

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104241-81434

**Laserové modifikácie funkčných povrchov tvárniacich
nástrojov**

Diplomová práca

2021

Bc. Denis Krajčovič

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104241-81434

**Laserové modifikácie funkčných povrchov tvárniacich
nástrojov**

Diplomová práca

Študijný program: obrábanie a tvárnenie

Študijný odbor: strojárstvo

Školiace pracovisko: Ústav výrobných technológií

Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.

Trnava 2021

Bc. Denis Krajčovič



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Denis Krajčovič**
ID študenta: 81434
Študijný program: obrábanie a tvárnenie
Študijný odbor: strojárstvo
Vedúca práce: doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.
Miesto vypracovania: MTF STU so sídlom v Tmave

Názov práce: **Laserové modifikácie funkčných povrchov tvárniacich nástrojov**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

- 1 Modifikácie vlastností funkčných povrchov nástrojových materiálov
- 2 Proces laserového mikroobrábania – textúrovania
- 3 Analýza tvarových a rozmerových parametrov prvkov mikrotextrúr

Riešenie zadania práce od: 15. 02. 2021

Dátum odovzdania práce: 25. 04. 2021

Bc. Denis Krajčovič
študent

Ing. Ivan Buranský, PhD.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Peter Šugár, CSc.
garant študijného programu

Podakovanie

Chcel by som sa poďakovať vedúcej práce doc. Ing. Jane Šugárovej, PhD. za neoceniteľné rady, odborné vedenie, spoluprácu a usmernenia, ktoré mi poskytla pri vypracovaní tejto diplomovej práce. Ďalej by som chcel poďakovať mojej rodine a mojej priateľke za podporu počas celého štúdia.

Táto diplomová práca vznikla v rámci projektu "Zvyšovanie profesijných kompetencií absolventov univerzitného vzdelávania v odbore Výrobné technológie implementovaním prvkov duálneho vzdelávania" (022STU-4/2019), s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR a projektu SmartEUREKA (S 0104-FlexTool) "An Integral Process Value Chain Based on Hybrid Manufacturing Process for a Flexible and Reconfigurable Production of High Complex Tooling".

SÚHRN

KRAJČOVIČ, Denis, Bc.: *Laserové modifikácie funkčných povrchov tvárniacich nástrojov*. [Diplomová práca] - Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. - Školiteľ: prof. Ing. Jana Šugárová, PhD., - Trnava: MTF STU, 2021. 84 s.

Cieľom diplomovej práce je analyzovanie tvarových a rozmerových parametrov textúr, vytvorených nanosekundovým vláknovým laserom na návare z materiálu SK STELKAY 6-G.

Diplomová práca je rozdelená do troch častí. V prvej časti sa nachádzajú modifikácie vlastností funkčných povrchov nástrojových materiálov, ktoré sa delia na metódy vyhotovenia povrchovej textúry od dolnej časti smerom nahor a na metódy vyhotovenia povrchovej textúry od hornej časti smerom nadol. Druhá časť pozostáva z opisu procesu laserového mikroobrábania – textúrovania. Táto časť je práce sa zameriava na princíp a metódy laserového textúrovania, druhy textúrovaných povrchov laserom, ale aj aplikáciami povrchových textúr vyhotovených laserom. Posledná časť diplomovej práce obsahuje opis experimentu. V tejto časti sa nachádza opísaný experimentálny materiál, využité zariadenia a vyhotovené textúry, ale aj vyhodnotenie experimentu. Výsledkom je analýza tvarových a rozmerových parametrov prvkov mikrotextúr.

Kľúčové slová : laser, obrábanie, textúrovanie povrchu

ABSTRACT

KRAJČOVIČ, Denis, Bc.: *Laser modified surfaces of forming tools*. [Master thesis] – Slovak University of Technology in Bratislava. Faculty of Materials Science and Technology in Trnava; Institute of Production Technologies. - Supervisor: prof. Ing. Jana Šugárová, PhD., - Trnava: MTF STU, 2021. 84 s.

The thesis main goal is to analyse the shape and dimensional parameters of textures created by the nanosecond fiber laser on the weld of SK STELKAY 6-G material.

Thesis is divided into three chapters. The first part contains modification properties of the functional surfaces of the tool materials, which are divided into methods of making a surface texture from the bottom upwards and methods of making a surface texture from the top downwards. The second part consists of a description of the laser micromachining process – texturing. This section of thesis focus on laser texturing principles and methods, types of textured surfaces by laser, and applications of surface textures created by laser. The last part of the thesis contains a description of the experiment. This section of thesis describes experimental material, used equipment, and created textures, but also evaluation of the experiment. The result is an analysis of the shape and dimensional parameters of microtexture elements.

Key words: laser, machining, surface texturing

OBSAH

ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK, ZNAČIEK	9
ZOZNAM IUSTRÁCIÍ A TABULIEK	10
ÚVOD	12
1 MODIFIKÁCIE VLASTNOSTÍ FUNKČNÝCH POVRCHOV NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLOV	13
1.1 Nástrojové materiály využívané na tvárniace nástroje	13
1.1.1 Nástrojové ocele.....	14
1.1.2 Keramické materiály	15
1.1.3 Spekané karbidy	17
1.1.4 Supertvrde materiály	19
1.1.4.1 Diamant	19
1.1.4.2 Kubický nitrid bóru	20
1.2 Možností modifikácie vlastností funkčných povrchov	21
1.2.1 Metódy vyhotovenia povrchovej textúry od dolnej časti smerom nahor.....	22
1.2.1.1 Mazivá.....	22
1.2.1.2 Tepelné spracovanie	23
1.2.1.3 Chemicko-tepelné spracovanie	24
1.2.1.4 Povlakovanie	25
1.2.2 Metódy vyhotovenia povrchovej textúry od hornej časti smerom nadol.....	28
1.2.2.1 Honovanie	28
1.2.2.2 Valčekovanie	30
1.2.2.3 Laserové mikroobrábanie	32
2 PROCES LASEROVÉHO MIKROOBRÁBANIA - TEXTÚROVANIA	33
2.1 Princíp laserového textúrovania	34
2.2 Metódy laserového textúrovania.....	34
2.3 Typy textúrovaných povrchov laserovým zväzkom.....	37
2.3.1 Nanotextúry.....	39
2.3.2 Mikrotextúry	40

2.4	Aplikácie povrchových textúr vyhotovených laserom	40
2.4.1	Využitie laserového textúrovania na modifikáciu tribologických vlastností povrchov.....	41
2.4.2	Využitie laserového textúrovania v medicíne	42
2.4.3	Využitie laserového textúrovania na modifikáciu optických vlastností	42
2.5	Prehľad tvarov laserových textúr využitých v experimentoch	44
3	ANALÝZA TVAROVÝCH A ROZMEROVÝCH PARAMETROV PRVKOV	
	MIKROTEXTÚR.....	50
3.1	Experimentálny materiál.....	50
3.2	Využitie zariadenie a vyhotovené textúry	51
3.3	Vyhodnocovanie rozmerovej presnosti zhotovených textúr.....	53
3.4	Kvalitatívne vyhodnotenie vyhotovených textúr	60
3.5	Zhrnutie.....	67
	ZÁVER	69
	ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	71

ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK, ZNAČIEK

Cr ₃ C ₂	dikarbid trichrómu
CrN	nitrid chrómu
CVD	Chemical Vapour Deposition (Chemické spôsoby tvorby vrstiev vo vákuu)
DLC	Diamond like carbon (Diamant ako uhlík)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia)
LDW	Laser direct write (Priama tvorba textúr)
LIPSS	Laser Induced Periodic Surface Structures (Periodické povrchové štruktúry indukované laserom)
LST	Laser surface texturing (Technológia laserového textúrovania)
MoS ₂	disulfid molybdénu
Nd-Yag	pevnolátkový laser ytrium-aluminium-granát dopovaný neodýmom
PVD	Physical Vapour Deposition (Fyzikálna depozícia z pár)
TaC	karbid tantalu
TiAlN	nitrid titánu a hliníka
TiC	karbid titánu
TiN	nitrid titánu
WC	karbid volfrámu

ZOZNAM IUSTRÁCIÍ A TABULIEK

Obrázok 1 Príklady využitia keramických materiálov na tvárniace nástroje	17
Obrázok 2 Spôsob výroby spekaných karbidov procesom práškovej metalurgie	18
Obrázok 3 Príklady nástrojov zo spekaných karbidov	19
Obrázok 4 Nástroje vyhotovené zo syntetického diamantu	20
Obrázok 5 Povlakované nástroje PVD povlakmi	26
Obrázok 6 Porovnanie povlakovaných nástrojov rôznymi povlakmi	28
Obrázok 7 Proces honovania	30
Obrázok 8 Porovnanie obrobených povrch po jednotlivých technológiách.....	31
Obrázok 9 Nástroj slúžiaci na technológiu valčekovania.....	32
Obrázok 10 Metóda laserového textúrovania cez masku	35
Obrázok 11 Priame laserové textúrovanie - LDW	36
Obrázok 12 Metóda pôsobenia laserového zväzku cez rotujúci perforovaný disk	37
Obrázok 13 Rozdelenie povrchových textúr	38
Obrázok 14 Rozdelenie laserom vytvorených povrchových textúr podľa veľkosti.....	38
Obrázok 15 Porovnanie usporiadaných a neusporiadaných nanotextúr.....	39
Obrázok 16 Rôzne typy textúr patriacich do skupiny mikrotextúr	40
Obrázok 17 Príklady rôznych hustôt útvarov laserovej textúry	41
Obrázok 18 Tvar textúry v experimente Vyhodnotenia trenia laserovo textúrovanej nástrojovej ocele	44
Obrázok 19 Tvary textúr použitých v experimente Vplyv povrchovej textúry nástroja na trenie a vlastnosti povrchových vrstiev formovanej súčasti.....	45
Obrázok 20 Tvary jednotlivých sád textúr využitých v experimente Nový tvar povrchovej textúry pre riadenie smerového trenia	46
Obrázok 21 Použité tvary textúr v experimente Laserové povrchové textúry nástrojovej ocle: hodnotenie kvality štruktúrovaných povrchov.....	47
Obrázok 22 Použité tvary v experimente Vplyv laserového textúrovania na odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu	48
Obrázok 23 Použité textúry v experimente Vplyv laserom štruktúrovaného povrchu na proces mazania	49
Obrázok 24 Použitý obrábací stroj	52
Obrázok 25 Vyhotovené textúry na návare	53
Obrázok 26 Navrhnuté rozmery tvarov textúr pre obidve sady	53
Obrázok 27 Laserový konfokálny mikroskop ZEISS LSM 700	54

Obrázok 28 Analyzovanie rozmerov textúr s tvarom kruhu	55
Obrázok 29 Analyzovanie rozmerov textúr s tvarom oválu.....	55
Obrázok 30 Pretavený materiál v strede oválnej textúry pri meraní prvej sady.....	56
Obrázok 31 Pretavený materiál v strede oválnej textúry pri meraní druhej sady.....	57
Obrázok 32 Vysokorozlišovací rastrovací elektrónový mikroskop s detektormi.....	60
Obrázok 33 Vyhodnocované textúry z prvej sady.....	61
Obrázok 34 Vyhodnocované textúry z druhej sady.....	61
Obrázok 35 Kvalitatívne vyhodnocovanie kruhových textúr pri 500-násobnom zväčšení.	62
Obrázok 36 Kvalitatívne vyhodnocovanie oválnych textúr pri 350-násobnom zväčšení ...	62
Obrázok 37 Kvalitatívne porovnávanie kruhových textúr	65
Obrázok 38 Kvalitatívne vyhodnotenie oválnych textúr	66
Obrázok 39 Pretavený materiál v strede textúry pri 250-násobnom zväčšení	67
Tabuľka 1 Parametre navárania.....	50
Tabuľka 2 Chemické zloženie prídavného materiálu SK STELKAY 6-G	50
Tabuľka 3 Parametre 5-osového laserového obrábacieho stroja Lasertec 80 Shape.....	51
Tabuľka 4 Porovnanie nameraných rozmerov kruhových textúr	58
Tabuľka 5 Porovnanie nameraných rozmerov oválnych textúr	59
Tabuľka 6 Priemerné hodnoty výšok vyhrnutého materiálu okolo textúr.....	59
Tabuľka 7 Priemerné hodnoty nameraných rozmerov na meraných útvarov s rozstupom 0,05 mm.....	63
Tabuľka 8 Priemerné hodnoty nameraných rozmerov na meraných útvarov s rozstupom 0,1 mm.....	64

ÚVOD

Tvárnenie materiálov je neoddeliteľnou súčasťou výrobných technológií slúžiacich na výrobu súčiastok. Rovnako ako pri technológií obrábania, tak aj pri technológií tvárnenia je najdôležitejšie vzájomné pôsobenie medzi nástrojom a tvárneným materiálom z pohľadu vzniku trenia. Trenie patrí do procesu tvárnenia a je jeho neodlúčiteľnou časťou. Je to neželaný jav, ktorý spôsobuje stratu mechanickej energie počas celého procesu tvárnenia, pokiaľ sú nástroje a tvárnený materiál v interakcii. Vplyv trenia je daný koeficientom trenia, ktorý sa snažíme minimalizovať.

Koeficient trenia sa v praxi môže znižovať viacerými metódami ako sú mazivá, tepelné spracovanie, chemicko-tepelné spracovanie, povlakovanie a aj mechanické obrábanie povrchu nástroja ako sú napr. honovanie, valčekovanie, ale aj laserové textúrovanie. Technológia laserového textúrovania patrí súčinnostnej dobe medzi najvyužívanejšie technológie, ktoré sa využívajú na zníženie koeficientu trenia. Touto technológiou sa vytvárajú textúry, ktoré pozostávajú z priehlbín rôznych rozmerov a tvarov. Priehlbiny majú rozmery niekoľko μm niekedy až nm . Tieto priehlbiny plnia úlohu pascí v ktorých sa zachytávajú častice uvoľnené pri abrazívnom opotrebení alebo zásobníkov pre mazivo. Znížením koeficientu trenia sa dosahuje aj predĺženie životnosti nástroja.

Cieľom práce je oboznámenie sa s možnosťami modifikácie vlastností funkčných povrchov so zameraním na laserové textúrovanie povrchov materiálov a analyzovanie tvarových a rozmerových prvkov mikrotextúr vyhotovených laserovým textúrovaním na návare z materiálu SK STELKAY 6-G.

1 MODIFIKÁCIE VLASTNOSTÍ FUNKČNÝCH POVRCHOV NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLOV

V kapitole číslo jedna budú objasnené materiály využívané na výrobu nástrojov konkrétne ich funkčných povrchov. Tieto nástroje sú určené na využitie pri operáciách tvárnenia. V tejto kapitole budú taktiež predstavené možnosti modifikácie vlastností už spomenutých funkčných povrchov nástrojových materiálov, ktorých cieľom je znížiť opotrebenie nástrojov vďaka zníženiu trenia.

1.1 Nástrojové materiály využívané na tvárniace nástroje

Významnú úlohu v procesoch pri ktorých dochádza k produkcii výrobkov majú nástroje, ktoré sa používajú pri výrobných procesoch v každej organizácii zameranej na výrobu. Tieto nástroje značne ovplyvňujú produktivitu a výkonnosť výrobného procesu. Dané charakteristiky sú vo výraznej miere závislé od vlastností nástroja a od jeho celkovej kvality, ktorú najviac ovplyvňuje materiál použitý na výrobu nástroja. Je veľmi veľké množstvo rozličných požiadaviek na nástroje a kvôli tomu musí byť aj viac rozličných druhov materiálov slúžiacich na výrobu nástroja. V porovnávaní nástrojových materiálov s konštrukčnými materiálmi sú nástrojové materiály charakteristické špecifickými úžitkovými vlastnosťami a chemickým zložením čo je združené aj s ekonomicky náročnejšou výrobou. Nástrojové materiály je možné roztriediť podľa využitia:

- na výrobu nástrojov využívaných pri procesoch tvárnenia (za studena, za tepla),
- na výrobu rezných nástrojov,
- na výrobu meracích nástrojov (kalibre),
- na výrobu foriem využívaných pri odlievaní kovov,
- na výrobu pomocných nástrojov,
- na výrobu prípravkov (Iždinská 2006; Moravčík 2010).

Nástrojové materiály využívané na výrobu nástrojov pre proces tvárnenia sa delia:

- nástrojové ocele,
- keramické materiály,
- spekané karbidy (WC, TiC, TaC + spojivo Co),
- supertvrde materiály (Moravčík 2010).

Pri výbere materiálu na výrobu tvárniacich nástrojov je dôležité rozlíšiť dve časti z ktorých sa skladá tvárniaci nástroj. Prvá časť pozostáva z konštrukčnej časti ktorej úlohou je zaistiť správny, ale aj spoľahlivý chod nástroja. Druhá časť spočíva z aktívnej časti. Táto časť prichádza do styku s materiálom, ktorý sa tvárni. Pri voľbe materiálu z ktorého budú jednotlivé časti nástroja vyrobené treba brať do úvahy veľa kritérií. Medzi najvýznamnejšie kritéria patria druh nástroja a jeho namáhanie, ďalej pevnosť, typ a rozmery materiálu, ktorý sa bude spracovávať, životnosť nástroja, tvar a veľkosť nástroja. Taktiež medzi tieto z rozhodujúce hľadiska patrí aj finančné kritérium. Pri využití menej kvalitných a lacnejších materiálov dochádza k rýchlejšiemu opotrebeniu a tým sa predlžujú vedľajšie časy výroby, ktoré súvisia s častejšou výmenou nástrojov s čím súvisí aj pokles produktivity. Ale pri využití kvalitnejších a drahších materiálov použitých na výrobu nástrojov dochádza k nárastu produktivity zmenšovaním vedľajších časov, ktoré súvisia s výmenou nástrojov v dôsledku opotrebenia. Avšak narastajú náklady potrebné na kúpu nástroja (Novotný 1985; Pecháček a kol. 2008; Polák, Hrivňák 1989).

1.1.1 Nástrojové ocele

Jedným zo špičkových výrobkov oceliarskeho priemyslu sú nástrojové ocele vďaka ich vysokej pevnosti, húževnatosti, dobrej obrobitelnosti a relatívne nízkym nákladom. Nástrojové ocele sú zliatiny na báze železa. Patria medzi najrozšírenejšie materiály slúžiace na výrobu nástrojov a mechanizmov využívaných na náročné cyklické trecie procesy, ako sú: nástroje na tvárnenie, frézy, strižné nástroje, rezné nože, lisovacie formy a pod. Veľkou výhodou týchto ocelí je možnosť zmeny vlastností vďaka zmene chemického zloženia a voľby špecifického tepelného spracovania. Tvrdosť pri zachovaní húževnatosti patrí do skupiny vyžadovaných finálnych vlastností nástrojových ocelí. Tieto vlastnosti sa získavajú pri procese zušľachtovania, ktorý sa skladá z termického kalenia a následného popúšťania. Pri procese kalenia prichádza k tvorbe martenzitickej štruktúry, vďaka ktorej má materiál požadovanú tvrdosť a pevnosť, ale súčasne má vysoké vnútorné napätia, ktoré znižujú jeho húževnatosť. Kvôli vysokým vnútorným napätiam musí ihneď po kalení nasledovať proces popúšťania, zásluhou ktorého sa dosahujú žiadané hodnoty mechanických vlastností ocele. Nástroje sú vyhotovované z kvalitnejších materiálov. Na základe chemického zloženia sú to väčšinou ocele s obsahom uhlíka väčším ako 0,77%. Požiadavky na nástrojové ocele sú často protikladné ako napríklad, aby oceľ mala dostatočnú pevnosť, ale aj húževnatosť. Na nástroje určené na prácu za studena sa požaduje

prekaliteľnosť, kaliteľnosť, tvrdosť, obrobitelnosť, odolnosť proti opotrebeniu, pevnosť v tlaku a v ohybe, húževnatosť a tvrdosť. Pri práci za tepla sa využívajú nástrojové ocele, ktoré majú vysokú tvrdosť pri bežných a zvýšených teplotách, odolnosť proti popusteniu, tepelnú vodivosť a odolnosť proti tepelnej únave. Nástrojové ocele určené na výrobu foriem používaných na odlievanie neželezných kovov a na tvárnenie plastov musia mať navyše lešiteľnosť, žiaruvzdornosť, chemickú, ale aj protikoroziu odolnosť. Uvedené vlastnosti sú zvyčajne dosiahnuté jedným alebo dvomi hlavnými prísadovými prvkami. Ostatné prísady znižujú nepriaznivý dosah hlavných prísad na ďalšie vlastnosti. Vhodným legovaním získame žiadané vlastnosti ocelí. Medzi najdôležitejšie prvky na legovanie patrí uhlík, mangán, kremík, chróm, nikel a ďalšie. Avšak uhlík a karbidotvorné prvky ako chróm, wolfrám, molybdén, a vanád majú osobitné postavenie. So zvyšujúcou koncentráciou uhlíka prichádza k rastu tvrdosti, ale ku znižovaniu húževnatosti. S rastúcim obsahom karbidotvorných prvkov dochádza ku zväčšeniu oteruvzdornosti a odolnosti ocelí proti popúšťaniu, a spolu s tým aj trvanlivosť a výkonnosť nástrojov, ale dochádza ku poklesu odolnosti voči tvorbe trhlín (Cigánová 2019; Gualteri et al. 2009; Hrnčiar 2006; Moravčík a kol. 2010).

Na výrobu nástrojov používaných pri procesoch tvárnenia sa využívajú nástrojové ocele a to buď uhlíkové alebo zliatinové (Novotný 1985).

1.1.2 Keramické materiály

Z mnohých archeologických nálezov vyplýva, že človek je sprevádzaný keramickými výrobkami už odpradávna. Dokonca z niektorých historických období sú keramické výrobky často jediným dôkazom o činnosti človeka. Keramické materiály boli pôvodne pripravované výlučne z prírodných surovín. Tieto materiály sú vlastne prvým materiálom, ktorý bol vyrobený človekom a mal špecifické vlastnosti a vynikajúcu stabilitu daných vlastností. Súčasné keramické materiály sú odlišné od tých pôvodne vyrábaných nielen použitými surovinami a úrovňou technologického spracovania, ale najmä svojimi úžitkovými vlastnosťami. Keramické materiály vyznačujú výrazný vedecko-technický pokrok. Tieto súčasné keramické materiály sú označované ako inžinierska keramika pretože majú vyššie kvalitatívne vlastnosti. Medzi hlavné výhody keramických materiálov sú veľmi dobré mechanické vlastnosti ako napr. odolnosť proti opotrebeniu, vysoká tvrdosť. Ďalšie výhody sú žiaruvzdornosť, koróziivzdornosť, oteruvzdornosť. Sú elektricky nevodivé a majú aj tepelno-izolačnú schopnosť, inertnosť k chemikáliám a okolitému prostrediu.

Z medziatómovej väzby, ktorá je všeobecne kovalentná a iónová a tiež z typu kryštálovej mriežky vyplýva krehkosť keramiky. Pohyblivé dislokácie sú v keramických materiáloch, ale majú malú možnosť pohybu a preto jednotlivé zrná navzájom neprispôsobujú svoje tvary pri plastickej deformácii. Polykryštalické kovové materiály majú dostatok sklzových rovín. Preto jednotlivé zrná sa môžu navzájom prispôsobovať tak, aby nevznikali medzi nimi trhliny. Ale keramické materiály toto nespĺňajú. Mikroštruktúra je vedľajšou príčinou krehkosti keramiky. Pretože keramika je spekaný materiál, ktorý je charakteristický pórovitosťou a nehomogenitou. V modernej inžinierskej keramike je krehkosť čiastočne potlačená. V súčasnosti poznáme viac druhov keramiky v závislosti od použitej kombinácie prvkov a účelu použitia. Keramické materiály sú vďaka dobrým mechanickým vlastnostiam široko uplatňujú v rôznych odvetviach priemyslu ako napr. v letektve, v stavebníctve, ale aj v oblasti výroby nástrojov najmä rezných nástrojov, ale čím ďalej viac a viac sa vyskytujú aj na nástroje pre procesy tvárnenia (Fang 2008; Hrivňák 1999; Moravčík 2010; Píška, Bučková 2018).

Tvárnacie nástroje sú vystavované veľkému namáhaniu a vysokému stupňu opotrebenia. A preto pri takýchto podmienkach sa technická keramika prejavuje ako prvotriedny materiál, pretože svojimi vlastnosťami je oveľa lepšia pri porovnaní s ostatnými nástrojovými materiálmi. V závislosti od použitého materiálu môžu byť nástroje extrémne opotrebované a preto procesy tvárnenia sú ďalšou oblasťou využitia keramických materiálov (Ceramtec 2019).

Na použité nástroje pri tvárnení má tiež zásadný vplyv mechanické a tepelné namáhanie, ktoré vznikajú pri procesoch tvárnenia. Toto namáhanie posúva nástroje neraz až na hranicu ich výkonností. Tvárnacie nástroje vyhotovené z keramických materiálov majú výnimočnú odolnosť voči týmto namáhaniam. Dosiahnuté výborné tribologické vlastnosti, ktoré vznikli pri použití tvárniacich nástrojov vyrobených z keramických materiálov zabezpečujú ich výnimočne dlhú životnosť. Keďže, keramické materiály majú výbornú chemickú a tepelnú odolnosť tak, nástroje vyrobené z takýchto materiálov sú vhodné aj na využitie v agresívnom prostredí ako sú napríklad kyseliny a lúhy. Možnosti aplikácií použitia keramických materiálov na tvárnacie nástroje sú na obr.1. Pri procesoch tvárnenie sa uplatňujú najmä keramické materiály:

- oxid zirkoničitý,
- oxid hlinitý,
- nitrid kremíka (Ceramtec 2019).



