

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303V004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

DISERTAČNÍ PRÁCE

LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů

Autor:
Školitel:

Ing. Adam Čermák
Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.

Plzeň 2017

Garance a vedení disertační práce

Vedoucí katedry:	Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.	ZČU - FST/KTO/RTI
Vedoucí oddělení:	Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.	ZČU - FST/KTO/RTI
Školitel:	Ing. Pavel Kožmín, Ph. D.	HOFMEISTER s.r.o.

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma

LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

.....
Podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků disertační práce včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat řadě lidí, kteří mi byli po dobu mého doktorského studia velkou oporou jak po studijní, profesní, tak i po osobní stránce. Velké díky patří panu školiteli Ing. Pavlu Kožmínovi, Ph.D., který po celou dobu mého studia vnášel do mé činnosti své cenné rady, hodnotné postřehy a připomínky. Další velké díky směřuji do centra fyzikálních věd a technologií FTMC ve Vilniusu, kde jsem mohl s předními odborníky z vědecké a průmyslové sféry konzultovat problematiku laserového mikroobrábění, jejichž poznatky a odborné rady výraznou měrou přispěly k tvorbě této práce.

Další poděkování patří především dvěma subjektům, katedře technologie obrábění a firmě HOFMEISTER s.r.o., jenž mi umožnily svým materiálovým a technologickým zázemím realizaci této disertační práce.

Tato práce vznikala za podpory řady projektů: „Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie – technologie obrábění I“ - SGS 2013 - 031; „Rozšíření vývojového centra řezných nástrojů“ – 4.2 PT03/938; „Progresivní laserové technologie“ - TA04011000 a „Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie – technologie obrábění II“ SGS 2016 – 005. Všechny zmíněné projekty významným způsobem umožňovaly efektivní nabytí erudice v takto dynamicky se rozvíjejícím a komplexním oboru, kterým technologie laserového mikroobrábění bezesporu je.

V neposlední řadě chci poděkovat mým rodičům za morální podporu, avšak největší díky směřuji Bc. Petře Mikulenkové, která pro mě byla velkou oporou nejen při zpracování této práce, ale po celou dobu studia na Fakultě strojní.

Anotace

Disertační práce *LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů* se zabývá vývojem a integrací technologie radiálního laserového mikroobrábění pro výrobu makrogeometrických prvků, jež jsou vytvářeny do obecných ploch monolitních řezných nástrojů. Hlavní cíl práce klade důraz na eliminaci současných nevýhod technologie laserového mikroobrábění, mezi které lze zařadit nízkou produktivitu samotné technologie a její složitou integraci do procesního řetězce výroby monolitních řezných nástrojů. Řešení takovéto komplexní úlohy je rozděleno do tří jednotlivých parciálních cílů.

V první části práce je charakterizovaný návrh metodiky pro zvýšení efektivity ablačních procesů, kde je řešena produktivita mikroobrábění na základě parametrů laserového zdroje s ultrakrátkými pulsy vůči mikroobráběným řezným materiálům. Druhá část pojednává o metodickém návrhu, jenž slouží pro 3D zaměřování břitů monolitních řezných nástrojů v pracovním prostoru laserového stroje s následným velmi precizním polohováním 3D makrogeometrických prvků určených k laserovému mikroobrábění. Třetí část práce řeší návrh technologie výroby makrogeometrických prvků z pohledů strategie rozmítání laserového paprsku a procesních parametrů laseru, kde lze využít dva přístupy polohování: v režimu synchronizace kinematiky stroje a galvo-skeneru (řízení os 5+1), popř. v režimu indexace kinematiky stroje a galvo-skeneru (řízení os 2+4).

V závěru práce byly ověřeny všechny autorem navržené metodiky pomocí případové studie, kde byly úspěšně evaluovány výsledky makrogeometrických úprav provedených na dvou monolitních řezných nástrojích. Na jejich obecných plochách byly aplikovány oba zmíněné přístupy polohování.

Annotation

Dissertation thesis *LASER in Micromachining Processes of Monolithic Cutting Tools* deals with development and integration of radial laser micromachining technology for manufacturing of macrogeometrical features, which are manufactured into general surfaces of monolithic cutting tools. The main goal of the thesis is focused on elimination of current disadvantages of laser micromachining technology. Especially a low productivity of the technology and its complicated integration into process chain of monolithic cutting tools are solved. Due to such a complex task, this problem is divided into three individual goals.

In the first part of thesis a designed methodology for increasing of the ablation process efficiency is characterized. Micromachining productivity is solved on the basis of ultra-short laser source with dependence on micromachined cutting materials. Next part of thesis deals with a methodical design, which serves for 3D targeting of cutting edges on monolithic cutting tools in the workspace of the laser machine. Very precise positioning of 3D macrogeometry features against cutting edges for laser micromachining purposes is the main benefit of this multi-axis positioning methodology. A design of manufacturing technology for creation of macrogeometrical features from the view of scanning strategy of laser beam and its process parameters is solved in the third part of thesis. Two positioning approaches during laser micromachining can be used: synchronization mode of kinematics and galvo-scanner (axis control 5+1); indexing mode of kinematics and galvo-scanner (axis control 2+4).

All designed methodologies were verified by case study at the end of the thesis, where the result of macrogeometrical preparations on two monolithic cutting tools were performed and successfully evaluated. Both of these positioning approaches were applied to their general surfaces.

Obsah

1 Úvod.....	16
1.1 Řezné nástroje z pohledu nároků současného průmyslu	16
1.2 Laserový systém pro potřeby mikroobrábění	17
1.3 Využití laserového mikroobrábění v oblasti řezných nástrojů	19
1.3.1 Radiální mikroobrábění.....	19
1.3.2 Tangenciální mikroobrábění.....	20
1.4 Analýza problematiky laserového mikroobrábění řezných nástrojů a její komplexnost.....	21
1.4.1 Stanovení cílů disertační práce	22
2 Abláční procesy vybraných řezných materiálů	24
2.1 Ablace jako mechanismus laserového mikroobrábění	24
2.1.1 Absorbivita	24
2.1.2 Vlastnosti laserového paprsku	24
2.1.3 Mechanismy ablace se zřetelem na délku pulsu.....	28
2.1.4 Teorie ablačního procesu.....	30
2.1.5 Dynamika rozmítání laserového paprsku	35
2.2 Produktivita a způsoby vyšetření ablačních procesů.....	40
2.2.1 Současné možnosti zvyšování produktivity laserového mikroobrábění	40
2.2.2 Metodické přístupy přípravných a ablačních procesů.....	41
2.2.3 Specifikace prvního parciálního cíle disertační práce	43
2.2.4 Získání okrajových podmínek laserového systému s následným využitím	43
2.2.5 Návrh pokročilého způsobu experimentálního testování ablace materiálu.....	48
2.3 Studie ablačních procesů vybraných řezných materiálů.....	52
2.3.1 Vstupní parametry pro vyšetření materiálové ablace	53
2.3.2 Stanovení ablačního prahu F_{th} řezného materiálu.....	55
2.3.3 Stanovení okrajových podmínek laserového systému na základě mikroobráběného materiálu.....	56
2.3.4 Vyšetření ablačních procesů při zvyšování poměru F_0/F_{th}	57
2.3.5 Vyšetření ablačních procesů při konstantním poměru $F_0/F_{th} = e^2$	62
3 Metodický návrh zaměření břitů monolitních řezných nástrojů pro účely laserového mikroobrábění.....	68
3.1 Problematika polohování laserového paprsku vůči břitům monolitního řezného nástroje	69
3.1.1 Nepřesnosti broušeného monolitního řezného nástroje.....	69
3.1.2 Kritéria laserového systému pro zaměřování břitů monolitních řezných nástrojů.....	70
3.1.3 Specifikace druhého parciálního cíle disertační práce	70
3.2 Geometrické prvky monolitních řezných nástrojů pro potřeby zaměření	71
3.3 Vývojové fáze postupu řešení navrhované metodiky.....	72

3.4	Postup řešení jednotlivých sub-programů	74
3.4.1	Charakteristika hlavního parametrického programu	76
3.4.2	Zaměření osy nástroje.....	78
3.4.3	Vyšetření bodů na ose nástroje.....	79
3.4.4	Vyšetření bodů na průměru nástroje	84
3.4.5	Stanovení výchozího bodu laserového paprsku	89
3.4.6	Laserový proces mikroobrábění na zaměřených břitech monolitního řezného nástroje	91
4	Principy tvorby makrogeometrických prvků na monolitních řezných nástrojích	93
4.1	Nové technologické přístupy v oblasti utvařečů třísek.....	93
4.1.1	Specifikace třetího parciálního cíle disertační práce.....	94
4.2	Výroba utvařeče třísek pomocí indexace kinematiky laserového systému	95
4.2.1	Experimentální vyšetření tvaru geometrické entity v přechodové oblasti.....	96
4.3	Výroba utvařečů třísek pomocí synchronního polohování kinematiky laserového systému.....	99
4.3.1	Výpočtový modul pro nadefinování tvaru geometrické entity	101
4.3.2	Výpočtový modul relativního pohybu.....	104
5	Ověření naplnění cílů disertační práce	107
5.1	Případová studie pro ověření navržených metodik.....	107
5.1.1	Stanovení procesních parametrů laserového mikroobrábění z hlediska ablačního procesu	108
5.1.2	Tvorba prototypu segmentového utvařeče třísek.....	109
5.1.3	Tvorba prototypu plynulého utvařeče třísek.....	111
5.2	Evaluační dosažených výsledků po laserovém mikroobrábění	112
5.2.1	Tvarová a rozměrová přesnost	112
5.2.2	Kvalita mikroobrobených entit.....	112
5.3	Shrnutí evaluace výsledků	113
6	Budoucí trendy laserového mikroobrábění v oblasti monolitních řezných nástrojů.....	115
6.1	Funkcionalizace povrchů vlivem jeho mikrostrukturování	115
6.2	Precisní ostření monolitních řezných nástrojů.....	116
6.3	Tvorba monolitních řezných mikronástrojů	118
7	Závěr.....	119
8	Literatura.....	121
9	Publikační činnost autora	127
10	Přílohy.....	129

Seznam zkratek

Zkratka	Popis	
	Anglický ekvivalent	Český ekvivalent
CAD	computer aided design	-
CBN	Cubic boron-nitride	Kubický nitrid bóru
Co	cobalt	kobalt
CPA	chirped pulsed amplifier	technologie pro zesilování ultrakrátkých pulsů
CVD-D	Chemical Vapor Deposition -diamond	Diamant vyrobení CVD technologií
DOE	deflective optics element	optický difrakční element
EDM	Electro-discharge machining	Elektro-erozivní obrábění
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy	elektronová spektroskopie
(F)LIPSS	(Femtosecond) Laser Induced Periodic Surface Structures	Laserem Indukované Periodické Povrchové Struktury (fs pulsy)
GaAs	Gallium arsenide	Arsenid gallitý
HAZ	Heat affected zone	Tepelně ovlivněná oblast
HWP	half-wave plate	($\lambda/2$), neboli půl-vlnná destička
K10	-	ISO třída slinutého karbidu
LIDT	laser induced damage threshold	„limitní hustota energie pro optické komponenty“
NaCl	Sodium chloride	Chlorid sodný
NbC	Niob carbide	karbid niobu
PCD	Polycrystalline diamond	Polykrystalický diamant
PLC	Programmable logic controller	Programovací logický kontroler
QWP	quarted-wave plate	($\lambda/4$), neboli čtvrt-vlnná destička
RI	recognition interface	rozeznávací rozhraní
SK	Cemented carbide	Slinutý karbid
SLM	spatial light modulator	prostorový světelný modulátor
TaC	tantalum carbide	karbid tantalu
TEM	Transverse electromagnetic mode	Příčný elektromagnetický mód
TiC	titanium carbide	karbid titanu
UI	User interface	Uživatelské rozhraní
USP	Ultrashort pulse	Ultrakrátký puls
VBD	Indexable cutting insert	Vyměnitelná břitová destička
WC	tungsten carbide	karbid wolframu
I H	First harmonic	První harmonická (celek základní vlnové délky) – např. $\lambda=1064\text{nm}$
II H	Second harmonic	Druhá harmonická (polovina základní vlnové délky) – $\lambda=532\text{nm}$
III H	Third harmonic	Třetí harmonická (třetina základní vlnové délky) – $\lambda= 355\text{nm}$
IV H	Fourth harmonic	Čtvrtá harmonická (čtvrtina základní vlnové délky) – $\lambda = 266\text{nm}$
*dxf	drawing exchange format	-
*dwg	DraWinG	-

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A_{abs}	-	Absorbivita
$A_{\text{def},1}$	-	souřadnice definovaného okolí bodu A ležící na prvním břítu
A_{wob}	mm	velikost amplitudy při „wobblingu“
$A_{\text{wob},i}$	mm	proměnná velikost amplitudy při „wobblingu“
Attn	%	atenuátor (procentuální vyjádření použitého výkonu laserového zdroje z jeho maxima)
A^0	-	souřadnice průsečíku v bodě A pro všechny břity v maticovém zápisu
A_1^0	-	souřadnice průsečíku v bodě A pro první vyšetřený břit
A^1	-	rozeznaná data přímky v oblasti bodu A pro všechny břity v maticovém zápisu
A^2	-	stanovená data přímky v oblasti bodu A pro všechny břity v maticovém zápisu
$A^1 \cap A^2$	-	průnik z rozeznaných a stanovených dat přímek A^1 a A^2 pro výpočet výsledné polohy průsečíků A^0
$B_{\text{def},1}$	-	souřadnice definovaného okolí bodu B ležící na prvním břítu
B^0	-	souřadnice průsečíku v bodě B pro všechny břity v maticovém zápisu
B^1	-	rozeznaná data přímky v oblasti bodu B pro všechny břity v maticovém zápisu
B^2	-	stanovená data přímky v oblasti bodu B pro všechny břity v maticovém zápisu
$B^1 \cap B^2$	-	průnik z rozeznaných a stanovených dat přímek B^1 a B^2 pro výpočet výsledné polohy průsečíků B^0
$C_{\text{def},1}$	-	souřadnice definovaného okolí bodu C ležící na prvním břítu
C^0	-	souřadnice průsečíku v bodě C pro všechny břity v maticovém zápisu
C_1^0	-	souřadnice průsečíku v bodě C pro první vyšetřený břit
C^1	-	rozeznaná data přímky v oblasti bodu C pro všechny břity v maticovém zápisu
C^2	-	stanovená data přímky v oblasti bodu C pro všechny břity v maticovém zápisu
$C^1 \cap C^2$	-	průnik z rozeznaných a stanovených dat přímek C^1 a C^2 pro výpočet výsledné polohy průsečíků C^0
del	-	rovnoměrný / nerovnoměrný dělení břitů
dx	μm	vzdálenost mezi středy pulsů ve směru X_{galvo}
dT	mm	velikost kroku určující vzdálenost referenčních bodů mezi segmentovými geometrickými entitami ležící na trajektoriích břitů mezi body E a D^0
(dV/dt)	mm^3/min	objem ablace za jednotku času viz \dot{V}
dy	μm	vzdálenost mezi středy pulsů ve směru Y_{galvo}
D	μm	velikost zaostřeného paprsku – „laser spot“
D_0	$\mu\text{m}/\text{mm}$	průměr paprsku pro intenzitu $1/e^2$ před vstupem do fokusační optiky
D^2	μm	kvadrát „laser spotu“
$D_{\text{def},1}$	-	souřadnice definovaného okolí bodu D ležící na prvním břítu
D^0	-	souřadnice průsečíku v bodě D pro všechny břity v maticovém zápisu
D^1	-	rozeznaná data přímky v oblasti bodu D pro všechny břity v maticovém zápisu
D^2	-	stanovená data přímky v oblasti bodu D pro všechny břity v maticovém zápisu

$D^1 \cap D^2$	-	průnik z rozeznávaných a stanovených dat přímkou D^1 a D^2 pro výpočet výsledné polohy průsečíků D^0
\varnothing_{dh6}	mm	průměr upínací části nástroje
$\varnothing D$	mm	průměr řezné části nástroje
$\varnothing D_c$	mm	průměr řezné části nástroje ve vzdálenosti m od čela nástroje
$\varnothing D_u$	mm	průměr řezné části nástroje ve vzdálenosti $m+L_0$ od čela nástroje
E	-	souřadnice počátečních bodů pro všechny břity v maticovém zápisu
E_p	J	energie v pulsu
E_{th}	J	prahová energie v pulsu
E_1	-	souřadnice počátečního bodu pro první břit
f	mm	ohnisková vzdálenost
f_{opt}	kHz	optimální opakovací frekvence
f_p	kHz	opakovací frekvence
f_{wob}	Hz	frekvence amplitudy při „wobblingu“
$f_{wob,i}$	Hz	proměnná frekvence amplitudy při „wobblingu“
$f(x)$	-	křivka definující průřez tvaru utvařeče třísek
F	J/cm ²	hustota energie
F_0	J/cm ²	špičková hustota energie (v ose laserového paprsku)
F_0/F_{th}	-	poměrové vyjádření parametrů špičkové a prahové hustoty energie
F_{opt}	J/cm ²	optimální hustota energie
F_r	J/cm ²	lokální hustota energie závislá na poloměru paprsku r
F_{th}	J/cm ²	prahová hustota energie, ablační práh
h	mm	hloubka definovaného utvařeče třísek
H	%	faktor překrytí šrafovaní
i	-	počet generovaných hodnot
$I(0)$	W/cm ²	Intenzita záření na povrchu
$I(z)$	W/cm ²	Intenzita záření v hloubce z
I_0	W/cm ²	maximum intenzity záření ($r = 0$)
I_r	W/cm ²	Intenzita záření závislá na vzdálenosti ke středu laserového paprsku r
IT6		třída přesnosti 6
k	-	směrnice přímky
K_y	mm	prodloužení délky řezné hrany
L	mm	délka řezné hrany
$L_{celk,i}$	mm	celková délka řezné hrany i -tého břitu mezi body D^0 a E
L_i	mm	skutečná délka řezné hrany i -tého břitu v maticovém zápisu
L_0	mm	definovaná délka řezné hrany
m	mm	vzdálenost bodů A^0 a C^0 od čela nástroje
M^2	-	faktor kvality paprsku
n	mm	vzdálenost bodů B^0 a D^0 od konce řezné části nástroje
N	-	počet pulsů
P_{av}	W	Průměrný výkon
P_p	W	špičkový výkon
p_{def}	mm	definované stoupání šroubovice
p_i	mm	vypočtené stoupání šroubovice i -tého břitu v maticovém zápisu
r	$\mu\text{m}, \text{mm}$	rádus
$r_{nást}$	mm	poloměr řezné části nástroje
R	-	výpočetní matice pro vyšetření skutečného zúžení průměru řezné části nástroje ζ_i
R_a	μm	střední aritmetická drsnost profilu
Ref_i	mm	poloha referenčního bodu amplitudy i -té vrstvy $A_{wob,i}$
S	-	výpočetní matice pro vyšetření skutečné délky řezné hrany L_i
S_a	μm	střední aritmetická drsnost plochy

S_{a-IH}	μm	střední aritmetická drsnost plochy při IH
S_{a-IIH}	μm	střední aritmetická drsnost plochy při IIH
S_p	%	faktor překrytí pulsů
$S_{wob,i}$	mm	střední velikost amplitudy i-té vrstvy $A_{wob,i}$
T	-	trajektorie mezi body E a D^0 i-tého břitu v maticovém zápisu
T_{sat}	$^{\circ}\text{C}$	saturační teplota
u_a	mm	nejistota měření typu A
v_f	mm/s; m/s	rychlost rozmitání laserového paprsku
v_{f-lim}	mm/s; m/s	limitní rychlost galvo-skeneru pro rozmitání laserového paprsku
v_{f-MAX}	mm/s; m/s	použitelné maximum rozmitací rychlosti laserového paprsku
v_{kin}	mm/s	rychlost pohybu kinematiky laserového systému
$v_{kin,i}$	mm/s	proměnná rychlost pohybu kinematiky laserového systému při „wobblingu“
v_{wob}	mm/s	rychlost polohování zrcátek galvo skeneru při „wobblingu“
V_{25}	%	25 % objemové překrytí geometrických entit v přechodové oblasti
V_{50}	%	50 % objemové překrytí geometrických entit v přechodové oblasti
V_{75}	%	75 % objemové překrytí geometrických entit v přechodové oblasti
\dot{V}	mm^3/min	objem ablace za jednotku času
\dot{V}/P_{av}	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	objem ablace za jednotku času \dot{V} v poměru vůči průměrnému výkonu P_{av}
$(\dot{V}/P_{av})_{max}$	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	maximální objem ablace za jednotku času \dot{V} v poměru vůči průměrnému výkonu P_{av}
w_0	μm	rádus paprsku pro intenzitu $1/e^2$
$w_z(z)$	μm	rádus paprsku ve vzdálenosti z
x_{osa}		poloha osy nástroje ve směru osy X
x_T	mm	posunutí ve směru osy X
$X_{1,i}^f$	-	kořen 1 souřadnice X^f i-té vrstvy dle $f(x)$
$X_{2,i}^f$	-	kořen 2 souřadnice X^f i-té vrstvy dle $f(x)$
Z	mm	vzdálenost
Z_{abl}	μm	hloubka ablace
$Z_{cam,diam}$	mm	souřadnice Z kamerového pole na průměru nástroje
$Z_{cam,osa}$	mm	souřadnice Z kamerového pole v ose nástroje
Z_n	-	počet zubů nástroje
Z_T	mm	posunutí ve směru osy Z
Z	mm	hloubka ostrosti; (Rayleighův rozsah)
Z_1^f	-	souřadnice Z^f i-té vrstvy
α	K^{-1}	teplotní roztažnost
α^{A1}	$^{\circ}$	úhel natočení rozeznané přímky A^1 pro všechny břity
α^{A2}	$^{\circ}$	úhel natočení stanovené přímky A^2 pro všechny břity
α^{B1}	$^{\circ}$	úhel natočení rozeznané přímky B^1 pro všechny břity
α^{B2}	$^{\circ}$	úhel natočení stanovené přímky B^2 pro všechny břity
α^{C1}	$^{\circ}$	úhel natočení rozeznané přímky C^1 pro všechny břity
α^{C2}	$^{\circ}$	úhel natočení stanovené přímky C^2 pro všechny břity
α^{D1}	$^{\circ}$	úhel natočení rozeznané přímky D^1 pro všechny břity
α^{D2}	$^{\circ}$	úhel natočení stanovené přímky D^2 pro všechny břity
α_G	$^{\circ}$	úhel úkosu geometrické entity v přechodové oblasti
δ	nm	hloubka penetrace
ΔV	mm^3	objem ablace na jednotku pulsu
Δz_{abl}	μm	rozdíl hloubky ablace
ζ	mm	zúžení průměru řezné části nástroje
ζ_i	mm	skutečné zúžení průměru řezné části nástroje i-tého břitu v maticovém zápisu

$\zeta_{cal,i}$	mm	dopočtené zúžení průměru řezné části nástroje i-tého břítu mezi body C^0 a E
$\zeta_{celk,i}$	mm	celkové zúžení průměru řezné části nástroje i-tého břítu mezi body D^0 a E
Θ	mRad	divergence paprsku
Θ_c	°	kontaktní úhel mezi kapalinou a povrchem
λ	nm	vlnová délka
λ_{tep}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	tepelná vodivost
μ	-	absorpční koeficient
ξ	-	inkubační koeficient
τ_p	ns, ps, fs	délka pulsu
φ	°	úhel rotace liniového šrafování – při klasickém rozmítání laserového paprsku
φ_{wob}	°	úhel natočení rozmítaného obrazce – při „wobble“ rozmítání laserového paprsku
Φ_{abs}	°	absolutní hodnota rotace břítu
$\Phi_{abs,i}$	°	absolutní hodnota rotace i-tého břítu v maticovém zápisu
$\Phi_{cal,i}$	°	dopočtená relativní hodnota rotace i-tého břítu mezi body C^0 a E
$\Phi_{celk,i}$	°	celková relativní hodnota rotace i-tého břítu mezi body D^0 a E
Φ_{rel}	°	relativní hodnota rotace břítu
$\Phi_{rel,i}$	°	relativní hodnota rotace i-tého břítu v maticovém zápisu
χ	mm	definovaná šířka fazety
ψ	-	poměrný parametr mezi parametry $f_{wob,i}$ a $v_{kin,i}$
ψ_{opt}	-	použitelná oblast rozsahu poměrného parametru
ω	°	úhel stoupání šroubovice

Seznam obrázků

Obrázek 1-1 Srovnání dvou přístupů: a) radiální mikroobrábění; b) tangenciální mikroobrábění	19
Obrázek 1-2 Vliv počtu vrstev v z-ose na kvalitu mikroobrábění:	
a) modelový stav; b) malý počet vrstev; c) velký počet vrstev	20
Obrázek 1-3 Rozdíl ve tvarech obou způsobů mikroobrábění	20
Obrázek 1-4 Tangenciální mikroobrábění.....	20
Obrázek 2-1 Vliv divergence paprsku na rozložení energie dle Gausse	25
Obrázek 2-2 Znázornění M^2 faktoru jako odchylky reálného svazku od ideálního [11].....	26
Obrázek 2-3 Polarizace podél rychlé osy (vlevo - 2/3 vlnové délky) a pomalé osy (vpravo - 4 vlnové délky) [49]	27
Obrázek 2-4 Princip HWP a QWP [50]	28
Obrázek 2-5 Rozdíl rozložení energie v pulsu E_p u krátkých a ultrakrátkých pulsů	29
Obrázek 2-6 Vliv délky pulsu na přesnost mikroobrábění kovů	30
Obrázek 2-7 Profil intenzity záření laserového paprsku dle Gaussovo normálního rozložení.....	31
Obrázek 2-8 Princip rozmítání laserového paprsku do roviny X_{galvo} a Y_{galvo} [60].....	35
Obrázek 2-9 Princip rozmítání laserového paprsku pomocí polygonálního galvo skeneru	36
Obrázek 2-10 Parametry rozmítací strategie S_p a H	37
Obrázek 2-11 Výsledek mikroobrábění při různých hodnotách dy [58]	37
Obrázek 2-12 Různé druhy rozmítání paprsku pomocí funkce "wobble":	
a) lineárně ve směru X_{galvo} ; b) lineárně ve směru Y_{galvo} ; c) lineárně v definovaném natočení;	
d) kruhově; e) elipsou v definovaném natočení	38
Obrázek 2-13 Promítnutí výsledného relativního pohybu laserového paprsku na rovinnou plochu.....	38
Obrázek 2-14 Vlivy kompenzačních strategií na výsledný tvar mikroobrobené entity:	
a) bez kompenzace; b) sky-writting; c) sky-writting + synchronizace [56]	39
Obrázek 2-15 Rozložení energie v pulsu: a) do větších hodnot E_p ; b) do větších hodnot f_p	41
Obrázek 2-16 Závislost dosažené hloubky na skenovacích parametrech při $\lambda = 532 \text{ nm}$, $\tau_p < 13 \text{ ps}$, $f = 200 \text{ kHz}$, $w_0 = 12,5 \text{ }\mu\text{m}$, $F = 1,58 \text{ J/cm}^2$ [72].....	42
Obrázek 2-17 Možnost podoby pokročilé matice pro vyšetření materiálové ablace [72].....	48
Obrázek 2-18 Vzorkovací matice pro čtyři proměnné parametry: a) S_p ; b) H ; c) P_{av} ; d) f_p [72].....	49
Obrázek 2-19 Vývojový diagram pro pokročilé testování materiálové ablace	50
Obrázek 2-20 Schématická ukázka nastavení pokročilé matice 4x3 a závislostí a) $F = f(f_p, P)$; b) $Z_{abi} = f(S_p, H)$ při: $\lambda = 532 \text{ nm}$; $\tau_p = 12 \text{ ps}$; $f_p < 200; 600 \text{ kHz}>$; $Attn < 10; 100\%>$; $w_0 = 12,5 \text{ }\mu\text{m}$	51
Obrázek 2-21 Vlivy různých technologických úprav na topografii povrchu slinutého karbidu:	
A) jemné broušení; B) laserové mikroobrábění - radiální; C) laserové mikroobrábění – tangenciální.	52
Obrázek 2-22 Metalografický výbrus testovaného slinutého karbidu K10 – zvětšeno 1000x [64]	53
Obrázek 2-23 Schématické znázornění pokročilé testovací matice 5x2 včetně procesních parametrů pro zachování konstantního poměru $F_0/F_{th} = e^2$ u slinutého karbidu K10 při:	
$\lambda = 1064 \text{ nm}$; $w_0 = 20 \text{ }\mu\text{m}$	64
Obrázek 2-24 Schématické znázornění pokročilé testovací matice 3x2 včetně procesních parametrů pro zachování konstantního poměru $F_0/F_{th} = e^2$ u slinutého karbidu K10 při:	
$\lambda = 532 \text{ nm}$; $w_0 = 17,5 \text{ }\mu\text{m}$	64
Obrázek 3-1 Hlavní předpoklady laserového mikroobrábění řezných nástrojů	68
Obrázek 3-2 Vstupní parametry monolitního řezného nástroje dle výkresové dokumentace	71
Obrázek 3-3 Stanovení zúžení řezného nástroje.....	72
Obrázek 3-4 Značení os víceosé kinematiky laserového stroje.....	73
Obrázek 3-5 Nadefinování jednotlivých bodů pro realizaci zaměřování břitů monolitních řezných nástrojů	75
Obrázek 3-6 Vývojový diagram pro hlavní parametrický program	77
Obrázek 3-7 Úpínací část monolitního řezného nástroje:	
oblasti pro RI - červeně; oblast nejvyšší povrchy - žlutě.....	78
Obrázek 3-8 Vývojový diagram pro sub-program 1	79
Obrázek 3-9 Vývojový diagram pro sub-program 2	80

Obrázek 3-10 Grafické znázornění vyšetřovaných bodů a přímek: a) $A^0 A^1 A^2$; b) $B^0 B^1 B^2$	81
Obrázek 3-11 Vývojový diagram pro sub-program 3	85
Obrázek 3-12 Grafické znázornění vyšetřovaných bodů: a) $C^0 C^1 C^2$; b) $D^0 D^1 D^2$	86
Obrázek 3-13 Vývojový diagram pro sub-program 4	89
Obrázek 3-14 Vývojový diagram pro sub-program 5	91
Obrázek 4-1 Dosažitelné typy utvařečů třisek laserovou technologií: a) segmentový; b) plynulý.....	94
Obrázek 4-2 Vliv velikosti kroku dT na výsledný utvařeč třisek a) bez překrytí entit b) s překrytím entit	95
Obrázek 4-3 Přejímová oblast geometrických entit.....	96
Obrázek 4-4 Zobecněné varianty tvarových úprav přejímových oblastí	96
Obrázek 4-5 Různé úrovně překrytí přejímových oblastí v procentuálním vyjádření.....	97
Obrázek 4-6 Vývojový diagram pro výrobu utvařečů třisek.....	100
Obrázek 4-7 a) křivka $f(x)$ definující tvar průřezu utvařeče v rovině kolmé na osu nástroje, b) dekompozice funkce křivky $f(x)$ pro jednodušší definování tvaru průřezu.....	101
Obrázek 4-8 Schématické vyjádření výpočtového modulu tvaru průřezu geometrické entity v rovině kolmé na osu nástroje XZ.....	102
Obrázek 4-9 Vliv velikosti parametru ψ na strategii rozmítání laserového paprsku	105
Obrázek 5-1 Příklad pro ověření - čelní válcová fréza o třech břitech.....	107
Obrázek 5-2 Navázání tvarů dvou geometrických entit v přejímové oblasti, kde $\alpha_G = 60^\circ$ a) pohled shora, b) pohled z boku	110
Obrázek 5-3 Ukázka kompletního skenu jednoho břitu upraveného segmentovými utvařeči třisek: a) detail b) celek	113
Obrázek 5-4 Ukázka kompletního skenu jednoho břitu upraveného plynulým utvařečem třisek: a) detail b) celek	113
Obrázek 5-5 Makrosnímek zachycující výsledek obou variant vyrobených utvařečů třisek: a) plynulý, b) segmentový	114
Obrázek 6-1 Definování hydrofobních vlastností [86].....	115
Obrázek 6-2 Mikrostruktura na válcové fazetě monolitního řezného nástroje: a) stav před mikrostrukturováním, b) stav po mikrostrukturování	116
Obrázek 6-3 Vliv hustoty energie F na kvalitu řezu karbidických zrn WC při $\lambda = 532$ nm, $w_0 = 12,5$ μm : a) $F = 2$ J/cm ² , b) $F = 5$ J/cm ² , c) $F = 10$ J/cm ² [91].....	117
Obrázek 6-4 Porovnání mezi řeznou hranou (A) a upravenou laserem (B): zvětšeno 500x [92].....	117
Obrázek 6-5 Ukázky tří navržených mikronástrojů z PCD [93]	118
Obrázek 6-6 Uzavřené průřezy jednotlivých drážek definované křivkami.....	118

Seznam tabulek

Tabulka 1-1 Relativní porovnání úprav řezných nástrojů k jejím charakteristickým vlastnostem [1]..	16
Tabulka 2-1 Mechanické vlastnosti slinutého karbidu K10 [64]	53
Tabulka 2-2 Výsledné hodnoty parametrů F_0/F_{th} a w_0 pro obě vlnové délky λ	55
Tabulka 2-3 SEM detaily vyšetřovaných oblastí A, B a C dle grafu 2-14	59
Tabulka 2-4 Přehled procesních parametrů pro slinutý karbid K10.....	60
Tabulka 2-5 Hodnoty prezentující poměr $F_0/F_{th} = e^2$ při IH; $w_0=20\mu\text{m}$	62
Tabulka 2-6 Hodnoty prezentující poměr $F_0/F_{th} = e^2$ při IIIH; $w_0=17,5\mu\text{m}$	62
Tabulka 2-7 Rozmítací rychlosti laserového paprsku v_f při definovaných faktorech S_p/H pro IH ($w_0 = 20\mu\text{m}$)	63
Tabulka 2-8 Rozmítací rychlosti laserového paprsku v_f při definovaných faktorech S_p/H pro IIIH ($w_0 = 17,5\mu\text{m}$).....	63
Tabulka 2-9 Shrnutí dosažených úběrů dV/dt na referenčním a nejrychleji testovaném poli pro IH....	67
Tabulka 2-10 Shrnutí dosažených úběrů dV/dt na referenčním a nejrychleji testovaném poli pro IH..	67
Tabulka 3-1 Legenda k užívání horních a dolních indexů pro vyšetřované body.....	74
Tabulka 4-1 Detail přechodové oblasti (500x).....	97
Tabulka 5-1 Mechanické vlastnosti slinutého karbidu CTS 12D od fy Ceratizit [78]	107
Tabulka 5-2 Výsledné hodnoty parametrů definující ablační proces materiálu CTS 12D.....	109
Tabulka 5-3 Shrnující procesní parametry pro laserové mikroobrábění segmentových makrogeometrických entit.....	111
Tabulka 5-4 Shrnující procesní parametry pro laserové mikroobrábění plynulého utvařeče třísek....	111
Tabulka 5-5 Shrnující tabulka naměřených hodnot tvaru a polohy.....	112
Tabulka 5-6 Shrnující tabulka naměřených hodnot profilové drsnosti povrchu	112

1 Úvod

1.1 Řezné nástroje z pohledu nároků současného průmyslu

Hlavní zástupci klíčových průmyslových oblastí (např. automobilový a letecký průmysl, zdravotní technika) mají neustálou potřebu zvyšovat produktivitu a efektivitu obrábění. To představuje nové výzvy, a to nejen pro vývoj obráběcích strojů, ale především pro rozvoj a vylepšování řezných nástrojů používaných v těchto procesech.

Stále častěji používané supertvrdé řezné materiály (polykrystalický diamant – PCD, či kubický nitrit bóru – CBN) lze využít pro řešení otázky zvyšující se produktivity obrábění. Nicméně úprava nástrojů z těchto řezných materiálů je konvenčními způsoby velmi obtížná vzhledem k jejich extrémní tvrdosti, proto je nutné zvolit nové výrobní technologie nekonvenčního charakteru, které umožní vývoj přesné mikro- a makrogeometrie řezného nástroje.

Integrace nové, především nekonvenční technologie umožňuje výrobcům řezných nástrojů tvorbu unikátních a nezaměnitelných prvků na jejich řezných nástrojích, které ovlivní procesní vlastnosti, jako jsou např.: zvyšování řezivosti a trvanlivosti nástroje, snižování frikčního koeficientu povrchu nástroje, redukce řezných sil a dalších. Pro tvorbu přesných geometrií, velmi malých poloměrů zaoblení ostří, či definovatelných povrchových vlastností lze technologii laserového mikroobrábění považovat za velmi vhodnou volbu.

Technologie laserového mikroobrábění v oblasti řezných nástrojů nabízí mnoho benefitů a obsahuje několik nevýhod. Je-li bráno v potaz relativní porovnání všech dostupných metod sloužících k úpravě makro a mikro geometrie řezných nástrojů (Tabulka 1-1), lze získat spoustu aspektů, které ukazují přednosti a nevýhody úprav laserem.

Tabulka 1-1 Relativní porovnání úprav řezných nástrojů k jejich charakteristickým vlastnostem [1]

	Obrábění hydroabrazivním paprskem	Broušení	Magneto-abrazivní proudem	Otryskávání proudem abraziva	Obrábění LASERem	EDM
Investiční náklady	+	○	○	○	○	-
Produktivita	+	+	+	+	○	-
Integrace do procesního řetězce	++	+	+	+	○	-
Vyrobitelný rozsah - velikostní	○	+	+	+	+	○
Přesnost a opakovatelnost	++	+	○	+	-	+
Vyrobitelnost asymetrických geometrií	+	+	○	-	-	○
Úprava supertvrdých řezných materiálů	○	○	○	○	○	++
Úprava místně omezených částí řezných nástrojů	+	+	○	-	-	+
Úprava řezné hrany na komplexní geometrii	-	+	○	+	+	+

V případě předností technologie laserového obrábění lze mluvit o velmi dobré přesnosti a opakovatelnosti, úpravě lokálně omezených ploch na řezných částech nástrojů a komplexních geometrií na břitech řezných nástrojů. Obrábění supertvrdých nástrojů (PCD; CBN) lze hodnotit jako výborné. Naopak mezi nevýhody, které se vyskytují u této technologie, patří vysoké pořizovací náklady technologie, nízká produktivita a složitá integrace do procesního řetězce výroby nástrojů [1;5]. Odstranění posledních dvou zmíněných nevýhod si klade za cíl tato disertační práce.

1.2 Laserový systém pro potřeby mikroobrábění

Laserové mikroobrábění řezných nástrojů vyžaduje určitou konfiguraci laserového systému, která umožní realizovat potřebné geometrické úpravy. Charakterizovat lze laserový systém dle pěti hlavních sub-systémů, které spolu musí být vzájemně sladěné, synchronizované.

- Laserový zdroj
- Vedení a úprava laserového paprsku
- Základna systému
- Měřicí subsystém
- Řídicí subsystém

Výběr pulsního laserového zdroje je důležitý z pohledu efektivity úběru mikroobrábění, protože definuje jednu oblast vlastností laserového paprsku, jakožto mikroobráběcího nástroje. Konkrétně se jedná o vlnovou délku λ , která ovlivňuje materiálovou schopnost absorbovat laserové záření. Dále sem spadá délka laserového pulsu τ_p , jež charakterizuje dobu interakce laserového pulsu s mikroobráběným materiálem. Při výběru je nutné zohlednit parametry výkonu laserového zdroje, především hodnoty průměrného výkonu P_{av} a jeho opakovací frekvenci pulsů f_p , které jsou uživatelsky variabilní, tudíž lze jimi nastavovat proces laserového mikroobrábění.

Výsledných vlastností laserového paprsku je docíleno v laserové trati pomocí sladěné soustavy opto-mechanických komponent, které rozvedou laserový paprsek od zdroje až k mikroobráběnému materiálu s cílem určité kvality, definovaného rozložení energie v pulsu a co nejmenšími výkonovými neboli energetickými ztrátami. Laserová trať musí být kompatibilní s parametry laserového zdroje, kde je zejména důležitá úprava tenkými vrstvami jednotlivých optických komponent pro zlepšení odrazivosti či propustnosti laserového paprsku, aby docházelo k minimalizaci ztrát výkonu. Dále je to samotná velikost komponent umožňující průchod většího průřezu laserového paprsku. S vyššími parametrovými nároky laserového zdroje rapidně roste náročnost na čistotu prostředí laserové tratě, kde nečistoty (např. prachové částice) mohou na optických komponentách způsobit jejich fatální poškození. Před opuštěním laserové tratě projde paprsek skrze rozmítací skener (tzv. Galvo-skener), který umožňuje dynamicky rozmítat paprsek dle potřeb technologie. Za galvo-skenerem se již nachází fokusační čočka, jejíž charakter a kvalita zpracování má majoritní vliv na finální vlastnosti fokusovaného paprsku, a tím i přesnost mikroobrábění.

Dalším prvkem je tzv. základna systému, která zahrnuje rám mikroobráběcího stroje, kinematiku pro indexované a synchronizované polohování obrobku a v neposlední řadě i tlumicí prvky. Rámy laserových mikroobráběcích strojů jsou koncepčně navrhovány s ohledem na vysoké požadavky, jako jsou tvarové a polohové nároky na mikroobráběné entity. Z těchto důvodů je v převážné většině navrhován granit, který je především používán pro výrobu velmi přesných strojů např.: brusky a souřadnicové měřicí stroje. Výborné mechanické

a tepelné vlastnosti souvisejí s vysokou pořizovací cenou. Mezi konkrétní výhody granitu spadá homogenita materiálu, nulová vnitřní napětí, dokonalá rozměrová stálost, o 50% nižší tepelná roztažnost vůči oceli, vynikající tlumicí vlastnosti a vysoká statická tuhost. Kinematika stroje může být klasickým tříosým i víceosým konceptem. Veškeré varianty musí splňovat vysokou přesnost polohování, kvůli preciznímu umístění malých geometrických entit na výsledný obrobek. Zvýšená přesnost těchto kinematik je podmíněná použitím klimatizovaných prostor. Teplota v těchto prostorech nesmí kolísat. V souvislosti přesné kinematiky a obrobku je nutné zvolit potřebné upínací rozhraní, které může být mechanického, hydraulického, tepelného či podtlakového charakteru.

