

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti úpravy břitu řezného nástroje pomocí LASERU

Autor: **Bc. Adam ČERMÁK**
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**
Konzultant práce: **Ing. Pavel KOŽMÍN, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Nejprve bych chtěl především poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za vedení, podporu a důležité připomínky během tvorby této práce. Další velké díky patří Ing. Pavlu Kožmínovi, Ph.D., který mi během zpracování DP pomáhal s řešením vzniklých problémů.

Další poděkování patří: Ing. Šrachtovi, Ing. Hrabětovi a Ing. Roudovi za jejich ochotu, spolupráci a případnou pomoc při tvorbě této DP.

Řešení této DP mi přineslo mnoho zajímavých možností spolupráce, např. formou zahraniční stáže u firmy Alicona, kde jsem mohl řešit a konzultovat korektnost svých naměřených výsledků s předními odborníky na problematiku bezdotykového měření. Proto bych chtěl poděkovat Ing. Benešovi, Ph.D.; Ing. Mrázovi, Ph.D.; Ing. Kožmínovi, Ph.D.; Ing. Syrovátkovi; Ing. Česákové za koordinaci a vedení firmy Alicona za přijetí a realizaci této odborné zahraniční stáže na jejich pracovišti.

V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům za jejich podporu a za to, že mi finančně umožnili studovat na fakultě strojní.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Čermák	Jméno Adam	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	BAKALÁŘSKÁ	DIPLOMOVÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti úpravy bříty řezného nástroje pomocí LASERU		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	85	TEXTOVÁ ČÁST	79	GRAFICKÁ ČÁST	6
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem diplomové práce je metodika obrábění makro-geometrických prvků na VBD pomocí nízkonákladového pulzního pevnolátkového laseru (Nd:YAG) s nanosekundovou délkou pulzu. Obsah práce především zahrnuje kapitoly s nastavením procesních parametrů a metodiku polohování geometrických entit. Cílem této práce je experimentální upravení VBD z PKD a SK pomocí laseru. Práce je doplněna o technicko-ekonomické zhodnocení, které řeší nákladovost při změně procesních parametrů.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>laserové obrábění, Nd:YAG, utvařec třisek, SCAPS, nanosekundový pulzní laser</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Čermák	Name Adam	
FIELD OF STUDY	2303T004 „Department of Machining Technology”		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	BACHELOR	DIPLOMA	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The possibilities of edge preparation of cutting tool using a LASER		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	85	TEXT PART	79	GRAPHICAL PART	6
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The aim of diploma thesis is methodology of cutting of macro-geometric elements on indexable cutting inserts by low-cost nanosecond pulsed solid-state (Nd:YAG) laser. Content of thesis mainly contains chapters with process parameters settings and methodology of geometrical entity positioning. The aim of this thesis is experimental laser preparation of indexable cutting inserts, which are made of PDC and sintered carbide. There is a technical-economical assessment in thesis, which solves costs during the change of process parameters.</p>
KEY WORDS	laser machining, Nd:YAG, chip breaker, SCAPS, nanosecond pulsed laser

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	9
1 Úvod	11
1.1 Cíle práce	11
1.2 Mikroobrábění pomocí laseru	12
1.2.1 Princip laseru	12
1.2.2 Druhy laserů	13
1.3 Výhody a nevýhody nasazení laserů v mikroobrábění	13
1.3.1 Výhody nasazení laserů v mikroobrábění	13
1.3.2 Nevýhody nasazení laserů v mikroobrábění.....	14
2 Analýza současného stavu.....	15
2.1 Charakteristika laseru pro mikroobrábění.....	15
2.1.1 Absorpce laserového paprsku.....	15
2.1.2 Délka pulsu laseru	17
2.1.3 Tepelně ovlivněná oblast.....	19
2.2 Laserová obráběcí centra v současnosti.....	21
2.2.1 Laser Pluss - RayCutter®	21
2.2.2 Ewag AG - Laser line	22
2.2.3 DMG/MoriSeiki - LASERTEC 20/40/50 PrecisionTool	23
2.2.4 Coherent - AethonSystem	25
2.3 Řezné materiály obráběné laserem	27
2.4 Možnosti úprav geometrie řezného břitu laserem.....	29
2.4.1 Standardizované úpravy	30
2.4.2 Nestandardizované úpravy	31
3 Vlastní návrh řešení	35
3.1 Charakteristika použitého laserového zařízení	35
3.2 Kalibrace optiky.....	35
3.3 Metodika mikroobrábění v 3D modulu	36
3.3.1 Nastavení 3D modulu	36
3.3.2 Nastavení ohniskové vzdálenosti.....	36
3.3.3 Import geometrické entity	38
3.3.4 Posun obrysu geometrické entity ve 3D modulu SCAPS	39
3.3.5 Nastavení vrstev	41
3.3.6 Nastavení procesu mikroobrábění	44
3.4 Charakteristika mikroobráběných materiálů.....	45

3.5	Nastavení parametrů laseru.....	46
3.5.1	Tvarová přesnost	46
3.5.2	Nastavení procesních parametrů pro dosažení tvarové přesnosti.....	48
3.5.3	Nastavení frekvence pulzu f_p pro dosažení drsnosti povrchu	53
3.5.4	Vliv parametru výkonu P na drsnost a hloubku	55
3.6	Polohování geometrických entit na břitech nástrojů.....	56
3.6.1	Polohovací přípravek.....	57
3.6.2	Model VBD s pomocnými prvky a jejich použití.....	58
3.7	Cyklus procesů úpravy bříty nástroje	60
4	Realizace experimentu a jeho vyhodnocení.....	62
4.1	Experiment č. 1	63
4.2	Experiment č. 2	67
4.3	Experiment č. 3	68
5	Technicko-ekonomické zhodnocení	72
6	Závěr	74
	Literatura	76
	Seznam příloh	79

Seznam zkratk a symbolů

Zkratky	Popis
ŘK	řezná keramika
CBN	kubický nitrid bóru
PKD	polykrystalický diamant
Nd:YAG	vláknový laser dopovaný Ytterbiem
VBD	vyměnitelná břitová destička
CW	continuous wave - kontinuální pracovní režim vln
CNC	computer numeric control
HAZ	heat affected zone - tepelně ovlivněná oblast
CAD	computer aided design
CAM	computer aided manufacturing
*.dxf	drawing exchange format
*.igs	initial graphics exchange specification
HSK	označení pro upínací kužel
CCD kamera	charge coupled device - zařízení s vázanými náboji
*.stl	stereolithography; standard tessellation language
SK	slinutý karbid
LED	light-emitting diode - dioda emitující světlo
LAO	Lasery a Optika
WC	karbid wolframu
PLC	programmable logic controller - programovatelný logický automat
*.cli	command-line interface
GRP	glass reinforced plastic - vyztužený plast skleněným vláknem
IFM G4	infinite focus measurement G4

Symbole a značky	Jednotky	Popis
R_a	[μm]	aritmetická střední hodnota profilové drsnosti
R_z	[μm]	maximální profilová drsnost
λ	[nm]	vlnová délka
P	[W]	výkon
f_p	[kHz]	frekvence pulzů
f	[mm]	ohnisková vzdálenost
T	[K]	teplota
a_p	[mm]	axiální hloubka řezu
f_n	[mm/ot.]	posuv na otáčku
h	[mm; μm]	hloubka
D	[mm]	průměr
α	[°]	úhel hřbetu
r_ϵ	[mm]	rádus ostří
ρ	[g/mm ³]	hustota
v_f	[mm/s]	rychlost rozmítání paprsku skenovací hlavy
Slice	[mm]	tloušťka jedné vrstvy
$L_{vf/fp}$	[μm]	velikost ablace materiálu v 1 vrstvě závislé na v_f a f_p
t	[min]	čas
U	[mm ³ /min]	úběr materiálu za jednotku času
S	[-]	počet vrstev v modelu
I	[GW/cm ²]	výkon laseru na jednotku plochy
I_{ea}	[GW/cm ²]	prahová hodnota intenzity laserového paprsku
$h_{jm.}$	[mm]	jmenovitá hloubka
N	[Kč/0,01mm ³]	náklady na ablaci $V=0,01\text{mm}^3$

1 Úvod

Tato práce vznikla na základě zvyšujících se požadavků na řezné nástroje. Mezi dlouhodobé potřeby průmyslové praxe patří zvyšování trvanlivosti nástrojů, minimalizování konečného počtu výrobních operací na obrobek, používání nových řezných strategií, které vedou ke zvýšení produktivity obrábění a zlepšení výsledné kvality povrchu obrobků. V případě zvýšení trvanlivosti nástroje lze sáhnout po progresivnějších řezných materiálech (ŘK, CBN či PKD), které umožní několikanásobně zvýšit trvanlivost nástroje v řezném procesu. Výběr supertvrdeho řezného materiálu vždy nemůže zajistit druhý zmíněný trend, protože výrobní technologie těchto výjimečných řezných materiálu neumožňuje zpracování makrogeometrických prvků, mezi které se řadí např. utvařeče třísek či fasetky.

1.1 Cíle práce

Cílem této práce bylo aplikování nekonvenční technologie na úpravy břítu řezného nástroje laserovým paprskem pomocí zařízení *LAO - Shine Fiber 20W*. Jako laserový zdroj byl použit nízkonákladový pulzní pevnolátkový laser (Nd:YAG) o vlnové délce 1064nm a s nanosekundovou délkou pulzu, který se v praxi převážně používá k popisování a značení výrobků. Na tomto zařízení bylo hlavním přínosem vytvořit metodiku obrábění makrogeometrických prvků na VBD, jak ze supertvrdých řezných materiálů, které nejsou snadno obrobitelné žádnou konvenční technologií, tak i tvorbu prototypových utvařečů třísek a ostatních tvarových prvků ve slinutém karbidu.

Obsah této práce zahrnuje správné nastavení softwaru laserového zařízení, vyšetření vzájemných vztahů všech procesních parametrů ovlivňující výstupní kvalitu laserového svazku a metodiku polohování geometrických entit na břitech nástrojů. Požadavky na zmíněné laserové zařízení pro úpravy makrogeometrických entit jsou následující:

- průměrná odchylka od ideálního tvaru vytvořeného geometrického útvaru na břítu nástroje by neměla být vyšší než $5\mu\text{m}$
- požadovaná kvalita laserem dosaženého obrobeného povrchu geometrického útvaru by měla být v rozmezí $R_a=(0,2-1)\mu\text{m}$; $R_z=(1-5)\mu\text{m}$
- přesnost opakovatelné polohy geometrické entity na břítu nástroje by neměla přesáhnout $10\mu\text{m}$

V případě nesplnění požadavků nízkonákladového laserového zařízení by v závěrečné kapitole měla figurovat charakteristika laserového zařízení, která by výše uvedeným požadavkům dostála.

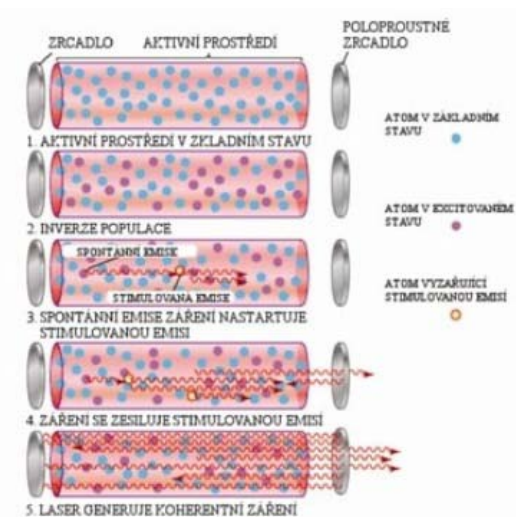
1.2 Mikroobrábění pomocí laseru

Laserový paprsek je jedinečný svým charakterem. Paprsek je kolimovaný (nerozbíhá se), monochromatický (generované fotony mají stejnou frekvenci, resp. vlnovou délku) a koherentní (fotony jsou tzv. ve fázi jak časové, tak prostorové). To jsou vlastnosti, kvůli kterým lze fokusovat laserový paprsek do malého bodu a dosáhnout tak vysoké plošné hustoty energie, která je potřebná k mikroobrobení daného materiálu [5].

1.2.1 Princip laseru

Princip vychází ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky. Základem laseru je aktivní prostředí, které je nějakým způsobem buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzením je dodávána energie do laseru, která je potom právě pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. K tomu je zapotřebí ještě vytvořit tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly [5].

Aktivní prostředí vždy obsahuje „element“, který se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Tímto elementem je nejčastěji atom. Pro tuto chvíli je důležité, že při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu tento element vyzáří foton (kvantum elektromagnetického záření). Tento zářivý přechod se děje spontánně sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižší energií – ve stavu termodynamické rovnováhy. Právě díky buzení



Obrázek 1-1 Princip laseru [5]

tento stav porušíme a převedeme aktivní prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina našich elementů ve stavu s vyšší energií (tento stav se nazývá inverze populace). Teprve v tuto chvíli můžeme energii dodanou aktivnímu prostředí přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise. Jedná se v podstatě o lavinovitý efekt, kdy nám foton dopadající na excitovaný atom způsobí (stimuluje) jeho přechod z horní na dolní energetickou hladinu a přitom dojde k emisi dalšího fotonu. Jak fotony putují rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet rapidně narůstá a dochází k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů - svazek laseru (Obrázek 1-1) [5].

1.2.2 Druhy laserů

Laserová zařízení lze dělit podle několika hledisek: typ aktivního prostředí, velikosti vlnové délky, délky pulzu, typu buzení, typu výstupního svazku či výstupního výkonu. Níže je uvedeno pouze základní dělení laserů. Užšímu a konkrétnějšímu rozdělení laserů pro mikroobrábění se věnuje následující kapitola 2.

1.2.2.1 Rozdělení dle typu aktivního prostředí [6], [7]

- Plynové (He-Ne, CO₂, excimerové lasery - ArF, KrF, XeCl, XeF)
- Pevnolátkové (Nd:YAG laser, diskový laser, vláknový laser, diodový laser)
- Chemické

1.2.2.2 Rozdělení dle typu pracovního režimu[6]

- kontinuální (CW)
- pulzní

1.3 Výhody a nevýhody nasazení laserů v mikroobrábění

Rozbor výhod a nevýhod laserového mikroobrábění umožňuje uživateli identifikovat vhodné aplikační oblasti. Tato část poskytuje přehled o silných stránkách použití laseru, tak i upozorňuje na některé problémy, které jsou s ním spojené.

1.3.1 Výhody nasazení laserů v mikroobrábění [8]

- Snadná integrace v CNC strojích - možnost kombinace s více-osým polohovacím systémem, kde se může podporovat široký rozsah aplikací s vysokou přesností. Nevyžaduje komplexní kinematiku nástroj-obrobek, proto lze snadno začlenit do kontrolního systému.
- Bezkontaktní obrábění - mezi laserovým paprskem a obrobkem nedochází k žádným mechanickým interakcím, proto se tu nevyskytuje žádné opotřebení nástroje. To poskytuje vysokou rozměrovou přesnost, opakovatelnost a také eliminuje potřebu výměny nástrojů.
- Zpracování široké škály materiálů - mikroobrábění je použitelné na jakékoliv materiály, absorbující záření ve spektru, které pokrývá laserový zdroj svou vlnovou délkou.
- Obrábění složitých prvků - průměr laserového svazku může mít velikost v řádech desítek mikrometrů. To umožňuje obrábění jemných detailů a velmi malých vnitřních rádiusů.

- Schopnost miniaturizace - mikro-vrtání pro elektroniku, mikro-čochky pro optické odvětví. Ablace přesných induktorů a mikro-ovladačů, či výroba mikro-chirurgických nástrojů.
- Zanedbatelné řezné síly a jednoduché upnutí obrobku - z těchto důvodů nedochází během mikroobrábění k elastickým deformacím obrobku. To vede k dalším redukcím chyb vzniklé při mikroobrábění. Jednoduché přípravky značně snižují náklady na pomocnou výbavu.

1.3.2 Nevýhody nasazení laserů v mikroobrábění [8]

- Nízká energetická účinnost - energetické ztráty jsou spojovány s nízkou účinností laserů (až 80%). Navzdory tomu jsou provozní náklady pro mikroobrábění stále nízké.
- Dlouhé časy - malá tloušťka odebíraných vrstev (jednotky μm) spolu s malým průměrem fokusovaného paprsku tvoří celý cyklus mikroobrábění velmi pomalým, i když je skenovací rychlost paprsku značně vysoká. Čas operace značně roste se zvětšujícím se odebíraným objemem materiálu.
- Vysoký počet procesních parametrů - při mikroobrábění musí být kontrolováno mnoho parametrů, u kterých ještě nejsou plně prozkoumány vzájemné závislosti a další vlivy.
- Tepelně ovlivněná oblast(dále jen HAZ)- k hlavnímu mechanismu mikroobrábění patří absorpce energie, která vede k přenosu tepla a k fázovým změnám materiálu. HAZ je ovlivněná tepelnou vodivostí materiálu a daným pulzním režimem laserového zdroje. HAZ má negativní vliv na materiálové vlastnosti (zbytkové napětí, tvorba mikrotrhlin).
- Přetavení - přetavené vrstvy vznikají následkem znovu ztuhlého roztaveného materiálu. Vrstvy znovu ztuhlých oxidů lze během mikroobrábění pozorovat v dutinách a na jejich hranicích. Odstranění této přetavené vrstvy vyžaduje další dokončení.
- Úkosy - po mikroobrábění laserem dochází u ideálních svislých stěn k úkosům. Vyplyvá to z několika faktorů, které se vyskytují současně. Úkosy na svislých stěnách vznikají zejména v důsledku snížené intenzity v oblastech, které jsou vzdáleny od optické osy. Dále se jedná o difrakci způsobenou stěnami a tepelnou vodivostí mezi stěnou a dnem obrobku.
- Drsnost povrchu - vzhledem k charakteru úběru materiálu, kde je princip založen na jednotlivě překrytých pulsech. Vznikne vždy specifický vzor výsledného povrchu. Ačkoliv je možné použít leštění laserem, výsledný povrch se zlepší maximálně o 30%.

2 Analýza současného stavu

Jak již bylo nastíněno v předešlé kapitole (1.3), lze lasery rozdělit dle typu výstupního svazku na kontinuální a pulzní. Kontinuální (dále jen CW) laser generuje souvislý výstupní výkon (v průmyslu se využívá zejména pro řezání a kalení), pulzní naopak generuje laserové pulzy. V průmyslu je nejčastěji používáno tzv. Q-spínání, kdy laser generuje pulzy s délkou v řádu ns (zejména pro značení, gravírování) nebo pomocí pulzního buzení (např. výbojkami) s pulzy v řádech ms (pro laserové svařování). Speciální třídou jsou pak tzv. ultrarychlé lasery, které generují pulzy v řádech ps a fs, jež nejsou v průmyslu zatím příliš rozšířeny kvůli jejich ceně, nicméně jsou do budoucna ideální pro mikroobráběcí aplikace [5].

Následující podkapitola je již vyhrazena charakteristice ns a ps pulzních laserů, která zkoumá vhodnost a difference délky pulzů pro mikroobráběcí operace. Porovnání těchto 2 pulzů slouží k určení vhodnosti ns pulzu pro mikroobráběcí procesy.

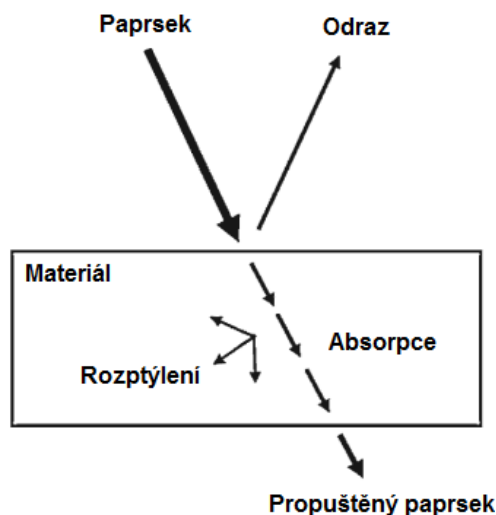
2.1 Charakteristika laseru pro mikroobrábění

Dosažení maximální přesnosti laserovým zpracováním vyžaduje výběr laserového zdroje se správnými výstupními parametry. Mikroobrábění laserem (neboli ablace materiálu) je výsledkem interakce laserového paprsku s obráběným materiálem. Faktory a vlivy, které ovlivňují mikroobrábění laserem, jsou popsány v následujících 3 podkapitolách.

2.1.1 Absorpce laserového paprsku

2.1.1.1 Obecná rovina [9,10, 23]

Mezi laserovým zářením a materiálem existují 3 typy interakce: záření může být odraženo, propouštěno skrz materiál nebo absorbováno. Ve skutečnosti se všechny typy vyskytují v určité míře. Aby bylo mikroobrábění umožněno, tak materiál musí přijímané záření absorbovat. Zbylé 2 typy (odraz a propouštění záření) představují energii, která spadá do ztrát během mikroobrábění (Obr. 2-1).



Obrázek 2-1 Laserové záření a interakce s materiálem [23]

Nejdůležitějším parametrem ovlivňující zpracování materiálu je vlnová délka použitého světla (záření). Různé materiály pohlcují záření v různých částech elektromagnetického spektra, proto je zde nutný správný výběr vlnové délky laseru, aby mohla nastat absorpce fotonů. Laserová ablace nastává pouze na vlnové délce, která je silně absorpční pro konkrétní materiál. Obecně platí, že vyšší absorpční účinnost vede k větší efektivitě (úběrům) mikroobrábění.

Existuje několik možností, jak zvýšit absorpci laserového paprsku. Mezi tyto způsoby patří vytvoření vhodné povrchové úpravy před mikroobráběním (zdrsňení povrchového reliéfu) nebo použití vhodného způsobu povlakování (platí zejména pro leštěné povrchy). Těmito způsoby je redukována odrazivost záření.

Další možností je zvýšení absorpce prostřednictvím změny vlnové délky, která je umožněna pomocí optických konverzních technik, ale tato volba vyžaduje nemalé vstupní náklady na nový laserový zdroj. Touto cestou lze mít dvojnásobek, trojnásobek či čtyřnásobek základní emisní frekvence, čímž se získá vyšší harmonická vlnová délka ($\lambda = 532, 355, \text{ resp. } 266\text{nm}$). S vyšší harmonickou třídou (nižší λ) lze mikroobrobit větší škálu materiálů. O významnosti absorpce laserového záření pro řezné materiály pojednává kapitola 2.3, která se věnuje důležitým faktorům a závislostem.

2.1.1.2 Princip [9]

Během interakce laserového záření a materiálu jsou elektrony v objemu materiálu excitovány (atomy mají energii na úrovni vyšší energetické hladiny) fotony laseru. V důsledku toho je

elektronový subsystém zahříván na vysokou teplotu a absorbovaná energie přestupuje do atomové mřížky.

Ztráty energie jsou způsobeny tepelným přechodem přes elektrony do objemu materiálu. Podle klasické lineární teorie, která popisuje absorpci záření Beer-Lambertovým zákonem, se uvádí, že absorpce konkrétní vlnové délky záření šířící se skrz materiál je funkcí délky dráhy materiálu a je nezávislá na dopadající intenzitě. Pro velmi vysoké intenzity, které mohou být dosaženy laserovým zpracováním, probíhá nelineární jev a způsobuje vyšší absorpční energie. Podle lineárního absorpčního modelu jsou elektrony excitovány fotony a tepelná energie přestoupí do mřížky, kde způsobí tavení či vypařování. V případě extrémních intenzit energie jako je ablace při ultrakrátkých délkách pulzu, se dá mluvit o studené ablací, protože vazby elektronů zpracovávaného materiálu jsou přímo odpařeny.

2.1.2 Délka pulsu laseru [6, 8, 9]

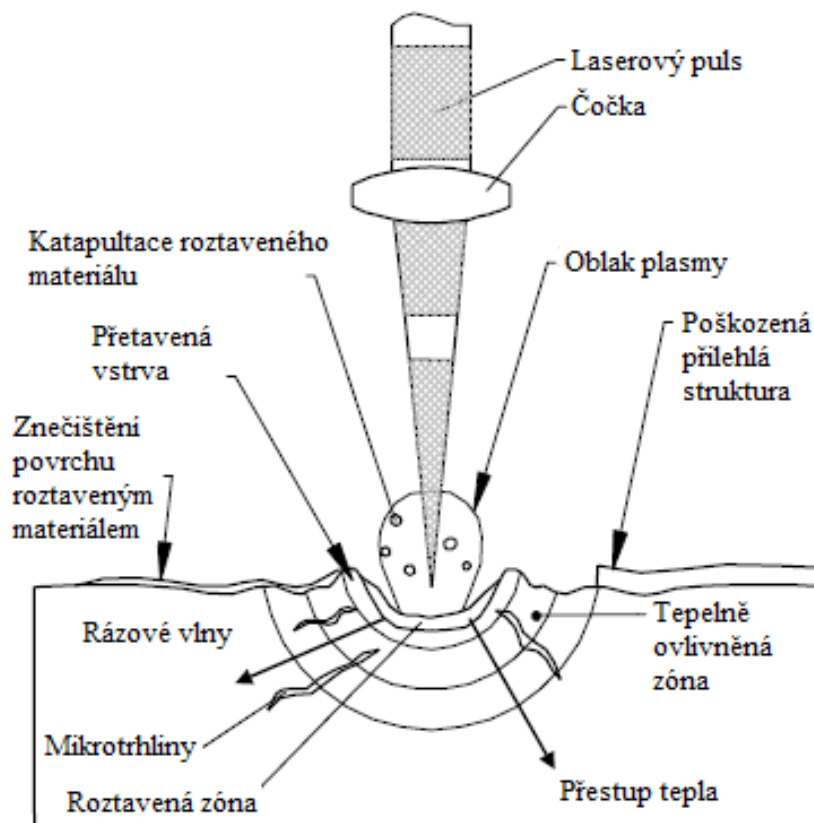
Další vlivnou charakteristikou interakce laser-obrobek je délka pulsu. Sem patří dva hlavní faktory, kterými jsou délka pulsu a doba tepelné difúze. Obecně platí to, že při určitém množství energie se současně kratší délkou pulzu bude v místě dopadu paprsku dodán vyšší špičkový výkon. U většiny materiálů to umožňuje mikroobráběcí operace pouze několika jednotkami wattů výkonu.

Po aplikaci laserového paprsku nezůstává tepelná energie lokalizována v místě, kam byla původně zaměřena, ale teplo se šíří (difunduje) materiálem dál. Čas tepelné difúze je doba, která je potřebná pro rozptyl daného množství energie do okolního materiálu a pro každý materiál je tento čas specifický. V závislosti na čase tepelné difúze materiálu se doba laserového impulsu dělí do dvou časových režimů: dlouhé (μs a ns pulzy) a ultrarychlé (ps a fs pulzy). Dlouhé pulzní lasery jsou lasery s dobou trvání pulzu déle než 10ps. V současnosti se jedná o nejpoužívanější komerční lasery v průmyslu. Ultrarychlé (ultrakrátké) lasery mají impulsy kratší než 10ps. Obvykle se jedná o femtosekundové lasery.

Teplo vnesené do substrátu při dlouhém pulzním režimu (Obrázek 2-2) difunduje do okolí. Toto má nepříznivý vliv na kvalitu mikroobrábění, protože tepelná difúze snižuje účinnost laserového zpracování, kvůli odvodu energie z pracovního místa - energie, která by jinak byla použita na odstraňování (mikroobrábění) materiálu. V důsledku toho se teplota v zaostřeném bodě (v ohnisku) nedostane potřebně vysoko nad bod tání obráběného materiálu. Protože nenastane odpařování materiálu, tak se materiál pouze taví. Roztavený materiál je pak dále

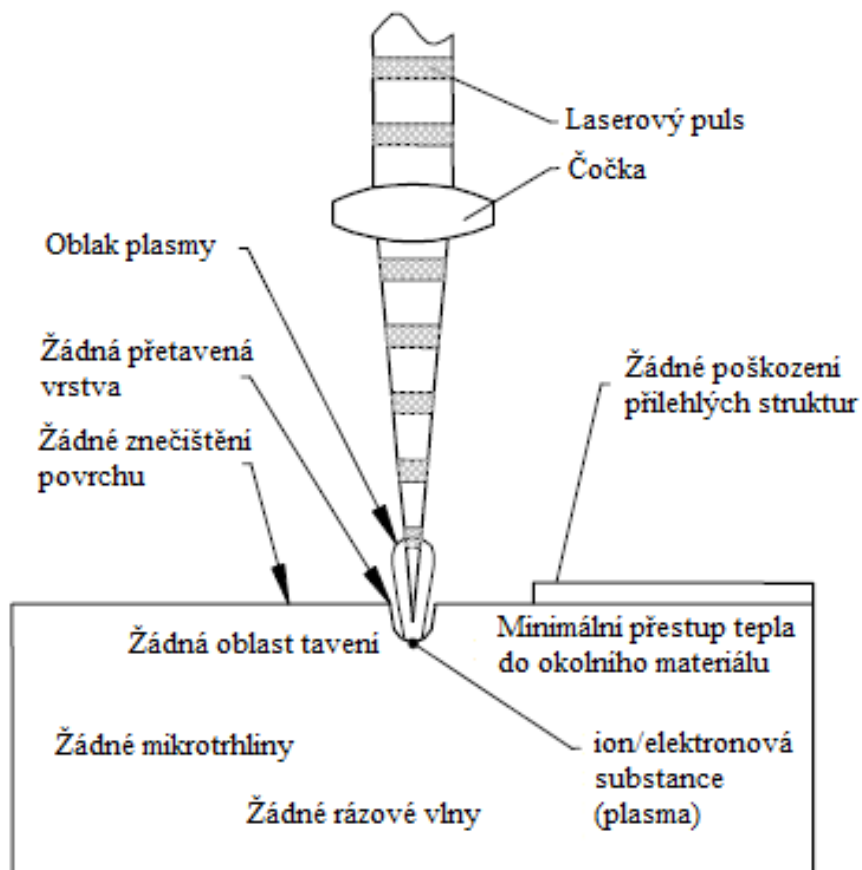
vymrštěn, ve formě kapek, pryč z místa řezu. Tyto kapky dopadají zpět na povrch a tvoří nečistoty (Obrázek 2-4 v kap 2.1.3), které kazí kvalitu obrobeného a okolního povrchu.

Dalším negativním jevem při mikroobrábění laserem s dlouhými pulzy je vznik tepelně ovlivněné zóny (HAZ). Tepelná energie, která se rozptýlí do okolního materiálu, může vytvářet v přilehlé oblasti mechanické namáhání a mikrotrhliny. S HAZ úzce souvisí tvorba přetavené vrstvy, která vzniká kolem pracovního místa laserového paprsku. Tento znovu ztuhlý materiál má často fyzikální vlastnosti odlišné od neroztaveného materiálu. Přetavená vrstva musí být obvykle odstraněna čistícími pochody.



Obrázek 2-2 Ablace μ s a ns pulzy [9]

Jelikož malá HAZ, zanechaná laserovým paprskem s ns pulzy, nemusí být vyhovující pro některé nejnovější mikroobráběcí aplikace, tak jsou používány lasery s velmi krátkými pulzy. V ultrarychlém režimu (Obrázek 2-3) jsou laserové pulzy tak krátké, že nanesená tepelná energie laserovým paprskem nemá dostatek času k tomu, aby se mohla rozptýlit do okolí materiálu. Proto je všechna energie efektivně využita pro ohřev i ablací materiálu, kde materiál přejde do stavu plazmy. Plazma expanduje pryč z pracovního prostoru ve formě oblaku vysoce ionizovaných atomů. V důsledku tohoto jevu zde nevznikají žádné kapičky, které by ztuhly na přilehlém povrchu. Jelikož zde není dostatek času pro rozptýlení tepla do okolního materiálu, nedochází tu k žádné HAZ.