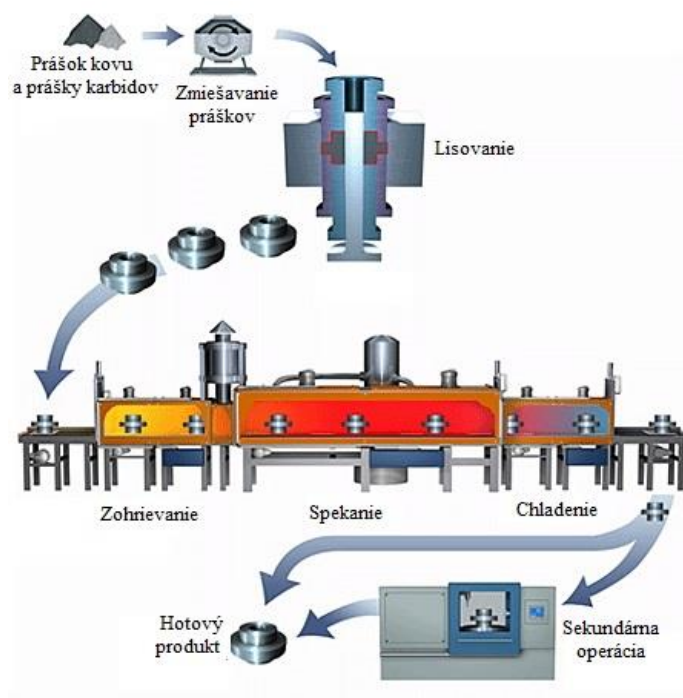
Obrázok 1 Príklady využitia keramických materiálov na tvárniace nástroje (Ceramtec 2019)

1.1.3 Spekané karbidy

Spekané karbidy vznikli kvôli nevyhnutnej potrebe vzniku materiálov slúžiacich na efektívnejšie obrábanie kovov. Aj keď už boli dávno známe tvrdšie materiály ako je kalená oceľ ako napr. korund alebo diamant, ale tieto materiály majú nízku húževnatosť a preto sa dali použiť iba vo forme voľných abrazívnych častíc alebo vo forme brúsnych kotúčov. Kvôli tomu, boli nevhodné pre využitie pre klasický rezný nástroj (Humár 2008).

Spekané karbidy sú vytvárané procesom práškovej metalurgie. Proces práškovej metalurgie patrí medzi progresívne technológie výroby materiálov, zobrazený na obr. 2. Tento proces je založený na lisovaní zmesi prášku, ktorá sa skladá zo zmesi kovových a keramických práškov ako napr. WC, TiC, TaC, Cr₃C₂ a kobalt, ktorý vytvára spojivo. Po ukončení procesu zlisovania sa táto zmes speká. Teplota spekania sa približuje teplote tavenia spojiva. Takýmto proces sa vytvára materiál s dostatočne vysokou pevnosťou v tlaku i v ohybe a s tvrdosťou, ktorá sa približuje k tvrdosti použitých karbidov. Najvyužívanejšie karbidy sú karbid volfrámu, titánu, tantalu a chrómu, ktoré zaručujú požadovanú tvrdosť. Ako spojivo je najčastejšie využívaný kobalt, pričom so stúpajúcim obsahom kobaltu klesá tvrdosť spekaných karbidov, ale pevnosť v ohybe sa zväčšuje. Ako ďalšie spojivá sa využívajú nikel, železo alebo nehrdzavejúca oceľ. Častice spojiva sú veľmi malé, rádovo niekoľko mikrometrov, ale výhodou je využitie nanočastíc pretože nástroje majú potom dostatočnú húževnatosť. Týmto procesom je možné vyhotoviť rôzne druhy materiálov alebo výrobkov, ktoré sa nedajú vyhotoviť konvenčnou metódou obrábania. Práškovou metalurgiou dosahujeme ekonomickejšiu výrobu, ale produkcia nových materiálov je

ekonomicky komplikovanejšia (Humár 2008; Janáč a kol. 2004; Macek a kol. 2006; Moravčík a kol. 2010).



Obrázok 2 Spôsob výroby spekaných karbidov procesom práškovej metalurgie (CMFURNACES 2015)

Spekané karbidy sa vo veľkom množstve využívajú na produkciu vymeniteľných rezných doštičiek na obrábacia nástroje, ale taktiež sa využívajú aj v iných oblastiach ako je napr. tvárnenie, pretože majú vynikajúcu tvrdosť, dlhodobú trvanlivosť ostria i pri vysokých teplotách, vynikajúcu odolnosť proti opotrebeniu a pevnosť v tlaku, ale sú krehkejšie. Príklady nástrojov zo spekaných karbidov sú na obr. 3. V tvárnení sa využívajú pri operáciách ohýbania na zlepšenie odolnosti proti opotrebeniu a na úsporu legovaných ocelí. Spekané karbidy sa taktiež používajú pri operáciách vykonávaných pri ťahaní drôtov, u ktorých je hlavným nástrojom prievlak. Ťažná sila a tlak na drôt zapríčinia v prievlaku vznik plastickej deformácie ťahaného drôtu. A preto sú kladené prísne nároky najmä na mechanické vlastnosti súvisiace s materiálom, z ktorého je prievlak vyhotovený. Najbežnejšie sa na výrobu prievlakov využívajú najmä spekané karbidy vytvorené z karbidov volfrámu alebo titánu a ako spojivo je použitý kobalt. Nástroje vyrobené zo spekaných karbidov sa dajú iba brúsiť prípadne obrábať elektroerozívnym spôsobom (Macek a kol. 2006; Moravčík a kol. 2010; Tittel 2010).



Obrázok 3 Príklady nástrojov zo spekaných karbidov (Bremer 2020)

1.1.4 Supertvrdé materiály

Do skupiny supertvrdých materiálov patria kubický nitrid bóru a diamant či už syntetický alebo prírodný, ktoré sú v súčasnosti najpoužívanejšie. Tieto materiály majú za následok rozšírenia alternatív a tiež zväčšenie výkonu nástrojov pri procesoch obrábania. Pôvodné určenie takýchto nástrojov bolo na operácie brúsenia. Až ďalším zlepšovaním procesov technológie výroby a neustálym kladeným väčšieho dôrazu na presnosť výrobkov prišlo k aplikovaniu supertvrdých materiálov do rezných procesov. V ktorých slúžia ako materiály na výrobu nástrojov (Jurko a kol. 2006).

1.1.4.1 Diamant

Diamant tvorí jednu z alotropických modifikácií uhlíka, pričom jeho štruktúra je vytvorená z kovalentného typu väzby. Tento materiál je krehký. Rozkladať sa začne okolo teploty 700 °C na vzduchu. Diamanty či už syntetický alebo prírodný sú takmer totožné. Oba neobsahujú nečistoty na základe čoho majú výborné vlastnosti. Diamant je využívaný v tvárnení na výrobu prievlakov slúžiacich na ťahanie drôtov s priemerom menším ako 0,06 mm, ale najčastejšie sa využíva na výrobu brúsnych kotúčov. Nástroje vyhotovené zo syntetického diamantu sú na obr. 4. Diamantové prievlaky sa delia na :

- prievlaky vyhotovené z prírodného diamantu určené na ťahanie drôtov do priemeru 0,5 mm,

- prievlaky vytvorené zo syntetického diamantu využívané na ťahanie drôtov s väčšími priermi až do 15 mm (Jurko a kol. 2006; Moravčík a kol. 2010, Tittel 2010).



Obrázok 4 Nástroje vyhotovené zo syntetického diamantu (Tien Chen Diamond Industry 2020)

1.1.4.2 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru je umelo vytvorený druhý najtvrdší materiál, pretože diamant nie je adekvátny na použitie pri procesoch obrábania. Mäkkou hexagonálnou modifikáciou vystupuje nitrid bóru v určitej podobnosti s uhlíkom, kde kryštalizuje s rovnakým typom mriežky ako grafit a tvrdou úpravou, ktorá má identickú štruktúru mriežky ako diamant. Prírodný nitrid bóru nie je vhodný na nástroje s definovanou geometriou reznej hrany, pretože na rozdiel od hexagonálneho kremíka je mäkký. Ešte len premenou na kubickú mriežku za vysokých teplôt a tlaku sa stáva kubický nitrid bóru druhým najtvrdším materiálom hneď po diamante. Nástroje z kubického nitridu bóru sa využívajú na obrábanie bielych liatin, ktoré majú tvrdosť nad 50 HRC, legované liatiny, tvrdých návarov a stelitov. Pri obrábaní týchto materiálov kubickým nitridom bóru dosiahneme oveľa väčšiu životnosť nástroja ako pri obrábaní nástrojom zo spekaného karbidu či reznou keramikou. Ďalšie vlastnosti tohto materiálu sú vysoká chemická odolnosť a tepelná stabilita, ale tiež dobrá pevnosť v ohybe. Vo veľa vlastnostiach je podobný reznej keramike, ale je oveľa viac húževnatejší a je odolnejší proti opotrebeniu. V súčasnosti sa nástroje z kubického nitridu

bóru aj na inovačné procesy v technológií obrábania ako sú napr. vysoko rýchlostné rezanie, obrábanie bez využitia rezných kvapalín, ale aj obrábanie kalených materiálov sústružením a frézovaním (Čep, Petruž 2013; Humár 2008; Jurko a kol. 2006; Píška, Bučková 2018).

1.2 Možností modifikácie vlastností funkčných povrchov

Existuje mnoho možností modifikácií vlastností funkčných povrchov nástrojových materiálov, vďaka ktorým sa dajú zlepšiť úžitkové vlastnosti nástrojových materiálov. Sú to najmä procesy chemicko-tepelného spracovania, tvorba vrstiev alebo textúr na povrchu funkčných častí, procesy tepelného spracovania, povlakovanie, laserové spevňovanie a ďalšie. Kľúčovými faktormi, ktoré vplyvajú na funkčnosť povrchu sú určite textúra povrchu a geometria. Textúra tvárniacich nástrojov má vysoký potenciál na zníženie trenia a opotrebovania, a taktiež má zásadný vplyv na vlastnosti povrchových vrstiev formovaného materiálu ako sú napr. mikrotvrdosť alebo drsnosť povrchu. Metódy slúžiace na vytvorenie povrchovej textúry je možné rozdeliť na metódy od dolnej časti smerom nahor a opačne od hornej časti smerom nadol (Demir et al. 2013; Ibatan et al. 2015; Šugárová a kol. 2018; Zábavník, Buršák 2009).

Modifikáciám na vylepšenie funkčných vlastností sa venuje tribológia. Tribológiu je možné popísať ako vedu zaoberajúcu sa problémami trenia, opotrebovania a mazania vzájomne trúcich sa povrchov pri ich vzájomnom relatívnom pohybe. Úlohou tribológie je znížiť veľkosť koeficientu trenia a tým aj zmenšiť opotrebenie trúcich sa častí pri ich vzájomných kontaktoch, čo spôsobuje predĺženie životnosti nástroja, a v poslednom rade to spôsobuje zníženie finančných nákladov na proces výroby výrobku. Myšlienka využitia povrchových textúr na vylepšenie tribologických vlastností povrchov nie je novou myšlienkou. Významnou časťou tribológie je časť spracovania materiálov. Do tejto oblasti patrí tvárnenie, ale aj obrábanie materiálov. Procesy tribológie majú v oblasti spracovania materiálov významnú úlohu. A tou je, že na povrchové vlastnosti produktu vplyvajú priamo, čo súvisí aj s kvalitou výrobku. Tieto procesy v oblasti spracovania materiálov tiež ovplyvňujú spotrebu energie a materiálov vo výrobnom procese, pretože sú zodpovedné za opotrebovávanie nástroja, ale aj za trenie medzi nástrojom a obrábaným materiálom (Blaškovič 1990; Kluch 2016).

1.2.1 Metódy vyhotovenia povrchovej textúry od dolnej časti smerom nahor

Postupy vyhotovovania povrchovej textúry od dolnej časti nahor sú tie, pri ktorých je povrch nanášaný zvyčajne chemicko-tepelným procesom a to buď vo forme povlaku alebo je povrch vytváraný postupne vrstvu po vrstve. Rozmerový rozsah textúr môže dosiahnuť až nanometrickú úroveň (Šugárová a kol. 2017).

1.2.1.1 Mazivá

Neodlúčiteľnou časťou procesov spracovania či už kovových alebo aj nekovových materiálov pri technológiách trieskového obrábania, ako aj pri technológiách objemového a plošného tvárnenia sú mazivá. Adekvátny výber maziva pri oboch prípadoch spôsobuje viaceré možnosti na zvýšenie produktivity práce. Väčšia časť tvárniacich procesov by bola nerealizovateľná vtedy, ak by bola nesprávna voľba maziva. Mazacie médium spôsobuje okrem zlepšenia technických a technologických parametrov aj zmenšenie opotrebenia nástrojov ale aj sekundárnych nákladov. Pre správnu voľbu druhu chladiaceho a mazacieho média treba brať do úvahy pracovné prostredie, teploty, opotrebenie nástroja, akosť obrobených plôch, ekonomiku výroby a ekologické požiadavky. Aby mazivo vykonávalo správnu mazacu činnosť musia plochy telies správne prilnúť k mazacej ploche vďaka čomu sa zmenšilo vnútorné trenie. Od mazív sa vyžaduje aj aby mali chemickú stálosť, požadovanú životnosť a čistotu a mnohé ďalšie. (Ábel, Ogurčáková 2003; Čilíková a kol. 2008; Rusnák a kol. 2012).

Mazivá sa rozdeľujú podľa rozličných kritérií. Dve hlavné kritéria je delenie podľa skupenstva a delenie podľa pôvodu. Mazivá sa rozdeľujú podľa skupenstva na plynné, kvapalné a pevné. Plastické mazivá a mazacie pasty tvoria prechod medzi pevnými a kvapalnými mazivami. Mazivá sa delia podľa pôvodu na ropné, syntetické, zmesné a na mazivá rastlinného alebo živočíšneho pôvodu (Kačmár 2014).

Rozmanitosť kritérií na konečné vlastnosti mazív využívaných pri operáciách tvárnenia je odôvodnením toho, že sú používané iba mazivá kvapalné, pevné a plastické. Kvapalné mazivá patria v dnešnej dobe medzi najvyužívanejšie mazivá. Do skupiny týchto mazív patria ropné, syntetické oleje, ale aj oleje rastlinného alebo živočíšneho charakteru. Kvapalné mazivá sú vylepšované aditívami, ktoré spôsobujú zlepšenie viskozity a odolnosti proti starnutiu, znečisteniu nečistotami a prachom, taktiež znižujú oxidáciu a veľkosť trenia. Pevné mazivá pri klznom kontakte nespôsobujú chemickú reakciu. Trecie plochy sa

odnímajú fyzikálne od seba. Pevné mazivá sú určené na použitie ak nie sú stanovené striktné kritéria na odvod tepla, ale je vyžadovaný veľký mazací film. Grafit, mastenec a sírník molybdeničitý patria do skupiny najznámejších pevných mazív. Plastické mazivá sú vo forme pasty. Sú zložené zo základného oleja a zhusťovadla. Tak, ako kvapalné mazivá aj plastické sú vylepšované aditívami. Výhodami plastických mazív oproti kvapalným sú nepatrné konštrukčné náklady, dlhodobá životnosť bez potreby údržby, vhodnejšie utesnenie mazacieho miesta pred vonkajšími vplyvmi, odolnejšie voči vode a lepšia príľnavosť k povrchom ale na druhej strane ich nevýhodami sú nemožnosť odvodu tepla, nemožnosť odvodu vniknutých čiastočiek nečistôt do plastického maziva, individuálne zásobiť mazivom mazacie miesta a nemožnosť odvodu tepla (Dálik, 2009; Růžička, 2014; Štěpina, Veselý 1985).

1.2.1.2 Tepelné spracovanie

Proces tepelného spracovania materiálov je charakterizovaný ako technická činnosť, ktorá vyplýva z cielenej a riadenej tvorby určitého stavu už spracovaného materiálu. Ohrev materiálu na určenú teplotu, výdrž na tejto teplote a následne ochladzovanie sú tri časti z ktorých pozostáva tepelné spracovanie. Cieľom daného procesu je doceliť požadované vlastnosti polotovaru alebo súčiastky. Do skupiny tepelného spracovania patria operácie ako sú žihanie, kalenie a popúšťanie (Moravčík a kol. 2010).

Proces žihanie pozostáva z ohrevu na žihaciu teplotu, následným zotrvaním na tejto teplote a ochladením nízkou rýchlosťou do teploty okolia. Ochladzovanie najčastejšie prebieha buď v peci alebo na vzduchu. Úlohou procesu žihania je dosiahnutie rovnovážneho stavu. Žíhaním dochádza ku zníženiu tvrdosti a vnútorných napätí, taktiež sa odstraňuje nepriaznivý vplyv na vnútornú stavbu materiálu, ktorý vznikol v dôsledku predchádzajúcich výrobných procesov. Týmto tepelným spracovaním je možné aj upraviť mikroštruktúru aby vyhovovala trieskovému obrábaniu, kaleniu prípadne chemicko-tepelnému spracovaniu (Moravčík a kol. 2010).

Ohrev ocele 30 až 50 °C nad teplotu prekryštalizácie, zotrvanie na tejto teplote z dôvodu homogenizácie austenitu a následné ochladenie kritickou alebo vyššou ochladzovacou rýchlosťou tvorí proces kalenia. Štruktúru zakaleného materiálu tvorí martenzit a zvyškový austenit. Ochladzovanie v tomto procese prebieha do prostredia, ktoré závisí od druhu kalenia. Po procese kalenia vždy nasleduje popúšťanie z dôvodu vzniku štruktúrnych a tepelných napätí, ktoré vznikajú pri kalení. Tieto napätia sa popúšťaním

znižujú. Popúšťanie sa delí na vysokoteplotné a nízokoteplotné popúšťanie. Vysokoteplotné je pri teplotách nad 400 °C a nízokoteplotné je do 200 °C. Pri nízokoteplotnom popúšťaní výsledná tvrdosť zostáva vysoká, ale mierne sa zníži merný objem a znižujú sa aj napätia. Kalenie s následným vysokoteplotným popúšťaním sa nazýva zošľachtovanie. Zmenšenie tvrdosti, pevnosti ale aj znižovanie vnútorných napätí sa dosahuje procesom zušľachtovania, ale zvyšujú sa plastické vlastnosti ako sú ťažnosť, zúženie a húževnatosť. Využitie zušľachtovania je najmä v automobilovom priemysle napríklad hnacie hriadele, náboje spojok, guľové a zvislé čapy v riadení a mnohé ďalšie (Moravčík a kol. 2010).

1.2.1.3 Chemicko-tepelné spracovanie

Nástroje, ktoré už prešli procesom tepelného spracovania sú v podstate už pripravené k použitiu vo výrobnom procese. Ale v niektorých prípadoch sú kladené vyššie nároky na povrchové charakteristiky daných nástrojov. Splnenie týchto charakteristík a zmenu chemického zloženia povrchu materiálov možno zabezpečiť pomocou rôznych aplikácií chemicko-tepelného spracovania ako sú napr. boridovanie, nitridovanie, nauhličovanie. Najčastejším cieľom chemicko-tepelného spracovania býva zvýšenie tvrdosti povrchu, zvýšenie odolnosti proti únavovému porušeniu a zlepšenie odolnosti súčiastky proti opotrebeniu. V špeciálnych prípadoch sa dosiahnu aj výborne či už koroziívzdorné vlastnosti alebo aj žiaruvzdorné vlastnosti súčiastok (Macek a kol. 2006; Moravčík, Hazlinger 2009).

Nitridovanie je proces nasycovania povrchu dusíkom a tento proces je možné vykonávať v rôznych prostrediach. Nitridácia v soľných kúpeľoch je staršia technológia nitridácie. V súčasnosti je už nevyužívaná. Nitridácia v plynoch sa používa najmä pri nástrojoch vyrobených z nízkoalloyovaných ocelí. Nástroje z vysokolegovanej ocele sa nitridujú z dôvodu reprodukovateľnosti a kvality vrstiev plazmovou alebo iónovou nitridáciou. Proces nitridácie je vykonávaný z dôvodu zväčšenia tvrdosti povrchovej vrstvy, zlepšenia klzných vlastností znížením koeficientu trenia, zvýšenia odolnosti voči opotrebeniu, únavovej pevnosti. Nevýhodou je, že nitridáciou sa znižuje húževnatosť materiálu, najmä ak je pomer nitridovanej vrstvy a hrúbky nástroja pomerne veľký. Proces nitridácie je využívaný na sériové nasycovanie kľukových hriadeľov nákladných automobilov. Medzi ďalšie aplikácie patria konštrukčné súčiastky ako sú napr. valce motorov, ozubené kolesá, razníky, klzné ložiska, skrutky, matice a pod. Nitridujú sa aj

nástroje využívané na tvárnenie pre prácu za tepla aj za studena (Hazlinger, Moravčík 2013; Macek a kol. 2006).

Boridovanie je proces nasycovania povrchu bórom. Týmto procesom sa zvyšuje odolnosť voči opotrebeniu pri abrazívnom trení, trení pri zvýšených teplotách a klznom trení. Vrstva, ktorá je boridovaná je odolná proti vzniku oxidov. Nasycovanie povrchu bórom sa uskutočňuje v rozmedzí teplôt od 800 °C do 1050 °C a hrúbka týchto vrstiev je najčastejšie v intervale od 0,1 až do 0,3 mm. Boridovanie trvá 3 až 6 hodín. Rast vrstvy boridov je spomaľovaný legujúcimi prvkami a uhlíkom. Dané chemicko-tepelné spracovanie sa nasycujú nástroje využívané pri procesoch tvárnenia, rôzne súčiastky mechanizmov, ktoré pracujú v abrazívnych prostrediach napr. ako sú súčiastky čerpadiel, pásov, pásových strojov a pod. Ďalšie použitie boridovania je na formy využívané na tlakové liatie farebných kovov (Moravčík a kol. 2010).

Nauhličovanie je proces nasycovania povrchu uhlíkom. Cieľom nauhličovania je zväčšenie odolnosti voči opotrebeniu a zvýšenie povrchovej tvrdosti materiálu. Húževnaté vlastnosti sú zabezpečené jadrom. Proces nasycovania povrchu uhlíkom sa dosahuje aj lepšia odolnosť voči únave materiálu. Tento proces prebieha v rozmedzí teplôt od 900 °C do 930 °C a hrúbka vrstiev je 0,5 mm až 1,3 mm. Nauhličované a kalené materiály dosahujú povrchovú tvrdosť 58 až 62 HRC. Prostredia v ktorých je možné vykonávať proces nauhličovania sú v roztavených soliach, v plazme, vo vákuu, v tuhom prostredí, ale aj v plynnom prostredí. Nauhličovanie má v praxi široké spektrum využitia. Sú to konštrukčne súčiastky, niektoré nástroje a prípravky ako napr. prietlačníky slúžiace na výrobu presných malých otvorov chladičov zo zliatin hliníka. Najväčšie využitie nauhličovania je v automobilovom priemysle, napr. ozubené kolesá v prevodovkách, rôzne hriadele, kietky ložísk a pod (Moravčík, Hazlinger 2009).

1.2.1.4 Povlakovanie

Medzi povlaky zlepšujúce výkonnosť tvárniacich nástrojov patria tvrdé povlaky na báze zliatin niklu, tvrdé chrómovanie, PVD (Physical Vapour Deposition) a CVD (Chemical Vapour Deposition). Pri využití týchto povrchových úprav sa predpokladá dvoj až štvornásobné zväčšenie životnosti nástroja. Účinnosť využitia daných povrchových vrstiev narastá so zväčšujúcou sa hrúbkou spracovávaného materiálu. Drsnosť povrchu presných výstrižkov je výrazne lepšia ak sa použijú nástroje, ktoré sú povlakované karbidmi alebo

nitridmi. Pre docielenie presnejších rozmerov je vhodnejšie využitie tvrdých PVD povlakov (Suchánek 2012).

PVD povlakovanie je technológia fyzikálnej depozície pár, ktorá využíva fyzikálny princíp na vytvorenie povlakov. Najčastejšie využívanými povlakmi sú PVD povlaky najmä TiN, TiAlN a CrN. Povlaky vytvorené PVD procesmi majú nižšiu odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu ako CVD povlaky, ale vyžadujú potrebu menšej teploty pri vytváraní povlaku. Teplota potrebná na tento typ povlakovania je v rozmedzí od 200°C do 500 °C a vákuum je v rozpätí od 10^{-3} Pa do 10^{-4} Pa. Hrúbka povlaku je v intervale od 2 μm do 5 μm . Tvrdosť daného povlaku je závislá od nanášaného materiálu. Procesy tohto typu povlakovania sú najviac využívané na povlakovanie nástrojov vyhotovených z rýchloreznej ocele. Pre povlakovanie spekaných karbidov sa metódy PVD povlakovania využívali menej, ale v poslednej dobe prichádza ku výraznému rozvoju procesov PVD povlakovania a tiež ku aplikáciám aj v oblasti spekaných karbidov. Tento typ povlaku je vytváraný rôznymi spôsobmi, ktorými sú: vákuové naparovanie, vákuové naprašovanie alebo iónové povlakovanie. K veľkým nevýhodám procesov tohto typu povlakovania patrí požiadavka pohybovať s povlakovaným predmetom, aby bolo rovnomerné pokrytie povlakom po celom povrchu povlakovaného predmetu. Druhou nevýhodou je potreba relatívne zložitého vákuového systému. Táto metóda povlakovania má aj výhody, ktoré sú: možnosť povlakovania ostrých hrán, zlepšenie prevádzkovej životnosti až dvojnásobne správne vyhotoveným povlakom a tiež spomínaná potreba menšej teploty na proces povlakovania. Príklad využitia PVD povlakovania nástrojov je na obr. 5 (Čep, Petrů 2013; Hazlinger, Moravčík 2013; Suchánek 2012).



