dle druhu znečištění a nastavených parametrů laserového zařízení. Ke zhodnocení došlo ihned po laserovém očištění, kdy v průběhu tohoto procesu byla posuzována rychlost čištění a nastavené parametry vůči kvalitě očištěné plochy. Největší pozornost u vizuálního hodnocení byla věnována nedokonalostem v čisticí operaci, přesněji pouze těm, které jsou na první pohled viditelné pouhým okem bez použití jakéhokoliv přibližovacího aparátu. V tomto smyslu je řeč především o pozůstatcích předchozích povrchových kontaminantů, tedy jejich částicím, jež nebylo možné během čištění laserem samotným paprskem odstranit z povrchu.

Prvotní posouzení kvality očištěné plochy probíhalo hned během odlaďování nastavovaných parametrů (výkon a frekvence laserového paprsku). Při odladění bylo zjištěno, že s nastavením frekvence 30 kHz a výkonu v rozmezí od 10 % do 40 % nelze zadané znečištění plnohodnotně odstranit. Tato problematika je zcela rozebrána již v kapitole 4.2 Očištění vzorků.

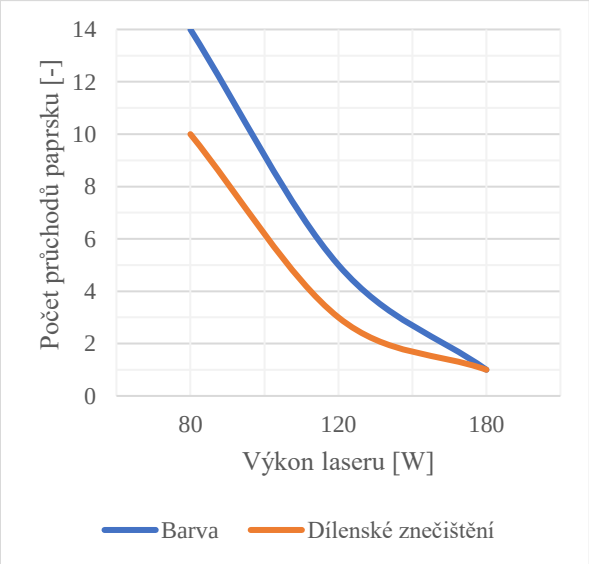
Největším problémem z hlediska čistoty plochy se ukázalo dílenské znečištění, jelikož především kovové třísky nebyly ze zkoumaného povrchu odstraněny, ale došlo pouze k jejich spálení, a to při jakémkoliv nastavení přístrojových parametrů. Ostatní částice z této směsi kontaminantů (např. mastnota a prach) byly z ploch vždy odstraněny a nebylo nutné řešit jejich následnou extrakci. Oproti tomu právě spálené kovové třísky a případné jiné zbytky materiálů (např. spálené dřevěné piliny) musely být po laserovém čištění manuálně odstraněny. Tento krok ručního dočištění lze považovat za poměrně velké negativum, a to hned z několika důvodů:

- Dojde k prodloužení celkového času čištění, jelikož je nutné do procesu zařadit další pohyby a operace. Nejprve v rámci bezpečnosti zajistit laserový přístroj, následně odložit laserovou hlavici, uchopit hadr a setřít pozůstatek nečistot. Odhadované navýšení času pro zkušeného pracovníka činní zhruba 10 s.
- Hrozí nebezpečí poškození povrchu od kovových třísek, které by při nešetrném zacházení mohly poškrábat očištěnou plochu. Tomu by však bylo možné zabránit například pomocí stlačeného vzduchu, jež by z očištěného předmětu třísky odfoukl.

U barevného nátěru sice došlo k jeho kompletnímu odstranění, nicméně doba procesu čištění byla vždy delší než u druhého typu znečištění. Toto platilo až do nastavení 90 % výkonu, kde byly oba druhy znečištění odstraněny na první průchod laserového paprsku, který trval přibližně 2 s. Z tab. 1 (v kapitole 4.2 Očištění vzorků) je patrné, že mezi nastaveným výkonem laseru a průměrným časem čištění i počtem průchodů paprsku platí nepřímá úměrnost a to taková, že se zvyšujícím se výkonem se čas čištění zkracuje a počet průchodů laseru se zmenšuje. Tyto závislosti jsou vyobrazeny v níže uvedených grafech (obr. 31 a obr. 32). V případě barevného nátěru je nutné poznamenat, že byť pro jeho odstranění bylo zapotřebí delší působení laserového paprsku, došlo k jeho kompletní extrakci, a tudíž nebylo nutné další dočišťování. To stejné však neplatí pro dílenské znečištění, kde sice čas pro odstranění mastnoty nebyl tak dlouhý jako u barvy, ale po laserovém čištění muselo vždy následovat dočištění hadrem, které celkový čistící proces prodloužilo.



Obr. 31 Závislost času čištění na výkonu.



Obr. 32 Závislost počtu průchodů na výkonu.

Souhrnně lze v rámci prvotní kritiky konstatovat, že nejlepších výsledků pro hodnotu frekvence 30 kHz bylo dosaženo s nastavením nejvyšší hodnoty testovaného výkonu (180 W). S těmito parametry byly oba druhy znečištění odstraněny nejrychleji a nejkvalitněji, a to za stejnou dobu působení laserového paprsku. V dalších případech odstranění barevného nátěru zabralo delší časové úseky než u dílenského znečištění, avšak bylo provedeno kvalitněji bez nutnosti dalšího dočištění.

Druhá fáze vyhodnocování spočívala v porovnání naměřených parametrů drsností povrchu na daných plochách v rámci jednotlivých skupin vzorků i mezi oběma druhy znečištění. Z výstupních dat, které byly získány ze softwaru TalyMap, byl v rámci každé skupiny vypočten aritmetický průměr ze získaných hodnot pro dané parametry (dle vzorce 4.1) a tyto průměry byly následně mezi sebou posuzovány. Hodnocen byl rozdíl struktury povrchu na očištěné ploše a povrchu plochy, jež nepřišla do styku s laserovým paprskem. Konečný výpočtový hodnotící vztah byl tedy proveden mezi průměrnými hodnotami z levé a pravé strany a průměrnými hodnotami ze střední části vzorku.

Vzorec, pomocí kterého byly vypočteny aritmetické průměry naměřených hodnot [60]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{4.1}$$

kde: $\bar{x}$ - aritmetický průměr,

n - celkový počet prvků,

x_i - i-tý prvek z celé skupiny prvků.

Aritmetický průměr byl u všech vzorků počítán ze tří kusů plíšků, což pro znečištěné plochy představuje šest hodnot a tři hodnoty pro plochy s původní kvalitou. Průměrná hodnota z naměřených veličin ze střední části vzorků poskytuje relevantní údaje, byť byla vypočtena pouze ze tří povrchů. Jednalo se totiž o základní povrch, kde lidským faktorem nemohlo během čištění dojít k různorodým výsledkům, tudíž byla hodnota tři odsouhlasena za plně dostačující pro získání správných údajů.

Získané hodnoty ze střední plochy byly posuzovány vůči těm vypočteným z ploch krajních, a to v obou směrech měření. Jelikož střední plocha měla původní kvalitu, byla její hodnota pojata za referenční a vypočtené veličiny z krajních ploch byly vždy s touto referenční porovnávány. Pro většinu 2D a 3D parametrů indikuje jejich menší hodnota lepší drsnost povrchu (je hladší). Tento předpoklad platí především pro výškové 3D parametry Sa, Sz, Sp a Sv, stejně jako pro jejich 2D ekvivalenty profilu drsnosti povrchu Ra, Rz, Rp a Rv. Jinak je tomu např. u 2D parametru RSm, jež určuje průměrnou šířku prvku profilu a u vzhledových ploch by měl být co největší, aby byly výstupky vzdáleny co nejdále od sebe. Podobně je na tom i zkoumaný 3D parametr Spc, značící zakřivení vrcholů, jež je úzce spjat s aplikací a zatížením daného povrchu, kdy je z hlediska vzhledových vlastností plochy vhodné mít jeho hodnotu co největší, neboť je to příznivější co do odrazivosti. V případě horší odrazivosti jsou na povrchu ostré vrcholky s malým poloměrem zakřivení a jako takové je lze spíše najít na místech s horší drsností (vyšší hodnota Sa). Poslední 3D parametr Spd udává počet výstupků na plochu, a i zde záleží na aplikačním použití daného povrchu (třecí vlastnosti, schopnost udržení maziva apod.). S Spd koreluje 2D parametr RPc a v případě tohoto experimentu je z důvodu kvalitní a opticky přijatelné plochy vhodné mít výstupků co nejméně, tudíž jejich hodnoty co nejmenší. Souhrn výše zmíněných údajů je uveden v tab. 5, kde menší nebo větší hodnota parametru značí lepší vzhled plochy – menší s označením M a větší s V. [58; 59]

Tab. 5 Přehled hodnot zkoumaných parametrů vůči kvalitě plochy.

2D						3D					
Ra	Rz	Rp	Rv	RSm	RPc	Sa	Sz	Sp	Sv	Spd	Spc
M	M	M	M	V	M	M	M	M	M	M	V

V rámci porovnávání hodnot referenční plochy s čištěnou bylo postupováno podle toho, zda je z pohledu kvality povrchu výhodné mít u daného parametru menší či vyšší hodnotu. Pokud by ke zlepšení povrchových vlastností došlo snížením hodnoty parametrů (Ra, Rz, Rp, Rv, RPc, Sa, Sz, Sp, Sv a Spd), byla hodnota z čištěných ploch odečtena od referenční hodnoty z ploch středních. V opačném případě (RSm a Spc) byl postup obrácený a získaná velikost parametrů u referenčních ploch byla odečtena od těch čištěných. Díky těmto numerický pravidlům bylo vyhodnocení velice prosté, jelikož pokud byla výsledná hodnota záporná, došlo ke zhoršení daného parametru povrchu a naopak.

- **Sada vzorků s čísly 1, 2 a 3 z korozivzdorné oceli 17 241**

  V této sadě byl odstraňován barevný nátěr z oceli 17 241 při nastavení parametrů laserového přístroje na 30 kHz a 80 W. Z tab. 6 lze vypozorovat, že s nastavením těchto hodnot a u tohoto druhu povrchového znečištění dochází jednoznačně k ovlivnění základního materiálu, a to převážně negativním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu však nebyly výrazné a v případě 2D parametrů se pohybovaly převážně v řádech setin až tisícin jednotek. U 3D parametrů jsou výsledky rozmanitější, což je bezesporu zapříčiněno druhy těchto parametrů a jejich jednotkami, ale ani zde nedošlo k výrazným změnám ve struktuře povrchu.

Tab. 6 Vyhodnocení sady vzorků 1, 2 a 3.