Obrázek 2-3 Ablace ps a fs pulzy [9]

2.1.3 Tepelně ovlivněná oblast [8, 9]

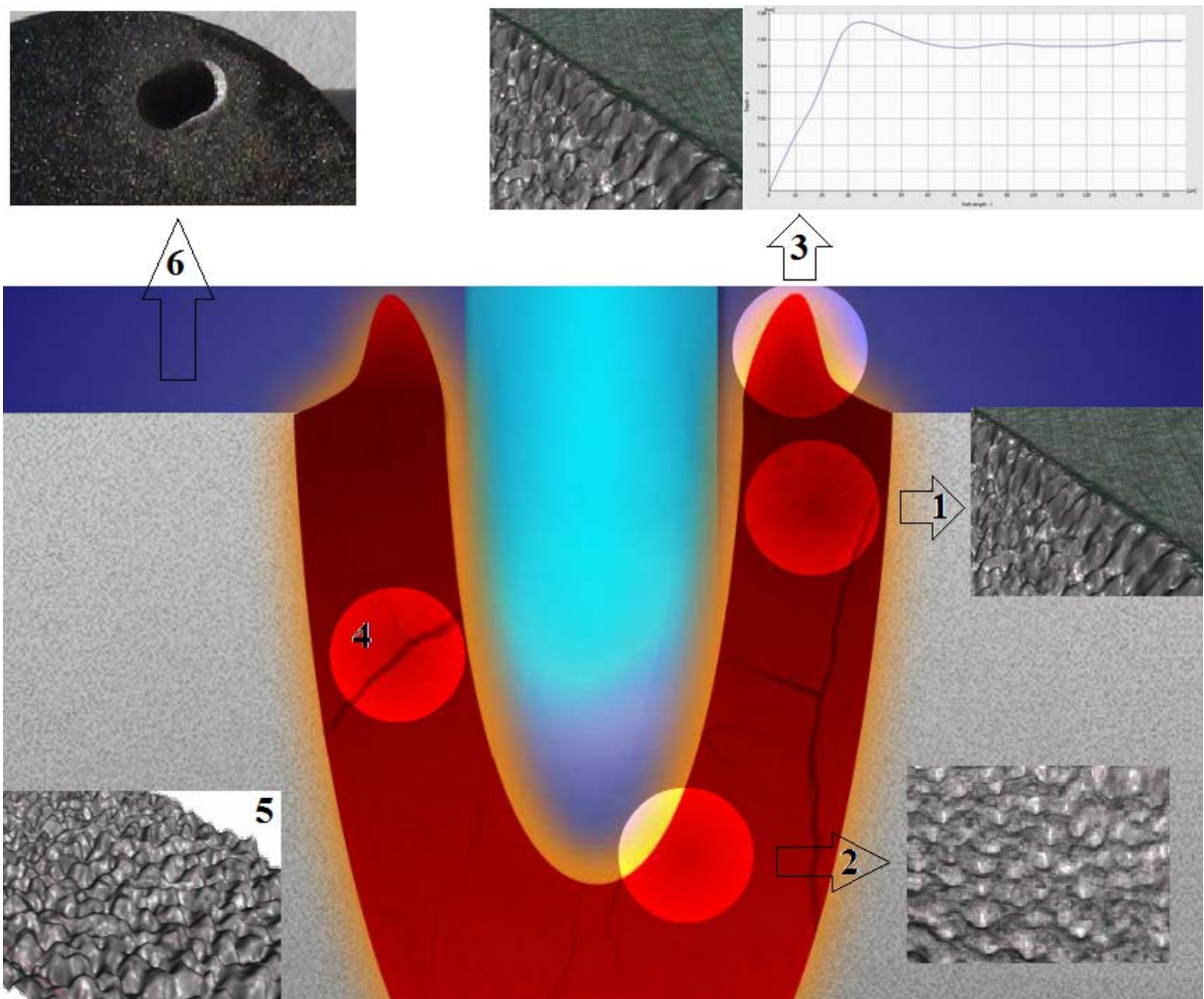
Tato kapitola se věnuje možným formám a následkům tepelně ovlivněné oblasti. Ve výše uvedené kapitole 2.1.2 byly zmíněny vlivy délek pulzů a čas tepelné difúze.

Druhý uvedený faktor je ovlivněn tepelnou vodivostí, který je dalším klíčovým materiálovým faktorem. Tepelná vodivost má vliv na šíření absorbované energie do objemu materiálu, kde energie ztrácí účinnost a vzniká tepelné ovlivnění (HAZ). Např. keramické materiály, které mají vysoké teploty tání a odpařování, mají nízkou tepelnou vodivost, což je řadí mezi snadno obrobitelné materiály laserovým paprskem.

V závislosti na materiálu a aplikaci může být HAZ ve formě:

1. zabarvení povrchu
2. roztavení či přetavení materiálu
3. deformací - zborcení tvaru, charakteristický lem po obvodové hraně
4. mikrotrhliny, zbytkové napětí
5. charakteristická topografie povrchu
6. jiné - povrchové nečistoty (kapky ztuhlého materiálu)

Formy a dopady HAZ jsou ukázány na obrázku 2-4.



Obrázek 2-4 Formy HAZ a její následky

Z těchto příčin je nutné co nejvíce minimalizovat tepelné poškození okolního materiálu. U některých materiálů je toho docíleno použitím kratších vlnových délek, proto roste obliba ultrafialových laserů (viz. kap. 2.1.1). Další snížení tepelného zatížení materiálů lze ovlivnit redukcí délky pulzů (viz. kap. 2.1.2).

2.2 Laserová obráběcí centra v současnosti

V současné době existuje na světovém trhu několik společností, které integrují laserové zdroje do plnohodnotných strojních zařízení i s více-osou kinematikou. Laserové zpracování umožňuje inovativní, nákladově efektivní řešení a nový vývoj v mnoha průmyslových odvětvích. Technologie laserového paprsku už pronikla do zdravotnictví, strojírenství, elektrotechnického a plastického průmyslu či dokonce do zpracování klenotnického zboží. Ve strojírenství se hlavně jedná o dělení plechů, svařování, kalení, popisování a obrábění miniaturních prvků např. vrtání otvorů do křemíkových desek nebo výroba nástrojů, o které bude pojednáno v této kapitole. Dosahovaná přesnost tohoto typu zpracování otevírá zcela nové perspektivy.

Vzhledem ke zvýšenému používání speciálních hliníkových slitin a kompozitních materiálů vyztužené tzv. whiskerovými vlákny (především letecký průmysl, popř. speciální aplikace), se zvětšuje poptávka zejména po diamantových, ale i ostatních řezných nástrojích. Mikroobrábění laserem umožňuje úpravy i těch nejtvrdějších řezných materiálů, proto je tato kapitola věnovaná rešerši dostupných laserových zařízení, které provádí úpravy řezných nástrojů.

2.2.1 Laser Pluss - RayCutter® [11]

V laserovém zařízení RayCutter® 3000 od německé firmy Laser Pluss lze v jednom ocelovém rámu kombinovat několik laserových zdrojů, popř. jiné laserové vybavení (viz. doplňky). Pohybové díly jsou upevněny na granitovém podkladu. Zařízení obsahuje CNC řízené osy s vysoce dynamickými lineárními motory a skleněnými měřidly pro zpětnou vazbu polohy, ostatní komponenty jsou již konvenčního charakteru (ochranný kryt na pneumatický pohon s bezpečnostním sklem, integrovaná jednotka s aktivním uhlíkovým filtrem na pohlčení výfukových zplodin).

Zařízení je vhodné pro obrábění nástrojů vyrobených z PKD, CBN. Mikroobrábění komplexních 3D tvarů je umožněno pouze s doplňky, které jsou dodávány za příplatek.

Laserový zdroj

- Diodově čerpaný pevno-látkový ND: YAG laser
- kontinuální jmenovitý výkon až 100W (optimalizováno pro přesné obrábění)
- kontinuální jmenovitý výkon na obrobku s optimalizovanou kvalitou paprsku až 20W
- více parametrů laserového zdroje výrobce neudává

Software a řízení

- firma Laser Pluss používá vlastní RayGraph[®] CAD systém, který má další integrovaný softwarový nástroj RayTurn[®] pro rotační nástroje
- pracuje se všemi současnými formáty (např. *.dxf; *.IGS)
- s RayGraph[®] CAD mohou být obrobny VBD, které jsou uspořádány na paletách v maticovém tvaru (možnost výroby sériového charakteru)
- softwarový nástroj RayTurn[®] umožňuje obrábění mnohozubých fréz
- základní verze CNC řízení obsahuje interpolaci třech os, možnost doplňku pro pětiosé řízení
- systém obsahuje CAM postprocesor, který převádí geometrické data do CNC drah, postprocesor je vhodný pro vytváření otevřených kontur
- je zde integrovaná databáze pro ukládání materiálových dat

Doplňky a možnosti vylepšení

- rotační jednotka do průměru 350 mm a nástrojový HSK upínač
- paletizační a manipulační systémy
- laserový dotkový senzor pro přesné snímání povrchu obrobku
- koaxiální kamera, CCD kamera s telecentrickým optickým měřením
- speciální optika pro vertikální obrábění či podříznutí hran
- 3D obrábění

2.2.2 Ewag AG - Laser line [12]

Produkt od švýcarské firmy Ewag AG je považován za laserové špičkové obráběcí centrum. Koncept pětiosé kinematiky stroje překrývající se s tříosým naváděním laserového paprsku zajišťuje největší možnou flexibilitu při obrábění vysoce komplexních nástrojů. V tomto přístroji je navíc integrován šestiosý robot pro automatickou výměnu obráběných nástrojů. Pro upevnění nástrojů je v Laser Line použito upínání typu HSK63. Ke zjištění a zaměření

nástroje je zde použita obrobková sonda. Odchytky správného umístění nástroje jsou softwarově kompenzovány. Výrobce do tohoto přístroje instaluje výkonné pulzní lasery s pikosekundovou délkou pulzu.

Výrobce zaručuje zvýšení produktivity a přesnosti zejména v supertvrdých typech materiálů (PCD/CBN), ale i u klasických řezných materiálů. Přístroj umožňuje úpravu řezné hrany, vnější kontury (úprava úhlu hřbetu), mikroobrobení fazety a tvarově komplexního 3D utvařeče třísek na čele nástroje (Obr. 2-5). Všechny tyto operace se provádí na jedno upnutí. Dle tvrzení výrobce zabere tvorba výše uvedených prvků (včetně utvařečů třísek hloubky 0,3 mm) na dvoubřitém frézovacím nástroji 22 min.

Laserový zdroj

- $P = 50 \text{ W}$
- $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- $f = 400\text{-}1000 \text{ kHz}$
- délka pulzu $< 15 \text{ ps}$



Obrázek 2-5 úprava VBD z PKD na jedno upnutí (vlevo: před/ vpravo/po úpravě) [12]

Software a řízení

Programy jsou vytvářeny snadno a pružně tím, že se kombinuje více programovacích modulů (LaserSoft a 3D Scaps). Monitorování a řízení je plně integrováno do LaserSoft systému, stejně jako programování robotu pro výrobní operace. Pro mikroobrábění komplexních 3D útvarů je používán program 3D Scaps, který pracuje s STL formátem. Načtený tvar je rozdělen do vrstev, které jsou postupně odebírány. Zde jsou také voleny strategie obrábění a nastavení parametrů výstupního laserového svazku. Stejným způsobem může být definováno a začleněno do stromu programu i značení nástrojů.

Doplňky a možnosti vylepšení

Firma Ewag AG nedodává žádné oddělené příslušenství.

2.2.3 DMG/MoriSeiki - LASERTEC 20/40/50 PrecisionTool [13, 14]

Společnost DMG - MoriSeiki má ve svém portfoliu hned 3 zařízení, které se orientují na výrobu a úpravu nástrojů. Aplikační oblast se rozšiřuje z úpravy úhlu hřbetu a řezné hrany (VBD, čelní válcové frézy a výstružníky) přes kompletní geometrie s utvařeči třísek z PKD/CBN/SK břitových destiček až po dělení PKD/CBN polotovarů. Rozdělení jednotlivých aplikačních oblastí pro konkrétní stroje je znázorněno v tabulce 2-1 a 2-2.

aplikace na PKD/CBN	LASERTEC 20	LASERTEC 40	LASERTEC 50
	PrecisionTool	PrecisionTool	PrecisionTool
řezná hrana s úhlem hřbetu na PKD	•		
utvačeře třísek na PKD	•	•	
dělení kruhových polotovarů z PKD/CBN			•

Tabulka 2-1Přehled aplikací pro supertvrdé materiály [13]

Aplikace na slinutý karbid	LASERTEC 20	LASERTEC 40	LASERTEC 50
	PrecisionTool	PrecisionTool	PrecisionTool
prototyping utvařečů třísek na VBD ze SK		•	• (piko)
karbidové raznice s geometrií utvařeče třísek		• (piko)	• (piko)

Tabulka 2-2Přehled aplikací pro slinuté karbidy [13]

2.2.3.1 LASERTEC 20 Precision Tool

Jedná se o tuhý pětiosý stroj, stabilní konstrukce (monoBLOCK[®]) a vysokou dynamikou s lineárními/rotačními motory ve všech pěti osách. Jako laserový zdroj je používán vláknový laser o výkonu P=100W. Tento stroj zaručuje opakovatelnou přesnost a kvalitu, umožňuje upravit řezné hrany o rádiu 2-3 μ m bez vylomení ostří a vnitřní rádiu až do 15 μ m. Řídicí systém je od firmy Siemens (Siemens 840D solution online with DMG ERGOline[®] control). Tento systém používá parametrické programování pro standardní tvary VBD, generování CNC programu je v tomto případě automatické. Dotyková sonda a kamera ověří polohu VBD s následnou automatickou korekcí CNC drah. Dle použitého laserového zdroje (vláknový laser; P=100W) je stroj vhodný pro supertvrdé řezné nástroje (viz. tab. 2-1).

2.2.3.2 LASERTEC 40 PrecisionTool

Provedení s označením č. 40 se vyrábí ve dvou verzích, které se liší použitými laserovými zdroji. Tento stroj má volitelnou čtvrtou osu jako indexované zařízení, základní rám je vytvořen z polymer-betonu. V důsledku kruhové kabiny je do stroje velmi dobrá přístupnost. Řídicí systém nese název LASERSOFT 3-D a umožňuje přímý výpočet programu z 3D CAD souboru, dále lze pomocí utility 3D-Contour nastavit paralelní dokončování obrysů pro dosažení nejlepšího jednotného povrchu. Systém umožňuje práci s větším počtem různých obrobků, které mohou být po celé pracovní ploše (pomocí nosného systému, např. palety). Toto je vhodné např. pro větší série VBD, obrábění zde probíhá bez obsluhy. Pro zaměření správné polohy VBD je používána funkce Auto Video Set-up, která s pomocí vestavěné CCD kamery vyhledá předdefinované měřicí body, které pomohou k automatické korekci polohy.

Tvorba kompletního reliéfu utvařeče třísky (hloubka 0,3 mm) na jedné prototypové VBD ze slinutého karbidu, dle tvrzení výrobce, trvá přibližně 3h.



Obrázek 2-6 Prototyp utvařeče třísky na VBD ze slinutého karbidu [14]

Rozdělení zdrojů dle tabulky 2-1 a 2-2

- - Nd:YV04 (12W); vláknový laser (100W) - vhodné pro prototypovou výrobu geometrie utvařeče třísek na slinutém karbidu a PKD, CBN
- **(piko)** - pikosekundový laser (25/50W) - tento zdroj je určen pro výrobu karbidových lisovacích nástrojů s geometrií utvařeče třísek pro VBD s kvalitou povrchu až Ra 0,3μm

2.2.3.3 LASERTEC 50 Precision Tool

Provedení s označením č. 50 se vyrábí také ve dvou verzích, které se liší použitými laserovými zdroji. Pěti-osý stroj má rám vytvořen z polymer-betonu, dynamika pohybu v ose x/y je zaručena lineárními motory. Přesnost polohování udává výrobce 8μm. Řídicí systém je od firmy Siemens (Siemens 840D solution online with DMG ERGOline® control)

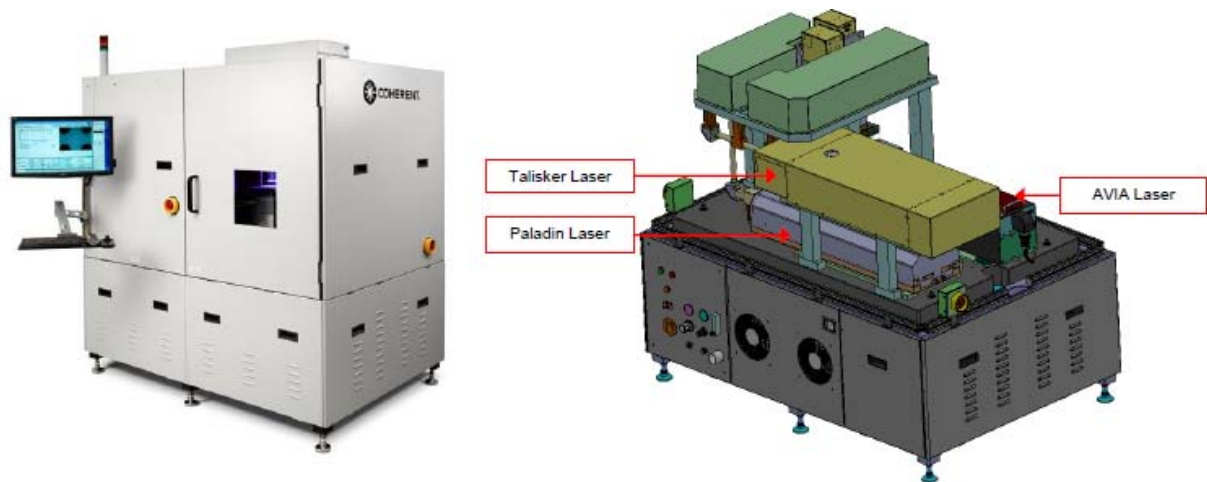
Rozdělení zdrojů dle tabulky 2-1 a 2-2

- - Nd:YAG (300W) - používá se na řezání a dělení kruhových polotovarů vyrobených z PKD a CBN. Jedná se o čistý a přesný řez s nízkou tepelně ovlivněnou oblastí (od 50μm) a řeznou rychlostí až 100mm/min (tloušťka PKD polotovaru 1,6mm). Při použití pětiosé kinematiky lze z polotovarů "předřezat" i úhel hřbetu.
- **(piko)** - pikosekundový laser (25/50W) - tento laserový zdroj je s kombinací pětiosého řízení stroje řešením pro speciální obrábění či kompletní prototyping břitových destiček včetně úhlů hřbetu

2.2.4 Coherent - AethonSystem [15]

Tato více-účelová laserová pracovní stanice je především určena pro výzkum, vývoj, klasifikaci procesů založených na laserovém zpracování a nebo jako součást pilotní linky ve firmě. Platforma Aethonu je navržena tak, aby bylo zařízení soběstačné a snadno ovladatelné. Zároveň nabízí flexibilitu zpracování s řadou různých laserových systémů (až 3 laserové zdroje). Softwarové rozhraní poskytuje značný stupeň kontroly nad provozními

podmínkami. Samozřejmostí jsou ochranné prvky a izolovaný rám od vibrací. Lasery a x, y, z osy jsou kvůli stabilitě přimontovány na granitovou desku.



Obrázek 2-7 Ukázka modelu stroje Aethon (vpravo) s 3 integrovanými laserovými zdroji [15]

Konečné rozvržení (typ laseru, vlnová délka) se může lišit podle příslušného zákazníka. Aethon system bude zahrnovat laser typu Talisker Ultra 532-8. Tato konfigurace využívá optický skener a dva laserové svazky pro provoz v zeleném (532nm) a infračerveném (1064nm) spektru. Přístroj zahrnuje i pokročilé snímání obrazu založené na inteligentní kameře s vysokým rozlišením a variabilním bílém LED osvětlení. Zobrazovací systém je plně integrován do uživatelského rozhraní a je ideální pro kontrolu nebo umístění ostří destičky nebo jiného výchozího prvku. Zobrazovací systém navíc umožňuje kalibraci os, které se používá ke zvýšení přesnosti polohování systému. Řídicí systém umožňuje pohodlné ovládání všech důležitých komponent stroje včetně výběru vlnových délek a nastavení procesních parametrů.

Laserové zdroje [16, 17, 18]

TaliskerTM Ultra 532-8

- $P > 16 \text{ W}$
- $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- $f = 1\text{-}200 \text{ kHz}$
- délka pulzu $< 15 \text{ ps}$
- $P > 8 \text{ W}$
- $\lambda = 532 \text{ nm}$
- $f = 1\text{-}200 \text{ kHz}$
- délka pulzu $< 15 \text{ ps}$

PaladinTM Advanced 355 (dle použitého modelu)

- $P = (>8; >10; >16; >24)$ W
- $\lambda = 355$ nm
- $f = 80$ MHz
- délka pulzu > 15 ps

AviaTM 355 - 23

- $P = 23$ W (při 90 kHz)
- $\lambda = 355$ nm
- $f = 1 - 300$ kHz (optimum 90 - 110 kHz)
- délka pulzu >40 ns

2.3 Řezné materiály obráběné laserem [8,10,19, 20, 21, 22, 23]

Obrábění laserovým paprskem je tepelný proces. Efektivita tohoto procesu závisí na tepelných vlastnostech a do jisté míry na optických (transparentních) vlastnostech, namísto mechanických vlastností obráběného materiálu. Proto materiály, které vykazují značnou křehkost nebo tvrdost, mají příznivé tepelné vlastnosti. Např. nízká teplotní (α) a tepelná (λ) vodivost jsou obzvláště velmi vhodné pro laserové obrábění. Dalším důležitým aspektem je absorpivita obráběného materiálu. O možnostech, jak lze zvýšit schopnost absorpce obráběného materiálu bylo pojednáno v kap. 2.1.1.

Absorbivita (A) materiálu je důležitou složkou pro samotný proces obrábění. Ta může být definována jako zlomek dopadajícího záření, které je absorbováno v kolmém dopadu. Každý materiál má určitou hodnotu absorpce (tzv. absorpční koeficient μ), která je obecně vyjádřena Beer-Lambertovým zákonem.

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\mu z} \quad (1)$$

I_0 vstupní intenzita záření

I_z intenzita záření v hloubce z

μ absorpční koeficient

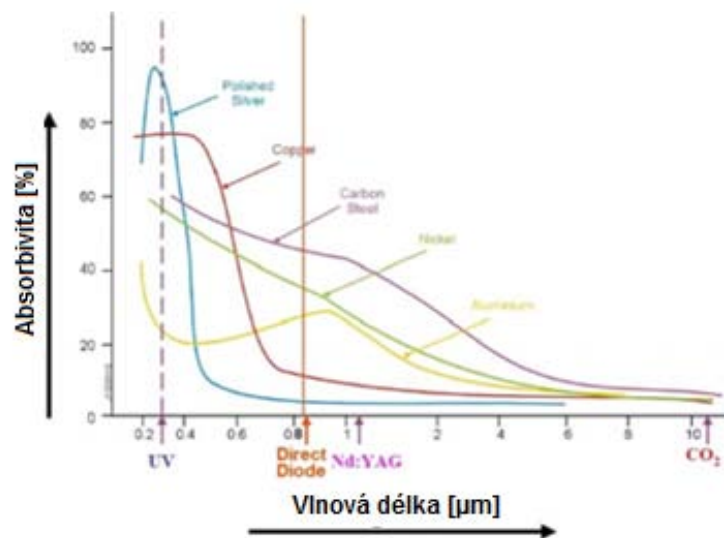
Pro neprůhledné materiály se absorbivita (A) může vyjádřit jako:

$$A = 1 - R \quad (2)$$

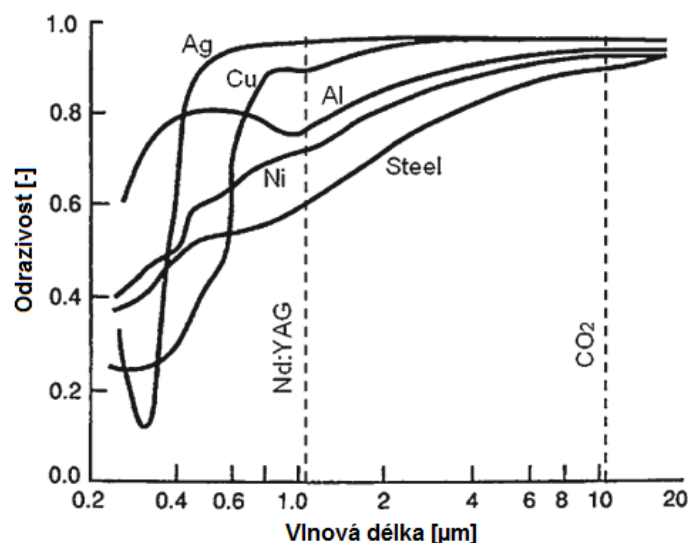
kde R znamená odrazivost materiálu. Odrazivost a absorpce materiálu se může vypočítat z měření optických konstant nebo pomocí komplexních refrakčních indexů, které ve svých

výpočtech využívají parametry silně závislé na vlnové délce a teplotě, proto je odrazivost (tím pádem i absorpce) materiálu značně ovlivněna vlnovou délkou a teplotou. Nicméně, závislost vlnové délky na odrazivosti by měla být použita pouze jako vodítko, protože je zde několik faktorů, které mohou silně ovlivnit absorpci. Obecně, odrazivost materiálů s rostoucí teplotou klesá, proto se materiály, které jsou silně reflexní při nízké teplotě, mohou při vysokých teplotách stát značně absorpční. K dalším vlivům patří úhel dopadu paprsku a stav povrchu obráběného materiálu.

Pro lepší názornost závislosti absorpce a odrazivosti na vlnové délce slouží grafy (2-1 a 2-2), kde jsou demonstrovány průběhy absorpce konvenčních materiálů. V grafech je názorně demonstrována rovnice č. 2. Součet absorpitivity a odrazivosti se bude blížit k hodnotě 1.



Graf 2-1A = $f(\lambda)$ [10]



Graf 2-2 $R=f(\lambda)$ [23]

K dalším materiálovým vlastnostem, které ovlivňují proces laserového obrábění, patří tepelná vodivost (λ). Hodnoty tepelné vodivosti jsou pro vybranou oblast řezných materiálů ukázány v tabulce č. 2-3. Tato fyzikální vlastnost je klíčovým materiálovým faktorem ovlivňující výslednou povrchovou integritu (čas tepelné difúze a rozptyl absorbované energie do objemu obrobku způsobuje ztrátu energie určenou pro ablaci materiálu-viz. kapitola 2.1.3), tedy určuje velikost HAZ. Čím bude mít obráběný materiál nižší hodnotu tepelné vodivosti, tím bude mít menší HAZ. Hodnota této vlastnosti má se zvyšující se teplotou rostoucí charakter ($\uparrow T \Rightarrow \uparrow \lambda$). Rozsahy jsou uvedeny v následující tabulce.

Nejčastěji obráběné řezné materiály jsou: polykrystalický diamant (PKD), kubický nitrid bóru (CBN) a slinutý karbid (SK). Tyto materiály se již laserem v praxi obrábí. Poslední uvedený materiál v tabulce je řezná keramika (ŘK), která by podle hodnot tepelné vodivosti měla mít nejmenší teplem ovlivněné oblasti.

Jak už bylo okrajově zmíněno v úvodu tohoto bodu, tak hlavní a nespornou výhodou laserového obrábění je fakt, že mechanické vlastnosti (především tvrdost) jsou pro tento druh nekonvenčního zpracování minoritním aspektem, proto je tato technologie jedinou vhodnou volbou pro obrobení supertvrdých řezných materiálů.

Vlastnosti	SK	ŘK			CBN	PKD
		Al ₂ O ₃	Zr ₂ O	Si ₃ O ₄		
Měrná hmotnost [g/cm ³]	14,8 - 15,0	3,9 - 4,0	6,0 - 6,1	3,1 - 3,3	4,0	4,1
Pevnost v ohybu [Mpa] (při 20°C)	1400-2200	350 - 500	650 - 700	600 - 850	600	300
Tvrdost [HV]	1300-2000		2000-2800		2700-3500	5000-8000
Měrná tepelná vodivost [W/m.K]	80 - 100	12	3	17 - 100	100 - 600	150 - 550

Tabulka 2-3 Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti polykrystalických materiálů ve srovnání se SK [20, 21, 22]

2.4 Možnosti úprav geometrie řezného břitu laserem

Během řezného procesu (především u soustružení, které je charakteristické svým nepřerušovaným řezem) probíhá celé spektrum žádoucích či nežádoucích dějů. Jedná se např. o nevhodný odchod třísek (zejména zpevněné třísky odlamující se proti nástroji), problémy s nárůstkou a z nich vyplývající horší kvalita obrobeného povrchu a nižší trvanlivost nástroje (feritické ocele či slitiny hliníku s nízkým obsahem křemíku), vibrace aj.. K optimalizování

těchto dějů se používají úpravy makrogeometrie břitu, které mohou být standardizované, ale i nestandardizované. O obou typech pojednávají následující podkapitoly.

2.4.1 Standardizované úpravy [24, 25, 26]

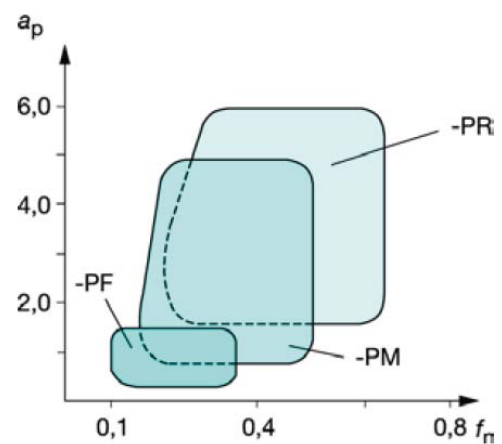
K těmto úpravám patří geometrické prvky umístěné na čele břitu, které slouží k utváření a zkracování třísky. Utváření třísky u VBD ovlivňuje geometrie destičky, úhel čela, velikost primární fasetky a utvařeče třísky. Utvařeče třísky jsou vhodným řešením pro změnu tvaru a délky vznikající třísky [24].

Z vhodného tvaru utvořené třísky plyne několik výhod:

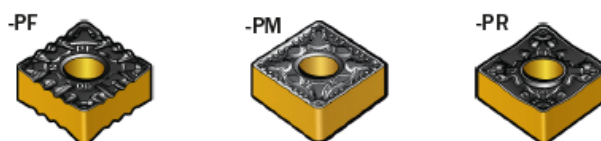
- zamezení poškozování povrchu obrobku
- zamezení poškozování břitu
- usnadnění manipulace s třískovým odpadem (zadírání třísek v dopravnících stroje)
- zabránění ohrožení obsluhy stroje
- snížení tepla v řezu

Konstrukce břitové destičky bude zcela odlišná v porovnání např. s destičkou určenou pro jemné dokončovací operace (zde je v záběru poloměr špičky a z tohoto důvodu se geometrie zaměřuje především na roh vyměnitelné břitové destičky, jejíž aplikační oblast je dána menšími hodnotami posuvu a hloubky řezu), oproti destičce, určené pro těžké hrubování (zde je důležitá geometrie na celé ploše čela a její aplikační oblast je určena pro větší hodnoty posuvu a hloubky řezu)[24]. Typy utvařečů sedle řezných podmínek dělí na:

- hrubovací - R (roughing - kombinace velkých hodnot a_p ; f_n)
- střední - M (medium machining - široká oblast hodnot a_p ; f_n)
- dokončování - F (finishing - kombinace nízkých hodnot a_p ; f_n)



Graf 2-3 Diagram vhodného utváření třísek pro různé řezné podmínky [26]

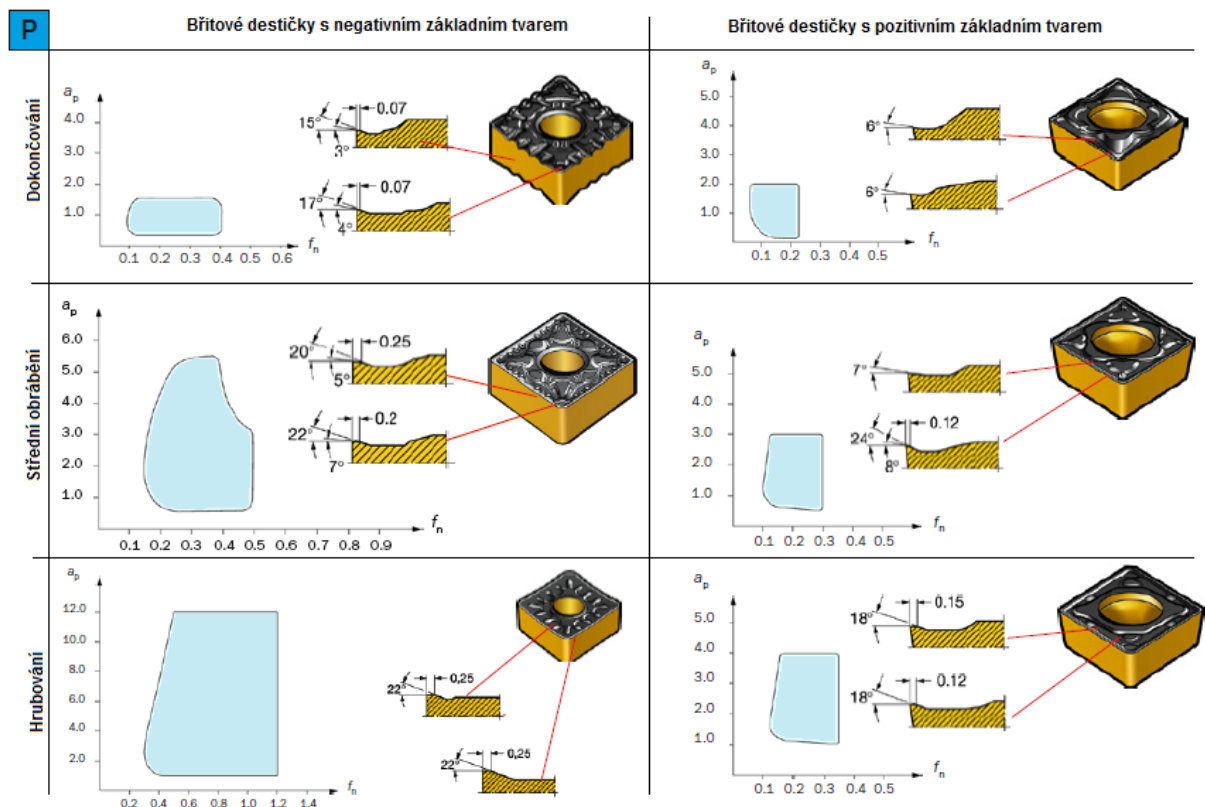


Obrázek 2-8 Ukázka geometrie 3 VBD pro různé řezné podmínky [26]

V dnešní době je na trhu mnoho výrobců VBD ze slinutých karbidů, kteří používají své vlastní vzory utvařečů třísek. Vhodné parametry řezného procesu (axiální hloubka řezu - a_p a posuv - f_n), které zaručují vznik požadované třísky, jsou vyjádřeny formou diagramů vhodného utváření třísek (graf 2-3).