Obrázok 5 Povlakované nástroje PVD povlakmi (Herring 2015)

Metóda CVD povlakovania je uskutočňovaná chemickým nanášaním z pár, pri ktorom vznikajú povlaky reakciami v plyne z chemických zlúčenín a kovov pri vysokých teplotách. Nevýhodou CVD povlakov je požiadavka vysokých teplôt pri vytváraní povlakov, ktoré sú výrazne vyššie ako je teplota popúšťania nástrojových ocelí. Preto je potrebné po CVD povlakovaní aby nasledovali procesy tepelného spracovania a to kalenie a popúšťanie. Nevyhnutnosťou je aby toto tepelné spracovanie prebiehalo buď vo vákuu alebo v redukčnej atmosfére, kvôli oxidácii povlakov na báze titánu pri teplotách nad 550°C. Dané tepelné spracovanie zapríčiňuje niektoré obmedzenia pri nástrojoch povlakovaných CVD povlakmi. Povlaky vytvárané CVD povlakovaním sú o hrúbky 4 až 10 μm a tento proces je vykonávaný zvyčajne od 5 do 8 hodín. Procesy CVD povlakovania sú uskutočňované predovšetkým na povlakovanie spekaných karbidov. Organické kovové zlúčeniny, hydridy, halogenidy, hydrochloridy kovov a kovy sú najviac používané ako zdroj CVD povlakovania. Hydridy sú neporovnateľne menej stabilné ako sú zodpovedajúce halogenidy a hydrochloridy. Hlavnými výhodami CVD povlakovania sú výborná príľnavosť k povlakovanému materiálu, vysoká hustota povlaku, nanášanie povlaku zo všetkých strán premetu ako dôsledok relatívne vysokých pracovných tlakov plynnej zmesi a dobrá stechiometria povlaku. Najväčšou nevýhodou je už spomínaná potreba vysokej teploty pri povlakovaní, pretože môže mať negatívny vplyv na vlastnosti povlakovaného nástroja po uskutočnení procesu povlakovania, ale toto sa netýka spekaných karbidov. Kvôli tomu je limitovaný rozsah možných podkladových materiálov, a preto sa vývoj CVD povlakovania sústreďuje na zníženie tejto pracovnej teploty (Čep, Petrů 2013; Hazlinger, Moravčík 2013; Suchánek 2012).

V aplikáciách, v ktorých je vyžadovaná odolnosť voči opotrebeniu za súčasne nízkeho trenia sú využívané DLC procesy povlakovania. Tieto procesy sú najvyužívanejšie pri procesoch tvárnenia hliníkových zliatin za studena a taktiež sa pri daných procesoch začínajú využívať povlaky na báze zirkónu. Povlaky na báze zirkonnitridu (ZrN) sú všestranne využívané, pretože majú vysokú tvrdosť, odolnosť voči korózií a vysokú odolnosť voči príľnavosti neželezných kovov. Taktiež sa často využívajú na dekoratívne povlakovanie pretože majú bieložlatú farbu. Ten druh povlakov je dopovaný kovmi ako napr. chrómom alebo karbidmi ako napr. karbidom volfrámu. Keďže metóda DLC povlakov má nízku hodnotu koeficientu trenia tak sú využiteľné na povlakovanie tvárniacich nástrojov pre tvárnenie bez maziva neželezných kovov a zliatin. ZrN povlaky majú viacero možností využitia, ako sú napr. určenie na obrábanie hliníkových zliatin s obsahom kremíka do 6%, na tvárnenie hliníkových zliatin, a taktiež v zdravotníctve, ako ochrana pri sterilizácii

nástrojov, pretože majú vysokú odolnosť voči korózií. Ďalšiu skupinu povlakov tvoria spojenia tvrdých vrstiev spolu s klznými vrstvami na báze MoS_2 , čo je disulfid molybdénu. Tento druh povlakov je najviac využívaným v leteckom a kozmickom priemysle, a preto sú volané aj samomazanými. V bežnej technickej praxi sú používané na povlakovanie vyhadzovačov a pohyblivých častí foriem slúžiacich na procesy lisovania plastov, kde sa nemôže využívať mazanie, ako prevencia proti zadreniu. Tento druh povlakov nie je tvrdý, a preto ho je možné používať aj na povlakovanie mäkkých podkladových materiálov a materiálov, ktoré neboli tepelne spracované. Na obr. 6 je porovnanie nástrojov povlakovaných rôznymi povlakmi (Sondor a kol. 2013; Suchánek 2012).



Obrázok 6 Porovnanie povlakovaných nástrojov rôznymi povlakmi (Szwajka et al. 2019)

1.2.2 Metódy vyhotovenia povrchovej textúry od hornej časti smerom nadol

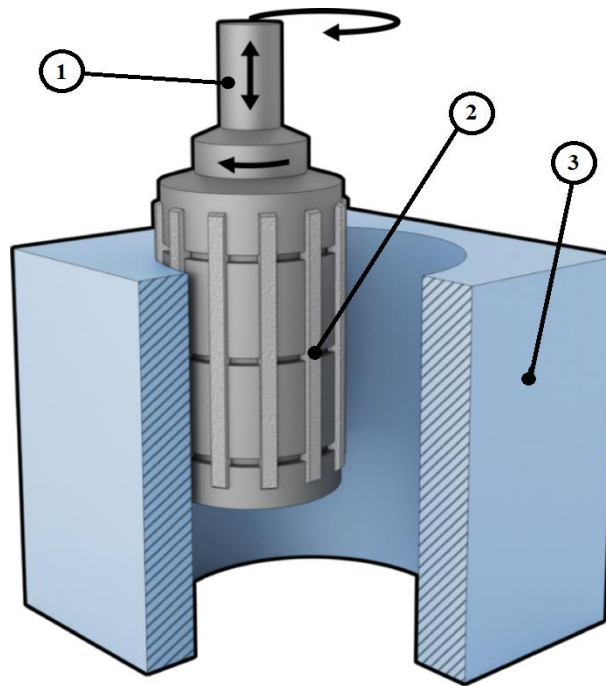
Postupy vyhotovovania povrchovej textúry od hornej časti nadol pozostávajú z postupného odstraňovania materiálu z počiatočného povrchu. Tieto metódy sú viac flexibilné. Medzi tieto postupy patria napr. brúsenie, honovanie, obrábanie laserovým lúčom, chemické leptanie a iné (Šugárová a kol. 2017).

1.2.2.1 Honovanie

Proces honovania pozostáva z hromadného mikrorezania tisícok brusných zŕn s neurčeným tvarom a geometriou pevne udržovaných v spojive za súčasného mazania a chladenia reznou kvapalinou. Týmto procesom je možné doceliť vysokú akosť povrchu, a taktiež tvarovú a rozmerovú presnosť. Obrábaná je plocha, ktorá je v trvalom styku

s nástrojom. Počas priebehu procesu honovania nastáva vznik periodickej zmeny smeru priamočiareho vratného pohybu nástroja, čo je honovací kameň, za súčasného rotačného pohybu, buď obrobku alebo nástroja. Nástroj, ktorý je určený na honovanie sa skladá z honovacej hlavy. Do tejto hlavy sú umiestnené alebo upevnené, či už mechanicky alebo môžu byť aj nalepené po obvode pozdĺž osi jemnozrnné brúsne tyčinky, ktoré sa nazývajú honovacie kamene. Honovací kameň má tvar hranola a jeho rozmery sú podľa honovacej hlavy. Nástroje slúžiace na honovanie sa vyrábajú z korundu, z karborundu, z diamantu alebo z kubického nitridu bóru. Ak sú honovacie kamene diamantové alebo sú z kubického nitridu bóru, tak v dôsledku vysokej životnosti nástroja sa uplatňujú v hromadnej výrobe. Keďže diamantové zrná trčia zo spojiva, tak rezná schopnosť daných kameňov je vyššia ako u klasických korundových kameňov alebo karborundových kameňov, z čoho vyplýva možnosť skrátenia honovacieho času približne na polovicu, ale docielená drsnosť je dvojnásobne väčšia (Janáč a kol. 2004; Lipa, Janáč 2000).

Honovanie možno uskutočňovať aj na vŕtačkách, ktoré sú s ručným axiálnym pohybom a vykonávajú rotačný pohyb nástroja, ale perfektný proces honovania je možné uskutočniť len na honovačkách. Honovačky sú zvyčajne využívané len v hromadnej alebo veľkosériovej výrobe výrobkov. Proces honovania sa delí na hrubovaciu a dokončovaciu časť, od čoho závisí aj použitie honovacieho kameňa. Pomocou procesov honovania sú zvyčajne dokončované valcové otvory strojových súčiastok, kde je potrebné dosiahnuť vysokú akosť povrchu, ale aj užšie tolerancie tvaru a rozmerov. Najčastejšie sú honované súčiastky, ktoré sú typické strojové, ako sú napr. hydraulické valce, motorové valce, pneumatické valce a pod. Proces honovania je zobrazený na obr.7. Materiály obrábateľné honovaním sú ocele, či už kalené alebo nekalené, liatiny, ľahké kovy, farebné kovy, grafit, spekané karbidy, sklo ale aj iné materiály. Pri priebehu procesu honovania vykonáva činnosť v jednom okamihu 100 až 1000-krát viac brusných zŕn, ako pri procese brúsenia. Geometrická presnosť dosiahnutá honovaním je v intervale od 2 do 5 μm . Procesom honovanie môžeme dosiahnuť napr. nízku vlnitosť povrchu, vyššiu kvalitu povrchu, vyššiu produktivitu práce, väčšiu presnosť tvaru a rozmerov, zníženie nárokov na presnosť a kvalitu povrchu predošlých operácií a iné (Janáč a kol. 2004; Lipa, Janáč 2000).



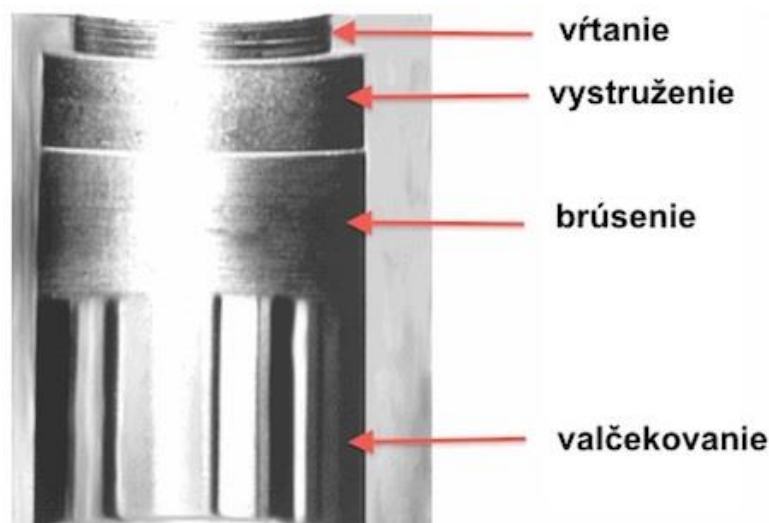
Obrázok 7 Proces honovania (Manufacturingguide 2020)

1 - Honovacia hlava, 2 - Honovací kameň, 3 – Obrobok

1.2.2.2 Valčekovanie

Technológia valčekovania sa v súčasnosti zaradzuje do skupiny veľmi vyhľadávaných technológií slúžiacich na opracovanie materiálov. Táto technológia je pre firmy zaujímavá nielen kvôli svojim nesporným technickým prednostiam, ale aj kvôli nízkym investičným nákladom. Patrí do skupiny dokončovacích technológií. Valčekovanie je technológia bez trieskového formovania materiálu a cieľom tejto technológie je zlepšenie kvality povrchu bez úberu materiálu. Pri tejto technológii sú pritlačované odvaľované tvrdé oceľové valčeky na mäkkší povrch obrábaného materiálu. Oceľové valčeky sú vysokoleštené a vytvrdzované. Tieto valčeky generujú tlak, ktorý ak prekročí prípustný bod ohybu povrchu obrobku, tak povrchová vrstva je tvárnená za studena plastickou deformáciou. Týmto spôsobom sa zrovnávajú výstupky a priehlbiny, vďaka čomu sa povrch stane rovnomerný a taktiež sa vytvrdí. Kvalita povrchu dosiahnutá technológiou valčekovania je výrazne lepšia ako dosiahnutá technológiami honovania alebo brúsenia. Výsledkom valčekovania je vytvrdený a zrkadlový povrch, ktorý má záťažové charakteristika, lepšie ako by mal obrábaný materiál pri úberoch materiálu procesmi brúsenia za súčasného spevnenia povrchu. Porovnanie obrobených povrchov jednotlivými technológiami je vyobrazené na obr.8. Valčekovanie odstraňuje vady a nerovnosti povrchu s presnosťou na tisícinu milimetra. Existuje viacero druhov valčkových nástrojov. Jeden typ valčkových nástrojov

pozostáva z tela, v ktorom sú valčeky zo spekaných karbidov. Valčeky majú kužeľovitý tvar a rotujú v tele nástroja okolo obráteného kužeľovitého vretena uloženého na ložisku. Ďalší druh je valčekomací nástroj s diamantovou plôškou, ktorá je využívaná rovnako ako sa využíva u sústružníckych nožov. Tieto druhy valčekomacích nástrojov dopĺňajú hydraulické nástroje s guľčkami na priechodzie otvory, slepé otvory, na vonkajšie valcové plochy alebo otvory so zvláštnym tvarom na dne či na kužeľové otvory. Na obr. 9 je znázornený nástroj využívaný na valčekomanie. Donedávna táto technológia bola využívaná v oblastiach vyhotovovania valcových otvorov alebo hriadeľov. Ale dnes je možné valčekomovať ďalšie plochy, ako sú stupňovité vonkajšie a vnútorné priemery, rádius, zápichy, kužeľové plochy a iné. Niektoré valčekomacie nástroje pozostávajú aj z mikrometra, ktorý umožňuje nastavenie obrábania aj iných priemerov. Ak je otvor obrobený precízne a hladko nie je potrebné valčekomovať. Ale ani výrazné trhliny na obrobku a hlboké priehlbiny, ktoré vznikajú vŕtaním a sústružením nie sú pre operácie valčekomovania vhodné. Budú viditeľné aj po použití valčekomacieho nástroja, pretože tento kopíruje aj veľké pukliny a rozmerové nepresnosti. Technológiou valčekomovania je možné tvárniť všetky plasticky tvárne materiály (Albaprecision 2007; Havelka 2004; IMEXIM 2018).



Obrázok 8 Porovnanie obrobených povrch po jednotlivých technológiách (OCTOPUS TOOLS 2017)

Výhody procesu valčekomovania:

- krátke časy procesu,
- nízke investičné náklady,
- vysoká spoľahlivosť procesu,
- vysoká ekologickosť (Albaprecision 2007).



Obrázok 9 Nástroj slúžiaci na technológiu valčekovania (TrigoN Tools 2020)

1.2.2.3 Laserové mikroobrábanie

Technológiou laserového textúrovania (LST) sú vyhotovované mikro alebo makro povrchové textúry. Technológiu LST je možné nadobudnúť zväčšenie odolnosti voči únave, ale aj predĺženie životnosti nástroja alebo súčiastky. Tiež je možné procesom laserového textúrovania dosiahnuť zlepšenie optických, tribologických alebo rôznych iných funkčných vlastností obrobeného povrchu materiálu. Využitie nachádza v rôznych oblastiach napr. v medicíne na úprava nástrojov využívaných v chirurgii alebo na úpravu rôznych druhov implantátov, ďalšie využitie je vo výrobe, či už obrábacích alebo tvárniacich nástrojov a existuje mnoho ďalších aplikácií laserového textúrovania. Proces textúrovania prebieha rovnako ako laserové gravírovanie, a to abláciou povrchovej vrstvy. Po procese textúrovania, však zostáva na okrajoch textúr prebytočný pretavený materiál. Tento prebytočný materiál je nutné odstrániť. Odstraňuje sa dokončovacími procesmi, ako napríklad lapovaním. Laserové textúrovanie sa využíva, pretože je ekologickejšie ako napríklad procesy tryskania alebo chemického leptania (Etsion 2005; GF 2018).

2 PROCES LASEROVÉHO MIKROOBRÁBANIA - TEXTÚROVANIA

Technológia laserového textúrovania je účinná metóda slúžiaca najmä na zlepšenie tribologických vlastností trecích párov. V danej technológii sa pomocou laserového zariadenia vytvárajú textúry pozostávajúce z priehlbín na povrchu pomocou procesu ablácie materiálu. V najjednoduchšej forme textúrovania sa jedná iba o zdrsnenie povrchu alebo vytvorenie opakujúceho sa tvaru. Pri použití viacerých premyslených spôsobov ide už o vytvorenie textúry na povrchu materiálu. Vytvorená textúra zapríčini zníženie koeficientu trenia alebo umožní mazivu nanesenému na povrchu sa rozmiestniť rovnomernejšie vo vytvorených textúrach, čím môže prísť k ďalšiemu zlepšeniu trecích vlastností na povrchu. Okrem toho, sa laserom vnášajú do materiálu tlakové napätia pomocou jednotlivých pulzov. Spôsobí to spevnenie alebo zvýšenie medze únavy. Povrchové textúry sú využívané vo viacerých oblastiach priemyslu na zlepšenie odolnosti voči opotrebeniu, zlepšenie únosnosti, a samozrejme, aj na zníženie koeficientu trenia tribologických mechanických komponentov. Textúry sú vytvárané na ťažníkoch alebo strižníkoch, za účelom zníženia trenia pri ich používaní. Špeciálne využitie laserového textúrovania je vyhotovenie textúr na formách určených pre výrobu automobilových pneumatík. V automobilovom priemysle sa textúry využívajú aj na textúrovanie valcov, ktoré sú používané pri valcovaní ocele, vďaka čomu prichádza ku zlepšeniu tvárniteľnosti. Ďalšie využitie laserového zväzku je pri spracovaní rôznych materiálov, čím sa dosahuje veľa vlastností, ktoré nie je možné získať využitím inej technológie. Ak sa využijú laserové technológie, tak prichádza k úspore prevádzkových nákladov. Vďaka tomu majú laserové technológie výnimočné postavenie a sú zárukou budúceho rozvoja. (Brajer a kol. 2014; Steen, Mazunder 2010; Šugárová a kol. 2018; Tang et al. 2013).

Rovnako, ako všetky formy laserového značenia, tak aj laserové textúrovanie povrchov ponúka množstvo výhod, medzi ktoré patria nasledovné. Proces LST je veľmi spoľahlivý opakovateľný proces, ktorý je riadený počítačovým systémom. Ďalšou výhodou je efektívnosť vynaložených nákladov, ktorá je spojená so znížením času práce a výroby, v porovnaní s inými tradičnými metódami značenia. Taktiež, medzi výhody patrí schopnosť vytvárať textúry aj na ťažko dostupných miestach na výrobkoch. K výhodám sa zaraďuje i výrazne zníženie odpadu materiálu, pretože táto technológia je bez triesková (Grimes 2017).

2.1 Princíp laserového textúrovania

Technológia LST využíva proces ablácie materiálu, ktorý vzniká zmenou energie lasera na povrchu obrábaného materiálu. Laserové zariadenie fokusuje laserový zväzok do veľmi malého bodu, čo vyvolá veľmi presnú abláciu materiálu na povrchovej vrstve materiálu. Doba interakcie medzi materiálom, ktorý absorboval laserové žiarenie, a samotným laserovým žiarením určuje presnú charakteristiku procesu. Laserové zariadenia možno používať na vytvorenie veľmi presnej trojrozmernej textúry na povrchovej vrstve materiálu s vysokou rozlišovacou vlastnosťou, pretože ultrakrátko laserové pulzy a ultrafialové žiarenie sú schopné odoberať iba zlomok mikrometrov počas jedného pulzu. Počas niekoľkých nanosekúnd povrch materiálu absorbuje laserové žiarenie. Pohltená energia daného laserového žiarenia sa mení na teplo, a tým sa materiál v mieste pôsobenia laserového zväzku ohrieva. Proces ohrievania prebieha, až kým sa materiál v danom mieste dopadu laserového zväzku nezačne odparovať, čo sa nazýva abláciou. Na vznik procesu ablácie sú nevyhnutné pulzy s vysokou energiou, ktoré majú hodnotu až niekoľko GW/cm^2 (Schaeffer 2016; Schmitt et al. 2012).

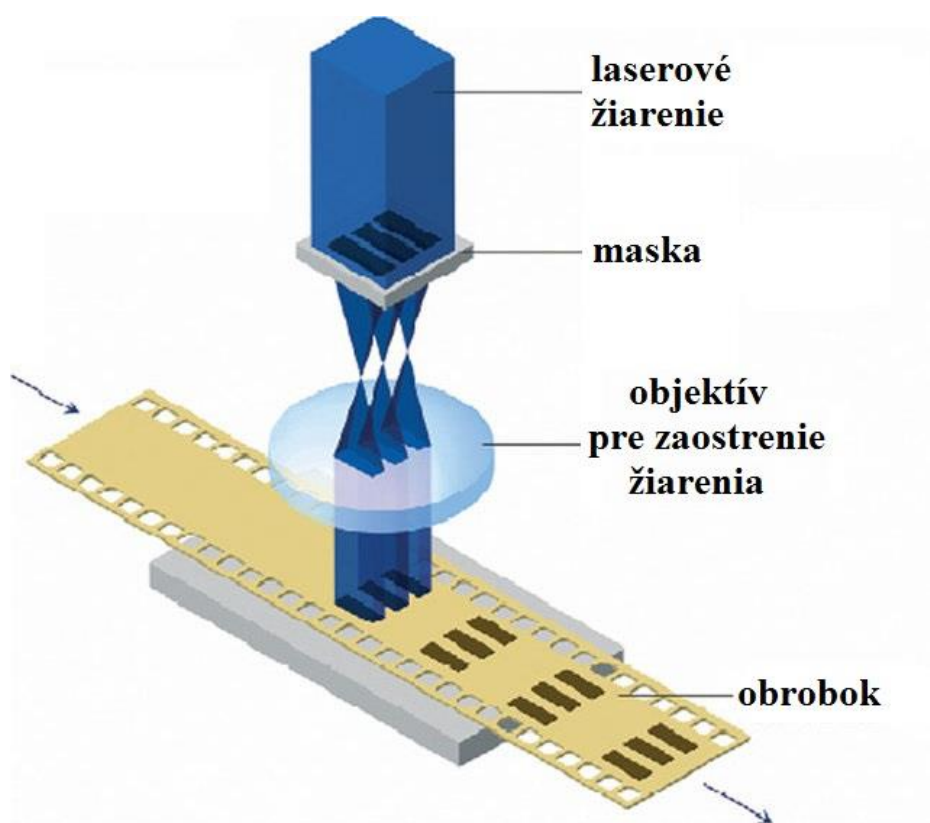
Výsledok procesu laserového textúrovania je ovplyvnený viacerými procesnými parametrami, ktoré majú veľký význam, ale zatiaľ sú nedostatočne objasnené. Jedným z nich je časová náročnosť snahy inicializácie procesu pri tvorbe nového výrobku. Ak je nepredvídateľné alebo nie je známe správanie procesu pre daný materiál, stratégiu obrábania alebo dané parametre obrábania, tak tieto veci musia byť určené a dopredu overené ešte pred začatím využívania daného procesu obrábania, čo je časovo náročné. Ďalším vplyvom je nekontrolované obrábanie, najmä pri obrábaní veľkoplošných resp. veľkorozmerných povrchov, ktoré môže trvať aj niekoľko hodín. Ak je už proces vytvárania textúr spustený, tak už je nemožné pozmeniť parametre a stratégiu obrábania. Taktiež je nemožné zistiť hĺbku vyhotovenej štruktúry (Schmitt et al. 2012).

2.2 Metódy laserového textúrovania

Pre technológiu laserového textúrovania sú charakteristické tri základné metódy vytvárania textúr. Prvá metóda pozostáva z vytvárania textúr cez masku, ktorá je tzv. mask projection. Druhá metóda pozostáva z tvorby textúr priamo, čiže je tzv. laser direct write (LDW) a tretia pozostáva z pôsobenia laserového zväzku cez rotujúci perforovaný disk. Všetky tri metódy je možné upravovať, čo sa týka ich princípu alebo aj využitých laserových

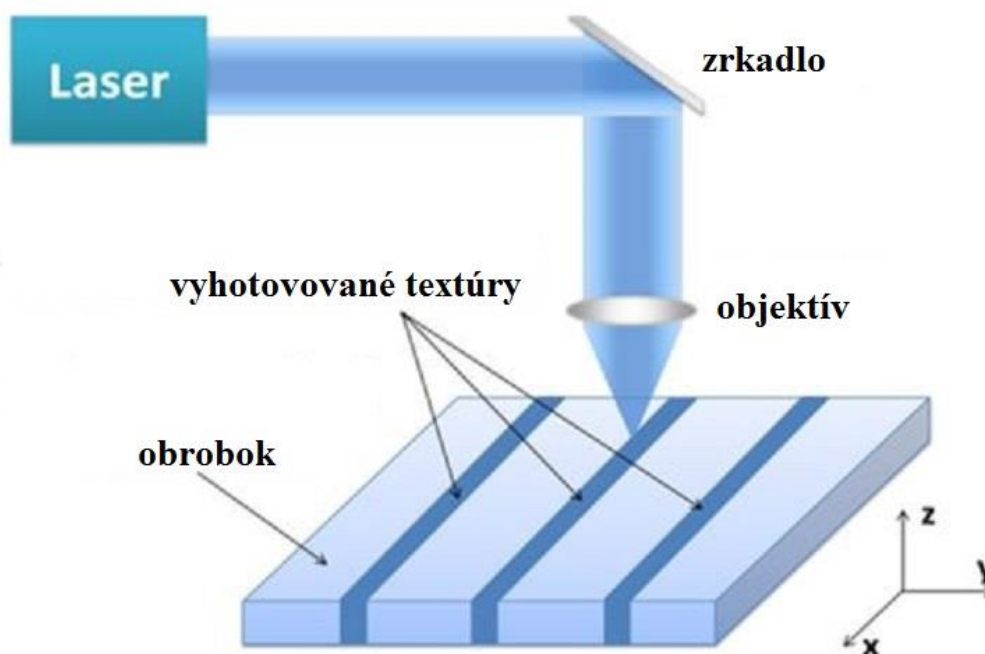
zariadení. Každá z nich prináša rozličné technické, dokonca aj ekonomické výhody a nevýhody (Rizvi et al. 2017).