Sada vzorků 1, 2 a 3						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	-0,002	-0,003	Sa	[µm]	-0,003
Rz	[µm]	-0,034	-0,033	Sz	[µm]	-0,038
Rp	[µm]	-0,024	-0,025	Sp	[µm]	-0,101
Rv	[µm]	-0,010	-0,008	Sv	[µm]	0,039
RSm	[mm]	0,000	0,000	Spd	[mm^{-2}]	-534,000
RPc	[mm^{-1}]	-0,601	-0,096	Spc	[mm^{-1}]	28,417

Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a většiny 3D parametrů. V případě 2D byly negativní jevy laseru pozorovány v obou směrech měření, až na parametr RSm jehož hodnota nebyla laserem ovlivněna.

Nejvýraznější rozdíl v obou směrech měření lze pozorovat u RPc a v případě plošných 3D parametrů u Spd. Zlepšení nastalo ve dvou případech (Sv a Spc), kde v celkovém měřítku došlo ke zmenšení hloubky prohlubní a zvětšení zakřivení nerovnostních vrcholků, čímž byla získána lepší odrazivost.

- **Sada vzorků s čísly 4, 5 a 6 z korozivzdorné oceli 17 241**

V rámci této sady byl odstraňován barevný nátěr z oceli 17 241 při nastavení parametrů laserového přístroje na 30 kHz a 120 W. Z tab. 7 lze vypozorovat, že s nastavenými hodnotami a u této formy povrchového znečištění dochází jednoznačně k ovlivnění povrchové vrstvy materiálu, a to převážně negativním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu vzorků sice byly výraznější než v předchozím případě s nastaveným výkonem 80 W, ale i zde se jedná o velmi malé rozdíly.

Tab. 7 Vyhodnocení sady vzorků 4, 5 a 6.

Sada vzorků 4, 5 a 6						
2D				**3D**		
Parametr		**Směr**		**Parametr**		**Hodnota**
		Západ-Východ	**Sever-Jih**			
Ra	[µm]	-0,007	-0,008	Sa	[µm]	-0,008
Rz	[µm]	-0,104	-0,116	Sz	[µm]	-0,144
Rp	[µm]	-0,062	-0,064	Sp	[µm]	-0,101
Rv	[µm]	-0,042	-0,052	Sv	[µm]	-0,052
RSm	[mm]	0,000	0,000	Spd	[mm^{-2}]	604,000
RPc	[mm^{-1}]	-0,460	-0,596	Spc	[mm^{-1}]	57,717

Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů. Výjimkou ve 2D je parametr RSm, u kterého jako jediného nebyla postřehnuta jakákoliv změna. U ostatních měřených veličin byly zaznamenány negativní projevy laserového paprsku na čištěných plochách. Dále lze pozorovat, že vlivem čištění došlo ke snížení počtu výstupků na danou plochu vzorků, přesněji o 604 vrcholků – tak jak uvádí parametr Spd. Zlepšení je patrné rovněž u Spc, jež naznačuje mírné zvýšení odrazivosti na očištěné ploše v porovnání s plochou původní.

- **Sada vzorků s čísly 7, 8 a 9 z korozivzdorné oceli 17 241**

V této sadě byl odstraňován barevný nátěr z oceli 17 241 při nastavení parametrů laserového přístroje na 30 kHz a 180 W. Z následující tab. 8 lze vypozorovat, že s nastavením uvedených hodnot a u tohoto druhu znečištění dochází k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to výlučně negativním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu ovšem nebyly tak markantní a v případě 2D parametrů se pohybovaly převážně v řádech setin jednotek a méně. U 3D parametrů jsou výsledky rozmanitější, což je bezesporu zapříčiněno různorodostí těchto parametrů a jejich jednotkami, ale ani zde nedošlo k výrazným změnám ve struktuře povrchu.

Tab. 8 Vyhodnocení sady vzorků 7, 8 a 9.

Sada vzorků 7, 8 a 9						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	-0,003	-0,003	Sa	[µm]	-0,003
Rz	[µm]	-0,048	-0,028	Sz	[µm]	-0,044
Rp	[µm]	-0,039	-0,038	Sp	[µm]	-0,046
Rv	[µm]	-0,010	0,010	Sv	[µm]	-0,002
RSm	[mm]	0,000	0,000	Spd	[mm^{-2}]	-617,833
RPc	[mm^{-1}]	-0,191	-0,199	Spc	[mm^{-1}]	36,717

Při odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů. Výjimkou ve 2D je parametr Rv ve směru Sever-Jih, u kterého jako jediného došlo ke zlepšení a parametr RSm, jehož hodnota se nezměnila. U ostatních měřených veličin byly zaznamenány negativní projevy laserového paprsku na čištěné plochy. Pozitivní změna Rv poukazuje na to, že došlo k nepatrnému zmenšení největší prohlubně na zkoumaném profilu v rozsahu základní délky. Dále lze pozorovat zlepšení 3D parametru Spc, jež naznačuje lepší odrazivost na očištěných plochách než u ploch původních.

Z uvedených výsledků vyplývá, že se zvyšujícím se výkonem laseru nedochází k narůstajícím defektům na čištěných plochách, jelikož největší změny ve struktuře povrchu nastávaly s nastavením střední zkoumané hodnoty výkonu 120 W. Nicméně je nutné konstatovat, že plochy byly čištěny pouze do odstranění daných nečistot, což pro rostoucí výkon laseru znamenalo kratší čas jeho působení na daný povrch materiálu. Hodnoty uvedené v tab. 8 (výkon 180 W) jsou značně podobné těm, jež byly vypočteny v tab. 6 (výkon 80 W), avšak rozdíl mezi dobami působení laserového paprsku zde představuje 58 s. Lze tedy predikovat, že pokud by laserové paprsky o stejné frekvenci, ale s různými výkony působily na materiál stejně dlouhou dobu, zajisté by ve struktuře povrchu došlo k větším změnám u laseru s vyšším nastaveným výkonem.

- **Sada vzorků s čísly 15, 16 a 17 z korozivzdorné oceli 17 241**

  Jedná se o první sadu vzorků, kde bylo z oceli 17 241 odstraňováno dílenské znečištění. K vyčištění zadaných ploch byl na laserovém zařízení nastaven výkon 80 W a frekvence 30 kHz. Z následující tab. 9 lze vypozorovat, že s nastavením uvedených hodnot a u tohoto druhu znečištění dochází bezpochyby k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to výlučně negativním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu ovšem nebyly tak markantní a v případě 2D parametrů se pohybovaly převážně v řádech setin jednotek a méně. U 3D parametrů jsou výsledky rozmanitější, což je bezesporu zapříčiněno rozmanitostí těchto parametrů a jejich jednotkami, ale ani zde nelze hovořit o výrazných změnách ve struktuře povrchu.

Tab. 9 Vyhodnocení sady vzorků 15, 16 a 17.

Sada vzorků 15, 16 a 17						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	-0,003	-0,001	Sa	[µm]	0,000
Rz	[µm]	-0,030	-0,014	Sz	[µm]	-0,038
Rp	[µm]	-0,024	-0,022	Sp	[µm]	-0,037
Rv	[µm]	-0,009	0,008	Sv	[µm]	0,004
RSm	[mm]	0,000	0,000	Spd	[mm^{-2}]	-434,500
RPc	[mm^{-1}]	-0,203	-0,327	Spc	[mm^{-1}]	-1,433

Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů, podobně jako tomu bylo v případech znečištění barevným nátěrem. Výjimkou ve 2D jsou parametry RSm a Rv, v případě 3D se jedná o parametry Sv a Sa. RSm a Sa byly jediné parametry, které laserový paprsek nijak neovlivnil. Ze zkoumaných 2D parametrů nastal progres pouze u Rv, a to výhradně ve směru Sever-Jih. V rámci zhodnocení 3D struktury byla snížena hodnota Sv, avšak pouze v řádech tisícin mikrometru.

Po laserovém očištění, s přihlédnutím výhradně ke zlepšeným parametrům textury povrchu, získaly dané plochy několik pozitiv. Došlo ke zvětšení průměrné šířky prvku profilu, což je u vzhledových povrchů kladným jevem a tuto skutečnost popisuje parametr RSm. Snížení hodnoty Rv poukazuje na to, že došlo k nepatrnému zmenšení největší prohlubně na zkoumaném profilu v rozsahu základní délky, avšak pouze ve směru měření Sever-Jih. Parametr Sv koreluje s Rv a rovněž poukazuje na zmenšení největší prohlubně na zkoumaném profilu, nicméně zde se jedná o plošné posouzení stavu povrchu.

- **Sada vzorků s čísly 19, 20 a 21 z korozivzdorné oceli 17 241**

  Tato sada plíšků z oceli 17 241 je druhou skupinou vzorků s povrchem kontaminovaným dílenským znečištěním. K vyčištění určených ploch byl na laserovém zařízení nastaven výkon 120 W a frekvence 30 kHz, která je pro všechny nastavované výkony konstantní. Z následující tab. 10 lze vypozorovat, že s nastavením uvedených hodnot a při tomto druhu znečištění dochází zcela bezpochyby k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to převážně pozitivním způsobem. Pozitivní ovlivnění povrchu materiálu je oproti předešlým výsledkům, u kterých byl zaznamenán negativní vliv působení laserového paprsku, podstatným rozdílem. Prakticky většina změn způsobených ve struktuře povrchu ovšem nebyla tak markantní, ať už se jednalo o 2D či 3D parametry textury povrchu.

Tab. 10 Vyhodnocení sady vzorků 19, 20 a 21.

Sada vzorků 19, 20 a 21						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	0,002	0,002	Sa	[µm]	0,001
Rz	[µm]	0,042	0,099	Sz	[µm]	0,422
Rp	[µm]	0,058	0,110	Sp	[µm]	0,345
Rv	[µm]	-0,015	-0,012	Sv	[µm]	0,063
RSm	[mm]	0,000	0,000	Spd	[mm^{-2}]	-3954,667
RPc	[mm^{-1}]	0,121	0,294	Spc	[mm^{-1}]	-36,850

Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení pouze několika 2D a 3D parametrů, přesněji se jedná o Rv, Spd a Spc. Hodnota RSm opět nebyla nijak degradována, podobně jako tomu bylo v případě barevného znečištění. Ostatní parametry drsnosti byly laserovým čištěním zlepšeny. Díky laserovému paprsku o frekvenci 30 kHz a výkonu 120 W došlo ke zkvalitnění zkoumaných ploch v rámci 2D parametrů Ra, Rz, Rp a RPc a v rámci 3D parametrů Sa, Sz, Sp a Sv.

Všechny zlepšené výškové 2D parametry povrchové struktury (Ra, Rz, Rp a Rv) přispěly k vzhlednosti a celistvosti zkoumaných povrchů v obou směrech měření. Rovněž i parametr RPc, udávající informaci o počtu výstupků v rozmezí základní délky, byl vylepšen a snížení celkového počtu vrcholků rozhodně také přispělo k celistvosti zkoumaných ploch.