Pro obráběcí operace se na trhu vyskytuje na trhu nepřehledné množství geometrií utvařečů třísek. Zákazník si v současnosti může vybrat geometrii utvařeče dle několika hledisek:

- geometrie VBD (pozitivní/negativní základní tvar)
- podle typu řezného procesu (hrubovací, střední obrábění, dokončování)
- obráběný materiál (dle ISO: P,M,K,N,S,H)



Tabulka 2-4 Ukázka utvařečů pro obráběný materiál třídy P od firmy Sandvik [26]

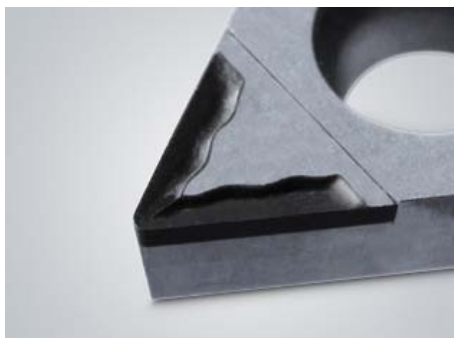
2.4.2 Nestandardizované úpravy

Do této skupiny spadají všechny atypické úpravy břitu, které jsou zakázkového charakteru určující specifické požadavky buď na řezný materiál, či tvorbu nestandardního tvaru břitu nástroje. Mikroobrábění laserem je pro tyto atypické úpravy břitu vhodné, jak z materiálového hlediska, kde lze obrábět širokou škálu řezných materiálů (především s vysokou tvrdostí - viz. kapitola 2.3), tak z tvarového hlediska, protože lze pomocí integrovaných softwarů obrábět (gravírovat) libovolné 3D objekty vymodelované v CAD softwarech. Zde se jedná hlavně o prototypy utvařečů třísek, tvorbu fasetek na čele nebo hřbetu břitu nástroje či

VBD, úpravy úhlu hřbetu, "umístění" vrubu na řezné hraně břitu v definované vzdálenosti od špičky (vrcholu zaoblení) VBD, nebo další úpravy optimalizující řezný proces. Následující podkapitoly ukazují příklady úprav geometrie pomocí mikroobrábění laserem.

2.4.2.1 Utvařecí třísek [12, 13, 14]

Titulky k obrázkům 9 - 15 jsou popsány v pořadí: nástroj/VBD; řezný materiál



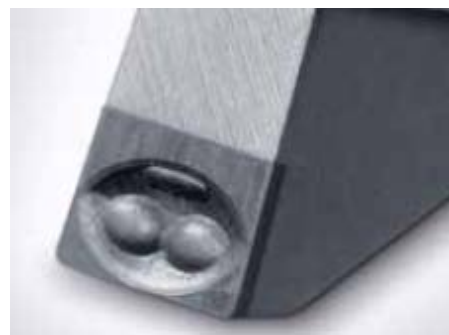
Obrázek 2-9 VBD; PKD [13]



Obrázek 2-12VBD; PKD [14]



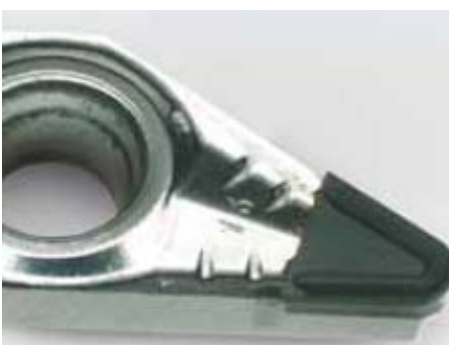
Obrázek 2-10VBD; PKD [13]



Obrázek 2-13 zapichovací nůž; PKD [14]



Obrázek 2-11VBD; CBN [12]



Obrázek 2-14 VBD; PKD [12]



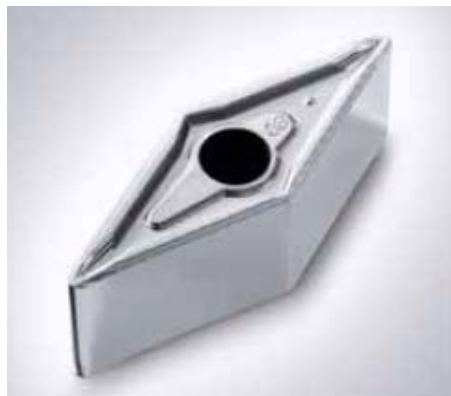
Obrázek 2-15 zapichovací a tvarový nůž; oba z PKD [13]

Obrázek 2 - 16 prezentuje prototyp utvařeče třísek po celé čelní ploše VBD

Obrázek 2 - 17 a 18 ukazují tvorbu nástrojů, které slouží k lisování utvařečů třísek



Obrázek 2-16 VBD; SK [13]



Obrázek 2-17VBD; SK [14]



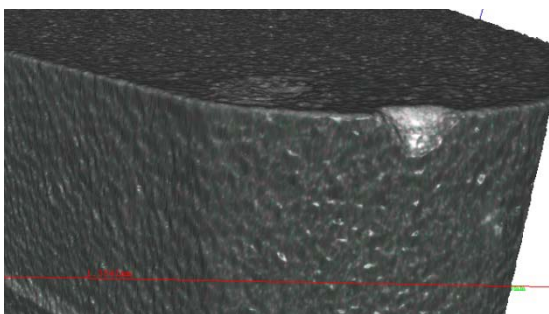
Obrázek 2-18VBD; SK [14]

2.4.2.2 Ostatní [12, 27]

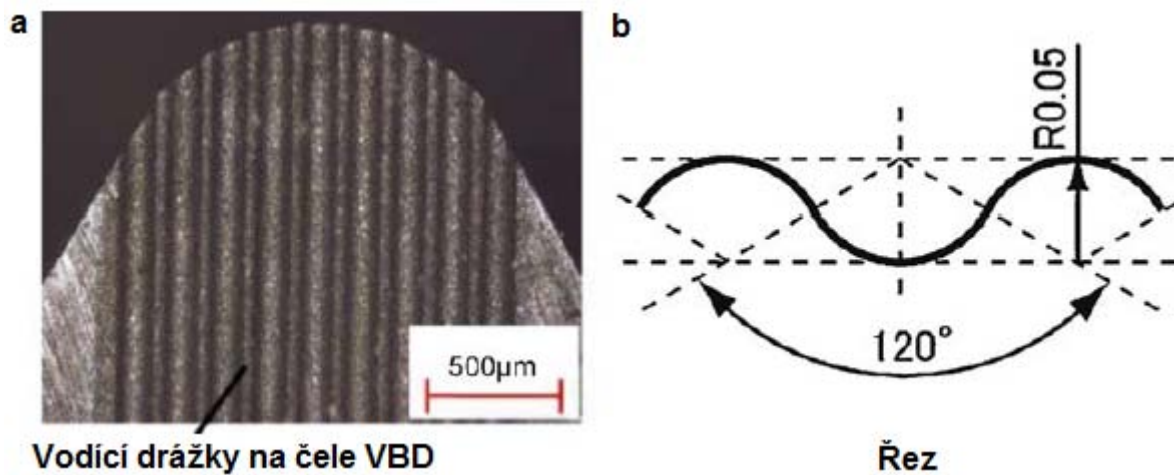
K dalším modifikacím břitu spadá úprava řezné hrany (Obrázek 2 - 19), tvorba vrubu na řezné hraně (Obrázek 2 - 20) nebo tzv. vodící drážky (Obrázek 2 - 21) pro kontinuální odvod třísek při soustružení velmi tažných (tvárných) materiálů.



Obrázek 2-19Úprava řezné hrany na PKD [12]



Obrázek 2-20 Vrhub na řezné hraně VBD; PKD



Vodící drážky na čele VBD

Obrázek 2-21 Vodící drážky: a) Pohled shora, b) Řez [27]

3 Vlastní návrh řešení

Tato kapitola se již věnuje postupu mikroobrábění pomocí laseru zn. LAO - Shine Fiber 20W. Přístroj je primárně používán k průmyslovému značení a popisování kovů a plastů, který lze snadno integrovat do výrobních linek. Jako další využití tohoto přístroje lze shledat v mikroobráběcích (gravírovacích) operacích, které využívají 3D softwarový modul zn. SCAPS nesoucí název Light 3D. Standardní popisování výrobků probíhá v programu SCAPS Light 2D.

3.1 Charakteristika použitého laserového zařízení

Tato pracovní stanice je vybavena vláknovým laserem dopovaným Ytterbiem (Nd:YAG), který má pulzní operační režim provedený pomocí Q-spínání [28].

Technické parametry laserového zdroje:

- $P = 20 \text{ W}$
- $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- $f = 20\text{-}100 \text{ kHz}$
- délka pulzu - 100 ns

Parametry pracovního pole:

- pracovní plocha - 110x110 mm
- ohnisková vzdálenost - 160 mm
- Průměr stopy v ohnisku - 34 μm
- hloubka ostrosti - 2,37 mm

Výrobce tohoto zařízení dodává různé řešení systému na zakázku. Jedná se o typ pracovního stolu (rotační/XY stůl), různé automatické pneumatické podavače, rotační jednotka pro značení válcových dílů (pouze pro značení dílů), systém odsávání zplodin aj. K důležitému příslušenství patří 3D modul pro mikroobrábění.

3.2 Kalibrace optiky

Předtím, než zde budou popsány metodiky a možnosti nastavení laserového zdroje, se musí zkalibrovat optika, která rozmítá laserový paprsek. Toto je především důležité pro dosažení požadovaných rozměrů, tudíž i tvarové přesnosti. I když má tento software dvě větve modulů (2D a 3D), musí se každý modul kalibrovat zvlášť (pokud je správně zkalibrovaný 2D modul ještě neznamena, že 3D modul je také správně seřízený!). Tímto se uživatel vyhne různým nesrovnalostem a získá požadovaný tvar, který byl naimportován do softwaru SCAPS. Korektně nastavenou optikou lze získat správné rozměry v osách X a Y. Třetí rozměr (osa Z) se získává vhodným nastavením výstupního laserového svazku, který je ovlivněn několika parametry. Každý z těchto parametrů, které jsou blíže popsány v kapitole 3.5, určitým

oměrem ovlivňují proces ablace, tudíž i výslednou hloubku a jakost povrchu mikroobráběného tvaru.[4]

Podrobný popis kalibrace optiky je uveden v příloze č.4.

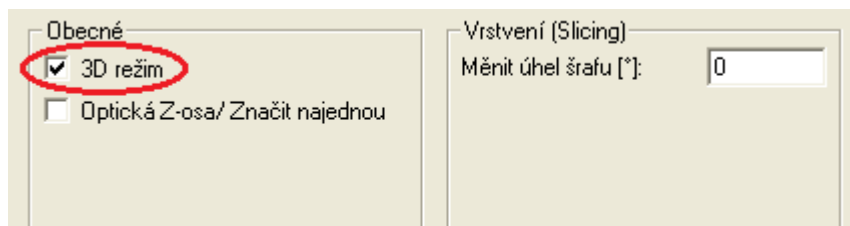
3.3 Metodika mikroobrábění v 3D modulu

Tato kapitola uvádí vlastní navrženou metodiku, jak docílit mikroobrábění pomocí popisovacího laseru a jeho integrovaného modulu. K tomuto modulu dodává společnost SCAPS GmbH manuál obsahující neucelené informace, které obsluze přes širokou škálu nabízených parametrů neumožní snadný průběh nastavení mikroobráběcího procesu. Postup, orientace a nastavení důležitých parametrů byl sepsán do následujících kroků.

- Nastavení 3D modulu
- Nastavení ohniskové vzdálenosti
- Import geometrické entity
- Posun obrysu geometrické entity
- Nastavení vrstev
- Nastavení procesu mikroobrábění

3.3.1 Nastavení 3D modulu

Pro používání popisovacího laseru pro mikroobrábění je nutné přepnout software z 2D modulu na 3D. Tento 3D modul je lepší uložit pod jiným jménem a následně spouštět 2D a 3D modul ze 2 zástupců (kvůli možným změnám viz. kalibrace optiky). Aktivace 3D modulu se provede otevřením nabídky **Nastavení** → **Systém** → **3D**, kde se v okně **Obecné** zaškrtně **3D režim** (Obrázek 3-1) a následně potvrdí tlačítkem **OK** a restartuje se.

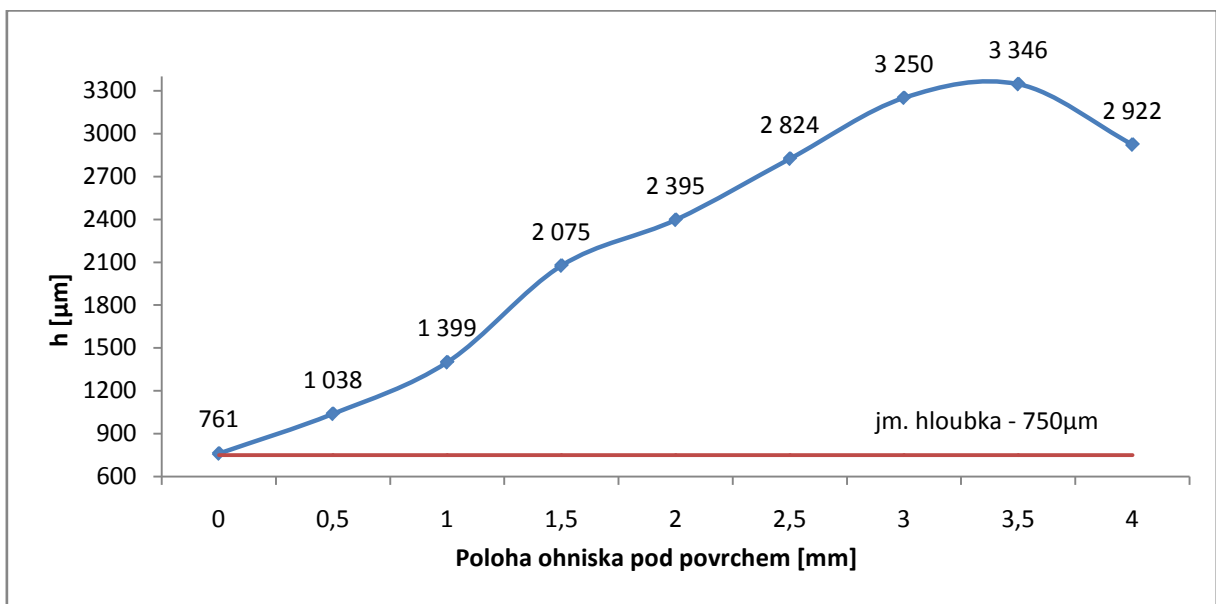


Obrázek 3-1 Nastavení 3D modulu

3.3.2 Nastavení ohniskové vzdálenosti

Ohniskovou vzdálenost lze nastavit dvěma způsoby. Buď přímo v softwaru ve 2D modulu, nebo nepřímo pomocí PLC panelu (obsluha se již nachází ve 3D modulu, který přímé nastavení ohniskové vzdálenosti nepodporuje). V obou případech musí být zjištěna výška obrobku, která se musí zadat, aby ohnisková vzdálenost f (Obrázek 3-2) zůstala konstantní

(160mm). Při nepřesném nastavení výšky obrobku by se ohnisko laserového svazku dostalo nad/pod povrch obrobku a došlo by k nižšímu nebo vyššímu ovlivnění (úběru) materiálu a vzniklý geometrický útvar by měl chybnou hloubku. V grafu 3-1 je nastavená hloubka obrobení na $h=750\mu\text{m}$ (jmenovitá hloubka). Špatnou polohou ohniska v podpovrchové vrstvě materiálu může laserový paprsek způsobit více než 4x větší požadovanou hloubku z důvodu většího ovlivnění materiálu (jedná se o polohu f cca 3,5mm pod povrchem materiálu). Princip nižší polohy ohniska je používán pro technologii dělení materiálu (plechů), kdy je laserový paprsek fokusován do místa pod povrchem materiálu do cca třetiny celkové tloušťky plechového polotovaru. Opakem je posunutí ohniska nad povrch materiálu, kde dosažený výsledek bude mít opačný charakter (nižší intenzita laserového paprsku => nižší hloubky než $h=750\mu\text{m}$).



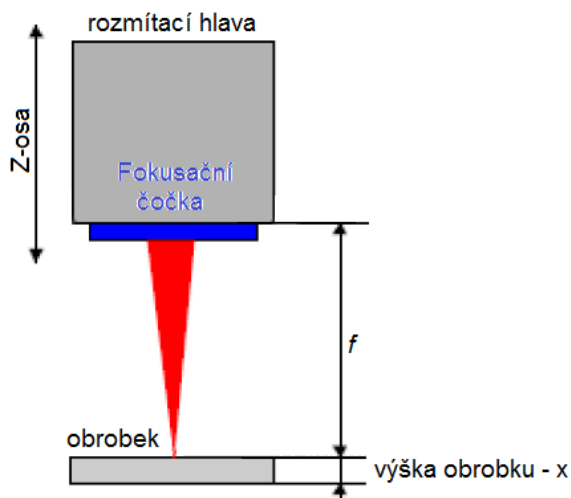
Graf 3-1 Vliv polohy ohniska pod povrchem obrobku na výsledné hloubce

K predikci nastavení polohy ohniska byla pro konkrétní obráběný materiál uvedený v tabulce 3-1 na základě vlastní metodiky zjištěna závislost skutečné hloubky obrobení ve vztahu k poloze ohniska k povrchu obrobku. Tato závislost byla zjištěna mikroobráběním otvoru o rozměrech $D=1\text{mm}$; $h=0,75\text{mm}$. Nastavení ohniskové vzdálenosti ve 2D modulu se provede v záložce **Řízení**,

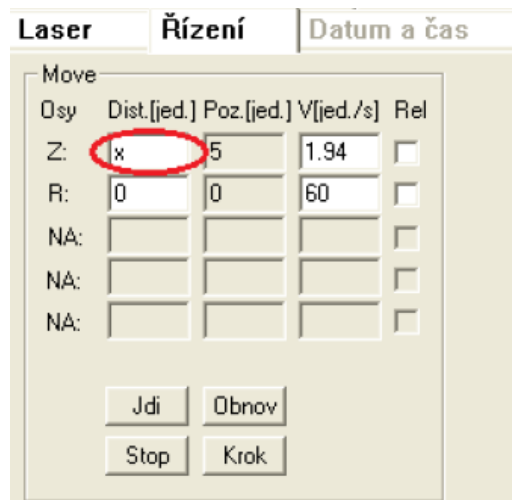
Graf	3-1
Materiál	Slinutý karbid - K-55SF
P [W]	20
v_c [mm/s]	200
f_p [kHz]	20
Slice [mm]	0,0005
Počet opakování	1x
Šřafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 0°
Šřafy č. 2 [rozptyl; úhel]	0,03; 90°

Tabulka 3-1 Použité parametry

kteřá se nachází v listu vlastností entit, kde se napíše výška obráběného vzorku¹ (Obrázek 3-3). Potvrzení této hodnoty se provede tlačítkem **Jdi**.



Obrázek 3-2 Nastavení ohniskové vzdálenosti



Obrázek 3-3 Nastavení výšky obrobku ve 2D modulu

Pokud se obsluha již nachází ve 3D modulu, tak se nastavení ohniskové vzdálenosti provede přes PLC panel (Obrázek 3-4). Okno s osou Z lze najít pomocí tlačítka **F5 (NEXT)**. Aktuální pozice ukazuje výchozí polohu rozmítací hlavy v ose Z. Požadovaná pozice se zadává obsluhou tlačítky **F1 (+)** a **F2 (-)** a potvrzení tlačítkem **F3 (ENT)** se rozmítací hlava přesune do stanovené polohy.



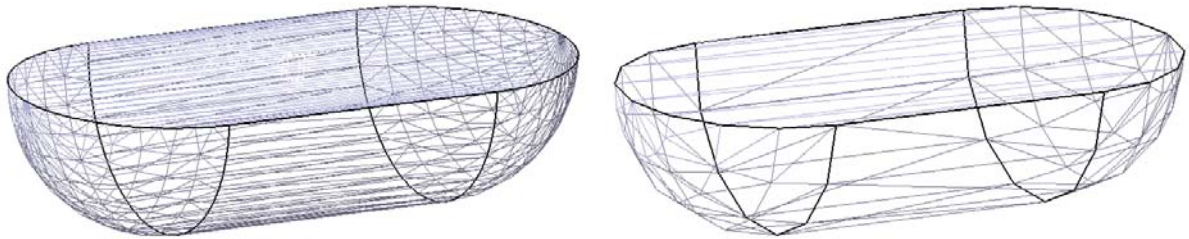
Obrázek 3-4 Nastavení výšky pomocí PLC panelu

3.3.3 Import geometrické entity

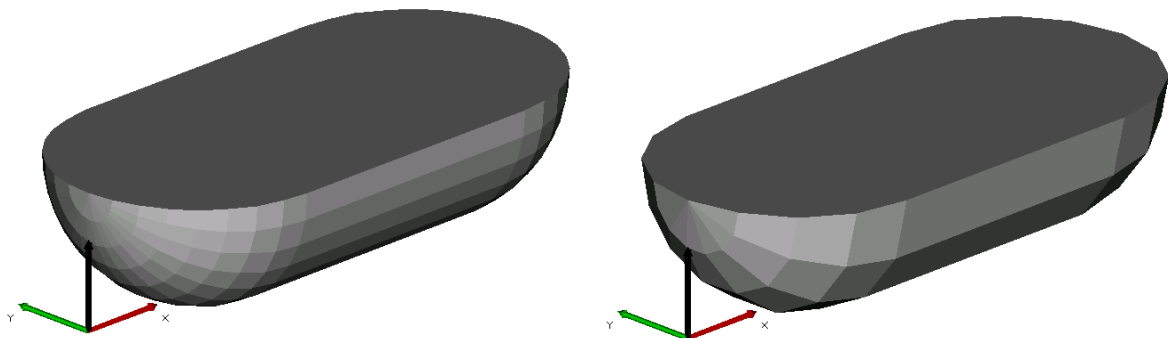
K docílení požadovaného tvaru na obrobku musí být v CAD softwaru vytvořen negativ objemového modelu (např. má-li být v obrobku vytvořen otvor, musí být do 3D modulu importován válec). Tento model se musí z CAD softwaru exportovat do podporovaných formátů *.STL nebo *.CLI (méně používaný) s následným importem do 3D modulu laserového zařízení.

¹ Jestli je obrobek z nějakého důvodu vypočítán přípravek, musí být tento přípravek rovněž započítán do výšky obrobku.

Pro tvorbu objemového modelu byl použit software CATIA V5, který umožňuje export do *.STL formátu. Zde je nutné zmínit, že se kvalita exportovaného modelu snížila kvůli charakteristice daného formátu, který je složen z trojúhelníků o různých délkách stran. Tyto délky stran jednotlivých trojúhelníků lze ovlivnit správným nastavením CAD softwaru tak, aby kvalita *.STL formátu byla dostatečná (Obrázek 3-5; model nalevo). Vyhovující kvalitu výstupního formátu lze ovlivnit pouze v CAD softwaru, nikoliv ve 3D modulu laserového zařízení. Na obrázku 3-5 je znázorněn vliv změny nastavení v příslušném CAD softwaru.



Obrázek 3-5 Model v CATIA V5: levý model - vyhovující kvalita; pravý model - nedostačující kvalita



Obrázek 3-6 Model v 3D SCAPS: levý model - vyhovující kvalita; pravý model - nedostačující kvalita

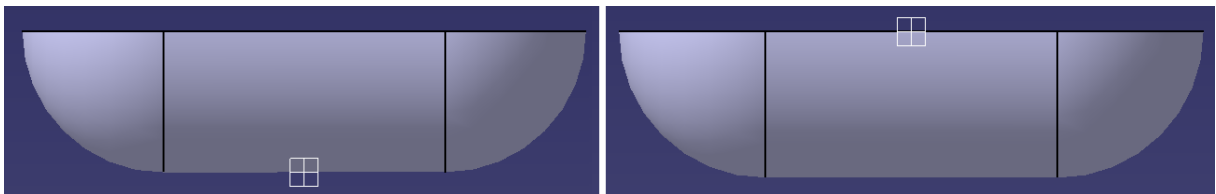
Obrázek 3-6 již demonstrovuje importovaný model ve 3D modulu SCAPS ve vyhovující a nevyhovující kvalitě. Po úpravě nastavení a vytvoření modelu v CAD softwaru lze provést export do *.STL formátu. Import modelu do 3D modulu se provádí přes nabídku **Soubor** → **Importovat(Ctrl + I)**.

3.3.4 Posun obrysu geometrické entity ve 3D modulu SCAPS

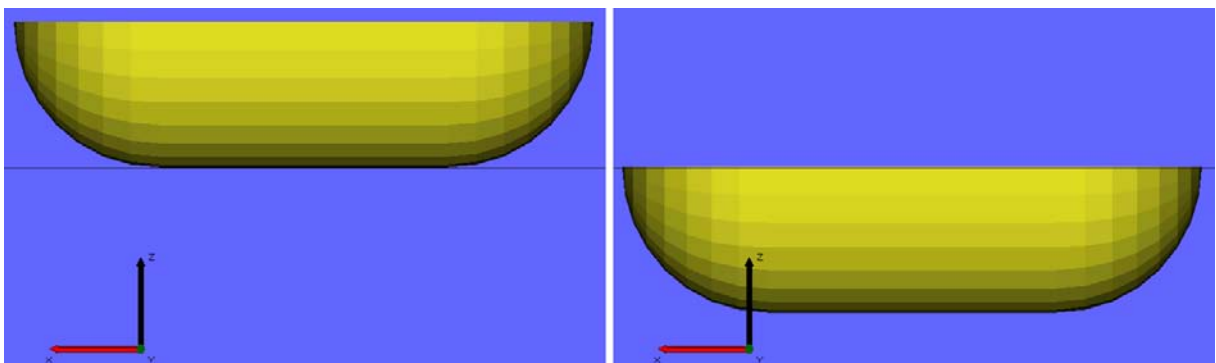
Při správném vytvoření modelu v CAD softwaru vůči počátku souřadnicového systému 3D modulu SCAPS nemusí být tento krok použit. V případě složitějšího tvaru CAD modelu, který svou geometrií neumožňuje vhodnou polohu počátku souřadnicového systému nebo svým jiným řešením zvyšuje časovou náročnost, je nutné ve 3D modulu provést posun obrysu. Posun importovaného modelu probíhá pouze v ose Z. Nutnost nastavení správného obrysu souvisí s dalším postupem (nastavení vrstev) této metodiky. Důvody posunu osy Z jsou přiblíženy v následujícím textu.

Na obrázku 3-7 jsou zobrazeny dva způsoby vytvoření modelu, které se liší v umístění počátku souřadnicového systému. Počátek souřadnicového systému je umístěn na levé straně pod a na pravé straně nad vytvořeným modelem. Poloha tohoto bodu zůstane při exportu do *.STL zachována a při importu do 3D modulu (Obrázek 3-8) je tento bod (pohled do roviny XZ) proložen rovinou XY - v pohledu se jeví jako přímka. (Této skutečnosti zachování počátku souřadnicového systému ve 3D modulu bude využito pro polohování obrobku v laserovém zařízení – viz kapitola 3.6)

Rovina XY, protínající původní počátek, ukazuje, že model po levé straně má celý objem v kladných Z hodnotách (souřadnicích). V tomto případě nedojde k posunutí obrysu v ose Z, protože v následném kroku, ve kterém dojde k vygenerování vrstev (kapitola 3.3.5), bere tato funkce v potaz pouze kladné hodnoty osy Z.



Obrázek 3-7 Možnosti umístění počátku souřadnicového systému vůči modelu v CATIA V5

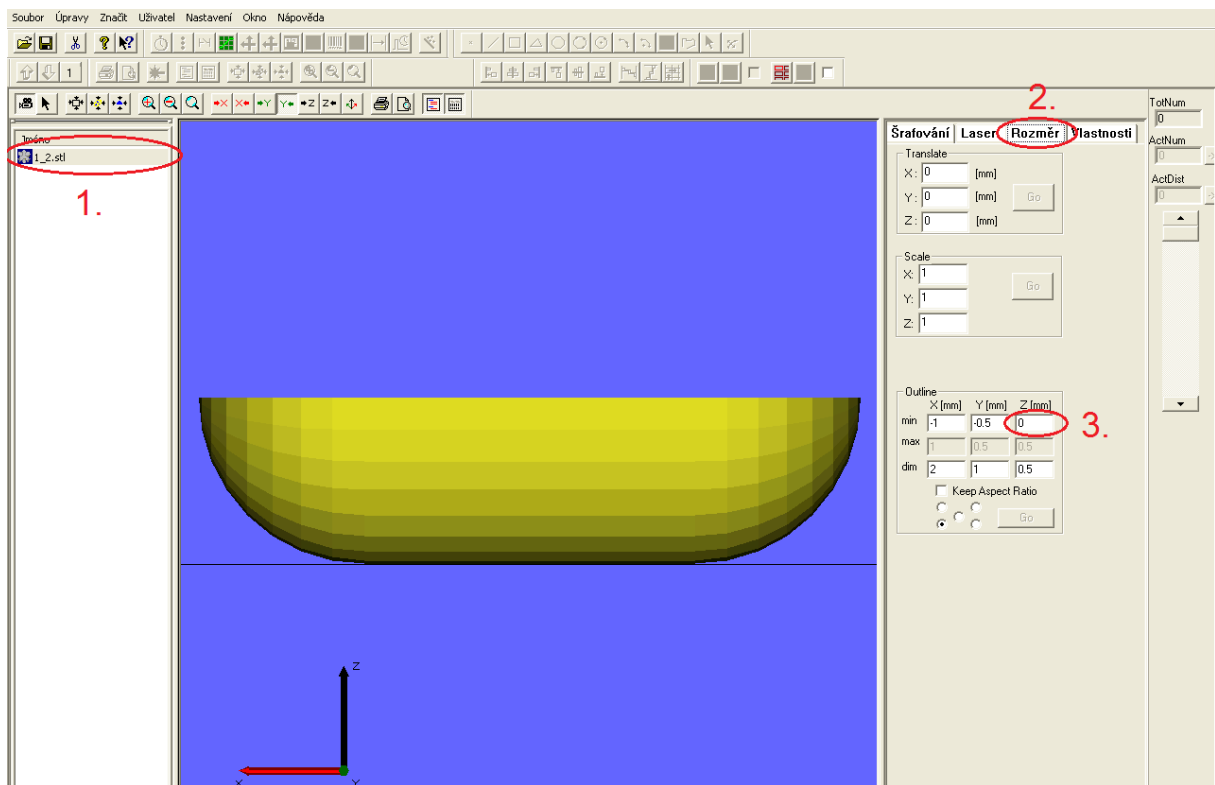


Obrázek 3-8 Importovaný model ve 3D SCAPSu (pohled do roviny XZ)

V případě modelu na pravé straně obrázku 3-8, který má kompletní objem v záporných Z hodnotách, by k vygenerování vrstev nedošlo, proto je nutné posunout obrys v Z ose nahoru o hodnotu, která je rovna celkové výšce importovaného modelu. Kdyby nedošlo k posunutí o celkovou výšku importovaného modelu, ale pouze např. o polovinu její celkové hodnoty (rovina XY by přesně půlila model), tak by vrstvy byly vygenerovány pouze v horní polovině modelu.