Pri tvorbe textúry cez masku je tvar textúry vyrezaný v maske. Tieto masky sú vyrábané z mosadze, z bronzu alebo ušľachtilých ocelí. Zdroj laserového zväzku je nepohyblivý, ale pohybovať sa môže maska, obrobok alebo maska aj obrobok súčasne. Pohyb obrobku aj masky musí byť precízne kontrolovaný. Laserový zväzok lúčov osvieti, buď naraz alebo po riadkoch masku podobne, ako je to pri vytváraní obrazu na televíznej obrazovke. Na základe tohto osvietenia sa prenáša tvar textúry vyrezanej v maske na obrobok. Časti, ktoré sú zakryté maskou ostávajú bez vytvorenej textúry, tak ako je zobrazené na obr. 11. Pri tejto metóde sú používané CO₂ lasery, Nd-Yag lasery alebo excimérové lasery. Výhodami danej metódy sú: jednoduchý systém, relatívne nízke obstarávacie náklady, ale hlavne vysoká rýchlosť vyhotovovania textúr. Táto metóda má samozrejme aj nevýhody, ktoré sú: malé pole slúžiace na tvorbu textúry, ktoré má od 10 do 40 mm², horšia kvalita vytvorenej textúry, ale hlavne vyššie náklady spojené so zmenou tvaru textúry, pretože je nutné vyrobiť a vymeniť celú masku. Metóda textúrovania cez masku je vhodná predovšetkým na vyhotovovanie veľkosériových výrobkov (Řasa a kol. 2001).



Obrázok 10 Metóda laserového textúrovania cez masku (Delmdahl, Frechner 2010)

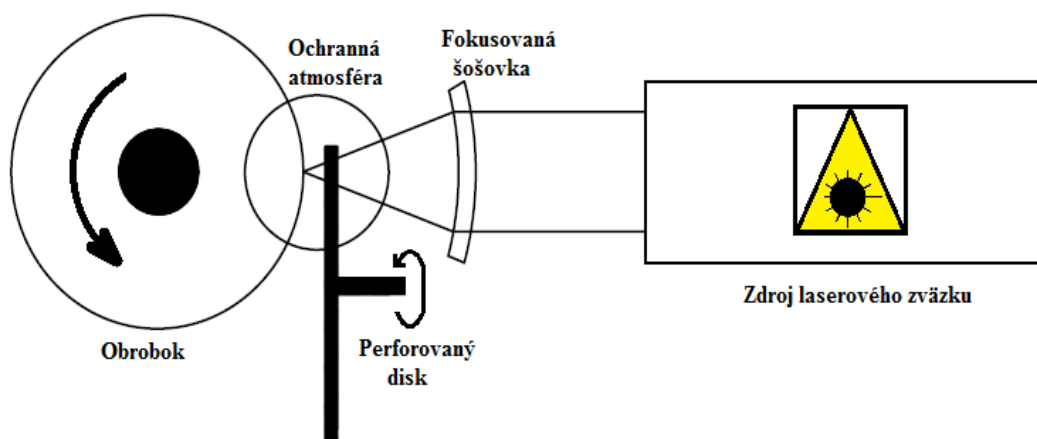
Pri vyhotovovaní textúr laserovým zväzkom priamo je na povrch obrábaného materiálu laserový zväzok zaostrený. Pri vytváraní textúr laserom, obrobok vykonáva translačný pohyb a laserový zväzok je fixný alebo to môže byť opačne, a vtedy translačný pohyb je vykonávaný laserovým zväzkom a obrobok je nepohyblivý. Pri oboch možnostiach je dráha programovateľná. Modernejší prípad pozostáva z vychyľovania laserového zväzku pomocou dvoch kolmých zrkadiel, ktoré vychyľujú daný zväzok v požadovanej dráhe. Pohyby zrkadiel sú riadené pomocou počítača. Upevnenie a princíp vychyľovania zrkadiel je rovnaký ako u galvanometra. Pri tejto metóde sú využívané CO₂ lasery a Nd-Yag lasery. Pre prenos laserového zväzku je možné použiť aj vláknovú optiku, vďaka ktorej je možné popisovať aj časti na málo prístupných miestach. Významnou výhodou technológie LDW oproti textúrovaniu cez masku je rýchlosť zmeny tvaru vytváraných textúr, pretože sa jedná len o zmenu v riadiacom programe pomocou klávesnice počítača, a tým odpadá výroba a výmena masky. Daná metóda je najčastejšie využívaná na vŕtanie otvorov, rezanie, ale aj vytváranie textúr. Nevýhodou tejto metódy je časová náročnosť obrábania väčších plôch. Metóda LDW je zobrazená na obr. 11 (Dahotre, Harimkar 2008; Řasa a kol. 2001; Rizvi, Apte 2017).



Obrázok 11 Priame laserové textúrovanie - LDW (Sones et al. 2020)

Tretia metóda laserového textúrovania je pôsobenie laserového zväzku cez rotujúci perforovaný disk. Princíp tejto metódy je založený na rýchlo sa otáčajúcom perforovanom

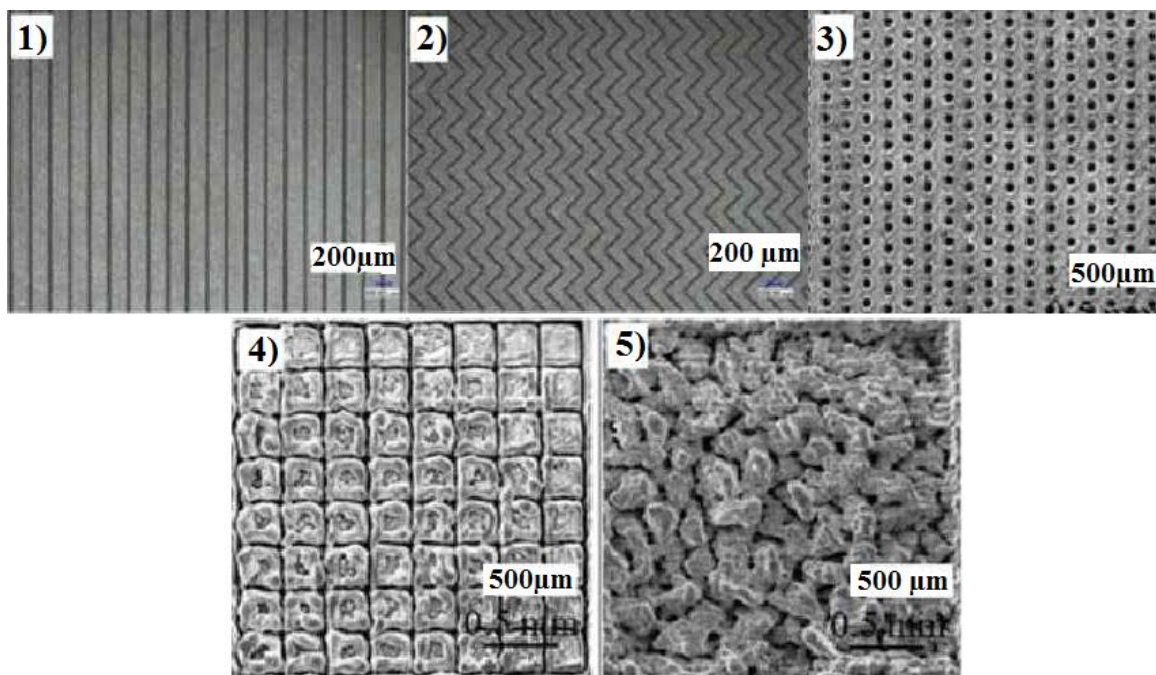
disku na ktorý pôsobí laserový zväzok. Laserový zväzok nie je fokusovaný. Vzdialenosť medzi jednotlivými textúrami upravuje perforovaný disk. Najväčšou výhodou tohto typu laserového textúrovania je rýchlosť produkcie, ale tento typ vyhotovovania laserových textúr má viac nevýhod ako výhod. Najväčšia nevýhoda tejto metódy je malá flexibilita metódy, pretože pri každej tvorbe novej textúry je nutnosť aj nového špeciálneho perforovaného disku. Medzi nevýhody patri aj malá presnosť vyhotovených textúr. Na okrajoch vytvorených textúr vznikajú stuhnutia roztaveného materiálu. Kvôli týmto stuhnutiam sú tvary textúr nepravidelné. Ďalšou nevýhodou je potreba zariadenia s ochranným plynom. Ochranný plyn plní úlohu ochrany roztaveného kovu pred oxidáciou a odstraňuje roztavený materiál z miesta tvorby textúry. Na obr. 12 je vyobrazená schéma tejto metódy (Gualtieri 2009).



Obrázok 12 Metóda pôsobenia laserového zväzku cez rotujúci perforovaný disk (Gualtieri 2009)

2.3 Typy textúrovaných povrchov laserovým zväzkom

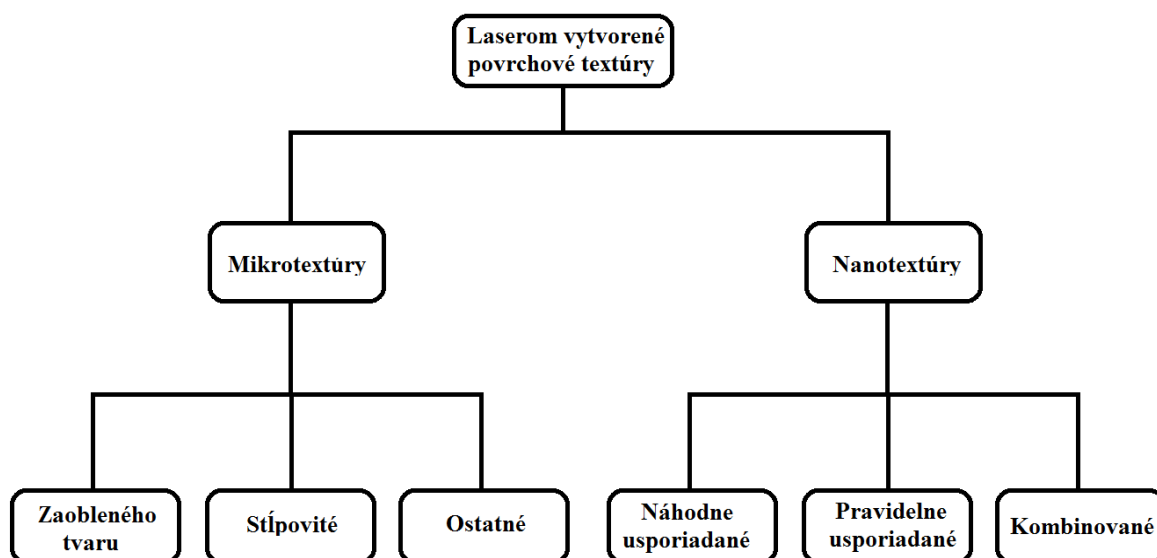
Rozličné oblasti priemyslu využívajú povrchové textúrovanie za pomoci laserového zväzku. Vyhotovené textúry sa delia na mriežkové, dierové, lineárne drážkovanie, tvarové drážkovanie a neusporiadané. Delenie povrchových textúr je zobrazené na obr. 13. Vlnová dĺžka, výkon, dĺžka impulzu, ale aj posuvová rýchlosť sú parametre laserového zväzku, od ktorých závisia kľúčové kritéria textúrovaných povrchov laserom. Vysoká reprodukovateľnosť a tiež možnosť vysokej kontroly procesu sú dané kľúčové kritéria pri povrchovom textúrovaní materiálov laserovým zväzkom (Wahab 2015).



Obrázok 13 Rozdelenie povrchových textúr (Wahab 15)

1) drážkové lineárne, 2) drážkové tvarové, 3) dierové, 4) mriežkové, 5) neusporiadané

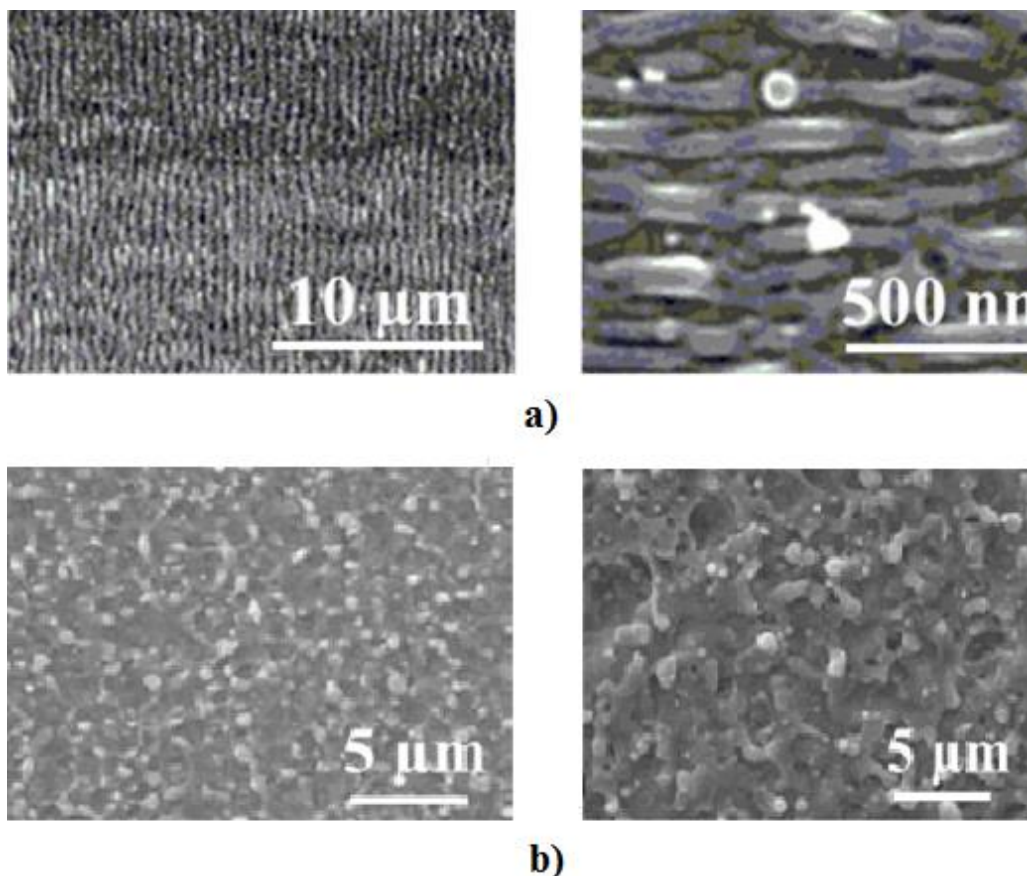
Ďalšie delenie laserom vytvorených povrchových textúr je na mikrotextúry a nanotextúry. Toto delenie je na obr. 14 (Ahmed et al. 2014).



Obrázok 14 Rozdelenie laserom vytvorených povrchových textúr podľa veľkosti (Ahmed et al. 2014)

2.3.1 Nanotextúry

Nanotextúry sú zvyčajne vyhotovované femtosekundovými lasermi. Bývajú vytvárané samostatne alebo aj v kombinácii s mikrotextúrami. Tieto textúry sú veľké niekoľko nanometrov. Delia sa na dve skupiny. Prvá skupina sú usporiadané alebo nazývané ako pravidelné a druhá skupina sú neusporiadané alebo nazývané ako náhodné. Prvú skupinu, čiže usporiadané tvoria výstupky alebo drážky. Ich usporiadanie je pravidelné. Druhú skupinu, čiže neusporiadané sú tvorené z viacerých alebo z jedného prvku. Môžu to byť, napríklad nanootvory, nanovýstupky, nanodutiny, ale aj ďalšie prvky. Usporiadanie takýchto prvkov je náhodné. Nanotextúry, ktoré sú na povrchu mikrotextúry tvoria kombináciu nanotextúr a mikrotextúr. Na obr. 15 je zobrazené porovnanie usporiadaných a neusporiadaných nanotextúr (Ahmed et al.2014).

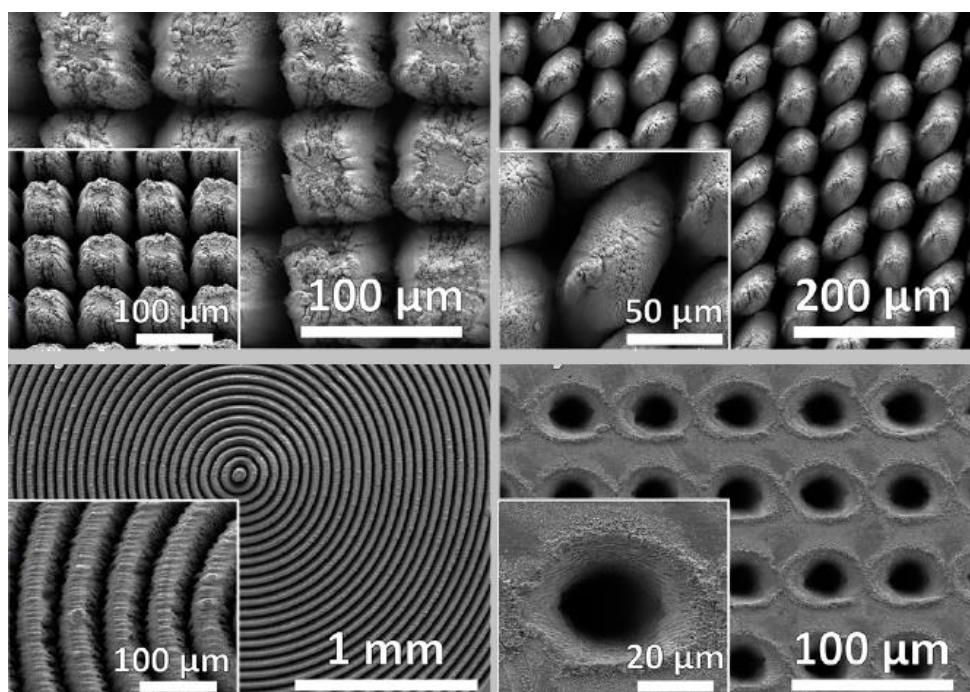


Obrázok 15 Porovnanie usporiadaných a neusporiadaných nanotextúr (Ahmed et al. 2014)

a) usporiadané nanotextúry, b) neusporiadané nanotextúry

2.3.2 Mikrotextúry

Výstupky zaobleného tvaru alebo drážka sú najčastejšie používané mikrotextúry na kovových povrchoch. Tvary mikrotextúr bývajú aj iné, ako napríklad stĺpové textúry. Stĺpové textúry môžu mať rôzny vzhľad, a to kopcovité, valcovité alebo kužeľové. Do skupiny mikrotextúr sa zaraďujú aj ďalšie typy textúr. Môžu to byť, napríklad rôzne otvory, drážky, ale tiež tvarové výstupky. Všetky druhy povrchových mikrotextúr sa delia zhodne ako sa delia nanotextúry. Sú pravidelné alebo náhodné. Ak sú pravidelné, tak sa im hovorí aj, že sú usporiadané, a ak sú náhodné tak sú neusporiadané. Rôzne typy mikrotextúr sú vyobrazené na obr. 16 (Ahmed et al. 2014).



Obrázok 16 Rôzne typy textúr patriacich do skupiny mikrotextúr (Ahmed et al. 2014)

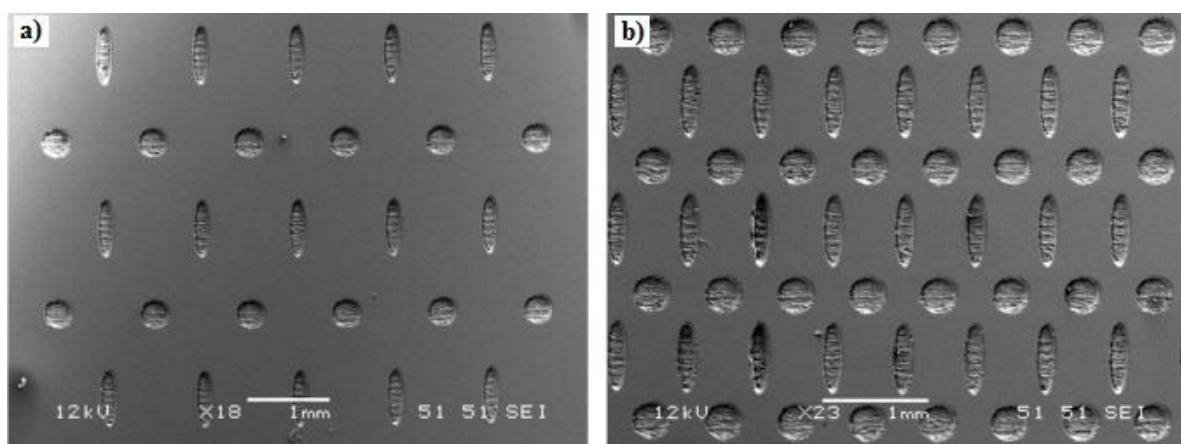
2.4 Aplikácie povrchových textúr vyhotovených laserom

V súčasnosti využiteľnosť povrchových textúr vyhotovených laserom má veľký technologický význam. Usporiadanie rôznych typov povrchových štruktúr, ktoré majú veľkosť niekoľko mikrometrov, niekedy len niekoľko nanometrov, spôsobuje zdokonalenie niektorých vlastností povrchov, a preto je využiteľné v mnohých oblastiach priemyslu. Napríklad, v medicíne sa laserové textúrovanie využíva na úpravu povrchových vrstiev implantátov. Vďaka tejto modifikácii sa zlepši rast a šírenie buniek. Jednou z ďalších oblastí priemyslu, v ktorej sa využíva textúrovanie povrchov laserom je optický priemysel. Využíva

sa na zmenu odrazivosti svetla. Taktiež, sa používa vo fotovoltaike a svetelnej detekcii na zvýšenie fotografickej citlivosti. Laserové textúrovanie povrchov je využívané aj na zmenu tribologických vlastností povrchov (Schreck, Gahr 2005).

2.4.1 Využitie laserového textúrovania na modifikáciu tribologických vlastností povrchov

Väčšie nároky na charakter povrchu a kvalitu sú vyžadované čoraz viac v dôsledku zlepšenia životnosti, spoľahlivosti a bezpečnosti, zníženia spotreby energie a opotrebenia, ale najmä zabezpečenie funkčnosti mechanických zariadení. Zníženie trenia medzi plochami povrchov, ktoré sú v kontakte je jeden spôsob z mnohých zabezpečujúci ich funkčnosť. Toto zníženie trenia je možné dosiahnuť vytvorením textúr rôznymi spôsobmi, napr. laserom. Textúry majú často veľmi presne zadefinovaný tvar a rozmery. Skladajú sa z mikroútvarov. Plnia úlohu mikro-hydrodynamických ložísk, zásobníka maziva, ale aj mikropasce. Oterom stykových plôch vznikajú mikročiasťky, ktoré sú zachytávané danými mikropascami. Textúry sú zvyčajne tvorené žliabkami alebo jednoduchými jamkami, pričom obe sú vytvárané abláciou povrchovej vrstvy materiálu. Rozmer, tvar a hustota útvarov na obrábanej povrchovej vrstve sú hlavnými parametrami laserových textúr. Príklady laserových textúr s rôznymi hustotami útvarov sú na obr. 17. Vhodne zvolené charakteristiky vyhotovovaných útvarov a správna voľba parametrov procesu laserového textúrovania môžu doceliť zníženie koeficientu trenia až o 20% (Dunn et al.2014; Vilhena et al. 2008).



Obrázok 17 Príklady rôznych hustôt útvarov laserovej textúry (Segu et al.2013)

a) laserová textúra s nízkou hustotou 7% b) laserová textúra s vysokou hustotou 20%

2.4.2 Využitie laserového textúrovania v medicíne

Výroba laserových textúr sa uplatňuje aj vo veľmi významnej oblasti, a to v medicíne. Danou technológiou sú vytvárané textúry na nástrojoch využívaných pri operáciách. Napríklad, textúry vyhotovované laserom sú vytvárané na chirurgických nožoch za účelom zníženia trenia pri rezaní tkaniva. Iným využitím laserových textúr u medicínskych nástrojov je na ihlách, ktoré sa používajú, napr. pri drenáži vredov alebo biopsii. Zavedenie ihly pri týchto medicínskych zákrokoch musí byť veľmi presné. Ihly zo špeciálnym dizajnom, tzv. echogenické ihly, patria do skupiny možností, ktorými je možné zvýšiť presnosť. Tieto ihly majú pri hrote vytvorenú textúru. Prvky tejto textúry plnia úlohu reflektorov ultrazvukových vln, ktoré sú využívané pri zavedení ihly do tkaniva. Presné zavedenie takýchto ihliel je zabezpečené pomocou odrazených signálov ultrazvukových vln od týchto reflektorov. Viaceré medicínske zariadenia a laboratória preukázali úspešnosť tejto stratégie laserových textúr vytvorených na hrotoch ihliel (Wang et al. 2015).

Ďalším uplatnením laserového textúrovania v medicíne je vytvorenie textúr na povrchoch implantátov. Problém implantátov je interakcia so živým tkanivom, čo zapríčiňuje uvoľnenie týchto implantátov z podporného tkaniva a vznik bolesti s následným opotrebením a vytvorením mikročastíc, ktoré zapríčiňujú zápal. Zápal spôsobujú stratu tkanivovej hmoty, následkom čoho je uvoľnenie implantátov. Preto sa súčasný vývoj zaoberá spracovaním biomateriálov z pohľadu zjednotenia daných materiálov spolu s tkanivami. Súčasne, je množstvo biokompatibilných materiálov, ktoré majú priaznivé mechanické, ale aj chemické vlastnosti za súčasnej dlhodobej výdrže zaťaženia v biologickom prostredí obmedzené. U biomateriáloch však nie sú dôležité len ich vhodné mechanické a chemické vlastnosti, ale aj správne spracovanie povrchu implantátov a lepšia odozva buniek a tkanív na materiály. Laserové textúrovanie spôsobí úpravu morfológie povrchu čo je jedným z vhodných spôsobov zlepšenia odozvy buniek a tkanív na materiál. Schopnosť viazať proteíny, osteoblasty a iné bunky, a ich zjednotenie s povrchom implantátu výrazne ovplyvňujú povrchové textúry (Brown, Arnold 2010; Brunette et al. 2001).