U tlumicích prvků jsou pro laserové systémy navrhovány zejména pasivní varianty, které se zde uplatňují kvůli svým nízkým pořizovacím nákladům. Mezi pasivní tlumicí prvky lze zařadit např. oddělený základ od okolních strojů, antivibrační podložky nebo desky. Aktivní tlumicí prvky lze rozdělit do 2 konstrukčních řešení. První z nich používá k tlumení vibrací piezoelektrické členy, které lze využít kvůli své vyšší vlastní frekvenci i pro řádkovací elektronovou mikroskopii. Pro těžší konstrukce (< 1000kg) lze použít stavitelné řešení s piezoelektrickými prvky. Druhá konstrukční varianta používá elektro-pneumatické vibrační izolace, které jsou oproti předešlému řešení levnější. Zde je použita především kombinace tlumicích prvků s nerezovými deskami, které jsou tvarově přizpůsobitelné potřebám stroje.

Měřicí subsystém je velmi důležitým prvkem v laserovém systému, protože umožňuje verifikovat mnoho veličin a parametrů. Mezi vyhodnocované veličiny spadá výkon laserového paprsku, jehož proměňování je důležité pro exaktní nastavení mikroobráběcího procesu. Dále sem spadá měření teplot z mnoha čidel umístěných ve všech subsystémech (např. chlazení zdroje, kinematiky, galvo skeneru, optické desky, aj.) a měření průtoku chladicí kapaliny, který je potřebný ke správné funkčnosti laserového zdroje. K tomuto subsystému lze zařadit i měřicí prvky pro analýzu mezioperačního a konečného stavu mikroobrobené entity. V tomto případě se jedná o kontaktní (obrobkové sondy) a bezkontaktní (kamerové) prvky, skrze které lze provádět polohování mikroobráběné entity, ale i měření finálních 2D tvarů a zjišťování potřebných korekcí. Pro tyto úkony je důležité, aby přesnost měřicího systému odpovídala požadavkům na výslednou přesnost polohování geometrických entit (např. velmi kvalitní rozlišovací schopnost kamerového pole a různé druhy násvitových osvětlení). Pro měření hloubek u mikroobráběných entit lze využít bezkontaktních měřicích systémů fungujících na principu triangulace. K získání referenčních bodů obrobku lze využít i kontaktní měření obrobkovou sondou.

V řídicím subsystému, který je „propleten“ celým laserovým systémem, je nutná provázanost jednotlivých logických sledů. U laserového zdroje se jedná o správnou dodávku elektrické energie pro napájení jeho budicích prvků, zesilovačů a dalších komponent. V laserové trati je, pro úpravu laserového paprsku, nutné řídit výkonové atenuátory, polarizační rotátory, „beam expandéry“ a rozmitací skenery. Kinematika laserového systému má pro řízení pohybu své vlastní řízení, totéž platí i pro aktivní tlumicí členy a pro upínací rozhraní (jedná-li se o podtlakový princip upnutí). Veškeré dílčí řídicí subsystémy mají své uživatelské rozhraní (skrze software či PLC). Tato jednotlivá rozhraní musí být propojena do celku, který slouží jako uživatelské rozhraní (UI) k ovládání veškerých prvků laserového systému. Tímto UI je zajištěn správný chod laserového systému a tím naplno využít jeho aplikační potenciál.

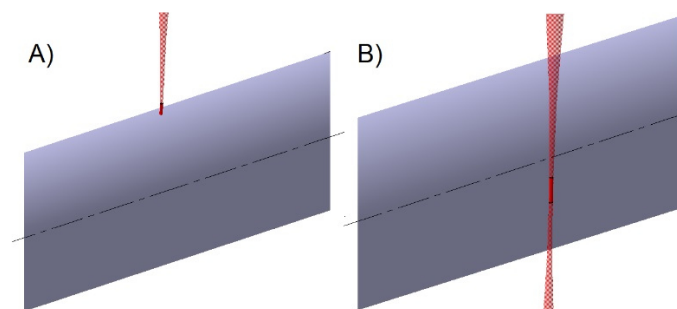
1.3 Využití laserového mikroobrábění v oblasti řezných nástrojů

Laserové mikroobrábění se v technické praxi rozšířilo do mnoha oborů. Největší podíl průmyslových zástupců lze najít ve strojírenství, elektroprůmyslu a zdravotní technice. Z pohledu strojírenství má laserové mikroobrábění dílčí podíl v oblasti řezných nástrojů, kde je s výhodou používáno kvůli úpravám především supertvrdých řezných materiálů (PCD; CBN), ale i ostatních zástupců (SK, CERMET, keramika). Tato technologie se uplatňuje na řezných nástrojích především ve výrobních úpravách makro- a mikrogeometrických prvků:

- utvařečů třísek
- fazet na čelních a hřbetních plochách břitů
- povrchových mikrostruktur
- rektifikaci ostří na břitech řezných nástrojů
- kompletní výroba mikronástrojů

Dle výroby určitého makro- a mikrogeometrického prvku lze principy laserového mikroobrábění neboli laserové ablace rozdělit do dvou oblastí:

- radiální mikroobrábění
- tangenciální mikroobrábění



Obrázek 1-1 Srovnání dvou přístupů:
a) radiální mikroobrábění; b) tangenciální mikroobrábění

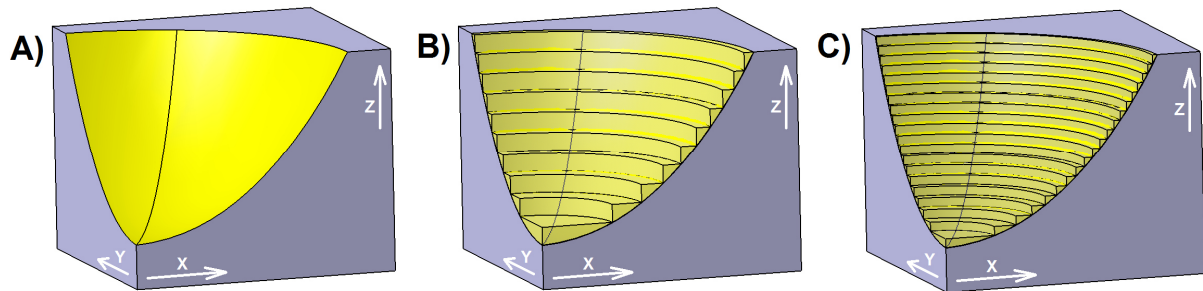
1.3.1 Radiální mikroobrábění

Radiální neboli 2,5osé mikroobrábění je v oblasti řezných nástrojů masově využíváno především ve výrobě utvařečů třísek. Tato forma laserového mikroobrábění umožňuje tvarovou flexibilitu vzniklého reliéfu, protože lze materiál odpařovat po jednotlivých vrstvách s měnícím se profilem, který je definován importovanou geometrickou entitou. Ve standardních případech je laserový paprsek vůči mikroobráběnému povrchu v ortogonální poloze.

Radiální mikroobrábění probíhá v optické ose laserového paprsku ve směru, kde je výsledná hloubka závislá na interakci laserového paprsku a mikroobráběného materiálu. Vysoká přesnost mikroobrobení je obtížně kontrolovatelná, protože se zde odebraný objem odvíjí od rychlosti odpařování materiálu, neboli ablace (vlivy: τ_p ; P_{av} ; f_p), která se liší vlivem určité míry heterogenity mikroobráběného materiálu (chemické složení; fáze). Kromě toho jsou případné defekty vstupního povrchu polotovaru promítnuty do konečné kontury.

Mikroobrábění po vrstvách s kombinací ortogonální polohy laserového paprsku způsobuje při menším počtu zvolených vrstev zhoršenou drsnost povrchu v tvarově komplikovaných oblastech. Tato nižší kvalita povrchu je způsobena neodstraněním přebývajících materiálů (obrázek 1-2b). Při volbě velkého počtu vrstev dojde k eliminaci zhoršeného povrchu na úkor

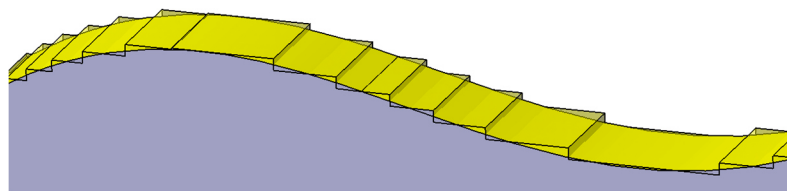
nižší efektivity úběru. Při vhodném nastavení laserových parametrů je radiální mikroobrábění z pohledu zachování dostačující drsnosti povrchu a materiálového úběru efektivní [32; 33].



Obrázek 1-2 Vliv počtu vrstev v z-ose na kvalitu mikroobrábění:
 a) modelový stav; b) malý počet vrstev; c) velký počet vrstev

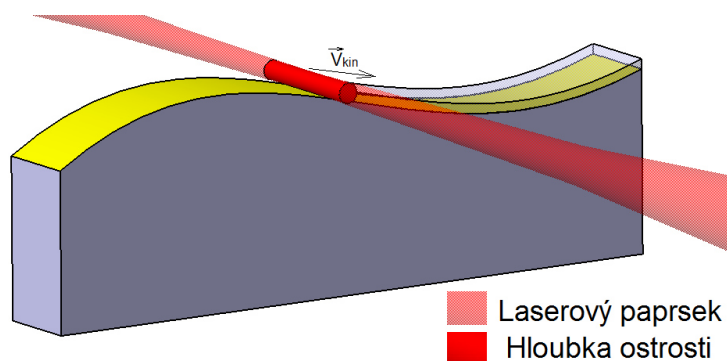
1.3.2 Tangenciální mikroobrábění

Tangenciální mikroobrábění je aplikovatelné především na rotační nástroje, kde je laserový paprsek v tečném kontaktu s mikroobráběnou plochou monolitního řezného nástroje. Tento způsob je použitelný pro geometricky hrubé nebo nedefinované polotovary, kde nedojde ke ztrátě přesnosti a povrchové kvality konečného obrysu. Zde se dají upotřebit vyšší výkony laserových zdrojů. Při malých úhlech dopadu laserového paprsku od mikroobráběné plochy dochází v důsledku klesající absorpce k leštícímu efektu, při kterém je drsnost povrchu finálního opracování lepší, než u výchozího stavu. Z důvodu relativního pohybu kinematiky os vůči laserovému paprsku vykazuje finální kontura lepší tvarovou přesnost, než ta vyrobená pomocí radiálního mikroobrábění, protože zde nedochází k diskretizační chybě (obrázek 1-3).



Obrázek 1-3 Rozdíl ve tvarech obou způsobů mikroobrábění

Výsledná kontura je definována pouze relativním pohybem laserového paprsku vůči kinematice laserového systému, čímž lze docílit výborné přesnosti a opakovatelnosti. Materiálový úběr je zde limitován hloubkou ostrosti laserového paprsku (obrázek 1-4) [32; 33].



Obrázek 1-4 Tangenciální mikroobrábění

1.4 Analýza problematiky laserového mikroobrábění řezných nástrojů a její komplexnost

Jak již bylo uvedeno v předchozí podkapitole, tak laserové mikroobrábění je masově využíváno pro výrobu utvařečů třísek na VBD z PCD a rovněž i z CBN. V současnosti jsou takto upravené řezné nástroje, zejména vyměnitelné břitové destičky, nabízené výrobcí nástrojů. Z tohoto důvodu zde nebude uveden jejich podrobnější popis.

V užším zájmu vývojových týmů je implementace laserového mikroobrábění na co největší počet možných operací, které umožní zvýšit řezné vlastnosti nástroje nebo zproduktivnit jejich výrobu. Hermani et al. [34; 36] využívá laserové mikroobrábění ke hrubování PCD polotovarů hřbetních ploch vyměnitelných břitových destiček (VBD) kvůli časové úspoře. Doba k docílení finálního rozměru VBD byla zredukována až o 60%. Jejich technologie hrubování je automatizovaná. Dold et al. [18; 35; 37] se ve svých výzkumných činnostech věnují laserovému mikroobrábění PCD, kde se zabývají návrhem technologie úpravy pájených PCD polotovarů na řezných nástrojích, na kterých následně modifikují utvařeče třísek, úhly hřbetů a poloměry zaoblení řezných hran. Úpravou geometrií VBD vyrobených z PCD, konkrétně úprava úhlů hřbetů včetně poloměrů zaoblení řezných hran, se věnuje studie Richmann et al. [39], která k mikroobrábění používá kombinaci vodního a laserového paprsku.

Nutno dodat, že žádná ze studií nedosáhla lepšího $r_{\beta} < 3 \mu\text{m}$. Richmann et al. [39] $r_{\beta} > 5 \mu\text{m}$, Dold [18] $r_{\beta} = 3 \mu\text{m}$. Dalším faktem je, že veškeré úpravy byly prováděny na rovinných plochách řezných nástrojů.

Zdroje [5; 32; 33; 38] představují koncept kompletní výroby mikronástrojů ($\text{ØD} = 1\text{-}2 \text{ mm}$) pomocí laserového mikroobrábění, konkrétně rotačních řezných nástrojů. Používané polotovary tzv. „roubíků“ na zmíněné mikronástroje jsou kombinací SK (upínací část) a PCD (řezná část), které jsou k sobě vzájemně spojeny pájeným spojem. V tomto případě je využito vysokého stupně synchronizace kinematiky a galvo skeneru, kde za pomoci tangenciálního mikroobrábění vytvářejí geometrické prvky mikronástrojů. V případě výroby nástrojů ze supertvrdých řezných materiálů se jedná o „high-end“ technologii laserového mikroobrábění v oblasti řezných nástrojů.

Nicméně nově vyvinutá technologie je použitelná pouze pro tvorbu kompletního rotačního nástroje od polotovaru po nástroj. Tento fakt klade vysoké nároky na výrobní časy řezného nástroje, které jsou v řádech jednotek hodin (šroubovitý vrták $l = 5 \text{ mm}$; $\text{ØD} = 2 \text{ mm} \approx 4\text{h}$ [33]). S náklady na surový polotovar včetně samostatné výroby je výsledná cena nástroje velmi vysoká. V případě výroby větších průměrů by neúměrně rostla doba výroby i pořizovací náklady na polotovar.

1.4.1 Stanovení cílů disertační práce

1.4.1.1 Hlavní cíl disertační práce

Současný stav technologie laserového mikroobrábění postrádá principy a metodické postupy, jimiž lze zajistit snazší integraci technologie laserového mikroobrábění do výrobního řetězce monolitního řezného nástroje.

Na základě prozkoumané rešerše byl stanoven hlavní cíl disertační práce, který se vymezuje na efektivní zvládnutí technologie radiálního laserového mikroobrábění v oblasti makrogeometrických úprav na obecných plochách monolitních řezných nástrojů, které jsou polohovány s vysokou přesností vůči řezným břitům.

V hlavním cíli práce je kladen důraz na eliminaci současných nevýhod technologie laserového mikroobrábění. Především se jedná o nízkou produktivitu a její složitou integraci do procesního řetězce výroby monolitních řezných nástrojů. K naplnění hlavního cíle je nutné definovat tři parciální cíle, které vedou k zvýšené efektivitě jednotlivých subsystémů laserového stroje, čímž bude usnadněna zmíněná integrace technologie.

1.4.1.2 Parciální cíle disertační práce

Jedním z aspektů vedoucí ke zlepšení integrace technologie laserového mikroobrábění je odladění ablačního procesu, jenž ovlivňuje produktivitu výroby makrogeometrických prvků. Mnoho studií, např. [17; 41; 43; 47], se obecně věnuje problematice zabývající se omezením a následným potřebám pro zajištění vyšší produktivity ablačních procesů, která by zlepšovala integraci technologie laserového mikroobrábění do výrobních řetězců v současném průmyslu. Tyto studie sice cílí na obecné definování ablačního procesu, ale již nedefinují oblast vhodných procesních parametrů na základě okrajových podmínek laserového zdroje dle jeho výkonové charakteristiky ve vztahu k mikroobráběnému materiálu.

Prvním parciálním cílem je tedy navržení metodiky, která umožní stanovit okrajové podmínky ablačního procesu daného laserového systému dle výkonové charakteristiky laserového zdroje ve vztahu k mikroobráběnému materiálu. Tyto okrajové podmínky dále pomohou nalézt takové procesní parametry, při kterých bude dosažena efektivní materiálová ablace konkrétního materiálu. Dle této metodiky a získaných procesních parametrů bude autorem dále navržen program, jehož algoritmy umožní variovat potřebné procesní parametry pro vyšetření efektivního ablačního procesu. Tento program přispěje k velmi rychlému a flexibilnímu vyšetření vlivů procesních parametrů laserového paprsku včetně jeho způsobu rozmítání na testovaný řezný materiál. Přínosem tohoto programu bude časově úsporný experimentální způsob testování ablačních procesů nových řezných materiálů.

Současná řešení laserového mikroobrábění dále postrádají úpravu monolitních řezných rotačních nástrojů ze slinutých karbidů předem vyrobených broušením, kde je možné modifikovat mikro- a makrogeometrii nástroje v před- a podepoziční fázi výrobního řetězce monolitního nástroje. V celkovém řešení přináší tento přístup jak časové (výrobní), tak finanční úspory (volba materiálu polotovaru). Úpravou monolitního řezného nástroje lze docílit navýšení požadovaných řezných vlastností (zvyšování řezivosti a trvanlivosti nástroje, snižování frikčního koeficientu povrchu nástroje, redukce řezných sil, aj.) za zlomek nákladů oproti nově vyvinuté technologii dle zdrojů [5; 32; 33 a 38].

Velikou nevýhodou laserového mikroobrábění makrogeometrických prvků na již vyrobených monolitních rotačních nástrojích je problematické polohování laserového paprsku vůči řeznému nástroji, protože přesnost polohování a zajištění relativní polohy laserového paprsku vůči monolitnímu řeznému nástroji je zde stěžejní.

Během broušení polotovarů monolitních řezných nástrojů dochází ke vzniku geometrických odchylek od ideálních tvarů břitů, jež jsou způsobeny konkrétními vlivy např. měnící se tuhostí polotovaru během broušení, přeupínáním nedokončeného polotovaru aj. Tyto geometrické odchylky neumožňují dodržení přesné relativní polohy laserového paprsku vůči všem břitům monolitních řezných nástrojů v prostoru laserového stroje. Z tohoto důvodu je nutné provést analýzu potřebných geometrických parametrů všech břitů, skrze které jsou přesně zaměřeny břity monolitních řezných nástrojů.

Na základě výše charakterizované problematiky byl autorem stanoven **druhý parciální cíl práce**, jehož obsahem je návrh metodiky týkající se optického způsobu zaměření monolitního řezného nástroje v pracovním prostoru laserového stroje, dle které jsou velmi přesně analyzovány všechny břity. Získání geometrických informací o průběhu všech břitů slouží k řízení kinematiky laserového stroje. Metodika bude zpracována formou hlavního parametrického programu a následných sub-programů pro geometrickou analýzu všech břitů monolitního rotačního nástroje s důrazem na co nejvyšší počet automatizačních prvků, jejíž implementací se při laserovém mikroobrábění ve výrobním řetězci monolitního rotačního nástroje dosáhne jak vyšší produktivity, tak se zkrátí i vedlejší výrobní časy.

Třetí parciální cíl disertační práce kombinuje obě předešlé oblasti navržené autorem. Tento dílčí cíl se zabývá komplexním návrhem, který charakterizuje principy výroby makrogeometrických prvků na obecných plochách monolitních řezných nástrojů, kde lze na základě získaných geometrických informací o všech břitech aplikovat dvě odlišné varianty polohování řezného nástroje vůči laserovému paprsku. Zejména se jedná o synchronizaci optických os galvo-skeneru společně s kinematikou laserového systému, a to v režimech indexace a synchronizace mechanických os.

2 Ablací procesy vybraných řezných materiálů

2.1 Ablace jako mechanismus laserového mikroobrábění

Aby bylo laserové mikroobrábění z aplikačního pohledu co nejefektivnějším, je nutné vybrat správný laserový zdroj. K tomu je nutné porozumět základním vlastnostem, které jsou důležité pro interakci laserového záření s mikroobráběným materiálem. Mikroobrábění laserovým paprskem je tepelný proces. Efektivita tohoto procesu závisí na tepelných vlastnostech a do jisté míry na optických (transparentních) vlastnostech, namísto mechanických vlastností mikroobráběného materiálu. Proto materiály, vyznačující se značně vysokými tvrdostmi, mohou mít příznivé tepelné vlastnosti. Např. nízkí součinitelé teplotní roztažnosti (α) a tepelné vodivosti (λ_{rep}) jsou obzvláště velmi vhodné pro laserové mikroobrábění. Dalšími důležitými parametry, které charakterizují vlastnosti laserového mikroobrábění, jsou např. efektivita úběru, přesnost mikroobrobené entity, minimální tepelné ovlivnění výrobku, aj. Jednotlivé faktory jsou definovány v následujících podkapitolách.

2.1.1 Absorbivita

Absorbivita (A_{abs}) materiálu je důležitou podmínkou pro samotný proces mikroobrábění. Ta může být definována jako zlomek dopadajícího záření, které je absorbováno v kolmém dopadu. Každý materiál má určitou hodnotu absorpce (tzv. absorpční koeficient μ , kde $0 < \mu < 1$), která je obecně vyjádřena Beer-Lambertovým zákonem.

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\mu z} \quad (2-1)$$

kde:

- I_0 vstupní intenzita záření
- I_z intenzita záření v hloubce z
- μ absorpční koeficient

Nejdůležitějším parametrem ovlivňující absorbivitu materiálu je vlnová délka λ laserového paprsku. Materiály absorbují záření v různých částech elektromagnetického spektra, proto je nutné vybrat odpovídající vlnovou délku λ , aby mohla nastat absorpce fotonů v co nejvyšší míře. Laserová ablace nastává pouze v takovém rozsahu vlnových délek, která je silně absorpční pro konkrétní materiál. Obecně platí, že vyšší absorpční účinnost vede k větší efektivitě mikroobrábění.

Zvýšení absorbivity materiálu lze provést dvěma způsoby. První způsob zahrnuje vytvoření povrchových úprav mikroobráběných materiálů (zdrsnění či povlakování povrchového reliéfu), kterými je redukována odrazivost záření. Další možností je zvýšení absorpce prostřednictvím změny vlnové délky, ale tato volba vyžaduje nemalé vstupní náklady na nový laserový zdroj. Touto cestou lze mít dvojnásobek (II H), trojnásobek (III H) či čtyřnásobek (IV H) základní emisní frekvence, čímž se získá kratší vlnová délka ($\lambda = 532, 355, \text{ resp. } 266\text{nm}$). S kratší vlnovou délkou λ (resp. vyšší harmonickou třídou) lze mikroobrábět větší materiálové spektrum [2;3;4;14].

2.1.2 Vlastnosti laserového paprsku

Laserové záření je z principu svého vzniku jedinečné svým charakterem. Pro účely mikroobrábění je ve většině aplikací používáno specifické rozložení energie laserového paprsku - dle Gausse (TEM_{00}). Velmi zřídka používané typy rozložení energií (např. „top-hat“

[96]; „square“, „donut“, „Besselův“ paprsek [95] apod.) nebude brán zřetel. Základními vlastnostmi laserového paprsku jsou: monochromaticnost, kolimovanost (opak divergence) a koherentnost.

2.1.2.1 Monochromaticnost

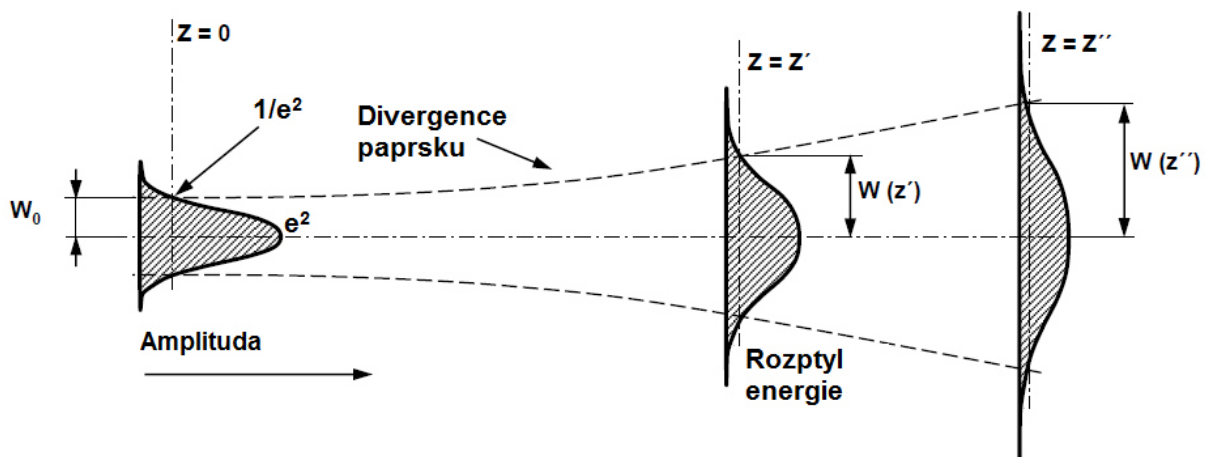
Monochromaticnost lze považovat za nejdůležitější vlastnost laserového paprsku, která je měřena pomocí šířky spektrální čáry. Laserový výstup se skládá z velmi blízkce umístěných, oddělených a úzkých čar, které vyhovují rezonančním podmínkám [6].

2.1.2.2 Divergence paprsku

Ideální úhel rozbíhavosti neboli divergence, by měl být nulový. Nicméně je to nemožné kvůli fyzikálním limitům, které jsou stanovené tzv. difrakčním jevem. Ve většině případů je velikost a rozlišovací schopnost mikroobrábění nad hranicí 1 μm. Jedním z důvodů omezeného rozlišení je difrakční limit laserového paprsku. Laserový paprsek je charakterizovaný velmi malým úhlem divergence Θ , který se pohybuje v rozmezí $\Theta = 0,2$ až 10 mRad [6-8; 31]. Podle normálního rozložení hustoty energie dle Gausse se průměr svazku mění podle:

$$w_z(z) = w_0[1 + (\lambda z/(\pi w_0)^2)]^{1/2} \quad (2-2)$$

kde: w_0 - počáteční rádius paprsku pro intenzitu $1/e^2$
 w_z - pás paprsku ve vzdálenosti z
 z - vzdálenost
 λ - vlnová délka



Obrázek 2-1 Vliv divergence paprsku na rozložení energie dle Gausse

2.1.2.3 Koherence

Koherence je stupeň uspořádanosti vln a je specifikována vzájemnou funkcí. Koherentní vlnění jsou taková, která mají stejnou frekvenci a jejich fázový rozdíl je v daném místě neměnný. Koherence paprsku se skládá ze dvou složek: prostorové a časové. Koherence paprsku je součástí zájmu v aplikacích, jako je např.: interferometrie a holografie [6; 9-11].

2.1.2.4 Módy laserového paprsku

Pomocí vlastností laserového módu lze získat tvar energetického rozložení paprsku. Již v úvodu této podkapitoly byl zmíněn fakt, že pro mikroobráběcí aplikace je používán paprsek s označením TEM₀₀. Do základního rozdělení laserových módů spadají 2 typy:

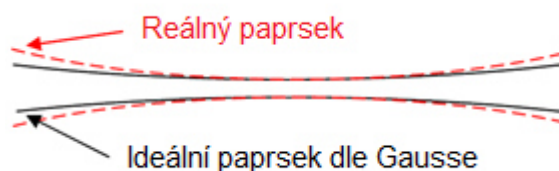
- příčné
- podélné

Tyto módy vznikají při buzení v rezonátoru, kde vlivem nerovnoměrně rozložené energie vzniká prostorové rozložení světelné energie. Vizualizaci laserových příčných módů si lze představit, když se rezonátorem pomyslně vede řez rovinou, která je kolmá k laserové ose. Touto rovinou lze získat příčné laserové módy. Podélným řezem rezonátoru lze znázornit podélné laserové módy, které v tomto případě hrají marginální roli [11; 12].

2.1.2.5 Faktor M^2

Další hodnoticím aspektem, dle kterého lze definovat kvalitu laserového paprsku, je faktor kvality M^2 . Tento faktor udává podíl geometrických vlastností reálného a ideálního Gaussova tvaru o stejné vlnové délce, kde se geometrickými vlastnostmi rozumí rádius laserového paprsku w_0 a divergence paprsku Θ . Tímto je M^2 faktor definován jako:

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} w_0 \Theta \quad (2-3)$$



Obrázek 2-2 Znárodnění M^2 faktoru jako odchylky reálného svazku od ideálního [11]

Ideální paprsek dle Gausse nabývá hodnoty $M^2 = 1$; a hodnoty menší než 1 nejsou fyzikálně možné. Je nutné vzít v úvahu, že M^2 faktor, jakožto samotné číslo, nemůže být považováno za kompletní charakteristiku kvality laserového paprsku [12]. Skutečná kvalita paprsku závisí na detailech, které nemohou být zahrnuty v jediném čísle [13].

2.1.2.6 Fokuse laserového paprsku

Velikost zaostřeného laserového paprsku $D = 2w_0$ (neboli tzv. „laser spot“) určuje schopnost výroby mikro detailů tzv. miniaturizace. Menšího mikroobrobeného detailu, než je velikost laserového spotu D lze dosáhnout velmi obtížně, ale tento směr je velmi neefektivní z hlediska ablačního procesu. Minimální velikost průměru spotu D , na který může být zaostřen laserový paprsek dle Gaussova normálního rozdělení je vyjádřen vztahem:

$$D = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f \cdot M^2}{\pi \cdot D_0} \quad (2-4)$$

kde: $D = 2w_0$ - průměr laserového spotu pro intenzitu $1/e^2$

λ - vlnová délka

f - ohnisková vzdálenost

M^2 - faktor kvality laserového paprsku

D_0 - průměr laserového paprsku pro intenzitu $1/e^2$ před vstupem do fokusační optiky

Ze vztahu (2-4) je patrné, že zaostřený paprsek je přímo úměrný vlnové délce λ , ohniskové vzdálenosti f a nepřímo úměrný velikosti průměru laserového paprsku na vstupu čočky D_0 [14]. Vyžaduje-li miniaturizace menší průměr laserového paprsku v ohnisku D , lze jí dosáhnout dvěma způsoby. První variantou je využití kratších vlnových délek, které s sebou nesou vysoké

nároky na povrchovou úpravu optických komponent a čistotu laserové trati způsobené především zvýšeným absorpčním potenciálem. Při znečištění (usazení prachové částice) optických elementů v laserové trati může nastat jejich okamžité poškození. Další nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. Výhodou této varianty je zachování ohniskové vzdálenosti f , tudíž pracovní vzdálenost zůstává beze změn.

Druhou variantou a přímější možností dosažení malého průměru D je použití optiky, která dosahuje krátké ohniskové vzdálenosti f . Tato varianta je levnější, ale přináší mnoho úskalí. Fokusační čočky s velmi krátkou ohniskovou vzdáleností f mají malou pracovní vzdálenost. Hrozí zde riziko poškození optiky vlivem výstřiku přetaveného materiálu, popř. kolize při používání víceosé kinematiky laserového stroje. Docílení malého průměru zaostřeného laserového paprsku D má oproti miniaturizaci jednu nevýhodu a tou je tzv. Rayleighův rozsah, neboli hloubka ostrosti Z , kterou lze vyjádřit dle:

$$Z = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \lambda \cdot M^2} \quad (2-5)$$

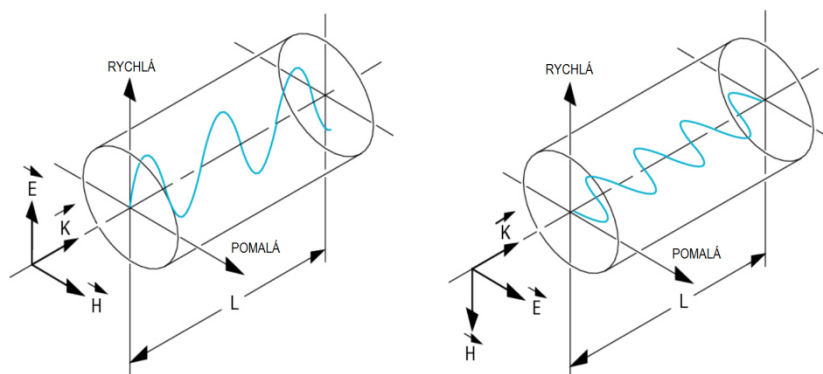
Ze vztahu (2-5) vyplývá, že snížení průměru fokusovaného paprsku D vede ke snížení hloubky ostrosti Z druhou mocninou. Při použití malého průměru fokusovaného paprsku D jsou kladeny vyšší nároky na udržení konstantní ohniskové vzdálenosti [14] (přesnost polohování; vibrace os, apod.), z důvodu dodržení hloubky ostrosti Z . Takto fokusovaný laserový spot je náchylnější na stabilitu dodávané konstantní hustoty energie F , která se vztahuje na jednotku plochy.

2.1.2.7 Polarizace laserového paprsku

Laserový paprsek je polarizován pomocí tří opto-mechanických komponent, mezi které patří tzv. „půl-vlnná“ ($\lambda/2$) destička, označená zkratkou HWP („half-wave plate“), čtvrt-vlnná ($\lambda/4$) destička, QWP („quarter-wave plate“) a kontrolor polarizačních rotátorů.

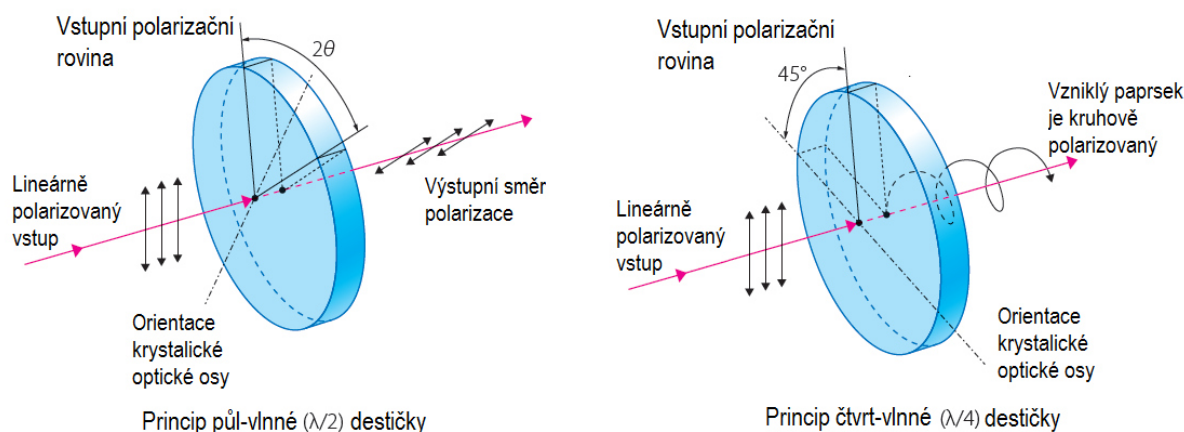
Interakce laserového paprsku s optickými komponenty v laserové trati je závislá na vlnové délce λ . Důsledkem této závislosti vzniká rezonanční interakce, při které dochází k dvojlomu světla, tzn. ke změně indexu lomu a polarizaci laserového paprsku [49]. Dvojlomu je snadné zabránit použitím amorfních materiálů, jako je sklo, nebo krystaly jednoduché symetrie (NaCl; GaAs). Na druhé straně lze dvojlomem upravit polarizační stav světla, proto jsou tyto optické komponenty nazývány jako dvojlomné vlnové nebo retardační desky.

Vlnové desky obsahují rychlou a pomalou osu (Obrázek 2-3). Rychlost rychlých a pomalých paprsků skrz dvojlomný materiál se mění nepřímo s jejich indexy lomu. Kvůli tomuto rozdílu v rychlostech dochází k fázovému rozdílu. Fázový rozdíl se řídí tloušťkou vlnových destiček, to platí pro veškeré vlnové délky λ [50].



Obrázek 2-3 Polarizace podél rychlé osy (vlevo - 2 2/3 vlnové délky) a pomalé osy (vpravo - 4 vlnové délky) [49]

Lineárně polarizovaný paprsek, který dopadne na půl-vlnný krystal (HWP) způsobí, že výstupní paprsek bude opět lineárně polarizovaný, ale úhel k optické ose bude $2x$ větší, než u dopadajícího paprsku. Proto lze HWP použít jako plynule nastavitelné rotátory. V případě dopadu lineárně polarizovaného paprsku na QWP (čtvrtvlnná destička - $\lambda/4$) vznikne paprsek kruhově polarizovaný. Když je QWP zdvojený, chová se jako HWP a otáčí rovinu polarizace v určitém úhlu [50].



Obrázek 2-4 Princip HWP a QWP [50]

Dopady polarizace při řezání

Zdroje [11; 52] uvádějí dopady změny typu polarizace či úhlu natočení HWP, kde se změna projevuje v kvalitě řezu (šířka řezu, drsnost řezných ploch), nejlepších hodnot je dosaženo při lineární polarizaci, kdy je úhel polarizace vůči vektoru řezání roven 90° .

Dopady polarizace při mikroobrábění

V oblasti laserového mikroobrábění lze hledat dopady polarizací ve dvou měřítkách - v mikro a nanostrukturách. Při laserovém mikroobrábění lineární polarizací lze na dně rozeznat tzv. LIPPS struktury (Laserem Indukované Periodické Povrchové Struktury, označované také pojmem „ripples“), které prezentují směr lineárně polarizovaného paprsku. U LIPPS struktur, které vznikají v kolmém směru na lineární polarizaci, se již využívá v mnoha odvětvích, kde jsou zkoumány zejména biokompatibilní, hydrofobní a hydrofilní vlastnosti povrchů (lékařství), ale i v oblastech řezných nástrojů, kde lze zaručit na plochách břitů mikrofluidní vlastnosti ovlivňující tribologické vlastnosti dotčených povrchů [53; 54; 55].

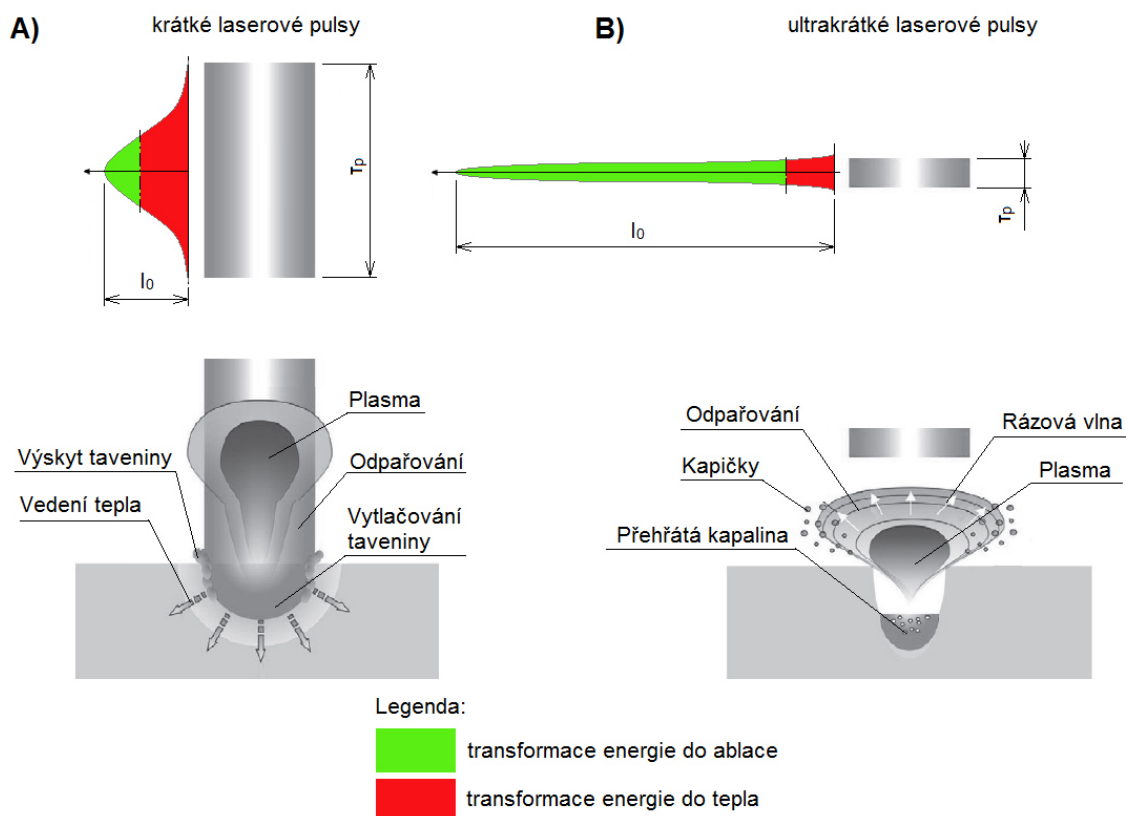
2.1.3 Mechanismy ablace se zřetelem na délku pulsu

Dalším parametrem, ovlivňující interakci laser-obrobek v laserovém mikroobrábění, je délka pulsu τ_p . Druh ablace (odpařování materiálu), pomocí laserového záření se odvíjí dle příslušného rozsahu délek pulsu - τ_p . Pro laserové mikroobrábění jsou uplatnitelné dva odlišné druhy ablačních mechanismů [20].