Posunutí obrysu má tedy výrazný význam i technologický a je možné jej provést následovně – viz obrázek 3-9:

1. v seznamu objektů se musí označit importovaný model, který chce programátor posunout
2. v listu vlastností entit se zvolí záložka **Rozměr**
3. v okně **Outline** se přepíše záporná hodnota Z_{\min} na $Z_{\min} = 0$ a potvrdí se tlačítkem Go



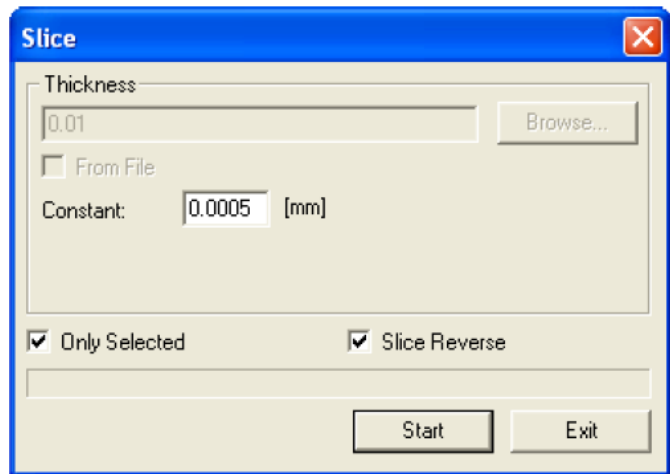
Obrázek 3-9 Posun obrysu geometrické entity

Tímto způsobem je zaručeno, že model bude v následující části metodiky kompletně rozdělen do vrstev.

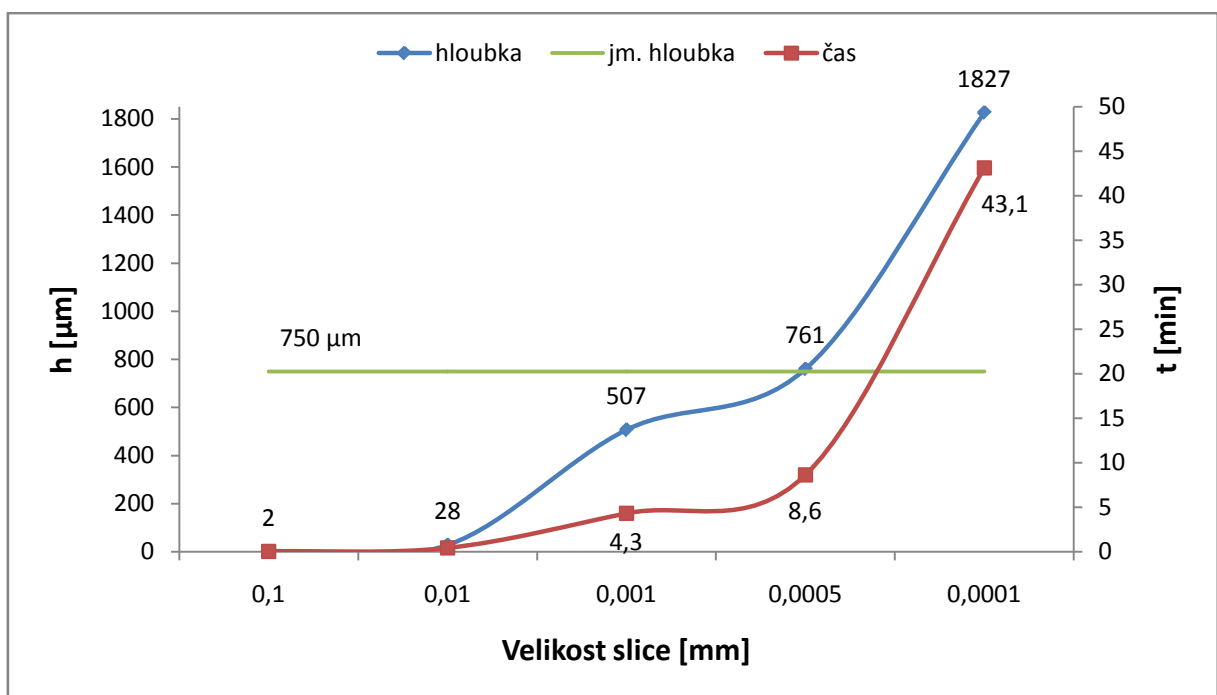
3.3.5 Nastavení vrstev

Mikroobrábění laserem pomocí tohoto 3D modulu funguje na principu rozdělení importovaného modelu na vrstvy, mezi kterými je uživatelem předepsána konstantní vzdálenost. Jedná se o integrovaný generátor vrstev, který pracuje s výškou modelu v ose Z. Tyto vrstvy a zobrazené povrchové kontury odebíraného objemu materiálu se následně vyplňují šrafy, které slouží jako dráha laserového paprsku. Princip mikroobrábění laserem lze tedy charakterizovat jako popisování (značení) materiálu způsobem vrstva po vrstvě.

Ke generování jednotlivých vrstev se použije dialogové okno **Slice**, které se nachází v nabídce **Úpravy** → **Slice**. Po otevření dialogového okna (Obrázek 3-10) se nastaví vzdálenost mezi vrstvami. Tento parametr se musí nastavit správně, protože značně ovlivňuje čas obrábění a konečnou hloubku vytvořeného útvaru v obrobku (Graf 3-2). Další nastavení dialogového okna je pole **Only Selected**, které rozvrství obsluhou vybrané modely. Dále se označí pole **Slice Reverse**. To zaručí, aby se vrstvy v modelu nevykreslovaly zespoda nahoru, ale opačným směrem. Po takto nastaveném dialogovém okně se spustí tlačítkem **Start** výpočet a po dokončení se okno uzavře tlačítkem **Exit**.



Obrázek 3-10 Dialogové okno - Slice

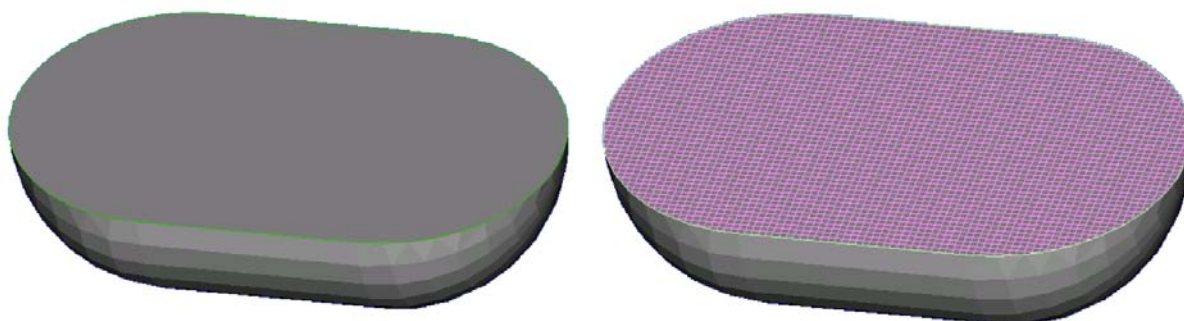


Graf 3-2 Závislost slice na hloubce

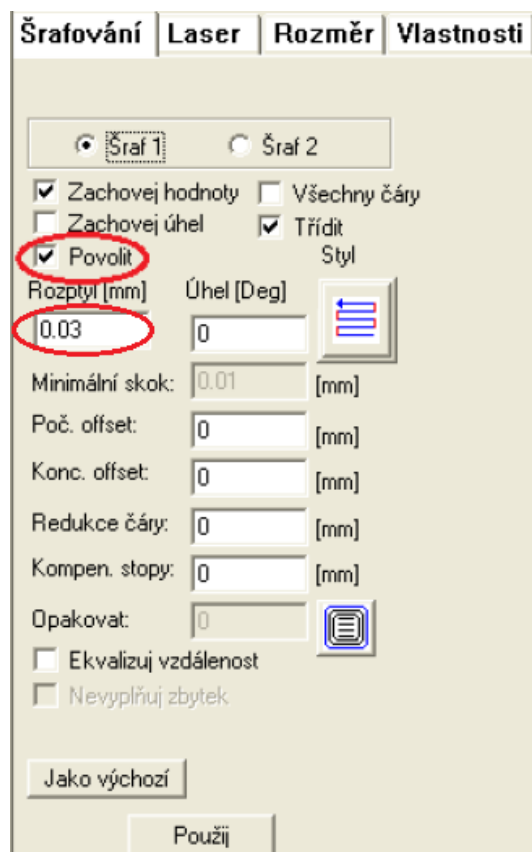
V grafu 3-2 je znázorněna experimentálně zjištěná závislost hloubky kruhového otvoru na velikosti slice. Tato závislost byla zjištěna mikroobráběním kruhového otvoru o rozměrech $D=1\text{mm}$ a $h=0,75\text{mm}$, při kterém byly použity konstanty zobrazené v tabulce 3-2.

Vygenerované vrstvy v podobě uzavřených kontur se v seznamu objektů vyskytnou jako samostatný prvek, který je nutné dále doplnit, (Obrázek 3-11 vlevo). Jejich doplnění se provádí pomocí šrafování.

K šrafování se v seznamu objektů označí nově vzniklý prvek. V listu vlastností entit se otevře záložka s názvem **Šrafování**, kde se musí **Šraf 1** povolit, a pak nastavit **Rozptyl** (Obrázek 3-12). Pro rozteč (**Rozptyl**) je doporučená hodnota 0,03mm. Po potvrzení tlačítkem **Použij** se obsluha přepne na volbu **Šraf 2**, kde nastaví totožné hodnoty vyjma úhlu, který se nastaví 90° - vzniká křížené šrafování. Po potvrzení volby Šraf 2 budou vrstvy vypadat podle obrázku 3-11 - vpravo.



Obrázek 3-11 Model s vygenerovanými vrstvami: vlevo - bez šrafování; vpravo - se šrafy



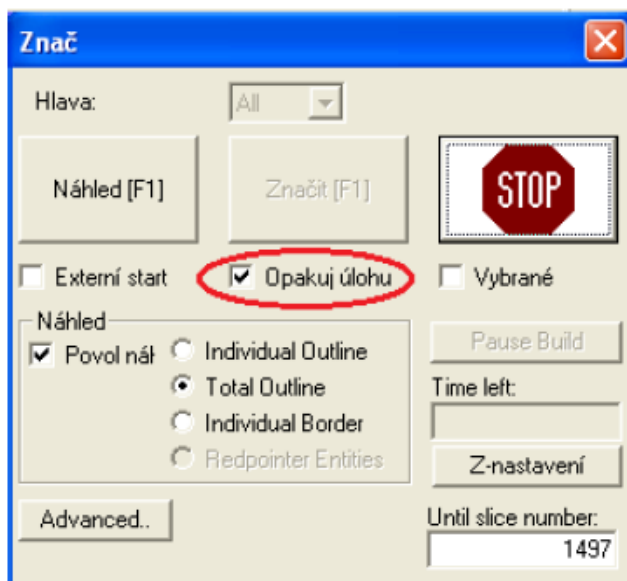
Obrázek 3-12 Nastavení šrafování (šraf č.1)

Graf	3-2
Materiál	K-55SF
P [W]	20
v_f [mm/s]	200
f_p [kHz]	20
Šrafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 0°
Šrafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 90°

Tabulka 3-2 Použité parametry

3.3.6 Nastavení procesu mikroobrábění

Po nadefinování výše uvedených kroků a procesních parametrů (kapitola 3.5) se zahájí samotný proces mikroobrábění. Procesní okno s názvem **Znač** (Obrázek 3-13) lze najít v nabídce **Značit** → **Start** nebo se může spustit klávesovou zkratkou **F2**. Aby bylo mikroobrábění proveditelné, musí se zaškrtnout pole **Opakuj úlohu**, jinak by byla obrobena pouze jedna vrstva a proces by se ukončil. Po stisknutí tlačítka **Náhled (F1)** se obrobek umístí do pracovního prostoru pod



Obrázek 3-13 Procesní okno "Znač"

laserový svazek, který promítá obrys obrobku do pracovního prostoru pod



Obrázek 3-14 PLC panel - Dvojruční ovládání

(kapitola 3.6) se v okně **Znač** zpřístupní tlačítko **Značit F1**. Nyní musí být zavřena bezpečnostní přepážka dvojručním ovládáním a poté se může spustit proces mikroobrábění (**F1**). Při laserovém mikroobrábění se spouštěcí ikona v okně **Znač** změní dle obrázku 3-15. Po ukončení mikroobrábění musí být bezpečnostní přepážka otevřena obsluhou.



Obrázek 3-15 Podoba procesního okna "Znač" během mikroobrábění

3.4 Charakteristika mikroobráběných materiálů

Pro úpravu geometrie byly vybrány dva řezné materiály ze slinutého karbidu, které mají označení TSM 33 a K-55SF. První ze jmenovaných je vyráběn firmou Ceratizit spadající dle ISO klasifikace do třídy K20 - K40. Velikost zrn karbidu wolframu (WC) je submikronová (0,5 - 0,8 μm). Tato třída je určena pro monolitní rotační nástroje, kterou lze obrábět nerezové oceli, žárovečné oceli, legované ocele Cr, Ni, Co, titanové slitiny, neželezné kovy a plasty. Informace o mechanických vlastnostech slinutého karbidu TSM 33 jsou uvedeny v tabulce 3-3.[2,3]

Druhý karbid, s označením K-55SF, vyrábí firma Konrad Friedrichs GmbH. Dle ISO klasifikace patří do třídy K10 - K30. Velikost zrn WC spadá do označení superfine (0,2-0,3 μm). Tento SK se doporučuje pro použití při vrtání a frézování např. vysoce otěruvzdorných materiálů, nerezových oceli, kompozitních materiálů - kevlar a GPR. Informace o mechanických vlastnostech slinutého karbidu K-55SF jsou uvedeny v tabulce 3-4.

Složení		Vlastnosti				
WC [%]	Co [%]	ρ [g/mm ³]	HRA	HV30	Vel. zrna [μm]	kardib. třída
89,5	10	14,5	91,9	1590	0,5 - 0,8	K20 - K40

Tabulka 3-3 Složení a mechanické vlastnosti slinutého karbidu TSM 33

Složení		Vlastnosti				
WC [%]	Co [%]	ρ [g/mm ³]	HRA	HV30	Vel. zrna [μm]	kardib. třída
91	9	14,4	93,9	1920	0,2 - 0,3	K10 - K30

Tabulka 3-4 Složení a mechanické vlastnosti slinutého karbidu K - 55SF

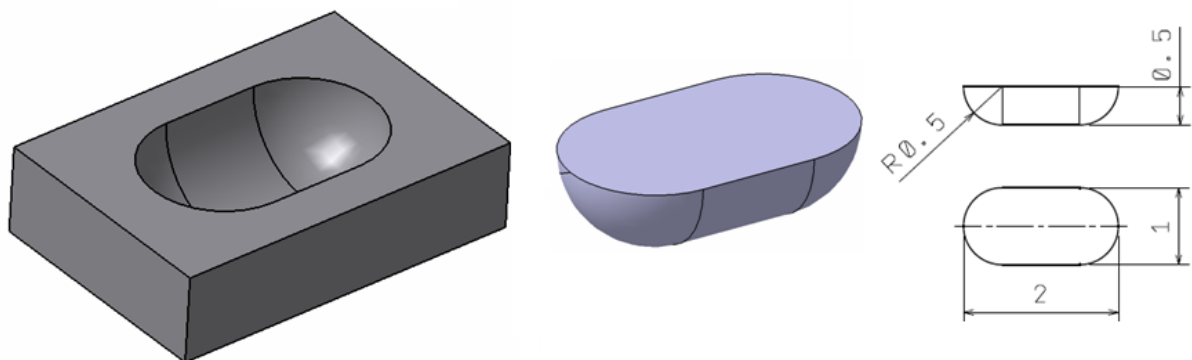
K těmto slinutým karbidům byl vybrán ještě polykrystalický diamant (PKD). Vzhledem k pořizovací ceně tohoto řezného materiálu nejsou získány konkrétní závislosti procesních parametrů, jako tomu je u obou slinutých karbidů v kapitole 3.5. Procesní parametry byly zvoleny na základě zkušeností diplomanta.

3.5 Nastavení parametrů laseru

Celkové nastavení laserového přístroje je velice komplexní záležitostí. Tyto možnosti nastavení lze hrubě rozdělit do dvou kroků. Prvním je oblast nastavení, tzv. strategie pohybu laserového svazku, kde je možné považovat nastavení vrstev a šrafů v importovaném modelu (kapitola 3.3.5). Druhým pak je nastavení, kam lze zařadit vlastnosti výstupního laserového svazku, který je přímo v interakci s materiálem obrobku. Do této oblasti spadají parametry výkonu P , skenovací rychlosti rozmítací hlavy v_f a frekvence pulzu f_p . Těmito parametry ovlivňující laserový paprsek se procesně ladí rozměr v ose Z a drsnost povrchu obrobenej plochy, proto jsou důležité pro docílení tvarové přesnosti a kvality povrchu.

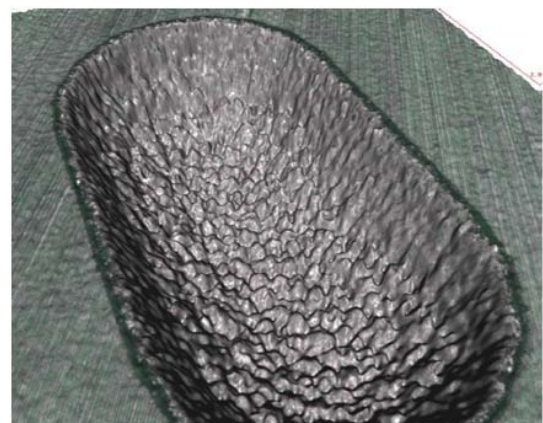
3.5.1 Tvarová přesnost

K dosažení tvarové přesnosti byla zvolena jednoduchá geometrická entita (Obrázek 3-16), která by měla sloužit k odladění tvaru.



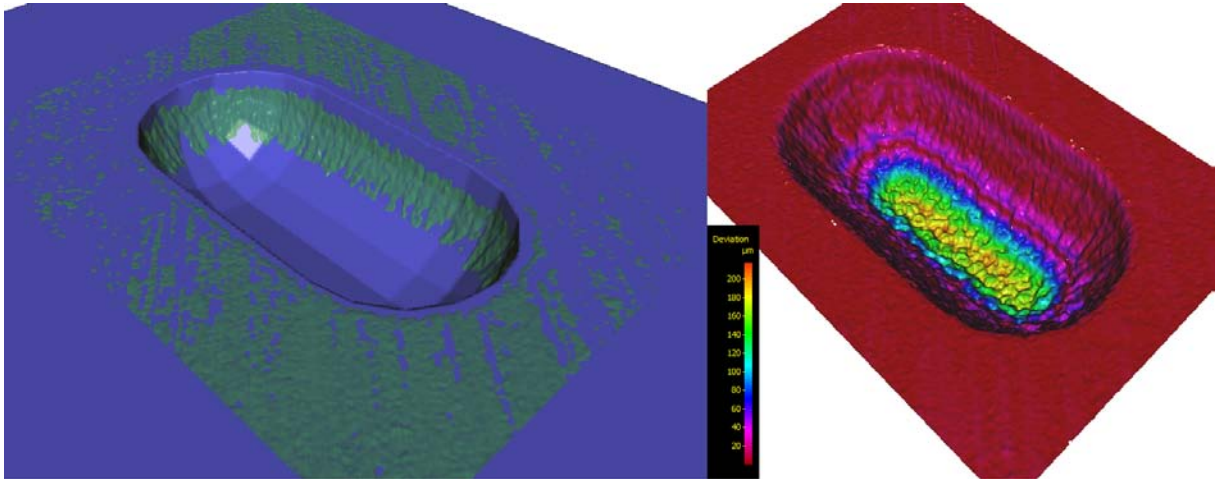
Obrázek 3-16 Geometrické entity: vlevo pro mikroskop; vpravo pro laserové zařízení + rozměry požadovaného tvaru

Na obrázku 3-16- vlevo je zobrazen model, ve kterém je demonstrován ideální tvar po obrobení laserem. Tento model byl vytvořen pro měřicí přístroj IFM G4 zn. Alicona (příloha č. 1) a bude sloužit ke zjištění velikosti tvarové odchylky. Po importování tohoto modelu s ideálním tvarem (import ve formátu *.STL) do měřicího přístroje se získá referenční model, od kterého bude tvarová odchylka počítána s pomocí interního modulu pro hodnocení diferenční analýzy. Tvar modelu na obr. 3-16 vpravo je od modelu vlevo tvarově negativní a slouží pro 3D modul laserového zařízení. Po procesu mikroobrábění se naskenuje vytvořený tvar v obrobku (Obrázek 3-17) výše uvedeným měřicím přístrojem.



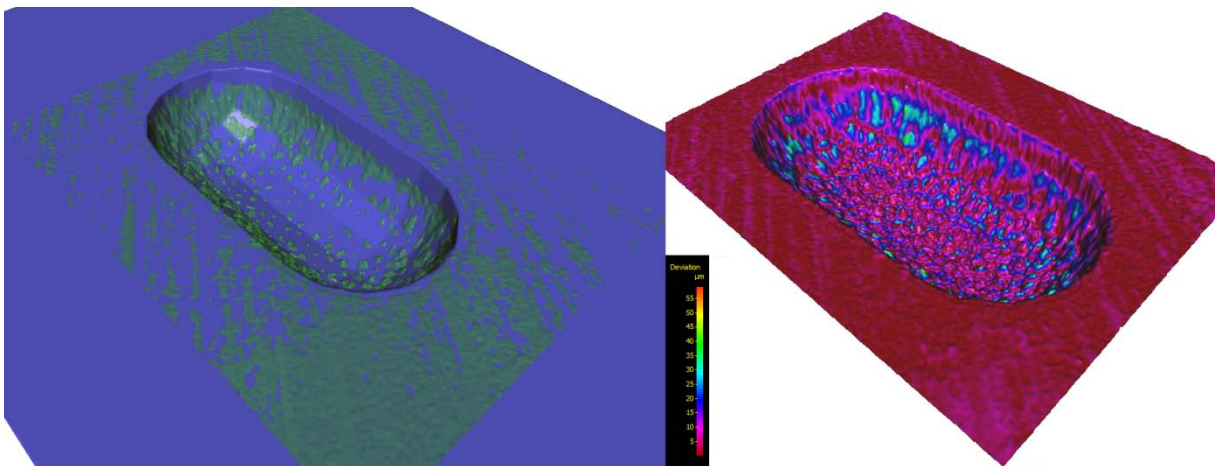
Obrázek 3-17 Scan vytvořeného tvaru

V této fázi se provede diferenční analýza (Obrázek 3-18 a 3-19), ve které se proloží reálný scan (zelený) s referenčním modelem (fialový). Poté, co se tyto barevné modely srovnají, se vyhodnotí diferenční měření, které používá pseudo zabarvení reálného tvaru prezentující odchylky od ideální tvaru dle zobrazené legendy (červená barva zde udává nulovou odchylku tvaru, jiná barva vykazuje dle legendy určitou hodnotu odchylky - Obr 3-21; žlutá = 180 μ m).



Obrázek 3-18 Maximální / průměrná odchylka:

217,48 μ m / 21,60 μ m



Obrázek 3-19 Maximální / průměrná odchylka:

59,03 μ m / 6,15 μ m

Obrázek	3-21
Materiál	K-55SF
P [W]	20
v_f [mm/s]	120
Slice [mm]	0,0005
f_p [kHz]	20
Šrafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 0°
Šrafy č. 2 [rozptyl; úhel]	0,03; 90°

Tabulka 3-5 Použité parametry

Obrázek	3-22
Materiál	K-55SF
P [W]	20
v_f [mm/s]	200
Slice [mm]	0,0005
f_p [kHz]	20
Šrafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 0°
Šrafy č. 2 [rozptyl; úhel]	0,03; 90°

Tabulka 3-6 Použité parametry

Z vyhodnocení obou diferenčních měření jsou patrné různé odchylky od reálného tvaru. Tvar zobrazený v obrázku 3-18 byl vyhodnocen s maximální odchylkou 217,48 μm a průměrnou hodnotou odchylky 21,60 μm . Tyto výsledné odchylky jsou vysoké, nedostačující a nesplňují požadavky z kapitoly 1.1. Zato zobrazený tvar v obrázku 3-19 má již nižší odchylky, konkrétně 59,03 μm (maximální); 6,15 μm (průměrná). Tyto hodnoty jsou již uspokojivé. Tyto vzniklé difference pocházejí z rozdílných nastavení parametrů (tabulky 3-5; 3-6). Z těchto nastavení je patrné, že změna skenovací rychlosti rozmítací hlavy v_f ovlivnila výslednou hloubku, protože ostatní parametry zůstaly konstantní. Kvůli této skutečnosti byl vytvořen další experiment, který měl zjistit vliv skenovací rychlosti v_f a frekvence pulzů f_p na výsledné hloubce obrobeneho zkušebního modelu.

3.5.2 Nastavení procesních parametrů pro dosažení tvarové přesnosti

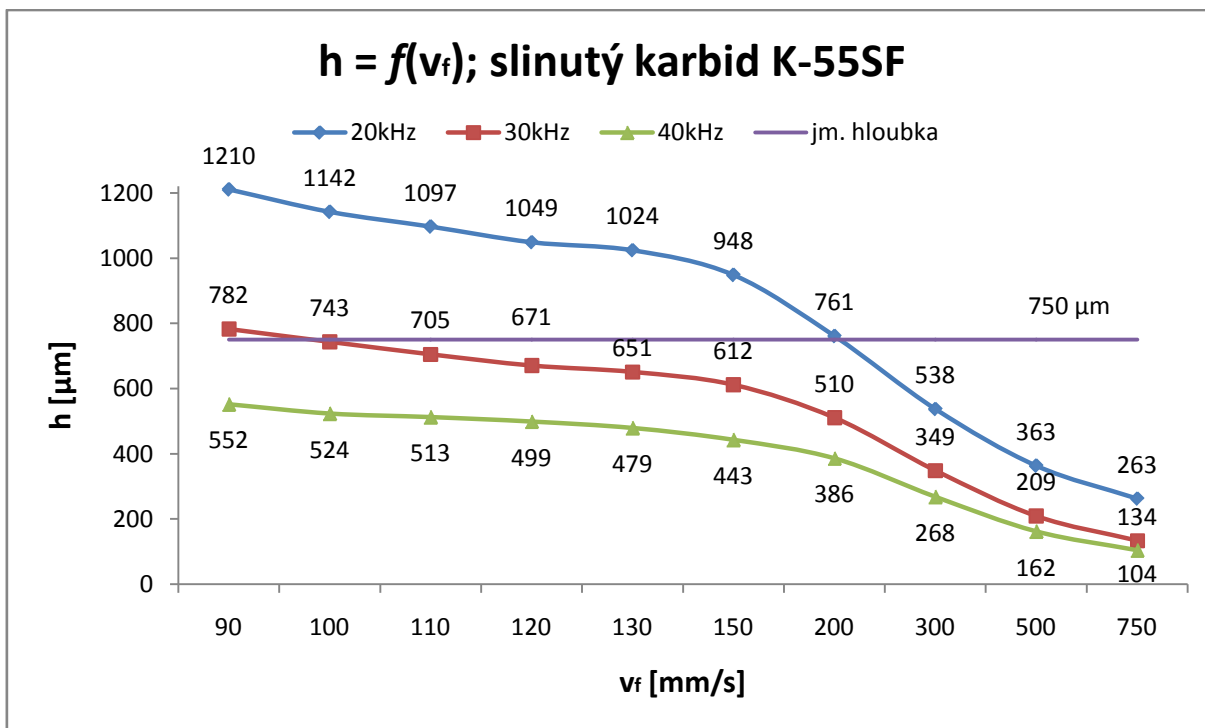
Výsledný rozměr v ose Z lze výrazně ovlivnit třemi parametry. Jedná se o velikost vrstvy (Slice - Graf 3-2), skenovací rychlost rozmítací hlavy v_f a frekvenci pulzu f_p . Pro výše uvedené materiály (kapitola 3.4) byl proveden experiment, který poskytne informace o vlivu skenovací rychlosti v_f a frekvence pulzu f_p na výslednou hloubku h . Po provedení experimentu byl vyhodnocen graf 3-3 a 3-4. Grafy vychází z obrobení kruhového otvoru o rozměrech $D=1\text{mm}$; $h=0,75\text{mm}$. Pro každý vynesení bod v grafu byl vytvořen otvor o příslušné v_f (osa X) a f_p (křivky). V grafech se vyskytují tři křivky a jedna přímka. Křivky prezentují konstantní hodnotu nastavení frekvence pulzů ($f_p = 20\text{kHz}$; 30kHz a 40kHz - viz legenda v grafech). Přímka ukazuje jmenovitou hloubku, která ukazuje správnou hloubku požadovaného otvoru ($h = 750\mu\text{m}$). Průsečíky přímky s křivkami tedy představují správná nastavení skenovací rychlosti a frekvence pulzů pro docílení jmenovité hloubky. Z těchto průsečíků plyne, že při nastavení parametru $f_p=40\text{kHz}$ nelze dosáhnout požadované jmenovité hloubky 750 μm . Z grafů 3-3; 3-4 vyplývají závislosti změny hloubky na nastavení procesních parametrů v_f a f_p :

- Při vyšších hodnotách skenovací rychlosti klesá výsledná hloubka otvoru ($\uparrow v_f \Rightarrow \downarrow h$)
- Při vyšších hodnotách frekvence pulzů klesá výsledná hloubka otvoru ($\uparrow f_p \Rightarrow \downarrow h$)

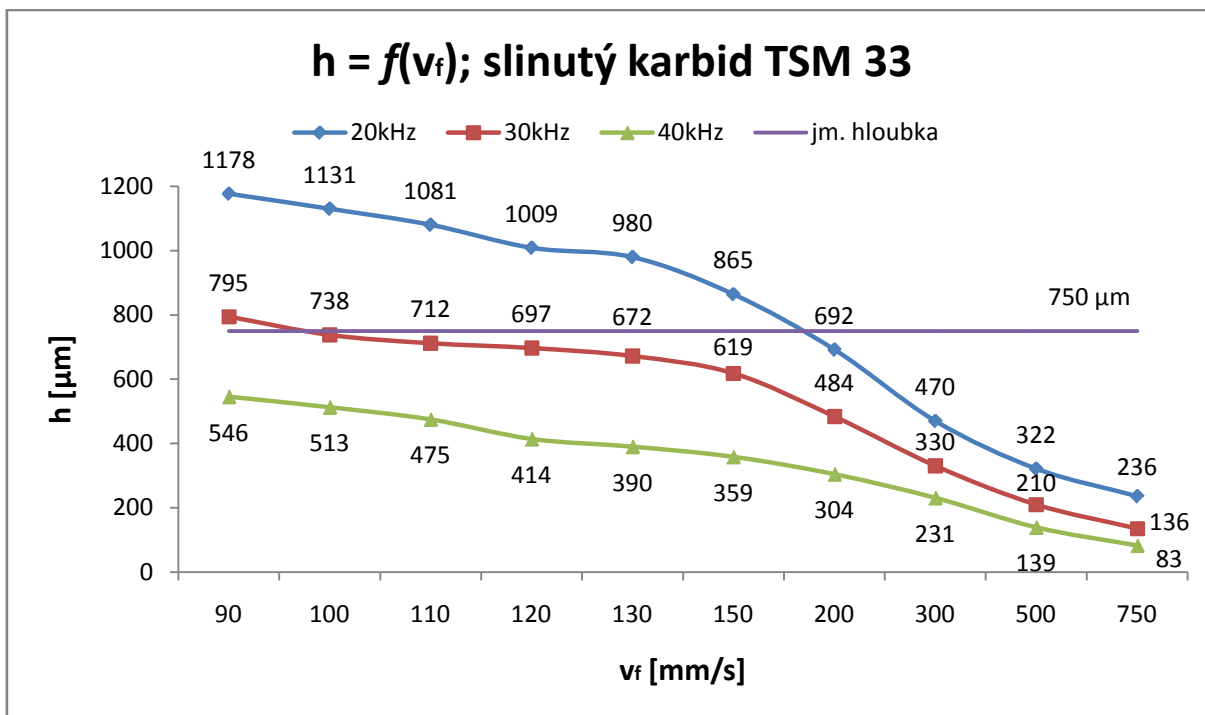
Graf	3-3; 3-4
P [W]	20
Slice [mm]	0,0005
Šrafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 0°
Šrafy č. 2 [rozptyl; úhel]	0,03; 90°

Tabulka 3-7 Použité parametry

Níže uvedené grafy platí při nastavení zbývajících parametrů dle tabulky 3-7 a dodržení hloubky $h=750\mu\text{m}$ u importovaného modelu.