Největší a významný rozdíl mezi původní a očištěnou plochou nastal u 3D parametru Spd, jež určuje počet výstupků na plochu. U této veličiny došlo k rapidnímu zhoršení, tedy k nárůstu počtu výstupků na zkoumané ploše. Z pohledu vzhledových vlastností jde jednoznačně o zhoršení stavu povrchu, nicméně s ohledem na jeho aplikační použití (např. udržení maziva) se může jednat o výhodu.

- **Sada vzorků s čísly 22, 23 a 24 z korozivzdorné oceli 17 241**

Jedná se o poslední sadu vzorků, kde bylo z oceli 17 241 odstraňováno dílenské znečištění. K vyčištění zadaných ploch byl na laserovém zařízení nastaven nejvyšší zkoumaný výkon 180 W a frekvence 30 kHz, která byla pro všechna čištění konstantní. Z následující tab. 11 lze vypozorovat, že s nastavením uvedených hodnot a u tohoto druhu znečištění dochází bezpochyby k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to výlučně negativním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu ovšem nebyly tak markantní a v případě 2D parametrů se pohybovaly převážně v řádech setin jednotek a méně. U 3D parametrů jsou výsledky rozmanitější, což je bezesporu zapříčiněno druhy těchto parametrů a jejich jednotkami, ale ani zde nebyly zaznamenány výraznější změny struktury povrchu.

Tab. 11 Vyhodnocení sady vzorků 22, 23 a 24.

Sada vzorků 22, 23 a 24						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	-0,006	-0,002	Sa	[µm]	-0,003
Rz	[µm]	-0,075	-0,046	Sz	[µm]	-0,118
Rp	[µm]	-0,047	-0,049	Sp	[µm]	-0,116
Rv	[µm]	-0,028	0,002	Sv	[µm]	-0,018
RSm	[mm]	0,000	0,000	Spd	[mm^{-2}]	158,333
RPc	[mm^{-1}]	-0,279	-0,452	Spc	[mm^{-1}]	45,400

Při odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů. Výjimkou ve 2D je pouze parametr Rv ve směru Sever-Jih a parametr RSm, u kterého v obou směrech snímání nedošlo k žádné změně. U těchto jako jediných hodnot došlo ke zlepšení či ke stagnaci, přičemž u ostatních měřených veličin byly pozorovány negativní projevy laserového paprsku na čištěné plochy. Pozitivní změna Rv poukazuje na to, že došlo k nepatrnému zmenšení největší prohlubně na zkoumaném profilu v rozsahu základní délky. Dále lze pozorovat zdokonalení 3D parametrů Spd a Spc, kde vlivem jejich progrese nastalo zlepšení odrazivosti povrchu a snížení počtu výstupků na plochu.

Z uvedených výsledků vyplývá, že se zvyšujícím se výkonem laseru podmínečně nedochází k narůstajícím defektům na čištěných plochách. U dílenského znečištění byla získána široká rozmanitost výstupních hodnot v rámci materiálu z oceli 17 241. Nelze zde tedy jednoznačně poukázat na to, při jakých nastavených parametrech laserového přístroje docházelo k největším změnám v povrchové textuře materiálu. Při výkonu 120 W však došlo ke zlepšení nejvyššího počtu parametrů textury povrchu a zároveň i k největší naměřené změně (Spd), která ovšem z pohledu vzhledových vlastností působila negativním vlivem.

Tak jako tomu bylo u barevného nátěru i zde je nutné konstatovat, že plochy byly čištěny pouze do odstranění daných nečistot, což pro rostoucí výkon laseru znamenalo kratší čas jeho působení na daný povrch materiálu. Rozdíl mezi dobami působení laserového paprsku u nejnižšího a nejvyššího nastaveného výkonu zde představuje 58 s. Lze tedy předpokládat, že pokud by laserové paprsky o stejné frekvenci, ale s různými výkony působily na materiál stejně dlouho, zajisté by ve struktuře povrchu došlo k větším změnám u laseru nastaveného na vyšší výkon.

- **Sada vzorků s čísly 114, 115 a 116 z uhlíkové oceli 11 443.**

  Jedná se o první sadu vzorků, kde byl z uhlíkové oceli 11 443 odstraňován barevný nátěr. K vyčištění zadaných ploch byl na laserovém zařízení nastaven výkon 80 W a frekvence 30 kHz. Z následující tab. 12 lze vypozorovat, že s nastavením uvedených hodnot a u tohoto druhu znečištění dochází jednoznačně k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to jak negativním, tak i pozitivním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu ovšem nebyly tak markantní, ale bezesporu se jedná o větší rozdíly než u předchozího zkoumaného materiálu (ocel 17 241). V případě 2D parametrů se rozdíly jejich hodnot od referenčních ploch pohybovaly v řádu desetin jednotek a méně, zatímco u 3D parametrů jsou výsledky rozmanitější, což je s nejvyšší pravděpodobností zapříčiněno různorodostí parametrů.

  Tab. 12 Vyhodnocení sady vzorků 114, 115 a 116.

Sada vzorků 114, 115 a 116						
2D				**3D**		
Parametr		**Směr**		**Parametr**		**Hodnota**
		Západ-Východ	**Sever-Jih**			
Ra	[µm]	0,048	-0,006	Sa	[µm]	0,029
Rz	[µm]	0,137	-0,056	Sz	[µm]	0,000
Rp	[µm]	0,066	-0,044	Sp	[µm]	0,072
Rv	[µm]	0,071	-0,011	Sv	[µm]	0,259
RSm	[mm]	-0,001	0,001	Spd	[mm^{-2}]	-131,667
RPc	[mm^{-1}]	-0,114	-0,264	Spc	[mm^{-1}]	32,950

  Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo u všech 2D parametrů k jejich zlepšení či zhoršení, a to v závislosti na směru měření. Příznivějších hodnot bylo dosaženo ve směru Západ-Východ u parametrů Ra, Rz, Rp a Rv, přičemž ve směru Sever-Jih byly naopak získány horší výsledky než u referenční plochy. U RSm byl tento jev opačný a u parametru RPc došlo k jeho zhoršení v obou směrech měření. V rámci 3D parametrů došlo k získání příznivějších hodnot u Sa, Sv a Spc, naopak na hodnoty Sp a Spd měl laserový paprsek negativní vliv. V 3D měřítku dále nedošlo ke změnám u parametru Sz, jež představuje maximální výšku zkoumaného profilu.

  V celkovém zhodnocení lze říci, že ve směru měření Západ-Východ došlo bezpochyby ke zlepšení textury povrchu a se zvýšením parametru RPc byly získány i jiné výhody než pouze vzhledově přijatelný povrch. Díky navýšení počtu výstupků, což v celkovém měřítku potvrzuje i Spd byla získána např. lepší zadržitelnost maziva. Lze tedy říci, že ve směru analýzy Západ-Východ vznikl po očištění celistvější a vzhlednější povrch, než je tomu ve směru opačném, kde jediné zlepšení nastalo v případě RSm. Zde se však jedná o velmi malou a prakticky zanedbatelnou změnu.

- **Sada vzorků s čísly 106, 113 a 124 z uhlíkové oceli 11 443.**

  V rámci této sady byl odstraňován barevný nátěr z oceli 11 443 při nastavení parametrů laserového přístroje na 30 kHz a 120 W. Z tab. 13 lze vypozorovat, že při nastavení těchto hodnot a u této formy povrchového znečištění dochází jednoznačně k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to převážně negativním způsobem. Změny vzniklé ve struktuře povrchu ovšem nebyly tak signifikantní, jelikož v případě 2D parametrů se rozdíly jejich hodnot od referenčních ploch pohybovaly v řádu desetin jednotek a méně. U 3D parametrů jsou výsledky rozmanitější, což je zcela jistě dáno rozmanitostí těchto parametrů a jejich jednotkami.

  Tab. 13 Vyhodnocení sady vzorků 106, 113 a 124.

Sada vzorků 106, 113 a 124						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	-0,052	-0,027	Sa	[µm]	-0,030
Rz	[µm]	-0,194	-0,101	Sz	[µm]	-0,401
Rp	[µm]	-0,125	-0,055	Sp	[µm]	-0,261
Rv	[µm]	-0,070	-0,047	Sv	[µm]	-0,369
RSm	[mm]	0,001	0,000	Spd	[mm^{-2}]	474,667
RPc	[mm^{-1}]	-0,238	-0,186	Spc	[mm^{-1}]	52,633

  Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů. Výjimku ve 2D představuje parametr RSm, u kterého jako jediného došlo ke zlepšení (ve směru Západ-Východ) a stagnaci (ve směru Sever-Jih). U ostatních měřených veličin byly pozorovány negativní projevy laserového paprsku na čištěné plochy. Díky nárůstu hodnot RSm byla získána větší průměrná šířka prvku, jež má pozitivní vliv na vzhledové vlastnosti vzorků a vytváří celistvější celkový dojem povrchu. Nicméně v případě RSm byl progres značně malý a v komplexním zhodnocení ploch prakticky zanedbatelný.

  Na 3D parametrech textury povrchu lze pozorovat zlepšení u Spd a Spc. Z Spd je patrné, že vlivem laserového čištění došlo ke snížení počtu výstupků na danou plochu vzorku a zvýšení hodnoty Spc naznačuje lepší odrazivost očištěné plochy vůči té referenční. V rámci globálního zhodnocení však povrch laserovým čištěním spíše utrpěl a byť došlo ke zlepšení několika jeho popisných parametrů, celková kvalita byla snížena.

- **Sada vzorků s čísly 109, 110 a 111 z uhlíkové oceli 11 443.**

  Jedná se o druhou sadu vzorků, kde byl z uhlíkové oceli 11 443 odstraňován barevný nátěr. K vyčištění zadaných ploch byl na laserovém zařízení nastaven výkon 120 W a frekvence 30 kHz, jejíž hodnota byla pro všechna čištění konstantní. Z následující tab. 14 lze vypozorovat, že s nastavením uvedených hodnot a v případě tohoto druhu

znečištění dochází jednoznačně k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to jak negativním, tak i pozitivním způsobem. Ačkoliv změny způsobené ve struktuře povrchu nebyly nijak výrazné, téměř ve všech případech byly znatelnější oproti předchozímu zkoumanému materiálu (ocel 17 241).

Tab. 14 Vyhodnocení sady vzorků 109, 110 a 111.

Sada vzorků 109, 110 a 111						
2D				**3D**		
Parametr		**Směr**		**Parametr**		**Hodnota**
		Západ-Východ	**Sever-Jih**			
Ra	[µm]	-0,004	-0,058	Sa	[µm]	-0,022
Rz	[µm]	-0,032	-0,156	Sz	[µm]	-0,322
Rp	[µm]	0,008	-0,116	Sp	[µm]	-0,128
Rv	[µm]	-0,039	-0,040	Sv	[µm]	-0,097
RSm	[mm]	-0,002	0,003	Spd	[mm^{-2}]	154,500
RPc	[mm^{-1}]	-0,249	-0,044	Spc	[mm^{-1}]	157,633

Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů. Výjimku ve 2D představují parametry Rp a RSm ovšem pouze v jednom ze směrů měření. V případě Rp došlo ke zlepšení ve směru Západ-Východ a u RSm ve směru Sever-Jih. Výsledkem snížení hodnoty Rp je zisk menšího největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky. Naopak díky nárůstu hodnot RSm došlo ke zvětšení průměrné šířky prvku, což má pozitivní vliv na vzhledové vlastnosti vzorků. Na 3D parametrech textury povrchu lze pozorovat zlepšení u Spd a Spc. Z Spd je patrné, že vlivem laserového čištění došlo ke snížení počtu výstupků na danou plochu vzorku. Zvýšení hodnoty Spc naznačuje lepší odrazivost očištěné plochy vůči té referenční.