2.1.3.1 Krátké a ultrakrátké pulsy

První oblast zahrnuje krátké délky pulsu (v řádech mikro a nanosekund) při níž je generována tepelně ovlivněná oblast (HAZ). Pro tento druh pulsu je dominantní vedení tepla, tavení, odpařování a tvorba plasmu (Obr. 2-5a). Takovéto délky pulsu jsou delší než je doba termalizace u většiny materiálů. Doba termalizace charakterizuje šíření tepla materiálem s ohledem na jeho tepelné vlastnosti (tepelná vodivost, teplotní roztažnost; teploty tavení, varu, aj.) [16]. Během laserového mikroobrábění materiálu o totožném množství energie v pulsu E_p

se současně kratší délkou pulzu τ_p (Obr. 2-5b) bude v místě dopadu paprsku dodán mnohonásobně vyšší špičkový výkon P_p . Tím dojde ke změně poměru energií, které se u krátkých pulsů projevily ve velké míře tepelným ovlivněním materiálu. Při snižování délky pulsů $100 \text{ ns} > \tau_p > 100 \text{ fs}$ dochází ke změnám ablačních vlastností z tepelného do tzv. atermálního (bezteplotního) režimu [18]. Změnou τ_p na ultrakrátké laserové pulsy (v řádech pikosekund až femtosekund), lze dosáhnout velmi precisiho mikroobrábění [17;19].



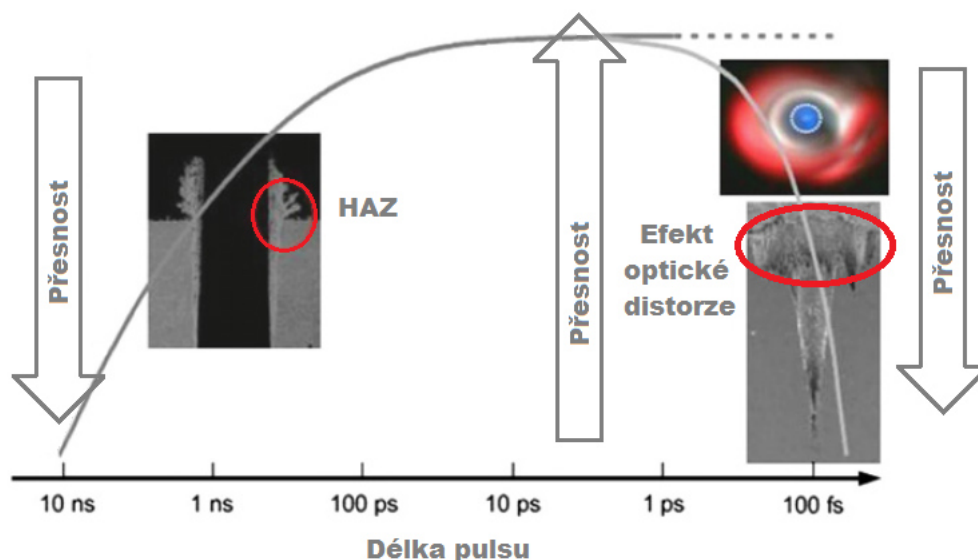
Obrázek 2-5 Rozdíl rozložení energie v pulsu E_p u krátkých a ultrakrátkých pulsů

Kvůli extrémně krátkým pulsům a vysokým intenzitám záření I nemůže být energie okamžitě přenesena do objemu materiálu. U ablací ultrakrátkými laserovými pulsy vznikají v místě procesu extrémní tlaky, hustoty a teploty, které akcelerují ionizaci materiálu. Tento stav následně přechází do vysokých tlaků směsi par a kapalných kapiček, jejichž rozvoj je velmi rychlý. Tento jev je pro daný typ ablačního mechanismu známý pod pojmem exploze fáze [19-23].

Jak je výše uvedeno, velikost doby termalizace se především odvíjí od tepelných charakteristik mikroobráběných materiálů, ale i od velikosti použité energie pulsu E_p ; opakovací frekvence f_p a hustoty energie F . Obecně se doba termalizace, konkrétně u kovů, pohybuje okolo 1ps [26], 5-10 ps [17;19;24;25], ale i 12 ps [27;28]. Hodnota tohoto parametru není dle jednotlivých zdrojů konstantní, protože zde záleží i na volbě procesních parametrů (např. f_p ; F) zvolených pro ablací daného materiálu. Při zvolení nevhodných procesních parametrů laseru může dojít k významnému tepelnému ovlivnění (HAZ) i při ps pulsech, které jsou kratší, než vyžaduje doba termalizace [18;19;29]. K HAZ může docházet i při fs pulsech $\tau_p = 150\text{fs}$ [22], proto termín „ultrakrátký pulsní laser – USP laser“ není striktně stanoven. Obvykle se tento termín odkazuje na laserové systémy s dobou trvání délky pulsů od několika fs až po desítky ps.

2.1.3.2 Optimální délka pulsů

Laserové zdroje, potažmo celé laserové systémy, musí být spolehlivé, rigidní a cenově dostupné. S kratšími délkami pulsů dochází ke zmenšování HAZ, která ve finále nikdy nedosáhne nulových hodnot ani při fs režimu [22]. Na druhou stranu, kvůli velmi vysokým intenzitám záření s fs pulsy (až TW/cm²), dochází k silným deformacím laserového paprsku (tzv. efektu optické distorze), který nastává v okolí roviny ohniska. Tento jev je způsobován interakcí okolního vzduchu a nelineárním charakterem laserového paprsku. Nelineární efekty, nabízející významné výhody v mnoha aplikačních oblastech ultrakrátkých pulsů zejména ve zpracování transparentních materiálů, se v případě ablace kovových materiálu ukázaly jako velmi rušivé. Těmito jevy je velmi negativně ovlivněna přesnost laserového mikroobrábění. Schématický obrázek 2-6 ukazuje vliv délky pulsů τ_p při mikroobrábění kovů. Při délkách pulsů $\tau_p \geq 200$ ps je kvalita laserového mikroobrábění ovlivněna tepelnými jevy, zatímco u délek pulsů kolem $\tau_p \approx 100$ fs špatnou morfologii ablace způsobuje efekt optické distorze [22;30].



Obrázek 2-6 Vliv délky pulsů na přesnost mikroobrábění kovů

Obecně vzato, s kratšími délkami pulsů roste kvalita zpracování mikroobrobené entity, ale také i komplexnost laserového systému, která významně promlouvá do vstupních pořizovacích nákladů laserové technologie. Z tohoto důvodu je při návrhu celého laserového systému nutné zohlednit jeho aplikační využití. Pro mikroobrábění řezných materiálů se laserové systémy s rámcovou délkou pulsů $1 \text{ ps} < \tau_p < 100 \text{ ps}$ jeví jako nejvhodnější řešení k poměru cena vůči požadované přesnosti ablace.

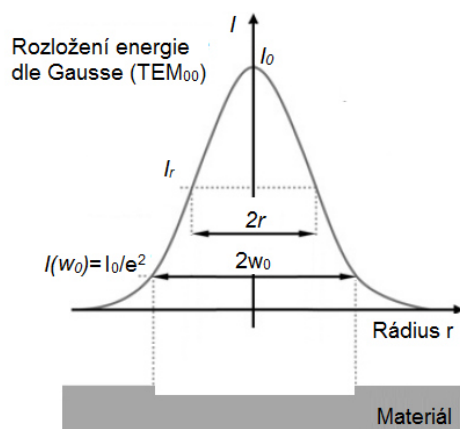
2.1.4 Teorie ablačního procesu

[17;18;19;22;23;24;25;40;41;42;43;44;45;46;47;48]

Pro matematické vyjádření ablačních procesů je nutné definovat několik parametrů, mezi které patří energie v pulsu E_p , hustota energie F a prahové hustoty energie F_{th} . Při výpočtech je brán zřetel na rozložení hustoty energie dle Gaussova profilu normálního rozdělení. Ve většině aplikačních případů je u ps a fs pulsních laserů použit tento typ rozložení hustoty energie. Gaussovo normální rozložení hustoty energie je vyjádřeno vztahem

$$I_r = I_0 \cdot e^{\frac{-2r^2}{w_0^2}}, \quad (2-6)$$

kde I_r intenzita záření závislá na vzdálenosti ke středu laserového paprsku r ,
 w_0 rádius laserového spotu pro intenzitu $1/e^2$,
 I_0 maximum intenzity v $r = 0$.



Obrázek 2-7 Profil intenzity záření laserového paprsku dle Gaussovo normálního rozložení

Energii laserového paprsku lze kvantifikovat dvěma způsoby - absolutní hodnotou pomocí energie v pulsu E_p , který je vyjádřen průměrným výkonem laserového zdroje P_{av} a opakovací frekvencí f_p

$$E_p = \frac{P_{av}}{f_p}, \quad (2-7)$$

nebo měrnou hodnotou pomocí hustoty energie F , která je vztažena na plochu zaostřeného laserového paprsku

$$F = \frac{E_p}{\pi \cdot w_0^2}. \quad (2-8)$$

Během procesu ablace materiálu musí hustota energie laserového paprsku F překročit svou prahovou hodnotu F_{th} . Pokud nenastane tato podmínka, nedojde k ablaci materiálu.

2.1.4.1 Vyhodnocení ablačního prahu

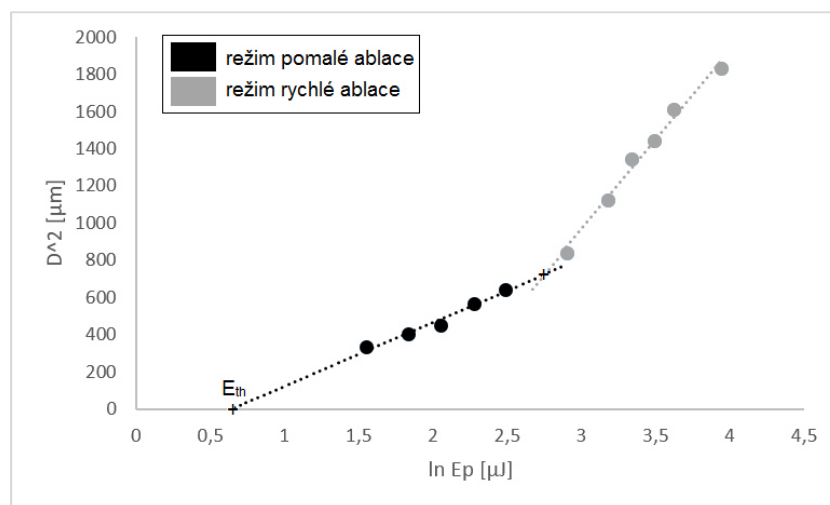
Vyšetření ablačního prahu

Prahová hodnota hustoty energie F_{th} , neboli prahová ablace, charakterizuje nejnižší množství potřebné energie, při kterém nastanou trvalé změny ve skruktuře mikroobráběného materiálu. Pokud je použita velikost hustoty energie F lehce nad ablačním prahem F_{th} , dochází k mírné ablaci. Účinnost ablace je velmi nízká, ale zpravidla umožňuje velmi precísni a čistý materiálový úběr. Míra odstraňování materiálu pomalu roste se zvyšující se hustotou energie F až do určitého bodu zlomu. Tento zlom se projevuje tím, že s dalším zvyšováním hustoty energie F rapidně narůstá ablace materiálu. Vyhodnocení ablačního prahu F_{th} , který je aplikovatelný na laserový paprsek Gaussova normálního rozložení, lze za pomoci vztahu

$$D^2 = 2w_0^2 \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right). \quad (2-9)$$

Pro vyšetřovaný materiál je nutné provést iniciaci povrchu jednotlivými laserovými pulsy. Tyto jednotlivé pulsy jsou „laserovány“ při různých energiích v pulsech E_p . Rozsahy použitých energií v pulsech E_p se odvíjí od testovaného materiálu a použitého laserového zdroje, např.

$1 \mu\text{J} < E_p < 10 \mu\text{J}$. Pro přesnější vyšetření F_{th} je doporučen menší rozsah E_p . Po výrobě a proměření vzniklých průměrů jsou hodnoty vyneseny do grafu (2-1), kde je na ose x vynesena energie v pulsu E_p v logaritmickém měřítku a na ose y kvadrát vzniklého průměru.



Graf 2-1 Vyšetření ablačního prahu F_{th}

Z grafu jsou patrné oba zmíněné režimy tzv. pomalé a rychlé ablace vč. jejich bodu zlomu. Zaznamenané hodnoty jsou vyneseny do grafu a metodou nejmenších čtverců proloženy přímkami, které jsou zapsány ve standardním matematickém tvaru $y = kx + q$. Pro vyhodnocení prahové ablace F_{th} je nutné použít přímkou pro režim pomalé ablace. Prahová energie v pulsu E_{th} leží na průsečíku osy x a přímkou pomalého ablačního režimu. K vyjádření je dále nutné získat radius spotu w_0 při intenzitě $1/e^2$, která je vyšetřena ze vztahu

$$w_0 = \sqrt{k/2}, \quad (2-10)$$

kde k je směrnice přímkou. Nyní lze ablační práh F_{th} vyjádřit vztahem

$$F_{th} = \frac{E_{th}}{\pi w_0^2}. \quad (2-11)$$

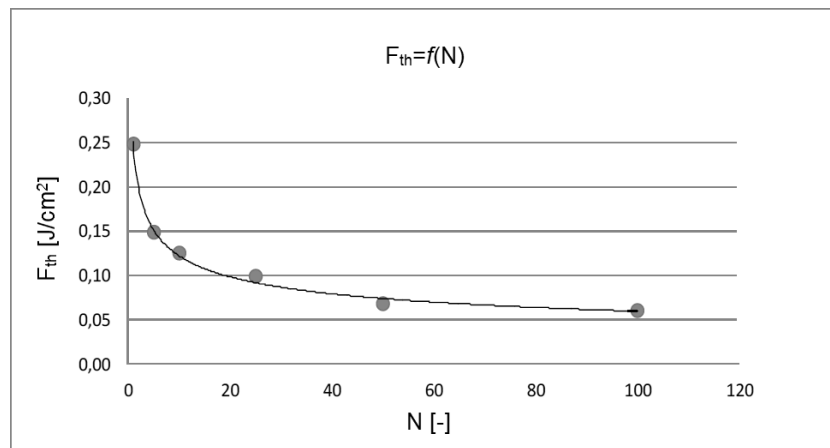
Vlivy na velikost ablačního prahu

Do velikosti ablačního prahu F_{th} pro daný materiál promlouvá mnoho vlivů. Jelikož je úběr materiálu spojen s koncentrací energie uvnitř materiálu, tak je ablační práh F_{th} , kromě materiálových parametrů, závislý i na vlnové délce λ , délce pulsu τ_p a konfiguraci pulsů (jednotlivé pulsy nebo tzv. „burst“ mód [97]). S kratšími vlnovými délkami λ dochází ke zvýšení absorpitivity materiálu a tím pádem i ke snížení ablačního prahu F_{th} . Totéž platí i o délce pulsu τ_p , protože s kratší délkou pulsu se docílí vyšší špičkové energie v pulsu, takže se téměř veškerá energie pulsu transformuje do ablace, a tím dochází i ke snížení F_{th} .

Velikost ablačního prahu F_{th} klesá s vyšším počtem příchozích pulsů N , které jsou aplikovány do stejného místa materiálu. Laserové pulsy způsobují změnu povrchových charakteristik materiálu, které jsou definovány tzv. inkubačním efektem. Tímto efektem dochází k redukci hustoty ablačního prahu, protože $F_{th} = f(N)$. Vzhledem k inkubačnímu efektu je ablační práh F_{th} spolu s počtem aplikovaných pulsů vyjádřen vztahem

$$F_{th}(N) = F_{th}(1) \cdot N^{\xi-1}, \quad (2-12)$$

kde $0 < \zeta \leq 1$ je inkubační koeficient, který popisuje inkubaci defektů vznikajících laserovým zářením. Je-li $\zeta = 1$; znamená to, že ablační práh není závislý na počtech pulsů, protože zde nedochází k akumulaci defektů. Je-li parametr $\zeta > 1$, je povrch materiálu zakalen [17;19;24;25]. Typické hodnoty inkubačního koeficientu ζ jsou pro kovy v rozmezí 0,8-0,9; tzn. ablační práh F_{th} s počtem přibývajících pulsů klesá (viz Graf 2-2). Vlivem použití „burst“ módu lze velikost inkubačního koeficientu ζ dále snižovat. Giannuzzi et al. [97] došli k významné redukci velikosti ablačního prahu F_{th} ve své práci, ve které zkoumali vliv „burst“ módu na inkubační efekt.



Graf 2-2 Vliv počtu pulsů na ablační práh F_{th} pro nerezovou ocel při τ_p 900fs [19]

Z tohoto důvodu může dojít k ablaci materiálu i za předpokladu, že $F < F_{th}$; protože se projeví inkubační efekt, kde saturací jednoho místa materiálu více pulsy N dojde k jeho mikroobrobení [18;19;25].

2.1.4.2 Hloubka ablace

Hloubka ablace z_{abl} závisí na dvou materiálových parametrech: hloubce penetrace δ a poměru hustoty energie F vůči prahové energii F_{th} . Hloubka penetrace δ je schopnost energie proniknout do materiálu. Hloubka ablace z_{abl} je vyjádřena vztahem

$$z_{abl} = \delta \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right). \quad (2-13)$$

V případě hloubky penetrace δ se opět jedná o materiálový parametr, jehož velikost ovlivňuje proces ablace, a tím i nastavení procesních parametrů laseru. Při nárůstu počtu pulsů N a zvyšující se délky pulsu τ_p , hodnota hloubky penetrace δ silně klesá [17; 24; 41; 47].

2.1.4.3 Objem a efektivita ablace

Pro laserový paprsek o Gaussově normálním rozložení hustoty energie lze dle vztahů (2-6) a (2-8) vyjádřit místní hustotu energie závislou na poloměru paprsku r dle

$$F_r = F_0 \cdot e^{\frac{-2r^2}{w_0^2}}, \quad (2-14)$$

kde F_0 je tzv. špičková hustota energie, která se nachází v ose laserového paprsku. Použitím vztahu (2-13) lze vyjádřit objem ablace ΔV na puls

$$\Delta V = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot w_0^2 \cdot \delta \cdot \ln^2 \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right). \quad (2-15)$$

V laserovém mikroobrábění je pro ablaci materiálu aplikován mnohonásobně větší počet pulsů. Objem ablace za jednotku času \dot{V} lze vyjádřit pomocí parametru opakovací frekvence f_p a průměrného výkonu P_{av}

$$\dot{V} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot w_0^2 \cdot \delta \cdot f_p \cdot \ln^2 \left(\frac{2 \cdot P_{av}}{f_p \cdot \pi \cdot w_0^2 \cdot F_{th}} \right). \quad (2-16)$$

Alternativou objemu ablace za jednotku času \dot{V} je vyjádření jeho poměru vůči průměrnému výkonu P_{av} jako funkci špičkové hustoty energie F_0

$$\frac{\dot{V}}{P_{av}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{F_0} \cdot \ln^2 \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right), \quad (2-17)$$

kde vnesením vztahu (2-17) do grafu 2-3 vznikne křivka s extrémem, jenž vyjadřuje optimální bod s nejvyšší účinností, při kterém dochází k maximální rychlosti ablace

$$\left. \frac{\dot{V}}{P_{av}} \right|_{max} = \frac{2}{e^2} \cdot \frac{\delta}{F_{th}}. \quad (2-18)$$

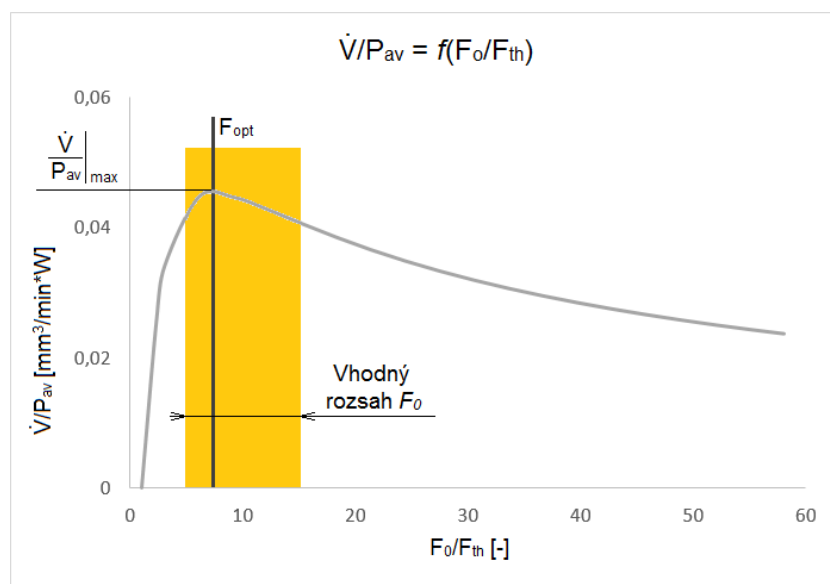
Tohoto maximálního materiálového úběru je docíleno v optimální špičkové hustotě energie F_{opt} , která je dána vztahem

$$F_{opt} = e^2 \cdot F_{th}, \quad (2-19)$$

nebo optimální frekvencí pulsu f_{opt} :

$$f_{opt} = \frac{2}{e^2} \cdot \frac{P_{av}}{\pi \cdot w_0^2 \cdot F_{th}}. \quad (2-20)$$

Používání vyšších nebo nižších špičkových hustot energií F_0 vede k nižší efektivitě ablace. Z tohoto důvodu je dodržení poměru F_0/F_{th} v rozsahu hodnot $5 < F_0/F_{th} < 15$ charakterizováno jako pravidlo pravé ruky. Dodržení tohoto poměru vede u většiny kovů poměrně k nízkým špičkovým hustotám energií F_0 , a proto je zde prostor pro navýšení efektivity ablace dalšími procesními parametry jako např. zvýšení opakovací frekvence f_p zároveň s rozmítací rychlostí laserového paprsku v_f tak, aby byla zachována konstantní vzdálenost mezi jednotlivými pulsy. Vhodný rozsah poměru F_0/F_{th} , včetně F_{opt} je znázorněn v grafu 2-3.



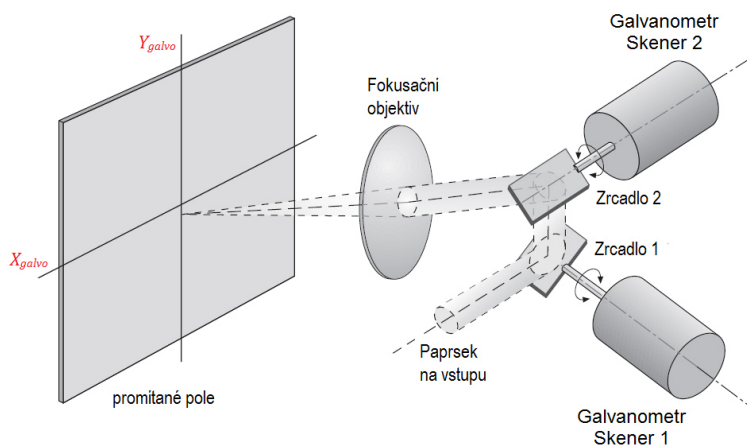
Graf 2-3 Materiálový úběr průměrným výkonem \dot{V}/P_{av} jako funkce poměru F_0/F_{th}

2.1.5 Dynamika rozmítání laserového paprsku

Řízení laserového paprsku a jeho dynamika je z pohledu skenovací strategie velmi důležitým aspektem, kterým je ovlivněna přesnost mikroobráběného tvaru, finální drsnost povrchu a především efektivita ablačního procesu.

2.1.5.1 Hardwarové možnosti rozmítání

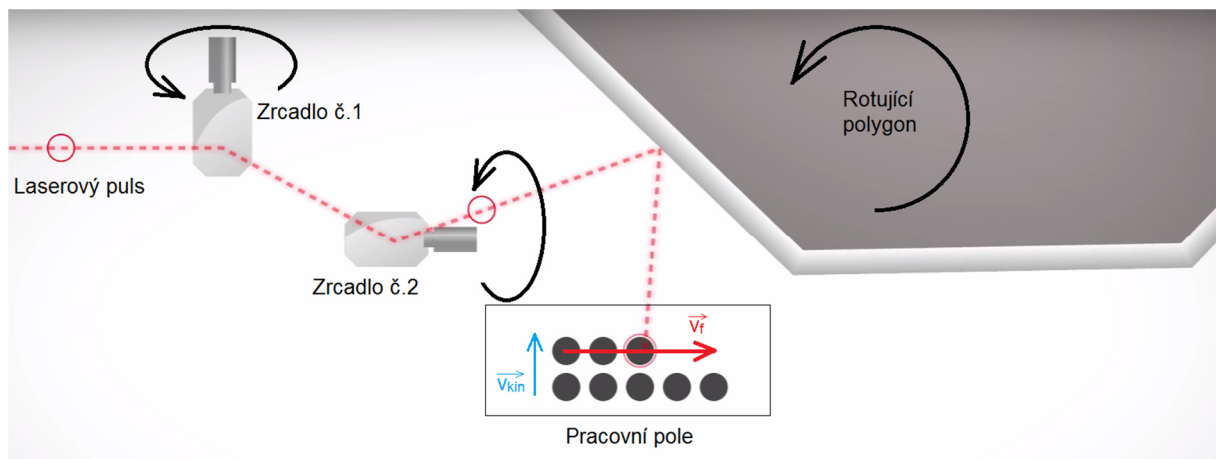
Kvůli potřebě vysokých rychlostí pohybu laserového paprsku po povrchu mikroobráběného materiálu je používán tzv. galvo-skener, jenž vychyluje (rozmítá) laserový paprsek do roviny X_{galvo} a Y_{galvo} (obrázek 2-8). Vychylování laserového paprsku je realizováno pomocí dvou odrazivých zrcadel, kde každé z nich rozmítá paprsek do jiné osy. Laserový paprsek vstupující skrze vstupní štěrbinu galvo-skeneru je nejprve vychýlen do směru X_{galvo} zrcadlem č. 1, a poté do směru Y_{galvo} zrcadlem č. 2. Výsledný úhel vychýlení by měl být velmi přesně a dynamicky upraven řízením poloh galvo metrickými skenery. Laserový paprsek dále putuje skrze fokusační čočku, kde v definované (ohniskové) vzdálenosti f dopadá na pracovní pole určitého rozměru.



Obrázek 2-8 Princip rozmítání laserového paprsku do roviny X_{galvo} a Y_{galvo} [60]

Trend vývoje galvo skenerů je soustředěn do zvyšování rychlosti rozmítání laserového paprsku, protože je zde velký prostor pro redukci procesních časů. Klasické konstrukce galvo skenerů (obr. 2-8) umožňují rozmítat laserový paprsek do $v_f = 10$ m/s. Nová generace galvo skenerů

využívá rozmítání pomocí polygonů, jež dosahují konstantních rozmítacích rychlostí do $v_f = 100\text{m/s}$ (Next Scan TechnologyTM). V případě dalších výrobců např. HyperSCANTM lze využít rychlosti až do $v_f = 200\text{m/s}$. Princip rozmítání laserového paprsku pomocí polygonálních galvo skenerů spočívá v rotujícím polygonu (obrázek 2-9), kterým se rozmítání laserového paprsku, vlivem měnícího se úhlu dopadu na rotující polygon, mnohonásobně zrychlí oproti standardním galvo skenerům. Posun řádku v rastru je konán buď skrze galvo zrcátko č. 2, které vychyluje laserový paprsek po celé šíři polygonu, nebo pomocí posuvu kinematiky o rychlosti v_{kin} . V této sestavě také figuruje galvo zrcátko č. 1, které koriguje polohovou chybu při rastrování tzv. „facet error“. Nevýhodou polygonálního galvo skeneru je rozmítání laserového paprsku pouze v jednom směru, kde toto omezení vychází z ryze jeho konstrukčního charakteru [47;56;57;94].



Obrázek 2-9 Princip rozmítání laserového paprsku pomocí polygonálního galvo skeneru

Tyto polygonální galvo skenery lze použít pro rastrování velkých ploch, kde lze plně využít jejich maximálních rychlostí. Aplikačně lze tento typ skeneru využít i pro radiální mikroobrábění [47]. Především jsou tyto typy skenerů používány ke zpracování povrchů, kde jsou zejména aplikovány pro rastrování tenkých vrstev, značení, objemovou ablací (otvory, drážky, kapsy), aditivní tisk, laserové čištění či žíhání [56].

Jelikož se v obou případech jedná o opto-mechanickou komponentu, je nutné vhodně zvolit povlak pro galvo zrcadla (případně i polygon) dle rozsahu použitelnosti vlnových délek λ včetně tzv. LIDT parametru, který definuje „přenositelnou“ limitní hustotu energie optických komponent. Dalším důležitým aspektem u galvo skenerů jsou jejich pracovní teploty. Každý galvo skener má vyšší provozní teploty z důvodu eliminace kolísání teplot, aby nebyla ovlivněna přesnost vychylování laserového paprsku vlivem tepelných dilatací během temperování galvo skenerů na jejich provozní teploty.

2.1.5.2 Rozmítací strategie

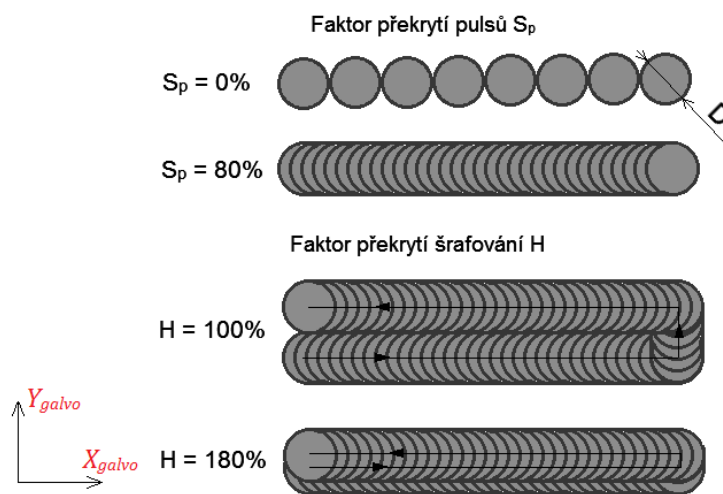
Šrafování

Z pohledu vedení paprsku je nutné definovat další parametry, které blíže charakterizují ablační proces včetně rozmítací strategie. Laserový paprsek lze rozmítat pomocí šrafování, které může mít různé geometrické uspořádání. Mezi typická uspořádání lze zařadit: liniové šrafování a konturové šrafování. Dold [18] se věnoval i dalším, nestandardním druhům uspořádání šrafování, které jsou přiloženy v příloze č. 10.1.1. Tato práce se vymezuje pouze na používání standardního (liniové) uspořádání šrafování.

Aby došlo k požadovanému laserovému mikroobrábění, tak je nutné, aby se laserový paprsek rozmítal o určitých parametrech šrafování. K tomuto šrafování dochází puls po pulsu s možnou definicí vzdálenosti mezi středy pulsů ve směrech X_{galvo} (označeno dx) a Y_{galvo} (dy); (je-li brán v potaz standardní kartézský souřadnicový systém). Tyto vzdálenosti středů pulsů lze definovat jako faktor překrytí šrafování H (čím větší vzdálenost mezi středy pulsů ve směru osy Y_{galvo} (dy) – tím nižší hodnota faktoru překrytí šrafování H) a faktor překrytí pulsů S_p (čím větší vzdálenost mezi středy pulsů ve směru osy X_{galvo} (dx) – tím nižší hodnota faktoru šrafování S_p) viz obrázek 2-10. Faktor S_p lze vyjádřit jako

$$S_p = 1 - \frac{v_f}{D \cdot f_p}, \quad (2-21)$$

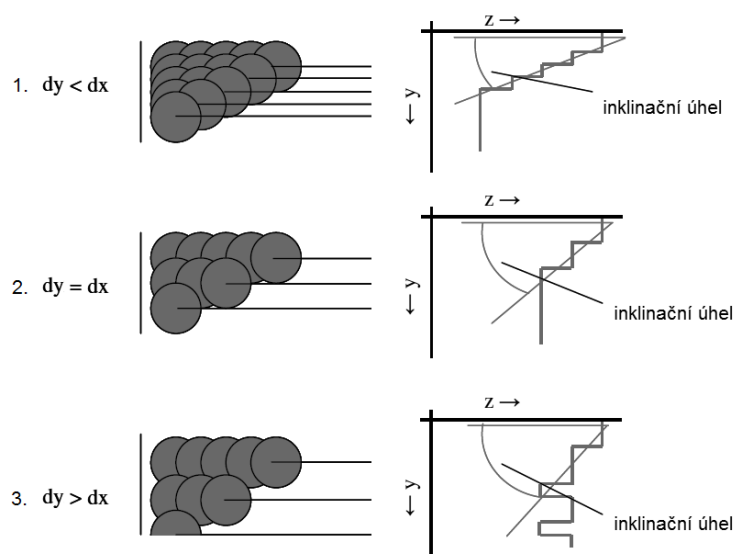
kde v_f skenovací rychlost,
 D průměr laser spotu,
 f_p opakovací frekvence,



Obrázek 2-10 Parametry rozmítací strategie S_p a H

přičemž mohou nastat tři situace při překrývání pulsů v X_{galvo} a Y_{galvo} směru:

1. $dy < dx$ (např. $H=190\%$; $S_p=80\%$)
2. $dy = dx$ (např. $H=180\%$; $S_p=80\%$)
3. $dy > dx$ (např. $H=170\%$; $S_p=80\%$)



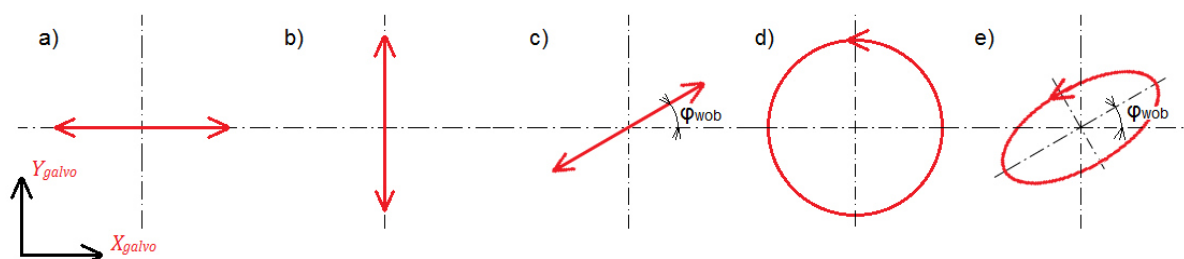
Obrázek 2-11 Výsledek mikroobrábění při různých hodnotách dy [58]

Je-li použit první příklad nastavení, dochází k minimalizaci inklinálního úhlu při mikroobrábění kolmých stěn ve směru X_{galvo} . Ve druhém způsobu nastavení $dy = dx$ dochází ke stejnému inklinálnímu úhlu ve směru X_{galvo} jako ve směru Y_{galvo} . Při použití nastavení dle varianty č. 3 dojde k tvorbě velmi velkého inklinálního úhlu, ale i ke zhoršení drsnosti povrchu a nižší hloubky ablace z_{abl} [58].

K parametrům rozmítací strategie je dále nutné definovat: způsob pohybu paprsku (obousměrný či jednosměrný pohyb), odsazení (offset) od importované kontury, který má vliv na výslednou velikost geometrické entity a úhel rotace liniového šrafování φ , jenž ovlivňuje výslednou drsnost vytvořeného povrchu. Zdroj Christian et. al [59], se zabývá vlivem nastavení úhlu standardního šrafování φ na výslednou drsnost povrchu, ve kterém byly pro vyšetření experimentu zvoleny tři metodické přístupy, které definují formování povrchové topografie. Z těchto přístupů byly identifikovány dva mechanismy, při kterých dochází k formování povrchové struktury. Použitelné hodnoty úhlů šrafování leží v rozmezí $6^\circ < \varphi < 174^\circ$.

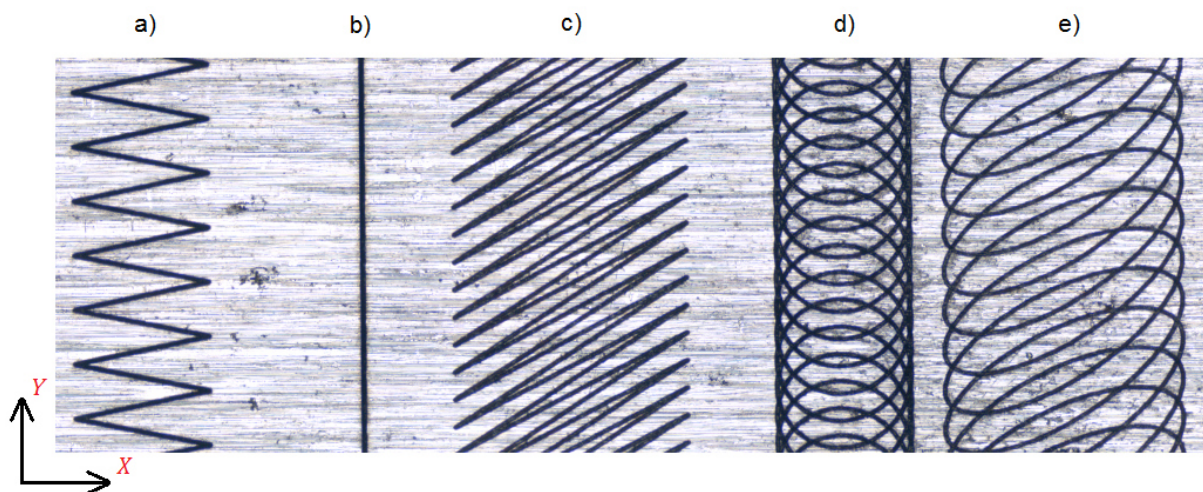
Rozmítání pomocí „wobble“ funkce

Dalším druhem rozmítání lze provést tzv. „wobble“ funkcí, jejíž pomocí je laserový paprsek rozkmitán o určité amplitudě A_{wob} a frekvenci kmitání f_{wob} pod definovaným úhlem φ_{wob} . V tomto rozmítání lze využít několik typů rozmítání, které jsou zobrazeny na obrázku 2-12.



Obrázek 2-12 Různé druhy rozmítání paprsku pomocí funkce "wobble": a) lineárně ve směru X_{galvo} ; b) lineárně ve směru Y_{galvo} ; c) lineárně v definovaném natočení; d) kruhově; e) elipsou v definovaném natočení

Výhodou tohoto typu dynamického rozmítání je možnost synchronizace s kinematikou laserového systému. Tímto způsobem lze docílit relativního pohybu laserového paprsku, který je potřebný pro oba způsoby mikroobrábění (viz kap 1.3). Relativní pohyb uvedených variant je znázorněn na rovinné ploše (obrázek 2-13), kde kinematika laserového stroje vykonala pohyb ve směru Y .

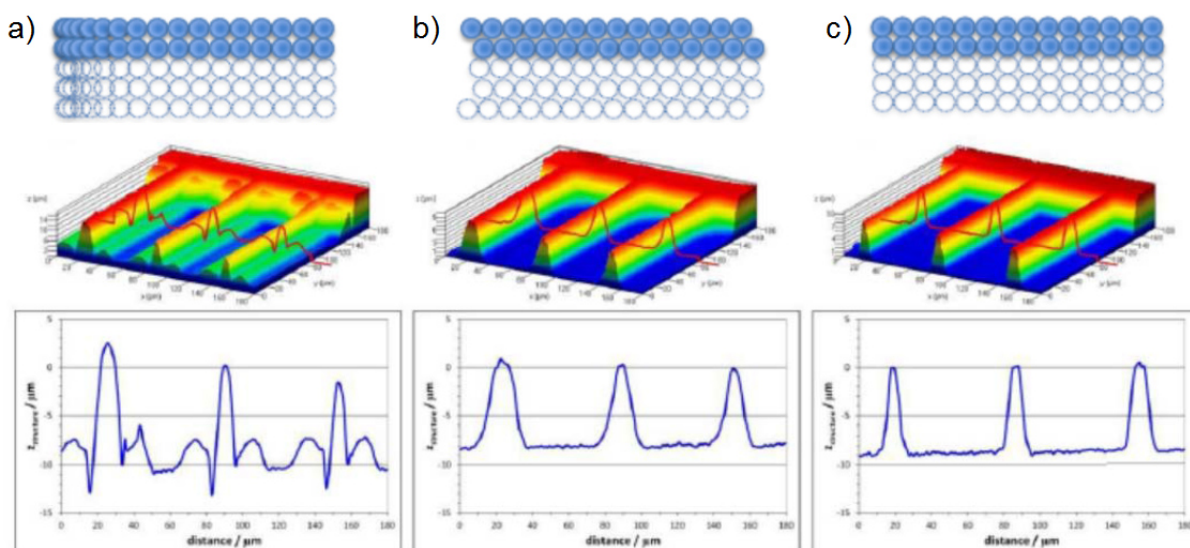


Obrázek 2-13 Promítnutí výsledného relativního pohybu laserového paprsku na rovinnou plochu

2.1.5.3 Kompenzační strategie rozmítání

Tento druh strategií umožňuje optimalizaci rozmítání paprsku během šrafování v souvislosti s vyšší kvalitou tvaru mikroobráběných geometrických entit. Mezi tyto strategie patří funkce „sky-writting“ a synchronizace pohybu galvo zrcátek.

Během rozmítání laserového paprsku do definované kontury dochází ke zrychlování a zpomalování galvometrů v krajních polohách mikroobráběných kontur, tímto dochází ke zkracování vzdálenosti jednotlivých pulsů v krajních místech kontury, což má za následek podřezání požadovaného tvaru (obrázek 2-14a). Funkce „sky-writting“ (obrázek 2-14b) umožňuje umístit zrychlovací a zpomalovací části dráhy mimo mikroobráběnou konturu. Tímto je pak eliminován „propal“ po okrajích kontury. I když je funkce „sky-writting“ aktivní, přetrvává problém nesynchronního pohybu během tvorby liniového šrafování – viz obrázek 2-14b, jenž má vliv na tvarovou kvalitu mikroobrobené entity. Synchronizace pohybu galvometrů při šrafování je důležitá pro dodržení nejvyšší tvarové kvality mikroobráběné geometrické entity. Synchronizace se projevuje následovně – viz obrázek 2-14c [43;56;61;62].



Obrázek 2-14 Vlivy kompenzačních strategií na výsledný tvar mikroobrobené entity:
 a) bez kompenzace; b) sky-writting; c) sky-writting + synchronizace [56]

2.2 Produktivita a způsoby vyšetření ablačních procesů

Tato podkapitola se zaměřuje na způsoby, jimiž lze docílit zvýšení produktivity technologie laserového mikroobrábění. Hlavním cílem této podkapitoly je však autorův návrh, jenž se zaměřuje na obecný postup získání okrajových podmínek laserového zdroje dle jeho výkonové charakteristiky ve vztahu k mikroobráběnému materiálu.