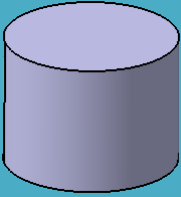

Graf 3-3 h=f(v_f); slinutý karbid K-55SF



Graf 3-4h=f(v_f); slinutý karbid TSM 33

Při obrobení tvaru, který má jiný rozměr v ose Z ($h \neq 750\mu\text{m}$), se musí provést přepočet, aby bylo možné použít uvedené grafy. Při obrobení jiného tvaru, který by měl hloubku např. $h=500\mu\text{m}$, vstupuje do hry ještě další parametr slice (tabulka 3-8).

Pro bližší vysvětlení a přepočítání výsledné hloubky jiného modelu může sloužit vytvořený tvar z obrázku 3-22 s výslednou hloubkou $h=500\mu\text{m}$, který byl obroben dle parametrů zobrazených v tabulce 3-6. Tvarové přesnosti (průměrná odchylka $6,15\mu\text{m}$) bylo docíleno při $v_f=200\text{mm/s}$, ale z grafu 3-3, který byl vytvořen na otvoru o hloubce $h=0,75\text{mm}$, vyplývá, že by pro dosažení požadované hloubky $h=0,5\text{mm}$ (při $f_p=20\text{kHz}$) stačila rychlost $v_f=300-350\text{mm/s}$. Zde tomu tak není, kvůli rozdílným výškám jednotlivých modelů (vysvětleno v tabulce 3-8).

	
$h=0,75\text{mm}$	$h=0,5\text{mm}$
Konstanty: Slice = 0,0005 mm; slinutý karbid K-55SF	
$S_{\text{válec}} = \frac{0,75 [\text{mm}]}{0,0005 [\text{mm}]} = 1500$	$S_{\text{žlábek}} = \frac{0,5 [\text{mm}]}{0,0005 [\text{mm}]} = 1000$
$L_{200/20 \text{ válec}} = \frac{761 [\mu\text{m}]}{1500} = 0,507 [\mu\text{m}]$	$L_{200/20 \text{ žlábek}} = \frac{506 [\mu\text{m}]}{1000} = 0,506 [\mu\text{m}]$
S = počet vrstev v modelu	
$L_{200/20}$ = úběr materiálu v jedné vrstvě [μm] při $v_f=200\text{mm/s}$ a $f_p=20\text{kHz}$	

Tabulka 3-8 Vliv odlišné výšky modelů na počtu vrstev

Rozdíl nastává při zachování konstantní velikosti slice, kdy válec (použitý na vytvoření otvoru) má celkem 1500 vrstev a žlábek má pouhých 1000 vrstev. Jediným parametrem, který je rovný pro oba dva modely je úběr odpařeného materiálu na jednu vrstvu při totožné skenovací rychlosti v_f a frekvenci pulzu f_p .

Možnosti dosažení požadované hloubky libovolného modelu (např. žlábků) jsou:

1. Slice $\neq 0,0005\text{mm}$; S = 1500

Při nastavení stejného počtu vrstev S jako má model válce v grafech 3-3, popř. 3-4, se lze orientovat přímo pomocí grafů.

$$Slice_{\text{žlábek}} = \frac{\text{výška modelu v mm}}{\text{počet vrstev S}} = \frac{0,5}{1500} = 0,000\bar{3}\text{mm} \quad (6)$$

Po nastavení této velikosti vrstvy lze dosáhnout hloubky $h=0,5\text{mm}$ při $f_p=20\text{kHz}$ a $v_f=300-350\text{mm/s}$ dle grafu 3-3 (pro K-55SF).

2. Dle úběru materiálu na 1 vrstvu

V tomto případě se vezmou hodnoty jednotlivých hloubek z grafů 3-3 a 3-4, které se vydělí počtem vrstev ($S=1500$) a vypočte se parametr $L_{vf/fp}$ (Tabulka 3-9). Tento parametr pomůže získat přehled o ablaci materiálu v jedné vrstvě při konkrétně zadaných hodnotách v_f a f_p .

$L_{vf/fp} [\mu\text{m}]$		K-55SF			TSM33		
		f_p [kHz]					
		20	30	40	20	30	40
v_f [mm/s]	90	0,8068	0,5214	0,3679	0,7851	0,5300	0,3638
	100	0,7612	0,4955	0,3491	0,7537	0,4919	0,3420
	110	0,7310	0,4702	0,3419	0,7206	0,4747	0,3168
	120	0,6993	0,4471	0,3328	0,6725	0,4648	0,2761
	130	0,6829	0,4342	0,3195	0,6533	0,4482	0,2600
	150	0,6322	0,4078	0,2953	0,5766	0,4125	0,2393
	200	0,5072	0,3402	0,2575	0,4613	0,3223	0,2028
	300	0,3585	0,2327	0,1789	0,3135	0,2203	0,1539
	500	0,2423	0,1394	0,1081	0,2147	0,1403	0,0928
	750	0,1751	0,0895	0,0696	0,1570	0,0905	0,0553

Tabulka 3-9 Hodnoty $L_{vf/fp}$

Hodnoty $L[\mu\text{m}]$ z této tabulky prezentují tloušťku vrstvy - slice $[\mu\text{m}]$, kde při splnění rovnosti těchto parametrů lze docílit požadované hloubky jakéhokoliv tvaru modelu. Pro jasnější pochopení zde budou uvedeny možné příklady užití tabulky 3-9.

Př. 1

Dáno:

Slinutý karbid:	K-55SF
Hloubka požadovaného tvaru:	$h = 0,5\text{mm}$
Velikosti vrstvy	$\text{Slice} = 0,0005\text{mm} = 0,5\mu\text{m}$
Podmínka rovnosti parametrů	$\text{Slice} [\mu\text{m}] = L_{vf/fp} [\mu\text{m}]$
Obsluha má na výběr:	$L_{200/20} = 0,5072\mu\text{m}$
(dle tabulky 3-9)	$L_{100/30} = 0,4955\mu\text{m}$

Obsluha pro získání výsledné hloubky $h=0,5\text{mm}$ s použitím velikosti vrstvy $0,0005\text{mm}$ musí použít pro slinutý karbid K-55SF hodnoty procesních parametrů $v_f = 200\text{mm/s}$ a $f_p=20\text{kHz}$ nebo $v_f=100\text{mm/s}$ a $f_p=30\text{kHz}$.

Př. 2

Dáno:

Slinutý karbid:	TSM 33
Hloubka požadovaného tvaru:	$h = 0,4\text{mm} = 400\mu\text{m}$
Procesní parametry:	$v_f = 120\text{mm/s}$
	$f_p = 30\text{kHz}$

Podmínka rovnosti parametrů **Slice [μm] = L_{v_f/f_p} [μm]**

z tabulky 3-9 $L_{120/30} = 0,4648 \mu\text{m}$

→ $\text{Slice} = 0,4648\mu\text{m} = 0,0004648\text{mm}$

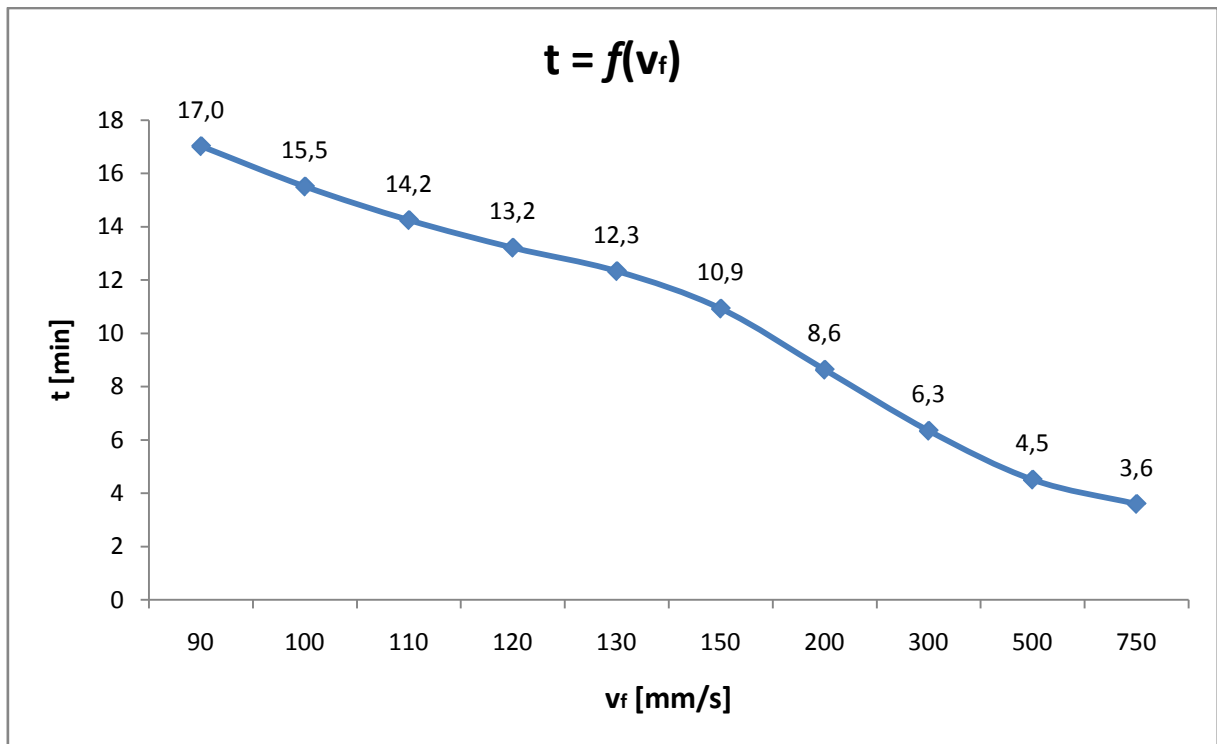
Obsluha pro získání výsledné hloubky $h=0,4\text{mm}$ s použitím procesních parametrů $v_f = 120\text{mm/s}$ a $f_p = 30\text{kHz}$ musí použít pro slinutý karbid TSM33 hodnotu velikosti vrstvy **Slice = 0,0004648mm.**

Kontrola:

$$S = \frac{\text{hloubka} [\mu\text{m}]}{L_{120/30} [\mu\text{m}]} \cong 861 \quad h = S \cdot \text{Slice} [\text{mm}] = 861 \cdot 0,0004648 = 0,4\text{mm}$$

V praxi může dojít k určitým diferencím mezi zvolenými hodnotami L_{v_f/f_p} (z tabulky 3-9) a výslednou hloubkou tvaru (odchylka cca $\pm 30\mu\text{m}$). Tato nepřesnost vyplývá z faktu, že se vlivem změny teploty, během mikroobrábění laserem, mění vlastnosti materiálu a to zejména absorpivita, která roste se zvyšující se teplotou (viz kapitola 2.3). Z tohoto důvodu, je-li to možné, se musí příslušný tvar odzkoušet (mikroobrobit laserem a naskenovaný výsledek podrobit diferenční analýze) na stejném materiálu obrobku, na kterém obsluha bude chtít mikroobrobit požadovaný tvar.

Z výše uvedených grafů (3-3 a 3-4) si lze všimnout ještě jedné závislosti. Zde se jedná o parametr frekvence pulzů f_p . Z grafů lze vyvodit závislost, že se zvyšující se frekvencí při dodržení konstantní rychlosti klesá hloubka požadovaného tvaru (Obrázek 3-23). Nižší hloubku lze odstranit snížením rychlosti v_f . Tato změna v_f ovlivňuje čas mikroobrábění t (Graf 3-5), který se prodlužuje. Další závislostí, která je pro oba slinuté karbidy odvozená z grafů 3-3, 3-4 a 3-5, je úběr materiálu za jednotku času $U[\text{mm}^3/\text{min}] = f(v_f)$. Tyto grafy jsou přiloženy v kapitole č. 5.

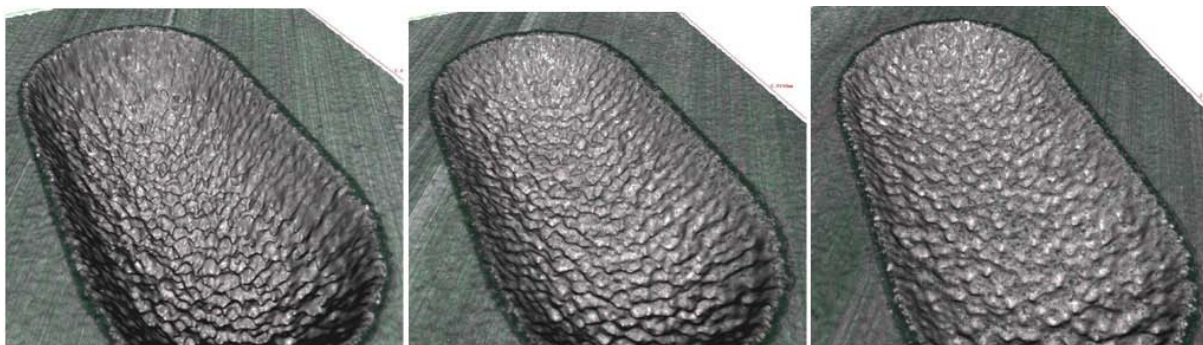


Graf 3-5 $t=f(v_f)$

3.5.3 Nastavení frekvence pulzu f_p pro dosažení drsnosti povrchu [1]

Tato kapitola je zaměřena na parametr f_p , který ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu. Výše uvedené tvrzení o snižující se hloubce souvisí s prahovou hodnotou laserové ablace I_{ea} . Během procesu ablace materiálu musí intenzita laserového paprsku I [GW/cm²] (výkon laseru na jednotku plochy) překročit prahovou hodnotu I_{ea} . Intenzita laserového paprsku I je ovlivněna zejména frekvencí pulzů f_p , která určuje pulzní špičkový výkon laserového zdroje. Prahová hodnota I_{ea} omezující použitelnost vyšších frekvencí pulzů pro ablaci materiálu je ovlivněna celou řadou materiálových vlastností a typem laserového zdroje. Ze strany mikroobráběného materiálu se jedná především o absorpční koeficient, tepelnou vodivost, teplotní vodivost, teplotu materiálu, teplotu tavení, teplotu odpařování (ablace) materiálu a entalpii odpařování. Ze strany laserového zdroje se jedná o průměr laserového svazku a celkový charakter pulzního laserového paprsku (ns; ps; ...).

Pro frekvenci pulzu $f_p > 40$ kHz intenzita klesne pod prahovou hodnotu laserové ablace [32]. Z tohoto důsledku nelze použít $f_p > 40$ kHz pro úpravu břitů rezných nástrojů. Odhad minimální požadované intenzity laseru lze ověřit změnou frekvence pulzu (Obrázek 3-20), kde byla zároveň pozorována kvalita drsnosti povrchu (Graf 3-6), která se se zvětšujícím parametrem f_p zlepšovala. ($\uparrow f_p \Rightarrow \downarrow R_a; R_z$).



Obrázek 3-20 Různé kvality povrchů při změně f_p

Materiál	K-55SF
P [W]	20
v_f [mm/s]	200
Slice [mm]	0,0005
f_p [kHz]	20
$h_{jm.}$ [mm]	0,5
h [mm]	0,506
Šrafy č. 1	0,03; 0°
Šrafy č. 2	0,03; 90°

Tabulka 3-10 Použité parametry

Materiál	K-55SF
P [W]	20
v_f [mm/s]	200
Slice [mm]	0,0005
f_p [kHz]	30
$h_{jm.}$ [mm]	0,5
h [mm]	0,340
Šrafy č. 1	0,03; 0°
Šrafy č. 2	0,03; 90°

Tabulka 3-11 Použité parametry

Materiál	K-55SF
P [W]	20
v_f [mm/s]	200
Slice [mm]	0,0005
f_p [kHz]	40
$h_{jm.}$ [mm]	0,5
h [mm]	0,258
Šrafy č. 1	0,03; 0°
Šrafy č. 2	0,03; 90°

Tabulka 3-12 Použité parametry

kde: h_{jm} - jmenovitá hloubka

h - dosažená hloubka

Pro každý obrobený tvar v obrázku 3-20 přísluší níže uvedená tabulka s použitými parametry. Z těchto parametrů je zřejmé, že pro obrobení těchto žlábků byl změněn pouze parametr f_p . Zde je patrné, že při zvětšování hodnoty f_p klesá obrobená hloubka žlábků. Tato skutečnost již vyplývá z grafů 3-3; 3-4. Z obrázku 3-20 je i pozorovatelné zlepšení drsnosti povrchu, které je řešeno v následujícím textu.

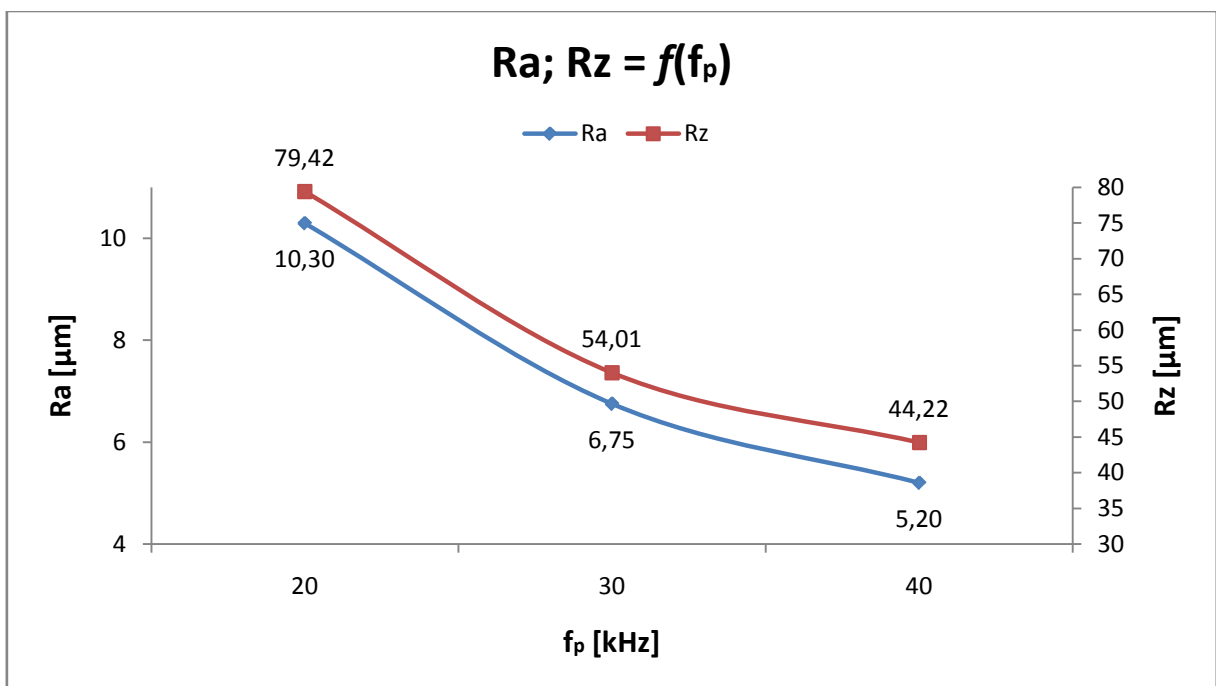
Graf 3-6 zobrazuje hodnoty drsnosti povrchu R_a a R_z , které byly naměřeny na slinutém karbidu K-55SF. Závislost v grafu 3-6 byla zjištěna mikroobráběním drážky v materiálu K-55SF o rozměrech 14x0,8x0,75(hloubka), při které byly použity konstanty zobrazené v tabulce 3-13. V případě změny parametru

Graf	3-6
Materiál	K-55SF
P [W]	20
v_f [mm/s]	200
Slice [mm]	0,0005
Šrafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 0°
Šrafy č. 2 [rozptyl; úhel]	0,03; 90°

Tabulka 3-13 Použité parametry

f_p se zde musí počítat s několika skutečnostmi, které už byly popsány v kapitole 3.5.2,

konkrétně v příkladu č.1. Zde má programátor pro dosažení hloubky $h=500\mu\text{m}$ dvě možnosti nastavení procesních parametrů. Buď nastaví procesní parametry na $v_f = 200\text{mm/s}$ a $f_p=20\text{kHz}$ nebo $v_f=100\text{mm/s}$ a $f_p=30\text{kHz}$. Při první zvolené možnosti bude ve tvaru žlábků drsnost kolem $R_a=10\mu\text{m}$ a $R_z=80\mu\text{m}$ (graf 3-6), tento tvar bude při rychlosti $v_f = 200\text{mm/s}$ vytvořen za $t = 8,6\text{min}$ (dle grafu 3-5). V případě nastavení druhé možnosti se docílení požadované hloubky podaří a drsnost v žlábků bude necelých $R_a=7\mu\text{m}$ a $R_z=55\mu\text{m}$. Při této rychlosti (100mm/s) bude tvar obrobek za $t = 15,5\text{min}$, což znamená, že tvar žlábků s nepatrně lepší kvalitou drsnosti ($R_a 10 \rightarrow 7\mu\text{m}$; $R_z 80 \rightarrow 55\mu\text{m}$), se bude obrábět o 1,8x déle než žlábků s horší kvalitou povrchu.

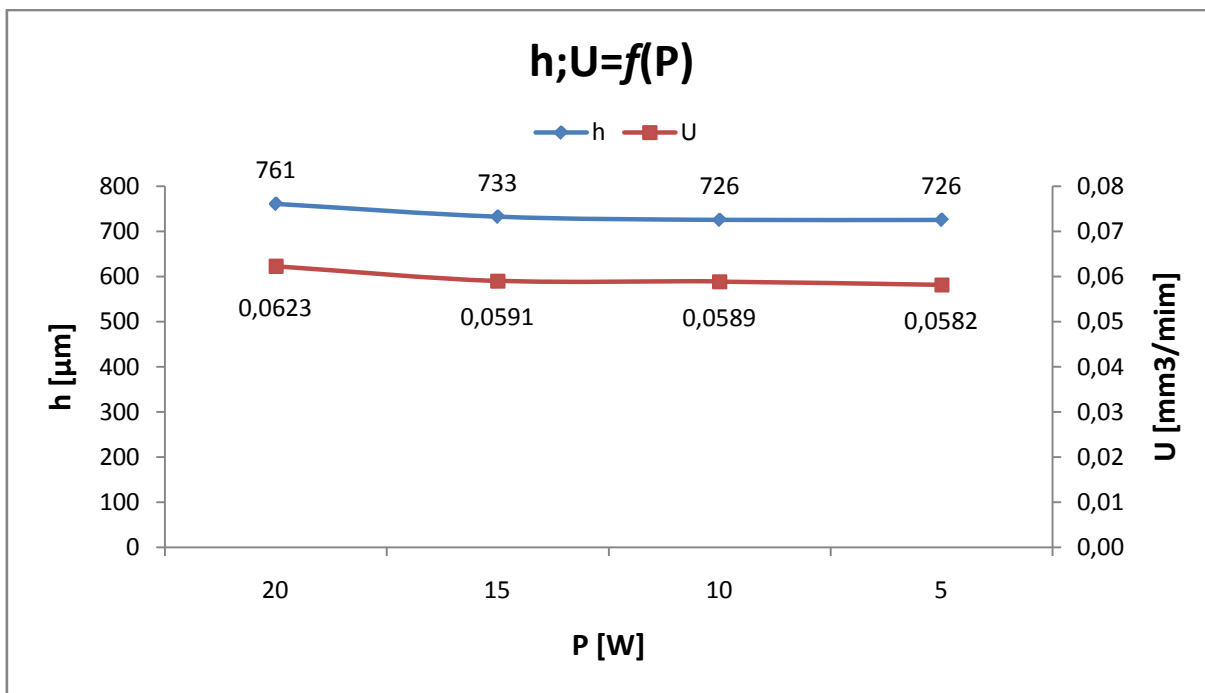


Graf 3-6 $R_a; R_z = f(f_p)$; slinutý karbid K-55SF dle ISO 4287

Bohužel tyto dosažené hodnoty drsnosti vytvořeného povrchu nekorespondují s požadavky, které jsou specifikované v kapitole 1.1. I přes tyto nedostačující hodnoty bude vytvořen experiment, který ověří ostatní kroky potřebné k vytvoření úpravy bříty.

3.5.4 Vliv parametru výkonu P na drsnost a hloubku

Pro ucelené informace je zde uveden poslední procesní parametr P [W], u kterého byl zjišťován vliv na hloubku (graf 3-7) a drsnost výsledného povrchu. Pro tyto závislosti byly vytvořeny drážky o rozměrech $4 \times 0,8 \times 0,75$ (hloubka). Při zjišťování závislostí byly použity konstantní parametry uvedené v tabulce 3-14. Vyhodnocení změny drsnosti povrchu zde není ukázáno, protože nedošlo k žádným změnám. Hodnoty drsnosti byly u všech měření shodné, jako prezentují výsledky z grafu 3-6 při $f_p=20\text{kHz}$.



Graf 3-7 h; U = f(P); slinutý karbid K-55SF

Z tohoto grafu lze usoudit, že změna výkonu má minimální vliv na změnu hloubky, proto se obsluha tímto parametrem nemusí zabývat a nechá ho na maximální možné hodnotě P=20W.

Graf	3-7
Materiál	K-55SF
v_f [mm/s]	200
Slice [mm]	0,0005
f_p [kHz]	20
Šrafy č. 1 [rozptyl; úhel]	0,03; 0°
Šrafy č. 2 [rozptyl; úhel]	0,03; 90°

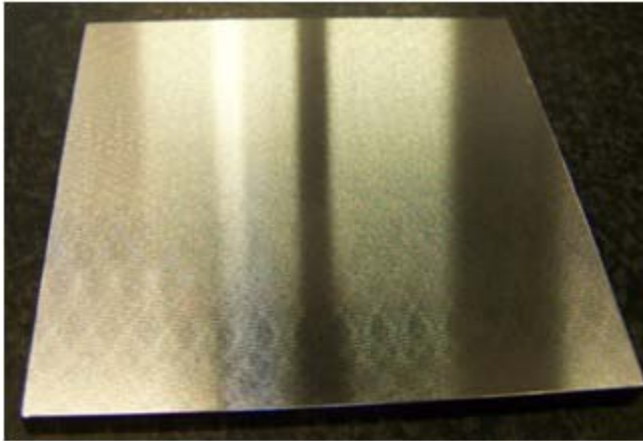
Tabulka 3-14 Použité parametry

3.6 Polohování geometrických entit na břitech nástrojů

Umístění detailů na břitech nástrojů je charakterizováno vysokou přesností. Naopak na popisování výrobků není kladen velký požadavek výsledné polohy. Z tohoto důvodu se do pracovních prostorů popisovacích laserů neinstalují taková zařízení, která by umožnila zaměřit např. hranu ostří VBD pomocí kamerového systému s následnou automatickou korekcí v souřadném systému tzv. virtuálního pracovního prostoru. Výsledkem této funkcionality by bylo ztotožnění umístění virtuálního modelu k mikroobrábění se skutečným reálným v pracovním prostoru laseru.

3.6.1 Polohovací přípravek

Pro tento účel byl navržen polohovací přípravek na VBD, který je vytvořen z obyčejné konstrukční oceli. Jedná se o destičku o rozměrech 100x100,tl.5 (Obrázek 3-21), která je na obou plochách zabroušena na $R_a=0,8\mu\text{m}$. Výkresová dokumentace je přiložena v příloze č. 2.



Obrázek 3-21 Polohovací přípravek

Na přípravku je důležité dodržení rovnoběžnosti ploch, protože se na přípravku bude umísťovat VBD. Záměr použití přípravku je v tom, že v pracovním prostoru laserového zařízení se vytvoří dorazy, které zajistí polohovacímu přípravku opakovatelnou polohu vložení (Obrázek 3-25; červený obrys). Dorazy jsou tvořeny úhelníkem, který je připevněn upínkami, dále rotační jednotkou

a dvěma prizmaty. Myšlenka na návrh přípravku vychází z kapitoly 3.3.4, kde bylo zjištěno zachování polohy bodů během exportu z CAD/CAM systému CATIA V5 do 3D modulu laseru. Pro polohování fyzické VBD se tato vlastnost plně využije. Pomocí CAD/CAM systému CATIA V5 se vymodeluje model VBD zároveň s pomocnými prvky, které si při exportu do *.STL formátu zachovají svou prostorovou polohu.

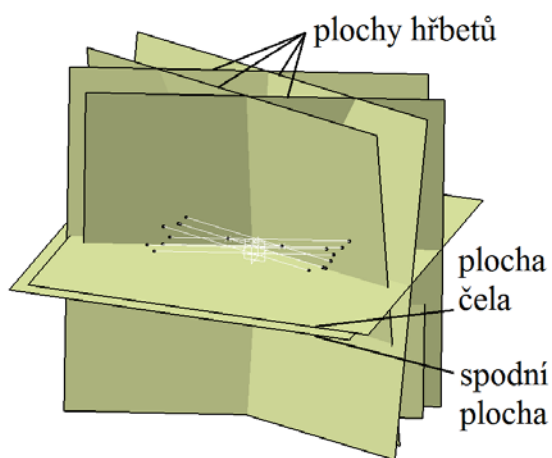
Mezi tyto pomocné prvky spadá lůžko s odlehčením, které se obrobí do polohovacího přípravku. Do obrobeného lůžka v přípravku se již uloží fyzická VBD a tím je přesně definována poloha. Následující podkapitola podrobně popisuje tvorbu modelu VBD s pomocnými prvky.



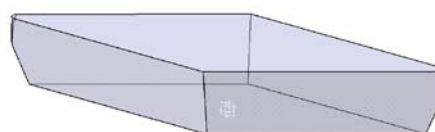
Obrázek 3-22 Uložení přípravku v pracovním prostoru laseru

3.6.2 Model VBD s pomocnými prvky a jejich použití

Polohování geometrických entit začíná u konkrétní fyzické VBD, kterou chce obsluha cíleně upravit na předem definovaných místech. Kvůli přesnému uložení fyzické VBD do lůžka je důležité vytvořit přesný model VBD, proto musí být daná fyzická VBD odměřena pomocí souřadnicového měřicího přístroje. Z měření na souřadnicovém přístroji se získají roviny prezentující spodní, čelní plochu VBD, její hřbetní plochy a z nich získané průsečnice (Obrázek 3-23). Tyto data se importují do CAD/CAM systému CATIA V5 v *.Igs formátu, kde se z průsečíků vytvoří přesný model VBD. V tomto modelu VBD se dále upraví poloměry r_e (Obrázek 3-24).