V rámci znečištění barvou z uvedených výsledků vyplývá, že se zvyšujícím se výkonem laseru podmínečně nedochází k narůstajícím defektům na čištěných plochách. U znečištění barevným nátěrem bylo získáno široké spektrum výstupních hodnot v rámci materiálu z oceli 11 443. Nelze zde tedy jednoznačně poukázat na to, při jakých nastavených parametrech laserového přístroje docházelo k největším změnám v povrchové textuře materiálu. Při výkonu 80 W ovšem došlo ke zlepšení nejvíce parametrů textury povrchu, avšak vždy pouze v jednom ze směrů měření.

Stejně tak jako u oceli 17 241, i zde je nutné konstatovat, že plochy byly čištěny pouze do odstranění daných nečistot, což pro rostoucí výkon laseru znamenalo kratší čas jeho působení na daný povrch materiálu. Rozdíl mezi dobami působení laserového paprsku u nejnižšího a nejvyššího nastaveného výkonu zde opětovně představuje 58 s. Lze tedy učinit závěr, že pokud by laserové paprsky o stejné frekvenci, ale s různými výkony působily na materiál stejně dlouhou dobu, došlo by ve struktuře povrchu ke znatelnějším změnám při nastavení laseru na vyšší výkon.

- **Sada vzorků s čísly 117, 119 a 121 z uhlíkové oceli 11 443.**

  Jedná se o první sadu vzorků, kde bylo z oceli 11 443 odstraňováno dílenské znečištění. K vyčištění zadaných ploch byl na laserovém zařízení nastaven výkon 80 W a frekvence 30 kHz. Z následující tab. 15 lze vypozorovat, že s nastavením uvedených hodnot a u tohoto druhu znečištění dochází k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to výhradně negativním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu ovšem nebyly tak markantní a v případě 2D parametrů se pohybovaly převážně v řádech desetin a setin jednotek, v závislosti na směru měření. U 3D parametrů jsou výsledky různorodější, což je s nejvyšší pravděpodobností zapříčiněno rozdílností jednotlivých parametrů, ale i zde vesměs nedošlo k výraznějším změnám ve struktuře povrchu.

  Tab. 15 Vyhodnocení sady vzorků 117, 119 a 121.

Sada vzorků 117, 119 a 121						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	-0,104	-0,055	Sa	[µm]	-0,096
Rz	[µm]	-0,337	-0,091	Sz	[µm]	-0,296
Rp	[µm]	-0,197	-0,047	Sp	[µm]	-0,101
Rv	[µm]	-0,139	-0,044	Sv	[µm]	-0,192
RSm	[mm]	0,005	0,006	Spd	[mm^{-2}]	629,167
RPc	[mm^{-1}]	-0,411	-0,190	Spc	[mm^{-1}]	124,933

  Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů. Výjimku ve 2D představuje parametr RSm, u kterého jako jediného došlo ke zlepšení, a to v obou směrech měření. U ostatních měřených veličin byly pozorovány negativní projevy působení laserového paprsku na čištěnou plochu. Díky nárůstu hodnot RSm byla získána větší průměrná šířka prvku, jež má pozitivní vliv na vzhledové vlastnosti vzorků. Na 3D parametrech textury povrchu lze pozorovat zlepšení u Spd a Spc. Z Spd je patrné, že vlivem laserového čištění došlo ke snížení počtu výstupků na danou plochu vzorku. Zvýšení hodnoty Spc zase naznačuje lepší odrazivost očištěné plochy vůči té referenční.

- **Sada vzorků s čísly 107, 108 a 112 z uhlíkové oceli 11 443.**

  Sada plíšků z oceli 11 443 je druhou skupinou vzorků s povrchem kontaminovaným dílenským znečištěním. K vyčištění určených ploch byl na laserovém zařízení nastaven výkon 120 W s frekvencí 30 kHz. Z následující tab. 16 lze vypozorovat, že s nastavenými hodnotami a při tomto druhu znečištění dochází k ovlivnění povrchové vrstvy materiálu, a to v podstatě pouze pozitivním způsobem. Změny způsobené v textuře povrchové vrstvy vzorků se zde téměř ve všech případech pohybují ve vyšších hodnotách, než jak tomu bylo u předchozího nastavení výkonu laseru (80 W).

Tab. 16 Vyhodnocení sady vzorků 107, 108 a 112.

Sada vzorků 107, 108 a 112						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	0,125	0,186	Sa	[µm]	0,219
Rz	[µm]	1,353	1,602	Sz	[µm]	3,728
Rp	[µm]	0,596	0,736	Sp	[µm]	1,245
Rv	[µm]	0,757	0,866	Sv	[µm]	2,372
RSm	[mm]	0,003	0,006	Spd	[mm^{-2}]	374,333
RPc	[mm^{-1}]	1,341	2,229	Spc	[mm^{-1}]	-920,500

Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení pouze u 3D parametru Spc, čímž byla snížena odrazivost čištěných povrchů. Všechny ostatní parametry drsnosti byly díky laserovému paprsku o frekvenci 30 kHz a výkonu 120 W zlepšeny, čímž došlo ke zkvalitnění zkoumaných ploch. Změny oproti referenčním plochám jsou v tomto případě u většiny 2D a 3D parametrů podstatné. V celkovém zhodnocení lze říci, že byť byla daným plochám snížena odrazivost, došlo ke komplexnímu vylepšení kvality povrchů z pohledu jejich drsnosti.

U všech zkoumaných 2D parametrů textury povrchu došlo ke zlepšení jejich stavu v obou směrech měření a v některých případech dokonce k velice podstatnému, např. parametr Rz, jež popisuje největší výšku profilu, byl snížen o svou značnou část, čímž bylo dosaženo celistvějšího vzhledu povrchu. Rovněž i parametr RPc, udávající informaci o počtu výstupků v rozmezí základní délky, byl poměrně vylepšen a snížení celkového počtu vrcholků taktéž přispělo k celistvosti zkoumaných ploch.

V případě 3D parametrů textury povrchu byl u všech zaznamenán progres, mimo již zmíněného parametru Spc. U ostatních nastalo výrazné zlepšení, tak jako u jejich 2D ekvivalentů, kde byly v plošném měřítku získány kvalitnější plochy. Spd korelující s RPc a dále např. Rz a Sz jsou tomu jasnými ukazateli.

- **Sada vzorků s čísly 118, 120 a 122 z uhlíkové oceli 11 443.**

  Jedná se o poslední sadu vzorků, kde bylo z oceli 11 443 odstraňováno dílenské znečištění. K vyčištění zadaných ploch byl na laserovém zařízení nastaven výkon 180 W a frekvence 30 kHz. V tab. 17 si lze povšimnout, že s nastavením uvedených hodnot a u tohoto druhu znečištění dochází bezpochyby k ovlivnění povrchové vrstvy základního materiálu, a to výhradně negativním způsobem. Změny způsobené ve struktuře povrchu ovšem nebyly nijak výrazné a v případě 2D parametrů se pohybovaly převážně v řádech setin jednotek, a to v obou směrech měření. U 3D parametrů jsou výsledky opět rozmanitější.

Tab. 17 Vyhodnocení sady vzorků 118, 120 a 122.

Sada vzorků 118, 120 a 122						
2D				3D		
Parametr		Směr		Parametr		Hodnota
		Západ-Východ	Sever-Jih			
Ra	[µm]	-0,034	-0,026	Sa	[µm]	-0,026
Rz	[µm]	-0,068	-0,056	Sz	[µm]	-0,138
Rp	[µm]	-0,023	-0,029	Sp	[µm]	-0,141
Rv	[µm]	-0,045	-0,028	Sv	[µm]	-0,150
RSm	[mm]	0,004	0,004	Spd	[mm^{-2}]	636,500
RPc	[mm^{-1}]	-0,167	-0,376	Spc	[mm^{-1}]	5,833

Během odstraňování nečistot na površích vzorků došlo ke zhoršení téměř všech 2D a 3D parametrů. Výjimku ve 2D představuje parametr RSm, u kterého jako jediného došlo ke zlepšení, a to v obou směrech měření. U ostatních měřených veličin byly pozorovány negativní projevy laserového paprsku na čištěné ploše. Díky nárůstu hodnot RSm byla získána větší průměrná šířka prvku, jež má pozitivní vliv na vzhledové vlastnosti vzorků. Na 3D parametrech textury povrchu lze pozorovat zlepšení u Spd a Spc. Z Spd je patrné, že vlivem laserového čištění došlo ke snížení počtu výstupků na dané plochy vzorků a zvýšení hodnoty Spc naznačuje lepší odrazivost očištěných ploch vůči těm referenčním.

Z uvedených výsledků vyplývá, že se zvyšujícím se výkonem laseru podmínečně nedochází k narůstajícím defektům na čištěných plochách. U dílenského znečištění byla získána široká paleta výstupních hodnot v rámci materiálu z oceli 11 443, tak jako tomu bylo i v případě barevného nátěru. Nelze proto jednoznačně uvést, při jakých nastavených parametrech laserového přístroje docházelo k největším změnám v povrchové struktuře materiálu. Při výkonu 120 W však došlo k významnému zlepšení prakticky všech parametrů textury povrchu (mimo parametru Spc) a zároveň i k největším naměřeným změnám v jejich velikosti.