Na základě určených okrajových podmínkách je dále autorovým cílem navrhnout parametrický program, jehož algoritmy umožní časově úspornější experimentální testování materiálové ablace dle vyššího počtu měnících se procesních parametrů, než bylo dosud standardně používáno.

2.2.1 Současné možnosti zvyšování produktivity laserového mikroobrábění

Zproduktivnění laserových technologií, vč. laserového mikroobrábění lze docílit hned několika způsoby. Základem je však naladění jednotlivých laserových sub-systémů na všech úrovních, protože i v tomto případě platí, že produktivita je ovlivněna nejslabším článkem v řetězci daného systému. Aktuální technologie nabízejí možnost zproduktivnění hned v několika subsystémech, jak v laserovém zdroji, tak především ve vedení a úpravě laserového paprsku, který klade nároky na řídicí subsystém.

2.2.1.1 Zvyšování výkonu laserových zdrojů

Zvyšování neboli tzv. „scalling“ výkonů ultrakrátkých laserových zdrojů lze provést pomocí amplifikátorů (zesilovačů), které mohou fungovat na regenerativní nebo lineární technologii. U laserových zdrojů s délkou pulsu τ_p v řádech fs dochází k navýšení výkonu pomocí procesu CPA „Chirped pulsed amplification“. Přímá „amplifikace“ laserových pulsů by vedla k poškození optických komponent, proto je využíván tzv. CPA proces, který je demonstrován v příloze č. 10.1.2. V obou případech může dojít k několikanásobnému zvýšení výsledného výkonu ultrakrátkých laserových zdrojů při dosažení průměrných výkonů $P_{av} > 1\text{kW}$ [47; 65; 66; 67].

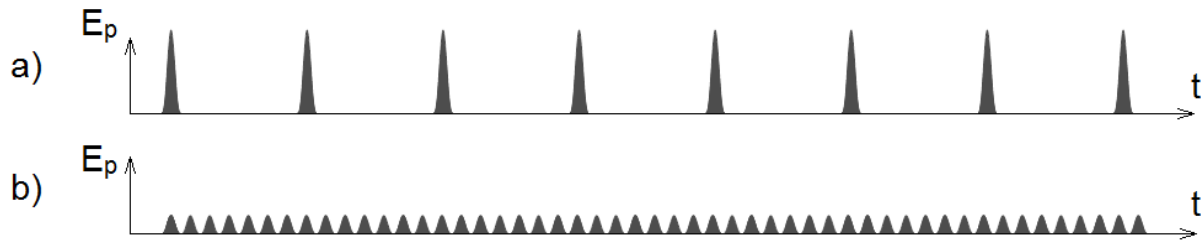
2.2.1.2 Paralelní proces s více laserovými spoty

Tzv. „Multi-spot processing“ lze využít k navýšení produktivity laserového procesu společně s využitím zvýšených průměrných výkonů laserových zdrojů. Průměrný výkon P_{av} je zde rozdělen do několika laserových spotů. K tomuto účelu se využívají tzv. optické difrakční elementy (DOE), které mohou být používány pro tvorbu pole o definovaném rastru $m \times n$. Tato metoda umožňuje paralelní laserový proces identických tvarů. Variabilní DOE jako je např. prostorový světelný modulátor (SLM) nabízí větší flexibilitu pro laserové mikroobrábění, protože umožňuje dynamickou změnu vzoru a počtu laserových spotů. Další výhodou SLM je generování specifického rozložení hustoty energie F laserového paprsku [47]. V současnosti se zabývá problematikou a potenciálním využitím SLM mnoho vědeckých prací [např. 68; 69; 70], proto zde nebude tato problematika blíže specifikována.

2.2.1.3 Vysoké rozmítací rychlosti laserového paprsku

Již zmíněné polygonální galvo skenery v kap. 2.1.5.1 ukazují další směr, kde lze využít vysokých průměrných výkonů laserových zdrojů. Pro plnohodnotné využití vysokých rozmítacích rychlostí $100 < v_f < 200\text{ m/s}$ je nutné mít vhodnou konfiguraci laserového zdroje. V případě vysokých skenovacích rychlostí je k vysokému průměrnému výkonu P_{av} nutné, aby laserový zdroj umožňoval i vysoké hodnoty opakovacích frekvencí f_p v řádech jednotek MHz.

Dle vztahu 2-7 je průměrný výkon P_{av} výsledek součinu opakovací frekvence f_p a energie v pulsu E_p . V tomto případě mohou nastat dva stavy, které jsou znázorněny v obrázku 2-15.



Obrázek 2-15 Rozložení energie v pulsu: a) do větších hodnot E_p ; b) do větších hodnot f_p

Vyšší energie v pulsu E_p (obrázek 2-15a) je využívána v případě paralelního procesu pomocí DOE. Při využití vyšších opakovacích frekvencí f_p (obrázek 2-15b) lze plně využít vysoký průměrný výkon P_{av} a tím i plnohodnotného využití polygonálního galvo skeneru [43;47].

2.2.2 Metodické přístupy přípravných a ablačních procesů

Charakteristiku ablačního procesu konkrétního materiálu lze vyšetřit dvěma základními způsoby:

- prediktivními přístupy s využitím matematických modelů
- experimentálními přístupy vycházející z teorie ablačního procesu

2.2.2.1 Prediktivní přístupy s využitím matematických modelů

Prediktivní přístupy umožňují simulovat interakci laserového paprsku a mikroobráběného materiálu. Tento způsob, používající matematických modelů, dokáže predikovat nejen ablační jevy, ale i např. absorpci a odrazivost laserového paprsku, přenos tepla, fázové změny materiálu, fluidní dynamické změny, tvorbu plazmatu, a další. Studie Tatra et al. [73] se věnuje simulaci materiálové ablace o různých délkách pulsů τ_p (60 ns, 10 ps, 170 fs) a její vliv na ablační proces z pohledu: odpařeného materiálu při určitém počtu pulsů $N = 25$ včetně podílu tvorby kapalného podílu a tvorby plazmatu při $N = 50$. Model byl úspěšně verifikován. Studie Domke et al. [74] vyšetřuje vliv faktoru překrytí pulsů S_p a hustoty energie F na generování povrchové drsnosti při použití ultrakrátkých pulsních laserů. Další zdroj se věnuje dynamice hustoty energie F ve vztahu na výslednou povrchovou strukturu během ablace pulsním laserem, kde výsledné hodnoty byly predikovány s chybou menší než 9% [75].

Výše uvedené prediktivní přístupy, kvůli své náročnosti, vyšetřují materiál pomocí jednotlivých pulsů do jednoho místa, popř. dokáží predikovat parametry ve 2D plochách. Více komplexní simulaci materiálové ablace popisuje zdroj [76], kde je již využíváno uživatelského rozhraní (UI). V tomto UI lze nastavit tvar výchozího a požadovaného modelu. Odchytky experimentu od simulace jsou u jednodušších tvarů do 10%, u konkávních tvarů i 12%.

Shrnutí prediktivních přístupů

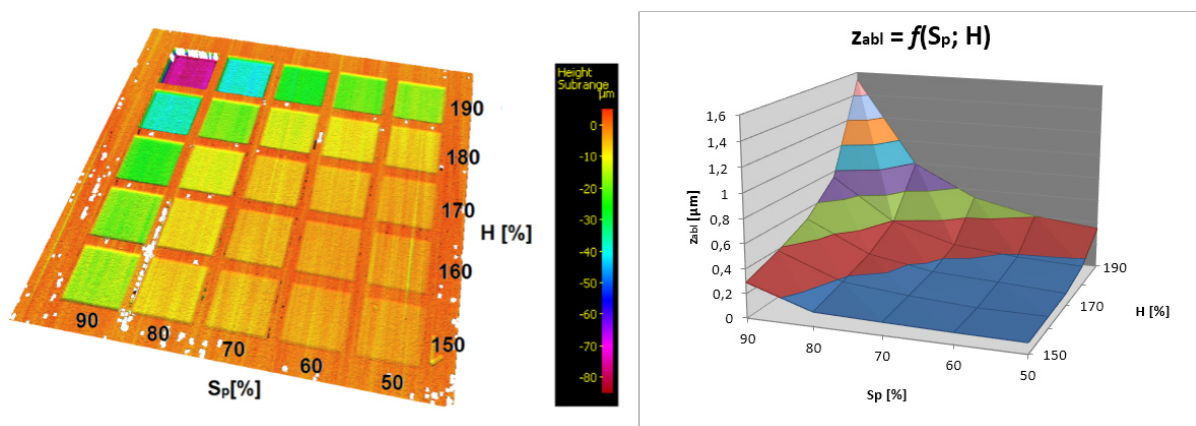
Tento způsob prediktivních ablačních procesů obnáší velmi vysoké nároky na přesnost hodnot materiálových konstant, protože vysokou vahou ovlivňují výsledky simulací. Další nevýhodou náročnosti prediktivních přístupů je možnost zjednodušování matematických vztahů v případě určitých výpočetních nelineárních funkcí. Náročnost prediktivního způsobu v současné době umožňuje simulaci jednoduchých geometrických tvarů mikroobráběných entit, které nemusí dostačovat požadavkům pro požadované tvary.

2.2.2.2 Experimentální přístupy vycházející z teorie ablačního procesu

Oproti tomuto směru je experimentální přístup, který vychází z teorie ablačního procesu, vhodný pro určení ablační charakteristiky materiálu, protože lze konkrétní materiál vyšetřit, aniž by bylo nutné znát veškeré materiálové konstanty. Tyto základní metodické přístupy jsou pro potřeby praxe nejčastěji používané, protože vycházejí z procesních parametrů laserového systému, které jsou přímo definovány operátorem stroje. Mezi tyto parametry spadá nastavení rozmítací strategie a nastavení procesních parametrů ovlivňujících energii laserového paprsku.

Základní způsob experimentálního testování ablace materiálu

Základním způsobem testování materiálu lze experimentálně zjistit vliv dvou procesních parametrů (např. vliv rozmítací strategie laserové paprsku (S_p ; H) na dosaženou hloubku ablace z_{abl}). V případě vyšetřování rozmítací strategie je nutné si u laserových procesních parametrů zvolit konstanty tak, aby byla dodržena konstantní hustota energie laserového paprsku F a výsledky měly vypovídající schopnost. Na obr. 2-16 je vyšetřena ablace materiálu pomocí uspořádání do matice 5x5, kde byl zjišťován vliv rozmítací strategie na hloubku ablace. Matice obrazců 5x5 v pseudo zbarvení indikuje dosaženou hloubku mikroobrobení. Dle vyhodnoceného grafu (obr 2-16 vpravo) je vidět rozdílná hloubka ablace $z_{abl} = f(S_p; H)$. Pomocí tohoto základního uspořádání testovací matice lze vyšetřit vliv překrytí pulzů S_p a rozteče H šrafování na finální hloubku ablace z_{abl} , kde se rozsah zjištěné hodnoty parametru z_{abl} (dle grafu v obrázku 2-16) pohybuje v rozsahu hodnot $0,1 < z_{abl} < 1,6 \mu\text{m}$.



Obrázek 2-16 Závislost dosažené hloubky na skenovacích parametrech při $\lambda = 532 \text{ nm}$, $\tau_p < 13 \text{ ps}$, $f = 200 \text{ kHz}$, $w_0 = 12,5 \mu\text{m}$, $F = 1,58 \text{ J/cm}^2$ [72]

Z tohoto grafu lze usoudit, že se zvyšujícími se hodnotami skenovacích parametrů roste materiálová ablace exponenciálně a oblast hodnot $S_p > 90\%$; $H > 190\%$ je velmi citlivá na řízení přesných hloubek ablace z_{abl} . Tuto metodiku lze aplikovat i s opačným procesním nastavením (procesní parametry – variabilně; skenovací strategie – konstantně).

Shrnutí základního způsobu experimentálního testování

Základní způsob experimentálního testování nabízí vyšetření materiálové ablace s ohledem na kvalitu mikroobrobení pouze při omezeném nastavení laserového systému (pouze variace dvou proměnných laserových parametrů). Z tohoto důvodu není experiment pružně nastavitelný a přípravné procesy pro vyšetření ablací jsou u nových materiálů značně časově neúsporné.

2.2.3 Specifikace prvního parciálního cíle disertační práce

První parciální cíl práce, jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole 1.4.1.2, má za snahu přispět k časově efektivnímu vyšetření ablačního procesu.

K realizaci tohoto cíle je nejprve nutné nalézt takové procesní parametry, jenž jsou nalezeny na základě okrajových podmínek daného laserového zdroje pro konkrétní mikroobráběný materiál. Způsob, jak nalézt tyto okrajové podmínky laserového zdroje v závislosti na mikroobráběný materiál, je navržen autorem. Z těchto okrajových podmínek lze stanovit procesní parametry pro efektivní materiálovou ablaci. V rámci tohoto cíle je dále navržen program, jehož algoritmy umožní variovat potřebné procesní parametry pro vyšetření efektivního ablačního procesu. Výsledkem tohoto programu je časově úsporné experimentální vyšetření vlivů procesních parametrů laserového paprsku včetně jeho způsobu rozmítání na testovaný rezný materiál. Tímto způsobem lze docílit získání takových procesních parametrů a parametrů ovlivňující strategii rozmítání laserového paprsku, které jsou pro konkrétní laserový systém a daný mikroobráběný materiál nejefektivnější.

2.2.4 Získání okrajových podmínek laserového systému s následným využitím

Tato podkapitola charakterizuje autorem navržený metodický přístup vyšetření okrajových podmínek pro laserové mikroobrábění u obecného laserového systému, dle kterého lze lépe nadefinovat některé subsystémy tak, aby byl potenciál výsledného laserového systému co nejvíce vyčerpán. U každého laserového systému lze zproduktivnit výrobní proces, jehož limitní (okrajové) podmínky jsou definovány na základě technické specifikace. Okrajové podmínky laserového systému lze definovat dle mnoha hledisek, neboli kritérií, která jsou charakteristická pro určitou skupinu laserových technologií. V případě určení okrajových podmínek u procesu technologie laserového mikroobrábění lze za tyto kritéria považovat objem odebraného materiálu při dodržení kvality mikroobrobeného tvaru a povrchu vzniklé geometrické entity. Na základě těchto kritérií lze obecně definovat okrajové podmínky pro proces laserového mikroobrábění. Po získání okrajových podmínek a konkrétního aplikačního potenciálu lze snáze sladit laserový systém. Zejména se toto sladění týká dvou subsystémů:

- laserový zdroj
- vedení (konkrétně rozmítání) laserového paprsku

Jestliže jsou známy okrajové podmínky laserového zdroje dle jeho výkonové charakteristiky a to na základě mikroobráběného materiálu, mohou u laserového systému nastat dva stavy.

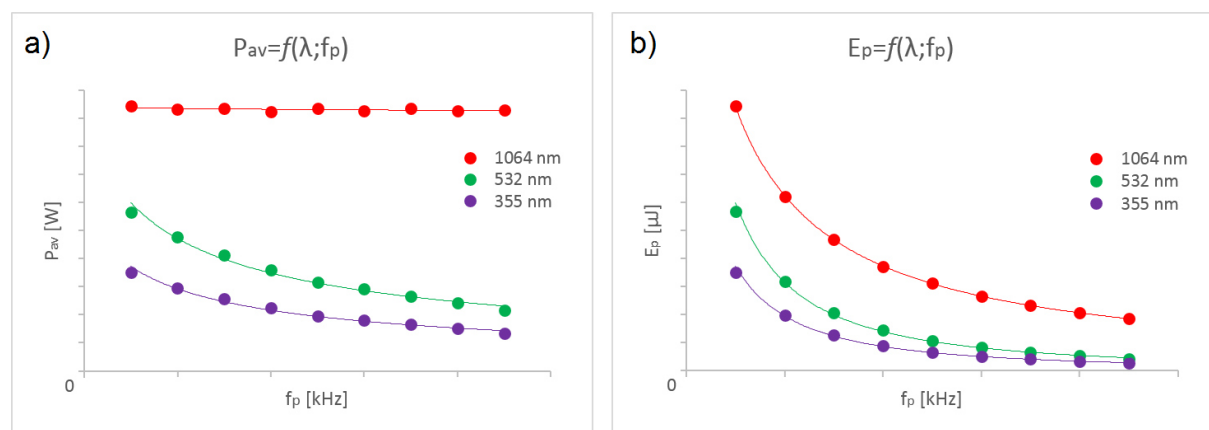
- **Poddimenzovaný laserový zdroj**, který nedokáže při vyšších opakovacích frekvencích f_p vygenerovat potřebnou energii v pulsu E_p , která je důležitá pro zajištění maximálního materiálového úběru vztaženého na poměrný výkon - \dot{V}/P_{av} pro konkrétní mikroobráběný materiál. Jako sekundární omezení může být nízký rozsah opakovací frekvence f_p , je-li laserový zdroj naladěn na vyšší průměrné výkony P_{av} .
- **Limitující rychlost galvo skeneru**, kde nelze rozmítání laserového paprsku realizovat většími rychlostmi v_f , např. kvůli velikosti mikroobráběné geometrické entity. V tomto případě nelze plně využít potenciál laserového zdroje pro daný materiál.

2.2.4.1 Definování okrajových podmínek laserového systému dle výkonové charakteristiky laserového zdroje

Popis výkonové charakteristiky laserových zdrojů

Každý laserový zdroj má svou výkonovou charakteristiku. Obecně platí, že s nižšími vlnovými délkami λ je obdržen menší průměrný výkon P_{av} [14]. Generování vyšších harmonických vlnových délek dochází za specifické účinnosti přeměny té výchozí, tzv. základní harmonické (IH). V případě generování druhé harmonické (IIH) jsou k přeměně používány krystaly, jejichž účinnost je $\sim 60\%$. Při generování třetí harmonické (IIIH) dochází skrze krystal, do kterého vstupuje jak IH, tak i IIH. Zde je IIIH generována s účinností $\sim 40\%$.

Dalším charakteristickým rysem pro IH ($\lambda=1064\text{nm}$) je, že si svůj průměrný výkon P_{av} zachovává v celém frekvenčním spektru f_p (Graf 2-4a). U vyšších harmonických IIH, resp. IIIH ($\lambda=532$, resp. 355nm) dochází ke snižování P_{av} se zvětšující se f_p . Další závislost lze vyjádřit za pomoci energie v pulsu E_p (graf 2-4b) dle vztahu 2-7, kde je pokles energie v pulsu E_p velmi zřetelný. U kratších vlnových délek λ klesá energie v pulsu E_p až k nulovým hodnotám, což znamená, že je proces laserového mikroobrábění značně neefektivní.



Graf 2-4 Výkonová charakteristika laserového zdroje: a) $P_{av}=f(\lambda; f_p)$; b) $E_p=f(\lambda; f_p)$

Pro tyto důvody je potřebné vybrat vhodný rozsah nastavení parametrů laserového zdroje, kterými lze docílit materiálové ablace v požadovaném rozsahu poměru $F_0/F_{th} = e^2$. Tento rozsah je definovaný vztahem 2-17, který popisuje maximální materiálový úběr vztažený na průměrný výkon - \dot{V}/P_{av} . Ze vztahu 2-17 je patrné, že $\dot{V}/P_{av} = f(\delta; F_{th})$. Tzn., že vhodné rozsahy hustot energií se odvíjí od konkrétních mikroobráběných materiálů. Výsledná křivka vztahu 2-17 vynesena v grafu 2-3 nabývá svého extrému při optimální hustotě energie F_{opt} , která je určena vztahem 2-19. Aby bylo možné obecně vyjádřit vhodný rozsah pro všechny mikroobráběné materiály, používá se poměrná hodnota parametrů F_0/F_{th} . Tímto definovaným poměrem lze ablaci materiálu považovat za efektivní, když rozsah F_0/F_{th} nabývá hodnot $5 < F_0/F_{th} < 15$ [47].

Definování okrajových podmínek na základě výkonové charakteristiky laserového zdroje

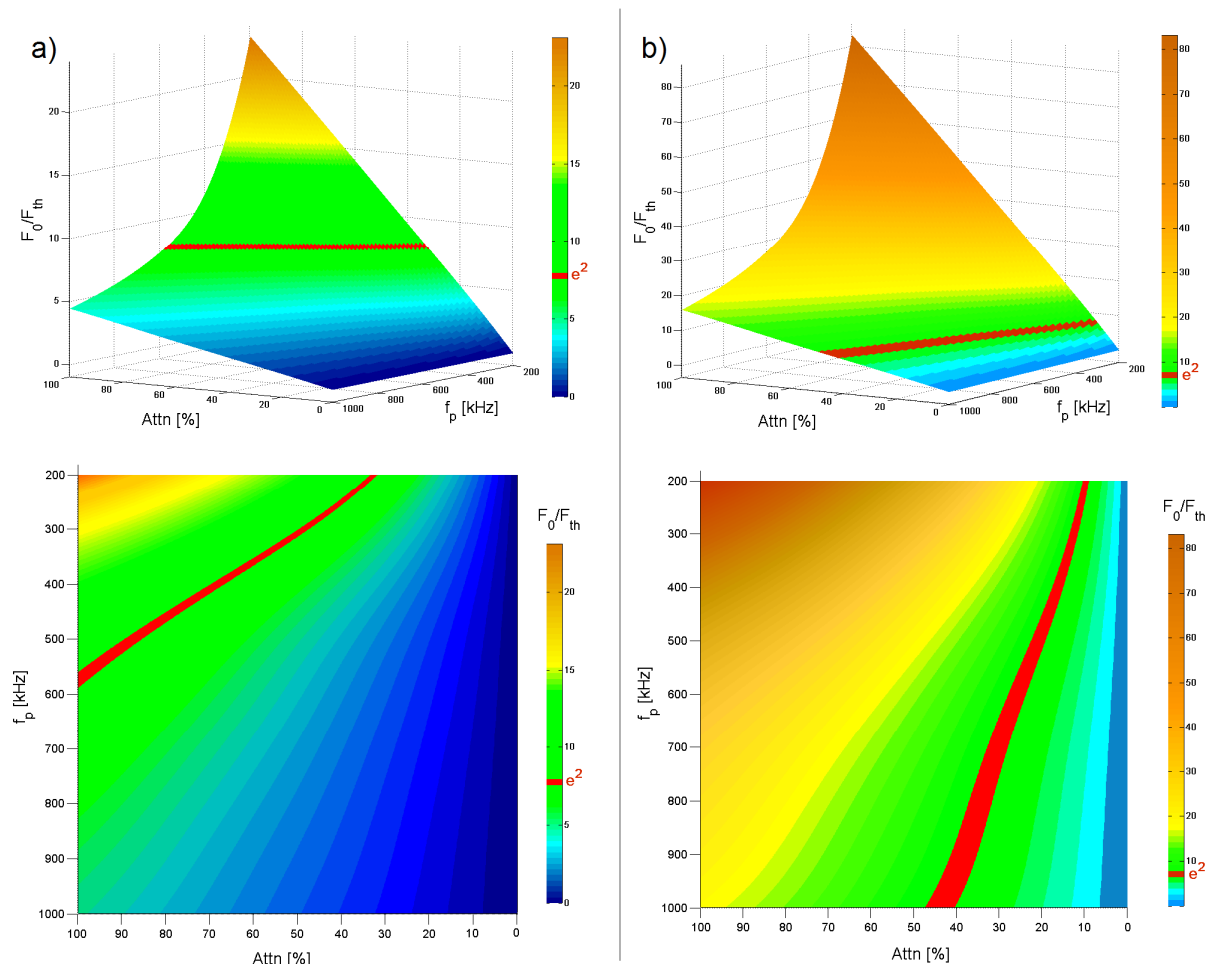
Nadefinování okrajových podmínek přímo závisí na těchto kritériích:

- výkonová charakteristika laserového zdroje
 - $E_p = f(P_{av}, f_p)$
- vedení a úprava laserového paprsku
 - $2w_0 = f(\lambda, M^2, f)$
- mikroobráběný materiál

- $F_{th} = f(E_{th}, w_0, N, \xi, A, \lambda, \tau_p)$
- $F_{opt} = f(F_{th})$

Pro obecné určení okrajových podmínek dle výkonové charakteristiky laserového zdroje byly pro názornost vybrány laserové zdroje o τ_p ; $\lambda = \text{konst.}$ s totožným rozsahem opakovacích frekvencí f_p . Tyto laserové zdroje mají různé naladění průměrného výkonu $P_{av} = 20\text{W}$ (Graf 2-5a) a 80W (Graf 2-5b). Fokuse laserového paprsku byla v obou případech pro testování mikroobráběného materiálu totožná ($2w_0 = \text{konst.}$).

Při znalosti parametrů zkoumaného materiálu (F_{th} ; F_{opt}) a známých výkonových charakteristikách laserových zdrojů lze pro určitou vlnovou délku λ získat okrajové podmínky, které jsou definovány pomocí výkonového atenuátoru $Attn$, sloužící k nastavení průměrného výkonu laserového zdroje P_{av} , a opakovací frekvence laserového zdroje f_p . Výsledné plochy v grafech 2-5a a 2-5b prezentují poměrnou hodnotu parametrů F_0/F_{th} , kde $F_0/F_{th} = e^2$ (viz graf 2-5) dle vztahu 2-19 prezentuje optimální hustotu energie F_{opt} pro daný mikroobráběný materiál. Plochy pro pásma efektivní ablace, v rozsahu hodnot $5 < F_0/F_{th} < 15$ pro zkoumaný materiál, jsou znázorněny zelenou barvou. Pro lepší interpretaci použitelných rozsahů F_0/F_{th} jsou v textu práce nadále používány pouze půdorysy plošných grafů.



Graf 2-5 Okrajové podmínky laserových zdrojů o různých výkonových charakteristikách pro totožné parametry $\lambda = 1064\text{nm}$; $\tau_p = 12\text{ps}$; $f_p < 200; 1000\text{kHz}$; $F_{th} = 0,25 \text{ J/cm}^2$; $w_0 = 20 \mu\text{m}$ a) $P_{av} = 20\text{W}$; b) $P_{av} = 80\text{W}$

Z odlišných průběhů okrajových podmínek laserových zdrojů ve vztahu na poměrovou hodnotu parametrů $F_0/F_{th} = e^2$ mikroobráběného materiálu lze usoudit, že slabší laserový zdroj (graf 2-5a) dosáhne maximálního průměrného výkonu P_{av} již při opakovací frekvenci $f_p \approx 570 \text{ kHz}$.

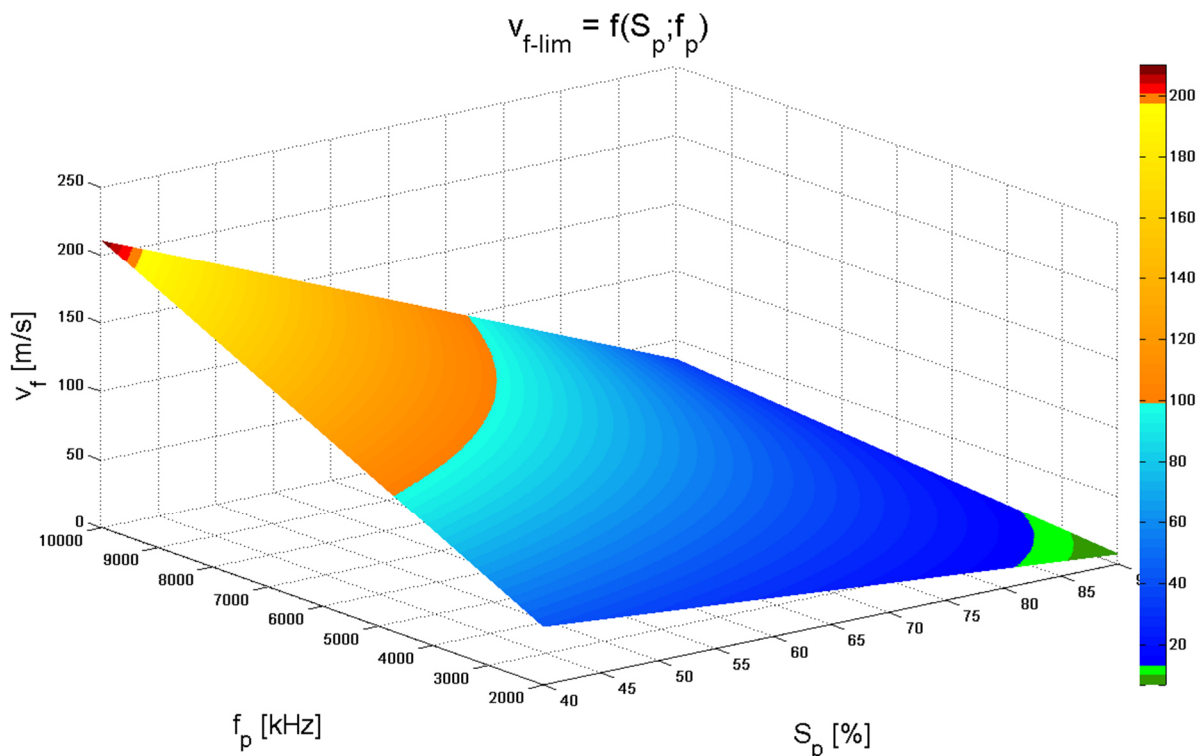
V opačném případě (graf 2-5b) nebude mikroobrábění totožného materiálu limitováno maximem parametru P_{av} , ale nízkým rozsahem opakovací frekvence f_p . V obou variantách je možné využít efektivní pásmo ablace (zelené), namísto maximálního materiálového úběru při $F_0/F_{th} = e^2$ (červené). Efektivní pásmo ablace umožňuje posunout oblast využití laserového zdroje k maximálním hodnotám parametrů P_{av} a f_p (oblast levého dolního rohu u obou grafů 2-5). Ideální konfigurace laserového zdroje pro daný mikroobrábění materiál při $F_0/F_{th} = e^2$, musí splňovat plné vytížení jeho výkonové charakteristiky (tzn. max. hodnoty parametrů P_{av} a f_p při $F_0/F_{th} = e^2$).

2.2.4.2 Definování okrajových podmínek laserového systému dle možností rozmítání laserového paprsku

Při znalosti okrajových podmínek laserového zdroje je dále nutné zvážit, zda lze veškerou energii laserového paprsku přenést v plné míře na mikroobráběný materiál. Pro vyšetření potřebného rozsahu skenovací rychlosti klasického či polygonálního galvo skeneru je použitý vztah 2-21, tzn. že:

- $v_f = f(2w_0; f_p, S_p)$

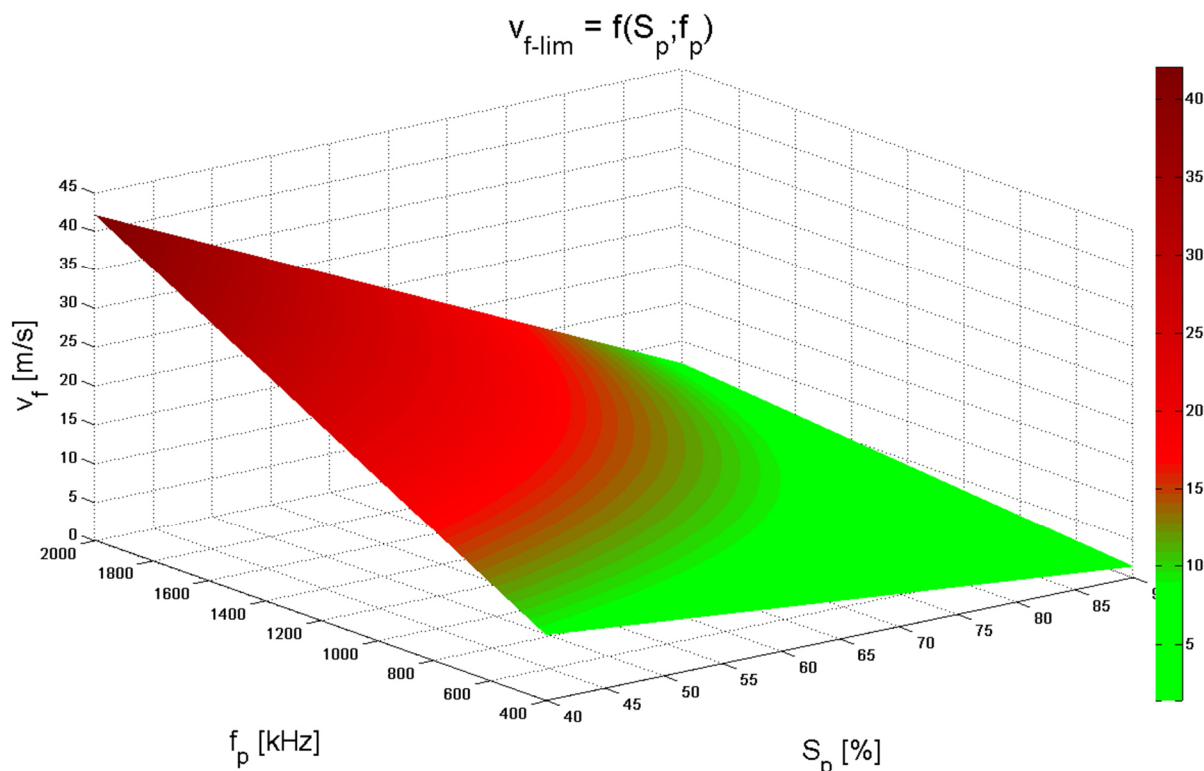
Pro nadefinování okrajových podmínek na základě možností rozmítání laserového paprsku bude uvažováno pouze liniové šrafování z důvodu možnosti porovnání klasického a polygonálního typu galvo skeneru. Pro konfrontaci všech dostupných rozmítacích typů galvo skeneru byl do grafu 2-6 použit rozsah frekvence pulsu f_p do 10 MHz.



Graf 2-6 Vliv parametrů S_p a $f_p <2;10\text{MHz}>$ na limitní rychlosti rozmítání $v_{f\text{-lim}}$ při $w_0 = 17,5\mu\text{m}$:
a) klasické galvo skenery - $v_{f\text{-lim}} = 10 \text{ m/s}$ [71;94] a polygonální galvo skenery:
b) Next Scan Technology™ - $v_{f\text{-lim}} = 100 \text{ m/s}$ [56]; c) Hyper Scan™ - $v_{f\text{-lim}} = 200 \text{ m/s}$ [57]

Z plochy grafu 2-6 lze dle maximálních hodnot rozmítací rychlosti $v_{f\text{-lim}}$ v závislosti na maximální opakovací frekvenci f_p , která je stanovena výkonovou charakteristikou laserového zdroje, určit použitelný rozsah faktoru překrytí S_p při daném parametru w_0 .

Převážná většina laserových zdrojů pro účely mikroobrábění využívá opakovací frekvence $f_p < 2\text{MHz}$ [63]. Z tohoto důvodu je do grafu 2-7 vynesena větší detail, kde $0,4 < f_p < 2\text{MHz}$. V tomto rozsahu opakovacích frekvencí f_p jsou nejvíce využívány klasické galvo skenery.



Graf 2-7 Vliv parametrů S_p a $f_p < 0,4; 2\text{MHz}>$ na limitní rychlosti rozmítání $v_{f\text{-lim}}$ pro klasické galvo skenery při $w_0 = 17,5\mu\text{m}$

Využívání maximálních rychlostí rozmítacích rychlostí $v_{f\text{-lim}}$, konkrétně u klasických galvo skenerů, je pouze teoretické, protože jsou určeny pro rozmítání laserového paprsku, který upravuje mikrogeometrické entity o velikostech v řádech stovek až desítek mikrometrů. Při radiálním (2,5osém) mikroobrábění takto malých detailů nelze z principu akcelerace galvo zrcadel efektivně využít vysokých rozmítacích rychlostí v_f . V případě navýšení rozmítací rychlosti v_f nedojde k úměrné časové úspoře mikroobrábění, protože se zde promítá vliv akcelerace a decelerace galvo zrcadel, velikost plochy aktuálně mikroobráběné vrstvy daného průřezu geometrické entity a vliv použití kompenzačních strategií (sky-writting, synchronizace), jež jsou důležité pro korektní miniaturizaci vytvářených tvarů. S velikostně většími mikroobráběnými entitami (a jejich většími plochami průřezů) lze docílit větší časové redukce procesu mikroobrábění vztažené na jednotku mikroobráběné plochy.

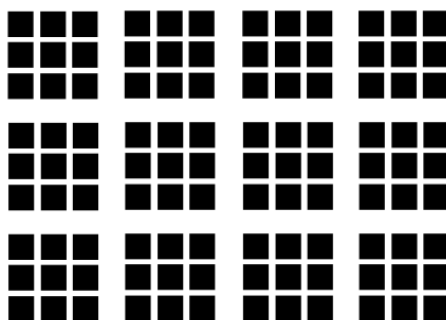
2.2.5 Návrh pokročilého způsobu experimentálního testování ablace materiálu

Na základě nedostatků základního způsobu experimentálního testování je autorovým cílem navrhnout nový metodický přístup formou parametrického programu, jehož algoritmy umožňují pracovat s více než dvěma variabilními procesními parametry. Možnost variovat více proměnných procesních parametrů časově zredukuje vyšetření interakce nového materiálu s laserovým paprskem.

Nový metodický přístup, z důvodu vysokého počtu variabilních procesních parametrů, zahrnuje obecné rozdělení procesních parametrů do dvou skupin:

- parametry ovlivňující strategii rozmítání laserového paprsku
- parametry ovlivňující energetické vlastnosti výstupního laserového paprsku

Dle výše uvedeného rozdělení proměnných parametrů do dvou skupin byly navrženy algoritmy, které umožňují testovat až čtyři parametry. Princip parametrického programu spočívá v generování modelů jednoduchých geometrických entit (např. čtverců). Všechny tyto geometrické entity jsou poskládány do maticového pole. Každá geometrická entita v matici má odlišné nastavení procesních parametrů, jejichž hodnoty lze načítat např. z textových souborů. Způsob uspořádání do maticového pole bylo zvoleno z důvodu přehlednosti a komfortnějšího vyhodnocení. Ukázkový způsob uspořádání geometrických entit je zobrazen v obrázku 2-17.



Obrázek 2-17 Možnost podoby pokročilé matice pro vyšetření materiálové ablace [72]

2.2.5.1 Princip variace jednotlivých laserových parametrů v pokročilé matici

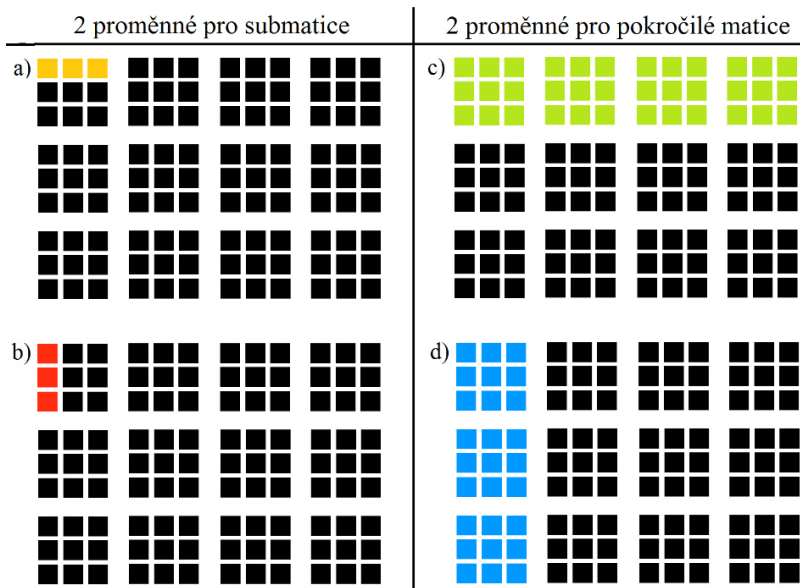
Odlišné prostorové dělení slouží pro optickou přehlednost. Dle obrázku 2-17 se pokročilá matice skládá ze submatic, kde je testována první dvojice proměnných parametrů. V celkové matici jsou testovány další dva proměnné parametry. Princip variace parametrů je znázorněn v obrázku 2-18.

V submaticích jsou testovány dva parametry, které slouží pro vyšetření rozmítací strategie:

- řádky: S_p – faktor překrytí – obr. 2-18a
- sloupce: H – faktor rozteče šrafování – obr. 2-18b

Celková matice již vyšetřuje parametry, které ovlivňují energii laserového paprsku:

- řádky: P_{av} – průměrný výkon – obr. 2-18c
- sloupce: f_p – frekvence pulzů – obr. 2-18d

Obrázek 2-18 Vzorovací matice pro čtyři proměnné parametry: a) S_p ; b) H ; c) P_{av} ; d) f_p [72]

Z obr. 2-18 vyplývá, že pro každou sub-matici je použita jiná hustota energie laserového paprsku, protože celková matice má proměnné parametry f_p a P_{av} , které přímo ovlivňují energii v pulsu E_p , kdežto jednotlivé geometrické entity v sub-maticích mají totožné nastavení parametrů S_p a H . Do této celkové matice lze nastavit nekonečně mnoho variant. Omezení použití tohoto vyšetřování je dáno velikostí obrobku a pracovním prostorem laserového stroje.

2.2.5.2 Návrh mikroobráběné entity

Geometrická entita je navržena tak, aby se podle ní dala vyhodnocovat hloubka ablace z_{abl} , drsnost povrchu dle ISO 4288 a zabírala minimum místa. Laserovým mikroobráběním dochází k neperiodicky se opakující povrchové topografii, proto lze pro měření profilové drsnosti povrchu zvolit „zig-zag“ strategii [8, 77]. Měření profilové drsnosti vyžaduje pro předpokládanou drsnost povrchu v rozmezí $0,1 < R_a < 2 \mu\text{m}$ měřenou délku alespoň 4 mm. Dle těchto požadavků musí být geometrická entita např. tvaru čtverce alespoň o minimální velikosti $0,4 \times 0,4 \text{ mm}$, aby byla zajištěna korektnost měření dle ISO 4288 [72].