2.4.3 Využitie laserového textúrovania na modifikáciu optických vlastností

Premenu svetla na elektrickú energiu využíva množstvo polovodičových zariadení. Sú to napríklad fotodiódy, ale tiež fotovoltaičné články. Tieto zariadenia sú využívané

v optických dátových úložiskách, v optických komunikačných zariadeniach a podobne. Zariadenia musia byť schopné pohltiť čo najviac slnečnej energie, pretože to vyžaduje ich optimálny výkon. Pohltenie čo najväčšieho množstva slnečnej energie možno zariadiť zvýšením pohlcovania žiarenia za podmienky objemovej stálosti materiálu, a taktiež znížením odrazivosti povrchov. Preto, sa v súčasnosti využíva povlakovanie tenkou antireflexnou vrstvou. Nevýhodou týchto povlakov je že sú využiteľné, len ak je uhol dopadu žiarenia kolmý, a tiež majú efektívne využitie len pre úzky spektrálny rozsah (Brown, Arnold 2010, Zhou et al. 2007).

Modifikácia optických povrchov pomocou laserového textúrovania predstavuje jednu z možností voľby spôsobov redukcie odrazivosti. Pretože, laserové textúrovanie spočíva v úbere materiálu z existujúceho povrchu, sú problémy so zlúčením základného materiálu a tenkých vrstiev vylúčené, ako napr. vzájomná difúzia prvkov, rozdielne koeficienty teplotnej rozťažnosti a slabá priľnavosť povrchov, a tiež je vďaka tomu povrch materiálu stabilnejší. Spôsob odrazu a rozptyl svetla je možné ovplyvniť vytváraním štruktúr, ktoré sa periodicky opakujú, čo je vlastne textúrovanie resp. štruktúrovanie. Textúrovaním je možné ovplyvniť aj pohlcovanie svetla hladkými optickými povrchmi. V dnešnej dobe sa vyrábajú vysoko absorpčné povrchy, ktoré sa kombinujú so super-hydrofóbnymi charakteristikami (Brown, Arnold 2010).

Textúry vytvárané za pomoci laseru sú využívané pre zlepšenie absorpcie svetla, a preto existuje viacero metód, ktoré sú využívané v praxi. Sú to, napr. tvorba periodických povrchových štruktúr, ktoré sú indukované laserom alebo mikroobrábanie povrchov priamym skenovaním (Brown, Arnold 2010).

Tvorba periodických povrchových štruktúr prezývaná aj LIPSS čo je skratka anglického názvu Laser Induced Periodic Surface Structures. LIPSS sa vyhotovuje na povrchoch vybraných materiálov, najmä na polyméroch. Tieto materiály musia byť skenované laserovým zväzkom, ktorý nie je zaostrený. Ak sú podmienky zvolené správne, vytvárajú sa buď stĺpcové alebo kužeľovité útvary. LIPSS je textúrovanie, ktoré je vhodné aj pre komerčnú veľkosériovú výrobu a proces takéhoto štruktúrovania je efektívny. Daným druhom textúrovania je možné štruktúrovať aj veľké plochy (Brown, Arnold 2010).

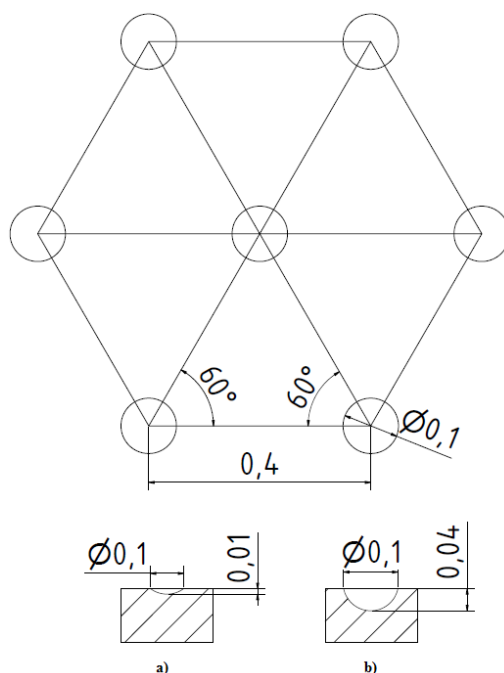
Mikroobrábanie povrchov priamym skenovaním prebieha zaostreným laserovým zväzkom za súčasnej ablácie, pričom sa vytvárajú útvary. Tieto útvary majú presne definovaný tvar. Tvar týchto útvarov môže byť žliabok, jamka alebo aj pyramidálne útvary a podobne. Skupina takýchto útvarov tvorí textúru (Brown, Arnold 2010).

2.5 Prehľad tvarov laserových textúr využitých v experimentoch

V oblasti laserového textúrovania materiálov bolo zrealizovaných množstvo experimentov. Využité boli rôzne materiály, ale taktiež rôzne tvary vyhotovených textúr. Tieto tvary mali odlišné hĺbky, ale aj hustotu rozmiestnenia týchto textúr na skúmanom povrchu vzorky a boli vyhotovované pri rozličných parametroch laserového obrábania.

Experiment Vyhodnotenie trenia laserovo textúrovanej nástrojovej ocele:

Autori Šugárová a kol. v experimente na Vyhodnotenie trenia laserovo textúrovanej nástrojovej ocele vyhotovili textúry na nástrojovej oceli S235JRG1. Pri tomto experimente využili kruhový tvar textúr v štyroch sadách. Tvary textúr sú zobrazené na obr. 18. Vo všetkých sadách bol priemer kruhu 0,1 mm a vzdialenosť medzi nimi 0,4 mm. V prvej a druhej sade bola hĺbka textúr 0,01 mm, ale jedna sada bola vyhotovená stratégiou obrábania hatching a druhá stratégiou obrábania caving. V tretej a štvrtej sade bola hĺbka textúr 0,04 mm a stratégia obrábania boli použité ako pri prvej a druhej sade. Laserové textúrovanie všetkých sád prebiehalo pri rovnakých parametroch laserového obrábania, kde skenovacia rýchlosť bola $1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, hrúbka odoberanej vrstvy bola $1 \text{ } \mu\text{m}$, výkon $10,075 \text{ W}$ a frekvencia 60 kHz (Šugárová a kol. 2017)

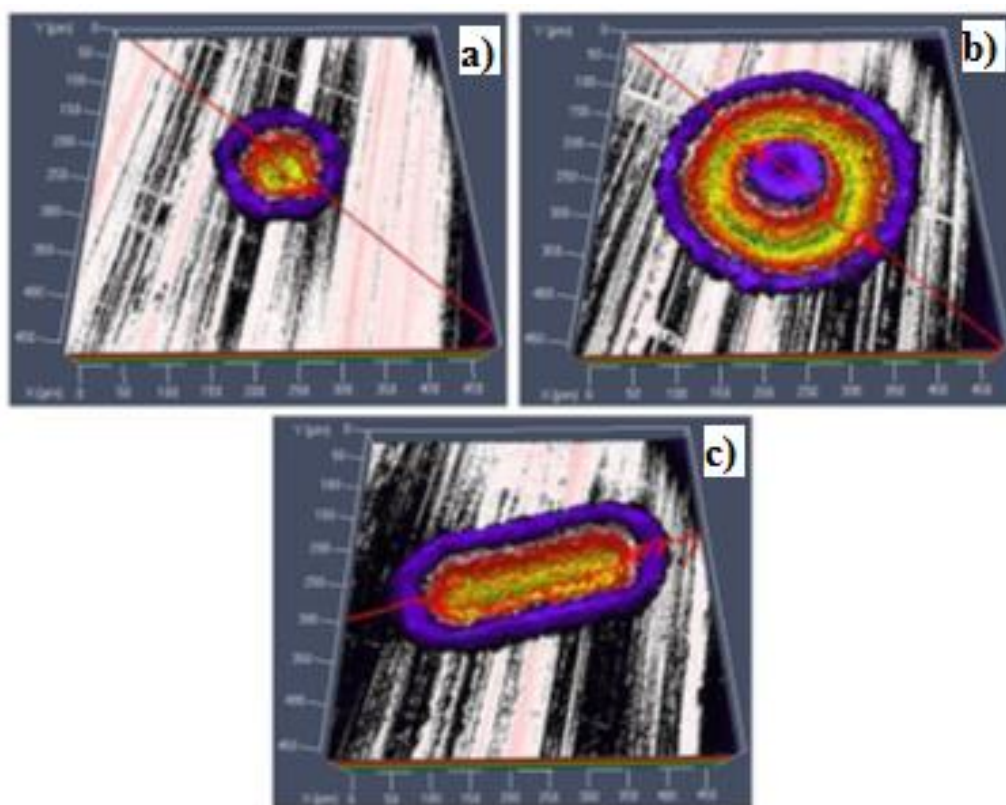


Obrázok 18 Tvar textúry v experimente Vyhodnotenia trenia laserovo textúrovanej nástrojovej ocele
(Šugárová a kol. 2017)

a) hĺbka prvej a druhej sady 0,01 mm b) hĺbka tretej a štvrtej sady 0,04 mm

Experiment Vplyv povrchovej textúry nástroja na trenie a vlastnosti povrchových vrstiev formovanej súčasti:

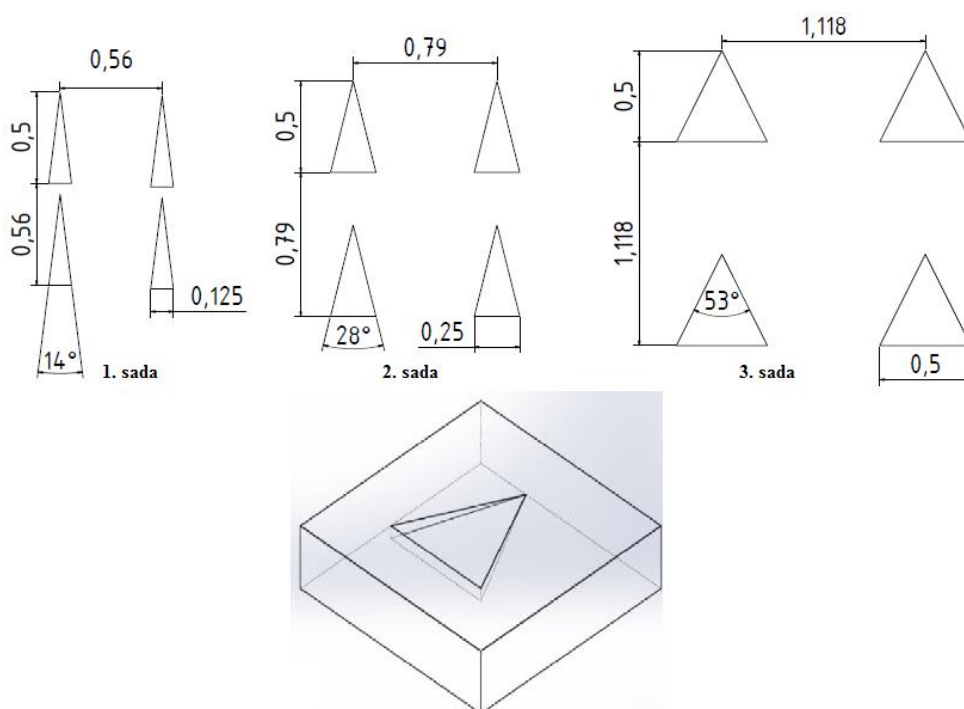
Autori Šugárová a kol. v experimente Vplyv povrchovej textúry nástroja na trenie a vlastnosti povrchových vrstiev formovanej súčasti vytvorili textúry pomocou laseru. Tvary textúr boli použité kruh, medzikružie a textúra elipsového tvaru. Jednotlivé tvary sú zobrazené na obr. 19. Kruhová textúra mala priemer 0,1 mm s hĺbkou textúry 0,02 mm. Textúra tvaru medzikružia mala rozmery vnútorného kruhu 0,14 mm a vonkajšieho 0,24 mm. Hĺbka tejto textúry bola 0,02 mm. Textúra elipsového tvaru mala šírku 0,1 mm a dĺžku 0,3 mm. Hĺbku mala tak ako aj obidve predchádzajúce 0,02 mm. Pri všetkých druhoch sád boli použité rovnaké parametre laserového obrábania. Skenovacia rýchlosť bola $1300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, hrúbka odrezávanej vrstvy $1 \mu\text{m}$, výkon 16,4 W a frekvencia 75 kHz (Šugárová a kol. 2018).



Obrázok 19 Tvary textúr použitých v experimente Vplyv povrchovej textúry nástroja na trenie a vlastnosti povrchových vrstiev formovanej súčasti (Šugárová a kol. 2018)
a) kruhový tvar, b) tvar medzikružia, c) elipsoidný tvar

Experiment Nový tvar povrchovej textúry pre riadenie smerového trenia:

Lu et al. v experimente Nový tvar povrchovej textúry pre riadenie smerového trenia využili technológiu laserového textúrovania povrchu materiálu. Textúry mali tvar trojuholníkov, ale použili rôzne rozmery týchto trojuholníkov, a taktiež ich odstup bol v jednotlivých sadách odlišný. Tvar textúr a rozmery sú zobrazené na obr. 20. Výška trojuholníkov bola vo všetkých sadách rovnaká 0,5 mm. Prvá sada trojuholníka mala rozmer 0,125 mm. Vrcholový uhol trojuholníkov bol 14° . Hĺbka prvej sady v najhlbšom mieste bola 0,015 mm. Rozstup trojuholníkov bol 0,56 mm. Druhá sada trojuholníka mala rozmer 0,250 mm. Vrcholový uhol trojuholníkov bol 28° . Hĺbka prvej sady v najhlbšom mieste bola 0,03 mm. Rozstup trojuholníkov bol 0,79 mm. Tretia sada trojuholníka mala rozmer 0,5 mm. Vrcholový uhol trojuholníkov bol 53° . Hĺbka prvej sady v najhlbšom mieste bola 0,06 mm. Rozstup trojuholníkov bol 1,118 mm (Lu et al. 2018).

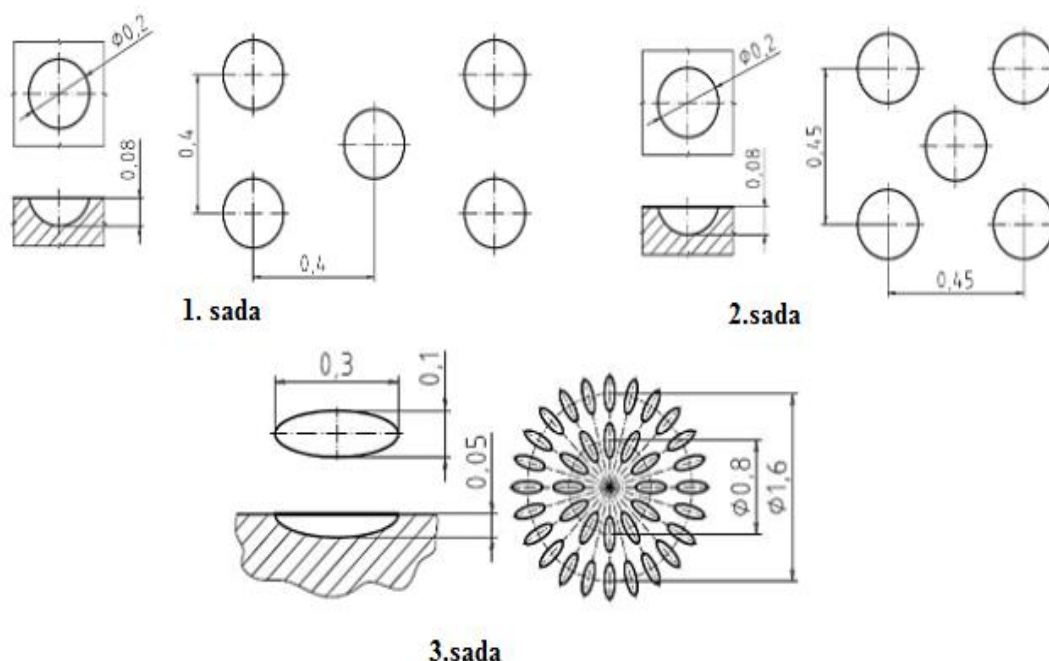


Obrázok 20 Tvary jednotlivých sád textúr využitých v experimente Nový tvar povrchovej textúry pre riadenie smerového trenia (Lu et al. 2018)

Experiment Laserové povrchové textúry nástrojovej ocele: hodnotenie kvality štruktúrovaných povrchov:

V tomto experimente boli vyhotovované laserom textúry na materiáli 90MnCrV8. Boli použité tri sady textúr. Prvá a druhá sada mali tvar kruhov ale s rôznymi rozmermi rozstupov. Tretia sada mala textúry s tvarom elipsy. Použité tvary laserových textúr spolu

s rozmermi sú na obr. 21. Prvé dve sady mali priemer kruhov 0,2 mm s hĺbkou 0,08 mm. Rozstup kruhov v prvej bol 0,4 mm a v druhej 0,45 mm. Tretia sada mala dĺžku 0,3 mm a šírku 0,1 mm., pričom hĺbka tejto sady textúr bola 0,05 mm. Každá sada bola vyhotovená pri rozličných parametroch obrábania. Prvá sada mala skenovaciu rýchlosť $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, výkon 19,35 W a frekvencia 80 kHz. Druhá sada mala skenovaciu rýchlosť $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, výkon 13,25 W a frekvencia 50 kHz. Posledná tretia sada mala skenovaciu rýchlosť $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, výkon 7 W a frekvencia 30 kHz (Šugár a kol.2016).

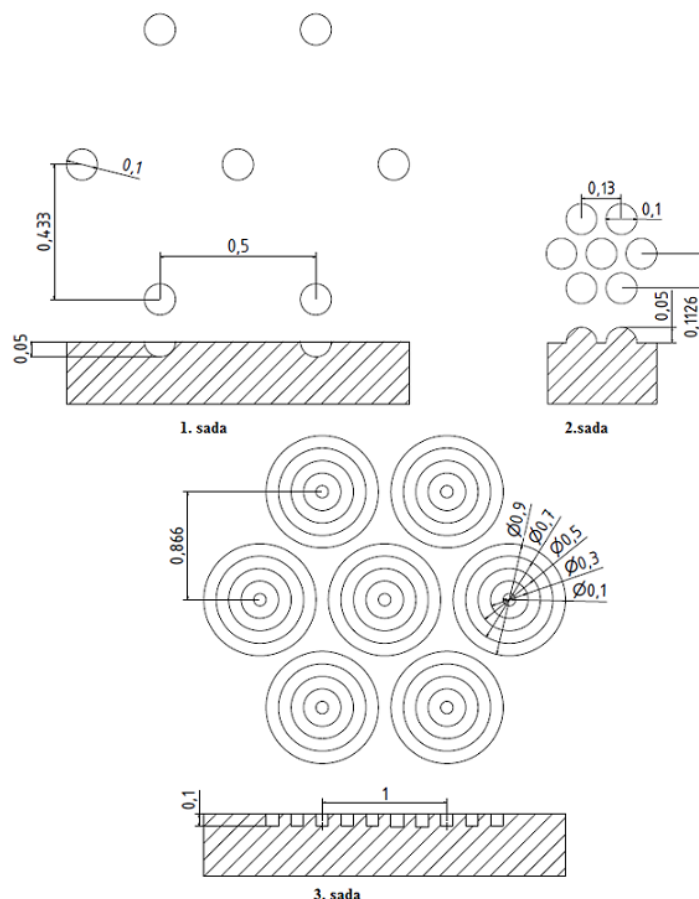


Obrázok 21 Použité tvary textúr v experimente Laserové povrchové textúry nástrojovej ocele: hodnotenie kvality štruktúrovaných povrchov (Šugár a kol. 2016)

Experiment Vplyv laserového textúrovania na odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu:

V danom experimente boli vytvorené textúry operáciou laserového textúrovania. Textúry boli vyhotovené na špeciálnych nástrojových oceliach K100 a K390 Microclean vyrobených firmou Böhler. Dané ocele sú určené na nástroje, ktoré slúžia na prácu za studena a odolávajú abrazívnemu opotrebeniu. Oba materiály mali rovnaké parametre obrábania frekvenciu 70 kHz aj skenovaciu rýchlosť $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, ale mali odlišný výkon obrábania. Materiál K100 bol obrábaný pri výkone stroja 48,7 W a materiál K390 Microclean bol obrábaný pri výkone 51,5 W. Boli použité dva tvary textúr. Prvý tvar bol kruh a druhý tvar bol tvar medzikružia. Kruhový tvar bol vytvorený v dvoch sadách. V prvej sade textúru tvorili jamky s priermi 0,1 mm a hĺbkou 0,05 mm. Rozstup jamiek bol 0,5 mm a hustota textúrovanej plochy bola 6,28 %. V druhej sade kruhového tvaru textúru tvorili

výstupky v tvare polgúl s priemerom 0,1 mm a výškou 0,05 mm. Rozstup polgúl bol 0,13 mm, čiže hustota zaplnenia plochy bola 93,7 %. Tretia sada mala tvar medzikružia. Každé medzikružie tvorilo päť kruhov. Najmenší ma priemer 0,1 mm a každý ďalší mal priemer väčší o 0,2 mm. Rozstup medzi jednotlivými medzikružiami bol 1 mm s hustotou textúrovanej plochy 38 %. Hĺbka vnútorných drážok bola 0,1 mm. Tvary textúr spolu s rozmermi sú vyobrazené na obr. 22 (Moravčíková a kol. 2018).

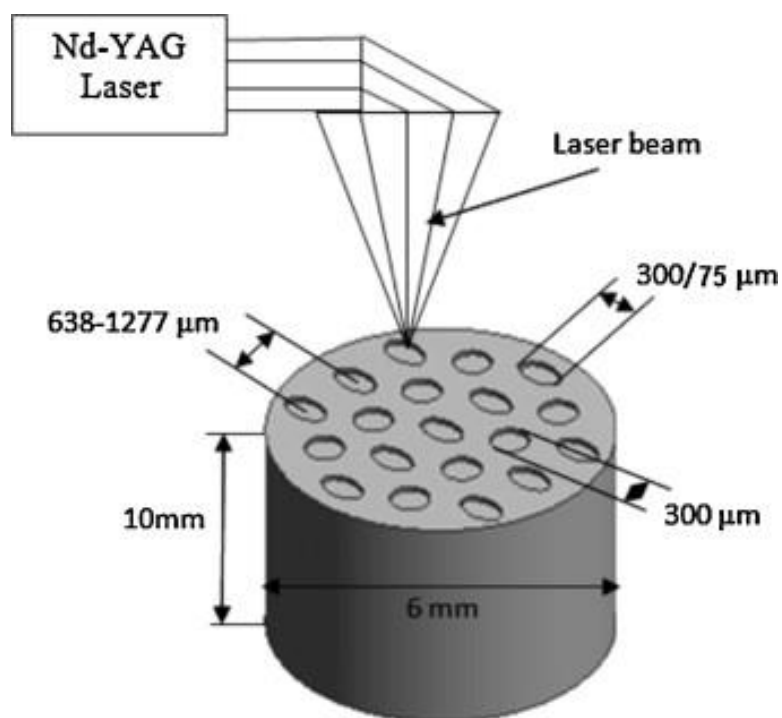


Obrázok 22 Použité tvary v experimente Vplyv laserového textúrovania na odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu (Moravčíková a kol. 2018)

Experiment Vplyv laserom štruktúrovaného povrchu na proces mazania:

Autori Segu et al. v experimente Vplyv laserom štruktúrovaného povrchu na proces mazania, ktorý bol realizovaný v roku 2013 vytvorili textúry pomocou technológie laserového textúrovania. Na vyhotovenie textúr bol použitý Nd-YAG laser s dĺžkou trvania pulzu 200 ns, s energiou jedného pulzu 1mJ, s výkonom 24W a s frekvenciou 15kHz. Daná textúra bola vyhotovená na vzorke z ocele AISI 52100, ktorého alternatívou je materiál 102Cr6 (14 109). Vytvorené laserové textúry pozostávali z kruhových jamiek s priemerom

0,3 mm a z oválnych jamiek dĺžkou 0,3 mm a šírkou 0,075 mm ako je vidieť na obr. 23. Textúry boli vyhotovené za účelom plnenia funkcie ako zásobníku maziva (Segu et al. 2013).



Obrázok 23 Použité textúry v experimente Vplyv laserom štruktúrovaného povrchu na proces mazania (Segu et al. 2013)

3 ANALÝZA TVAROVÝCH A ROZMEROVÝCH PARAMETROV PRVKOV MIKROTEXTÚR

Praktickú časť diplomovej práce tvorí experiment, v ktorom boli vyhotovené funkčné povrchy pomocou technológie laserového textúrovania. Boli vytvorené dve sady textúr, ktoré boli vyhotovené na návare z materiálu SK STELKAY 6-G. Návar bol vyrobený v spoločnosti HKS Forge, spol s.r.o., Trnava.

3.1 Experimentálny materiál

Experimentálna vzorka je tvorená návaram prídavného materiálu technológiou ručného MAG navárania. Naváranie prebiehalo s použitím elektródy s priemerom 1,6 mm a ochranného plynu, ktorý tvorí zmes argónu a 20% oxidu uhličitého. Parametre navárania sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Parametre navárania

Prídavný materiál	Elektrické napätie U (V)	Elektrický prúd I (A)	Rýchlosť podávania drôtu (m/min)
SK STELKAY 6-G	19,9	220	3,5

Prídavný materiál je SK STELKAY 6-G. Chemické zloženie prídavného materiálu je uvedené v tabuľke 2. SK STELKAY 6-G je kobaltová zliatina využívaná na zváranie v ochrannej atmosfére. Táto zliatina má vynikajúcu odolnosť voči opotrebeniu, oxidácií, oteru a tlaku v korozívnom prostredí s vysokou teplotou. Tvrdosť tejto zliatiny je 40 HRC. Daný prídavný materiál sa využíva na ventily, na ventilové sedlá v spaľovacích motoroch, na nožnice využívané pri strihaní za tepla, časti mlynov, kĺbové ventily a sedlá, razníky (GoWELD 2019).