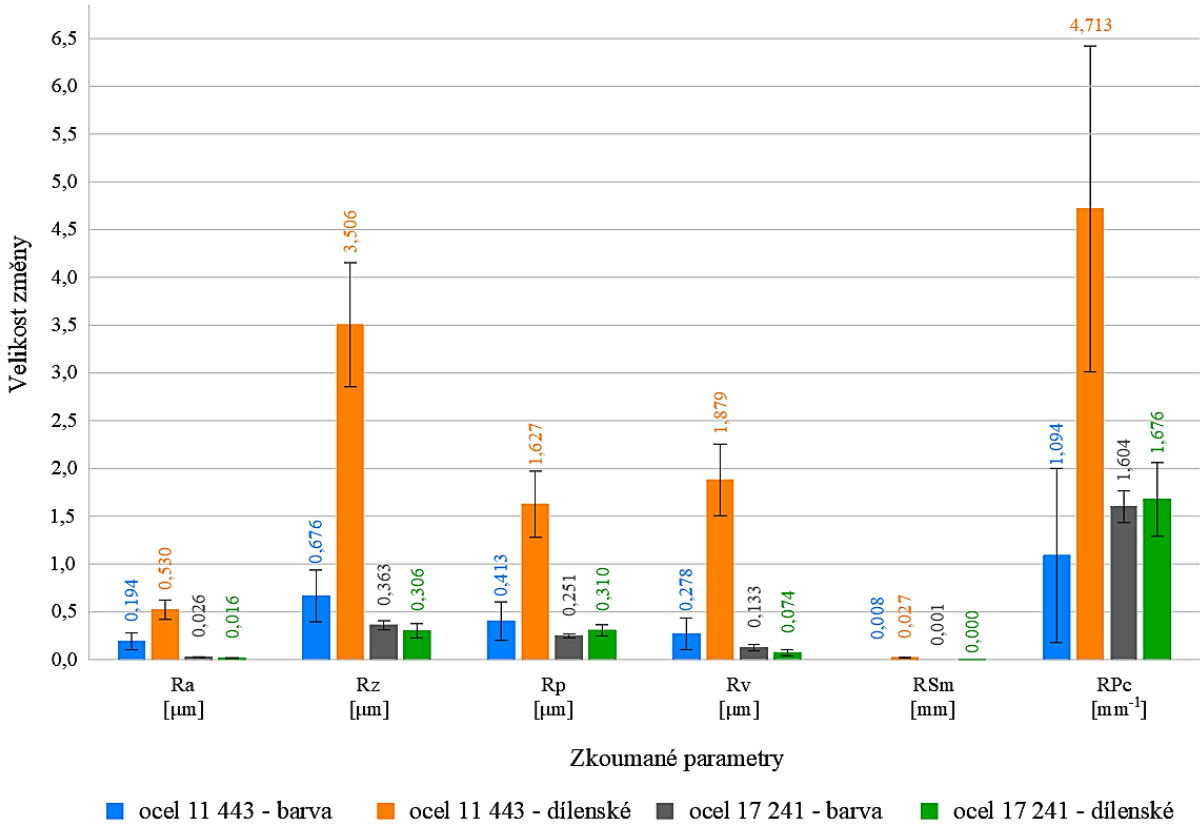
Stejně tak jako u barevného nátěru i zde je nutné konstatovat, že plochy byly čištěny pouze do odstranění daných nečistot, což pro rostoucí výkon laseru znamenalo kratší čas jeho působení na daný povrch materiálu. Rozdíl mezi dobami působení laserového paprsku u nejnižšího a nejvyššího nastaveného výkonu i v tomto případě činí 58 s. Opětovně lze proto vyslovit předpoklad, že pokud by laserové paprsky o stejné frekvenci, ale s různými výkony působily na materiál stejně dlouho, zajisté by ve struktuře povrchu došlo k větším změnám u laseru s vyšším výkonem.

4.4.1 Shrnutí výsledků

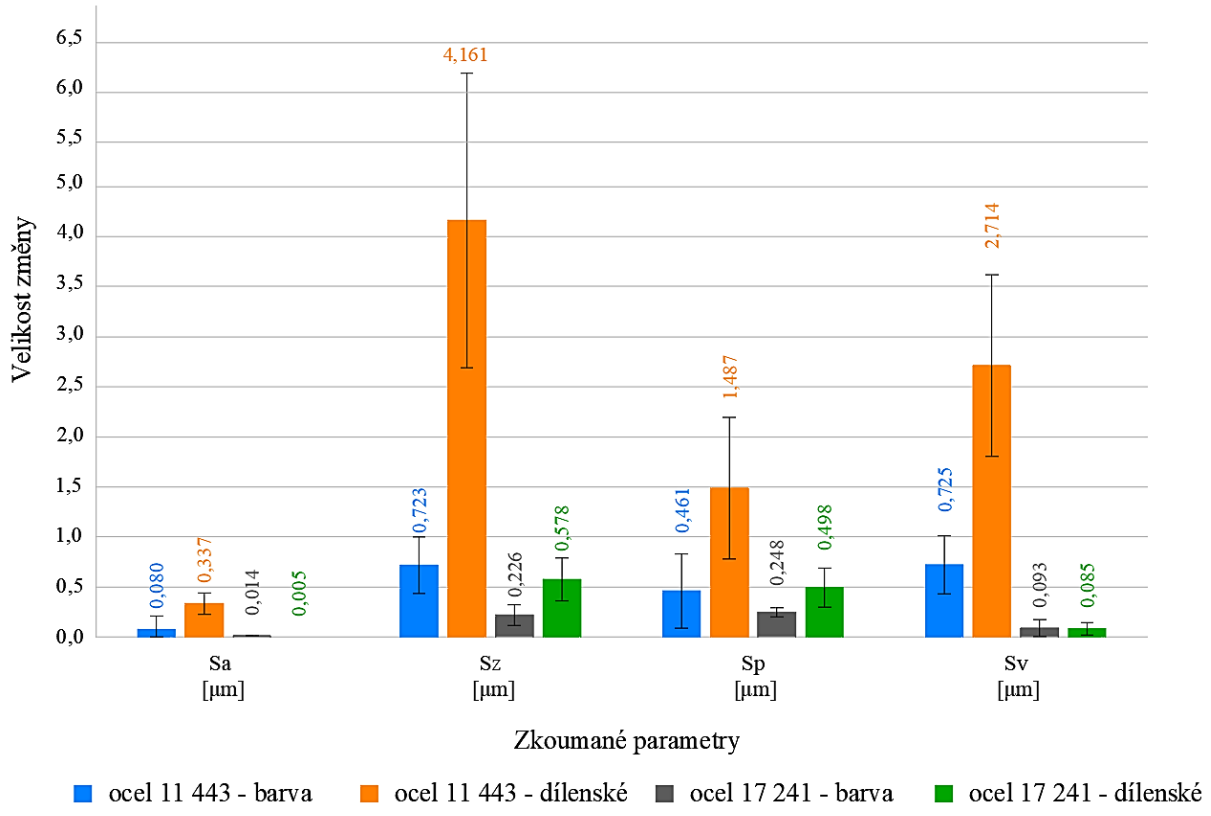
V rámci celkového shrnutí naměřených dat a vypočtených údajů lze konstatovat, že během procesu laserového čištění dochází k ovlivnění i povrchové vrstvy základního materiálu. Změny struktury se v tomto experimentu projevily převážně negativním způsobem, tedy došlo ke zhoršení drsnosti a celkového vzhledu čištěných ploch. Tyto změny v textuře povrchu však nebyly nijak výrazné a pouhým okem je nebylo možné postřehnout.

Laserové čištění pozitivně ovlivnilo několik zkoumaných parametrů z obou měřených profilů (2D i 3D). U oceli 17 241, jejíž povrch byl kontaminován barevným nátěrem, bylo zaznamenáno zlepšení různých měřených veličin, avšak pouze v případě Spc došlo k progresi při nastavení jakéhokoliv testovaného výkonu laseru. S dílenským znečištěním byl rovněž registrován velký počet zlepšených parametrů (především s nastaveným výkonem na 120 W), nicméně z celkového pohledu všech nastavovaných výkonů měl laserový paprsek nejčastěji pozitivní vliv na parametry Rv a Sv. Za zmínku rovněž stojí i parametr RSm, jež byl u oceli 17 241 většinově zlepšován nebo na jeho velikost nemělo laserové čištění prakticky žádný vliv. V případě oceli 11 443 s barevnou kontaminací povrchu bylo naměřeno zlepšení hodnot Spc při nastavení jakéhokoliv testovaného výkonu, podobně jako u oceli 17 241. U dílenského znečištění byla pozitivní změna zkoumaných parametrů nejčastěji zaznamenána u RSm a Spd, kde k progresi došlo u všech tří nastavených výkonů.

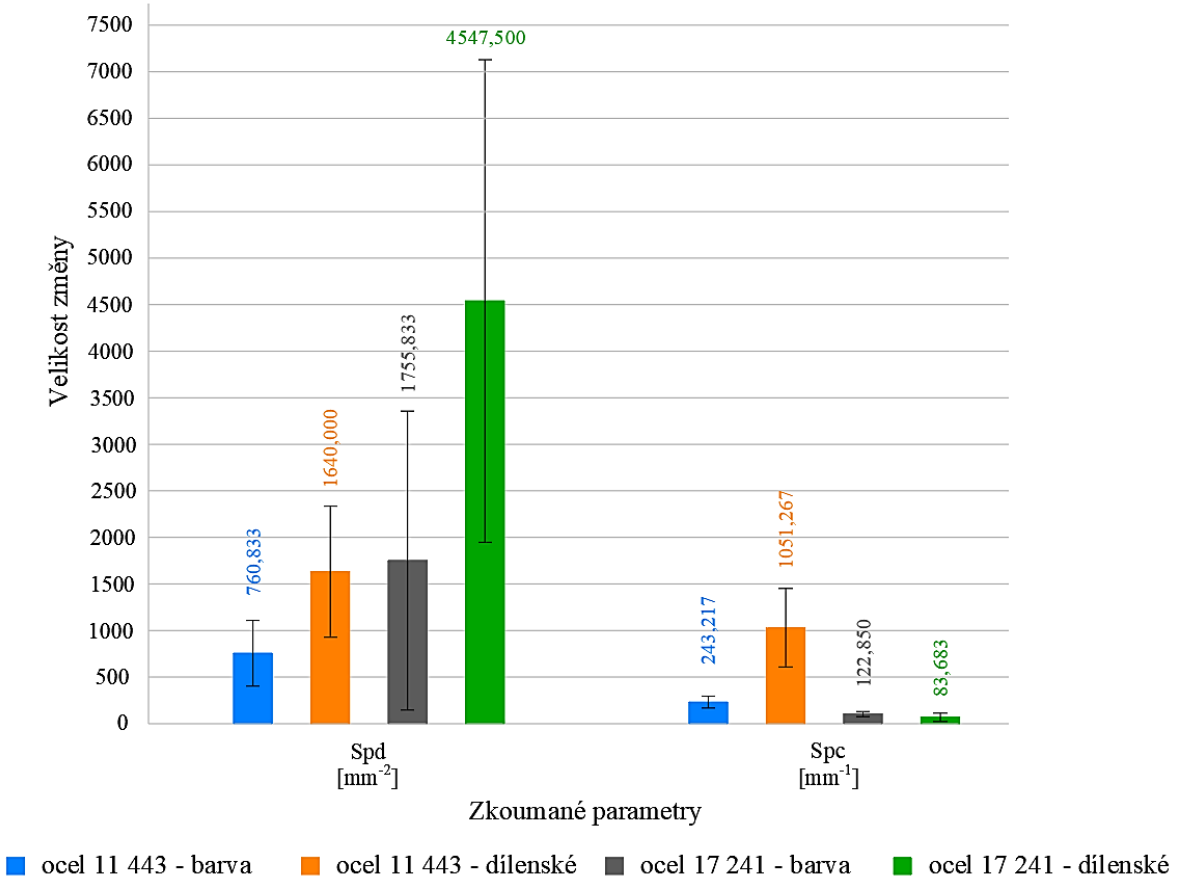
Pro porovnání výsledků celkových změn (pozitivních i negativních) byl proveden součet absolutních hodnot vypočtených rozdílů, jež jsou uvedeny v předchozích tabulkách (tab. 6 až tab. 17), a získané výsledky s odhady střední směrodatné odchylky byly následně vyneseny do sloupcových grafů, viz obr. 33 až obr. 35. Vyhodnocení 3D parametrů je z důvodu velkých velikostních rozdílů mezi výškovými a plošnými parametry pro lepší přehlednost rozděleno do dvou grafů.