2.2.5.3 Charakteristika navrženého parametrického programu pro pokročilé testování ablace

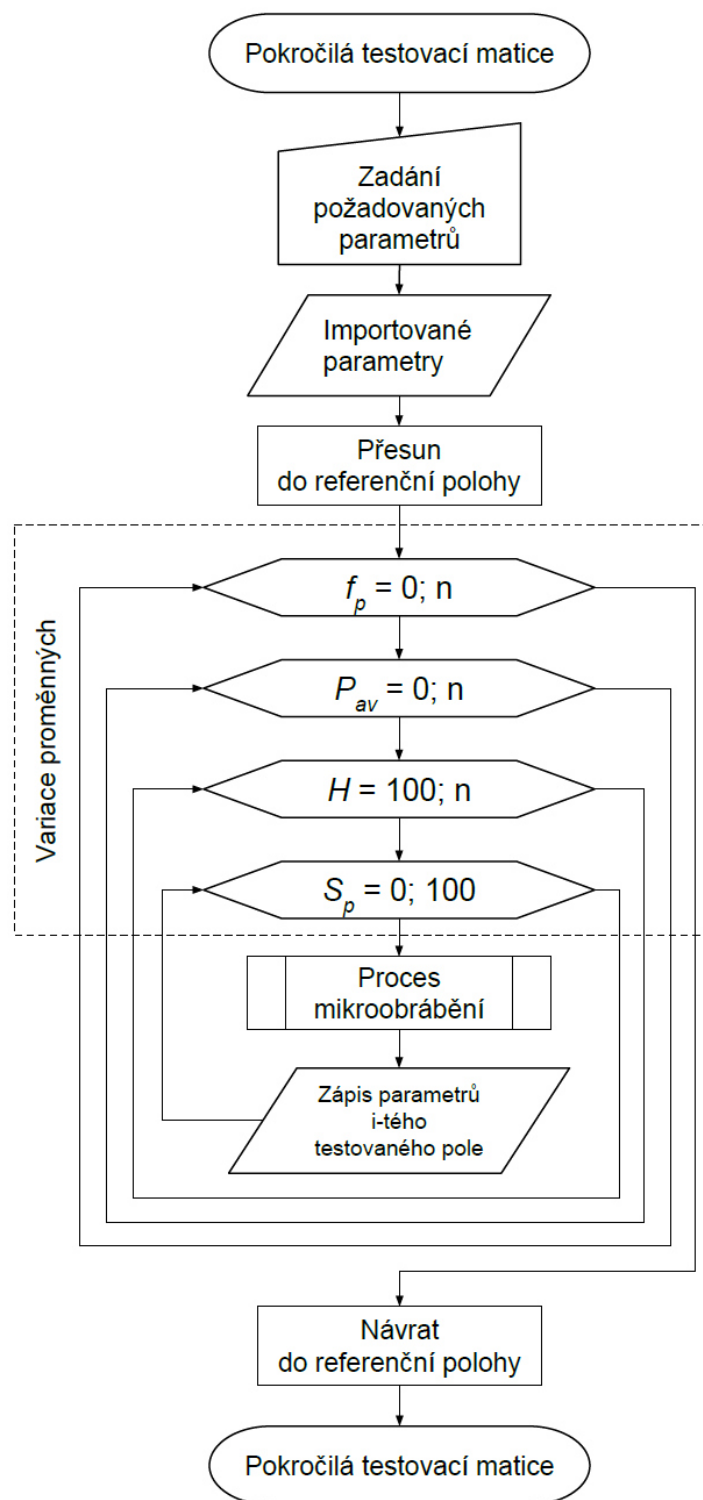
Charakteristika této pokročilé testovací matice je prezentována vývojovým diagramem v obrázku 2-19.

Do požadovaných vstupních parametrů je především nutné nadefinovat:

- velikost a model mikroobráběné entity
- počet mikroobráběných vrstev
- kompenzaci pro rozmítání laserového paprsku
- rádius spotu w_0 pro testovaný materiál při příslušné vlnové délce λ
- polohu referenčního bodu
- ostatní (např. defokusace laserového paprsku, procesní plyny, aj.)

Celkem jsou do parametrického programu importovány již výše zmíněné parametry (Obrázek 2-18). Hlavní jádro parametrického programu se skládá z algoritmů o čtyřech vnořených cyklech (ohraničená oblast v obrázku 2-19), jež slouží pro načítání hodnot jednotlivých

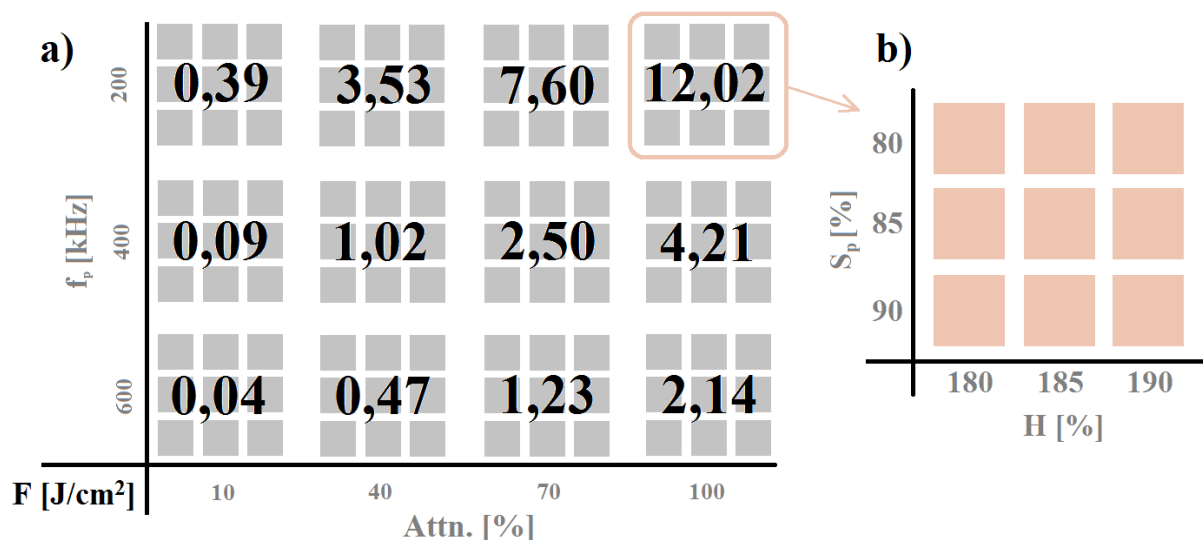
parametrů (P_{av} , f_p , S_p a H), podle kterých jsou voleny rozmítací strategie pohybu laserového paprsku a hustoty energie. Načítání těchto hodnot jednotlivých parametrů lze realizovat např. skrze textové soubory. Po načtení všech hodnot parametrů je přistoupeno k procesu mikroobrábění geometrických entit. Po jejich mikroobrobení lze veškerá data zapsat do jednoduchého textového souboru. Na základě množství parametrů je uzpůsoben formát vzorkovací matice, která může vypadat např. dle obrázku 2-20.



Obrázek 2-19 Vývojový diagram pro pokročilé testování materiálové ablace

2.2.5.4 Příklad řešení vyšetření jednotlivých laserových parametrů

Příklad nastavení jednotlivých polí v pokročilé testovací matici může dle obrázku 2-20 vypadat následovně, zde je prezentována matice 12x9. Na obrázku 2-20a je charakterizována hustota energie F v závislosti na f_p a P_{av} . Obrázek 2-20b znázorňuje detail sub-matice a její nastavení faktoru překrytí S_p a faktoru rozteče šrafování H . Poloměr paprsku ve spotu je pro testovaný materiál $w_0 = 12,5 \mu\text{m}$.



Obrázek 2-20 Schématická ukázka nastavení pokročilé matice 4x3 a závislosti
 a) $F = f(f_p, P)$; b) $z_{abl} = f(S_p, H)$ při: $\lambda = 532 \text{ nm}$; $\tau_p = 12 \text{ ps}$; $f_p <200; 600 \text{ kHz}>$; $\text{Attn} <10; 100\%>$; $w_0 = 12,5 \mu\text{m}$

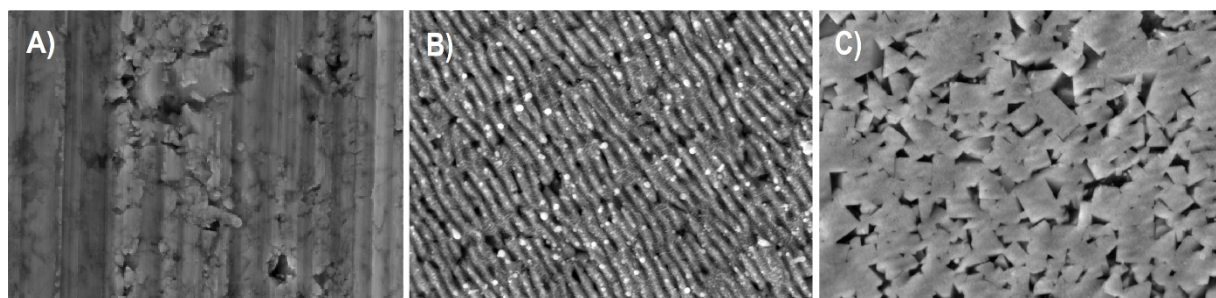
Aplikování tohoto metodického přístupu experimentálního testování materiálové ablace, včetně možností vyhodnocení kvalitativních parametrů povrchu a hloubky ablace z_{abl} v závislosti na variabilních procesních parametrech, se věnuje příloha č. 10.1.3.

2.3 Studie ablačních procesů vybraných řezných materiálů

V této podkapitole jsou využity autorem navržené metodické přístupy vyšetření okrajových podmínek laserového systému pro mikroobrábění vybraného řezného materiálu, které jsou stanoveny pro konkrétní laserový systém. Dále je zde použita metodika pokročilého experimentálního testování ablace pro vybraný materiál. Na základě těchto metodik, které jsou podloženy rešeršními podklady, lze stanovit vhodné laserové parametry pro radiální způsob mikroobrábění.

V návaznosti na definované cíle disertační práce jsou autorem vyšetřeny ablační procesy pro jednu skupinu řezných materiálů. Konkrétně se jedná o slinuté karbidy, které mají v současné době většinové zastoupení ve výrobě monolitních řezných nástrojů. Úprava řezného nástroje ze slinutého karbidu nese určitá specifika. Obecně jsou slinuté karbidy kompozitním materiálem, jenž obsahuje tvrdé fáze (WC, TiC, TaC, NbC) spojené s tvárnou (neboli pojivovou) fází (Co) [15]. Během výrobního procesu monolitního řezného nástroje za pomoci broušení dochází k materiálovému úběru abrazivním způsobem za současného vydrolování karbidických zrn z pojivové fáze. Četnost vydrolených karbidických zrn a tím narušeného povrchu řezného nástroje, je ovlivněna mnoha materiálovými faktory broušeného polotovaru (velikost karbidických zrn, obsahu pojiva) a brusného kotouče (zrnitost a koncentrace brusiva, typ pojiva), ale také řeznými podmínkami broušení (směr, rychlost, otáčky). I při dodržení vhodných podmínek u jemného broušení dojde k narušení povrchu vydrolením karbidických zrn (Obrázek 2-21a), protože se vždy bude jednat o mechanickou (abrazivní) interakci mezi obrobkem a nástrojem.

Absence mechanického zatížení mikroobráběného monolitního řezného nástroje vlivem laserového mikroobrábění má za následek přežívání tvrdých karbidických zrn bez porušení pojiva v krajních vrstvách materiálu [51]. Obrázky 2-21b a 2-21c již prezentují topografii povrchu při obou mikroobráběcích způsobech. Radiálním mikroobráběním (Obrázek 2-21b) lze při správné volbě procesních parametrů docílit tzv. laserem indukovaných periodických povrchových struktur – LIPPS [24, 53, 71, 79]. Tangenciálním mikroobráběním lze při korektních procesních parametrech docílit čistého řezu karbidických zrn [51] (Obrázek 2-21c).



Obrázek 2-21 Vlivy různých technologických úprav na topografii povrchu slinutého karbidu:
A) jemné broušení; B) laserové mikroobrábění - radiální; C) laserové mikroobrábění – tangenciální

2.3.1 Vstupní parametry pro vyšetření materiálové ablace

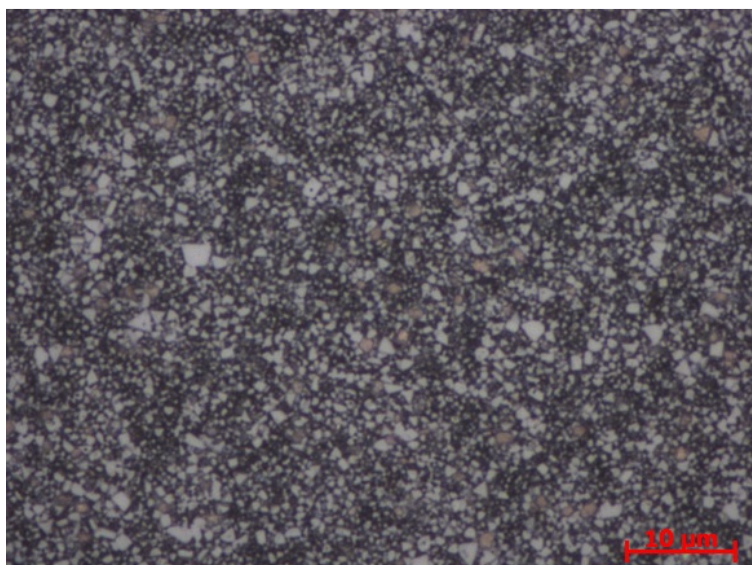
Pro nadefinování veškerých parametrů k navrženým metodikám (definování okrajových podmínek laserového zdroje a vyšetření ablačních procesů na pomoci pokročilé testovací matice) je nutné podrobit testovaný řezný materiál konkrétnímu vyšetření materiálové ablace.

2.3.1.1 Charakteristika slinutého karbidu

Pro studii ablačního procesu byl vybrán slinutý karbid K10 o mechanických parametrech, které jsou uvedeny výrobcem v tabulce 2-1. Materiál byl podroben vstupní analýze, ze které byly zjištěné hodnoty porovnány s údaji uvedenými výrobcem. Tvrdost a lomová houževnatost odpovídá tabulkovým hodnotám. Během hodnocení chemického složení nebyla zjištěna přítomnost jiných karbidů a podíl pojivové fáze rovněž odpovídá tabulkovým hodnotám. Průměrná hodnota velikosti zrna je přibližně 1 μ m, jak vyplývá z metalografického výbrusu - viz Obrázek 2-22 [64].

Tabulka 2-1 Mechanické vlastnosti slinutého karbidu K10 [64]

Označení karbidu dle ISO:	WC (%)	Co (%)	HV30:	Pevnost (MPa)	Hustota (g/cm ³)	Zrnitost (μ m)	λ_{tep} (W/(m \cdot K))	Pevnost v tlaku (GPa)
K10	94	6	1690	2800	14,85	1	97	6,1



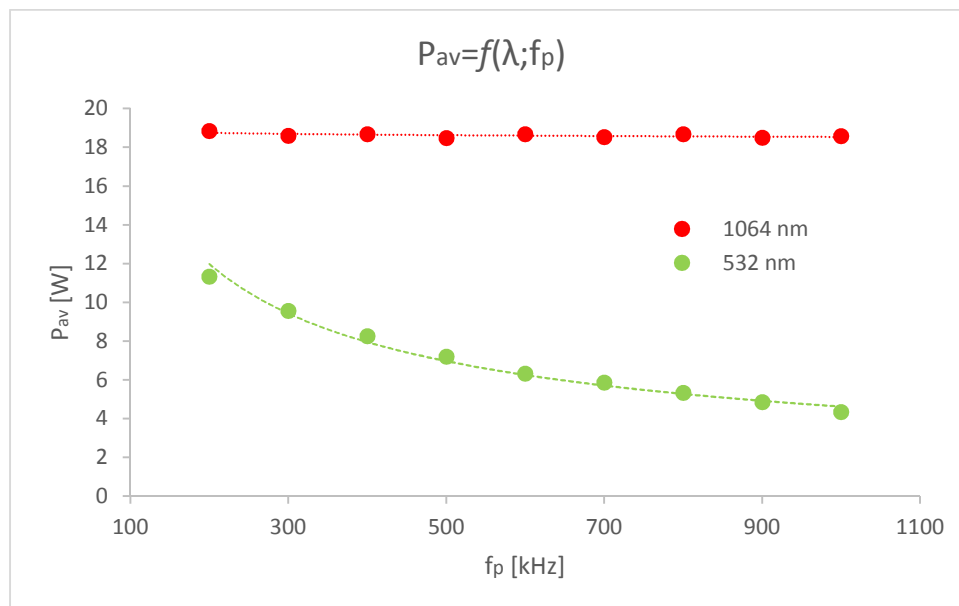
Obrázek 2-22 Metalografický výbrus testovaného slinutého karbidu K10 – zvětšeno 1000x [64]

2.3.1.2 Výkonová charakteristika použitého laserového zdroje

Veškeré experimenty v této části práce byly provedeny pomocí pevnolátkového pulsního laserového zdroje, jenž má diodami buzené aktivní prostředí Nd:YVO₄ (yttrium vanadát obohacený neodymem). Procesní parametry laserového zdroje jsou následující:

- $\lambda = 532\text{nm}$ ($P_{av} = 12\text{W}$)
- $\lambda = 1064\text{nm}$ ($P_{av} = 20\text{W}$)
- $\tau_p < 13\text{ps}$
- $f_p = 200\text{-}1000\text{kHz}$
- TEM₀₀
- $M^2 < 1,3$

Z procesních parametrů vyplývá možnost využití dvou vlnových délek ($\lambda = 1064\text{nm}$; resp. 532nm). Dle kapitoly 2.2.2.1 lze pro konkrétní experiment získat výkonovou charakteristiku laserového zdroje, která je důležitá pro stanovení okrajových podmínek. Výkonová charakteristika laserového zdroje byla získána pomocí powermetru. Její průběh je zanesen do grafu 2-8.



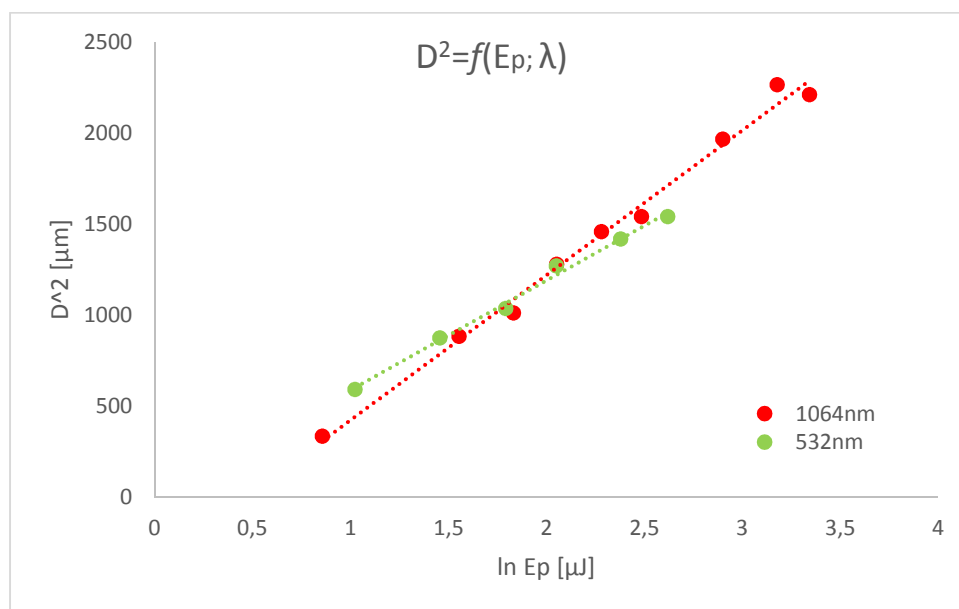
Graf 2-8 Výkonová charakteristika laserového zdroje pro studii ablačního procesu slinutého karbidu K10

2.3.2 Stanovení ablačního prahu F_{th} řezného materiálu

K vyšetření ablačního prahu F_{th} bylo využito rešeršních poznatků z kapitoly 2.1.4. Vypočtením ablačního prahu F_{th} je získána materiálová proměnná, která je ovlivněna mnoha faktory: počtem pulsů N , inkubačním ζ a absorpčním A koeficientem, ale především použitou vlnovou délkou laserového λ a délkou pulsu τ_p .

Ke stanovení ablačního prahu F_{th} bylo každé místo ovlivněno deseti laserovými pulsy ($N = 10$). Počet pulsů N byl určen na základě nejčastěji užívaných hodnot určujících strategii rozmítání, kde jsou rozsahy hodnot faktoru překrytí $70 < S_p < 90\%$. Správné rozsahy energií v pulsech E_p je nutné zvolit v závislosti na vlastnostech vyšetřovaného materiálu. Pokud materiál disponuje vysokou absorpcí, je vhodné, pro přesnější určení ablačního prahu F_{th} , použít rozsah nízkých hodnot energií v pulsu, např. $1 < E_p < 5\mu\text{J}$.

Vynesením hodnot do grafu 2-8 pro obě vlnové délky λ lze na základě sklonu obou přímk (proložených naměřenými body) usoudit, že ablační práh F_{th} pro $\lambda = 532\text{ nm}$ bude nižší, než je u základní vlnové délky $\lambda = 1064\text{ nm}$. Zjištěná rostoucí hodnota absorpčního koeficientu A při nižší vlnové délce λ se ztotožňuje se studií [26].



Graf 2-9 Vyšetření ablačního prahu F_{th} pro slinitý karbid na dvou různých vlnových délkách λ

Na základě grafu 2-8 byly dle vztahů 2-10 a 2-11 dopočítány parametry w_0 a F_{th} pro obě vlnové délky λ . Dopočtené parametry jsou vyneseny v tabulce 2-2.

Tabulka 2-2 Výsledné hodnoty parametrů F_{th} a w_0 pro obě vlnové délky λ

λ [nm]	F_{th} [J/cm ²]	w_0 [μm]
532	0,108	17,34
1064	0,127	19,94

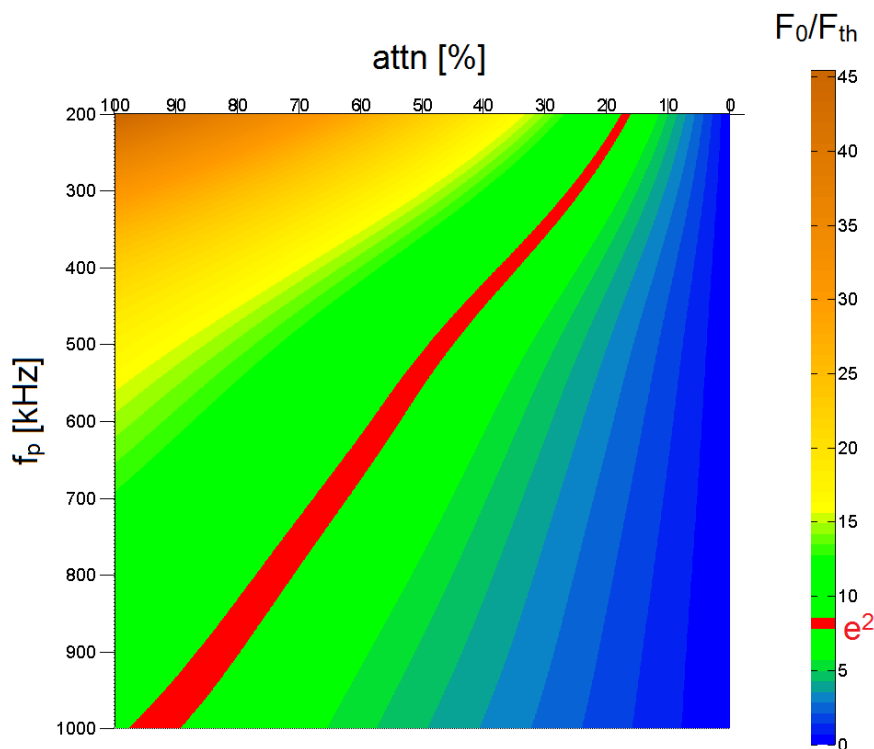
Ze zjištěných hodnot ablačních prahů F_{th} pro obě vlnové délky při $N = 10$, došlo při $\lambda = 532\text{ nm}$ o 15% navýšení efektivity ablace kvůli vyšším absorpčním schopnostem testovaného materiálu oproti jeho základní vlnové délce ($\lambda = 1064\text{ nm}$).

2.3.3 Stanovení okrajových podmínek laserového systému na základě mikroobráběného materiálu

Na základě známých kritérií - výkonové charakteristiky laserového zdroje $P_{av}=f(f_p;\lambda)$, výsledných materiálových parametrech ($F_{th}; w_0$) pro slinutý karbid K10, lze nadefinovat okrajové podmínky pro obě vlnové délky $\lambda = 1064\text{nm}$; resp. 532nm (IH; resp. IIIH).

2.3.3.1 IH

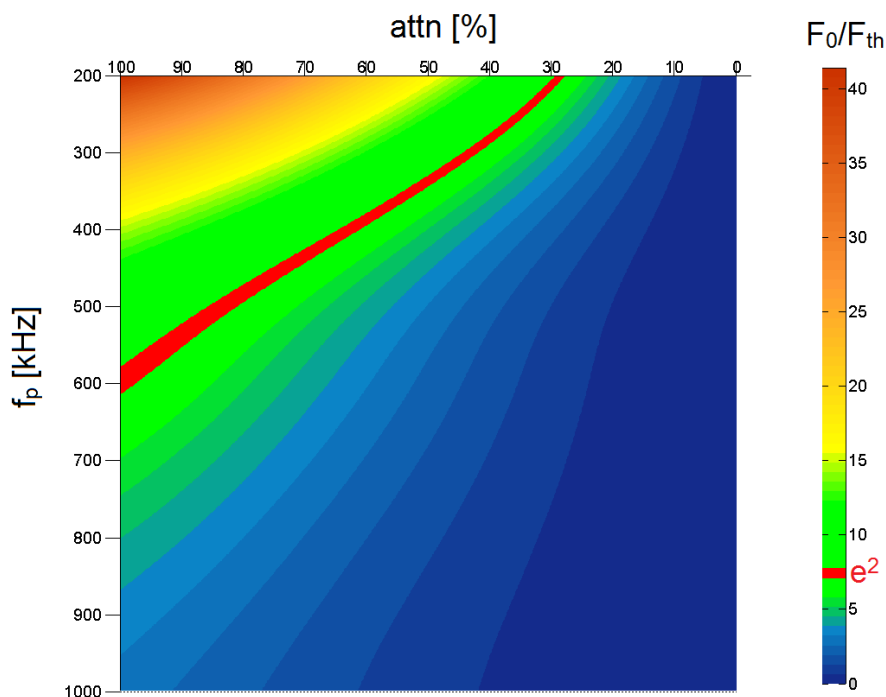
Graf 2-10 definuje využitelné rozmezí laserového zdroje pro poměrovou hodnotu parametrů $F_0/F_{th} = e^2$ (kde $F_{opt} = 0,941 \text{ J/cm}^2$) dle výkonové charakteristiky pro $\lambda = 1064 \text{ nm}$ (graf 2-8). V případě vyšetřovaného slinutého karbidu a použitého laserového zdroje se téměř jedná o ideální okrajové podmínky, protože pro konkrétní mikroobráběný materiál lze maximálního materiálového úběru vztaženého na průměrný výkon \dot{V}/P_{av} docílit při plném vytížení výkonové charakteristiky (maximální hodnoty parametrů P_{av} a f_p). Konkrétní hodnoty pro poměr $F_0/F_{th} = e^2$ jsou $Attn = 85 \%$ (odpovídá $P_{av} = 12,1 \text{ W}$) při $f_p = 1000 \text{ kHz}$.



Graf 2-10 Okrajové podmínky laserového systému pro parametry:
 $\lambda = 1064\text{nm}$; $\tau_p=12\text{ps}$; $f_p<200;1000\text{kHz}$; $F_{th} = 0,127\text{J/cm}^2$; $w_0 = 19,94\mu\text{m}$

2.3.3.2 IIIH

V případě definování okrajových podmínek dle výkonové charakteristiky pro vlnovou délku $\lambda = 532 \text{ nm}$, lze počítat s nižší poměrovou hodnotou $F_0/F_{th} = e^2$ ($F_{opt} = 0,798 \text{ J/cm}^2$) dle vztahu 2-19. Nicméně z klesajícího průměrného výkonu P_{av} při zvyšující se opakovací frekvence f_p dochází k rapidnímu poklesu energie v pulsu E_p až k nulovým hodnotám (dle grafu 2-4b). Z této příčiny mají okrajové podmínky zcela jiný průběh, než tomu bylo u předešlé vlnové délky $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Dle grafu 2-11, znázorňující okrajové podmínky pro IIIH, lze usoudit, že k maximálnímu materiálovému úběru vztaženému na průměrný výkon \dot{V}/P_{av} dojde již při $f_p = 600\text{kHz}$, kde parametr průměrného výkonu P_{av} ($Attn = 100\%$) dosahuje maximálních hodnot ($P_{av} = 4,66 \text{ W}$ při $f_p = 600 \text{ kHz}$).



Graf 2-11 Okrajové podmínky laserového systému pro parametry:
 $\lambda = 532 \text{ nm}$; $\tau_p = 12 \text{ ps}$; $f_p < 200; 1000 \text{ kHz}$; $F_{th} = 0,108 \text{ J/cm}^2$; $w_0 = 17,34 \text{ }\mu\text{m}$

Dodržením rozsahu poměru parametrů $5 < F_0/F_{th} < 15$ (zelené pásmo v grafech 2-10 a 2-11) lze zachovat efektivitu ablačního procesu při zachování velmi dobré kvality mikroobrobení. Aby byla prokázána nutnost nastavení procesních parametrů pro vhodnou materiálovou ablací, byly navrženy dva případy experimentálního vyšetření ablačních procesů, z nichž je u prvního případu poměr F_0/F_{th} vyšetřován v jeho plném rozsahu a u toho druhého je poměr konstantní $F_0/F_{th} = e^2$.

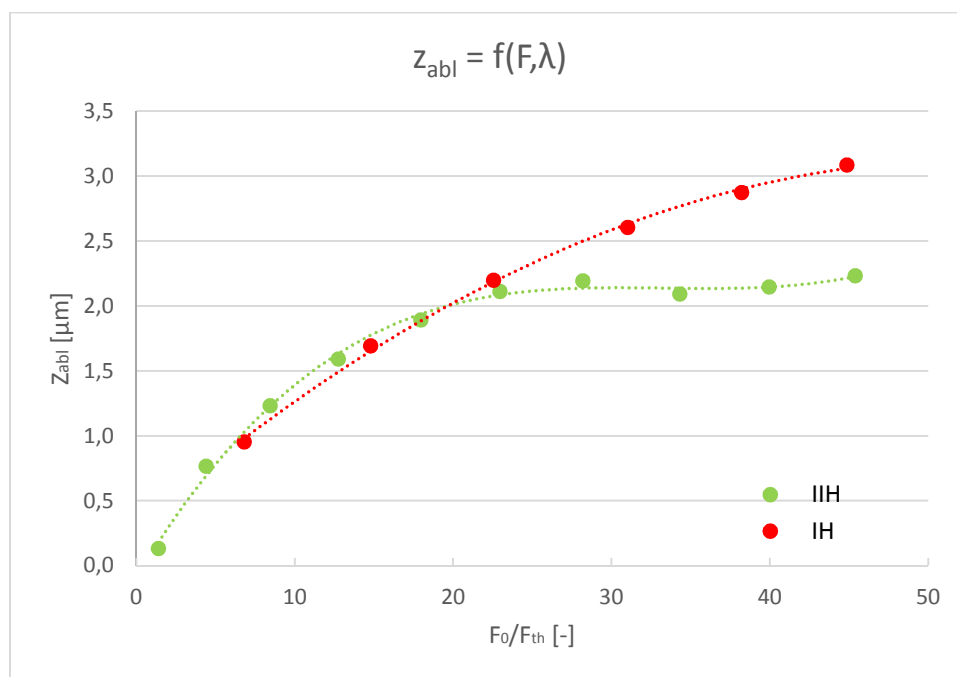
2.3.4 Vyšetření ablačních procesů při zvyšování poměru F_0/F_{th}

Pokud je ablační proces realizován v celé škále F_0/F_{th} , tak dle rešeršních zdrojů nejenže není zcela efektivní, ale během procesu dochází k neúměrnému tepelnému zatížení vyšetřovaného materiálu, neboli HAZ. V případě zvyšování hodnoty F_0/F_{th} (kde $0 < F_0/F_{th} < 45$ při konstantní opakovací frekvenci $f_p = 200 \text{ kHz}$) dochází k postupnému zvyšování hloubky ablace z_{abl} na jednu mikroobrobenou vrstvu (graf 2-12), která odpovídá rozsahu $0,3 < z_{abl} < 3,1 \text{ }\mu\text{m}$ v závislosti na použité vlnové délce λ . Níže uvedená experimentální data byla získána při těchto konstantních parametrech:

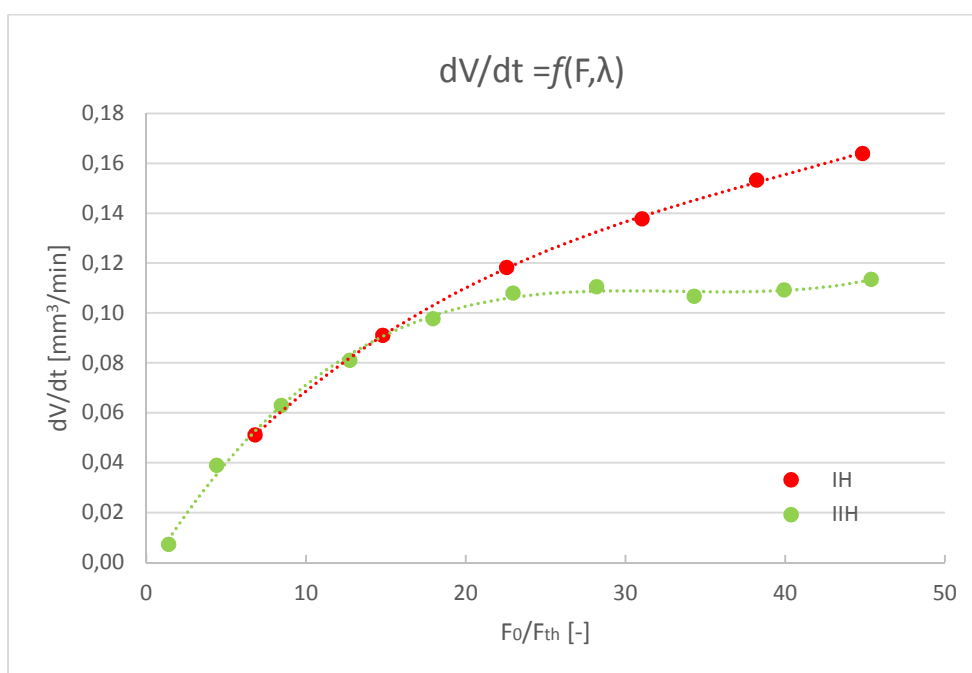
- $f_p = 200 \text{ kHz}$
- $S_p = 90 \text{ %}$
- $H = 190 \text{ %}$

V případě vlnové délky $\lambda = 532 \text{ nm}$ docházelo k nepatrně větší hloubce ablace z_{abl} při $F_0/F_{th} < 15$, čímž se zde projevovала vyšší absorbitivita materiálu A_{abs} . Zato při $F_0/F_{th} > 15$ dochází u ablačního procesu k poklesu hloubky ablace z_{abl} oproti chování na vlnové délce $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Tento jev nastává z důvodů několika faktorů. Marginální roli pro vlnovou délku $\lambda = 532 \text{ nm}$ zde hraje velikost radiusu w_0 laserového paprsku při intenzitě $1/e^2$, která je menší, než je tomu u základní vlnové délky $\lambda = 1064 \text{ nm}$ (tzn., že je zde vyšší hustota energie F_0). Výrazný je zde přechod z pomalého ablačního režimu do rychlého (v oblasti $15 < F_0/F_{th} < 20$),

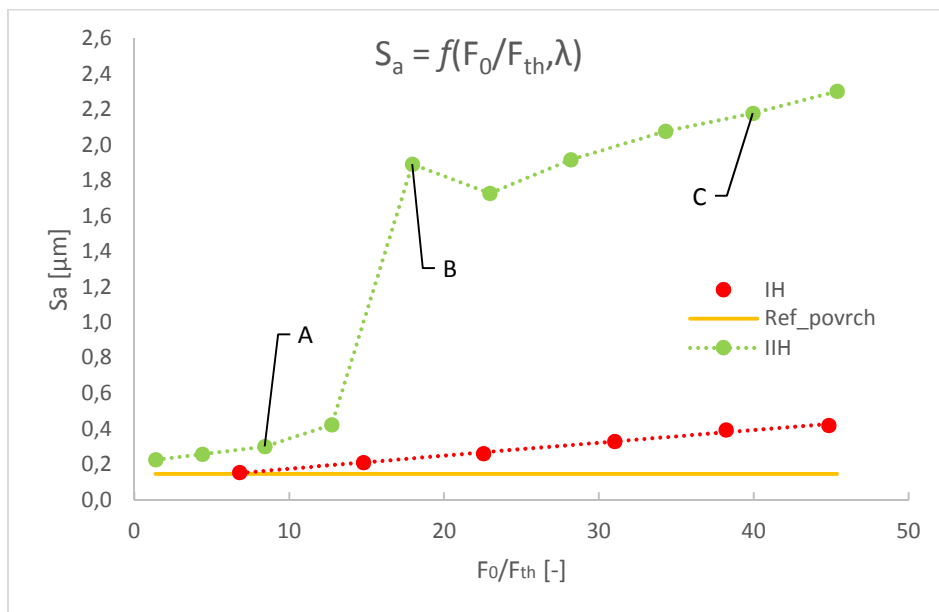
kde již nastávají tepelné jevy. V případě objemu ablace za jednotku času \dot{V} (graf 2-13), neboli dV/dt , lze vyvodit téměř shodnou závislost. Nejvíce se projevuje vliv tepelného ovlivnění pro $\lambda = 532 \text{ nm}$ při vyhodnocení drsnosti povrchu (graf 2-14), kde při $F_0/F_{th} > 18$ nastala skoková změna kvality dosaženého povrchu. Celý rozsah naměřených hodnot plošné drsnosti je $0,25 < S_a < 2,2 \mu\text{m}$. Parametry plošné drsnosti byly vyhodnocovány o konstantní ploše $0,8 \times 0,8 \text{ mm}$. Tabulka 2-3 již zachycuje stav povrchu všech oblastí získaných během pomalého ablačního režimu, rychlého ablačního režimu a jejich přechodové oblasti. Tyto oblasti jsou zdokumentovány ve dvou variantách zvětšení ($1000\times$ pro ucelený pohled; $10000\times$ pro mikro pohled).