Tabuľka 2 Chemické zloženie prídavného materiálu SK STELKAY 6-G (hm. %) (GoWELD 2019)

C	Mn	Si	Cr	W	Fe
0,95	0,8	1,4	30,0	4,2	3,0

3.2 Využitie zariadenie a vyhotovené textúry

Experiment pozostával z vytvorenia mikrotextúr, ktoré boli vyhotovené pomocou 5-osového laserového obrábacieho stroja Lasertec 80 Shape v laboratóriu Ústavu výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave. V tabuľke 3 sú parametre stroja Lasertec 80 Shape. Tento obrábací stroj je zobrazený na obr. 24, na ktorom je aj zobrazené upnutie návaru na vyhotovenie textúr. 5-osový laserový obrábací stroj Lasertec 80 Shape je vybavený ytterbiovým nanosekundovým vláknovým laserom a so strednou hodnotou vyžiarého výkonu 100 W.

Tabuľka 3 Parametre 5-osového laserového obrábacieho stroja Lasertec 80 Shape (DMG MORI 2020)

Pracovný priestor:	
Os X	800 mm
Os Y	500 mm
Os Z (ohnisková os)	700 mm
Veľkosť stola (3 osi)	900 mm x 600 mm
Maximálne zaťaženie stola (3 osi)	200 kg
Rozsah otáčania (os C)	360°
Rýchlosť posuv (X/Y/Z)	120/120/30 m*min ⁻¹
Laser:	
Typ laserového zdroja	Vláknový
Výkon lasera	100W
Ohnisková vzdialenosť	100/160/255 mm
Stroj:	
Hmotnosť	7000 kg
Rozmery (šírka x dĺžka x výška)	3335 x 2058 x 2290 mm



a)

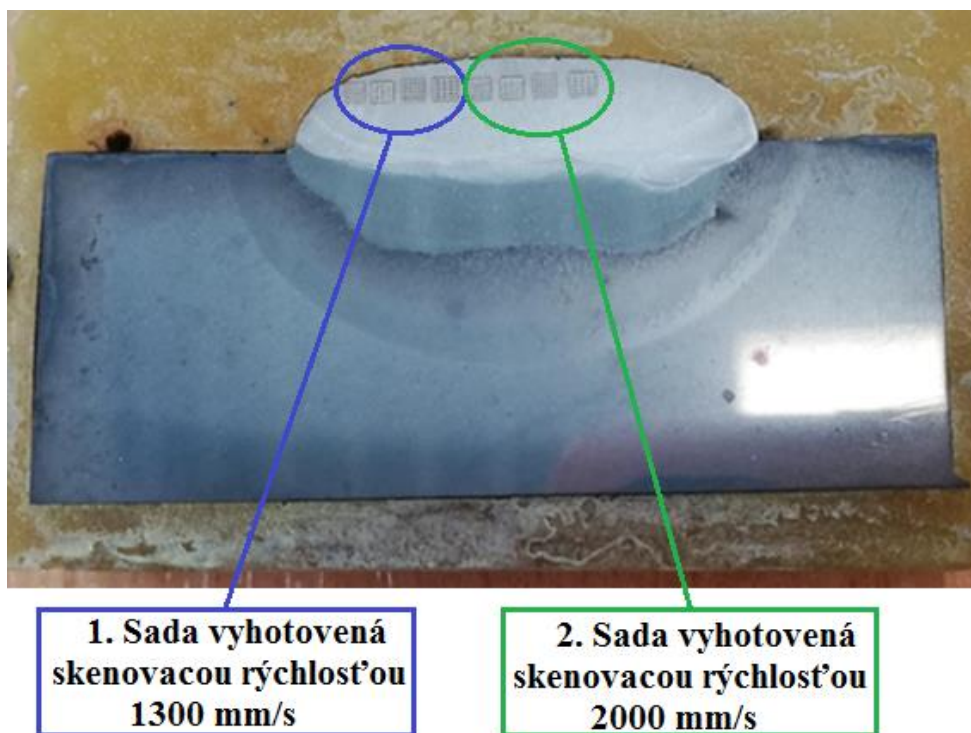


b)

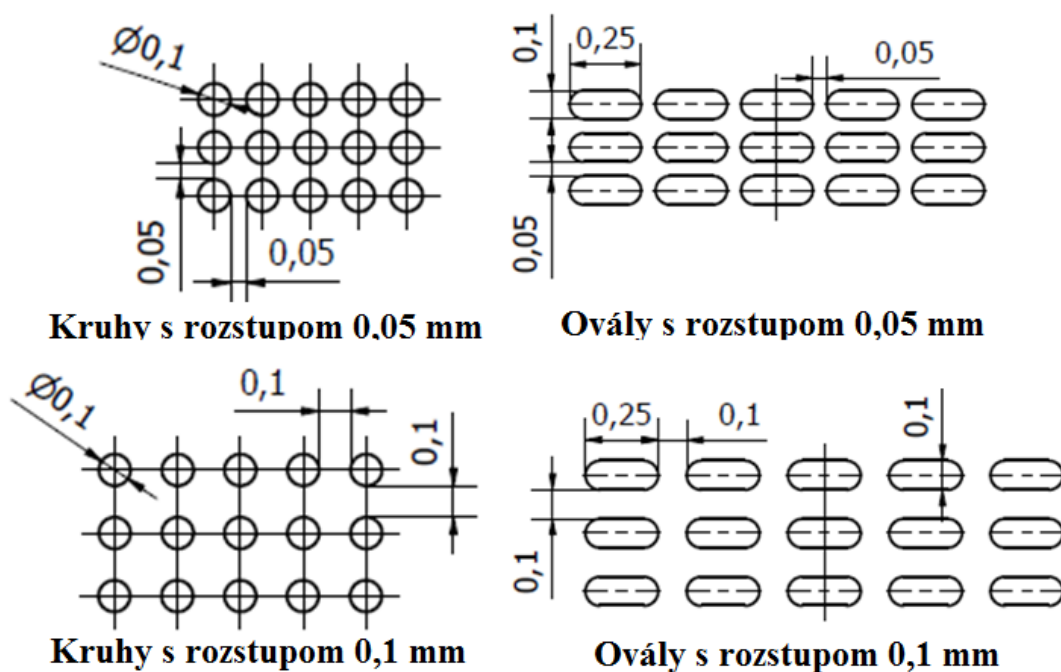
Obrázok 24 Použitý obrábací stroj

a) 5-osový laserový obrábací stroj Lasertec 80 Shape, b) upnutý návar na vyhotovenie textúr

Textúry boli vyhotovené na návare v dvoch sadách, tak ako sú zobrazené na obr. 25. Každá sada mala inú skenovaciu rýchlosť a bola tvorená dvomi tvarmi textúr. Tvary textúr boli kruh a ovál. Každý tvar bol vytvorený v dvoch sériách, ktoré sa odlišovali vzdialenosťami medzi útvarmi. Prvá sada bola vyhotovená skenovacou rýchlosťou 1300 mm.s^{-1} . V tejto sade boli vytvorené dve série kruhov a dve série oválov, pričom jedna série kruhov a jedna série ovalov mala vzdialenosť medzi útvarmi $0,05 \text{ mm}$ a druhá mala $0,1 \text{ mm}$. Druhá sada bola vyhotovená pri skenovacej rýchlosti 2000 mm.s^{-1} . Táto sada bola vytvorená rovnako, ako v prvej sade. Obsahovala dve série kruhov a dve série oválov. Každá série bola vyhotovená rovnako, ako v prvej sade. Všetky útvary v oboch sadách mali hĺbku textúr $0,02 \text{ mm}$. Rozmery vyhotovených tvarov sú zobrazené na obr. 26.



Obrázok 25 Vyhotovené textúry na návare



Obrázok 26 Navrhnuté rozmery tvarov textúr pre obidve sady

3.3 Vyhodnocovanie rozmerovej presnosti zhotovených textúr

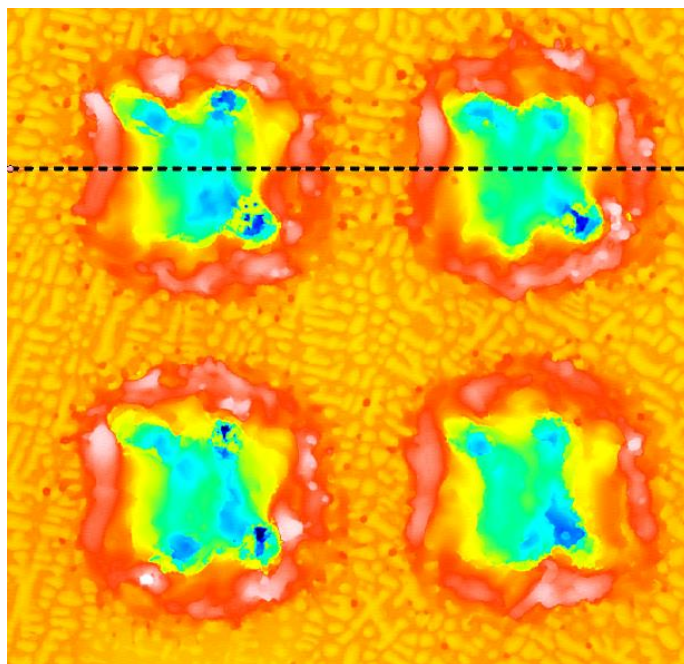
Vyrobené textúry podľa vyššie definovaných rozmerov boli analyzované pomocou skenovacej konfokálnej mikroskopie. Analyzovanie prebiehalo prostredníctvom laserového konfokálneho mikroskopu ZEISS LSM 700 v laboratóriu Ústavu materiálov

Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave, laserový konfokálny mikroskop je na obr. 27. Tento mikroskop je využívaný na analýzy a rekonštrukcie 3D povrchov telies, tak ako kovového, ale aj nekovového charakteru. ZEISS LSM 700 má rozlišovaciu schopnosť 10 nm vo vertikálnom smere. Na základe toho je možné nadobudnúť informácie o drsnosti povrchu plošnom, ale aj lineárnom zobrazení. Taktiež umožňuje podrobne skúmať opotrebovanie súčiastok na povrchovej vrstve adhéznym, abrazívnym, kavitačným, koróznym a únavovým mechanizmom. Základnou časťou laserového konfokálneho mikroskopu ZEISS LSM 700 je metalografický mikroskop ZEISS Axio Imager, ktorý umožňuje obraz snímať v tmavom i svetlom zobrazovacom poli (Čaplovič 2010).

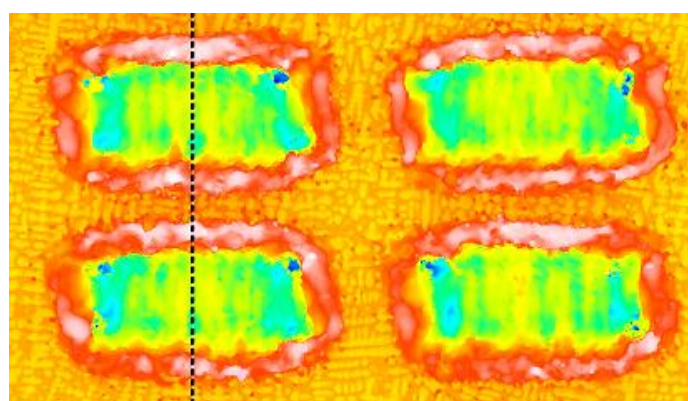


Obrázok 27 Laserový konfokálny mikroskop ZEISS LSM 700 (Čaplovič 2010)

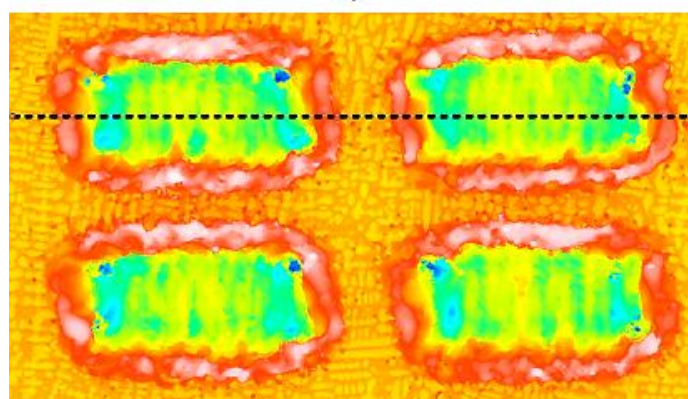
Cieľom laserového textúrovania bolo vyhotoviť na návare textúry, ktoré mali vopred definovaný tvar a rozmery. Následne sa konfokálnym mikroskopom vyhodnocovali jednotlivé sady textúr. Pri textúrach tvaru kruhu sa analyzovali rozmery, ktoré boli priemer kruhu, vzdialenosť medzi jednotlivými kruhmi a hĺbka textúry. Rozmery kruhových textúr boli analyzované v línii, tak ako je zobrazená na obr. 28. Pri textúrach s tvarom oválu sa vyhodnocovali rozmery a to dĺžka oválu, šírka oválu, vzdialenosť medzi jednotlivými oválmi a tiež hĺbka vytvorenej textúry. Vyhodnocované rozmery vytvorených textúr s tvarom oválu boli analyzované v línii, ktoré sú zobrazené na obr. 29.



Obrázok 28 Analyzovanie rozmerov textúr s tvarom kruhu



a)

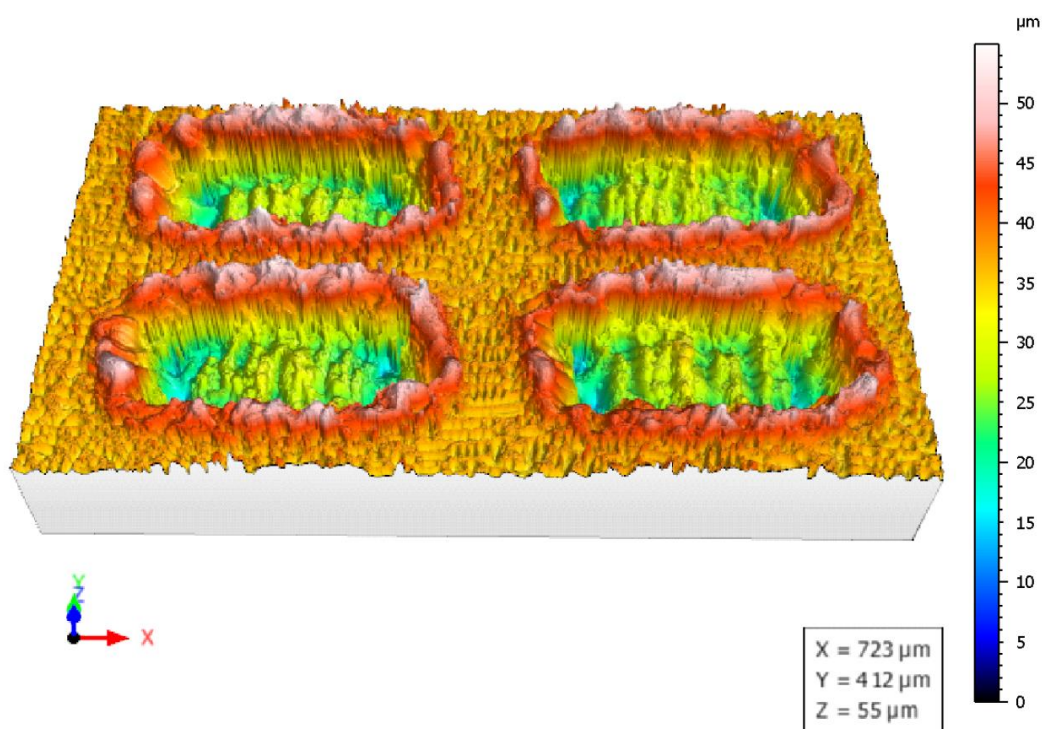


b)

Obrázok 29 Analyzovanie rozmerov textúr s tvarom oválu

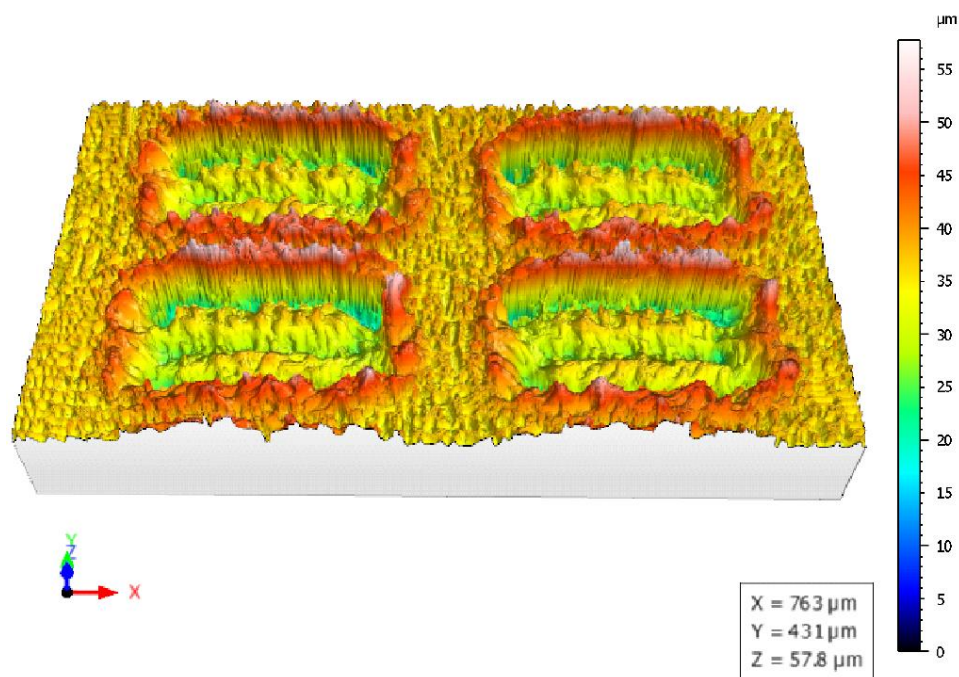
a) analyzovanie šírky, b) analyzovanie dĺžky, rozstupu útvarov a hĺbky

Vyhodnocované rozmery boli odčítané z jednotlivých línií. Namerané hodnoty pre prvú sadu a taktiež aj pre druhú sadu sú uvedené v Prílohe A. Pri meraní prvej sady textúr, ktorá bola vyhotovená skenovacou rýchlosťou 1300 mm.s^{-1} je vidieť, že zmena rozstupu útvarov nemá zásadný vplyv na rozmerovú presnosť vytvorených textúr. Z nameraných údajov vyplýva, že ani jeden nameraný rozmer nezodpovedá menovitým požadovaným rozmerom danej textúry. Pri oválnych textúrach sa zistilo, že krajné polohy pri meraní hĺbky sú svojou hodnotou najbližšie ku požadovanej hodnote $0,02 \text{ mm}$. Avšak v strede týchto textúr zostáva pretavený materiál ako je vidieť na obr 30.



Obrázok 30 Pretavený materiál v strede oválnej textúry pri meraní prvej sady

Z merania druhej sady textúr vyhotovených pri skenovacej rýchlosti 2000 mm.s^{-1} vyplýva podobne, ako pri meraní prvej sady a to, že zmena rozstupu útvarov nemá zásadný vplyv na rozmerovú presnosť. Taktiež, ani jedna z nameraných hodnôt nezodpovedá menovitej hodnote požadovaného tvaru. Pri nameraných hodnotách oválnych textúr je vidieť podobne, ako pri prvej sade, že hodnoty hĺbky textúry sú najbližšie k menovitej hodnote v okrajových polohách, ale v strede textúr je pretavený materiál, čo je možné vidieť na obr. 31.



Obrázok 31 Pretavený materiál v strede oválnej textúry pri meraní druhej sady

V tabuľke 4 sú porovnávané textúry s tvarom kruhu a v tabuľke 5 sú porovnávané textúry s tvarom oválu. Kruhovú a oválnu textúru boli vyhotovené každé v štyroch sériách. Dve série boli vyhotovené pri skenovacej rýchlosti 1300 mm.s^{-1} a rozlišovali sa rozstupom útvarov, ďalšie dve série boli vyhotovené skenovacou rýchlosťou 2000 mm.s^{-1} , a taktiež sa rozlišujú rozstupom útvarov. Z porovnaní meraní jednotlivých sád vyhotovených rozličnými skenovacími rýchlosťami sa zistilo, že zásadný vplyv na rozmerovú presnosť vytváraných textúr laserom má veľkosť skenovacej rýchlosti, pretože prvá sada vyhotovená nižšou skenovacou rýchlosťou, ako druhá sada, je z hľadiska rozmerovej presnosti navrhnutých útvarov presnejšia. Prvá sada má oproti druhej sade menšie odchýlky od menovitých požadovaných rozmerov, čo je vidieť v tabuľke 4 pre kruhové útvary a v tabuľke 5 pre oválne útvary. Pri kruhových útvaroch najväčšie odchýlky vznikli pri rozmere rozstupu útvarov a pri rozmere hĺbky útvarov pri textúre, ktoré boli vytvorené vyššou skenovacou rýchlosťou. Z porovnávaní oválnych textúr je vidieť najväčšie odchýlky, ktoré sa vytvorili pri rozmere hĺbok textúr vyhotovených vyššou skenovacou rýchlosťou. Z daných zistení vyplynulo, že veľkosti hĺbok textúr prvej sady sú bližšie k menovitej požadovanej hodnote, ako veľkosti hĺbok druhej sady a tiež, že pri textúrach s tvarom oválu je väčšie množstvo pretaveného materiálu v strede textúry, čo je vidieť na obrázkoch 30 a 31. Takže porovnávaním jednotlivých sád sa prišlo na to, že optimálnejším parametrom na dosiahnutie menších odchýlok od menovitých rozmerov textúr je skenovacia rýchlosť 1300 mm.s^{-1} , ktorá bola použitá pri prvej sade textúr.

Konfokálnou mikroskopiou bola vyhodnocovaná aj výška vyhrnutého materiálu okolo jednotlivých textúr. Všetky namerané hodnoty sú v prílohe B. Pri každej vytvorenej textúre bola výška vyhrnutého materiálu zmeraná tri krát a následne bola z nameraných hodnôt určená priemerná hodnota. V tabuľke 6 sa nachádzajú jednotlivé vyhotovené textúry s príslušnými priemernými hodnotami výšky vyhrnutého materiálu. Z porovnaní priemerných hodnôt je vidieť, že priemerné hodnoty výšok vyhrnutého materiálu sú väčšie pri oválnych textúrach ako pri kruhových textúrach.

Tabuľka 4 Porovnanie nameraných rozmerov kruhových textúr

Textúry tvar kruhu				
Skenovacia rýchlosť	Rozmer	Navrhovaný rozmer (mm)	Nameraný rozmer (mm)	Odchýlka (%)
1300 mm/s	priemer	0,100	0,092	8
	rozstup	0,050	0,060	20
	hlbka	0,020	0,0173	13,5
1300 mm/s	priemer	0,100	0,090	10
	rozstup	0,100	0,113	13
	hlbka	0,020	0,0183	8,5
2000 mm/s	priemer	0,100	0,074	26
	rozstup	0,050	0,077	54
	hlbka	0,020	0,013	35
2000 mm/s	priemer	0,100	0,082	18
	rozstup	0,100	0,126	26
	hlbka	0,020	0,011	45

Tabuľka 5 Porovnanie nameraných rozmerov oválnych textúr

Textúry tvaru oválu				
Skenovacia rýchlosť	Rozmer	Navrhovaný rozmer (mm)	Nameraný rozmer (mm)	Odchýlka (%)
1300 mm/s	dĺžka	0,250	0,240	4
	šírka	0,100	0,095	5
	rozstup	0,050	0,051	2
	hĺbka	0,020	0,0183	8,5
1300 mm/s	dĺžka	0,250	0,225	10
	šírka	0,100	0,097	3
	rozstup	0,100	0,096	4
	hĺbka	0,020	0,0177	11,5
2000 mm/s	dĺžka	0,250	0,223	10,8
	šírka	0,100	0,118	18
	rozstup	0,050	0,053	6
	hĺbka	0,020	0,0093	53,5
2000 mm/s	dĺžka	0,250	0,240	4
	šírka	0,100	0,131	31
	rozstup	0,100	0,113	13
	hĺbka	0,020	0,0073	63,5

Tabuľka 6 Priemerné hodnoty výšok vyhrnutého materiálu okolo textúr

Tvar textúry	Rozstup útvarov (mm)	1. sada, skenovacia rýchlosť 1300 mm/s		2. sada, skenovacia rýchlosť 2000 mm/s	
		Priemerná hodnota výšky vyhrnutého materiálu (mm)	Smerodajná odchýlka	Priemerná hodnota výšky vyhrnutého materiálu (mm)	Smerodajná odchýlka
kruh	0,050	0,0083	0,0004	0,0075	0,0004
ovál	0,050	0,0190	0,0008	0,0173	0,0012
kruh	0,100	0,0093	0,0004	0,0088	0,0002
ovál	0,100	0,0140	0,0008	0,0145	0,0004

3.4 Kvalitatívne vyhodnotenie vyhotovených textúr

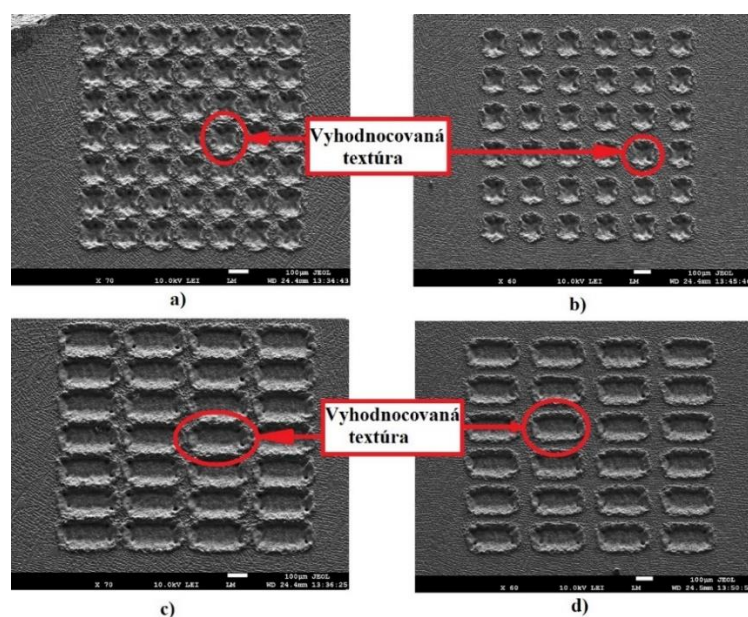
Vyhotovené textúry boli z hľadiska kvalitatívneho hodnotenia analyzované pomocou elektrónovej mikroskopie. Vyhodnocovanie bolo uskutočňované pomocou elektrónového mikroskopu JOEL JSM 7600F v laboratóriu Ústavu materiálov Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave. Tento mikroskop je zobrazený na obr 32. Mikroskop JOEL JSM 7600F je vysokorozlišovací rastrovací elektrónový mikroskop. Príslušenstvom daného mikroskopu sú detektory chemickej mikroanalýzy EDX X-MAX 50, WDX Inca Wave, a taktiež aj špeciálny detektor kryštalografickej orientácie fáz (EBDS), ktorý využíva difrakciu spätne odrazených elektrónov. Zostava v tejto špecifickej konfigurácii umožňuje pozorovať objekty od niekoľkých desiatok milimetrov až do 1 nanometra. Tento mikroskop sa využíva na analýzy povrchových javov rôznych materiálov, ako napríklad v zliatinách kovov, v plastoch, v keramike a v kompozitných nanočasticách. Detektory, ktoré sú pripojené sú schopné definovať chemické zloženie v širokom spektre prvkov. Detektor kryštalografickej orientácie fáz dokáže určiť textúru deformovaných materiálov mikrometrických rozmerov, čo je významné pri vývoji nových materiálov, ale aj pri optimalizácii technologických výrobných postupov. Taktiež, je to dôležité aj pri vyhodnocovaní príčin poškodenia rôznych súčiastok v strojárskom, chemickom, energetickom a elektronickom priemysle (Čaplovič 2010).