Obr. 33 Vyhodnocení celkových změn u 2D parametrů textury povrchu.



Obr. 34 Vyhodnocení celkových změn u 3D výškových parametrů textury povrchu.



Obr. 35 Vyhodnocení celkových změn u 3D plošných parametrů textury povrchu.

U oceli 17 241 znečištěné barevným nátěrem byla v celkovém součtu rozdílu, z výškových 2D parametrů nejvíce měněna hodnota Rz a naopak nejméně na laserový paprsek reagovala střední aritmetická úchylka profilu, značená Ra. Ze dvou zkoumaných délkových 2D parametrů byla více ovlivněna velikost RPc a v plošném 3D měřítku jednoznačně Spd. V rámci zkoumaných 3D výškových parametrů paprsek laseru nejvýrazněji ovlivnil Sp, naopak nejmenší změny byly zaznamenány u Sa.

Při zbavování se dílenského znečištěním, jímž byla potřísněna ocel 17 241, byla v celkovém součtu rozdílu z výškových 2D parametrů nejvíce měněna hodnota Rp a naopak nejméně na laserový paprsek reagovala střední aritmetická úchylka profilu, značená Ra. Ze dvou zkoumaných délkových 2D a plošných 3D parametrů došlo k výraznější změně velikosti u RPc a Spd, stejně jako v případě barevného nátěru. V rámci zkoumaných 3D výškových parametrů byla největší odchylka zaznamenána u Sz, na druhou stranu nejméně ovlivněn byl jednoznačně parametr Sa.

U oceli 11 443, z níž byl odstraňován barevný nátěr, byla v celkovém součtu rozdílu z výškových 2D parametrů nejvíce ovlivněna hodnota Rz a naopak nejméně na laserový paprsek reagovala střední aritmetická úchylka profilu Ra. Ze dvou zkoumaných délkových 2D parametrů byla více pozměněna velikost RPc a v plošném 3D měřítku Spd. V rámci zkoumaných 3D výškových parametrů paprsek laseru nejvíce přeměnil Sv, naopak nejmenší změny byly u Sa.

Během odstraňování dílenského znečištěním z oceli 11 443 byla v celkovém součtu rozdílu, z výškových 2D parametrů nejvíce měněna hodnota Rz. Nejméně na laserový paprsek reagovala střední aritmetická úchylka profilu Ra. Ze dvou zkoumaných délkových 2D a plošných 3D parametrů byly více pozměněny velikosti u RPc a Spd, tak jako ve všech předchozích případech. V rámci zkoumaných 3D výškových parametrů byla největší odchylka zaznamenána u Sz, naopak nejméně ovlivněným byl bezesporu parametr Sa.

Za účelem potvrzení získaných hodnot a objektivnosti celého experimentu bylo testování provedeno na několika sadách vzorků, přičemž každá sada měla parametry laserového zařízení nastaveny odlišně. Pro vyhodnocení změn ve struktuře povrchu bylo provedeno šest měření na očištěných plochách a tři měření na plochách s původní drsností. Z těchto získaných dat bylo následně provedeno statistické vyhodnocení, jež sloužilo jako podklad pro grafické zhodnocení změn v povrchové textuře.

4.4.2 Diskuze

Vliv velikosti výkonu laseru na kvalitu povrchu základního materiálu nelze v tomto experimentu plně vyhodnotit, neboť stanovená podmínka doby čištění spočívala v působení laserového paprsku na nečistoty pouze do doby jejich odstranění a tato doba se se zvyšujícím se výkonem laseru zkracovala, viz tab. 2. Daná podmínka brání paprsku po odstranění nečistot dále ovlivňovat povrch čištěného dílce, což je samozřejmě pozitivní a v běžném provozu žádoucí. Lze se však domnívat, že pokud by na materiál po stejnou dobu působily dva laserové paprsky o jednotné frekvenci, ale odlišném výkonu, došlo by k větším změnám v textuře povrchu u paprsku s vyšším výkonem.

Pro zisk lepších a relevantnějších výsledků by dle názoru autora bylo prospěšné provést měření na větším počtu testovaných vzorků, čímž by došlo ke snížení chybovosti zapříčiněné případnou odchýlenou naměřenou hodnotou, získanou u jednotlivých vzorků a na nich zkoumaných parametrech drsnosti povrchu. Dále by bylo vhodné místo ručního laserového zařízení použít počítačem řízený stroj, díky kterému by byl zajištěn konstantní posuv, vzdálenost od čištěného povrchu a úhel sklonu laserové hlavy vůči čištěnému materiálu. Myšlenku tohoto experimentu by dále šlo rozvinout s použitím širšího spektra čištěných

materiálů či druhů jejich kontaminace. Další z výzkumů laserového čištění by se mohl zaobírat tím, jak laserový paprsek ovlivňuje mikrostrukturu materiálu a zda nedochází při čištění k jeho velkému tepelnému ovlivnění.

Při práci s laserovým zařízením bylo nad rámec stanovených cílů provedeno i několik pokusů spočívajících v očištění vybraných materiálů (ocel 11 443 a ocel 17 241) od asfaltu, který představuje poměrně silné znečištění, jež nelze snadno odstranit. Obtížné odstranění se potvrdilo i během laserového čištění, kde bylo nutné povrch dlouhou dobu ozařovat světelným paprskem, ale i tak nedošlo ke kompletní extrakci asfaltového povlaku. Očištěný povrch byl místy stále pokryt tenkou vrstvou znečištění, kterou nebylo možné dále odstranit, a to ani s nastavením nejvyšších možných parametrů laserového zařízení (50 kHz a 200 W). V celkovém zhodnocení pokusu s asfaltovým znečištěním lze konstatovat, že jelikož jeho kompletní odstranění pomocí laseru bylo prakticky nemožné, hodnotí autor tuto technologii jako nevhodnou pro daný typ povrchové kontaminace.

ZÁVĚR

V práci byla rozebrána problematika vlivu laserového čištění na povrch základního materiálu, resp. na jeho texturu povrchu. Teoretická část práce byla zaměřena na charakteristiku laserových technologií a na přehled metod čištění povrchu v oblasti strojírenství. Rovněž zde byla představena společnost ŽLUTÉ LASERY s.r.o., díky níž došlo ke vzniku a vypracování této diplomové práce. V praktické části byl popsán průběh experimentu a byla v ní rozebrána volba materiálů, výroba vzorků, výběr kontaminantů a jejich aplikace na určené plochy, proces laserového čištění a měření drsnosti. Zkoumanými parametry drsnosti povrchu byly Ra, Rz, Rp, Rv, RSm, RPc, Sa, Sz, Sp, Sv, Spd a Spc. Pro vyhodnocení změn ve struktuře povrchu bylo provedeno šest měření na očištěných plochách a tři měření na plochách s původní drsností. Data získaná měřením byla následně statisticky vyhodnocena. V závěrečné části práce bylo provedeno slovní a grafické zhodnocení naměřených a statisticky zpracovaných údajů o povrchové struktuře čištěných materiálů, a rovněž zde byly navrženy možnosti zkvalitnění získaných dat a případné další výzkumy v této oblasti.

Získané poznatky budou mít zcela jistě pozitivní přínos pro spolupracující společnost ŽLUTÉ LASERY s.r.o., neboť diplomová práce byla do značné míry vypracována dle jejich provozních potřeb. Vybrané materiály a druhy znečištění byly podrobeny laserovému čištění s nastavením konstantní hodnoty frekvence 30 kHz na laserovém zařízení. U této frekvence byla zjištěna minimální přípustná hodnota volitelného výkonu laserového zařízení, při které je možné dané povrchové kontaminace odstranit a pro oba druhy znečištění představovala pro hodnotu frekvence 30 kHz 40 % z výkonu laserového přístroje. V rámci experimentu byly dále stanoveny přibližné časy čištění předem připravených kontaminovaných ploch a bylo provedeno vyhodnocení vlivu laserového paprsku na texturu základního materiálu.

V rámci zpracování diplomové práce došlo k naplnění zadání, přičemž bylo dosaženo následujících cílů:

- zpracování literární rešerše, jež představuje laserové technologie v oblasti strojírenství, dále přehled a rozbor metod čištění povrchů ve strojírenském průmyslu a rovněž i seznámení se společnost ŽLUTÉ LASERY s.r.o.,
- volby materiálů a výroby vzorků,
- výběru znečištění a jejich aplikace na dané plochy,
- odladění parametrů přístroje pro laserové čištění a samotné čištění povrchů,
- vizuálního zhodnocení očištěných ploch,
- měření drsnosti na zkoumaných plochách,
- statistického zpracování naměřených dat,
- celkového vyhodnocení změn v textuře povrchu.

Všechny vytýčené cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. EMAG. Zařízení pro laserové čištění LaserTec. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2019, č. 11 [cit. 2021-10-12]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/zarizeni-pro-laserove-cisteni-lasertec
2. NOTUS. Ako zvýšiť kvalitu povrchových úprav. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2017, č. 11 [cit. 2021-10-12]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/ako-zvysit-kvalitu-povrchovych-uprav
3. JEDELSKÝ, J., P. NĚMEC, D. VESELÝ a P. KALENDA. Povrchová úprava materiálů pomocí laseru. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2005, č. 4 [cit. 2021-10-12]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchova-uprava-materialu-pomoci-laseru
4. *Žluté lasery: laserové řezání, svařování a čištění.* Žluté lasery, [b.r.]. Dostupné také z: https://www.zlutelasery.cz/_files/ugd/b6d332_8a4c076d6bbf43da92ed123dc75fdaed.pdf
5. About us – HGLASER: Company Introduction. HGLaser Engineering. *HGTECH: Laser Cutting & Cleaning Manufacturers, Suppliers, Factory – HGLASER* [online]. ©1999-2021 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: https://www.hglaserglobal.com/about-us.html
6. Certifikace a firemní kultura. Liquid Design. *Bottling Printing: Průmyslové značení a kódování produktů a obalů* [online]. ©2022 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: https://www.bprinting.eu/certifikace-a-firemni-kultura
7. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I.* Vyd. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
8. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4025-8.
9. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I: elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění.* Vyd. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016, 106 s. ISBN 978-80-248-3943-1.
10. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění.* Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
11. SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky.* Praha: Academia, 1990, 195 s. Cesta k vědění. ISBN 80-200-0354-1.
12. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění.* Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1989, 122 s.
13. KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *Nekonvenční technologie.* Vyd. 1. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998, 164 s. Učebnice pro odborné školy. ISBN 80-7200-296-1.
14. ŘASA, J. a Z. KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2008, č. 3 [cit. 2021-11-09]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil
15. Fyzikálně-chemická mikrostruktura hmoty: atomy a atomová jádra. *AstroNuklFyzika* [online]. Vojtěch Ullmann, [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika.htm

16. KUBÁTOVÁ, Jitka a Ivo LUKEŠ. *Laserové technologie opracování kovových materiálů.* Dobrá u Frýdku-Místku: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1988, 36 s. Hutnické aktuality. ISSN 0322-8525.