Graf 2-12 Hloubka ablace z_{abl} v závislosti na F_0/F_{th} a zvolené vlnové délce λ

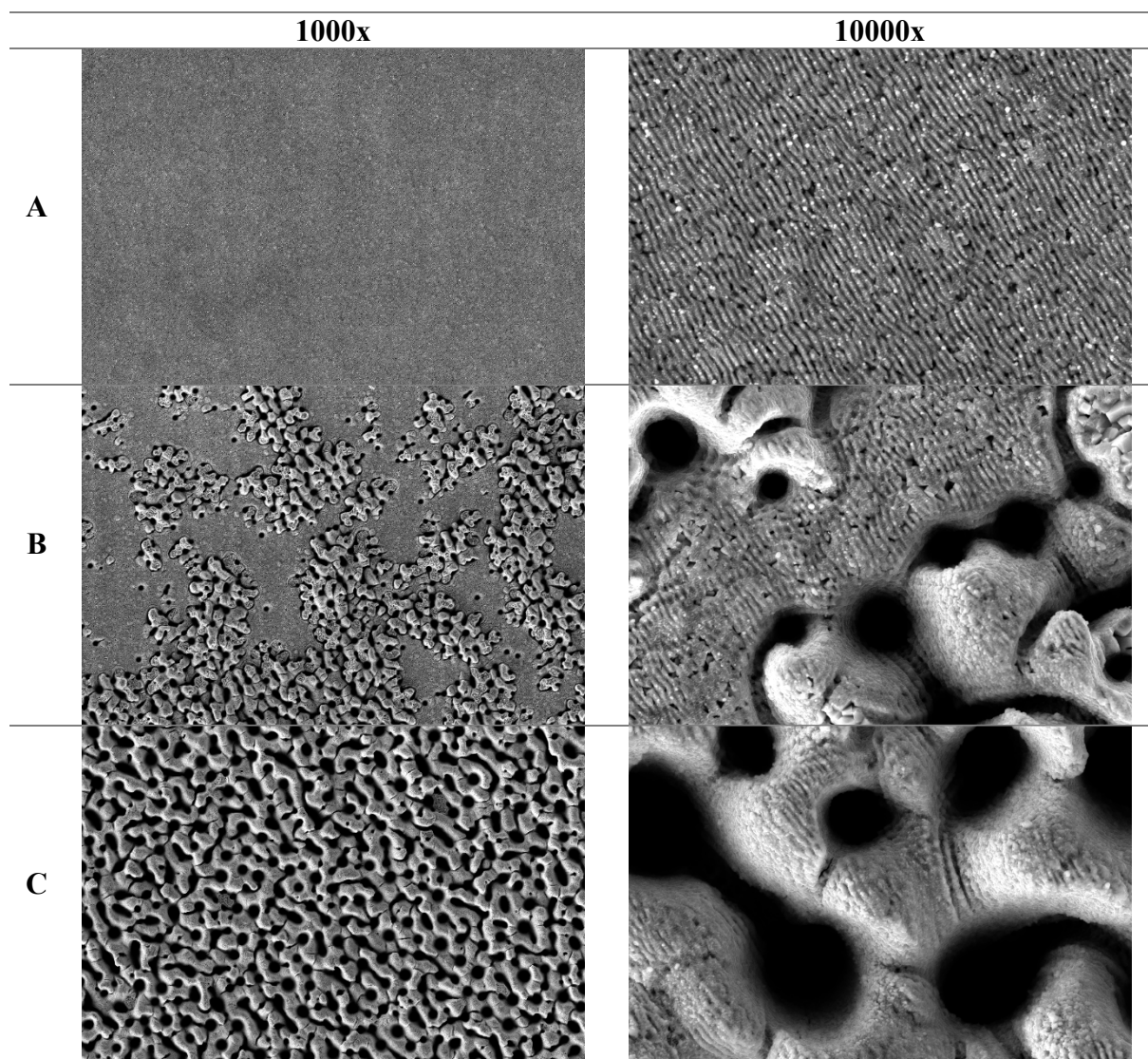


Graf 2-13 Objem ablace za jednotku času dV/dt v závislosti na F_0/F_{th} a zvolené vlnové délce λ

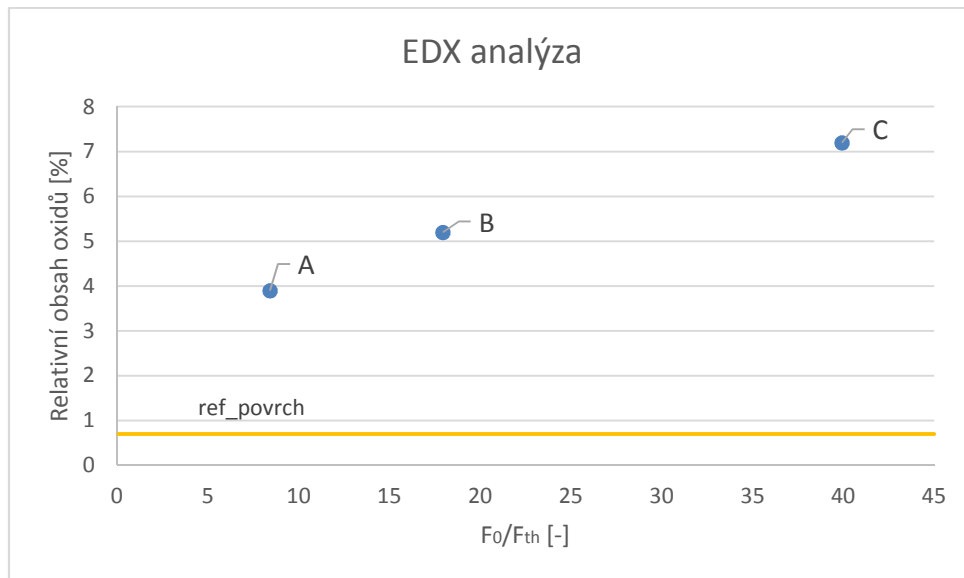


Graf 2-14 Vliv F_o/F_{th} a délky pulsu λ na kvalitu mikroobrobeného povrchu

Tabulka 2-3 SEM detaily vyšetřovaných oblastí A, B a C dle grafu 2-14



Změna ablačního režimu se projevila především ve kvalitě mikroobrobeného povrchu z pohledově hladkého povrchu A na povrch hrboletý C. V tomto případě demonstrovaném v tabulce 2-3, došlo vlivem tepelného zatížení testovaného materiálu k relativnímu nárůstu oxidické fáze, která při nižších poměrových hodnotách F_0/F_{th} vytváří oxidy Co a při vyšších hodnotách oxidy WC [64;80]. Zvyšující se relativní podíl oxidů v povrchové struktuře testovaného materiálu byl získán pomocí EDX analýzy, jejíž výsledky jsou zachyceny v grafu 2-15.



Graf 2-15 Relativní obsah oxidů v závislosti na poměru F_0/F_{th}

Bauer et al. [29] popsali mechanismus formování takto hrboletého povrchu při mikroobrábění nerezové oceli numerickým modelem, jenž je definován velikostí saturační teploty T_{sat} , která je závislá na rychlosti rozmitání laserového paprsku v_f , resp. vysokých hodnotách opakovací frekvence f_p při určité hustotě použité energie F_0 . Při překročení saturační teploty T_{sat} dochází k tepelným akumulacím na povrchu mikroobrábeného materiálu. Tato problematika je řešena v mnoha vědeckých zdrojích [25; 81; 94]. Z pohledu funkčnosti je vysoký podíl oxidů nežádoucí, a to zejména kvůli zvýšené křehkosti těchto oxidických fází.

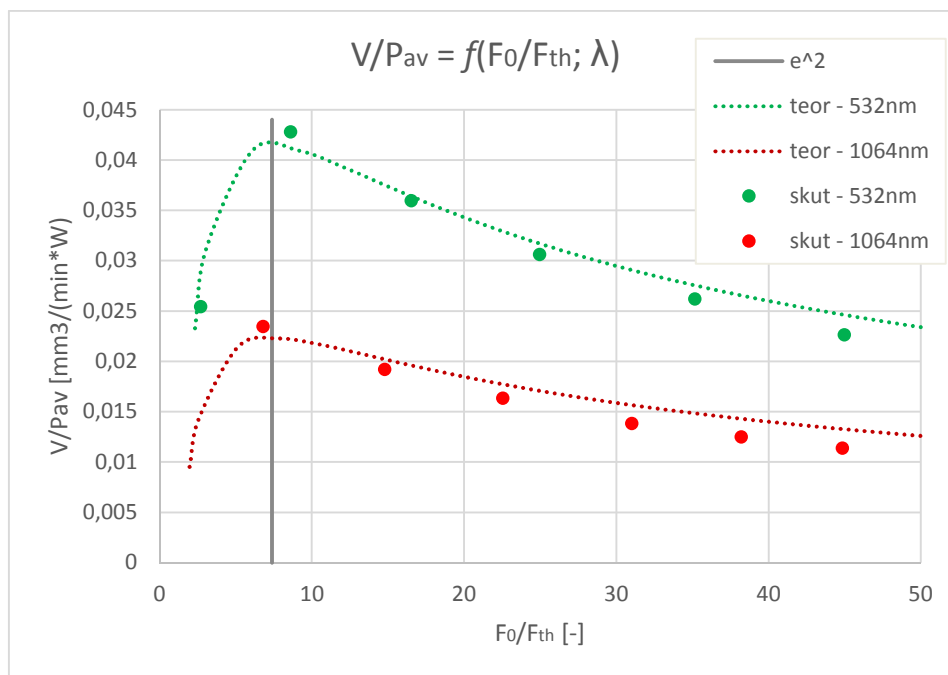
2.3.4.1 Shrnutí ablačních procesů při zvyšování poměru F_0/F_{th}

Shrnou-li se získaná experimentální data z celé škály poměrových hodnot F_0/F_{th} , lze vyšetřit dle vztahu 2-17 objem ablace za jednotku času \dot{V} , jenž je vyjádřený v poměru vůči průměrnému výkonu P_{av} jako funkce poměrových hodnot F_0/F_{th} , popř. špičkové hustoty energie F_0 . Křivky v grafu 2-16, vykazující extrém, vyjadřují optimální hustotu energie F_{opt} (vztah 2-19) pro maximální rychlosti ablace $(\dot{V}/P_{av})_{max}$ (vztah 2-18). Pro testovaný slinutý karbid K10 bylo při poměru $F_0/F_{th} = e^2$ dosaženo těchto parametrů.

Tabulka 2-4 Přehled procesních parametrů pro slinutý karbid K10

λ [nm]	F_{th} [J/cm ²]	w_0 [μm]	F_{opt} [J/cm ²]	S_a^1 [nm]	$(\dot{V}/P_{av})_{max}$ [mm ³ /(min·W)]
532	0,108	17,34	0,798	260	0,042
1064	0,127	19,94	0,941	165	0,023

¹ plošná drsnost referenčního povrchu $S_a = 140\text{nm}$



Graf 2-16 Materiálový úběr průměrným výkonem \dot{V}/P_{av} jako funkce poměru F_0/F_{th} pro obě vlnové délky λ

Z grafu 2-16 je patrné, že při poměru $F_0/F_{th} = e^2$ lze při $\lambda = 532$ nm docílit vyšší efektivity ablačního procesu, než je tomu u vlnové délky $\lambda = 1064$ nm. Při navyšování poměru $F_0/F_{th} > 15$ lze u obou vyšetřovaných vlnových délek pozorovat pokles skutečných hodnot materiálového úběru průměrným výkonem (\dot{V}/P_{av}) vůči teoretickému průběhu. Tato odchylka je způsobena HAZ mikroobráběných povrchů, kde již dochází k mechanismu formování hrubého povrchu (viz obrázky v tabulce 2-3b,c).

Dle přímého srovnání obou vlnových délek lze potvrdit lepší ablační účinnost u IIIH ($\lambda = 532$ nm). Pokud by byla porovnána účinnost ablačního procesu v celém spektru získaných okrajových podmínek laserového zdroje obou vlnových délek a vyšetřovaného slinutého karbidu K10 dle grafů 2-10 a 2-11, tak lze očekávat jiné účinnosti ablačních procesů, protože poměr $F_0/F_{th} = e^2$ pro IIIH končí při opakovací frekvenci $f_p = 600$ kHz, kdežto u IH lze poměr $F_0/F_{th} = e^2$, dle grafu 2-10, využít až do $f_p = 1000$ kHz.

Vyšetření účinnosti materiálové ablace při konstantním poměru $F_0/F_{th} = e^2$ pro obě vlnové délky je věnována následující podkapitola, ve které jsou dle okrajových podmínek obou charakteristik laserových zdrojů stanoveny procesní parametry pro slinutý karbid K10 a pomocí pokročilé matice realizovány experimenty včetně jejich vyhodnocení.

2.3.5 Vyšetření ablačních procesů při konstantním poměru $F_0/F_{th} = e^2$

Pokud je vyšetřování ablačních procesů daného materiálu prováděno při poměru $F_0/F_{th} = e^2$, lze zvětšit objem ablace za jednotku času \dot{V} (dV/dt) zvyšováním opakovací frekvence f_p se současným zvyšováním rychlosti rozmítání laserového paprsku v_f , dle vztahu 2-21 (za předpokladu dodržení konstantní hodnoty faktoru překrytí pulsů - S_p).

Aby byl dodržen poměr $F_0/F_{th} = e^2$ za pomoci konkrétního laserového zdroje a vybraného testovaného materiálu, je nutné postupovat podle autorem navržené metodiky, jež definuje okrajové podmínky, dle kterých jsou nastaveny konkrétní procesní parametry při zachování poměru $F_0/F_{th} = e^2$ (kap. 2.2.2.1). Pro vyšetřovaný slinutý karbid K10 jsou již podmínky procesních parametrů definovány v kap. 2.4.3. Na základě těchto dat byly vybrány procesní parametry napříč celým spektrem výkonové charakteristiky laserového zdroje - grafy 2-10 (IH) a 2-11 (IIH), podle kterých je slinutý karbid K10 experimentálně testován.

Hlavním smyslem vyšetření ablačních procesů při poměru $F_0/F_{th} = e^2$ je:

- ověření navržené metodiky charakterizované v kap. 2.2.2.1, za použití pokročilého způsobu experimentálního způsobu testování materiálové ablace (kap. 2.3.2.2)
- získání informace o reálném vlivu zvyšování rychlosti rozmítání laserového paprsku v_f na zvýšení objemu ablace za jednotku času \dot{V} (dV/dt).

2.3.5.1 Nastavení a realizace ablačních procesů při poměru $F_0/F_{th} = e^2$

Nastavení procesních parametrů dle definovaných okrajových podmínek

V případě znalosti okrajových podmínek laserového zdroje (graf 2-10 a 2-11) a optimální hustoty energie F_{opt} (tabulka 2-4), prezentující poměr $F_0/F_{th} = e^2$, lze korektně nastavit procesní parametry laserového zdroje. Dle průběhu grafu 2-10 pro IH a zvoleném kroku opakovací frekvence $f_p = 200\text{kHz}$ byly získány procesní parametry pro 5 testovacích polí. Na základě zvoleného kroku parametru opakovací frekvence f_p byly dle procentuálních hodnot atenuátoru přiřazeny průměrné výkony P_{av} . Finální hodnoty procesních parametrů pro jednotlivá pole (1 - 5) jsou shrnuty v tabulce 2-5.

Tabulka 2-5 Hodnoty prezentující poměr $F_0/F_{th} = e^2$ při IH; $w_0=20\mu\text{m}$

Č. pole	f_p [kHz]	P_{av} [W]
1.	200	2,37
2.	400	4,73
3.	600	7,10
4.	800	9,47
5.	1000	11,83

Analogicky byly získány hodnoty pro IIH dle grafu 2-11. Z vyšetřených okrajových podmínek v grafu 2-11 a zvoleném kroku opakovací frekvence $f_p = 200\text{kHz}$ se získaly procesní parametry pro 3 testovací pole (6 - 8). Finální hodnoty procesních parametrů pro IIH jsou shrnuty v tabulce 2-6.

Tabulka 2-6 Hodnoty prezentující poměr $F_0/F_{th} = e^2$ při IIH; $w_0=17,5\mu\text{m}$

Hodnota	f_p [kHz]	P_{av} [W]
6.	200	1,53
7.	400	3,07
8.	600	4,60

Nastavení strategie rozmítání laserového paprsku

Pro účely testování ablačního procesu při poměru $F_0/F_{th} = e^2$ byla strategie rozmítání laserového paprsku navržena v určitých ohledech odlišně, než tomu bylo u vyšetření ablačních procesů při zvyšování poměru F_0/F_{th} (kap. 2.4.4). Konkrétně se jednalo o velikost jednotlivých testovacích polí, kde byla použita 5x větší oblast pro vyšetření ablačních procesů. Větší oblast testovacích polí byla zvolena kvůli zvyšující se rozmítací rychlosti laserového paprsku v_f a jejího předpokládaného majoritního vlivu na nárůst objemu ablace za jednotku času dV/dt .

Další změnou bylo použití většího počtu vrstev (opět 5x větší hodnota, než u předešlého experimentu). Takový nárůst počtu vrstev pro mikroobrábění testovacího pole má citelný dopad na výsledné hodnoty hloubky ablace z_{abl} , kterými lze ověřit či vyvrátit správnost nalezených procesních parametrů dle autorem navržené metodiky (kap. 2.2.2.1). Dalším důsledkem zvětšeného počtu vrstev je časový nárůst mikroobrábění každého pole, ve kterém lze poté přesněji určit hodnoty objemu ablace za jednotku času dV/dt .

Laserový paprsek byl rozmítán pomocí liniového šrafování. Nastavení faktoru překrytí pulsů S_p a faktoru rozteče šrafování H bylo zvoleno ve dvou skupinách z důvodu vyšetření většího rozsahu rozmítací rychlosti laserového paprsku v_f .

1. skupina

- $S_p = 90\%$
- $H = 190\%$

2. skupina

- $S_p = 80\%$
- $H = 180\%$

Dle určených procesních parametrů (tabulka 2-5 a 2-6) a získaných hodnot w_0 (tabulka 2-2) pro obě vlnové délky, lze určit velikost rozmítací rychlosti v_f pro každé testovací pole dle vztahu 2-21.

Tabulka 2-7 Rozmítací rychlosti laserového paprsku v_f při definovaných faktorech S_p/H pro IH ($w_0 = 20\mu\text{m}$)

Č. pole	v_f [mm/s] při S_p/H [%]	
	90 % / 190 %	80 % / 180 %
1.	800	1600
2.	1600	3200
3.	2400	4800
4.	3200	6400
5.	4000	8000

Tabulka 2-8 Rozmítací rychlosti laserového paprsku v_f při definovaných faktorech S_p/H pro IIIH ($w_0 = 17,5\mu\text{m}$)

Č. pole	v_f [mm/s] při S_p/H [%]	
	90 % / 190 %	80 % / 180 %
6.	700	1400
7.	1400	2800
8.	2100	4200

Plnění získaných parametrů do pokročilé testovací matice

Po stanovení procesních parametrů a určení rozmítací strategie laserového paprsku lze pro testování použít pokročilou testovací matici, která je součástí autorova návrhu experimentálního testování (kap. 2.3.2.2). Pro vyšetření takto náročné materiálové ablace, je tento způsob testování podle pokročilé testovací matice časově úsporný. Pro tento případ experimentu je hlavní tělo programu pro pokročilé testování (obrázek 2-19) upraveno. Použité cykly, sloužící k variaci proměnných, jsou sloučeny tak, aby jednotlivé libovolné parametry (kombinačně P_{av} s f_p , S_p s H) nebyly nastaveny vůči sobě, ale zároveň spolu. Tato úprava cyklů v programu je pro případ dodržení poměru $F_0/F_{th} = e^2$ a testování konkrétní rozmítací strategie bezpodmínečná.

Ve výsledku lze experimentální vyšetření ablačních procesů, za pomoci pokročilé testovací matice a uvedených parametrů schematicky znázornit obrázkem 2-23 (pro IH) a 2-24 (IIH).

S_p/H [%]	80 / 180	2,37 / 200	4,73 / 400	7,10 / 600	9,47 / 800	11,83 / 1000
	90 / 190	2,37 / 200	4,73 / 400	7,10 / 600	9,47 / 800	11,83 / 1000
P_{av}/f_p [W/kHz]		1	2	3	4	5
		Č. pole				

Obrázek 2-23 Schématické znázornění pokročilé testovací matice 5x2 včetně procesních parametrů pro zachování konstantního poměru $F_0/F_{th} = e^2$ u slinutého karbidu K10 při: $\lambda = 1064\text{nm}$; $w_0 = 20\mu\text{m}$

S_p/H [%]	80 / 180	1,53 / 200	3,07 / 400	4,60 / 600
	90 / 190	1,53 / 200	3,07 / 400	4,60 / 600
P_{av}/f_p [W/kHz]		6	7	8
		Č. pole		

Obrázek 2-24 Schématické znázornění pokročilé testovací matice 3x2 včetně procesních parametrů pro zachování konstantního poměru $F_0/F_{th} = e^2$ u slinutého karbidu K10 při: $\lambda = 532\text{nm}$; $w_0 = 17,5\mu\text{m}$

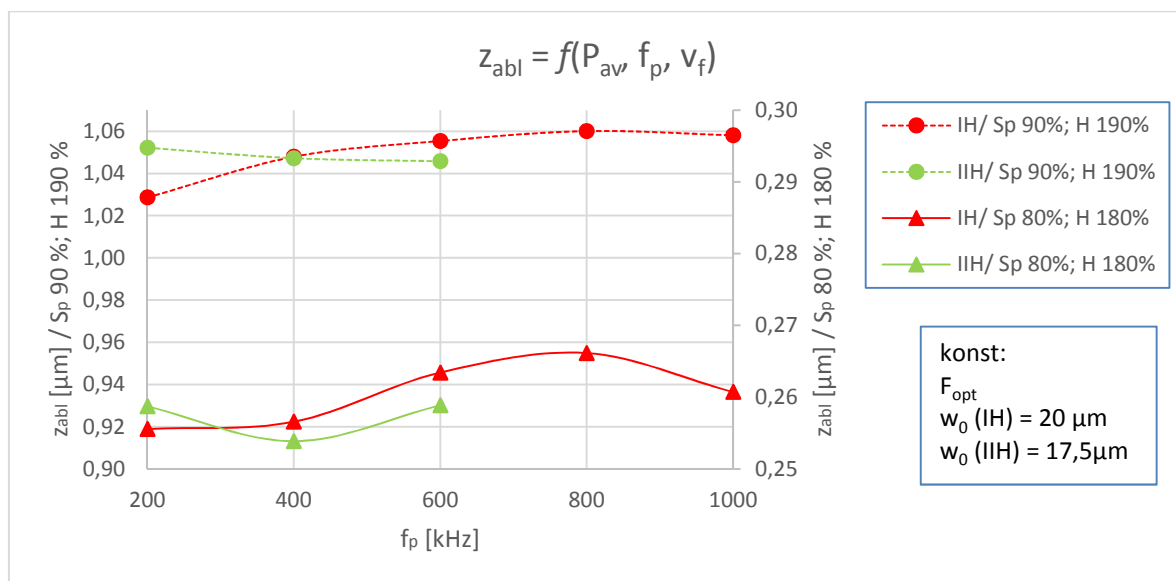
2.3.5.2 Výsledky a shrnutí experimentu ablačních procesů při konstantním poměru $F_0/F_{th} = e^2$

Po experimentálním testování byla jednotlivá pole vyhodnocena bezkontaktním měřicím zařízením Alicona IFM SL, na kterém po změření celkové dosažené hloubky h , mikroobrobeného objemu V , plošné drsnosti S_a a výsledného času mikroobrobení každého pole byly získány následující závislosti.

Změna hloubky ablace z_{abl} a drsnosti povrchu S_a při poměru $F_0/F_{th} = e^2$

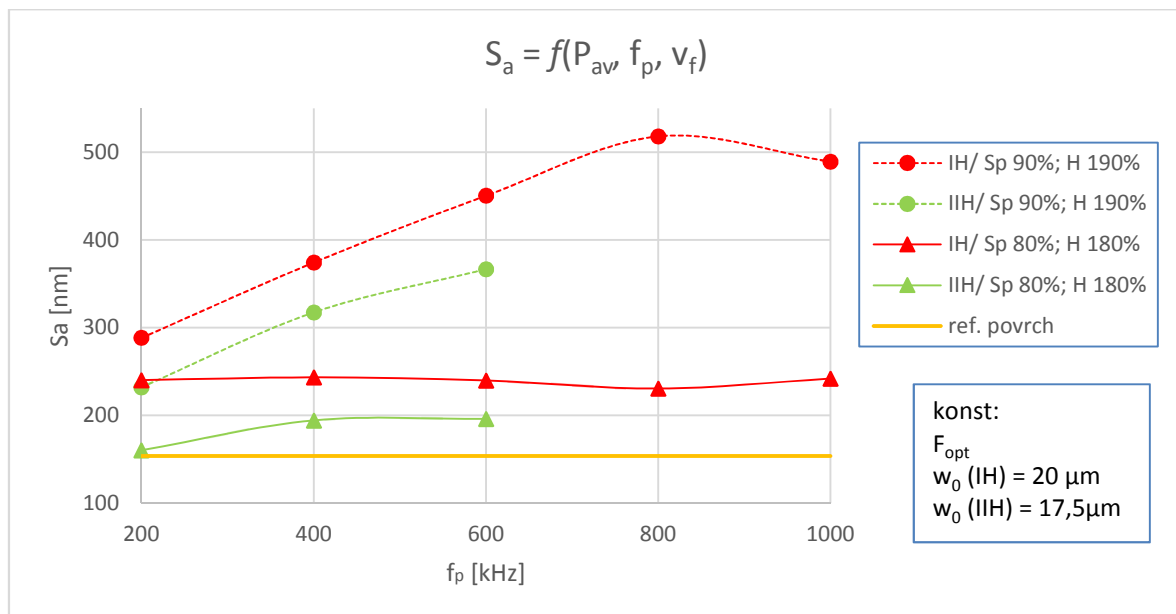
Vyšetřením změny hloubky ablace z_{abl} došlo k ověření správnosti zvolených procesních parametrů při $F_0/F_{th} = e^2$. Nastavení konstantních hustot energií F_0 u jednotlivých testovacích polí má za důsledek dosažení konstantních hodnot z_{abl} . Graf 2-17 shrnuje výsledky vlivů procesních parametrů při $F_0/F_{th} = e^2$ u všech testovaných polí (1. – 8.) a obou testovaných skupin rozmítacích strategií ($S_p/H = 90\% / 190\%$, resp. $80\% / 180\%$).

Při zvolené rozmítací strategii $S_p/H = 90\% / 190\%$, je u obou testovaných vlnových délek patrná minimální odchylka v hodnotách parametru z_{abl} , která na rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hloubkou nabývá hodnoty $\Delta z_{abl} = 0,031 \mu\text{m}$. U rozmítací strategie $S_p/H = 80\% / 180\%$, činí rozdíl Δz_{abl} , pro obě vlnové délky, pouhých $0,012 \mu\text{m}$! Na základě velmi nízkých hodnot Δz_{abl} lze tvrdit, že vyšetřené procesní parametry při $F_0/F_{th} = e^2$ za pomoci definovaných okrajových podmínek laserového systému odpovídají dosaženým hodnotám parametru z_{abl} .



Graf 2-17 Vliv procesních parametrů při $F_0/F_{th} = e^2$ na výslednou hloubku ablace z_{abl}

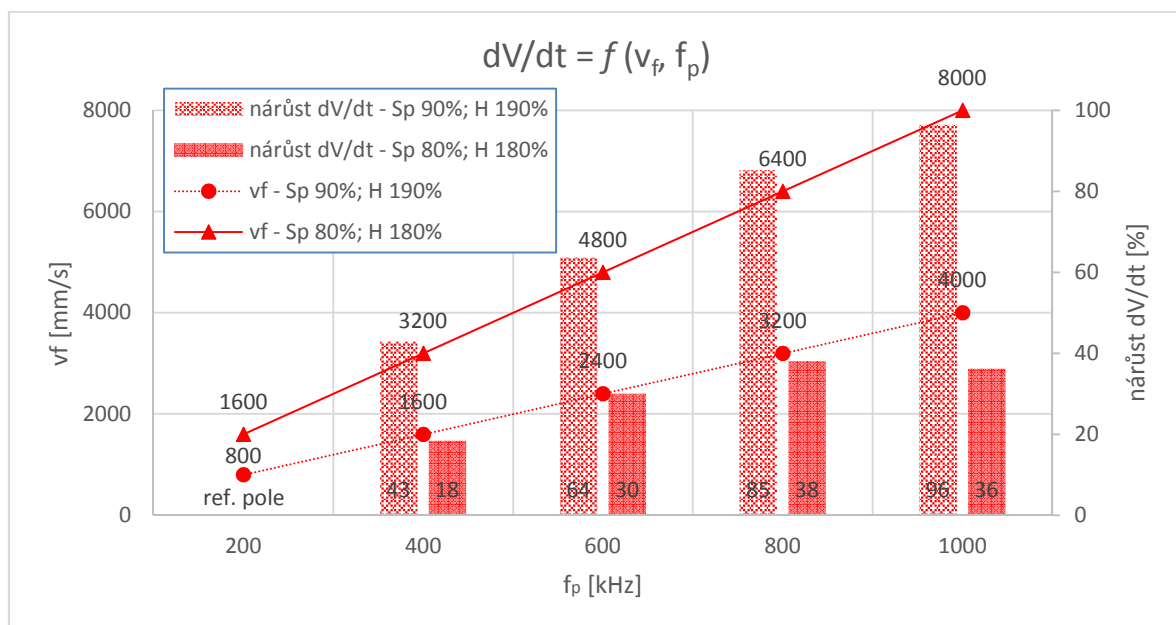
V případě vyhodnocení plošné drsnosti, zejména parametru S_a , byly vyšetřeny zcela odlišné průběhy hodnot, které prezentuje graf 2-18. Z jednotlivých průběhů křivek v grafu 2-18 lze usoudit, že při zvyšování opakovací frekvence f_p při rozmítací strategii $S_p/H = 90\% / 190\%$ se postupně zhoršuje kvalita povrchu na dnech testovaných polí. Zhoršující se kvalita povrchu je viditelná u obou použitých vlnových délek ($S_{a-IH} = 518\text{nm}$; $S_{a-IIH} = 366\text{nm}$). U rozmítací strategie $S_p/H = 80\% / 180\%$ není tento trend patrný a hodnoty parametru S_a jsou v celém testovaném spektru téměř konstantní ($S_{a-IH} = 240\text{nm}$; $S_{a-IIH} = 195\text{nm}$). Hodnota plošné drsnosti u referenčního povrchu slinutého karbidu byla $S_a = 153\text{nm}$.



Graf 2-18 Vliv procesních parametrů při $F_0/F_{th} = e^2$ na výslednou plošnou drsnost povrchu S_a

Nárůst objemu ablace za jednotku času dV/dt při zvyšování rozmítací rychlosti laserového paprsku v_f

Další vyšetřovanou závislostí ablačního procesu při poměru $F_0/F_{th} = e^2$ bylo získání skutečného objemu ablace za jednotku času dV/dt při lineárně se zvyšující rychlosti rozmítání laserového paprsku v_f . Získané závislosti, které jsou funkcí parametrů v_f a f_p , jsou prezentovány v grafech 2-19 (pro IH) a 2-20 (pro IIH). V případě testování při IH a možnosti využití maximální opakovací frekvence $f_p = 1000\text{kHz}$, byl rozsah rozmítacích rychlostí mezi $800 < v_f < 4000$ mm/s při $S_p/H = 90\% / 190\%$, resp. $1600 < v_f < 8000$ mm/s při $S_p/H = 80\% / 180\%$. Hodnoty rozmítacích rychlostí v_f jsou v kombinovaném grafu 2-19 znázorněny spojnicovým typem včetně příslušných značek dle legendy. Skutečný nárůst objemu ablace za jednotku času dV/dt je prezentován sloupcovým typem grafu, na kterém je tento nárůst vyjádřen procentuálně vůči referenčnímu testovacímu poli při $f_p = 200$ kHz.



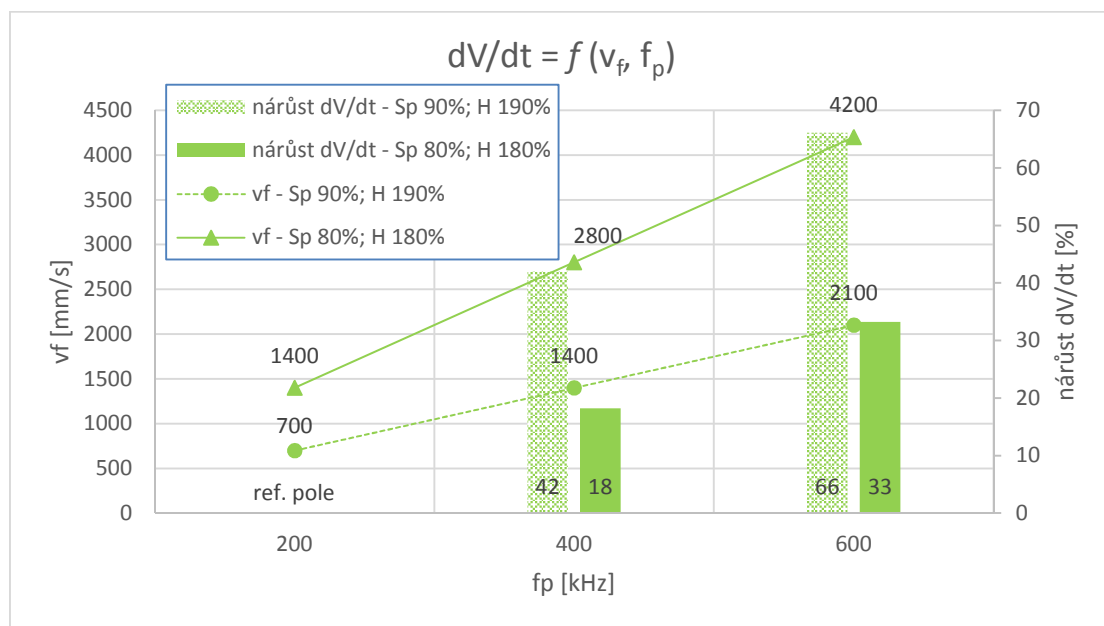
Graf 2-19 Skutečný nárůst parametru dV/dt v závislosti na rozmítací rychlosti v_f pro IH

Z číselných hodnot zobrazených u základů jednotlivých sloupců je zřejmé, že došlo pouze ke dvojnásobnému zefektivnění materiálové ablace za jednotku času dV/dt při pětinašobně vyšší rozmítací rychlosti v_f (u nastavení rozmítací strategie při $S_p/H = 90\% / 190\%$). Při použití nižších hodnot parametrů $S_p/H = 80\% / 180\%$ došlo pouze k 38% nárůstu parametru dV/dt , jehož maximum bylo zjištěno u 4. testovacího pole při $f_p = 800$ kHz, kde $v_f = 6400$ mm/s. V tomto případě je navyšování skenovacích rychlostí v_f , především kvůli velikosti testované geometrické entity, zcela neefektivní a reálně použitelné maximum rozmítacích rychlostí použitého galvo skeneru leží v rozmezí $4000 < v_{f-MAX} < 5000$ mm/s. Konkrétní materiálové úběry 1. a 5. testovaného pole obou zvolených strategií rozmítání laserového paprsku shrnuje tabulka 2-9.

Tabulka 2-9 Shrnutí dosažených úběrů dV/dt na referenčním a nejrychleji testovaném poli pro IH

Č. pole	dV/dt [mm ³ /min] při S_p/H [%]	
	90 % / 190 %	80 % / 180 %
1. (ref. pole)	0,110	0,068
5.	0,216	0,092

Skutečný nárůst objemu ablace za jednotku času dV/dt byl analogicky vyšetřen i pro IIIH (graf 2-20), kde byla na testovacích polích 6. - 8. zjištěna shodná závislost vůči IH. Kvůli omezujícím okrajovým podmínkám (max. $f_p = 600$ kHz) byly použity rozmítací rychlosti mezi $700 < v_f < 2100$ mm/s při $S_p/H = 90\% / 190\%$, resp. $1400 < v_f < 4200$ mm/s při $S_p/H = 80\% / 180\%$.



Graf 2-20 Skutečný nárůst parametru dV/dt v závislosti na rozmítací rychlosti v_f pro IIIH

Ze zobrazených sloupců v grafu 2-20 je zřejmé, že došlo pouze k 66% nárůstu materiálové ablace za jednotku času dV/dt při trojnásobně vyšší rozmítací rychlosti v_f (při $S_p/H = 90\% / 190\%$). Konkrétní materiálové úběry 6. a 8. testovaného pole obou zvolených strategií rozmítání laserového paprsku shrnuje tabulka 2-10.

Tabulka 2-10 Shrnutí dosažených úběrů dV/dt na referenčním a nejrychleji testovaném poli pro IH

Č. pole	dV/dt [mm ³ /min] při S_p/H [%]	
	90 % / 190 %	80 % / 180 %
6. (ref. pole)	0,092	0,059
8.	0,153	0,078

3 Metodický návrh zaměření břitů monolitních řezných nástrojů pro účely laserového mikroobrábění

Celý metodický návrh analýzy monolitních řezných nástrojů vychází ze získaných zkušeností autora práce a je jeho původním řešením.

Laserovým mikroobráběním lze docílit velmi striktních požadavků na funkčnost daného řezného nástroje za předpokladu korektně zvolených procesních parametrů v závislosti na mikroobráběném materiálu a použitém laserovém systému. K maximálnímu vyžití potenciálu této nekonvenční technologie je nutné docílit čtyř hlavních aspektů. Zejména se zde jedná o kvalitu mikroobrobeného povrchu, zajištění tvarové přesnosti, přesnosti polohy a zabezpečení opakovatelnosti – viz obrázek 3-1.



Obrázek 3-1 Hlavní předpoklady laserového mikroobrábění řezných nástrojů

První dva zmíněné faktory (kvalita mikroobrobeného povrchu, tvarová přesnost) lze vyšetřit pomocí metodických přístupů charakterizovaných v kapitole 2, kde na základě určených procesních parametrů lze docílit vysoké kvality opracování povrchu při přesně definované hloubce ablace z_{abl} , s čímž je úzce spojena opakovatelnost laserového mikroobrábění.

Aby byla zajištěna funkčnost řezného nástroje upraveného touto technologií, je nutné zabezpečit přesné polohování laserového paprsku vůči řeznému nástroji a opakovatelnost vytvářených geometrických entit, protože polohování mikroobráběných geometrických entit patří ke stěžejní části procesu mikroobrábění z důvodů velmi malých rozměrů (řády setin milimetrů) a velmi malé přípustné tolerance (řády mikrometrů). Správně zvolený způsob polohování snižuje vedlejší časy, zproduktivňuje výrobu, zvyšuje její opakovatelnost a usnadňuje integraci technologie laserového mikroobrábění do výrobního řetězce monolitních řezných nástrojů.

Technicky jsou laserové mikroobráběcí stroje vybaveny kamerovými systémy s různými rozlišovacími schopnostmi umožňující polohování geometrických entit v rozdílných přesnostech. Polohování těchto entit spočívá nejen v příslušné hardwarové konfiguraci, nýbrž také v konkrétním softwarovém řešení. V něm je možné v principu zvolit dva režimy polohování – manuální nebo automatické.

Manuální nastavení polohy je vhodné pro prototypový charakter výroby. Po založení obrobku do pracovního prostoru laseru musí operátor většinou přes kamerové pole jemně nastavit polohu požadované entity. Výhodou jsou nízké nároky na programování, nevýhodou vysoké riziko chyby operátora.

Automatický způsob polohování je pokročilejší forma umístování entit, která využívá obrobkových sond a tzv. rozeznávacího rozhraní. Principem tohoto rozhraní je rozpoznání předem nadefinovaných geometrických kontur (hrana, rádius), které jsou následně nasnímány a datově zpracovány přes kamerový systém. Datové informace jsou nadále zpracovány v algoritmech, které určí průsečíky. Vypočítané průsečíky slouží jako výchozí (referenční) body, kolem nichž dochází k transformaci kamerového pole, a tím i správnému nastavení polohy požadované entity. Následně proběhne importování geometricky definované entity. Posloupnost automatického způsobu polohování znázorňuje následující procesní řetězec.



Tento způsob řešení klade vyšší nároky na tvorbu algoritmů, ale výrazně zkracuje vedlejší časy při polohování a zcela eliminuje lidský faktor. Transformace vložené entity je poté řešena v rámci procesu mikroobrábění.

Výše uvedený princip polohování je v současném průmyslu využíván pouze pro umístování geometrických entit na rovinných plochách a nelze jej použít pro laserové mikroobrábění monolitních řezných nástrojů, protože jsou tyto nástroje tvořeny obecnými plochami, a nelze využít základní principy aplikovatelné na rovinných plochách.

3.1 Problematika polohování laserového paprsku vůči břitům monolitního řezného nástroje

Jak již bylo v úvodní kapitole této práce zmíněno, řešení současné technologie laserového mikroobrábění postrádá úpravu již vyrobených monolitních rotačních nástrojů za pomoci broušení. Technologie laserového mikroobrábění by v tomto případě poskytovala možnost modifikovat mikro- a makrogeometrii nástroje v jeho před- nebo podepoziční fázi výrobního řetězce, ale polohování laserového paprsku vůči řeznému nástroji je v případě již vyrobeného nástroje velmi komplikované.

3.1.1 Nepřesnosti broušeného monolitního řezného nástroje

V případě laserového mikroobrábění monolitního řezného nástroje je přesnost polohování a zajištění relativní polohy laserového paprsku vůči řeznému nástroji stěžejní. Řezný nástroj již ve výrobní fázi broušení vykazuje určité odchylky od ideálního tvaru a rozměru způsobené fyzikálními zákonitostmi, např. vysokými řeznými silami a měnící se tuhostí obrobku během procesu broušení, prudké změny teplotních polí aj. Z uvedených důvodů je potřebné analyzovat geometrie všech břitů monolitního řezného nástroje.

V současné době lze při výrobě nástrojů využít nespočetného množství měřicích přístrojů a strojů, které u monolitních řezných nástrojů umožní provést podrobnou analýzu rozměrů a tvarů. Výsledky měření z přístrojů lze využít pro výstupní kontrolu zhotoveného nástroje nebo pro odladění procesu broušení během výrobní dávky. Ve druhém zmíněném případě je nutné, aby měření nástroje bylo provedeno v totožném upínacím systému, ve kterém je nástroj i vyráběn

(tzv. výroba na jedno upnutí). Tímto způsobem odpadá opětovné najíždění řezného břitů, při kterém vzniká potenciální možnost vnesení chyby při seřizování do původní polohy.

V případě laserového mikroobráběcího systému nelze tyto hodnoty využít z důvodu nekompatibility upínání obrobků: laserový systém – nástrojová bruska – měřicí zařízení. Pro tento případ je tedy nutné, aby rozměrová a tvarová analýza nástroje proběhla v pracovním prostoru laserového stroje za pomoci jeho ostatních subsystémů.

3.1.2 Kritéria laserového systému pro zaměřování břitů monolitních řezných nástrojů

Aby bylo možné v laserovém systému realizovat rozměrovou a tvarovou analýzu monolitního řezného nástroje o potřebné přesnosti, musí jeho některé subsystémy splňovat mnoho požadavků, které se přímo podílejí na přesnosti a opakovatelnosti získaných dat. Konkrétně se jedná o měřicí subsystém, základnu systému a řídicí subsystém. Veškeré subsystémy jsou obecně charakterizovány v kapitole 1.2.

Základna systému musí splňovat vysoké nároky na tuhost a přesnost polohování víceosé kinematiky a její opakovatelnosti najetí do potřebných poloh v obecném prostoru laserového stroje. K dalšímu důležitému prvku patří upínací rozhraní, které fixuje monolitní řezný nástroj s minimálními úchytkami házení, jak axiálního, tak především radiálního. U měřicího subsystému je důležité skloubit mnoho aspektů: přesnosti obrobkových sond a bezkontaktních měřicích zařízení, rozlišení kamerových systémů a variantnosti návítových podmínek. U řídicího subsystému se především jedná o nastavení okrajových podmínek rozeznávacího rozhraní, které značným dílem ovlivňuje opakovatelnost rozeznávaných dat na základě mnoha proměnných, např. typ rozeznávaného prvku, směr, popř. oblast rozeznávaného prvku, toleranční pásmo pro výskyt rozeznávaných pixelů a jejich minimální počet, poměr šumu, typ a směr osvětlení včetně samotné expozice a další. Pokud celkový laserový systém nesplňuje některý z výše kladených požadavků na jednotlivé subsystémy, nelze docílit a vykonávat přesné rozměrové a tvarové analýzy monolitních řezných nástrojů.