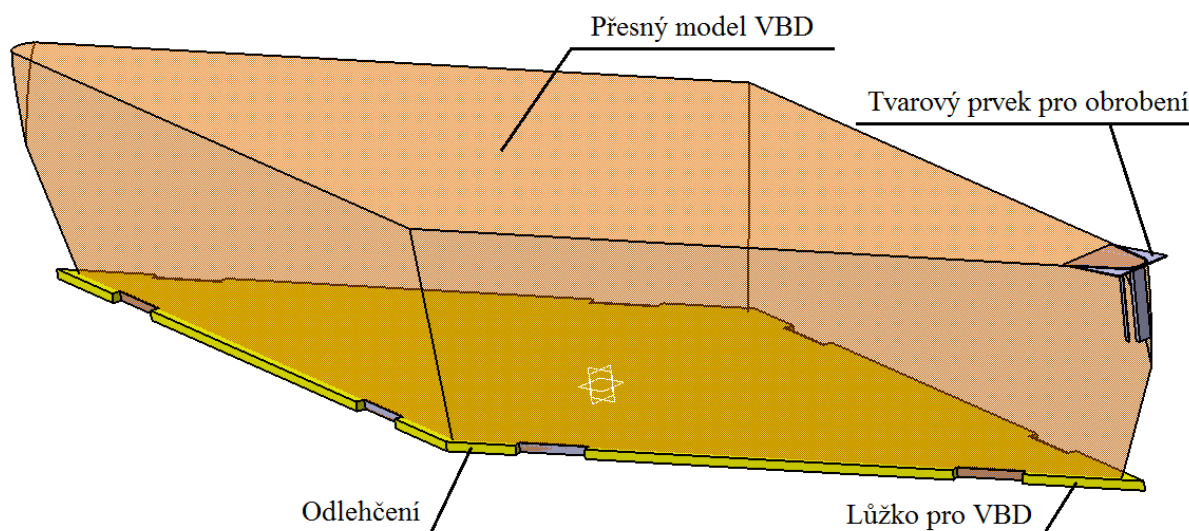
Obrázek 3-23 Naměřené roviny fyzické VBD



Obrázek 3-24 Přesný model VBD

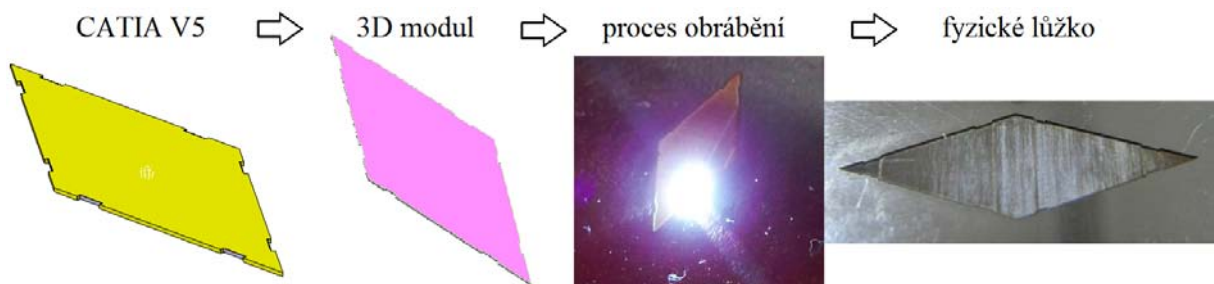
Po vytvoření přesného modelu VBD se začne s modelováním odlehčeného lůžka a geometrických tvarů. Poté, co má programátor rozmyšlenou úpravu bříty na VBD, může tento model vypadat jako

na obrázku 3-25. Při tvorbě tohoto modelu je výhodou mít orientovaný počátek na dně VBD (viz. kapitola 3.3.4). Tento bod je lepší definovat již na souřadnicovém měřicím přístroji.



Obrázek 3-25 Osazený přesný model VBD pomocnými a tvarovými prvky

Postup zhotovení lůžka zobrazuje obrázek 3-26, kde je zleva doprava ukázán postup od modelu lůžka v CATIA V5 až po reálný výsledek. Po obrobení tvaru musí obsluha lůžko vyčistit. Nyní do vytvořeného lůžka přesně zapadne fyzická VBD (Obrázek 3-27).

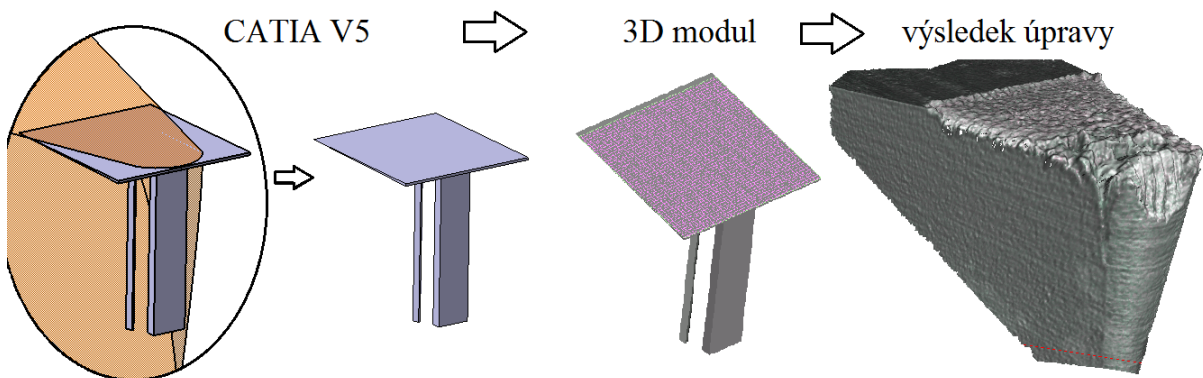


Obrázek 3-26 Průběh tvorby lůžka

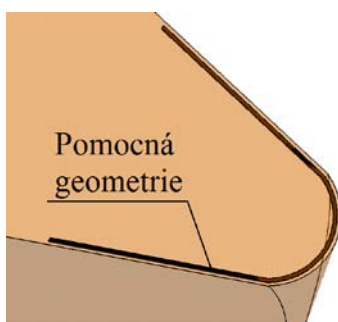
U tohoto celku (VBD+přípravek) se musí před následujícím obrobením geometrických prvků změřit celková výška, která je důležitá při nastavení správné ohniskové vzdálenosti f . Po přesném vložení polohovacího přípravku s VBD do pracovního prostoru laseru pomocí vytvořených dorazů a importování tvarového prvku do 3D modulu nastaví obsluha vhodné procesní parametry (kapitola 3.5). Nyní lze VBD obrobít podle postupu na obrázku 3-27.



Obrázek 3-27 Přesné uložení fyzické VBD v přípravku



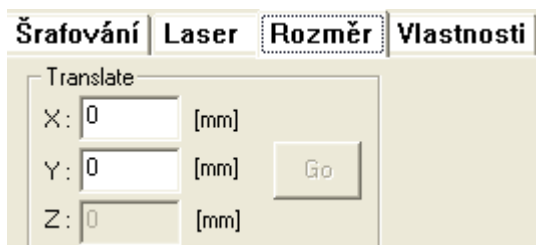
Obrázek 3-28 Průběh tvorby geometrického tvaru



Obrázek 3-29 Zobrazení pomocné geometrie

Jelikož je tato metoda polohování závislá na lidském faktoru, je nutné využít tzv. pomocnou geometrii. V našem případě se jedná o takovou, která např. lemuje hranu ostří VBD (Obrázek 3-29). Tato pomocná geometrie se obrobí na čelo fyzického VBD (pouze první vrstva), a pak se pomocí mikroskopu IFM G4 vyhodnotí odchylka od nadefinované polohy dle CAD/CAM systému CATIA V5. Jestliže zde nevznikla žádná odchylka od

umístění pomocné geometrie, pak je vše v pořádku a lze obrobit geometrický tvar na VBD. V případě vzniku nepřesnosti lze odchylku korigovat. V tomto momentu se již nebude korigovat pomocná geometrie, ale importovaný tvar (Obrázek 3-28) ve 3D modulu. Korekce tvaru se tedy provede ve 3D modulu. V seznamu objektů se nejprve musí označit prvek s vygenerovanými vrstvami, dále se v listu vlastností entit zvolí záložka **Rozměr**, kde se v



okně **Translate** (Obrázek 3-30) vyplní do směrů X a Y hodnoty (korekce), o které by se měly vygenerované vrstvy posunout. Tento posun se potvrdí tlačítkem **Go**. Po těchto krocích lze obrobit požadovaný tvar na VBD.

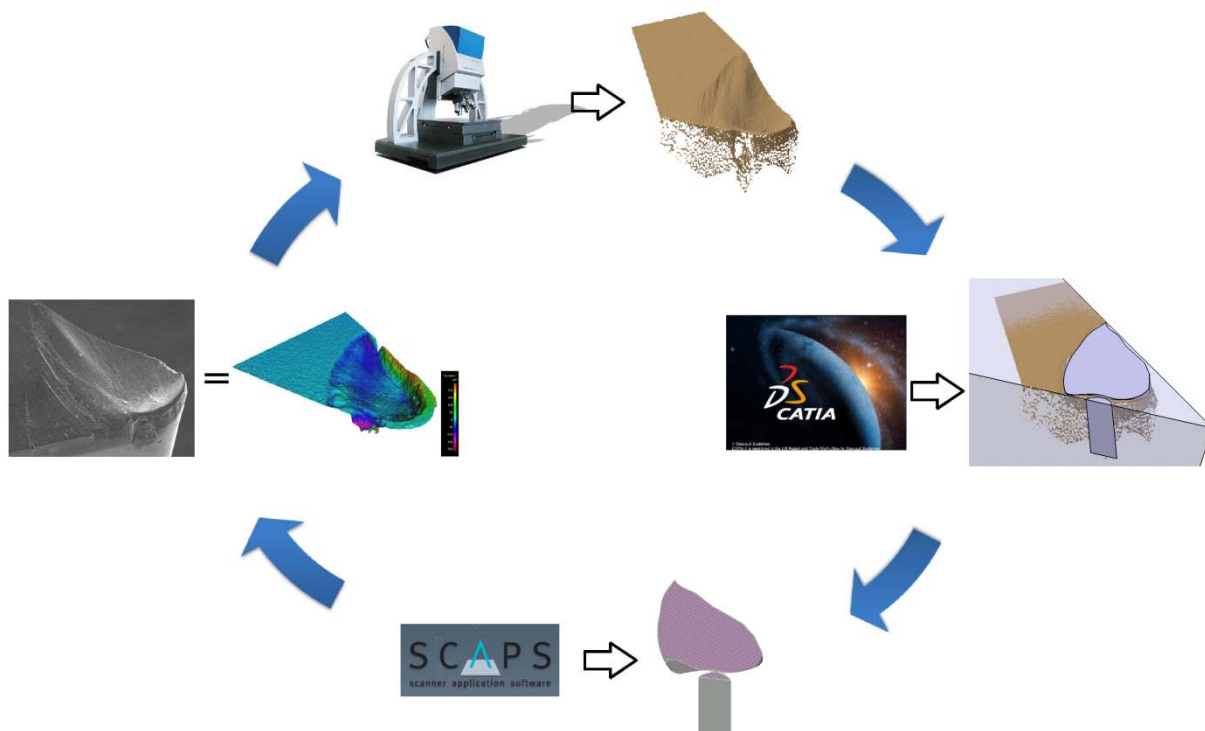
Obrázek 3-30 Okno Translate v listu vlastností entit

Závěrem této podkapitoly je nutné zmínit vysokou časovou náročnost polohování. Přípravné práce (naměření fyzické VBD na souřadnicovém přístroji, následná tvorba pomocných a hlavních prvků v CATII V5, úprava dorazů v pracovním prostoru, obrobení lůžka do polohovacího přípravku, obrobení pomocné geometrie s následným proměřením a vyhodnocením případné korekce) jsou časově velmi zdlouhavé (min. 3h). Další nevýhodou je jednorázové použití přesného lůžka pro VBD. Aplikace individuálně vytvořeného lůžka v přípravku ke konkrétní VBD by bylo již pro jinou VBD nepřesné, protože každá VBD je jinak rozměrově přesná. Tzn. že pro každou fyzickou VBD, u které by obsluha chtěla modifikovat řezný břit, by musela provést výše uvedené výkony. Vzhledem k těmto dvěma faktorům (čas, jednorázové použití) není tento postup polohování vhodný pro sériový charakter úpravy vyměnitelných břitových destiček, ale pouze pro určité případy (prototyp nového tvaru, úprava VBD z PKD). Pro kontrolu správné polohy je vhodné provést diferenční měření na přístroji IFM G4 zn. Alicona.

3.7 Cyklus procesů úpravy břítu nástroje

Tato kapitola vznikla za účelem rekapitulace vlastního návrhu řešení, ve kterém se shrnuly poznatky autora. Smyslem použití výše zmíněného návrhu řešení (kapitola 3) je docílení takového stavu, že při obdržení fyzické VBD s komplexním tvarem břítu (např. s lamačem třísek, definovanou polohou vrubu a fazet) je obsluha laserového zařízení schopna vytvořit repliku tohoto tvaru na jinou VBD, která může být vyrobena z jakéhokoliv řezného materiálu. Myšleno především z kategorie supertvrdých materiálů (PKD, CBN), které nelze upravovat jiným způsobem, než nekonvenční technologií laserového obrábění. Tvorba požadované

repliky je znázorněna v obrázku 3-31, který prezentuje uzavřený cyklus. Výstup tohoto cyklu by měl splňovat podmínku rovnosti v levé části obrázku (vstupní tvar = výstupní tvar). Zbylé části obrázku již znázorňují posloupnost dějů. Nejdříve je nutné získat kvalitní sken tvaru bříty z fyzického VBD pomocí IFM G4, který se musí exportovat do *.STL formátu (horní část obrázku). Tento sken se importuje do CAD/CAM systému CATIA V5, kde se (po několika krocích úprav) slícuje s přesným modelem VBD. V této fázi se zrekonstruuje část objemu VBD (pravá část obrázku), který bude sloužit pro 3D modul jako negativ tvaru pro obrobení VBD. Tento tvar se již importuje (rovněž v *.STL formátu) do SCAPS 3D modulu a provede se konečná fáze úpravy bříty pomocí laseru (spodní část obrázku). Po zhotovení je nutné zkontrolovat výsledný tvar a polohu úpravy na VBD. Tato kontrola proběhne pomocí diferenčního měření na přístroji IFM G4 (levá část obrázku). Jestliže se výsledky rovnají, tak byla replika úspěšně vyrobena.

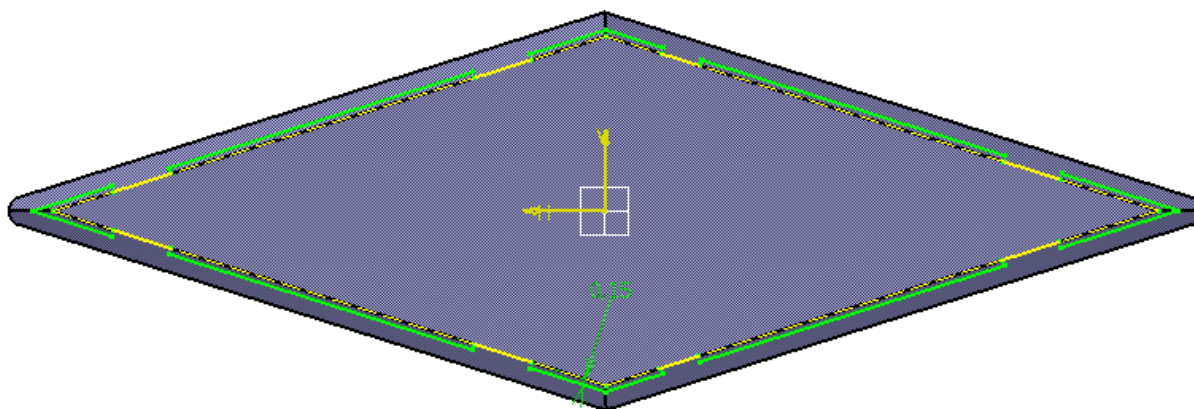


Obrázek 3-31 Cyklus navržené metodiky úpravy bříty nástroje

4 Realizace experimentu a jeho vyhodnocení

Tato kapitola již pojednává o konkrétních možnostech úprav na vyměnitelných břitových destičkách, ve které byly provedeny tři experimenty. Dva experimenty byly uskutečněny na VBD z polykrystalických diamantů a jeden na VBD ze slinutého karbidu. Důvody, proč v realizaci experimentu převládaly VBD z PKD a ne ze SK, byla nevyhovující výsledná kvalita povrchu po úpravě břitu v řezném materiálu ze SK (viz kapitola 3.5.3). Topografie výsledného povrchu byla v PKD kvalitativně lepší než ve SK, proto byly v experimentech hned dva zástupci tohoto řezného materiálu. V následujícím textu byly experimenty časově seřazeny tak, jak byly skutečně realizovány. Je to z toho důvodu, že u každého vzorku byly zjištěny určité nepřesnosti, na které se dalo reagovat případným zlepšením během přípravného procesu v CATII V5. Tyto nepřesnosti byly u jednotlivých experimentů charakterizovány a na následující úpravě VBD odstraněny.

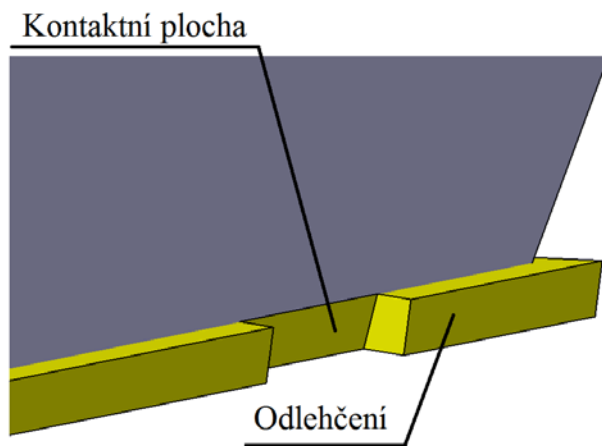
Začátek experimentu byl u všech fyzických VBD totožný, proto byl popsán v úvodu této kapitoly. Specifické úpravy břitu byly již rozepsány v následujících podkapitolách. Vždy se musel vytvořit přesný model VBD, který se odměřil na souřadnicovém měřicím přístroji (viz kapitola 3.6.2). Po vytvoření přesného modelu VBD se vymodelovalo odlehčené lůžko. Model tohoto lůžka musel obsahovat několik prvků, které byly pro umístění fyzické VBD důležité. Jednalo se o odlehčení kontaktních ploch, které zajistí precizní ustavení VBD. Toto odlehčení mohlo mít hodnotu od okraje VBD na spodní ploše kolem 0,1-0,2mm (Obrázek 4-1).



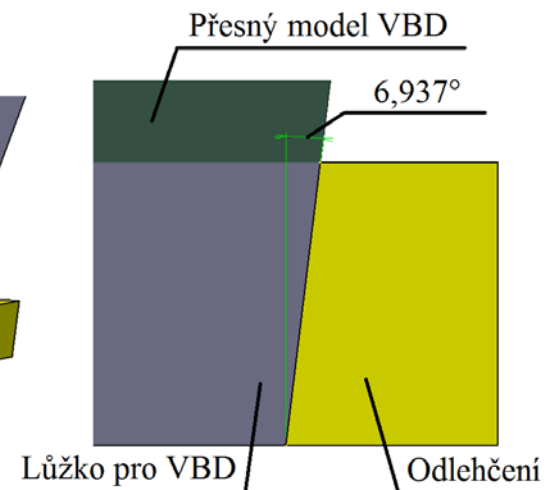
Obrázek 4-1 Pohled zespoda modelu VBD - tvar lůžka (zelený); kontaktní plochy (žluté)

K dalšímu důležitému prvku patřila správná tvorba kontaktní plochy (Obrázek 4-2). Tato plocha nemohla být vytvořena jako svislá stěna, protože fyzická VBD měla nenulový úhel α . Pro správné umístění fyzické VBD do polohovacího přípravku musela být kontaktní plocha modelu lůžka vytvořena pod stejným úhlem jako byl úhel α fyzické VBD. Tento úhel kontaktní plochy se vytvořil z přesného modelu VBD.

Detail kontaktní plochy



Řez kontaktní plochou

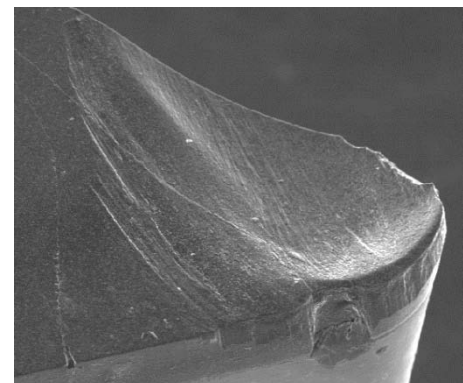


Obrázek 4-2 Kontaktní plocha lůžka pro VBD

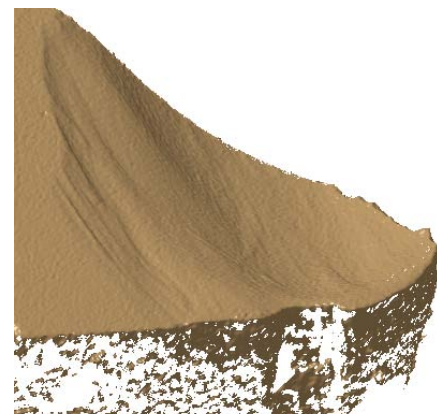
Po vytvoření celého lůžka pro VBD se přešlo ke specifickým úpravám břítu, které byly popsány v následujícím textu. Tyto podkapitoly již berou v úvahu zhotovený přesný model VBD a lůžka, proto se zabývají pouze problematikou zhotovení požadované úpravy břítu.

4.1 Experiment č. 1

První experiment byl proveden na VBD z PKD. Zde byl charakterizován komplexní tvar břítu s několika důležitými prvky (Obrázek 4-4). Jednalo se o složitou tvarovou čelní plochu, ve které musela být na hlavním ostří zachována fasetka. Další fasetka lemovala rádius ostří na hřbetní ploše VBD. K těmto prvkům ještě patřil vrub na hlavním ostří břítu. Tvorba tvarově komplexní repliky vyžadovala naskenování tvaru břítu fyzického VBD pomocí IFM G4 (Obrázek 4-3). Tento sken, který byl exportován do CAD/CAM systému CATIA V5, se musel do přesného modelu VBD umístit podle neopotřebených oblastí skenovaného tvaru (Obrázek 4-5). Mezi tyto oblasti patřila část čelní plochy, po které neodchází tříska, dále plochy hřbetu; neopotřebené hrany hlavního a vedlejšího ostří (červené čáry v obrázku 4-5). Tímto způsobem se definovala poloha budoucí geometrické entity, která vznikla na umístěném

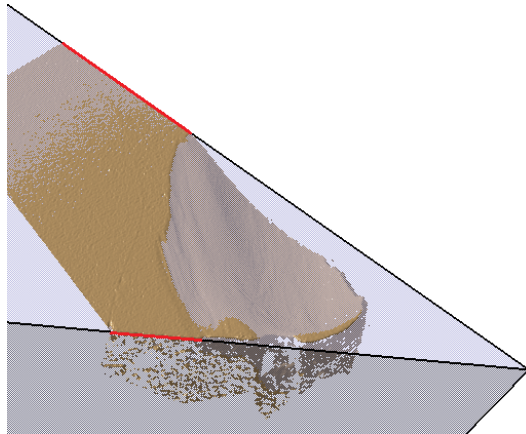


Obrázek 4-4 Požadovaný tvar břítu



Obrázek 4-3 Sken tvaru břítu

skenu tvaru břitu. U tohoto tvaru břitu byla teď důležitá rekonstrukce výše uvedených prvků. Principem šlo o "doplnění" opotřebovaného tvaru břitu objemem tak, aby vznikl původní tvar před opotřebením. Tím se získal negativní model tvaru, který sloužil pro 3D modul laseru. Tvorba negativního modelu (v CAD/CAM systému CATIA V5) musela proběhnout v novém těle, které bylo vyhrazeno jen pro tyto prvky (viz. kapitola 3.6.2).

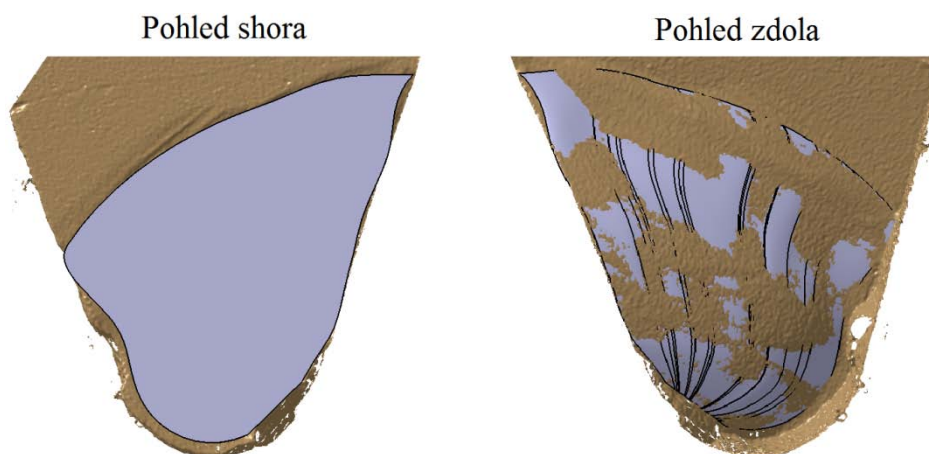


Obrázek 4-5 Umístění naskenovaného tvaru do přesného modelu VBD



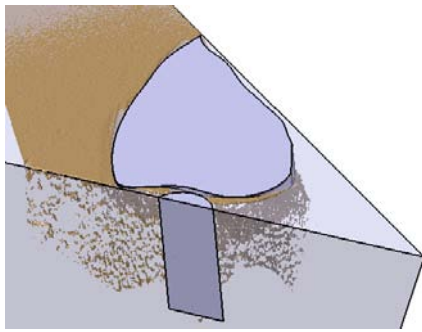
Obrázek 4-6 Rekonstrukce opotřebovaného čela

Nejprve se začalo s rekonstrukcí tvarově složitého čela, kde se musely nanést křivky a popř. vodící čáry, které vymezovaly oblast pro rekonstrukci plochy. Po aplikaci těchto křivek se sestavila plocha, která procházela skrz křivky (Obrázek 4-6). Pomocí této plochy se již doplnil chybějící objem na čele břitu. Horní plocha doplněného objemu byla totožná s neopotřebovanou plochou čela importovaného skenu (Obrázek 4-7; pohled shora). Pro ilustraci bylo v obrázku 4-7 doplněn pohled zdola, ze kterého lze vidět správný tvar zrekonstruovaného komplexního objemu.



Obrázek 4-7 Vymodelovaný objem pro čelo VBD

Dále se vytvořila další geometrická entita, která tvořila vrub na hlavním ostří VBD. V případě

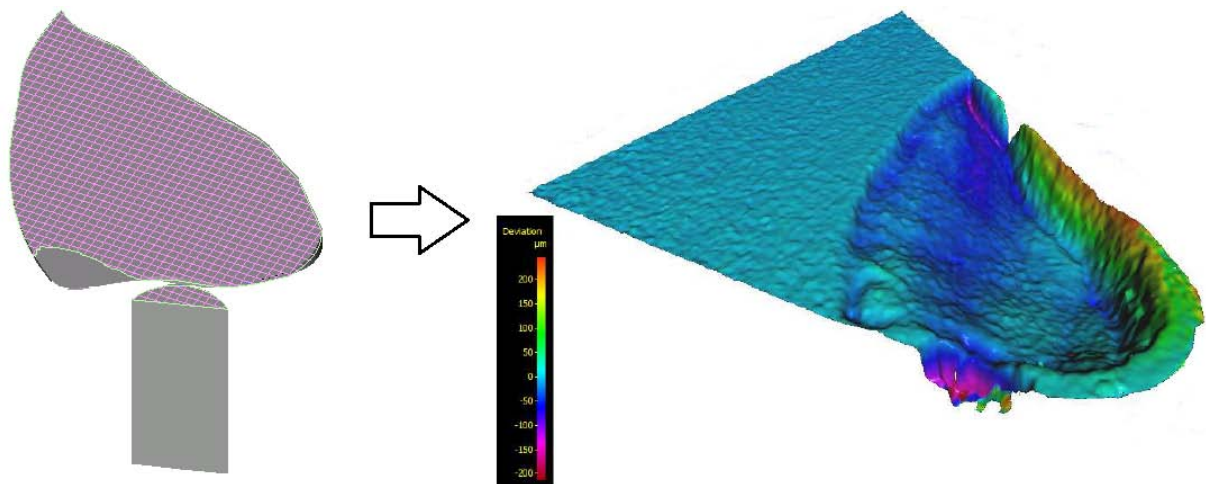


Obrázek 4-8 Model vrubu na hlavním ostří VBD

vrubu se nejednalo o žádný tvarově složitý prvek. Tento prvek byl vymodelován záměrně delší a to z toho důvodu, aby bylo zaručeno jeho úplné obrobení (Obrázek 4-8). Po dokončení vrubu se skryla všechna okolní těla (přesný model VBD, sken; lůžko) kromě tohoto, ve kterém byl vymodelován negativní tvar. Toto tělo se uložilo do *.STL formátu. Po této fázi přípravných činností bylo vše připraveno k úpravě nové VBD s replikovaným tvarem.

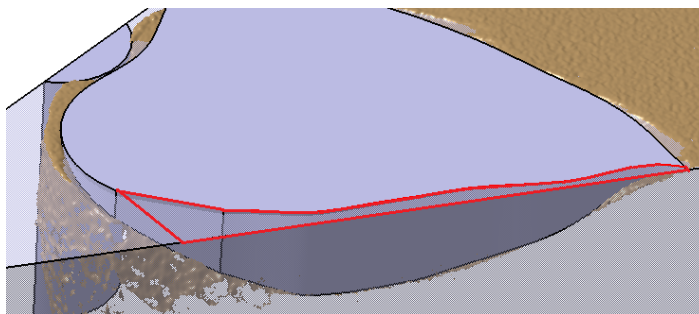
Po importu geometrického tvaru do 3D modulu se provede klasické nastavení procesních parametrů ($slice$, v_f , f_p , P). Vzhledem k úpravě tohoto typu řezného materiálu byly procesní parametry zvoleny na základě znalostí experimentátora ($slice=0,007mm$, $v_f=500mm/s$, $f_p=20kHz$). Po umístění fyzické VBD do pracovního prostoru a celkovém nastavení laserového zdroje se provedla její úprava laserem. Na obrázku 4-9 - vlevo je zobrazen importovaný model v 3D modulu připravený k úpravě VBD. Napravo je ukázáno výsledné diferenční měření, které sloužilo ke kontrole tvarové korektnosti. V tomto případě byl jako referenční model použit sken požadovaného tvaru (Obrázek 4-3) a porovnávací model byl získán z výsledné úpravy laserem.

Z této diferenční analýzy byly patrné některé odchylky (viz legenda s pseudo zbarvením v obrázku 4-9). Tyrkysová barva zde znázorňovala nulovou hodnotu odchylky. Tmavě modré až fialové zbarvení modelu ukazovalo nedodržení požadované hloubky. V případě čelní plochy břitu se jednalo o relativně malé odchylky. Znázorněný vrub již vypovídal o špatné poloze, protože zde odchylka tvaru (fialová) ukazovala hodnoty kolem $-200\mu m$. Zelená, žlutá a oranžová již vykazovala neupravenou plochu čela. Tato odchylka vznikla v důsledku



Obrázek 4-9 Geometrický tvar v 3D modulu (vlevo) a diferenční analýza výsledného tvaru VBD

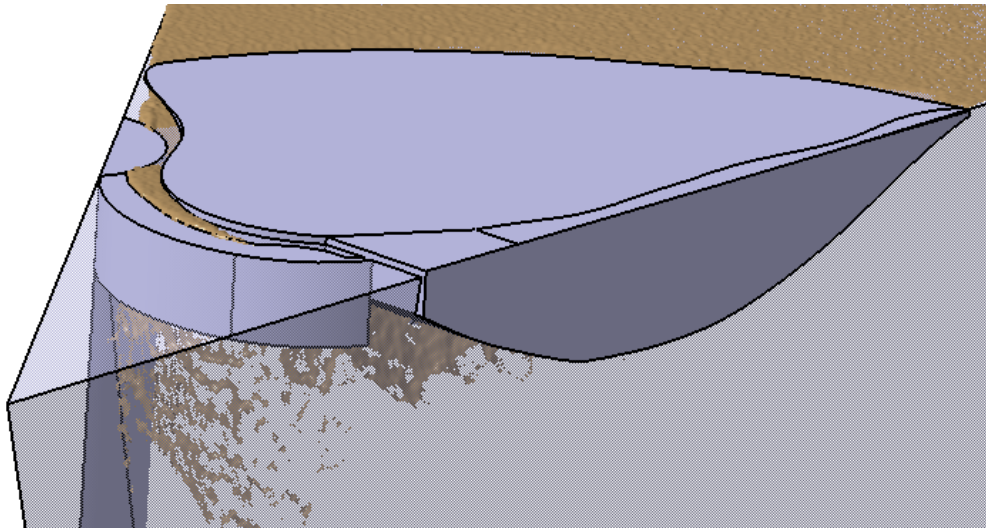
nevymodelovaného objemu, který chyběl v prostoru mezi vedlejším ostří a vymodelovaným objemem (červeně označená oblast v obrázku 4-10). Výsledné odchylky diferenční analýzy byly následující: maximální odchylka byla $+246,08\mu\text{m}$ a minimální odchylka činila $-212,64\mu\text{m}$. Průměrná odchylka nabyla záporné hodnoty $-4,69\mu\text{m}$.



Obrázek 4-10 Důsledek vzniku neupravené oblasti

Závěrem tohoto experimentu lze dodat, že získané hodnoty z diferenčního měření neodpovídaly požadavku dodržení tvarové přesnosti, které bylo specifikováno v úvodní kapitole. Přesto se z tohoto pokusu získaly cenné poznatky ohledně zpřesnění geometrického tvaru a polohy. Aby se v dalších experimentech zabránilo těmto nechtěným odchylkám, bylo nutné přistoupit k určitým úpravám.