17. BAJER, Jan. Výzkum laserových technologií: nové možnosti. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2021, č. 4 [cit. 2021-11-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/vyzkum-laserovych-technologii-nove-moznosti

18. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert Bielak. *Laserové technológie.* Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.

19. PILOUS, Václav. *Technologie kovových materiálů.* Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, 126 s. ISBN 978-80-7043-699-8.

20. Laserové svařování. *LaserTherm: lasery pro průmyslové technologie* [online]. ©2019 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu

21. MRŇA, Libor. Temná zákoutí laserového svařování. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2021, č. 4 [cit. 2021-11-26]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/temna-zakouti-laseroveho-svarovani

22. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem.* Vyd. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016, 120 s. ISBN 978-80-248-3944-8.

23. ŘASA, Jaroslav a Z. KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2008, č. 5 [cit. 2021-12-09]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil

24. Int laserem int laserovm paprskem Nd YAG Excimer. In: *SlideToDoc* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://slidetodoc.com/itn-laserem-itn-laserovm-paprskem-nd-yag-excimer/

25. KOŽMÍN, Pavel a M. ŠORM. Laserové mikrostrukturování. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2021, č. 4 [cit. 2021-12-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-mikrostrukturovani

26. KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1996, 89 s. ISBN 80-01-01472-X.

27. Úpravy povrchů kovů. *Informační portál Úpravy povrchů* [online]. ©2015 [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: https://www.upravy-povrchu.cz/#1

28. Termické odlakování. *ATOMO PROJEKT s.r.o.: Povrchové a tepelné úpravy kovů* [online]. ALFADESIGN.CZ, ©2021 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: https://atomo.cz/termicke-a-chemicke-odlakovani/

29. Čištění plazmou a kde se používá. *Meritage: age of merit* [online]. Meritage s.r.o., [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: https://www.meritage.cz/cisteni-plazmou-a-kde-se-pouziva/

30. SEDLÁK, Josef. *Konzultace DP* [e-mail]. 21. března 2022 [cit. 2022-03-22].

31. KRMÁŠKOVÁ, Vlasta. Průmyslové čištění drobných dílů. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2009, č. 4 [cit. 2022-01-18]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-cisteni-drobnych-dilu

32. KOPŘIVA, Andreas. *Porovnání účinnosti odmašťovacích prostředků* [online]. Praha, 2015, 65 s. [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63519/F2-BP-2015-Kopriva-Andreas-BPAndreasKopriva.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Kudláček.

33. Organická rozpouštědla a možnosti jejich zpracování. Omega Design. *Recyklace-redidel.cz* [online]. ©2022 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: https://www.recyklace-redidel.cz/chci-vedet-vic/organicka-rozpoustedla-a-moznosti-jejich-zpracovani/

34. VÁŇA, Pavel. Moření v kyselině solné. In: *EKOMOR* [online]. ©2022 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: http://www.ekomor.cz/wp-content/uploads/2017/04/Mo%C5%99en%C3%AD-v-kyselin%C4%9B-soln%C3%A9-Konference-OP-2016-min.pdf

35. KUBÍČEK, Jaroslav. Moření a leštění. Josef Řídký. In: *Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno* [online]. 2018 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_moreni_a_lesteni_2018_kubicek.pdf

36. Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2002, č. 5 [cit. 2022-01-25]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu

37. KUBÍČEK, Jaroslav. Tryskání. Josef Řídký. In: *Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno* [online]. 2018 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_tryskani_2018_kubicek.pdf

38. HORŇÁK, David. *Využití suchého ledu při čištění povrchů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=212347. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vítězslav Máša.

39. JANČA, Ladislav. Tryskání zvlhčeným abrazivem. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2009, č. 4 [cit. 2022-01-30]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/tryskani-zvlhcenym-abrazivem-2

40. FLIMEL, Karol. Laser jako nástroj pro vysokorychlostní čištění. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2016, č. 1,2 [cit. 2022-02-02]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/laser-jako-nastroj-pro-vysokorychlostni-cisteni

41. ŠVÁBEK, Roman. Lasery s krátkými pulzy pro povrchové úpravy. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2016, č. 12 [cit. 2022-02-02]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-s-kratkymi-pulzy-pro-povrchove-upravy

42. TAM, Andrew C., H. K. PARK a C. P. GRIGOROPOULOS. Laser cleaning of surface contaminants. *Applied Surface Science: a journal devoted to applied physics and chemistry of surfaces and interfaces* [online]. 1998 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0169-4332. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433297007885

43. LASCAM systems. LASCAM – Seriál o průmyslových laserech, díl I. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2017, č. 3 [cit. 2022-02-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/lascam-serial-o-prumyslovych-laserech-dil-i

44. DVOŘÁČEK, Pavel. Princip laserového čištění a jeho možnosti. *MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2019, č. 11 [cit. 2022-02-10]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/princip-laseroveho-cisteni-a-jeho-moznosti

45. PERRET, Arthur. How does laser cleaning work in 5 steps. In: *Laserax* [online]. 2020 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: https://www.laserax.com/blog/how-does-laser-cleaning-work

46. VEIKO, Vadim P., T. Ju. MUTIN, V. N. SMIRNOV, E. A. SHAKHNO a S. A. BATISHCHE. Laser cleaning of metal surfaces: physical processes and applications. In: *SPIE: The International Society for Optical Engineering* [online]. 2008 [cit. 2022-02-12]. Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies, vol. 69850D. DOI: 10.1117/12.786975. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/252997013_Laser_cleaning_of_metal_surfaces_Physical_processes_and_applications_-_art_no_69850D

47. Laserové čištění. digihive. *Narran: Laser precision* [online]. ©2021 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://narran.cz/aplikace/laserove-cisteni/

48. Laser restoration of Basilica di San Miniato al Monte. *El.En Group: Laser devices for health, industry, conservation* [online]. ©2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://elengroup.com/news/basilica-san-miniato-restoration.html

49. Armat. [Specifikace nerezových materiálů]. [b.r.]. Dostupné z: https://armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf

50. Jakosti nerezových materiálů. eStudio. *Inerez.cz: nerezový materiál a zařízení* [online]. 3Q Metal. ©2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/

51. Materiálové normy. Ferona online [online]. Ferona a.s., ©2017 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: https://online.ferona.cz/materialove-normy/

52. Ruční spektrometr a ruční analyzátor kovů DELTA Professional. *BAS Rudice: Spektrometry* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.bas.cz/rucni-analyzator-kovu-pro-trideni-kovu-pmi/delta-professional-rucni-analyzator-kovu-spektrometr.php

53. Jiskrový spektrometr Q4 TASMAN. *BAS Rudice: Spektrometry* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.bas.cz/bruker-quantron/q4_tasman.php

54. KAPLONEK, Wojciech a Czeslaw LUKIANOWICZ. Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements. In: PADRON, Ivan, ed. *Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy* [online]. Londýn: IntechOpen, 2012, s. 1-27 [cit. 2022-04-16]. ISBN 978-953-51-0404-9. DOI: 10.5772/35059. Dostupné z: https://www.intechopen.com/chapters/33093

55. Měření drsnosti povrchu. *Elektronická učebnice: ELUC* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103

56. Taylor Hobson Precision. *Talysurf CCI Lite Non-contact 3D Profiler*. 2008. Dostupné také z: https://www.yumpu.com/en/document/read/38441865/producttalysurf-cci-liteqxd

57. ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu.* Český normalizační institut, 1999. Třídící znak 01 4449.

58. ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu.* 2012. Třídící znak 01 4451.

59. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu.* Český normalizační institut, 1999. Třídící znak 01 4450.

60. KARPÍŠEK, Zdeněk. *MATEMATIKA IV: Statistika a pravděpodobnost.* 4. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2014. ISBN 978-80-214-4858-2

61. *Technical data sheet: PRISMA EFFECT METALLIC PRO.* Rakousko: Schuller Eh'klar, 2019, 2 s.

62. *Technické informace: MOGUL 10W-40.* Pardubice: PARAMO, a.s., [b.r.].

63. Obchodní rejstřík. *kurzycz* [online]. ©2020–2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://rejstrik-firem.kurzy.cz/

64. Citace PRO citační software pro instituce. *Citace.com –naučte se citovat* [online]. ©2015–2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.citace.com/citace-pro

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
Al	Hliník	[-]
CO_2	Oxid uhličitý	[-]
Cr	Chrom	[-]
Fe	Železo	[-]
FeO	Oxid železnatý	[-]
Fe_2O_3	Oxid železitý	[-]
Fe_3O_4	Oxid železnato-železitý	[-]
H_2	Molekula vodíku	[-]
H_2SO_4	Kyselina sírová	[-]
HCl	Kyselina chlorovodíková	[-]
Mg	Hořčík	[-]
Mn	Mangan	[-]
N_2	Molekula dusíku	[-]
n	Počet kusů	[-]
Pb	Olovo	[-]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu	[µm]
Rp	Největší výška výstupku profilu	[µm]
RPc	Počet výstupků	[mm^{-1}]
RSm	Průměrná šířka prvků profilu	[mm]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu	[µm]
Rz	Největší výška profilu	[µm]
Sa	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	[µm]
Si	Křemík	[-]
Sp	Maximální výška výstupku omezené stupnice povrchu	[µm]
Spc	Aritmetický průměr zakřivení píku	[mm^{-1}]
Spd	Hustota píku	[mm^{-2}]
Sv	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	[µm]
Sz	Maximální výška omezené stupnice povrchu	[µm]
Ti	Titan	[-]
V	Vanad	[-]
$\bar{x}$	Aritmetický průměr	[-]
x_i	I-tý kus ze sady	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
CCI	Coherence correlation interferometry
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FSI	Fakulta strojního inženýrství
ISO	International organization for standardization
LAM	Laser assisted machining
LASER	Light amplification by means of stimulated emission of radiation
LBM	Laser beam machining
NM	Neměřené body

Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminum garnet
obr.	Obrázek
pH	Potential of hydrogen
resp.	Respektive
s.r.o.	Společnost s ručením omezeným
tab.	Tabulka
tzn.	To znamená
USB	Universal serial bus
ÚST	Ústav strojírenské technologie
VUT	Vysoké učení technické
ŽL	ŽLUTÉ LASERY s.r.o.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Q4 TASMAN – chemické složení oceli 17 241