3.1.3 Specifikace druhého parciálního cíle disertační práce

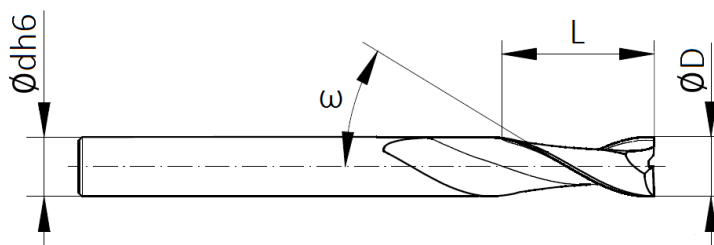
V počátcích této problematiky byl autorem vytvořen hrubý nástin rozměrové a tvarové analýzy břitů řezných monolitních nástrojů, kde byly informace o potřebných parametrech, ke zjištění relativní polohy laserového paprsku vůči řeznému nástroji. Získaná data byla zpracována manuálně, tzn. bez rozeznávacích algoritmů. Tento způsob ruční, neboli základní rozměrové a tvarové analýzy byl časově náročný, a tudíž i velmi neefektivní. Časy základní analýzy se pro jeden břit pohybovaly v rozmezí 20 - 25 min, na základě schopnosti obsluhy laserového systému. Tento způsob rozměrové a tvarové analýzy neposkytoval požadovanou rychlost provedení a žádnou opakovatelnost měření, která je pro úpravu řezných nástrojů stěžejní.

Z tohoto důvodu byl stanoven parciální cíl disertační práce, viz kap. 1.4.1.2, který definuje polo-automatizovanou geometrickou rozměrovou a tvarovou analýzu všech břitů monolitního rotačního nástroje. Tato geometrická analýza se opírá o automatické rozeznávání vhodně navržených bodů, jejichž precizní poziční vyšetření slouží k určení základních geometrických prvků monolitních řezných nástrojů a tím i určení precizní polohy řezných břitů v pracovním prostoru laserového stroje.

3.2 Geometrické prvky monolitních řezných nástrojů pro potřeby zaměření

Aby mohl být postaven metodický návrh ke geometrické analýze mikroobráběného monolitního řezného nástroje, tak je nejprve nutné nadefinovat příslušné geometrické parametry, které poslouží k vyšetření přesné trajektorie pohybu laserového paprsku v obecných rovinách a tím se zaručí korektní relativní poloha laserového paprsku vůči řeznému nástroji. Cílem metodického návrhu je vytvoření jednoho komplexního celku, skrze který budou zadávány základní vstupní parametry monolitního řezného nástroje z výkresové dokumentace (Obrázek 3-2). Vstupními data, potřebná pro sub-programy, jsou:

- $\varnothing dh_6$ průměr upínací části nástroje
- $\varnothing D$ průměr řezné části nástroje
- Z_n počet zubů
- ω úhel stoupání šroubovice
- L délka řezné hrany
- del rovnoměrný/ nerovnoměrný dělení břitů



Obrázek 3-2 Vstupní parametry monolitního řezného nástroje dle výkresové dokumentace

Na základě vstupních parametrů je navržena metodika, která analyzuje důležité body ležící na břitech nástroje. Podle těchto bodů dojde k propočtům a stanovení následujících parametrů, které definují výslednou polohu všech břitů. Těmito parametry jsou:

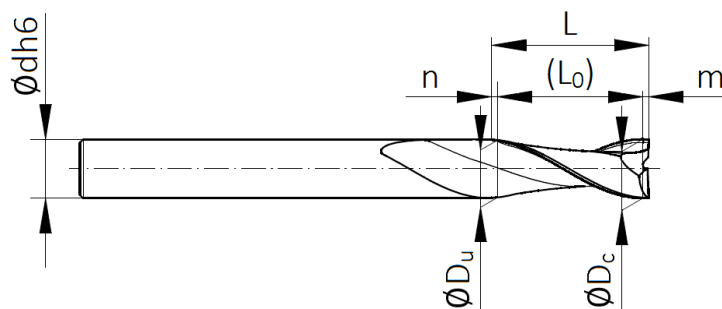
- poloha osy nástroje
- stoupání šroubovice pro všechny břity
- zúžení průměru řezné části nástroje pro všechny břity
- počáteční body trajektorie pohybu laserového paprsku před čelem nástroje pro všechny břity

Vyšetření polohy osy nástroje po upnutí do upínacího systému je důležité pro stanovení všech následujících parametrů definovaných výše. Geometrická analýza bodů pro stanovení parametru stoupání šroubovice je vyšetřována v ose nástroje. Zúžení průměru řezné části nástroje ζ je stanoveno na základě analyzovaných bodů, které se nacházejí na maximálním průměru monolitního řezného nástroje. Tímto způsobem lze získat poloměr každého břitu nástroje v libovolné poloze od jeho osy. Některé parametry jsou znázorněny v obrázku 3-3, např. zúžení průměru řezné části nástroje ζ , které lze na délce L_0 obecně vyjádřit

$$\zeta = \varnothing D_c - \varnothing D_u. \quad (3-1)$$

Měření zúžení průměru řezné části nástroje ζ probíhá ve vzdálenosti m (viz Obrázek 3-3) v délce L_0 , na které lze definovat ζ . Vzdálenost m , popř. n (vzdálenost od konce řezné části nástroje) lze stanovit obsluhou laserového systému. Standardně se hodnoty těchto vzdáleností

pohybují v rozmezí $0,5 < m$; $n < 3 \text{ mm}$ v závislosti na velikosti průměru $\varnothing D$ řezné části monolitního řezného nástroje.



Obrázek 3-3 Stanovení zúžení řezného nástroje

3.3 Vývojové fáze postupu řešení navrhované metodiky

V první fázi návrhu metodiky byly algoritmy tvořeny základními výpočty pro zjištění relativní polohy laserového paprsku vůči mikroobráběnému řeznému nástroji, které byly opatřeny zápisem získaných hodnot do textových souborů. Z těchto souborů byla data přebírána do následujících sub-programů, ze kterých slouží k dalším propočtům tvořící se trajektorie šroubovice. Posloupnost sub-programů a jejich postup zaměřování břitů je následující:

- určení osy nástroje
- určení stoupání šroubovice
- určení zúžení průměru řezné části nástroje
- výpočet počátečního bodu před čelem nástroje
- program pro samotný proces mikroobrábění

První čtyři sub-programy jsou použity pro vyšetření parametrů šroubovice, které specifikují přesnou trajektorii šroubovice břitu nástroje. Pátý sub-program obsahuje hlavní jádro mikroobráběcího procesu a jsou v něm používána data z předešlých programů.

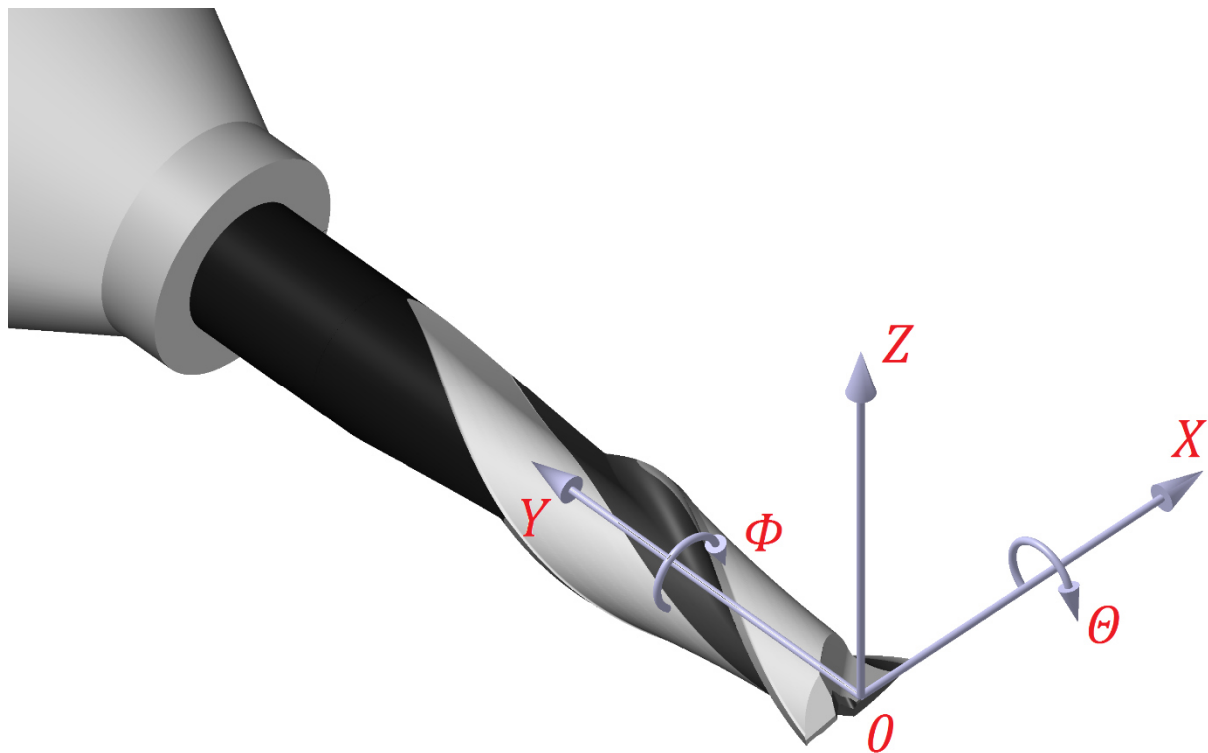
Sub-programy pro základní analýzu neobsahovaly algoritmy rozeznávacího rozhraní (dále jen RI). Polohová data v těchto sub-programech bylo nutné manuálně zadávat, doměřovat a korigovat. Docílení přesných parametrů výsledné trajektorie šroubovice vč. zúžení průměru řezné části nástroje bylo tímto způsobem velmi časově náročné.

Dalším směrem vývoje tohoto metodického návrhu je její nadstavba neboli pokročilá analýza dat. Cílem pokročilé analýzy dat je vyšetření důležitých bodů na monolitním řezném nástroji s využitím RI.

Metodika využívající pokročilé analýzy šroubovice obsahuje skupinu sub-programů, jejichž algoritmy zpracovávají a vyhodnocují data z RI. Na základě těchto dat dochází k vyšetření hledaných bodů na monolitním řezném nástroji. Přesnost získaných dat spočívá ve správném nastavení okrajových podmínek RI, které zahrnuje správné nadefinování hledaných elementů, včetně jejich násvitových podmínek (viz kap 3.1.2) pro získání např. správného kontrastu pro oblast přechodu břit nástroje – drážka nástroje. Celek pokročilé analýzy je opět tvořen pěti sub-programy.

Posledním krokem k zefektivnění samotné rozměrové a tvarové analýzy je její rozšíření na libovolný počet břitů dle geometrie samotného nástroje. Tento způsob umožňuje zanalyzovat a vyhodnocovat trajektorie všech břitů monolitního řezného nástroje. V tomto případě je postup řešení jednotlivých sub-programů zobecněn, což umožňuje zanalyzovat břity jak s pravidelným, tak i nepravidelným dělením. Zápis mezioperačních dat určených následujícím sub-programům je prováděn do maticových struktur, které lze řešit různými dostupnými způsoby např. zápis do textových souborů, dynamických operačních pamětí aj.

Posloupnost charakterizovaného postupu řešení je sepsána ve výše uvedeném pořadí na začátku této podkapitoly. Součástí postupu řešení jsou jednotlivé sub-programy charakterizovány vývojovými diagramy a zobecněnými matematickými zápisy. Postup řešení využívá kartézského souřadného systému pro víceosou kinematiku laserového stroje, jehož značení odpovídá obrázku 3-4.



Obrázek 3-4 Značení os víceosé kinematiky laserového stroje

3.4 Postup řešení jednotlivých sub-programů

Tato podkapitola popisuje autorem navržený postup řešení hlavního parametrického programu včetně jeho jednotlivých sub-programů, jejichž postupy jsou doplněny vývojovými diagramy s matematickým vyjádřením. Celková geometrická analýza (rozměrová, tvarová) monolitního řezného nástroje je provedena dle Obrázku 3-4, který prezentuje značení os kinematiky a polohu nulového bodu obrobku.

Postup řešení zahrnuje přesné určení několika důležitých bodů v konkrétních pozicích, které leží na břitech vyšetřovaného monolitního řezného nástroje. Dle kartézského souřadného systému v obrázku 3-4 a vyšetřených parametrech geometrie nástroje, definovaných v kap. 3.2, lze docílit konstantní relativní polohy laserového paprsku vůči jednotlivým břitům nástroje. Dle konkrétních parametrů nástroje, např. stoupání šroubovice, je získána informace pro pohyb os Y a Φ . Pohyb kinematiky ve směru osy X lze uskutečnit za pomoci parametru zúžení průměru řezné části nástroje ζ .

Všechny vyšetřované body jsou zobrazeny na obrázku 3-5, kde jsou body A^0 a B^0 vyšetřovány v ose monolitního řezného nástroje, body C^0 a D^0 na průměru monolitního řezného nástroje a bod E před čelem monolitního řezného nástroje. Na základě těchto bodů jsou vyšetřeny trajektorie břitů, jejichž označení bude stanoveno v průběhu následujících podkapitol. Z důvodu použitelnosti navrhované metodiky na libovolný počet břitů jsou veškeré body zapisovány do maticových struktur pro zpřehlednění matematických operací.

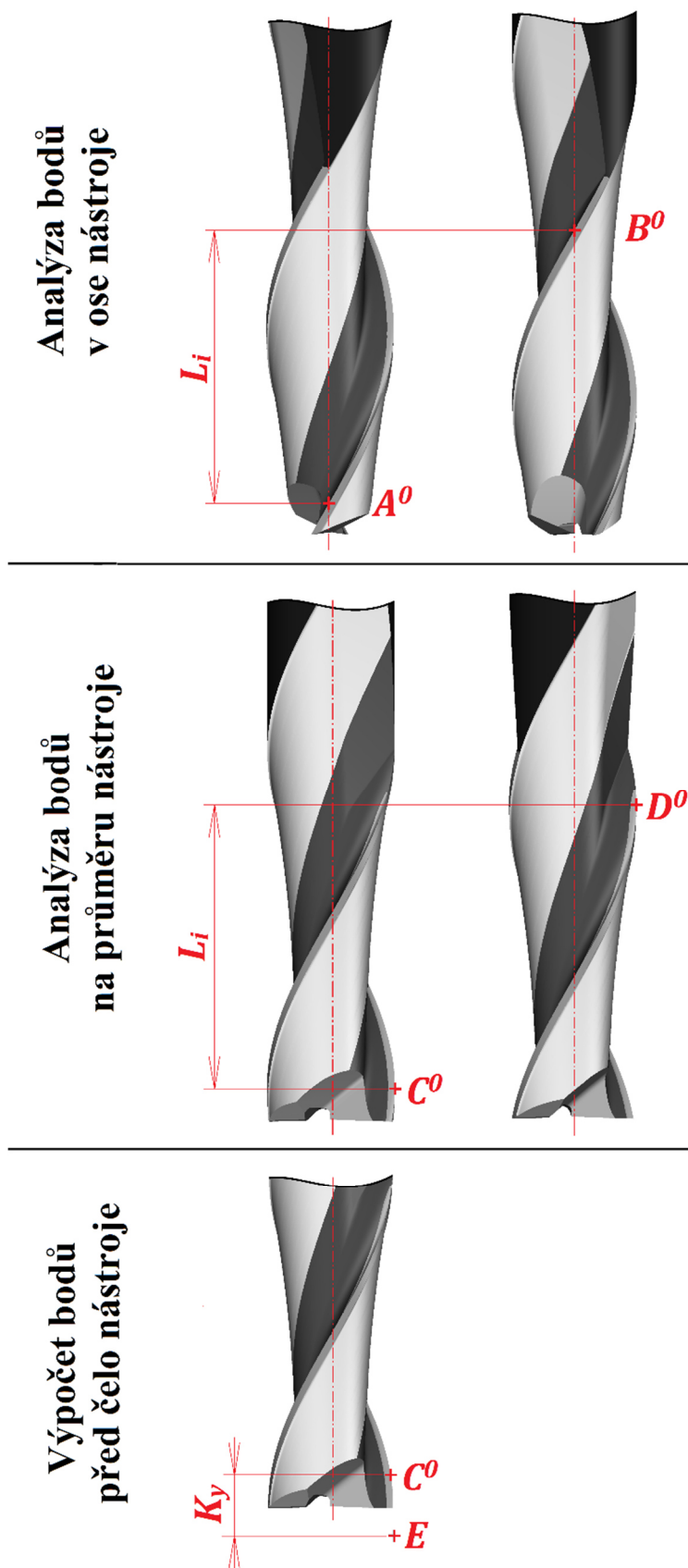
Pro orientaci v následujícím textu je pro uvedené body vysvětlen princip užívání dolních a horních indexů (tabulka 3-1).

$$A_i^q$$

Tabulka 3-1 Legenda k užívání horních a dolních indexů pro vyšetřované body

	Popis	Rozsah
A	označení vyšetřovaného prvku (bod, rotace, přímka)	A ... Z; α ... ω
i	číslo břitu	kde $i = 1 \dots n$
q	druh bodu	1 – rozeznaná data přímky 2 – definovaná data přímky 0 – vypočtený průsečík z přímek

Body označené horními indexy θ , jsou výslednými body vyšetřené výpočtem průsečíků přímek na základě získaných bodů s horními indexy 1 (rozeznányými přímkami) a 2 (definovanými přímkami). Body, které nenesou žádný horní index (např. bod E – obrázek 3-5), jsou vypočteny na základě bodů A^0 až D^0 .



Obrázek 3-5 Nadefinování jednotlivých bodů pro realizaci zaměřování břitů monolitních řezných nástrojů

K vyšetřovaným bodům definovaných v obrázku 3-5 je nutné zaznamenat absolutní polohu rotační osy kinematiky $\Phi_{abs,i}$. Tato data jsou důležitá z několika důvodů:

- poloha absolutní rotace $\Phi_{abs,i}$ definuje vyšetřovaný břit pro konkrétní bod
- umožňují dále zpracovávat rovnoměrné či nerovnoměrné dělení břitů
- z těchto dat je vyšetřena relativní rotace $\Phi_{rel,i}$ břitu pro následné vyšetření parametrů trajektorie břitu
- hodnoty relativních $\Phi_{rel,i}$ a absolutních $\Phi_{abs,i}$ rotací jsou součástí výpočtu pro prodloužení trajektorií pro všechny břity monolitního řezného nástroje (konkrétně bod E).

Všechny výše uvedené body jsou zpracovávány postupně v pěti sub-programech, které jsou charakterizovány v následujících podkapitolách třetí úrovně.

3.4.1 Charakteristika hlavního parametrického programu

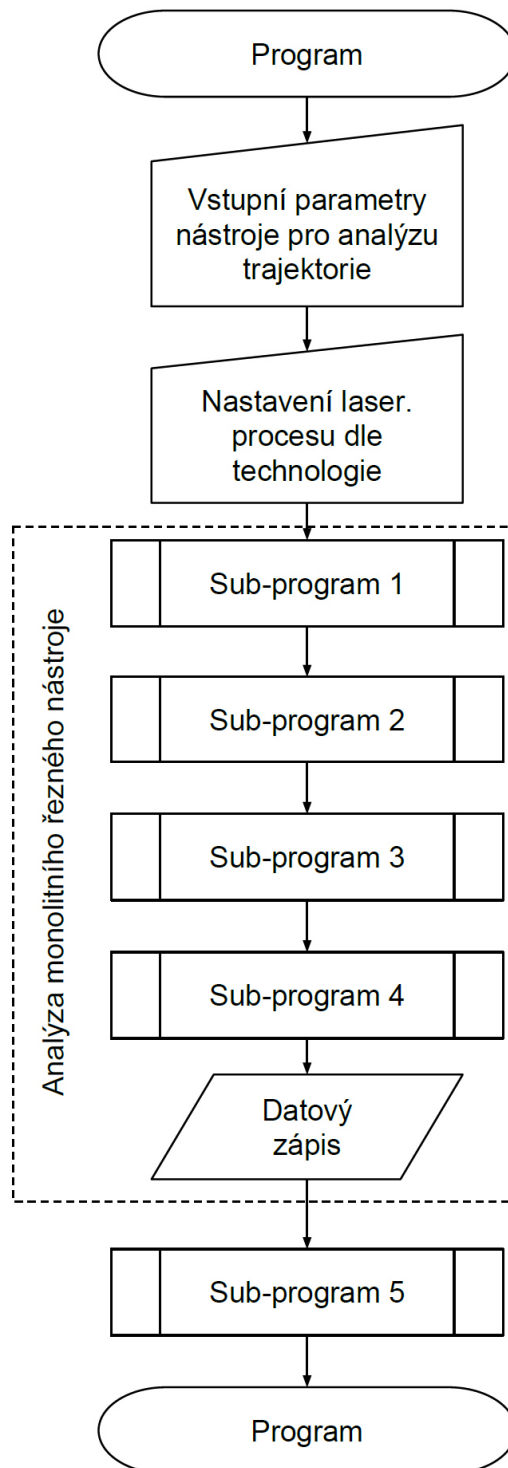
Výsledný postup řešení zahrnuje hlavní parametrický program (Obrázek 3-6), který lze spustit přes jednoduché uživatelské rozhraní (UI) obsahující definování globálních parametrů. Skrze UI jsou zadávány dvě skupiny těchto parametrů:

- 1) Parametry monolitního řezného nástroje pro analýzu trajektorie:
 - \varnothing_{dh6} průměr upínací části nástroje
 - $\varnothing D$ průměr řezné části nástroje
 - Z_n počet zubů
 - L_0 definovaná délka řezné hrany (např. mezi A^0 a B^0 resp. C^0 a D^0)
 - ω úhel stoupání šroubovice
 - del rovnoměrný/ nerovnoměrný dělení břitů
 - K_y délka dopočítané trajektorie - mezi C^0 a E
 - souřadnice polohy pro měření \varnothing_{dh6}
 - \pm orientace analýzy (rozeznávání bodů C^0 a D^0 z čela / hřbetu břitu)
- 2) Nastavení laserového procesu dle zvolené technologie mikroobrábění:
 - procesní parametry laserového paprsku
 - rozmítací strategie laserového paprsku
 - statické / dynamické tvarování laserového paprsku
 - a další...

Po zadání potřebných vstupních parametrů jsou hlavním programem vykonány čtyři sub-programy (ohraničená oblast v obrázku 3-6), které zanalyzují trajektorii břitů monolitního řezného nástroje. Během vykonání těchto sub-programů dojde ke zpracování a zápisu potřebných dat. Tato data lze obecně rozdělit těchto skupin:

- polohová data jednotlivých bodů (viz Obrázek 3-5)
- polohová data rotační osy k jednotlivým bodům
- data obsahující informace o trajektoriích břitů
- ostatní (data k ose nástroje; poloha Z souřadnice)

Po vykonání analýzy monolitního řezného nástroje následuje poslední sub-program, který dle nastavení laserového procesu vykoná příslušnou technologii laserového mikroobrábění na základě analyzované trajektorie z předem definovaného bodu E .



Obrázek 3-6 Vývojový diagram pro hlavní parametrický program

3.4.2 Zaměření osy nástroje

Zaměření osy nástroje neboli sub-program 1, je používán pro vyšetření osy nástroje, kde je osa nástroje vyšetřena pomocí jmenovité hodnoty upínací části nástroje $\varnothing dh6$. Oblast (průměr) upínací části nástroje $\varnothing dh6$ je používána kvůli své třídě přesnosti IT6, která pro stanovení osy nástroje umožňuje spolehlivou opakovatelnost najetí při nízkých hodnotách směrodatné odchylky u_a . Pro potřeby analýzy trajektorie břitů je důležitá poloha osy nástroje ve směru X, proto je k ose nástroje přiřazena zkratka x_{osa} .

Po vložení monolitního řezného nástroje do upínacího systému začíná úvod sub-programu 1 v upínací části nástroje na jeho nejvyšší povrchu, kde je definován výchozí bod. Přibližné polohové údaje X, Y a Z o nejvyšší povrchu válcové plochy upínací části řezného nástroje (Obrázek 3-7 – žluté pole) lze získat několika způsoby:

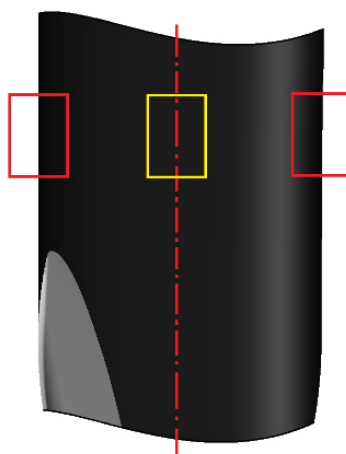
Manuálně:

- manuální fokusací obrazu kamerového pole

Automaticky:

- rozeznávacími metodami
- obrobkovou sondou
- bezkontaktním měřením

Po získání polohy nejvyšší povrchy, prezentující výchozí bod sub-programu 1, lze dle vstupního parametru $\varnothing dh6$ jmenovité hodnoty zahájit rozeznávání. (Pozn. RI je v sub-programu 1 používáno z důvodu sjednocení algoritmů i s ostatními sub-programy. Skutečnou hodnotu parametru $\varnothing dh6$ lze získat i jinými cestami.) Na základě parametru $\varnothing dh6$ a souřadnic X, Y a Z nejvyšší povrchy, nacházející se ve žluté oblasti obrázku 3-7, jsou vypočteny souřadnice pro oblasti, kde probíhá měření reálné hodnoty $\varnothing dh6$ (červené oblasti v obrázku 3-7).



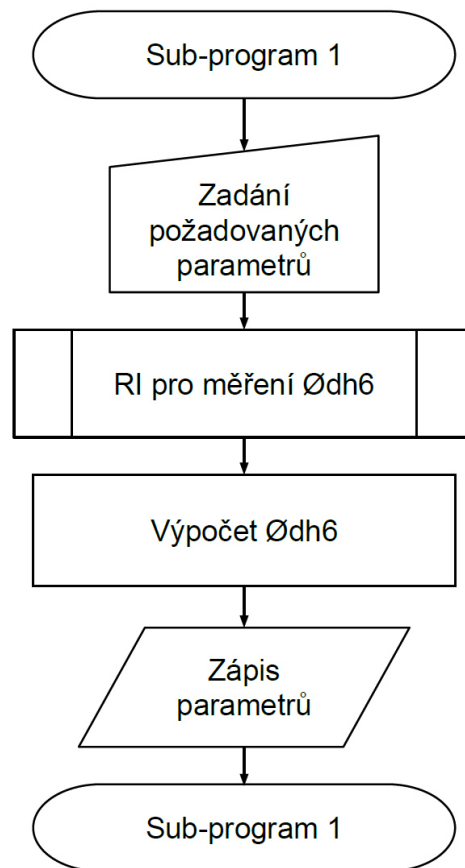
Obrázek 3-7 Upínací část monolitního řezného nástroje:
oblasti pro RI - červeně; oblast nejvyšší povrchy - žlutě

V těchto červeně vyznačených oblastech je rozeznáván přechod mezi upínací částí nástroje a prostorem na základě největšího kontrastu. Z těchto dat je nadále vypočítána přesná hodnota průměru upínací části nástroje $\varnothing dh6$, ze kterého je stanovena poloha osy nástroje ve směru X – parametr x_{osa} .

Sub-program 1 je ukončen v ose nástroje na nejvyšší povrchce upínací části monolitního řezného nástroje. V závěru programu jsou zaznamenány vyšetřené parametry:

- $\varnothing dh6$ přesná hodnota průměru upínací části nástroje
- x_{osa} poloha osy nástroje ve směru X

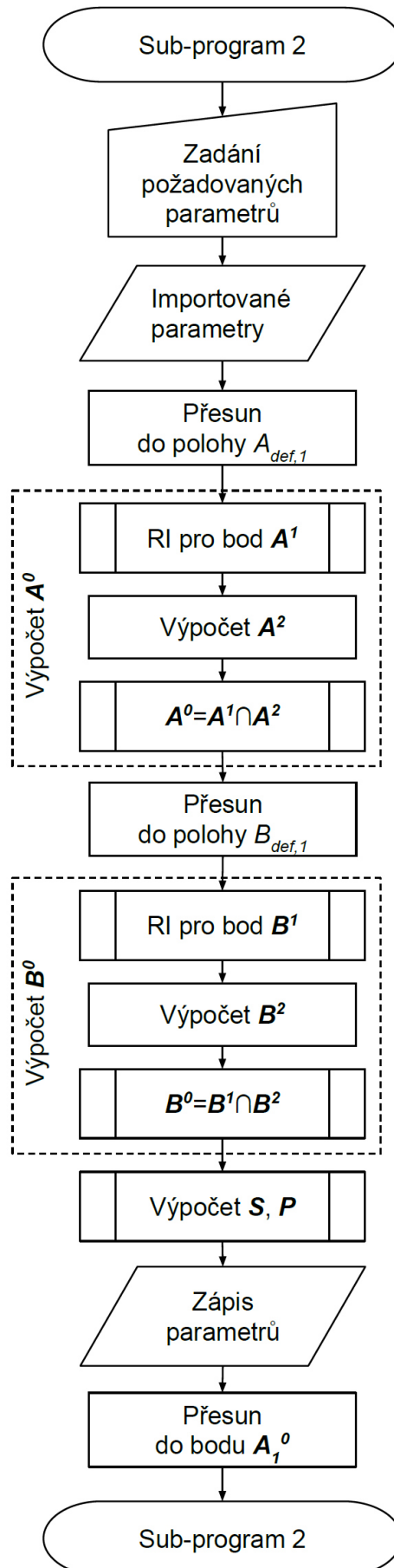
V obrázku 3-8 je znázorněn vývojový diagram sub-programu 1.



Obrázek 3-8 Vývojový diagram pro sub-program 1

3.4.3 Vyšetření bodů na ose nástroje

Vyšetřením dvou bodů na ose nástroje neboli sub-program 2 je dále vypočítáno stoupání šroubovice jednotlivých břitů v ose monolitního řezného nástroje za pomoci bodů A^0 a B^0 (Obrázek 3-5). Princip vyšetření stoupání šroubovice je zobrazen pomocí vývojového diagramu pro sub-program 2 (Obrázek 3-9), ve kterém je po zadání požadovaných parametrů vyšetřen bod A^0 na všech břitech, poté v definované vzdálenosti L_0 bod B^0 . K těmto bodům jsou zaznamenány úhly natočení i-tého břitu $\Phi_{abs,i}^A$ a $\Phi_{abs,i}^B$. Dle těchto parametrů jsou následně vypočtena data ke stoupání šroubovice: skutečná délka řezné hrany i-tého břitu L_i , relativní rotace nástroje mezi vyšetřenými průřechy Φ_{rel} a samotné stoupání šroubovice i-tého břitu p_i . Po zapsání parametrů je kamerové pole přesunuto do bodu A_1^0 , který je výchozím bodem následujícího sub-programu 3.



Obrázek 3-9 Vývojový diagram pro sub-program 2

Vstupními parametry tohoto sub-programu jsou:

- $\emptyset D$ průměr řezné části nástroje
- Z_n počet zubů
- L_0 definovaná délka řezné hrany
- ω úhel stoupání šroubovice
- del rovnoměrné / nerovnoměrné dělení břitů
- \pm orientace analýzy (rozeznávání bodů C^0 a D^0 z čela / hřbetu břitu)

a importovaným parametrem ze sub-programu 1 je:

- x_{osa} poloha osy nástroje ve směru X

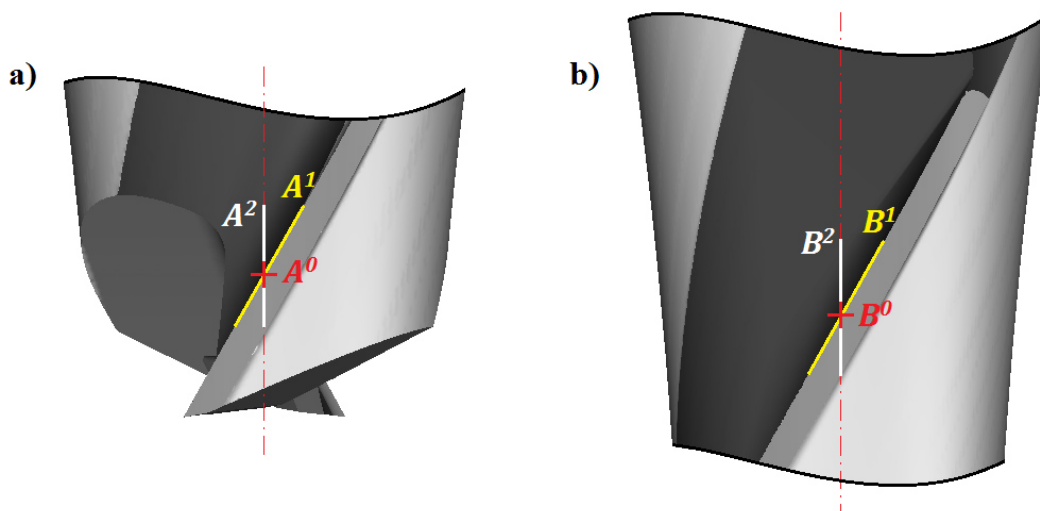
Některé vstupní parametry nejsou v tomto sub-programu využity, ale až v těch následujících (v tomto případě se jedná konkrétně o znaménku určující orientaci geometrické analýzy). Ve výsledku jsou veškeré vstupní parametry pro analýzu monolitního řezného nástroje shrnuty do hlavního parametrického programu (viz Kapitola 3.4.1).

Výchozím bodem sub-programu 2 je tzv. definovaný bod $A_{def,i}$ ležící na prvním břitu ($i = 1$). Tento bod leží na ose nástroje x_{osa} ve vzdálenosti m od čela nástroje, kterou lze opět určit manuálně i automatickým způsobem

$$A_{def,i} = f(x_{osa}; m), \text{ kde } i = 1. \quad (3-2)$$

V tomto bodě začíná výpočtový modul bodu A^0 (Obrázek 3-9 – výpočet A^0), na jehož konci je vyšetřený průsečík A^0 . Tento modul začíná rozeznáváním dat přímkou A^1 . Rozeznávaná data přímkou A^1 (Obrázek 3-10a) jsou proto zapisována i s absolutními hodnotami rotace monolitního řezného nástroje $\Phi_{abs,i}^A$, protože jsou funkcí parametru del ,

$$\Phi_{abs,i}^A = f(del). \quad (3-3)$$



Obrázek 3-10 Grafické znázornění vyšetřovaných bodů a přímek: a) $A^0 A^1 A^2$; b) $B^0 B^1 B^2$

Obecný matematický zápis těchto dat vypadá následovně:

$$\mathbf{A}^1 = \begin{pmatrix} X_1^{A1} & Y_1^{A1} & \alpha_1^{A1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^{A1} & Y_n^{A1} & \alpha_n^{A1} \end{pmatrix}, \Phi_{abs,i}^A = \begin{pmatrix} \Phi_{abs,1}^A \\ \vdots \\ \Phi_{abs,n}^A \end{pmatrix}. \quad (3-4)$$

Pro výpočet průsečíku bodů \mathbf{A}^0 je nutné stanovit data pro přímkou \mathbf{A}^2 . Pro sub-program 2 jsou data pro tuto přímkou u všech břitů konstantní, protože leží v ose nástroje, tudíž

$$\mathbf{A}^2 = (X^{A2} \quad Y^{A2} \quad \alpha^{A2}), \quad (3-5)$$

kde $X^{A2} = x_{osa}$,
 $Y^{A2} = m$,
 $\alpha^{A2} = \frac{\pi}{2}$.

Výpočet průsečíku \mathbf{A}^0 lze nyní vyjádřit z dat přímkou \mathbf{A}^1 a \mathbf{A}^2 , kde

$$\mathbf{A}^0 = \mathbf{A}^1 \cap \mathbf{A}^2 \quad (3-6)$$

Lze vyjádřit ze směrnicového zápisu rovnice přímky, kde prostřednictvím něj dojde k výpočtu hledaných průsečíků $X_i^{A0}; Y_i^{A0}$ pro $i = 1 \dots n$. Výsledný zápis průsečíku \mathbf{A}^0 vypadá následovně,

$$\mathbf{A}^0 = \begin{pmatrix} X^{A0} & Y_1^{A0} \\ \vdots & \vdots \\ X^{A0} & Y_n^{A0} \end{pmatrix}. \quad (3-7)$$

Po ukončení výpočtového modulu bodu \mathbf{A}^0 je kamerové pole přesunuto do definovaného bodu $B_{def,i}$ ležícího rovněž na prvním břitu ($i = 1$). K určení tohoto bodu jsou zapotřebí vstupní parametry: $\emptyset D$ (resp. rádius řezné části nástroje), definovaná délka řezné hrany L_0 , úhel stoupání šroubovice ω a vyšetřený průsečík na prvním břitu - bod \mathbf{A}_1^0 , protože

$$B_{def,i} = f(\emptyset D; L_0; \omega; \mathbf{A}_1^0), \text{ kde } i = 1. \quad (3-8)$$

Na základě těchto dat je vypočítáno definované stoupání p_{def} , dle kterého dojde k přesunu do bodu $B_{def,1}$. Vyšetření bodu \mathbf{B}^0 dochází při rotaci monolitního řezného nástroje při natočení nástroje o $\Phi_{abs,i}^B$, kde $\Phi_{abs,i}^B$ lze vyjádřit jako

$$\Phi_{abs,i}^B = \Phi_{abs,i}^A + \frac{L_0}{p_{def}} \cdot 360, \text{ kde } i = 1 \dots n. \quad (3-9)$$

Tak, jako v případě předešlých dat přímky \mathbf{A}^1 , je nejprve rozeznávána přímkou \mathbf{B}^1 (Obrázek 3-10b). Zápis dat této přímky při rotaci nástroje $\Phi_{abs,i}^B$ vypadá následovně

$$\mathbf{B}^1 = \begin{pmatrix} X_1^{B1} & Y_1^{B1} & \alpha_1^{B1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^{B1} & Y_n^{B1} & \alpha_n^{B1} \end{pmatrix}; \Phi_{abs,i}^B = \begin{pmatrix} \Phi_{abs,1}^B \\ \vdots \\ \Phi_{abs,n}^B \end{pmatrix}. \quad (3-10)$$

Výpočet dat přímky pro \mathbf{B}^2 je řešen stejně jako pro \mathbf{A}^2 . Pro sub-program 2 jsou data pro tuto přímkou u všech břitů konstantní, protože leží v ose nástroje, proto

$$\mathbf{B}^2 = (X^{B2} \quad Y^{B2} \quad \alpha^{B2}), \quad (3-11)$$

kde $X^{B2} = x_{osa},$
 $Y^{B2} = m + L_0,$
 $\alpha^{B2} = \frac{\pi}{2}.$

Výpočet průsečíku \mathbf{B}^0 je vyjádřen z dat přímek \mathbf{B}^1 a \mathbf{B}^2 , kde

$$\mathbf{B}^0 = \mathbf{B}^1 \cap \mathbf{B}^2 \quad (3-12)$$

lze vyjádřit ze směrnicového zápisu rovnice přímky, kde prostřednictvím něj dojde k výpočtu hledaných průsečíků $X_i^{B0}; Y_i^{B0}$ pro $i = 1 \dots n$. Výsledný zápis průsečíku \mathbf{B}^0 vypadá následovně,

$$\mathbf{B}^0 = \begin{pmatrix} X^{B0} & Y_1^{B0} \\ \vdots & \vdots \\ X^{B0} & Y_n^{B0} \end{pmatrix}. \quad (3-13)$$

Po dokončení výpočtového modulu bodu \mathbf{B}^0 je proveden výpočet parametrů pro stoupání šroubovice dle matice \mathbf{S} , kde

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}^0 - \mathbf{A}^0. \quad (3-14)$$

Matice \mathbf{S} obsahuje skutečnou délku řezné hrany L_i . Výsledek výpočtu matice \mathbf{S} je

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & L_1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & L_n \end{pmatrix}. \quad (3-15)$$

Jelikož byla pro výpočet průsečíků \mathbf{A}^0 , resp. \mathbf{B}^0 použita data přímek o konstantních hodnotách \mathbf{A}^2 , resp. \mathbf{B}^2 , došlo při výpočtu matice \mathbf{S} k vynulování hodnot prvního sloupce. Výsledek matice \mathbf{S} je proto dále upraven do následné matice L_i ,

$$L_i = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{pmatrix}, \text{ kde } i = 1 \dots n. \quad (3-16)$$

Absolutní poloha rotace i -tého břitu monolitního řezného nástroje mezi jednotlivými body \mathbf{A}^0 a \mathbf{B}^0 je vyjádřena relativními hodnotami $\Phi_{rel,i}$:

$$\Phi_{rel,i} = \Phi_{abs,i}^B - \Phi_{abs,i}^A, \quad (3-17)$$

$$\Phi_{rel,i} = konst. = \Phi_{rel}. \quad (3-18)$$

Z parametrů L_i a Φ_{rel} je vyjádřeno samotné stoupání i -tého břitu,

$$p_i = L_i \cdot \frac{360}{\Phi_{rel}}, \text{ kde } i = 1 \dots n, \quad (3-19)$$

které je zapsáno následovně,

$$p_i = \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix}, \text{ kde } i = 1 \dots n. \quad (3-20)$$

V závěru sub-programu 2 jsou zaznamenána tato vyšetřená data:

- A^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^A$ absolutní poloha rotace i-tého břitu v určitém bodě
- B^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^B$ absolutní poloha rotace i-tého břitu v určitém bodě
- L_i skutečná délka řezné hrany pro i-tý břit
- p_i stoupání šroubovice pro i-tý břit
- $z_{cam,osa}$ souřadnice Z kamerového pole v ose nástroje

Sub-program 2 je zakončen v ose nástroje na prvním břitu ve vyšetřené poloze A_1^0 , kde se nachází střed kamerového pole a výchozí pozice pro následující sub-program 3.