Pro odstranění maximální odchylky bylo zapotřebí "protáhnout" vytvořený tvar vně z přesného modelu VBD (Obrázek 4-11). K tomuto tvaru šlo dále vytvořit objem na poloměru zaoblení ostří, které vytvoří fasetku na hřbetu VBD.



Obrázek 4-11Inovovaný geometrický tvar

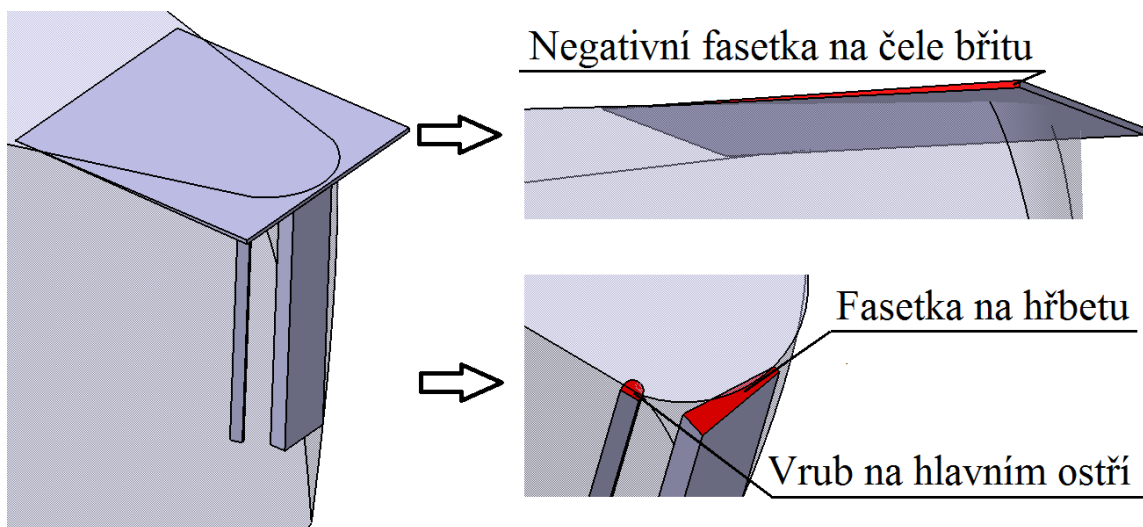
Pro eliminaci polohové nepřesnosti geometrického tvaru je vhodné (před finální úpravou břitu) použít jeden mezikrok, použití tzv. pomocné geometrie (kapitola 3.6.2). Vytvoření pomocné geometrie a její následné obrobení pomůže vyhodnotit velikost korekcí ve směrech os X a Y, které v dalším kroku pomůže zpřesnit umístění geometrického tvaru. Zvětšení geometrický tvarů vně přesného modelu VBD a tvorba pomocné geometrie byly již zahrnuty

do následujících experimentů, které tak představovaly další varianty pro navrhovanou metodiky úprav břitů rezných nástrojů pomocí laseru.

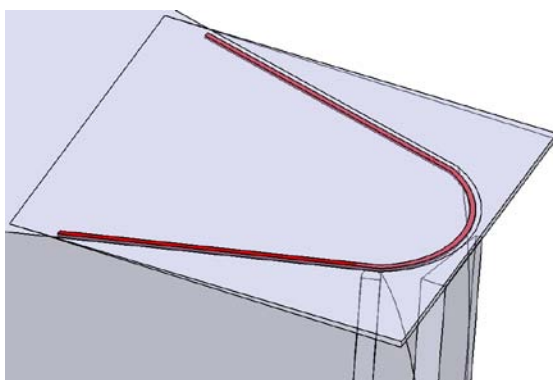
4.2 Experiment č. 2

Experiment č.2 se týkal VBD ze SK, ve kterém se nejednalo o tak komplexní tvar, jako byl požadován v předcházející úpravě břitu. V tomto případě nebyl k dispozici výchozí tvar, který by se mohl naskenovat a následně rekonstruovat. Zde šlo o prototypovou úpravu břitu, ve které byly specifikovány tyto prvky: fasetka na čele VBD s negativním úhlem, fasetka na hřbetu VBD s nulovým úhlem a definovaná poloha vrubu na hlavním ostří VBD. Z důvodu prototypové úpravy břitu nefigurovala v tomto experimentu kontrola pomocí diferenčního měření, protože bez výchozího tvaru nešlo porovnat výslednou úpravu. Jelikož se upravoval břit ze slinutého karbidu, tak zde bylo demonstrováno nastavení procesních parametrů.

Dle výše specifikovaných prvků pro úpravu břitu by geometrická entita mohla vypadat jako na obrázku 4-12. Všechny geometrické prvky měly záměrně protažený tvar přes model VBD. Důvody jsou zřejmé z experimentu č.1.



Obrázek 4-12 Geometrické prvky pro úpravu břitu ve druhém experimentu

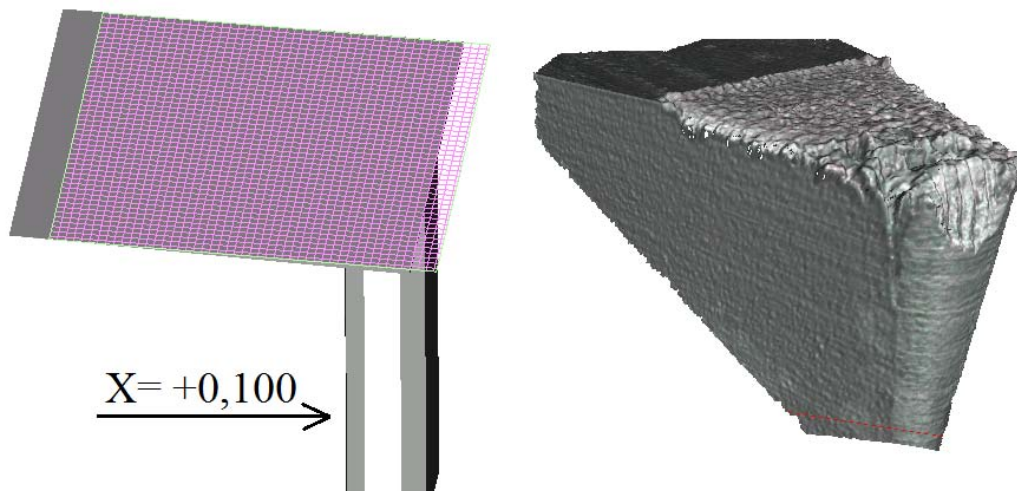


Obrázek 4-13 Pomocná geometrie

Poté, co byly zhotoveny tyto geometrické prvky, se musela kvůli eliminaci polohové nepřesnosti vytvořit pomocná geometrie. Pomocná geometrie by neměla přesahovat oblast, která zůstane zachována po výsledné fázi úpravy břitu (je to pouze kvůli estetickému hledisku). Vytvořená pomocná geometrie na

břítu nikterak neovlivní jeho řezné vlastnosti, protože se obrábí pouze jedna vrstva). Pro tento konkrétní případ experimentu lemovala pomocná geometrie hranu vedlejšího a hlavního ostří na čele VBD (Obrázek 4-13). Dále se musely nastavit procesní parametry laserového zdroje. Pro tento experiment byl (dle tabulky 3-9) nastaven úběr pro slinutý karbid K-55SF. V tomto případě byl vybrán parametr $slice = 0,0005\text{mm}$, proto musely být zvoleny parametry v_f a f_p . Při dodržení podmínky rovnosti parametrů $Slice = L_{vf/fp}$ byly pro úpravu laserem zvoleny tyto hodnoty: $v_f=200\text{mm/s}$ a $f_p =20\text{kHz}$. Po tomto nastavení se obrobila jedna vrstva pomocné geometrie, z které se určily velikosti korekcí v osách X a Y.

Po proměření polohy obrobenej pomocné geometrie na čele fyzické VBD (obrázek z měření není k dispozici) byla zjištěna odchylka v ose X od požadované polohy o celých $100\mu\text{m}$. Tato hodnota odchylky se následně zadala do okna zvané **Translate** (viz Obrázek 3-30). Korekce polohy mohla být provedena pouze u vygenerovaných vrstev. Z obrázku 4-14 vlevo je vidět posun vrstev vůči importovanému modelu o $100\mu\text{m}$ se směru osy X.



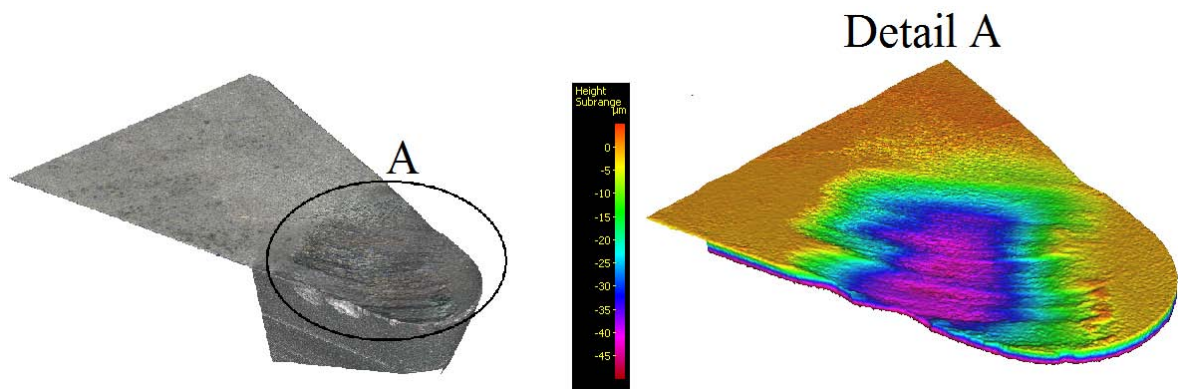
Obrázek 4-14 Korekce polohy vygenerovaných vrstev (vlevo) a výsledná úprava VBD

Pravá část obrázku 4-14 již zobrazuje finální úpravu VBD ze SK. V tomto experimentu byly dodrženy všechny požadavky na úpravu VBD. Z obrázku je patrné, že došlo ke správné úpravě čelní a hřbetní fazety. Poloha vrubu byla také dostačující. Jediným problémem zde byla dosažená kvalita zhotoveného povrchu, která byla ovlivněna charakterem výstupního laserového svazku (kapitola 3.5.3).

4.3 Experiment č. 3

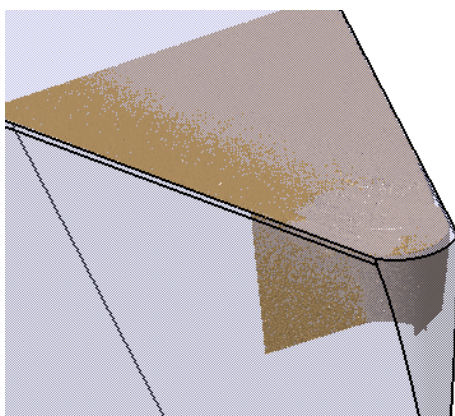
Poslední experiment se realizoval na VBD, která měla utvořenou řeznou hranu z PKD. Požadovaná úprava je na obrázku 4-15, kde je zobrazen sken výchozího tvaru břitu. Jednalo se o specifický výmol na čele VBD, který byl pro názornost zvětšen do detailu A s pseudo

zabarvením. Dle přiložené legendy v obrázku 4-15 se největší hloubka žlábků pohybovala kolem hodnoty $-45\mu\text{m}$. Tento sken se opět musel umístit do přesného modelu VBD dle

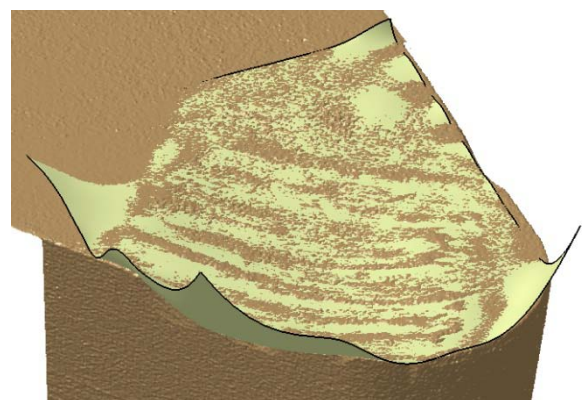


Obrázek 4-15 Požadovaný tvar v originálním zbarvení (vlevo) a detail čela VBD v pseudo zbarvení

neopotřebovaných částí skenovaného tvaru. Výhoda tohoto skenu oproti experimentu č. 1, spočívala v sestavení více skenovaných částí břitu do jednoho celku. Sken tvaru byl pořízen z více stran, tudíž byl celkově větší a navíc bez naskenovaných optických vad. Tento sken byl v prostředí CATIA V5 lépe polohovatelný, protože sken svou velikostí poskytoval více informací (ucelené plochy obou hřbetů, čela a neopotřebovaného ostří). Tento sken se umístil do přesného modelu VBD tak, jako sken pro experiment č. 1 (Obrázek 4-16).

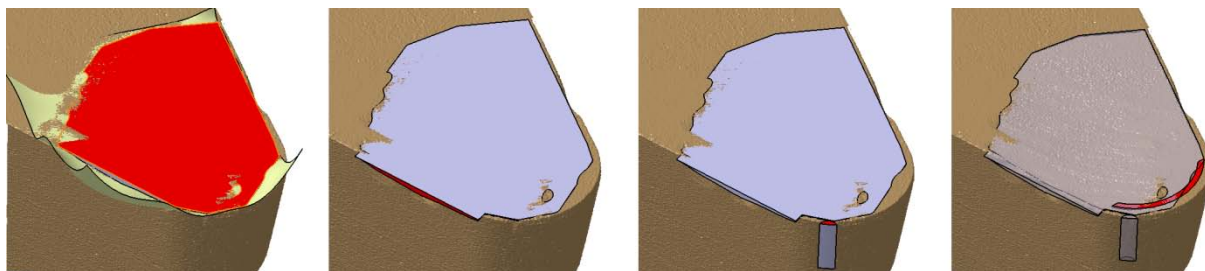


Obrázek 4-16 Umístění naskenovaného tvaru do přesného modelu VBD



Obrázek 4-17 Rekonstrukce plochy na dně výmolu

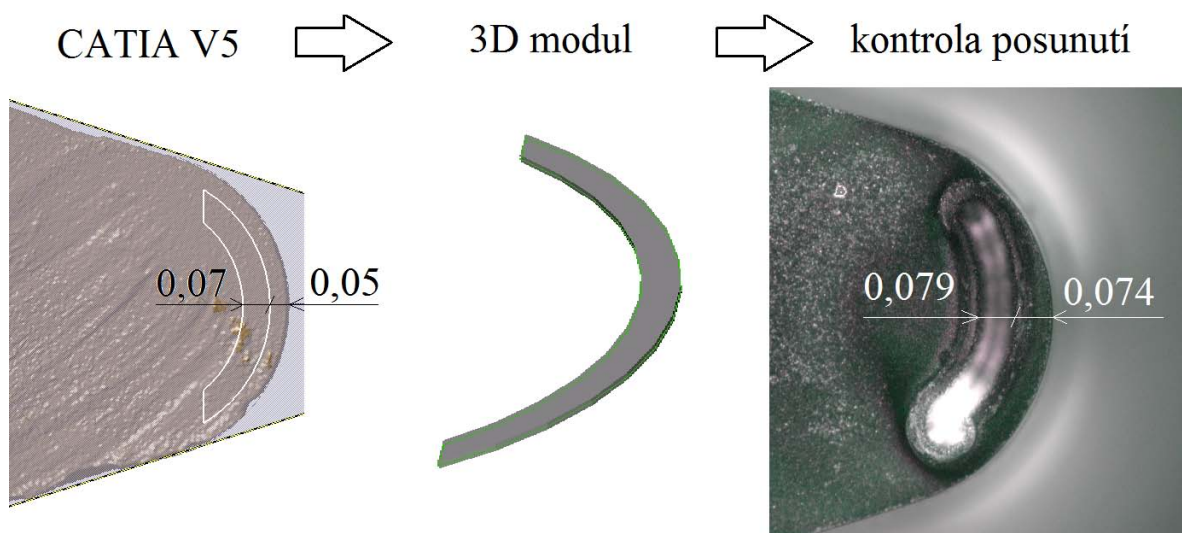
Dále se již zrekonstruovala plocha na dně výmolu. V tomto experimentu již plocha nebyla vytvořena pomocí ručně nanesených křivek a vodících čar, ale pomocí automatických prvků systému CATIA V5, které plochu s naskenovaným tvarem ve výsledném efektu lépe aproximovaly (Obrázek 4-17), než tomu bylo u experimentu č. 1. Tato plocha opět sloužila pro tvorbu chybějícího objemu ve výmolu, kde horní plocha doplněného objemu byla shodná s neopotřebovanou rovinou čela. K tomuto objemu se musely doplnit ostatní geometrické prvky ("protáhnutí" některých tvarů) a popř. vytvoření vrubu a pomocné geometrie. Tyto geometrické prvky byly postupně zachyceny (červená) na obrázku 4-18, kde je tvorba objemu zobrazena zleva doprava.



Obrázek 4-18 Tvorba objemu (zleva): vytažení základního objemu, protažení objemu vně přesný model VBV, vytvoření vrubu; vytvoření pomocné geometrie

Po vymodelování všech potřebných objemů byla přípravná fáze v CATIA V5 u konce. Po importování pomocné geometrie do 3D modulu se provedlo klasické nastavení procesních parametrů ($slice$, v_f , f_p , P). Vzhledem k úpravě tohoto typu řezného materiálu byly procesní parametry zvoleny na základě znalostí experimentátora ($slice=0,007\text{mm}$, $v_f=500\text{mm/s}$, $f_p=20\text{kHz}$). Po umístění fyzické VBD do pracovního prostoru a celkovém nastavení laserového zdroje se provedlo obrobení první vrstvy pomocné geometrie, které se muselo následně vyhodnotit.

Pro lepší porozumění, jak se korigovala poloha pomocí geometrie zobrazené na pravé straně obrázku 4-18, slouží následující obrázek 4-19. Na levé straně je pohled do skici pomocné geometrie. Zde byly zakótovány dva rozměry. Rozměr, který byl zakótovaný od hrany ostří do začátku pomocné geometrie (kóta 0,05mm) sloužila ke zjištění případné korekce polohy. Důležité je podotknout fakt, že ve 3D modulu se nemusel šrafovat tvar pomocné geometrie, postačil pouze obrys (prostřední část obrázku). Po obrobení první vrstvy pomocné geometrie



Obrázek 4-19 Ukázka korekce polohy

se fyzická VBD změnila na mikroskopu IFM G4 (obrázek 4-19 vpravo). Konkrétně v tomto experimentu došlo chybou experimentátora k nedodržení počtu obrobeneých vrstev pomocné geometrie, zde byly obrobene vrstvy 4, proto bylo zřejmé, že se tato chyba mohla projevit

během kontroly výsledného tvaru). Po proměření obrobené pomocné geometrie bylo zjištěno posunutí tvaru na hodnotu 0,074mm. Z této neshody plynulo, že se musela provést korekce ve směru osy X. Velikost korekce byl rozdíl mezi výstupní (naměřenou) a vstupní (zadanou) hodnotou:

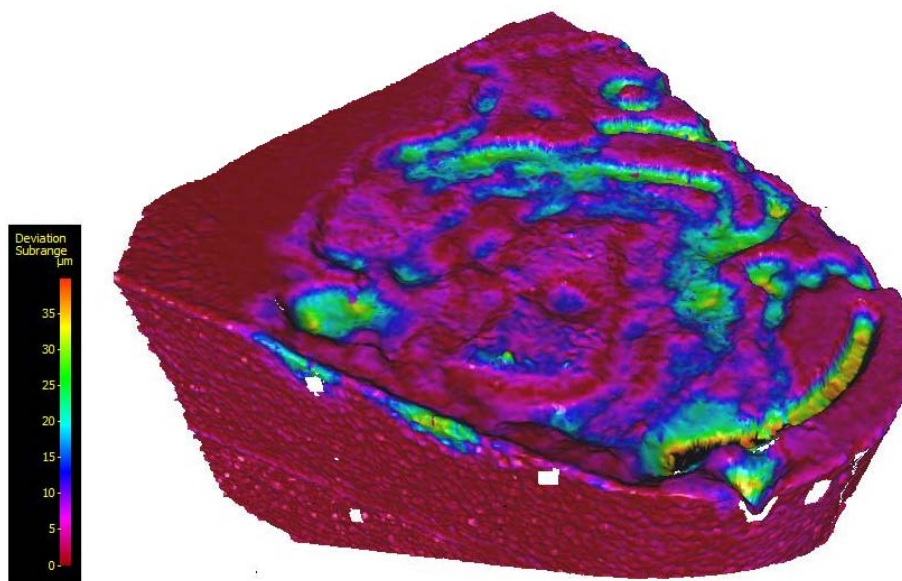
$$0,074 - 0,050 = +0,024mm$$



Obrázek 4-20 Polohová korekce vrstev

Po získání hodnoty posunu se do 3D modulu importoval geometrický tvar. Po vygenerování a editaci vrstev daného tvaru se mohly vrstvy posunout pomocí okna **Translate** (Obrázek 3-30) o hodnotu +0,024mm v ose X. Výsledek posunu vrstev dopadl následovně (Obrázek 4-20). Po umístění fyzické VBD zpět na připravené dorazy v pracovním prostoru laseru se již mohl spustit samotný proces úpravy. Výsledek diferenčního měření (Obrázek 4-

21; porovnání s tvarem z obrázku 4-15) vykazoval oproti experimentu č. 1 podstatné zlepšení výsledného tvaru. Nebýt zanesené chyby při obrábění pomocné geometrie, byly by konečné odchylky diferenčního měření nižší. Průměrná odchylka tvaru činila 5,36 μ m a maximální odchylka měla hodnotu 227,89 μ m. Povrch čela VBD odpovídal výchozímu tvaru břitu, protože byl převážně znázorněn rudou až tmavě modrou barvou (dle legendy), které znamenaly odchylku v rozmezí 0-15 μ m. Jediná výtka byla na umístění vrubu, které mělo být ve větší vzdálenosti na hlavním ostří od zaoblení břitu.



Obrázek 4-21 Diferenční analýza výsledné úpravy VBD

5 Technicko-ekonomické zhodnocení

Technicko-ekonomické zhodnocení této diplomové práce spočívá v odlišném nastavení procesních parametrů na *laseru LAO - Shine Fiber 20W*, které ovlivňují mnoho faktorů: např. kvalitu dosaženého povrchu a hloubku tvaru. Další faktor, který je ovlivněn změnou skenovací rychlosti, je čas. V kapitole 3.5.2 je řešeno různé nastavení těchto parametrů pro obrábění dvou slinutých karbidů, kdy při dosažení požadované hloubky otvoru $h=0,75\text{mm}$ (slinutý karbid K-55SF) lze zvolit dvě možnosti nastavení:

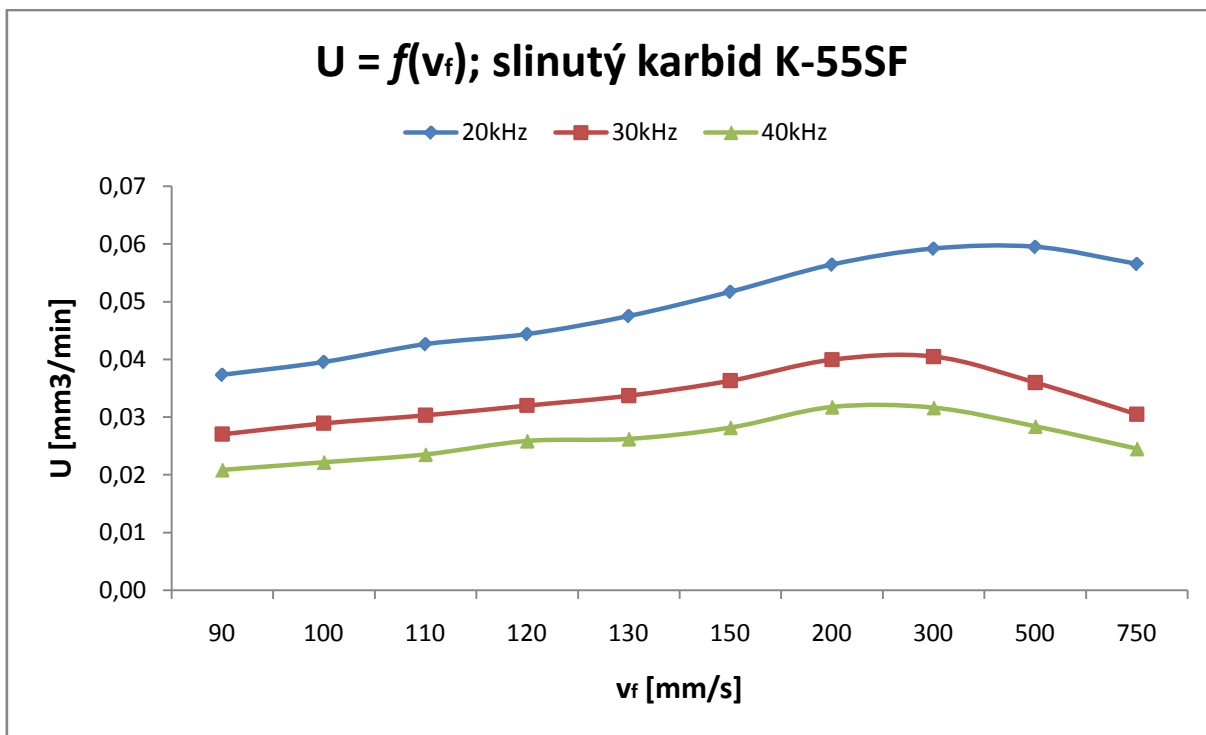
- $v_f=200\text{mm/s}$ při $f_p=20\text{kHz}$ (dále jen 1. varianta)
- $v_f=100\text{mm/s}$ při $f_p=30\text{kHz}$ (dále jen 2. varianta)

Při 1. zvolené variantě bude na dně kruhového otvoru drsnost kolem $R_a=10\mu\text{m}$ a $R_z=80\mu\text{m}$, tento otvor bude při rychlosti $v_f = 200\text{mm/s}$ vytvořen za $t = 8,6\text{min}$ (dle grafu 3-5). V případě nastavení 2. varianty se na dně otvoru dosáhne drsnosti v otvoru kolem $R_a=7\mu\text{m}$ a $R_z=55\mu\text{m}$. Při této rychlosti (100mm/s) bude otvor obroběn za $t = 15,5\text{min}$, což znamená, že otvor s nepatrně lepší kvalitou drsnosti ($R_a:10\rightarrow 7$; $R_z: 80\rightarrow 55$) se bude obrábět o 1,8x delším čase, než otvor s horší kvalitou povrchu.

Nyní, když je známá časová náročnost jednotlivých variant nastavení, se vypočítá finanční nákladnost těchto otvorů. Strojní hodinová sazba (dále jen SHS) pro *laser LAO - Shine Fiber 20W* byla, na základě konzultace v podniku, stanovena částkou 680Kč/h . Z toho lze snadno dopočítat, že 1. varianta ($t=8,6\text{min}$) obrobění otvoru bude stát $97,50\text{Kč}$ a 2. varianta ($t=15,5\text{min}$) vyjde na $175,70\text{Kč}$, \Rightarrow 2. varianta je o 80% dražší, než varianta č. 1, kdy dojde pouze k nepatrnému zlepšení kvality drsnosti povrchu (cca o 30%).

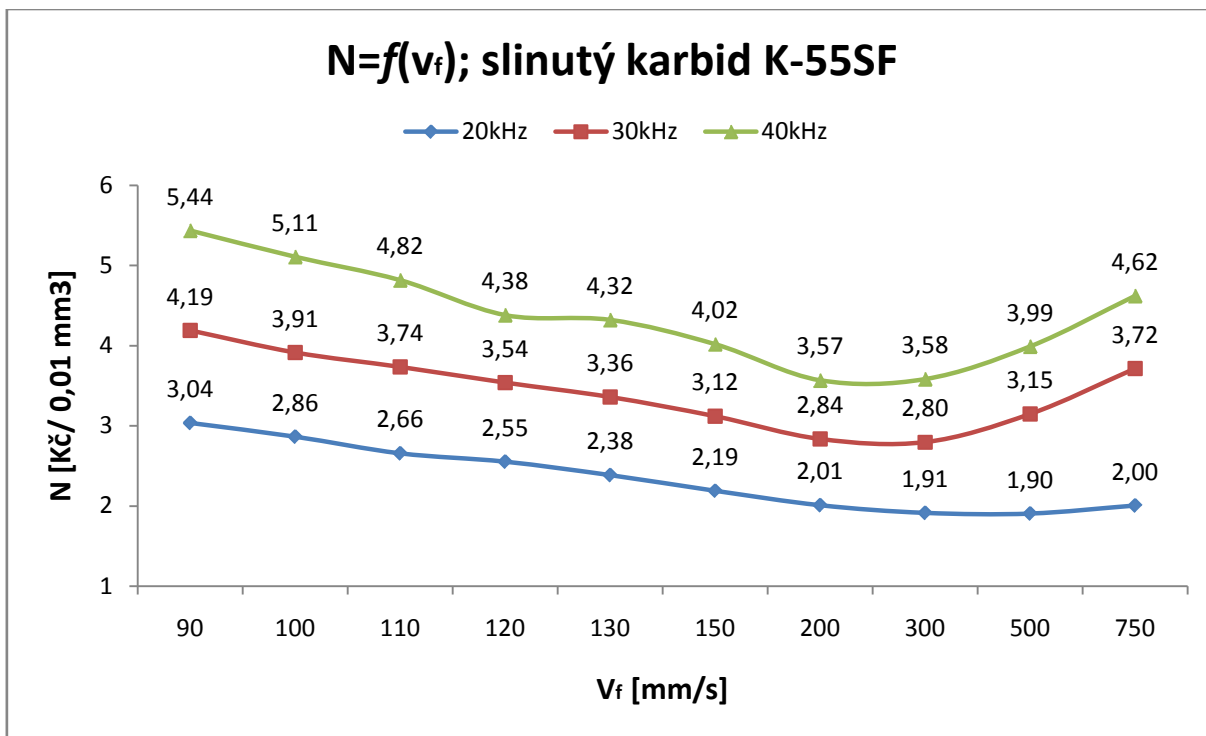
Z grafů 3-3 a 3-4, které jsou uvedeny v kapitole 3.5.2, lze získat hodnoty minutového úběru materiálu $U [\text{mm}^3/\text{min}]$ (graf 4-1), které mají větší vypovídající hodnotu pro technicko-ekonomické zhodnocení. Pro ukázkový případ postačí hodnoty U pouze pro materiál K-55SF, protože se od druhého slinutého karbidu (TSM 33 - příloha č.3) téměř neliší. Z grafu 4-1 vyplývají následující závislosti:

- při vyšších hodnotách skenovací rychlosti v_f roste minutový úběr U do svého maxima, které leží v intervalu $v_f= (250-350)\text{mm/s}$. Při $v_f>500\text{mm/s}$ hodnota U opět klesá.
- s vyšší hodnotou frekvence pulzu f_p hodnota U klesá ($\uparrow f_p \Rightarrow \downarrow U$)



Graf 5-1 $U=f(v_f)$; slinutý karbid K55SF

Při znalosti hodnoty SHS = 680Kč/h a hodnoty U (pro kompletní matici parametrů natavení) lze stanovit náklady na úběr $V=0,01\text{mm}^3$. Graf 4-2 demonstruje náklady na laserové obrobení $0,01\text{mm}^3$ při nastavení libovolného parametru. Z grafu 4-2 plyne, že nejnižší ceny pro ablaci $0,01\text{mm}^3$ jsou při nejvyšších hodnotách U z grafu 4-1, kde obrobení vyjde na $N < 2\text{Kč}/0,01\text{mm}^3$.



Graf 5-2 Náklady na ablaci $V=0,01\text{mm}^3$

6 Závěr

Tato práce vyšetřovala vhodnost použití nízkonákladového pulzního laseru *LAO - Shine Fiber 20W* pro úpravy břítu řezného nástroje, kde došlo k obrábění řezných materiálů jako je slinutý karbid a polykrystalický diamant. Smyslem práce bylo nalezení míry využitelnosti tohoto laserové zařízení oproti laserovým obráběcím centrům, které jsou v současnosti nabízeny trhem za několikanásobně vyšší pořizovací náklady (6-9x) než byly u laseru *LAO - Shine Fiber 20W*.

Součástí řešení tedy byla analýza současnosti laserových obráběcích center a jejich procesních možností při mikroobrábění různých druhů řezných materiálů ve vztahu na konkrétní aplikace úprav břitů řezných nástrojů. Z analytického řešení bylo zjištěno, že je důležité se věnovat jednak přesnosti obrobení požadovaného prostorového mikrotvaru s průměrnou odchylkou od ideálního tvaru $\leq 5\mu\text{m}$ na břítu řezného nástroje s přesností jeho polohování $\leq 10\mu\text{m}$, jednak jakostí opracování $R_a=(0,2-1)\mu\text{m}$; $R_z=(1-5)\mu\text{m}$.