Příloha 2 Q4 TASMAN – chemické složení oceli 11 443

Příloha 3 Barva PRISMA EFFECT METALLIC PRO – technický list

Příloha 4 Motorový olej 10W-40 – technický list

Příloha 5 Výstupní hodnoty měření drsnosti z přístroje Talysurf CCI

Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku

SampleNo

ocel 17 241

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.026	0.359	1.805	0.0015	0.0013	18.13	0.326	8.574	0.314	0.0046
2.	0.023	0.358	1.789	0.0012	0.00088	18.24	0.324	8.603	0.312	0.0042
3.	0.025	0.363	1.807	0.0016	0.0011	18.32	0.327	8.520	0.319	0.0047
4.	0.025	0.359	1.787	0.0013	0.00092	18.34	0.331	8.506	0.313	0.0050
5.	0.033	0.343	1.795	0.0021	0.0013	18.26	0.322	8.423	0.313	0.0036
⇑										
□	**0.026**	**0.356**	**1.797**	**0.0015**	**0.0011**	**18.26**	**0.326**	**8.525**	**0.314**	**0.0044**
⇓										
σ	0.0039	0.0077	0.0091	0.00035	0.00020	0.083	0.0034	0.069	0.0028	0.00054
υ	15.00	2.163	0.506	23.33	18.18	0.455	1.043	0.809	0.892	12.27

	As	B	Co	N	Nb	Sn	Ti	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0042	<0.0010	0.208	0.164	0.019	0.0084	0.0035	0.081	<0.020	69.95
2.	0.0036	<0.0010	0.209	0.173	0.016	0.0076	0.0034	0.080	<0.020	69.83
3.	0.0041	<0.0010	0.208	0.131	0.017	0.0087	0.0032	0.080	<0.020	69.84
4.	0.0039	<0.0010	0.208	0.121	0.016	0.0085	0.0035	0.081	<0.020	69.87
5.	0.0043	<0.0010	0.206	0.107	0.015	0.0085	0.0032	0.079	<0.020	70.06
⇑										
□	**0.0040**	**<0.0010**	**0.208**	**0.139**	**0.017**	**0.0083**	**0.0034**	**0.080**	**<0.020**	**69.91**
⇓										
σ	0.00028		0.0011	0.028	0.0016	0.00043	0.00016	0.00087		0.096
υ	7.000		0.529	20.14	9.412	5.181	4.706	1.087		0.137

Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku

SampleNo

ocel 11 443

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.039	0.022	0.222	<0.00050	<0.00030	0.0067	0.0040	<0.0015	0.0063	0.038
2.	0.043	0.021	0.222	<0.00050	<0.00030	0.0078	0.0037	<0.0015	0.0068	0.038
3.	0.040	0.020	0.221	<0.00050	<0.00030	0.0077	0.0037	<0.0015	0.0065	0.037
4.	0.044	0.019	0.220	<0.00050	<0.00030	0.0079	0.0035	<0.0015	0.0063	0.037
5.	0.039	0.022	0.222	<0.00050	<0.00030	0.0083	0.0047	0.0026	0.0068	0.039
⇑										
□	**0.041**	**0.021**	**0.221**	**<0.00050**	**<0.00030**	**0.0077**	**0.0039**	**0.0017**	**0.0065**	**0.038**
⇓										
σ	0.0023	0.0013	0.0010			0.00059	0.00047	0.00049	0.00025	0.00087
υ	5.610	6.190	0.452			7.662	12.05	28.82	3.846	2.289

	Al insol	Al sol	As	B	Bi	Ca	Ce	Co	N	Nb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	-0.0037	0.041	<0.00050	<0.00010	<0.0050	0.0017	0.0035	0.0018	>0.040	0.0038
2.	0.0023	0.036	<0.00050	<0.00010	<0.0050	0.0018	0.0039	0.0023	>0.040	0.0035
3.	0.0011	0.036	<0.00050	<0.00010	<0.0050	0.0018	0.0043	0.0019	>0.040	0.0037
4.	0.00014	0.037	<0.00050	<0.00010	<0.0050	0.0015	0.0040	0.0021	>0.040	0.0037
5.	0.0038	0.035	<0.00050	<0.00010	<0.0050	0.0015	0.0055	0.0024	>0.040	0.0040
⇑										
□	**0.00073**	**0.037**	**<0.00050**	**<0.00010**	**<0.0050**	**0.0017**	**0.0042**	**0.0021**	**>0.040**	**0.0037**
⇓										
σ	0.0028	0.0023				0.00016	0.00076	0.00025		0.00019
υ	383.56	6.216				9.412	18.10	11.90		5.135

	Pb	Sb	Sn	Ta	La	Ti	V	W	Zr	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0084	<0.0025	<0.00030	<0.010	<0.00050	0.00036	<0.00040	0.017	<0.00050	99.56
2.	0.011	<0.0025	<0.00030	<0.010	<0.00050	0.0010	<0.00040	0.015	0.00052	99.56
3.	0.0094	<0.0025	<0.00030	<0.010	<0.00050	0.00088	<0.00040	0.020	<0.00050	99.56
4.	0.0075	<0.0025	<0.00030	<0.010	<0.00050	0.00049	<0.00040	0.017	<0.00050	99.56
5.	0.011	<0.0025	<0.00030	<0.010	<0.00050	0.00067	<0.00040	0.018	<0.00050	99.55
⇑										
□	**0.0095**	**<0.0025**	**<0.00030**	**<0.010**	**<0.00050**	**0.00068**	**<0.00040**	**0.017**	**<0.00050**	**99.56**
⇓										
σ	0.0016					0.00027		0.0019	0.00001	0.0050
υ	16.84					39.71		11.18	2.000	0.0050

TECHNICAL DATA SHEET

Schuller Eh´klar GmbH
AUSTRIA
Im Astenfeld 6
A – 4490 St. Florian
Tel.(0043) 07224/68 200
Fax(0043) 07224/68 282
E-Mail: office@schuller.eu
www.schuller.eu

Schuller Eh'klar

16.11.2019

PRISMA EFFECT METALLIC PRO

Art. No. 91043, 91044,91047

Product Description: Decoration paint spray with metal pigments.

Properties and applications:

The paint spray delivers "leafing" effect to objects, gives the surfaces painted a pleasant appearance. The "leafing" effect could disappear by rubbing or overcoating. Suitable for decorating picture frames, ornaments, tee/coffe cups, Christmas items. Only for indoor application.

The temperature of the can must not be lower than 20°C to have a proper performance.

Childproof patented safety cap.

Technical data:

15 bar foil-coated can	
Net content	400ml
Appearance	containing pressurised liquid
Color	Miscellaneous
Scent	Typical solvent
Density at 20°C	0,75-0,80 g/ml
Pressure at 20°C	4,0 +/- 0,5 bar
Pressure at 50°C	8,0+/-0,5 bar
Flammability point	less than 0°C
Viscosity Ford Cup 4	From 11"
Remaining dry cylinder	From 21% to 26,4%
Grit to grindometro	From 8 to 10 Micron
Gloss	N.R.
Thickness 1 hand	7-10 Micron
Thickness 3 hands	22-30 Micron
Temperature resistance	110°C

DVR : 0054623
UID-Nummer : ATU 14258809
ARA-Lizenznummer : 00977

Zweigstelle Büro und Lager : 4490 St. Florian, HG Linz, FN 111542h
Zentrale : 1030 Wien, Hegergasse 7/16 , HG Wien, FN 111542h
Diese Lieferung erfolgt ausschließlich zu unseren Lieferungs- und Zahlungsbedingungen.

Schuller Eh´klar GmbH
AUSTRIA
Im Astenfeld 6
A – 4490 St. Florian
Tel.(0043) 07224/68 200
Fax(0043) 07224/68 282
E-Mail: office@schuller.eu
www.schuller.eu

Drying Time:

Dust Resistant	10 minutes
Dry to touch	20 minutes
Fully dry	24 hours

Art. No./Color:

91043	**Gold**
91044	**Goldbronze**
91047	**Copper**

Shelf-Life Time under proper storage condition: 2 Years.

Condition for safety storage:

Store at below 20°C. Keep away from unguarded flame and heat souces. Avoid direct exposure to sunlight. Cool and adquately ventilated.

Note:

Clean the surfaces before applying. The surfaces should be clean,dry and fet-free to reach good covering result.

Labelling:

Despite being considered reliable, this information is merely issued as a guideline. Its use implicates no liability by our company, including the breech of any patents or licenses. The user is responsible for checking that the product is suitable for the specific use.

PARAMO

Technické informace

MOGUL 10W-40
SAE 10W-40

POLOSYNTETICKÝ OLEJ PRO MOTORY OSOBNÍCH VOZŮ A LEHKÝCH UŽITKOVÝCH VOZIDEL

Popis:
MOGUL 10W-40 je celoroční polosyntetický motorový olej. Je vyroben z jakostních ropných a syntetických základových olejů a zušlechťujících přísad nejvyšší kvality (inhibitory oxidace a koroze, přísady detergentně disperzantní aj.).

Užití:
Je určen zejména k mazání moderních benzinových a naftových (i přeplňovaných) motorů osobních automobilů a lehkých užitkových vozidel, provozovaných celoročně. Velmi efektivní je jeho aplikace v motorech, pracujících za velmi nízkých teplot a tam, kde se žádá úspora paliva. Je vhodný rovněž pro motory používající jako paliva LPG a pro motory s katalyzátorem výfukových plynů.

Klasifikace, specifikace:
API SL/CF

Charakteristické vlastnosti:
- je zárukou bezproblémového celoročního provozu moderních motorů – umožňuje dobrou startovatelnost i při velmi nízkých teplotách
- dokonale chrání motor proti opotřebení
- potlačuje tvorbu vysokoteplotních úsad i nízkoteplotních kalů
- snižuje pasivní odpory motoru – umožňuje úsporu pohonných hmot
- zaručuje vynikající ochranu motoru proti korozi

Charakteristické parametry

Parametr	Jednotka	Hodnota	Norma
Kinematická viskozita při 100 °C	mm^2/s	13,5	ČSN EN ISO 3104
Viskozitní index		145	ČSN ISO 2909
Bod vzplanutí	°C	218	ČSN EN ISO 2592
Bod tekutosti	°C	-33	ČSN ISO 3016
TBN	mg KOH/g	6,2	ČSN ISO 3771

Hodnoty v tabulce jsou hodnotami typickými pro současnou produkci. Závazné parametry a další informace o výrobku jsou obsaženy v TN 23-780 PARAMO, a.s. a v bezpečnostním listu.
Podle Nařízení (ES) č. 1272/2008 (CLP) ***není*** *výrobek klasifikován jako nebezpečný.*

PARAMO, a.s., Přerovská 560, 530 06 Pardubice
tel.: 466 810 111, fax: 466 810 328
http: www.paramo.cz, e-mail: paramo@paramo.cz