Obrázok 32 Vysokorozlišovací rastrovací elektrónový mikroskop s detektormi (Čaplovič 2010)

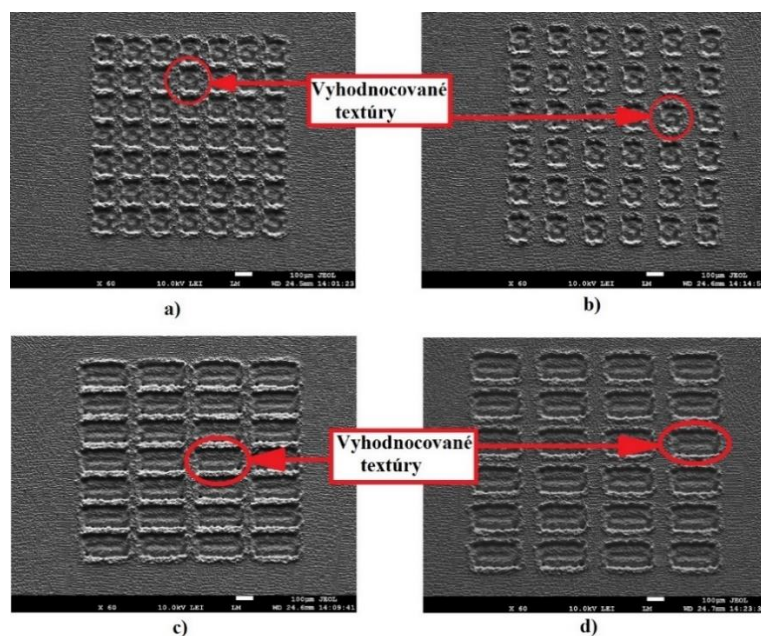
Kvalitatívne vyhodnocovanie sa vykonávalo elektrónovým mikroskopom. Pri analyzovaní boli z každej sady vybrané štyri textúry, pričom dve textúry mali tvar kruhu a dve mali tvar oválu. Vybrané kruhy boli každý z inej série, a to kruh s rozstupom útvarov 0,05 mm a druhý s rozstupom útvarov 0,1 mm. Podobne ako kruhy, boli vybrané aj textúry

s tvarom oválu. Vybrané vyhodnocované textúry z každej série pre prvú sadu sú vyobrazené na obrázku 33 a pre druhú sadu sú vyobrazené na obr. 34.



Obrázok 33 Vyhodnocované textúry z prvej sady

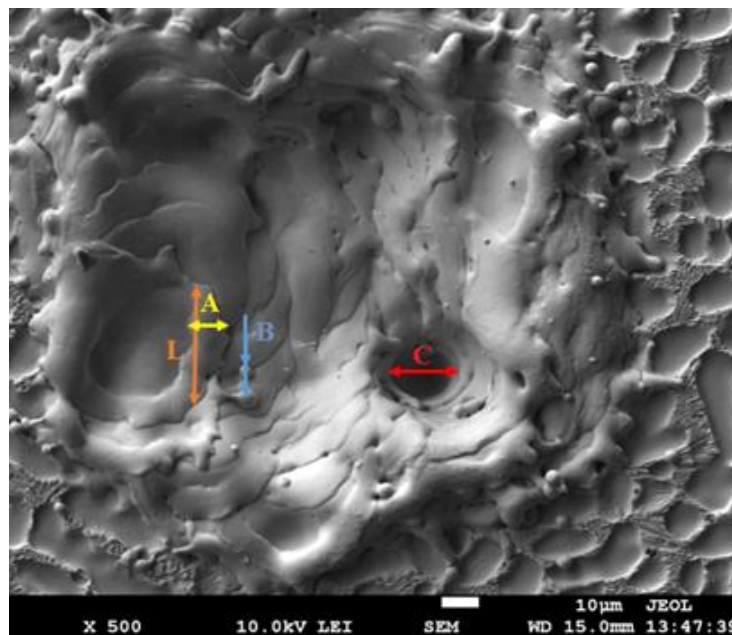
a) textúra tvar kruhu s rozstupom útvarov 0,05 mm pri 70-násobnom zväčšení, b) textúra tvar kruhu s rozstupom útvarov 0,1 mm pri 60-násobnom zväčšení, c) textúra tvar oválu s rozstupom útvarov 0,05 mm pri 70-násobnom zväčšení, d) textúra tvar oválu s rozstupom útvarov 0,1 mm pri 60-násobnom zväčšení



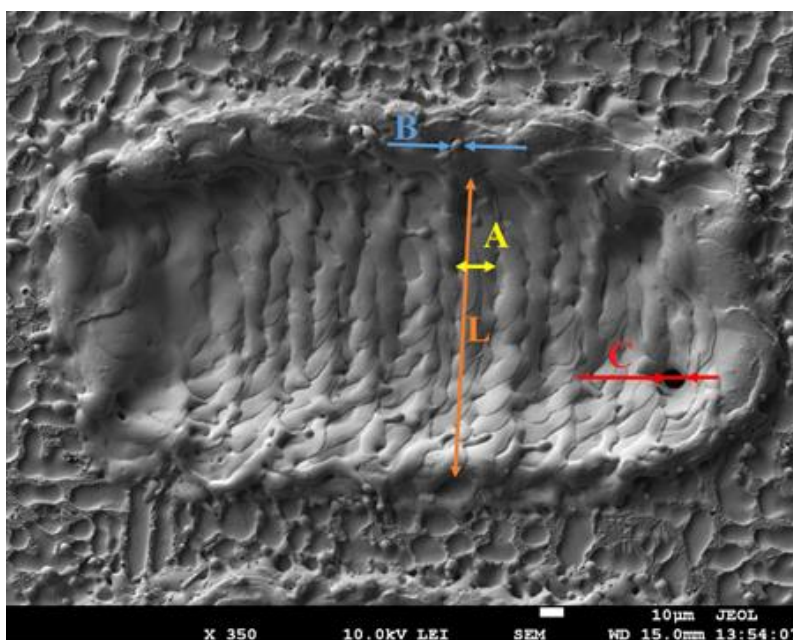
Obrázok 34 Vyhodnocované textúry z druhej sady

a) textúra tvar kruhu s rozstupom útvarov 0,05 mm pri 60-násobnom zväčšení, b) textúra tvar kruhu s rozstupom útvarov 0,1 mm pri 60-násobnom zväčšení, c) textúra tvar oválu s rozstupom útvarov 0,05 mm pri 60-násobnom zväčšení, d) textúra tvar oválu s rozstupom útvarov 0,1 mm pri 60-násobnom zväčšení

Pri kruhových textúrach boli vyhodnocované rozmery priemer póru označený ako rozmer „C“, dĺžka pretaveniny „L“, šírka pretaveniny „A“ a priemer zatuhnutej kvapky roztaveného návaru „B“. Pri oválnych textúrach boli vyhodnocované rozmery rovnaké, ako pri analyzovaní kruhových textúr. Všetky namerané hodnoty aj s vypočítanými priemernými hodnotami sú v prílohe C. Jednotlivé rozmery, ktoré sa analyzovali na kruhových textúrach je vidieť na obr. 35 a na obr. 36 sú zobrazené analyzované rozmery na oválnych textúrach.



Obrázok 35 Kvalitatívne vyhodnocovanie kruhových textúr pri 500-násobnom zväčšení



Obrázok 36 Kvalitatívne vyhodnocovanie oválnych textúr pri 350-násobnom zväčšení

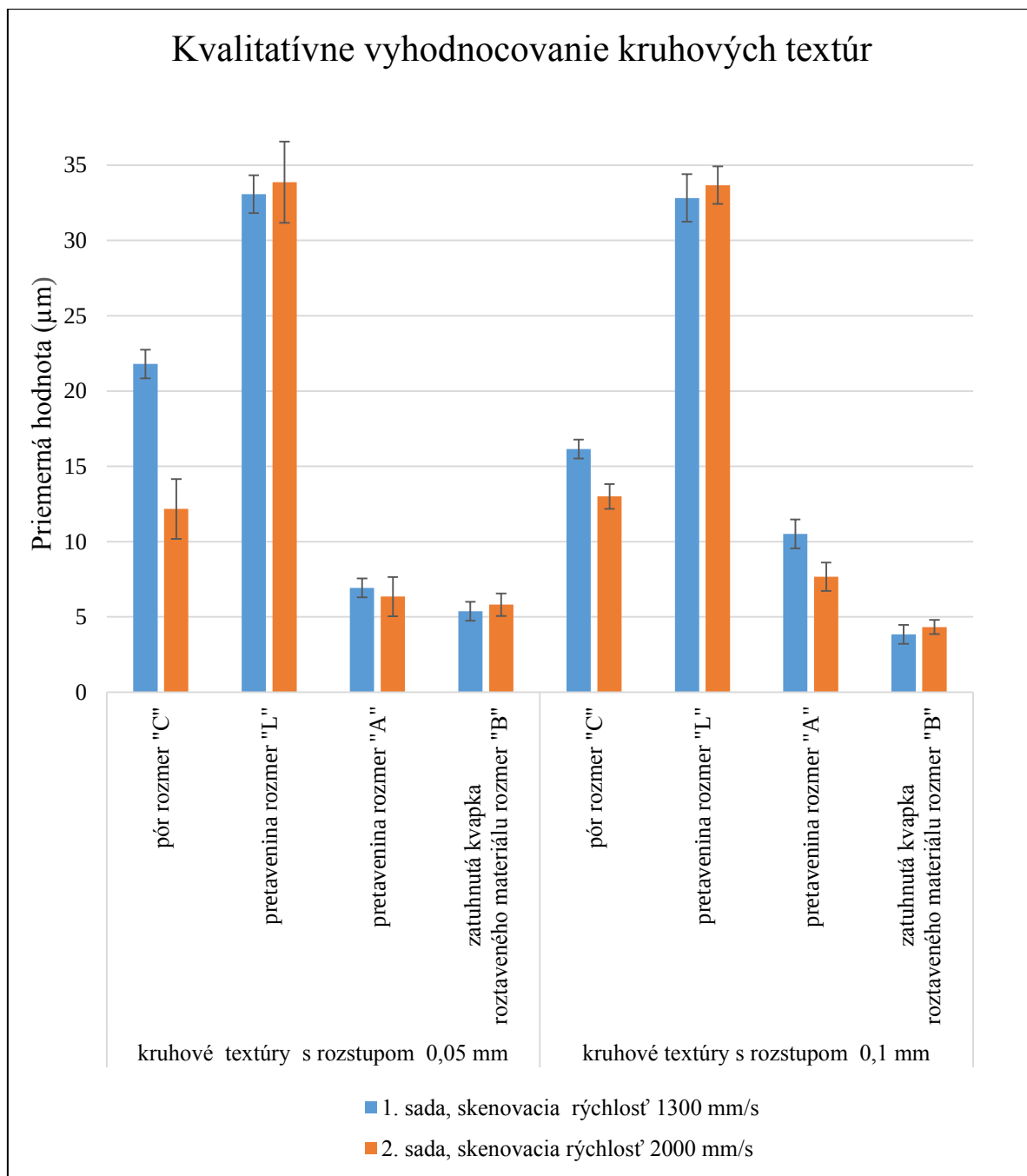
Každý rozmer vo vyhotovených textúrach bol zmeraný trikrát a z nich sa určila priemerná hodnota. V tabuľke 7 sa nachádzajú merané útvary s meranými rozmermi, ktoré boli merané na jednotlivých textúrach s ich príslušnými priemernými hodnotami. Následne sa porovnali vo forme grafov, ktoré sú zobrazené na obr. 37 a 38. V grafickom porovnávaní sa porovnávali jednotlivé rozmery namerané v jednotlivých sadách. Na obr. 37 je zobrazené porovnávanie nameraných údajov na kruhových textúrach v prvej sade, ktorá bola vyhotovená skenovacou rýchlosťou 1300 mm.s^{-1} a v druhej sade, ktorá bola vyhotovená skenovacou rýchlosťou 2000 mm.s^{-1} . Na obr. 38 je vidieť porovnávanie oválnych textúr prvej a druhej sady.

Tabuľka 7 Priemerné hodnoty nameraných rozmerov na meraných útvaroch s rozstupom 0,05 mm

Tvar textúry	Meraný útvar	Meraný rozmer	1. sada		2. sada	
			Priemerná hodnota meraného rozmeru (μm)	Smerodajná odchýlka	Priemerná hodnota meraného rozmeru (μm)	Smerodajná odchýlka
kruhové textúry	pór	C	21,795	0,959	12,169	1,980
	pretavenina	L	33,077	1,256	33,863	2,698
		A	6,923	0,628	6,349	1,296
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	B	5,385	0,628	5,820	0,748
oválne textúry	pór	C	7,408	0,749	26,357	2,900
	pretavenina	L	103,175	1,296	117,829	2,900
		A	11,111	1,296	25,581	1,899
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	B	4,233	0,748	9,302	1,899

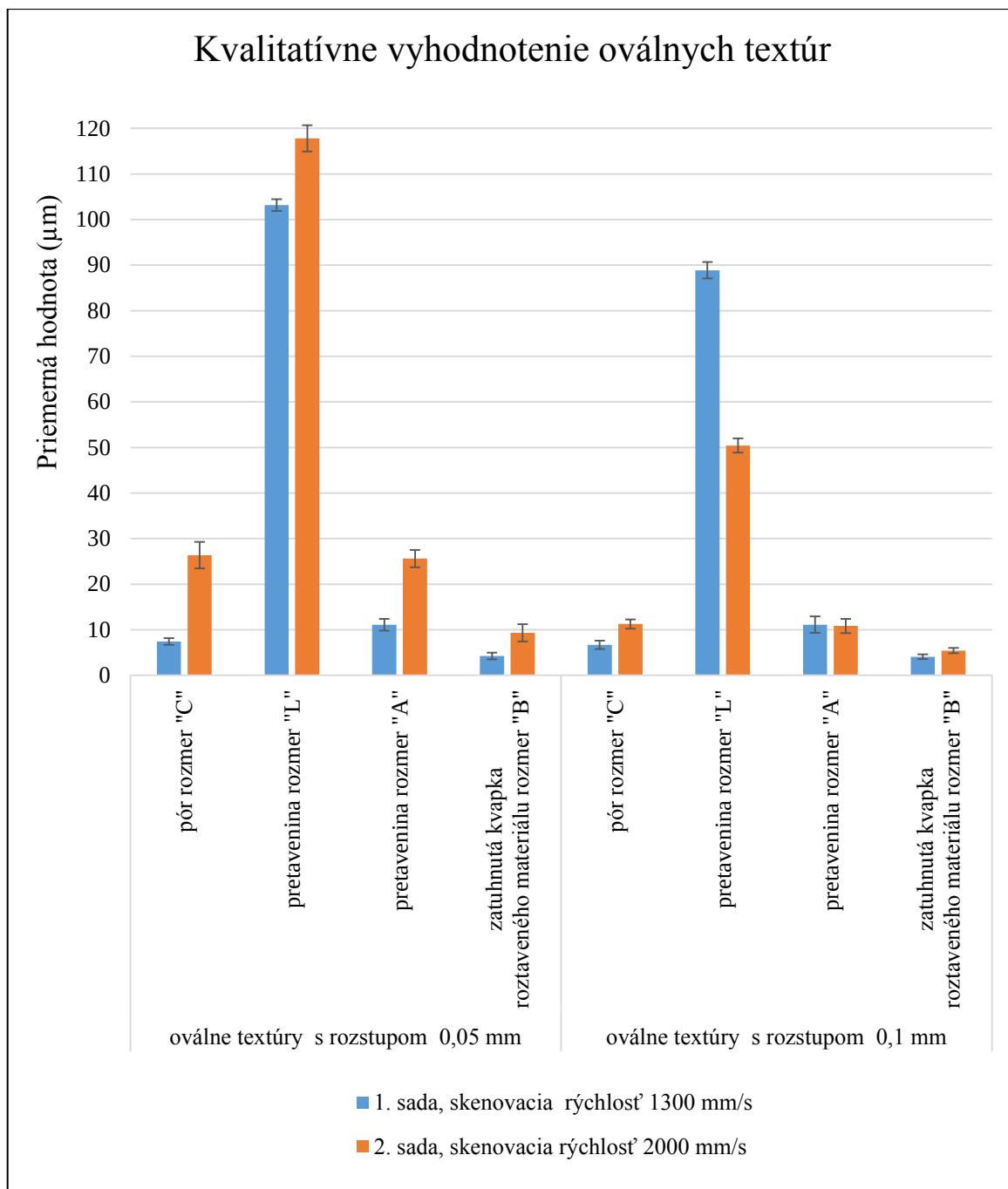
Tabuľka 8 Priemerné hodnoty nameraných rozmerov na meraných útvaroch s rozstupom 0,1 mm

Tvar textúry	Meraný útvar	Meraný rozmer	1. sada		2. sada	
			Priemerná hodnota meraného rozmeru (μm)	Smerodajná odchýlka	Priemerná hodnota meraného rozmeru (μm)	Smerodajná odchýlka
kruhové textúry	pór	C	16,154	0,628	13	0,816
	pretavenina	L	32,820	1,580	33,667	1,247
		A	10,513	0,959	7,667	0,943
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	B	3,846	0,628	4,333	0,471
oválne textúry	pór	C	6,667	0,907	11,250	1,021
	pretavenina	L	88,889	1,814	50,417	1,559
		A	11,111	1,814	10,833	1,559
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	B	4,074	0,524	5,417	0,589



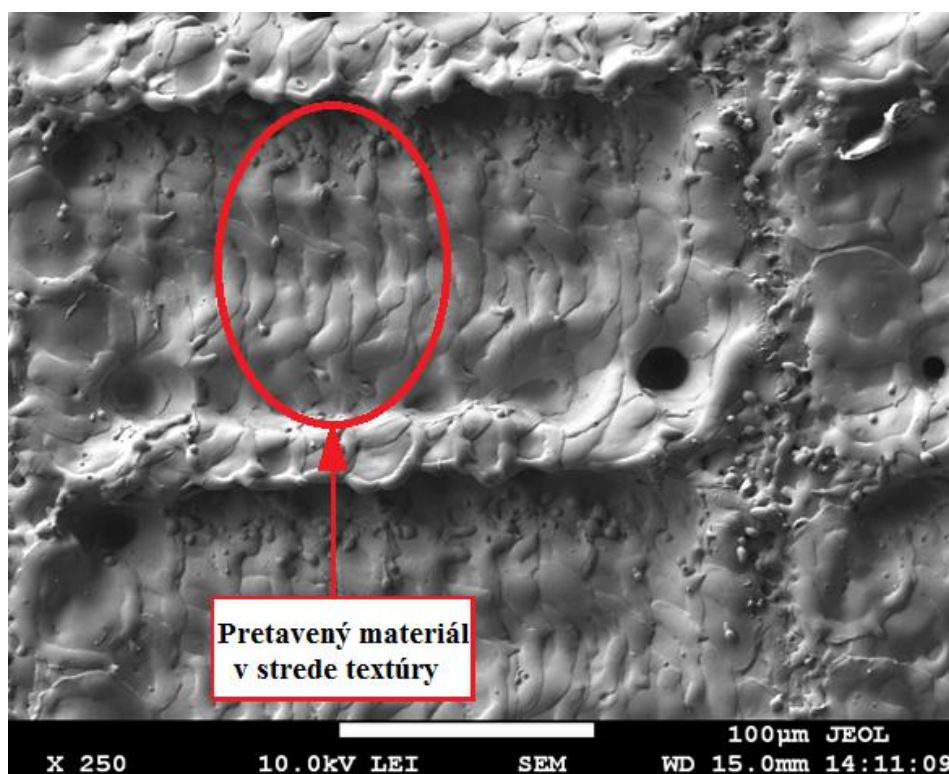
Obrázok 37 Kvalitatívne porovnávanie kruhových textúr

Z porovnávania kruhových textúr je vidieť, že vzniknutý pór v daných textúrach má väčšie rozmery pri prvej sade, ktorá je vyhotovená nižšou skenovacou rýchlosťou ako druhá sada. Pri druhej sade vznikajú kvapky zo zatuhnutého roztaveného materiálu s väčšími rozmermi ako pri prvej sade. Taktiež z porovnávania vyplýva, že pri prvej sade sa vytvárajú kratšie, ale širšie pretaveniny. V druhej sade textúr sa na rozdiel od prvej sady vytvárajú dlhšie a širšie pretaveniny.



Obrázok 38 Kvalitatívne vyhodnotenie oválnych textúr

Pri analyzovaní porovnávania oválnych textúr sa zistilo, že póry väčších rozmerov vznikajú pri sadách s vyššou skenovacou rýchlosťou, čiže pri druhej sade. Pri oválnych textúrach vznikajú rôzne pretaveniny, pretože v stredoch oválnych textúr sa nachádza väčšie množstvo pretaveného materiálu, ako na okrajoch daných textúr, čo je zobrazené na obr. 39. Podobne, ako u kruhových textúrach, tak aj u oválnych textúrach vznikajú kvapky zo zatuhnutého roztaveného materiálu s väčšími rozmermi v druhej sade, ktorá bola vyhotovená s väčšou skenovacou rýchlosťou.



Obrázok 39 Pretavený materiál v strede textúry pri 250-násobnom zväčšení

3.5 Zhrnutie

Z vyhodnocovania rozmerovej presnosti zhotovených textúr konfokálnou mikroskopiou sa zistilo, že rozstup textúr nemá zásadný vplyv na rozmerovú presnosť. Z nameraných údajov vyplýva, že ani jeden nameraný rozmer nezodpovedá menovitým požadovaným rozmerom, ale menšie odchýlky vznikli pri textúrach vyhotovených s menšou skenovacou rýchlosťou 1300 mm.s^{-1} . Z daného zistenia vyplýva, že skenovacia rýchlosť má zásadný vplyv na rozmerovú presnosť vyhotovených textúr. Vyhodnocovaním hĺbky oválnych textúr sa zistilo, že krajné polohy textúr sú svojou hodnotou hĺbky najbližšie k menovitej hodnote, pretože v strede daných textúr je zvyšný pretavený materiál. Analýzou výšok pretaveného materiálu sa prišlo k záveru, že priemerné hodnoty výšok pretaveného materiálu sú väčšie pri oválnych textúrach ako pri kruhových textúrach.

Kvalitatívna analýza prebiehala pomocou elektrónovej mikroskopie a analyzovaním textúr vyhotovených laserovým textúrovaním sa prišlo na to, že sa vytvárajú póry, pretaveniny, ale aj zatuhnuté kvapky roztaveného materiálu. Analýzou kruhových textúr sa zistilo, že vytvorené póry sú väčšie pri prvej sade, ktorá bola vyhotovená menšou skenovacou rýchlosťou ako druhá sada. Ale pri druhej sade vznikajú väčšie kvapky zo zatuhnutého roztaveného materiálu. Pri oválnych textúrach sú póry v porovnaní jednotlivých

sád väčšie v druhej sade. Taktiež, sa potvrdilo zistenie o väčšom množstve pretaveného materiálu v strede textúr, ktoré sa zistilo pri vyhodnocovaní rozmerovej presnosti. Na základe daného zistenia, sa odporúča, z dôvodu dosiahnutia navrhovaného rozmeru daným zariadením a súčasne pri daných parametroch, odoberať viac vrstiev. Rovnako, sa navrhuje pokračovať v experimente s nižšou skenovacou rýchlosťou, prípadne skenovaciu rýchlosť ešte znížiť.

ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo spracovať literárny prehľad o možnostiach modifikácií vlastností funkčných povrchov so zameraním na laserové textúrovanie povrchov materiálov s následnou analýzou tvarových a rozmerových prvkov mikrotextúr, ktoré boli vyhotovené technológiou laserového textúrovania na návare z materiálu SK STELKAY 6-G.

Diplomová práca sa venuje v prvej časti popisu možností modifikácií vlastností funkčných povrchov nástrojových materiálov. V tejto časti sa opisujú možnosti modifikácií metódami vyhotovenia povrchovej textúry od dolnej časti smerom nahor, čo sú napríklad mazivá, tepelné spracovanie, chemicko-tepelné spracovanie, ale aj povlakovanie, a taktiež sa opisujú možnosti modifikácií metódami vyhotovenia povrchovej textúry od hornej časti smerom nadol, čo sú napríklad honovanie, valčekovanie a laserové mikroobrábanie. Ďalšia časť diplomovej práce je venovaná procesu laserového mikroobrábania. V danej časti laserového textúrovania je opísaný princíp laserového textúrovania, metódy textúrovania, ako sú cez masku, priamo a cez perforovaný disk. Ďalej opisuje delenie a aplikácie laserového textúrovania, ale aj prehľad tvarov laserových textúr využitých v experimentoch. Posledná časť diplomovej práce je venovaná experimentálnej časti. Experimentálna časť pozostávala z výroby textúr na návare. Tento návar bol vyrobený v spoločnosti HKS Forge, spol. s r.o., Trnava. Na vytvorený návar sa vyhotovili textúry v laboratóriu Ústavu výrobných technológií MTF STU v Trnave, využitím 5-osového laserového obrábacieho stroja Lasertec 80 Shape. Vyhotovené textúry boli následne analyzované v laboratóriu Ústavu materiálov MTF STU v Trnave, s využitím laserového konfokálneho mikroskopu ZEISS LSM 700 a elektrónového mikroskopu JOEL JSM 7600F. Experimentom bolo zistené, že ani jeden nameraný rozmer nezodpovedal menovitému požadovanému rozmeru, ale menšie odchýlky vznikli pri textúrach vytvorených menšou skenovacou rýchlosťou. Ďalším zistením bolo, že v krajných polohách oválnych textúr sú hodnoty hĺbok najbližšie k menovitej hodnote, ale v strede textúr sa nachádza zvyšný pretavený materiál. Odporúča sa, z dôvodu dosiahnutia navrhovaného rozmeru daným zariadením a súčasne pri daných parametroch, odoberať viac vrstiev. Z analýzy výšok vyhrnutého materiálu sa dospelo k záveru, že priemerné hodnoty výšok vyhrnutého materiálu sú väčšie pri oválnych textúrach ako pri kruhových textúrach. Na základe celej analýzy sa odporúča v experimente pokračovať s nižšou skenovacou rýchlosťou, prípadne využiť ešte nižšiu skenovaciu rýchlosť, ako bola použitá pri prvej sade textúr.

Vytváranie textúr pomocou laseru sa v súčasnej dobe nepretržite vyvíja a je vykonávaných veľa výskumov na celom svete. Dôsledkom toho je poznatok, že laserové textúrovanie povrchov bude v praxi čoraz viac využívané.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

AHMED, T. K. M., GRAMBOW, C., KIETZIG, A.M., 2014. *Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining*. Montreal. ISSN 2072-666X

ALBAPRECISION. ©2007 [cit. 2020-11-17]. Dostupné na internete:
<https://www.albaprecision.sk/wp-content/uploads/2007/11/lepsie%20ako%20brusenie.pdf>

ÁBEL, M., OGURČÁKOVÁ, A. ©2003 [cit. 2020-11-9]. Dostupné na internete:
<https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/6-2003/pdf/95-97.pdf>

BLAŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M. 1990. *Tribológia*. Bratislava: Alfa. ISBN 80-05-00633-0

BRAJER, J., ŠVÁBEK, R., BAČIŠŤOVÁ, R., ZEMAN, P. ©2014 [cit. 2020-11-21]. Dostupné na internete: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/1694-navrh-a-optimalizace-laserovych-technologie>

BREMER, ©2020 [cit. 2020-10-30]. Dostupné na internete:
<https://www.bremer-willi.de/carbide-drawing-die-nibs.html>

BROWN, S. M., ARNOLD, B. C., 2010. Fundamentals of laser-material interaction and application to multiscale surface modification. In: K. SUGIOKA, M. MEUNEIER, A. PIQUÉ, eds., 2010. *Laser precision microfabrication*. New York: Springer. s. 91 – 120. ISBN 978-3-642-10522-7

BRUNETTE, D. M., TENGVALL, P., TEXTOR, M., THOMSEN, P., 2001. *Titanium in medicine: materials science, surface science, engineering, biological responses and medical applications*. New York: Springer. ISBN 978-3-642-56486-4

CERAMTEC, ©2019 [cit. 2020-10-27]. Dostupné na internete:
<https://www.ceramtec.com/competence/forming/>

CIGÁŇOVÁ, S. ©2019 [cit. 2020-10-21]. Dostupné na internete:
<https://www.vedanadosah.cvtisr.sk/zlepsenie-oteruvzdornosti-povrchu-nastrojovych-oceli>

CMFURNACES ©2015 [cit. 2020-10-30]. Dostupné na internete:
<https://www.cmfurnaces.com/metal-injection-molding-furnaces>

ČAPLOVIČ, Ľ. © 2010 [cit. 2021-4-18]. Dostupné na internete:
http://www.stuscientific.sk/data/MediaLibrary/101/Transfer_december_2010.pdf

ČEP, R., PETRŮ, J. ©2013 [cit. 2020-11-3]. Dostupné na internete:
http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_003/Technologie%20obr%C3%A1b%C4%Bn%C3%AD%20-%20v%C5%99%C3%ADkladech/03%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%20v%C5%99%C3%ADkladech%2001%20Mate ri%C3%A1ly%20C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF.pdf

ČILÍKOVÁ, M., PILC, J. a MÁDL, J. 2008. *Top trendy v obrábání, VI. část- procesné médiá*. Žilina: MEDIA/ST. ISBN 978-80-969789-3-9

DAHOTRE, N. B., HARIMKAR, S. P., 2008. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. New York: Springe science + Bussines media, ISBN 978-0-387-72343-3

DÁLIK, P., ©2009 [cit. 2020-11-10]. Dostupné na internete:
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42009/plasticke-maziva.html>

DELMDAHL, R., FECHNER, B. ©2010 [cit. 2020-11-25]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/225766225_Large-area_microprocessing_with_excimer_lasers

DEMIR, A. G., MARESSA, P., PREVITALI, B. ©2013 [cit. 2020-11-5]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/255729886_Fibre_Laser_Texturing_for_Surface_Functionalization

DMG MORI. ©2016 [cit. 2020-12-7]. Dostupné na internete:
<https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1547>

DUNN, A., CARSTENSEN, J. V., WLODARCZYK, K. L., HANSEN, E. B., GABZDYL, J., HARRISON, P. M., SHEPHARD, J. D., HAND, D. ©2014 [cit. 2020-11-30]. Dostupné na internete:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816614001262#f0065>

ETSION, I. ©2005 [cit. 2020-11-19]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/228343441_State_of_the_Art_in_Laser_Surface_Texturing

FANG, B., HUANG, CH., XU, CH., SUN, S. ©2008 [cit. 2020-10-26].
Dostupné na internete:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025608002474>

Ferona. ©2017 [cit. 2020-12-10].
Dostupné na internete:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025608002474>

GF. ©2018 [cit. 2020-11-19]. Dostupné na internete:
https://www.gfms.com/content/dam/gfac_country_US/WhitePapers/The%20Introduction%20of%20Laser%20Ablation%20for%20Surface%20Texturing.pdf

GoWELD. ©2019 [cit. 2020-1-14]. Dostupné na internete:
<https://eshop.goweld.sk/img/cms/GoWELD-BOHLER%20katalog%202019.pdf>

GRIMES, A. ©2017 [cit. 2020-11-21]. Dostupné na internete:
<https://www.permanentmarking.com/what-is-laser-texturing-and-what-are-its-applications/>

GUALTIERI, E., BORGHI, A., CALABRI, L., PUGNO, N., VALERI, S. ©2009 [cit. 2020-10-24]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X08002089>

GUALTIERI, E. ©2009 [cit. 2020-11-26]. Dostupné na internete: <http://www.nano-phdschool.unimore.it/site/home/phd-students/documento102017684.html>

HAVELKA, T. ©2004 [cit. 2020-11-17]. Dostupné na internete: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-valeckovanim.html>

HAZLINGER, M., MORAVČÍK, R. 2013. *Chemicko-tepelné spracovanie materiálov*. Bratislava: STU. ISBN 978-80-227-3924-5

HERRING, D. ©2015 [cit. 2020-11-12]. Dostupné na internete: <https://vacaero.com/information-resources/the-heat-treat-doctor/1252-vacuum-deposition-processes.html>

HRNČIAR, V. ©2006 [cit. 2020-10-24]. Dostupné na internete: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=161>

HUMÁR, A. 2008. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing. ISBN 978-80-254-2250-2

IBATAN, T., UDDIN, M.S., CHOWDHURY, M.A.K. ©2015 [cit. 2020-11-5]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897215003400#!>

IMEXIM. ©2018 [cit. 2020-11-17]. Dostupné na internete: <https://www.engineering.sk/clanky2/naradie-a-stroje/4373-valcekovacie-nastroje>

IŽDINSKÁ, Z., EMMER, Š., GONDÁR, E. 2006. *Strojárske materiály*. Bratislava: STU. ISBN 80-227-2488-2

JANÁČ, A., BÁTORA, B., BARANÉK, I., LIPA, Z. 2004. *Technológia obrábania*. Bratislava: STU. ISBN 80-227-2031-3

JURKO, J., ZAJAC, J., ČEP, R. 2006. *Top trendy v obrábání, II. část- Nástrojové materiály*. Žilina: MEDIA/ST. ISBN 80-968954-2-7

KAČMÁR, M. ©2014 [cit. 2020-11-11]. Dostupné na internete: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22014/vyroba-a-druhy-maziv.html>

KLUCHO, P. ©2016 [cit. 2020-10-27]. Dostupné na internete: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/tribologia-a-tribotechnika-pomaha-nasmu-hospodarstvu/>

LIPA, Z., JANÁČ, A. 2000. *Dokončovacie spôsoby obrábania*. Bratislava: STU. ISBN 80-227-1324-4

LU, P., WOOD, R., GEE, M., WANG, L., PFLEGING, W. ©2018 [cit. 2020-12-1]. Dostupné na internete:

https://www.researchgate.net/publication/322789542_A_Novel_Surface_Texture_Shape_or_Directional_Friction_Control

MACEK, K., JANOVEC, J., JURČI, P., ZUNA, P. 2006. *Kovové materiály*. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-03513-1

MANUFACTURINGGUIDE. ©2020 [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <https://www.manufacturingguide.com/en/mechanical-honing>

MicroscopeWorld. ©2020 [cit. 2020-12-7]. Dostupné na internete: <https://www.microscopeworld.com/p-1951-motic-smz-171-fled-stereo-zoom-esd-fixed-arm-microscopes.aspx>

MORAVČÍK, R., HAZLINGER, M., HUDÁKOVÁ, M., MARTINKOVIČ, M., ČIČKA, R. 2010. *Náuka o materiáloch I*. Trnava: AlumniPress. ISBN 978-80-8096-123-7

MORAVČÍK, R., HAZLINGER, M. 2009. *Náuka o materiáloch II*. Trnava: AlumniPress. ISBN 978-80-8096-081-0

MORAVČÍKOVÁ, J., MORAVČÍK, R., KUSÝ, M., NECPAL, M. ©2018 [cit. 2020-12-5]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/327357641_Influence_of_Laser_Surface_Texturing_on_Tribological_Performance_of_Tool_Steels

NOVOTNÝ, K. 1985. *Nástroje a přípravky. Část I – tváření*. Brno: Vysoké učení technické

OCTOPUS TOOLS. ©2017 [cit. 2020-11-18]. Dostupné na internete: <https://www.octopustools.sk/valcekovanie-valcekovaci-nastroje.php>

PECHÁČEK, F., CHARBULOVÁ, M., CHARBULA, J. 2008. *Rezné nástroje*. Trnava: AlumniPress. ISBN 978-80-8096-048-3

PÍŠKA, M., BUČKOVÁ, K. ©2018 [cit. 2020-11-3]. Dostupné na internete: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>

POLÁK, K., HRIVŇÁK, A. 1989. *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava: ALFA

ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V., 2001 In: *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, s. 155. ISBN 80-7183-227-8

RIZVI, N., APTE, P. ©2017 [cit. 2020-11-26]. Dostupné na internete: <https://www.lasermicromachining.com/wp-content/uploads/2017/02/Developments-in-Laser-Micromachining-Techniques.pdf>

RIZVI, N., MILNE, D., RUMSBY, P., GOWER, M. ©2017 [cit. 2020-11-25]. Dostupné na internete: <https://www.lasermicromachining.com/wp-content/uploads/2017/02/Laser-Micromachining-New-Development-and-Applications.pdf>

RUSNÁK, J., KADNÁR, M., KUČERA, M. 2012. *Výskum kľúčových parametrov klzných uložení mazaných ekologickými olejmi*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre. ISBN 978-80-552-0764-3

RŮŽIČKA, P. ©2014 [cit. 2020-11-11]. Dostupné na internete:
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22014/plasticka-maziva-s-prisadami-na-bazi-pevných-maziv-aplikace-a-tecnické-parametry.html>

SEGU, D.Z., CHOI, S.G., CHOI, J.H., KIM, S.S. ©2013 [cit. 2020-11-16]. Dostupné na internete:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433212022192#fig0005>

SCHAEFFER, R. D. ©2016 [cit. 2020-11-23]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/327185902_Fundamentals_of_Laser_Micromachining/stats

SCHMITT, R., MALLMANN, G., WINANDS, K., POTHEN, M. ©2012 [cit. 2020-11-23]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/233397853_Inline_Process_Metrology_System_for_the_Control_of_Laser_Surface_Structuring_Processes

SCHRECK, S., ZUM GAHR, K.-H. ©2005 [cit. 2020-11-30]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/233397853_Inline_Process_Metrology_System_for_the_Control_of_Laser_Surface_Structuring_Processes

SONDOR, J., BÉGER, M., KŘENEK, M. ©2013 [cit. 2020-11-14]. Dostupné na internete:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/pvd-povlaky-pro-tvareni-hlinikových-slitin-za-studena.html>

SONES, C., EASON, R., KATIS, I., HE, P. ©2020 [cit. 2020-11-26]. Dostupné na internete: <https://www.orc.soton.ac.uk/Laser-Direct-Write-Technologies>

STEEN, W. M., MAZUMDER, J., 2010. *Laser Material Processing*. London: Springer-Verlag. ISBN 978-1-84996-061-8

SZWAJKA, K., ZIELIŃSKA-SZWAJKA, J., TRZEPIECIŃSKI, T. ©2019. [cit. 2020-11-14]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/330709729_Experimental_study_on_drilling_MDF_with_tools_coated_with_TiAlN_and_ZrN

SUCHÁNEK, J. ©2012 [cit. 2020-11-12]. Dostupné na internete:
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32012/moznosti-zvyseni-zivotnosti-nastroju-pro-plosne-tvareni.html>

ŠTĚPINA, V., VESELÝ, V. 1985. *Maziva v tribologii*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied

ŠUGÁR, P., ŠUGÁROVÁ, J., FRNČÍK, M. ©2016. [cit. 2020-12-2]. Dostupné na internete:

https://www.researchgate.net/publication/303412000_Laser_surface_texturing_of_tool_steel_textured_surfaces_quality_evaluation

ŠUGÁROVÁ, J., ŠUGÁR, P., FRNČÍK, M. ©2017. [cit. 2020-11-6]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/317753840_Friction_Evaluation_of_Laser_Textured_Tool_Steel_Surfaces

ŠUGÁROVÁ, J., ŠUGÁR, P., FRNČÍK, M., NECPAL, M., MORAVČÍKOVÁ, J., KUSÝ, M. ©2018. [cit. 2020-11-6]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/324647853_The_Influence_of_the_Tool_Surface_Texture_on_Friction_and_the_Surface_Layers_Properties_of_Formed_Component

TANG, W., ZHOU, Y., ZHU, H., YANG, H. ©2013 [cit. 2020-11-21]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/257032965_The_effect_of_surface_texturing_on_reducing_the_friction_and_wear_of_steel_under_lubricated_sliding_contact

Tien Chen Diamond Industry ©2020 [cit. 2020-10-31]. Dostupné na internete: <https://diamond-dies.com/en/synthetic-diamond-dies>

TITTEL, V. 2010. *Steel wire production by cold drawing*. Koethen: Hochschule Anhalt. ISBN 978-3-86011-031-7

TrigoN TOOLS ©2020. [cit. 2020-11-18]. Dostupné na internete: <https://www.trigon.sk/produkty/nastroje/valcekovanie/>

VILHENA, L. M., SEDLÁČEK, M., PODGORNIK, B., VIŽINTIN, J., BABNIK, A., MOŽINA, J. ©2009. [cit. 2020-11-30]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X09001753#!>

ZÁBAVNÍK, V., BURŠÁK, M. 2009. *Materiál, tepelné spracovanie, kontrola kvality*. Košice: EMILENA. ISBN 978-80-553-0139-6

ZHOU, W., TAO, M., CHEN, L., YANG, H. ©2007. [cit. 2020-12-1]. Dostupné na internete: https://pdfs.semanticscholar.org/6244/d8fed3547925f792b2657de3395c935dfcfb.pdf?_ga=2.3719032.957465927.1606829184-338228998.1606829184

WAHAB, J. et al., 2015. *Laser surface texturing on ceramic coating*. Kuala Lumpur: Malaysian Tribology Society (MYTRIBOS), ISBN 978-967-13625-0-1

WANG, X., GIOVANNINI, M., XING, Y., KANG, Y., EHMAN, K. ©2015. [cit. 2020-11-17]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X15003333#f0010>

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Ja, dole podpísaný Denis Krajčovič čestne vyhlasujem, že som na diplomovej práci s témou Laserové modifikácie funkčných povrchov tvárniacich nástrojov pracoval samostatne, na základe poznatkov získaných pri konzultáciách s vedúcou práce, počas štúdia a informácií získaných z dostupnej literatúry uvedenej v zozname bibliografických odkazov.

Báhoň dňa 21.4.2021

Denis Krajčovič

Príloha A

1. sada, skenovacia rýchlosť $v = 1300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$			
Tvar textúry	Rozmer	Navrhovaný rozmer (mm)	Nameraný rozmer (mm)
kruh	priemer	0,100	0,092
	rozstup	0,050	0,060
	hĺbka	0,020	0,018
			0,017
			0,017
ovál	dĺžka	0,250	0,240
	šírka	0,100	0,095
	rozstup	0,050	0,051
	hĺbka	0,020	0,019
			0,018
			0,018
kruh	priemer	0,100	0,090
	rozstup	0,100	0,113
	hĺbka	0,020	0,018
			0,018
			0,019
ovál	dĺžka	0,250	0,225
	šírka	0,100	0,097
	rozstup	0,100	0,096
	hĺbka	0,020	0,017
			0,018
			0,018

2. sada, skenovacia rýchlosť $v = 2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$			
Tvar textúry	Rozmer	Navrhovaný rozmer (mm)	Nameraný rozmer (mm)
kruh	priemer	0,100	0,074
	rozstup	0,050	0,077
	hĺbka	0,020	0,014
			0,012
			0,013
ovál	dĺžka	0,250	0,223
	šírka	0,100	0,118
	rozstup	0,050	0,053
	hĺbka	0,020	0,010
			0,009
			0,009
kruh	priemer	0,100	0,082
	rozstup	0,100	0,126
	hĺbka	0,020	0,011
			0,010
			0,012
ovál	dĺžka	0,250	0,240
	šírka	0,100	0,131
	rozstup	0,100	0,113
	hĺbka	0,020	0,007
			0,008
			0,007

Príloha B

1. sada, skenovacia rýchlosť $v = 1300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$					
Tvar textúry	Rozstup útvarov (mm)	Meranie	Nameraná hodnota (mm)	Priemerná hodnota (mm)	Smerodajná odchýlka
kruh	0,050	1	0,008	0,0083	0,0005
	0,050	2	0,009		
	0,050	3	0,008		
ovál	0,050	1	0,018	0,019	0,0008
	0,050	2	0,020		
	0,050	3	0,019		
kruh	0,100	1	0,010	0,0093	0,0005
	0,100	2	0,009		
	0,100	3	0,009		
ovál	0,100	1	0,013	0,014	0,0008
	0,100	2	0,015		
	0,100	3	0,014		

2. sada, skenovacia rýchlosť $v = 2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$					
Tvar textúry	Rozstup útvarov (mm)	Meranie	Nameraná hodnota (mm)	Priemerná hodnota (mm)	Smerodajná odchýlka
kruh	0,050	1	0,007	0,0075	0,0004
	0,050	2	0,0075		
	0,050	3	0,008		
ovál	0,050	1	0,019	0,0173	0,0012
	0,050	2	0,017		
	0,050	3	0,016		
kruh	0,100	1	0,009	0,0088	0,0002
	0,100	2	0,009		
	0,100	3	0,0085		
ovál	0,100	1	0,015	0,0145	0,0004
	0,100	2	0,014		
	0,100	3	0,0145		

Príloha C

1. sada, skenovacia rýchlosť $v = 1300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, rozstup útvarov 0,05 mm						
Tvar textúry a rozstup útvarov	Meraný útvar	Meranie	Meraný rozmer	Nameraná hodnota (μm)	Priemerná hodnota (μm)	Smerodajná odchýlka
kruhovú textúru s rozstupom 0,05 mm	pór	1	C	21,538	21,795	0,959
		2	C	23,077		
		3	C	20,769		
	pretavenina	1	L	34,615	33,077	1,256
		2	L	31,538		
		3	L	33,077		
		1	A	7,692	6,923	0,628
		2	A	6,154		
		3	A	6,923		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	5,385	5,385	0,628
		2	B	4,615		
		3	B	6,154		
oválnu textúru s rozstupom 0,05 mm	pór	1	C	7,937	7,408	0,749
		2	C	6,349		
		3	C	7,937		
	pretavenina	1	L	103,175	103,175	1,296
		2	L	104,762		
		3	L	101,587		
		1	A	11,111	11,111	1,296
		2	A	9,524		
		3	A	12,698		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	4,762	4,233	0,748
		2	B	4,762		
		3	B	3,175		

1. sada, skenovacia rýchlosť $v = 1300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, rozstup útvarov 0,1 mm						
Tvar textúry a rozstup útvarov	Meraný útvar	Meranie	Meraný rozmer	Nameraná hodnota (μm)	Priemerná hodnota (μm)	Smerodajná odchýlka
kruhové textúry s rozstupom 0,1 mm	pór	1	C	16,923	16,154	0,628
		2	C	15,385		
		3	C	16,154		
	pretavenina	1	L	30,770	32,820	1,580
		2	L	33,076		
		3	L	34,615		
		1	A	9,231	10,513	0,959
		2	A	10,769		
		3	A	11,538		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	3,846	3,846	0,628
		2	B	3,077		
		3	B	4,615		
oválne textúry s rozstupom 0,1 mm	pór	1	C	7,778	6,667	0,907
		2	C	5,556		
		3	C	6,667		
	pretavenina	1	L	86,667	88,889	1,814
		2	L	88,889		
		3	L	91,111		
		1	A	13,333	11,111	1,814
		2	A	11,111		
		3	A	8,889		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	4,444	4,074	0,524
		2	B	3,333		
		3	B	4,444		

2. sada, skenovacia rýchlosť $v = 2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, rozstup útvarov 0,05 mm						
Tvar textúry a rozstup útvarov	Meraný útvar	Meranie	Meraný rozmer	Nameraná hodnota (μm)	Priemerná hodnota (μm)	Smerodajná odchýlka
kruhovú textúru s rozstupom 0,05 mm	pór	1	C	14,286	12,169	1,980
		2	C	12,698		
		3	C	9,524		
	pretavenina	1	L	34,921	33,863	2,698
		2	L	30,159		
		3	L	36,508		
		1	A	4,762	6,349	1,296
		2	A	7,937		
		3	A	6,349		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	6,349	5,820	0,748
		2	B	4,762		
		3	B	6,349		
oválnu textúru s rozstupom 0,05 mm	pór	1	C	30,233	26,357	2,900
		2	C	23,256		
		3	C	25,581		
	pretavenina	1	L	118,605	117,829	2,900
		2	L	113,953		
		3	L	120,930		
		1	A	23,256	25,581	1,899
		2	A	25,581		
		3	A	27,907		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	9,302	9,302	1,899
		2	B	11,628		
		3	B	6,977		

2. sada, skenovacia rýchlosť $v = 2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, rozstup útvarov 0,1 mm						
Tvar textúry a rozstup útvarov	Meraný útvar	Meranie	Meraný rozmer	Nameraná hodnota (μm)	Priemerná hodnota (μm)	Smerodajná odchýlka
kruhovú textúru s rozstupom 0,1 mm	pór	1	C	13	13	0,816
		2	C	12		
		3	C	14		
	pretavenina	1	L	34	33,667	1,247
		2	L	32		
		3	L	35		
		1	A	7	7,667	0,943
		2	A	7		
		3	A	9		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	4	4,333	0,471
		2	B	4		
		3	B	5		
oválne textúry s rozstupom 0,1 mm	pór	1	C	12,5	11,250	1,021
		2	C	10		
		3	C	11,25		
	pretavenina	1	L	52,5	50,417	1,559
		2	L	50		
		3	L	48,75		
		1	A	12,5	10,833	1,559
		2	A	8,75		
		3	A	11,25		
	zatuhnutá kvapka roztaveného materiálu	1	B	5	5,417	0,589
		2	B	5		
		3	B	6,25		