Hlavním přínosem této práce byla tvorba vlastního návrhu řešení, které se detailně zabývá metodikou mikroobrábění v softwaru SCAPS 3D. Důkladné zpracování této metodiky umožňuje snadný a ucelený průběh nastavení mikroobráběcího procesu a eliminuje špatná řešení, která by (už v této fázi) mohla vést ke špatné kvalitě výsledného tvaru. Dalším důležitým krokem bylo vyšetření interakce laserového paprsku s obráběným řezným materiálem, kde bylo nutné experimentálně zjistit vliv každého parametru nastavení laserového paprsku na obráběný materiál. Toto komplexní vyšetření laserového paprsku poskytuje mnoho cenných informací o jednotlivých parametrech, mezi které spadá výkon laseru P , frekvence pulzu f_p a rychlost rozmítací hlavy v_f . Kapitola 3.5 plnohodnotně umožňuje kompletní nastavení výkonu, frekvence a rychlosti rozmítací hlavy, které ovlivňuje jakost povrchu a kvalitu výsledného tvaru.

Do vlastního návrhu řešení spadá i polohování geometrických entit na břitech nástrojů, které u laseru *LAO - Shine Fiber 20W* řeší absenci zaměřovacího zařízení. Tato problematika polohování byla úspěšně vyřešena pomocí CAD/CAM systému CATIA V5 a polohovacího přípravku. Jedinou nevýhodou tohoto polohování je časová náročnost a jednorázové použití lůžka pro VBD kvůli vysokému požadavku na přesnost umístění detailů. V závěru kapitoly vlastního návrhu řešení je čtenář seznámen s cyklem navržené metodiky úpravy břítu nástroje,

kteřý propojuje všechny nutné kroky a poznatky získané diplomantem. Výstupem cyklu je získání tvarového duplikátu.

V realizaci experimentů již byly aplikovány veškeré vyzkoumané poznatky na SK a PKD, ve kterých byla zjištěna určitá omezení, která vyplynula jak z použitého laserového zdroje, tak z absence polohovacího zařízení. Použití laserového zdroje s nanosekundovou délkou pulzu neumožňuje docílit na SK požadovanou drsnost povrchu, která byla definována v úvodní kapitola 1.1 (Cíle práce). Tato skutečnost je dána ns délkou pulzu (100 ns), která neumožňuje proces studené ablace a v určité míře zde vzniká tepelně ovlivněná oblast, která zhoršuje kvalitu povrchu a vnáší značné teplo do objemu materiálu SK. Tento jev může iniciovat trhliny a tím degradovat trvanlivost břítu nástroje. Úprava PKD pomocí laseru s ns pulzy již vykazuje kvalitativně lepší povrch. V tomto případě zde hrají role odlišné materiálové vlastnosti PKD oproti SK, zvláště vyšší absorbitivita PKD při dopadu laserového paprsku o vlnové délce 1064nm.

Po těchto provedených experimentech lze laser *LAO - Shine Fiber 20W* určit jako vhodné zařízení pro úpravu břitů vyrobených z PKD. Pro břítý nástrojů z SK je z výše uvedených důvodů nevhodný. Pro docílení procesu studené ablace je nutné při této vlnové délce laserového paprsku použít laserový zdroj s ultrakrátkou délkou pulzu (menší než 10 ps).

Literatura

- [1] **AURICH, ZIMMERMANN, LEITZ.** *The preparation of cutting edges using a marking laser.* German Academic Society for Production Engineering[online]. 2010 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.springer.com/>>
- [2] *Hard metals for precision tools.* [online]. Tyrol: CERATIZIT Austria Gesellschaftm.b.H., 2012 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z WWW:< <http://www.ceratizit.com/>>
- [3] *K-55SF New Top Carbide Grade for Special Performance.* [online]. Kulmbach: Konrad Friedrichs GmbH & Co. KG, 2012 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z WWW: < http://www.german-carbide.com/fileadmin/content/Produktkatalog_K-Series.pdf>
- [4] **BERAN, Ondřej.** *Kalibrace optiky.* Praha: Megaflex, spol. s.r.o., 2012. 4 s.
- [5] **Novák, Miroslav.** *Průmyslové lasery (1) - princip laseru.* MM spektrum [online]. 13.03.2012 [cit. 2012-11-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>>
- [6] **Novák, Miroslav.** *Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi.* MM spektrum [online]. 04.09.2012 [cit. 2012-11-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>>
- [7] **MEIJER, J. a kol.** *Laser Machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons.* CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. 2002 [cit. 2012-11-16]. Dostupné z WWW:< http://ac.els-cdn.com/S0007850607616990/1-s2.0-S0007850607616990-main.pdf?_tid=bb3bb4e8-8034-11e2-ada3-00000aacb362&acdnat=1361897654_756c6d8d81a7fe54388f45fe4bf1cdb6>
- [8] **PETKOV, Petko.** *LASER MILLING: SURFACE INTEGRITY, REMOVAL STRATEGIES AND PROCESS ACCURACY* [online]. United Kingdom: Cardiff University 2011 [cit. 2012-11-25]. Dostupné z WWW: <<http://orca.cf.ac.uk/13705/1/2011PetkovPVPhD.pdf>>
- [9] *Fiber Laser Technology from Coherent.* [online].[cit. 2012-11-30]Dostupné z WWW:<http://www.coherent.com/flash/FlashTalisker/co1426_talisker_eng.html>
- [10] Dostupné z WWW:<<http://www.lao.cz-serial-laserove-rezani.htm>> [cit. 2012-11-17]
- [11] **LASSERPLUSSAG.** *Ray Cutter®* [online]. Německo, 2012. [cit. 2013-02-15]. Dostupné z WWW:<<http://laserpluss.de/cms/index.php?id=raycutter3000&L=1>>
- [12] **EWAG AG.** *LASER LINE - High-end laser machining center for modern tool manufacturing.* [online]. Švýcarsko, 2012. [cit. 2013-02-06]. Dostupné z WWW:<<http://www.ewag.com/en/products/lasering.html>>
- [13] *LASERTEC SeriesShape/PrecisionTool/FineCutting/PowerDrill.* [online]. Německo: DMG / MokiSeiki Deutschland GmbH, 2011. [cit. 2013-02-18]Dostupné z

WWW:<http://en.dmgmorse.com/pq/lasertec-40-precisiontool_en/pl0uk11_lasertec_series.pdf>

[14] **LASERTEC Precision Tool - Series**. [online]. DMG Europe Holding GmbH, 2011. [cit. 2013-02-18] Dostupné z WWW:<http://en.dmgmorse.com/pq/lasertec-40-precisiontool_en/pl0uk12_lasertec_precisiontool_series.pdf>

[15] **YUEN, PengFong; SUI Xiaodi**. *Proposal - Aethon System with Talisker Ultra 532-8*. Coherent Singapore, 2012, 15 s.

[16] **COHERENT, Inc**. *Picosecond Industrial Laser - Talisker Ultra 532-8*. [online] Santa Clara, CA, 2012, [cit. 2013-02-22]. Dostupné z WWW:<http://www.coherent.com/downloads/Talisker_Ultra532_DS_0412_4.pdf>

[17] **COHERENT, Inc**. *Modelocked UV Laser - Paladin Advanced 355*. [online] Santa Clara, CA, 2011, [cit. 2013-02-22]. Dostupné z WWW:<http://www.coherent.com/downloads/PaladinAdvanced355_DSrevB_0112_2.pdf>

[18] **COHERENT, Inc**. *Solid-State Q-Switched Ultraviolet Lasers - AVIA 355-23*. [online] Santa Clara, CA, 2007, [cit. 2013-02-22]. Dostupné z WWW:<http://www.coherent.com/downloads/AVIA_355-23_DS_final.pdf>

[19] **DUBEY, YADAVA**. *Laser beam machining*. International Journal of Machine Tools & Manufacture [online]. 2008 [cit. 2013-02-22]. Dostupné z WWW:<<http://www.sciencedirect.com/>>

[20] **HUMÁR, Antonín**. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

[21] **KŘÍŽ, Antonín**. *Řezná keramika*. Přednáška KMM/MO, ZČU Plzeň 2012

[22] **KŘÍŽ, Antonín**. *Supertvrdé řezné materiály*. Přednáška KMM/MO, ZČU Plzeň 2012

[23] **DAHOTRE, HARIMKAR**. *Laser Fabrication and Machining of Materials* [online]. The University of Tennessee, Knoxville: Springer, 2008 [cit. 2013-02-22]. Dostupné z WWW:<<http://books.google.cz/books?id=HeMwJetWUG4C&printsec=frontcover&dq=Laser+Fabrication+and+Machining+of+Materials&hl=cs&sa=X&ei=4ucpUaG4H8TGtQb0sIGIAg&ved=0CDgQ6AEwAA#v=onepage&q=Laser%20Fabrication%20and%20Machining%20of%20Materials&f=false>>

[24] **ČERNÝ, Zdeněk**. *Utváření ocelových třísek při soustružení materiálů „Jethete“ a „Hykro“ ve firmě Precision Castparts CZ s.r.o.* Plzeň, 2012. diplomová práce (Ing.). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta strojní

[25] **HOFMANN, P**. *Přednášky z KTO/TO*. Plzeň: ZČU, 2012. 108 s.

[26] **SANDVIK COROMANT**. *Technical guide -general turning*. 2012. 529 s.

[cit. 2013-02-25]. Dostupné z

WWW:<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-us/TURN_A.pdf>

[27] **SHAMOTO**, E. a kol. *Control of chip flow with guide grooves for continuous chip disposal and chip-pulling turning*. CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. 2011 [cit. 2013-02-26]. Dostupné z WWW:<http://ac.els-cdn.com/S0007850611000825/1-s2.0-S0007850611000825-main.pdf?_tid=926f6bfe-8034-11e2-9365-00000aacb362&acdnat=1361897585_aca603f7d9a47586c0db8f04c5ae6b33>

[28] *ShineFiber*. [online]. Praha: Megaflex, spol. s.r.o., 2012. [cit. 2013-03-01]

Dostupné z WWW:

<http://www.trotec-laser.cz/pages/trotec/pdf/LASER%20SHINE%20FIBER_CZ.pdf>

Seznam příloh

Příloha č. 1

Specifikace IFM G4 zn. Alicona

Příloha č. 2

Výkresová dokumentace polohovacího přípravku

Příloha č. 3

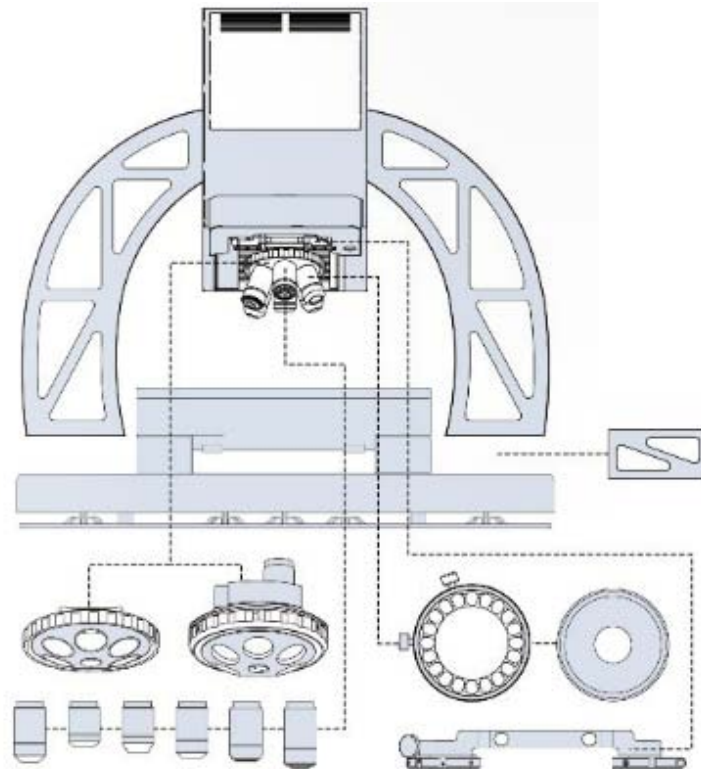
2 grafy pro slinutý karbid TSM33 (U, N)

Příloha č. 4

Kalibrace optiky laseru LAO - Shine Fiber 20W

Příloha č. 1

Specifikace IFM G4 zn. Alicona



OBJECTIVES

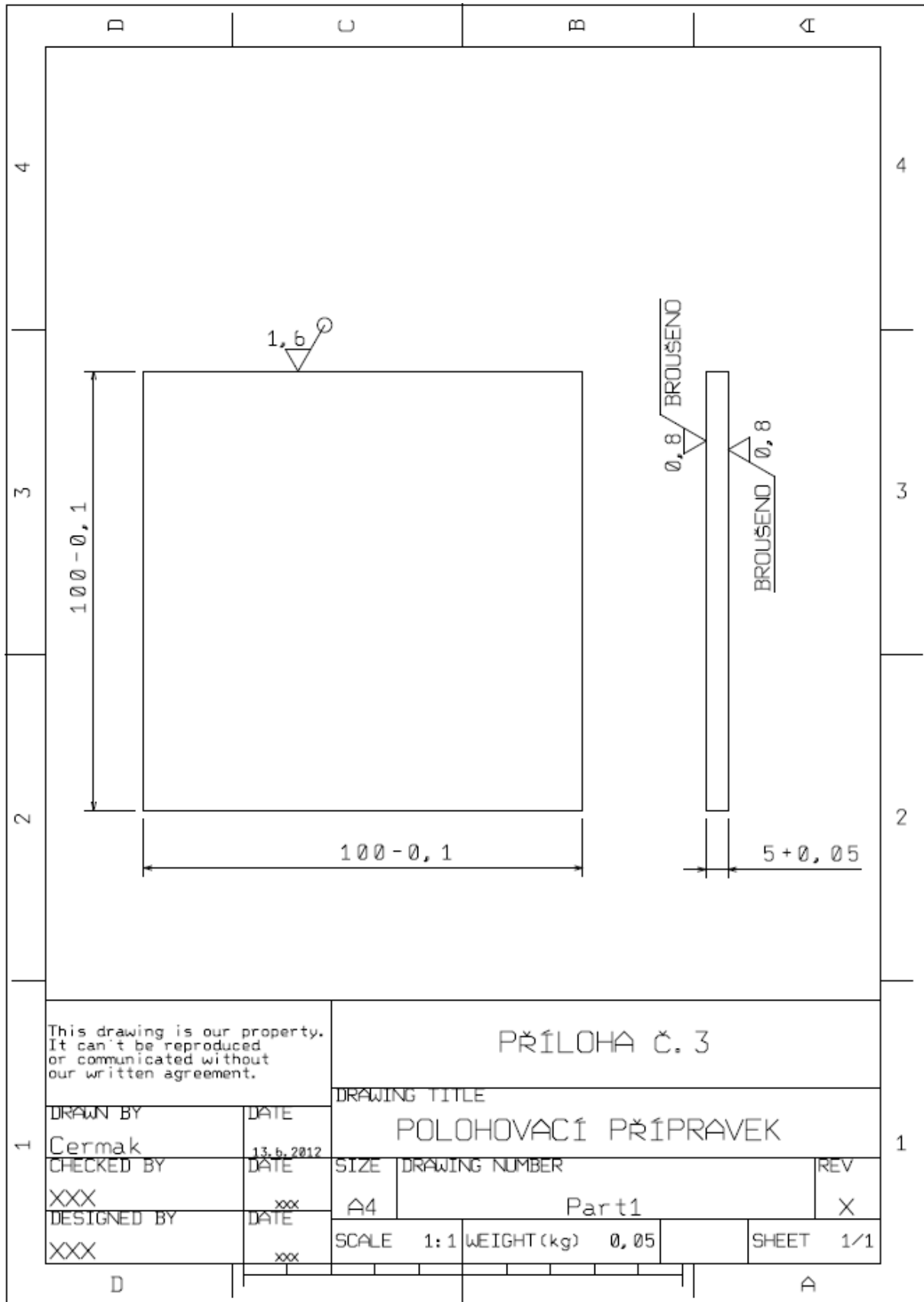
Objectives		2,5x	5x	10x	20x	50x	100x
Lateral sampling distance	μm	3.52	1.76	0.88	0.44	0.18	0.09
Min. lateral resolution	μm	58.71	23.48	11.74	8.8	6.4	4.4
Max. lateral resolution	μm	6.92	3.49	1.75	0.88	0.64	0.44
Min. repeatability (vert.)	μm	0.8	0.12	0.03	0.015	0.008	0.003
Max. scan height (approx.)	mm	8	22	16	12	9	3.2
Scan speed*	$\mu\text{m/s}$	2300	400	100	50	20	10
Best vertical resolution**	nm	2300	410	100	50	20	10
Vertical dynamic		3400	52000	160000	250000	430000	380000
Working distance	mm	8.8	23.5	17.5	13.0	10.1	3.5
Field of view X	μm	5716	2858	1429	715	286	143
Field of view Y	μm	4351	2175	1088	544	218	109
Max. extended field of view Y	mm^2	10000	10000	10000	4500	700	150
Max. uni-directional scan extension	mm	100	100	100	100	100	100

RANGE OF RESOLUTION AND APPLICATIONS

Objectives		2,5x	5x	10x	20x	50x	100x
Min. measurable height	nm	2300	410	100	50	20	10
Max. measurable height (approx.)	mm	8	22	16	12	9	3.2
Step height accuracy (1mm height step)	%	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Max. measurable area	mm^2	10000	10000	10000	4500	700	150
Max. measurable profile length	mm	100	100	100	100	100	100
Min. repeatability	nm	800	120	30	15	8	3
Min. measurable roughness (Ra)*	nm	7000	1200	300	150	60	30
Min. measurable roughness (Sa)*	nm	3500	600	150	75	30	15
Min. measurable radius	μm	20	10	8	5	2	1
Min. measurable vertical angle	°	20	20	20	20	20	20

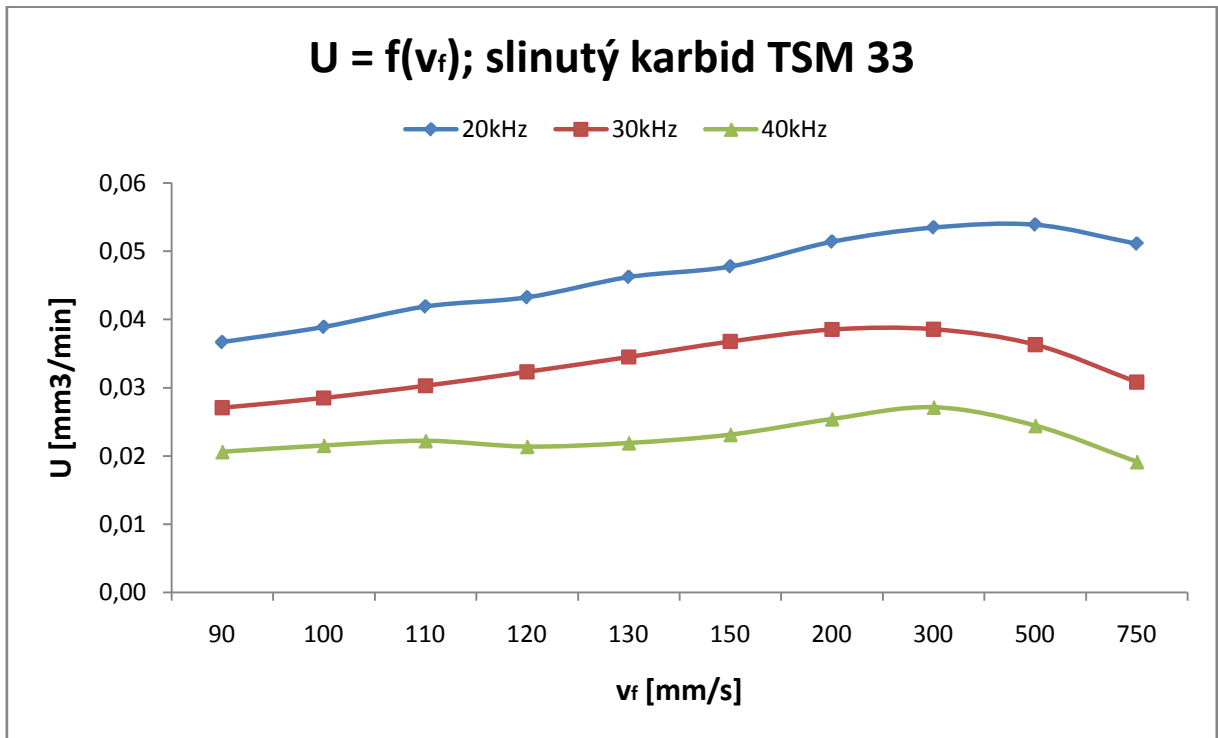
Příloha č. 2

Výkresová dokumentace polohovacího přípravku

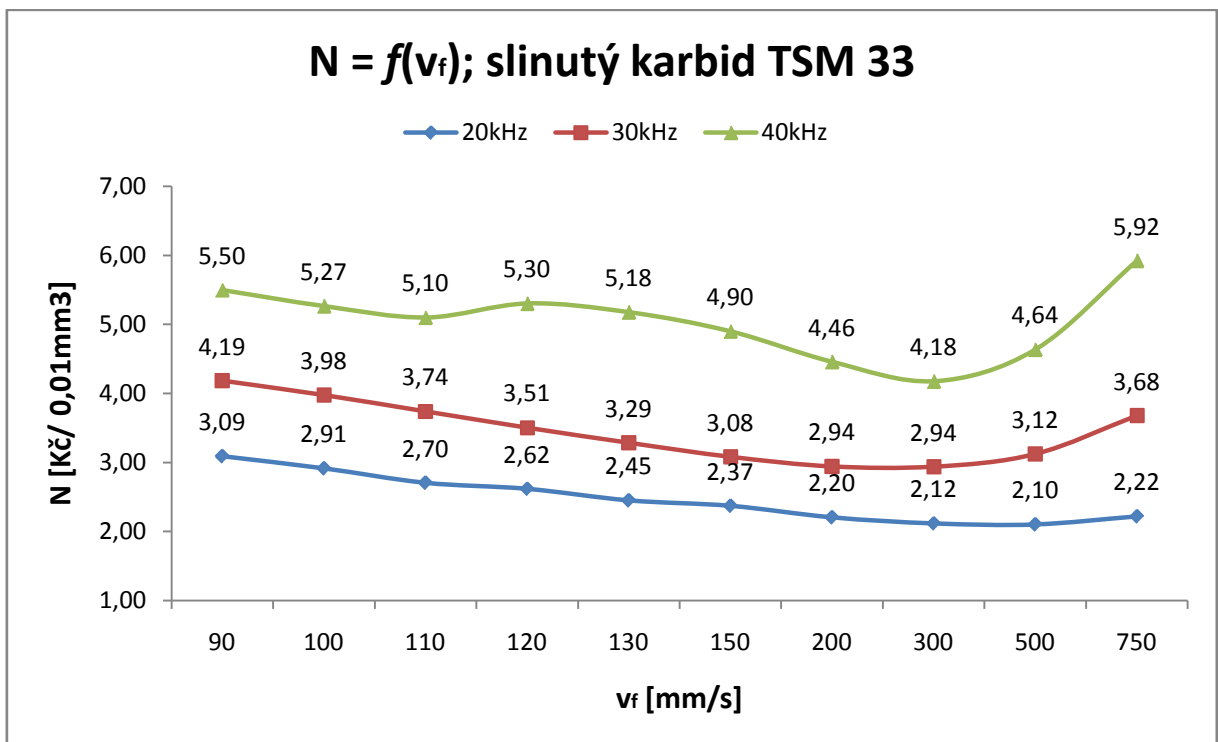


Příloha č. 3

2 grafy pro slinutý karbid TSM33 (U , N)



Graf 0-1 $U=f(v_f)$; slinutý karbid TSM 33

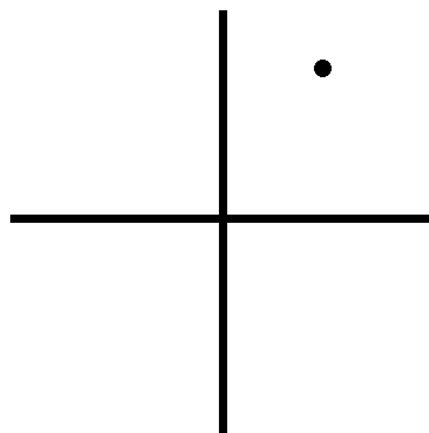


Graf 0-2 Jednicové náklady na ablaci $V=0,01\text{mm}^3$

Příloha č. 4

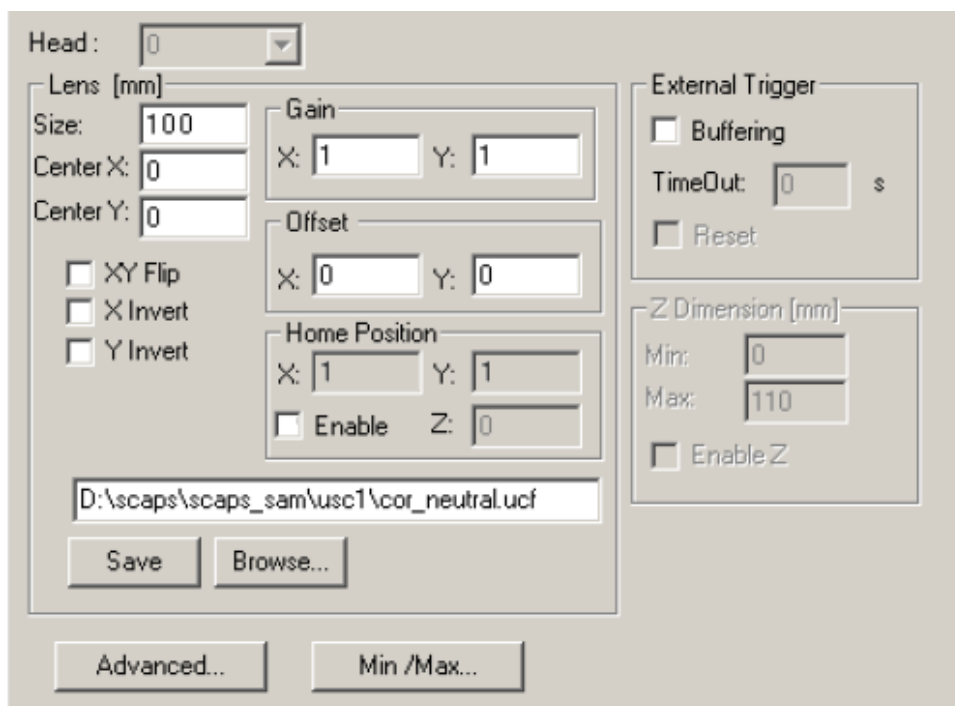
Kalibrace optiky laseru LAO - Shine Fiber 20W

K tomu, aby se uživatel zorientoval ve správném nastavení os (je zde možnost, že jsou osy invertovány), se musí zvolit vhodný model, který na první pohled odhalí případné nejasnosti hrubého seřízení os. V tomto případě se může jednat o nitkový kříž (ukazující osy X a Y) o délce úseček např. 40 mm a šířky 1 mm, který bude mít v 1. kvadrantu symbol (např. tvar kruhu). Tento model (Obrázek 3-1) si obsluha vytvoří v CAD softwaru.



Obrázek 0-1 Model pro prvotní seřízení os

Samotný mikroobráběcí proces probíhá na jakékoliv rovné kovové destičce. Po mikroobrobení obsluha zkontroluje, zda se kruh zobrazil v 1. kvadrantu nitkového kříže. Jestliže se kruh zobrazil v jiném kvadrantu, tak se osy musí prohodit v 3D modulu. V hlavním okně 3D SCAPS se v nabídce otevře nastavení → systém, kde se nachází záložka Optika. V této záložce (Obrázek 3-2) se bude odehrávat téměř kompletní kalibrace optiky. Pro invertování je možné vybrat "XY Flip" - prohození os o 90°, "X Invert" - prohodí zrcadlově osu X a "Y Invert" - prohodí zrcadlově osu Y. Výběr se potvrdí tlačítkem OK a pokus mikroobrobení se pro kontrolu zopakuje.



Obrázek 0-2 Okno pro seřízení optiky

V dalším kroku se již kalibrují osy, kde se v kalibruje každá zvlášť.

Nejprve se kalibruje optika v ose X a to tím způsobem, že se ve správném ohnisku označí obdélníček (pro výše uvedenou pracovní plochu 110x110 mm lze zvolit obdélník z rozměry 100x1 mm). Při kalibraci osy X se bude vypočítávat nová hodnota "Size", která je původně nastavena na hodnotu 100. Ke spočítání této nové velikosti je nutné znát původní hodnotu okna "Size", nastavenou délku obráběného obdélníku (100mm) a naměřenou (reálnou) délku obrobeného obdélníku. Ze vzorce č. 3 se spočítá nová hodnota "Size", která se přepíše ve výše uvedeném okně nastavení a potvrdí tlačítkem OK.

$$Size_{nová} = \frac{délka_{měřená}}{délka_{nastavená}} * Size_{původní} \quad (3)$$

Pozn.: hodnoty Center X a Y budou mít hodnotu 0 a 0.

Tento krok se opakuje dokud se naměřená délka rovná délce nastavené (4). Počet kroků iterace závisí na zručnosti obsluhy.

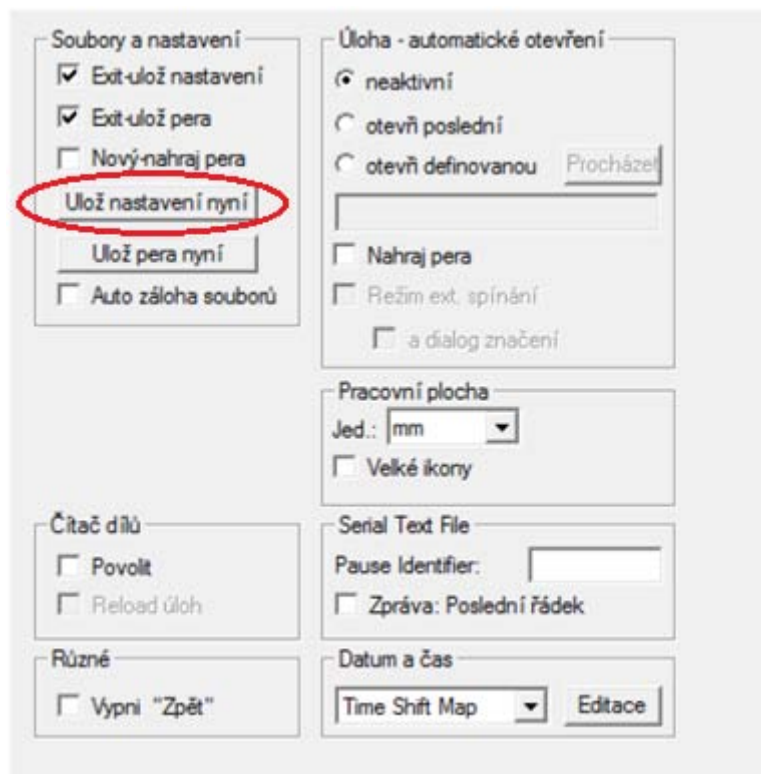
$$délka_{měřená} = délka_{nastavená} \quad (4)$$

Kalibrace optiky v ose Y se provádí v poli "Gain" a pouze v Y složce (dále jen "Gain_Y"). K tomu bude zapotřebí obdélník o rozměrech 1x100 mm. Při kalibraci osy Y se bude vypočítávat nová hodnota "Gain_Y", která je původně nastavena na hodnotu 1. Ke spočítání této nové hodnoty je nutné znát původní hodnotu pole "Gain_Y", nastavenou délku obráběného obdélníku (100mm) a naměřenou (reálnou) délku obrobeného obdélníku. Ze vzorce č. 5 se získá nová hodnota "Gain_Y".

$$Gain_Y_{nová} = \frac{délka_{měřená}}{délka_{nastavená}} * Gain_Y_{původní} \quad (5)$$

Tento krok se opakuje, dokud neplatí rovnice (4).

Poté, co jsou korektně seřizeny jednotlivé osy, obsluha přejde v okně nastavení do záložky Obecné (Obrázek 3-3), kde uloží hodnoty kalibrace tlačítkem "Ulož nastavení nyní" a potvrdí tlačítkem OK.



Obrázek 0-3 Okno pro uložení kalibrace optiky