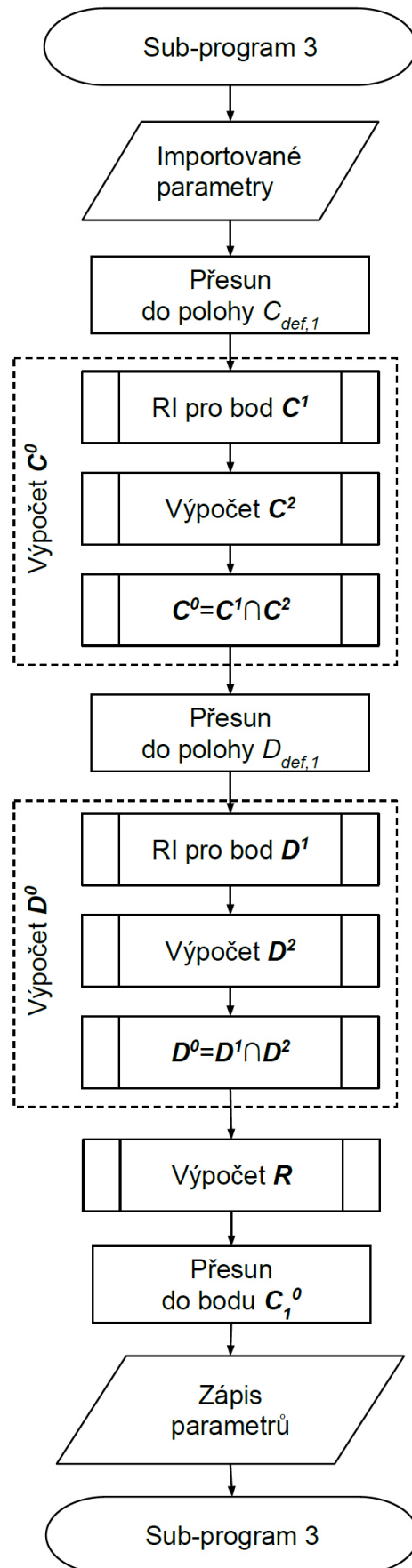
3.4.4 Vyšetření bodů na průměru nástroje

Další sub-program, třetí v pořadí, vyšetřuje zúžení průměru řezné části nástroje na všech břitech monolitního řezného nástroje – parametr ζ_i . Vyšetření tohoto parametru je prováděno na průměru nástroje. V tomto sub-programu se rozhoduje, zda bude monolitní řezný nástroj dále analyzován z čelních ploch břitů, nebo naopak z jeho hřbetních ploch. Výběr varianty analýzy lze ovlivnit orientací znamének v určitých skupinách algoritmů, které ovlivňují směr geometrické analýzy RI a hodnoty souřadnic X a absolutních rotací břitů monolitního řezného nástroje $\Phi_{abs,i}$:

- ze strany pravé → geometrická analýza ve směru z čel břitů → znaménko +
- ze strany levé → geometrická analýza ve směru ze hřbetů břitů → znaménko –

Smysl změny způsobu analýzy rozšiřuje aplikovatelnost metodického návrhu z pohledu zvoleného laserového technologického procesu. V případě geometrických úprav čelních ploch břitů monolitního řezného nástroje je použita geometrická analýza ve směru z čel břitů a naopak.

Po výběru geometrické analýzy na základě volby znaménka je vyšetřováno zúžení průměru řezné části nástroje jednotlivých břitů monolitního řezného nástroje ζ_i mezi body C^0 a D^0 (Obrázek 3-5). Princip vyšetření tohoto parametru je znázorněn vývojovým diagramem v obrázku 3-11, kde jsou v závislosti na bodech A^0 a B^0 v ose nástroje vyšetřeny body C^0 a D^0 ležící na průměru řezné části nástroje. K nově vyšetřeným bodům jsou zaznamenány absolutní hodnoty rotací i-tých břitů $\Phi_{abs,i}^C$ a $\Phi_{abs,i}^D$. Na základě bodů C^0 a D^0 je vypočten parametr k zúžení řezné části nástroje i-tého břitu ζ_i . Po zapsání parametrů je střed kamerového pole přesunut do bodu C_1^0 , který je výchozím bodem následujícího sub-programu 4.



Obrázek 3-11 Vývojový diagram pro sub-program 3

Celkem je do sub-programu 3 importováno 11 parametrů:

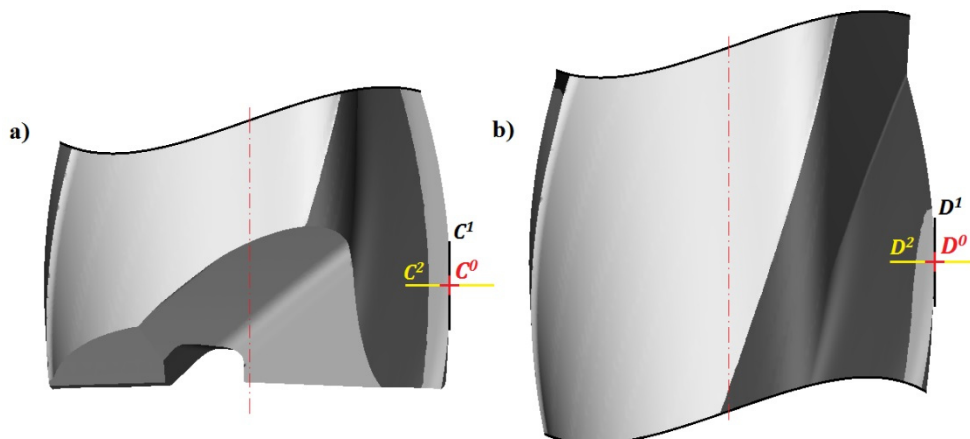
- $\emptyset D$ průměr řezné části nástroje (resp. rádius břitu $r_{nást}$)
- Z_n počet zubů
- \pm orientace analýzy
- x_{osa} poloha osy nástroje ve směru X
- A^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^A$ absolutní poloha rotace i-tého břitu v určitém bodě
- B^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^B$ absolutní poloha rotace i-tého břitu v určitém bodě
- L_i skutečná délka řezné hrany i-tého břitu
- p_i stoupání šroubovice i-tého břitu
- $z_{cam,osa}$ souřadnice Z kamerového pole v ose nástroje

Sedm posledních parametrů bylo vyšetřeno v předchozím sub-programu 2.

Z výchozí pozice sub-programu 3, bod A_i^0 , je střed kamerového pole přesunut do tzv. definovaného bodu $C_{def,i}$, který leží na prvním břitu, na průměru monolitního řezného nástroje ($i = 1$). Z toho vyplývá, že bod $C_{def,i}$ je funkcí níže uvedených parametrů

$$C_{def,1} = f(x_{osa}; r_{nást}; A_1^0; z_{cam,osa}), \text{ kde } i = 1 \dots n. \quad (3-21)$$

V tomto bodě začíná výpočtový modul bodu C^0 (Obrázek 3-11 – výpočet C^0), na jejímž konci je vyšetřený průsečík C^0 . Tento modul začíná rozeznáváním dat přímky C^1 (Obrázek 3-12a), ke kterým jsou zapisována data i s údajem rotace monolitního řezného nástroje $\Phi_{abs,i}^C$.



Obrázek 3-12 Grafické znázornění vyšetřovaných bodů: a) $C^0 C^1 C^2$; b) $D^0 D^1 D^2$

Obecný matematický zápis rozeznávaných dat přímky C^1 a absolutní rotace nástroje $\Phi_{abs,i}^C$ je v případě provedení geometrické analýzy ve směru z čelní plochy břitu

$$C^1 = \begin{pmatrix} X_1^{C1} & Y_1^{C1} & \alpha_1^{C1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^{C1} & Y_n^{C1} & \alpha_n^{C1} \end{pmatrix}, \Phi_{abs,i}^C = \begin{pmatrix} \Phi_{abs,1}^A + \frac{\pi}{2} \\ \vdots \\ \Phi_{abs,n}^A + \frac{\pi}{2} \end{pmatrix} \quad (3-22)$$

a pro případ geometrické analýzy ve směru ze hřbetní plochy břitu

$$\Phi_{abs,i}^C = \begin{pmatrix} \Phi_{abs,1}^A - \frac{\pi}{2} \\ \vdots \\ \Phi_{abs,n}^A - \frac{\pi}{2} \end{pmatrix}. \quad (3-23)$$

Pro výpočet průsečíků přímek, bod C^0 , je nutné stanovit data pro přímkou C^2 . Pro sub-program 3 nejsou data přímky C^2 konstantní, jako tomu bylo u předešlého sub-programu 2 pro přímkou A^2 , protože

$$C^2 = f(A^0; r_{nást}), \quad (3-24)$$

proto souřadnice přímek C^2 mají tento tvar

$$C^2 = \begin{pmatrix} X_1^{C2} & Y_1^{A0} & \alpha^{C2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^{C2} & Y_n^{A0} & \alpha^{C2} \end{pmatrix},$$

kde $\alpha^{C2} = 0$

$X_i^{C2} = X_i^{A0} + r_{nást}$ kde $i = 1 \dots n$ pro analýzu ve směru z čel břitů, nebo

$X_i^{C2} = X_i^{A0} - r_{nást}$ kde $i = 1 \dots n$ pro analýzu ve směru ze hřbetů břitů.

V následující charakteristice je postup řešení vysvětlen na přístupu ve směru z čelních ploch břitů.

Výpočet průsečíku C^0 je vyjádřen z dat přímek C^1 a C^2 , kde

$$C^0 = C^1 \cap C^2 \quad (3-25)$$

Ize vyjádřit ze směrnicového zápisu rovnice přímky, kde prostřednictvím něj dojde k výpočtu hledaných průsečíků $X_i^{C0}; Y_i^{C0}$ pro $i = 1 \dots n$. Výsledný zápis průsečíku C^0 vypadá následovně,

$$C^0 = \begin{pmatrix} X_1^{C0} & Y_1^{C0} \\ \vdots & \vdots \\ X_n^{C0} & Y_n^{C0} \end{pmatrix}. \quad (3-26)$$

Po ukončení výpočtového modulu bodu C^0 je střed kamerového pole přesunut z bodu C^0 do definovaného bodu $D_{def,i}$, který leží rovněž na prvním břitu ($i = 1$). Střed kamerového pole je do tohoto bodu přesunut již po vyšetřeních parametrech pro břit $i = 1$. Pro tento břit lze bod $D_{def,1}$ vyjádřit funkcí:

$$D_{def,i} = f(C_1^0; L_i; p_i), \text{ kde } i = 1. \quad (3-27)$$

Vyšetření bodu D^0 (Obrázek 3-12b) je analogií vyšetření bodu C^0 . Matematický zápis dat vypadá následovně,

$$D^1 = \begin{pmatrix} X_1^{D1} & Y_1^{D1} & \alpha_1^{D1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^{D1} & Y_n^{D1} & \alpha_n^{D1} \end{pmatrix}, \Phi_{abs,i}^D = \begin{pmatrix} \Phi_{abs,1}^B + \frac{\pi}{2} \\ \vdots \\ \Phi_{abs,n}^B + \frac{\pi}{2} \end{pmatrix}, \quad (3-28)$$

$$\mathbf{D}^2 = \begin{pmatrix} X_1^{D2} & Y_1^{B0} & \alpha^{D2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^{D2} & Y_n^{B0} & \alpha^{D2} \end{pmatrix}, \quad (3-29)$$

kde: $\alpha^{D2} = 0$,
 $X_i^{D2} = X_i^{B0} + r_{nást}$ pro $i = 1 \dots n$.

Výpočet průsečíku \mathbf{D}^0 je vyjádřen z dat přímek \mathbf{D}^1 a \mathbf{D}^2 , kde

$$\mathbf{D}^0 = \mathbf{D}^1 \cap \mathbf{D}^2 \quad (3-30)$$

Lze vyjádřit ze směrnicového zápisu rovnice přímky, kde prostřednictvím něj dojde k výpočtu hledaných průsečíků $X_i^{D0}; Y_i^{D0}$ pro $i = 1 \dots n$. Výsledný zápis průsečíku \mathbf{D}^0 vypadá následovně:

$$\mathbf{D}^0 = \begin{pmatrix} X_1^{D0} & Y_1^{D0} \\ \vdots & \vdots \\ X_n^{D0} & Y_n^{D0} \end{pmatrix}. \quad (3-31)$$

Po dokončení výpočtového modulu bodu \mathbf{D}^0 je proveden výpočet parametrů pro zúžení průměru řezné části nástroje dle matice \mathbf{R} , kde

$$\mathbf{R} = \mathbf{D}^0 - \mathbf{C}^0. \quad (3-32)$$

Výsledek obsahuje parametry ζ_i a L_i ,

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \zeta_1 & L_1 \\ \vdots & \vdots \\ \zeta_n & L_n \end{pmatrix}. \quad (3-33)$$

Matice \mathbf{R} obsahuje skutečnou délku řezné hrany L_i , která je již vyšetřena z předchozího sub-programu, proto je z matice \mathbf{R} vyjádřeno zúžení průměru řezné části nástroje ζ_i z jejího prvního sloupce. Z tohoto důvodu je výsledek matice \mathbf{R} dále upraven do matice ζ_i ,

$$\zeta_i = \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \vdots \\ \zeta_n \end{pmatrix}, \text{ kde } i = 1 \dots n. \quad (3-34)$$

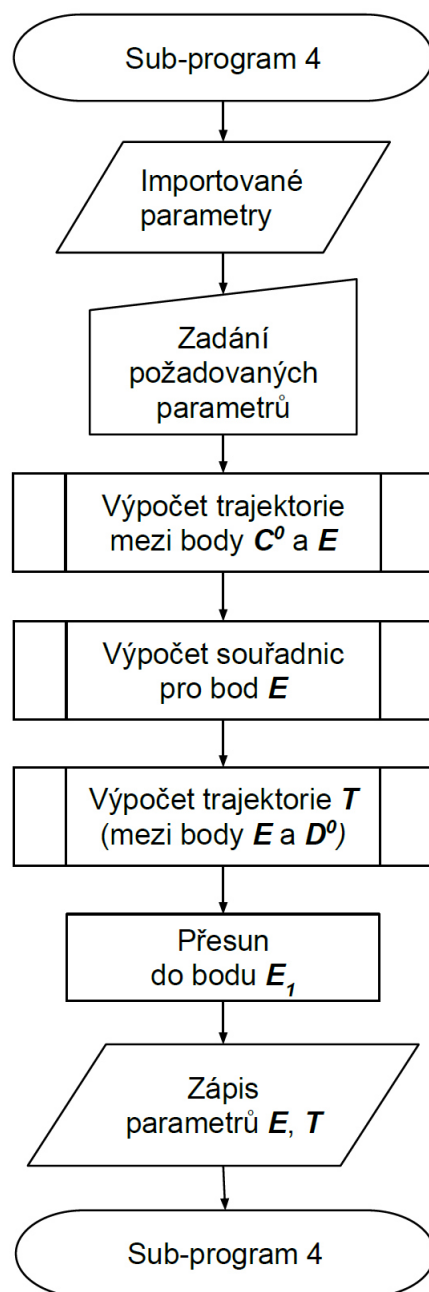
V závěru sub-programu 3 jsou zaznamenána tato vyšetřená data:

- \mathbf{C}^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^C$ absolutní poloha rotace i-tého břitu v určitém bodě
- \mathbf{D}^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^D$ absolutní poloha rotace i-tého břitu v určitém bodě
- ζ_i zúžení průměru řezné části nástroje i-tého břitu
- $z_{cam,diam}$ souřadnice Z kamerového pole na průměru nástroje

Sub-program 3 je zakončen na průměru nástroje na prvním břitu ve vyšetřené poloze \mathbf{C}_1^0 na místě, kde se nachází střed kamerového pole a výchozí pozice pro následující sub-program 4.

3.4.5 Stanovení výchozího bodu laserového paprsku

V této fázi, po vykonání sub-programu 3, je vyšetřeno cca 90% trajektorie všech břitů monolitního řezného nástroje. Zbývající část trajektorie spočívá ve stanovení výchozího bodu laserového paprsku na břitech nástroje a použití sub-programu 4, jehož algoritmy na základě získaných dat z předešlých sub-programů dopočítají chybějící část trajektorie (mezi body C^0 a E), která slouží např. jako technologický příjezd laserového paprsku k čelu nástroje, bod E (Obrázek 3-5).



Obrázek 3-13 Vývojový diagram pro sub-program 4

Ke vstupním parametrům tohoto sub-programu 4 patří prodloužení délky řezné hrany K_y před čelo monolitního řezného nástroje. Parametr K_y je konstantní pro všechny břity. Celkem je do sub-programu 4 importováno 9 parametrů:

- Z_n počet zubů
- C^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^A$ absolutní poloha rotace i-tého břitu v určitém bodě
- D^0 souřadnice průsečíků pro všechny břity
- Φ_{rel} relativní poloha rotace
- L_i skutečná délka řezné hrany i-tého břitu
- p_i stoupání šroubovice i-tého břitu
- ζ_i zúžení průměru řezné části nástroje i-tého břitu
- $z_{cam,diam}$ souřadnice Z kamerového pole na průměru nástroje

Po zadání vstupních hodnot dojde k určení trajektorie mezi body C^0 a E . Vypočtené parametry této trajektorie jsou opatřeny dolním indexem *cal*. Na základě zjištěných parametrů lze získat souřadnice bodu E a jeho absolutní hodnoty rotace monolitního řezného nástroje $\Phi_{abs,i}^E$. Matematické vyjádření těchto parametrů vypadá následovně,

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} X_1^{C^0} - \zeta_{cal,1} & Y_1^{C^0} - K_y \\ \vdots & \vdots \\ X_n^{C^0} - \zeta_{cal,n} & Y_n^{C^0} - K_y \end{pmatrix}, \quad (3-35)$$

$$\Phi_{abs,i}^E = \begin{pmatrix} \Phi_{abs,1}^A + \frac{\pi}{2} + \Phi_{cal,1} \\ \vdots \\ \Phi_{abs,n}^A + \frac{\pi}{2} + \Phi_{cal,n} \end{pmatrix}, \quad (3-36)$$

kde K_y konst.,
 $\zeta_{cal,i} = K_y \cdot tg\left(\frac{\zeta_i}{L_i}\right)$ pro $i = 1 \dots n$,
 $\Phi_{cal,i} = \frac{K_y}{p_i} \cdot 360$ pro $i = 1 \dots n$.

Po zjištění těchto hodnot je možné dopočítat parametry celkové trajektorie i-tého břitu mezi body E a D^0 ,

kde $\zeta_{celk,i} = \zeta_i + \zeta_{cal,i}$,
 $L_{celk,i} = L_i + K_y$,
 $\Phi_{celk,i} = \Phi_{rel} + \Phi_{cal,i}$ vše pro $i = 1 \dots n$.

Zmíněná trajektorie pro všechny břity je pro přehlednost zapsána v maticovém tvaru T , kde

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \zeta_{celk,1} & L_{celk,1} & \Phi_{celk,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \zeta_{celk,n} & L_{celk,n} & \Phi_{celk,n} \end{pmatrix}. \quad (3-37)$$

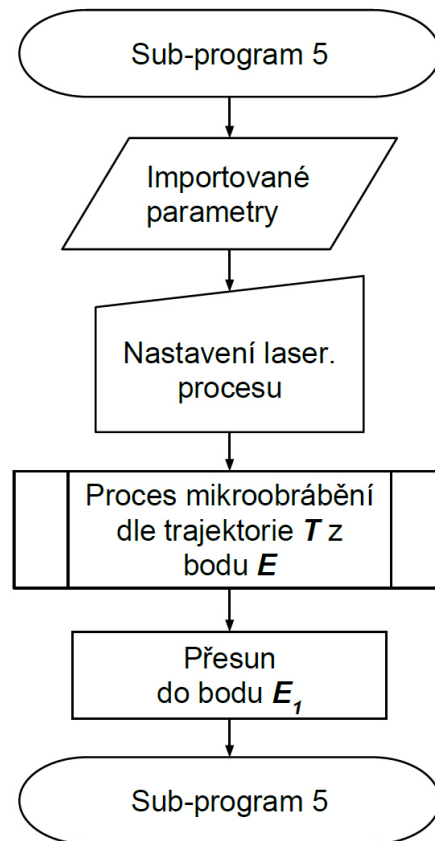
V závěru sub-programu 4 jsou poté identifikována následující vyšetřená data:

- E souřadnice bodu pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^E$ absolutní poloha rotace i -tého břitu v určitém bodě
- T zápis trajektorie v maticovém tvaru mezi body E a D^0 pro všechny břity

Sub-program 4 je zakončen na hodnotě průměru nástroje na prvním břitu ve vyšetřené poloze E_1 , ve které se nachází střed kamerového pole a výchozí pozice posledního sub-programu.

3.4.6 Laserový proces mikroobrábění na zaměřených břitech monolitního řezného nástroje

Poslední sub-program v řadě, podle vývojového diagramu hlavního parametrického programu (Obrázek 3-6), již slouží k vykonání algoritmů zahrnující laserové mikroobrábění na základě z geometricky analyzované trajektorie z předešlých sub-programů.



Obrázek 3-14 Vývojový diagram pro sub-program 5

K importovaným parametrům geometricky zanalyzované trajektorie patří:

- x_{osa} poloha osy nástroje ve směru X
- Z_n počet zubů
- $Z_{cam,diam}$ souřadnice Z kamerového pole na průměru nástroje
- E souřadnice bodu pro všechny břity
- $\Phi_{abs,i}^E$ absolutní poloha rotace i -tého břitu v určitém bodě
- T zápis trajektorie v maticovém tvaru mezi body E a D^0 pro všechny břity

V této fázi jsou již definovány procesní parametry pro laserové mikroobrábění, kterému byla věnována kapitola 2. Tzn., že nastavení procesních parametrů, rozmítacích strategií, možnosti tvarování laserového paprsku, aj. se zrealizuje podle možností používaného laserového systému. V této fázi lze v sub-programu 5 nastavit způsob polohování kinematiky laserového stroje a tím i mikroobráběného monolitního řezného nástroje vůči rozmítání laserového paprsku dvěma způsoby:

- pomocí indexace
- pomocí synchronního pohybu

Po nadefinování všech vstupních parametrů je vykonán proces mikroobrábění podle T z bodu E , přičemž výchozí bod tohoto sub-programu 5 leží na prvním břitu nástroje v bodě E_1 . Před ukončením sub-programu 5 je střed kamerového pole vrácen opětovně do polohy E_1 .

4 Principy tvorby makrogeometrických prvků na monolitních řezných nástrojích

Tato kapitola pojednává o způsobech radiálního laserového mikroobrábění makrogeometrických entit v oblasti monolitních řezných nástrojů. Zároveň propojuje autorem navržené metodiky v oblasti ablačních procesů (kapitola 2) a návrhu zaměření břitů monolitních řezných nástrojů (kapitola 3).

V současné praxi je laserové mikroobrábění masově využíváno pro výrobu utvařečů třísek, které jsou vytvářeny na površích supertvrdých řezných materiálů, zejména PCD. Z rešeršní studie vyplývá, že úprava této skupiny řezných materiálů pomocí laserového mikroobrábění je aplikována jednak na rovinných plochách [18; 34; 36; 82] vyměnitelných břitových destiček, jednak i v malé míře na monolitních řezných nástrojích v oblasti rovinných ploch. Rozšíření laserového mikroobrábění do oblasti obecných ploch monolitních řezných nástrojů lze docílit za pomoci jejich zanalyzované geometrie (rozměrové, tvarové), ze které jsou známé přesné geometrické informace o průběhu ostří jednotlivých břitů v pracovním prostoru laserového stroje. Kombinací laserového mikroobrábění s přesnou relativní polohou laserového paprsku vůči břitům monolitního řezného nástroje lze docílit inovativními a dosud nestandardními úpravami makro a mikrogeometrických prvků, které jsou již zmíněny v úvodu kapitoly 1.3. S přesně zaměřenými břitmi monolitního řezného nástroje v pracovním prostoru laserového stroje se otevírají dvířka novým způsobům geometrických modifikací břitů za pomoci laserového mikroobrábění. Z důvodu velmi širokého užití navržených metodik z předešlých kapitol 2 a 3 se tato kapitola vymezuje pouze na popis technologických přístupů laserového mikroobrábění v oblasti makrogeometrických úprav, konkrétně utvařečů třísek na břitech monolitních řezných nástrojů.

4.1 Nové technologické přístupy v oblasti utvařečů třísek

V případě znalosti přesné relativní polohy laserového paprsku vůči břitům monolitního řezného nástroje a vyšetřených procesních parametrů laserového paprsku lze vytvořit nové technologické přístupy, jimiž lze realizovat výrobu utvařečů třísek v obecných plochách monolitního řezného nástroje.

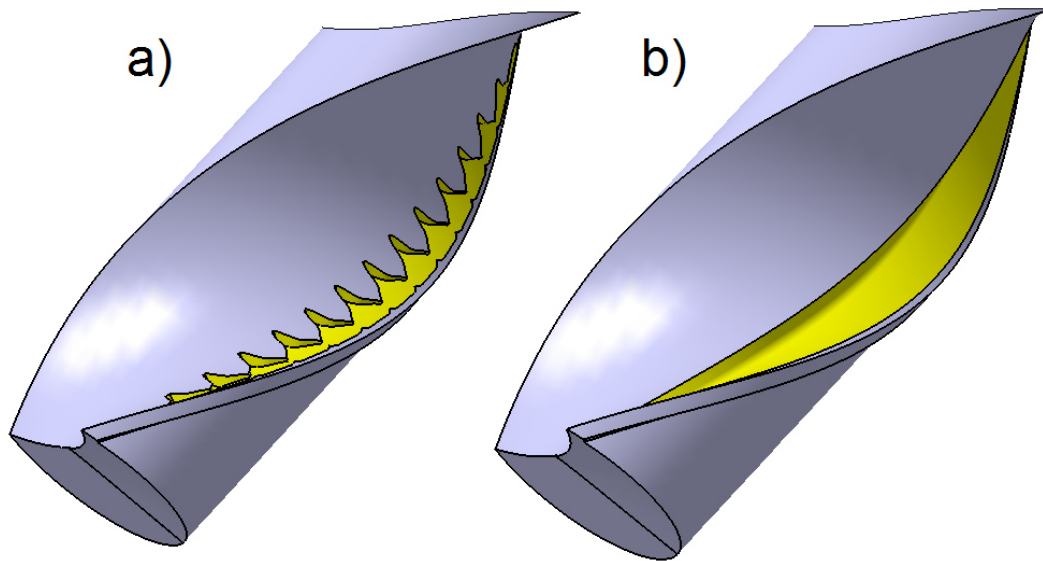
Stěžejní částí této práce je rozvedení obecného popisu sub-programu 5 (kap. 3.4.6), ve kterém se vyskytuje předdefinovaný postup: Proces mikroobrábění je uskutečněn podle zapsané trajektorie v maticovém tvaru T z bodu E , kde parametry zaznamenané v T (vztah 3-37) načítají data vyšetřených parametrů pro zúžení průměru řezné části nástroje i -tého břitu $\zeta_{celk,i}$, skutečnou délku řezné hrany i -tého břitu $L_{celk,i}$ a relativní polohu rotace i -tého břitu $\Phi_{celk,i}$, kde pro $i = 1 \dots n$.

V případě technologie výroby utvařečů třísek lze principiálně zvolit dva způsoby polohování kinematiky laserového stroje vůči laserovému paprsku v podobě

- indexace,
- synchronizace.

Využitím těchto dvou způsobů polohování lze docílit různých výrobních variant tvorby utvařečů třísek. V případě indexovaného polohování lze vytvořit segmentové utvařeče třísek (obrázek 4-1a), při synchronní variantě polohování lze vytvořit plynulé utvařeče třísek

s konstantním průřezem na celé délce řezné části mikroobráběného monolitního nástroje (obrázek 4-1b).



Obrázek 4-1 Dosažitelné typy utvařečů třísek laserovou technologií: a) segmentový; b) plynulý

4.1.1 Specifikace třetího parciálního cíle disertační práce

Oba zmíněné způsoby polohování po trajektorii zapsané v maticovém tvaru T mají svá specifika. Specifičnost těchto makrogeometrických modifikací monolitních řezných nástrojů, včetně jejich okrajových podmínek, není v žádné literatuře zmiňována. V případě výroby utvařečů třísek za pomoci indexace kinematiky laserového systému (Obrázek 4-1a) lze využít standardních rozmítacích strategií laserového paprsku. Nestandardní prvky uvedeného polohování lze experimentálně vyšetřit. V případě výroby utvařečů třísek za pomoci synchronního pohybu kinematiky laserového stroje spolu s laserovým paprskem po trajektorii dle zápisu T (Obrázek 4-1b) je nutné navrhnout zcela nový technologický přístup s určením okrajových podmínek a to z důvodu nestandardního řešení strategie rozmítání laserového paprsku.

Vyšetření obou technologických přístupů si autor ukládá jako třetí parciální cíl disertační práce.

U tvorby segmentových makrogeometrických prvků se zejména jedná o experimentální vyšetření přechodových oblastí jednotlivých tvarových segmentů a zabezpečení jejich plynulého navázání se zanedbatelnými tvarovými odchylkami.

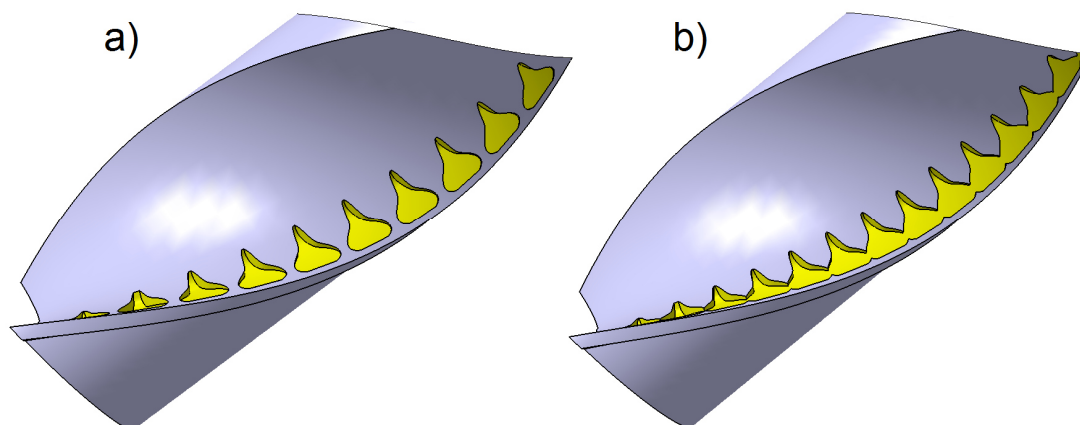
Stěžejní částí uvedeného parciálního cíle je však ucelený návrh technologie výroby utvařečů třísek za pomoci synchronního pohybu. Technologie výroby utvařečů třísek za pomoci synchronního pohybu vyžaduje nový návrh, protože se nedá uplatnit standardní rozmítací technika laserového paprsku za pomoci liniového či konturového šrafování. U tohoto principu tvorby utvařečů třísek nelze rovněž uplatnit 3D modely geometrických entit, z důvodu charakteru zvoleného způsobu polování. Tvary, konkrétně řezy, geometrických entit musí být definovány matematickými funkcemi, na základě kterých jsou určeny parametry pro rozmítání laserového paprsku. Z těchto nastavení vyplývají hodnoty dalších parametrů sloužící pro velikosti posuvů jednotlivých pracovních os použitého laserového systému, které musí být korektně stanoveny v souladu s rozmítací strategií laserového paprsku během celé výroby makrogeometrických entit na všech břitech monolitních řezných nástrojů.

4.2 Výroba utvařeče třísek pomocí indexace kinematiky laserového systému

Při výrobě utvařečů třísek za pomoci indexace kinematiky laserového stroje lze použít standardní metody rozmítání laserového paprsku pro radiální mikroobrábění. V případě výroby těchto makrogeometrických entit je nutné počáteční bod na břitu nástroje (bod E vč. $\Phi_{abs,i}^E$) definovat v určité vzdálenosti na břitech nástroje. Touto vzdáleností jsou zároveň definovány referenční body prvních geometrických entit na všech břitech sloužící pro výrobu prvního segmentu utvařeče třísek.

Pro další vytvářené geometrické entity na břitech monolitních nástrojů je nutné zvolit velikost kroku dT , jenž určuje vzdálenost mezi referenčními body dalších geometrických entit ležící na geometricky zanalyzovaných trajektoriích všech břitů – matice T . V tomto ohledu mohou nastat dva stavy:

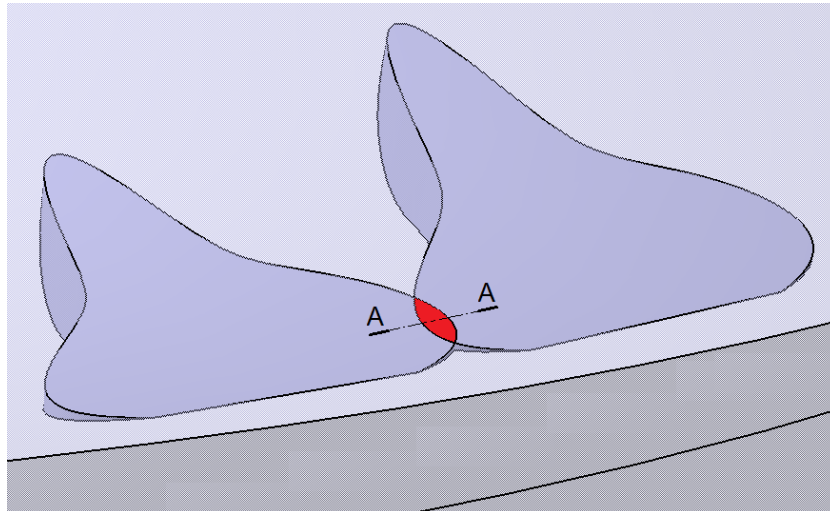
- velikost kroku dT je větší, než je šířka vytvářeného segmentu (Obrázek 4-2a)
- velikost kroku dT je menší, než je šířka vytvářeného segmentu (Obrázek 4-2b)



Obrázek 4-2 Vliv velikosti kroku dT na výsledný utvařeč třísek a) bez překrytí entit b) s překrytím entit

V případě prvního stavu lze utvařeče třísek vyrobit standardním způsobem, protože zde nedochází k překryvu geometrických entit. Při definování utvařečů třísek dle stavu prezentovaného v obrázku 4-2b je nutné vyřešit přechodové oblasti geometrických entit. Tato oblast je znázorněna na dvou geometrických entitách (Obrázek 4-3), kde je vyznačena červenou barvou. V těchto průnikových oblastech by v případě použití stejných geometrických entit (dle obrázku 4-2a) docházelo při laserovém mikroobrábění k „podřezávání“ požadovaného tvaru, protože je zde objem geometrických entit tzv. „zdablován“. Z tohoto důvodu je nutné, aby geometrické entity v těchto přechodových oblastech byly tvarově uzpůsobeny tak, aby jejich tvary ve výsledku odpovídaly finálnímu návrhu.

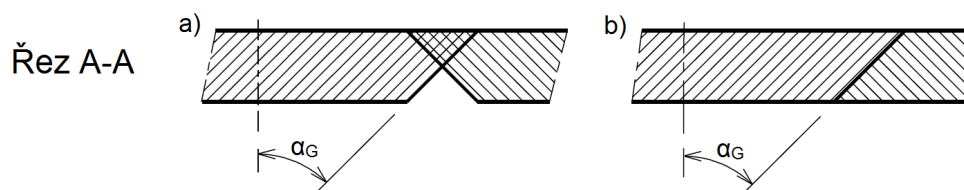
Modifikace tvarů geometrických entit v přechodových oblastech jsou dle autorova návrhu v následujících podkapitolách experimentálně vyšetřeny.



Obrázek 4-3 Přechodová oblast geometrických entit

4.2.1 Experimentální vyšetření tvaru geometrické entity v přechodové oblasti

Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k návrhu dvou variant tvarových modifikací, jejichž výsledkem je odstranění přebývajícího objemu v přechodové oblasti, který vznikl průnikem geometrických entit. Základní varianty tvarových modifikací jsou definovány v obrázku 4-4, který detailněji ukazuje řez A-A z obrázku 4-3.



Obrázek 4-4 Zobecněné varianty tvarových úprav přechodových oblastí

Tyto varianty tvarových modifikací prezentují dva typy úkosů, které ve variantě dle obrázku 4-4a naznačují překrytí v určitém poměru obou tvarů pod úhlem α_G . Výhoda této varianty tkví v použití pouze jedné geometrické entity pro celý monolitní nástroj, protože tvar v přechodové oblasti je v rovině řezu A-A symetrický. V případě varianty dle obrázku 4-4b dochází k přesnému navázání obou tvarů pod úhlem α_G . Tento způsob již vyžaduje pro výrobu utvařečů třísek na celém monolitním nástroji dvě geometrické entity, z nichž první je použita pouze jednou na začátku umístění řady geometrických entit (v bodě **E**), a ta druhá na všech ostatních místech. Úhel α_G je v experimentu u obou variant měněn v rozsahu $\langle 15^\circ; 75^\circ \rangle$, po kroku 15° .

Obě zmíněné varianty byly experimentálně vyšetřeny při konstantních podmínkách tak, aby se výhradně projevil vliv použitého tvaru v těchto přechodových oblastech. Experiment byl proveden na slinutém karbidu K10 (kap. 2.4.1.1). Abláční proces byl pro tento materiál nastaven dle výsledků dosažených v kap. 2.4.5, tzn. $F_{opt} = 0,798 \text{ J/cm}^2$ při IIIH, $S_p = 90 \%$, $H = 190 \%$ a $v_f = 700 \text{ mm/s}$. Hloubka navržených variant geometrických entit byla $h = 0,2 \text{ mm}$. Vyhodnocení tvarových odchylek v přechodových oblastech bylo provedeno 500x zvětšením na bezkontaktním měřicím přístroji Alicona IFM G4.

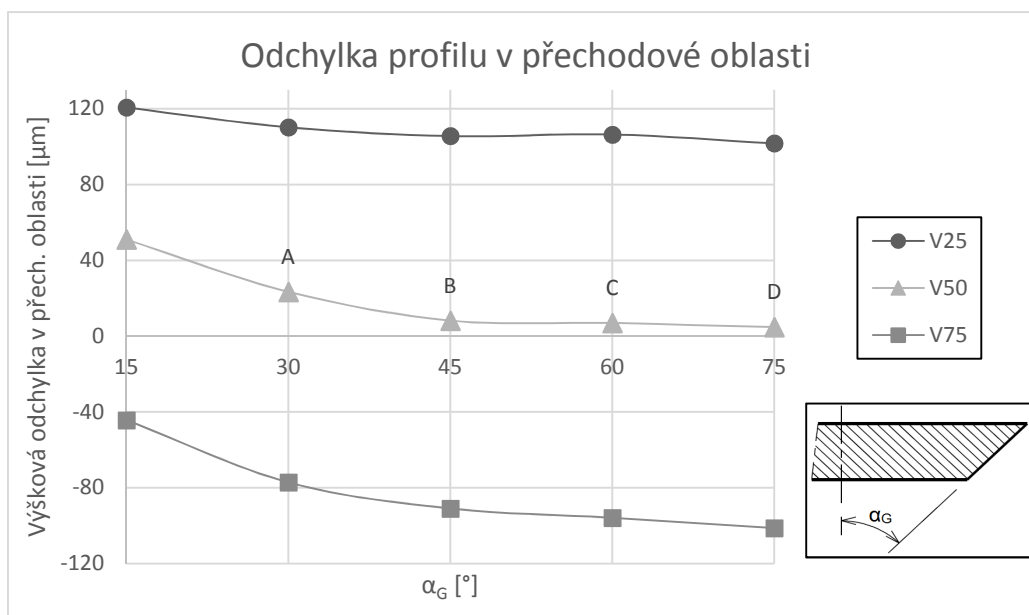
4.2.1.1 Varianta s překrytím modifikovaných tvarů pod úhlem α_G

V této variantě bylo hlavním cílem potvrdit či vyvrátit hypotézu, že přechodové oblasti musí mít redukovaný objem na své poloviční hodnoty, proto byly navrženy tři různé úrovně překrytí objemu: 25% (V_{25}), 50% (V_{50}) a 75% (V_{75}). Všechny úrovně překrytí prezentuje obrázek 4-5. Dalším cílem bylo nalezení vhodného úhlu α_G testovaných úkosů v přechodové oblasti, protože velikost úhlu α_G významně ovlivňuje velikost odchyly a plynulost náběhu překrývajících se přechodových oblastí.



Obrázek 4-5 Různé úrovně překrytí přechodových oblastí v procentuálním vyjádření

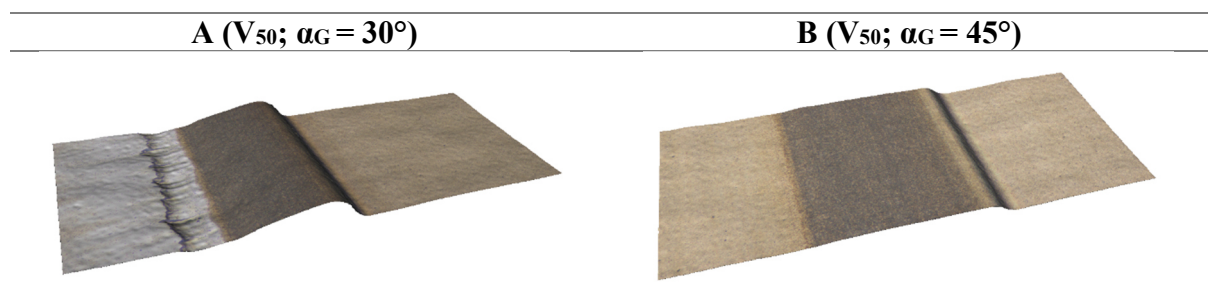
Výsledkem této části experimentu je zjištění vhodné úrovně překrytí při nalezení takového úhlu α_G , při kterém je výšková odchylna v přechodové oblasti minimální. Získané výsledky v grafu 4-1 potvrzují hypotézu, že nejvhodnější způsob navázání další geometrické entity je při 50% překrytí jeho modifikovaného tvaru (viz Obrázek 4-5b). Minimální odchylna přechodové oblasti je pozorovatelná v rozmezí úhlu $45^\circ < \alpha_G < 75^\circ$.



Graf 4-1 Vliv úrovně překrytí objemů a úhlu α_G na velikost výškových odchylek v přechodové oblasti

Níže uvedená tabulka již shrnuje detaily přechodových oblastí vybraných z grafu 4-1, jenž znázorňuje odchylky od detailu A = 23,4μm, až po detail D = 4,8μm

Tabulka 4-1 Detail přechodové oblasti (500x)



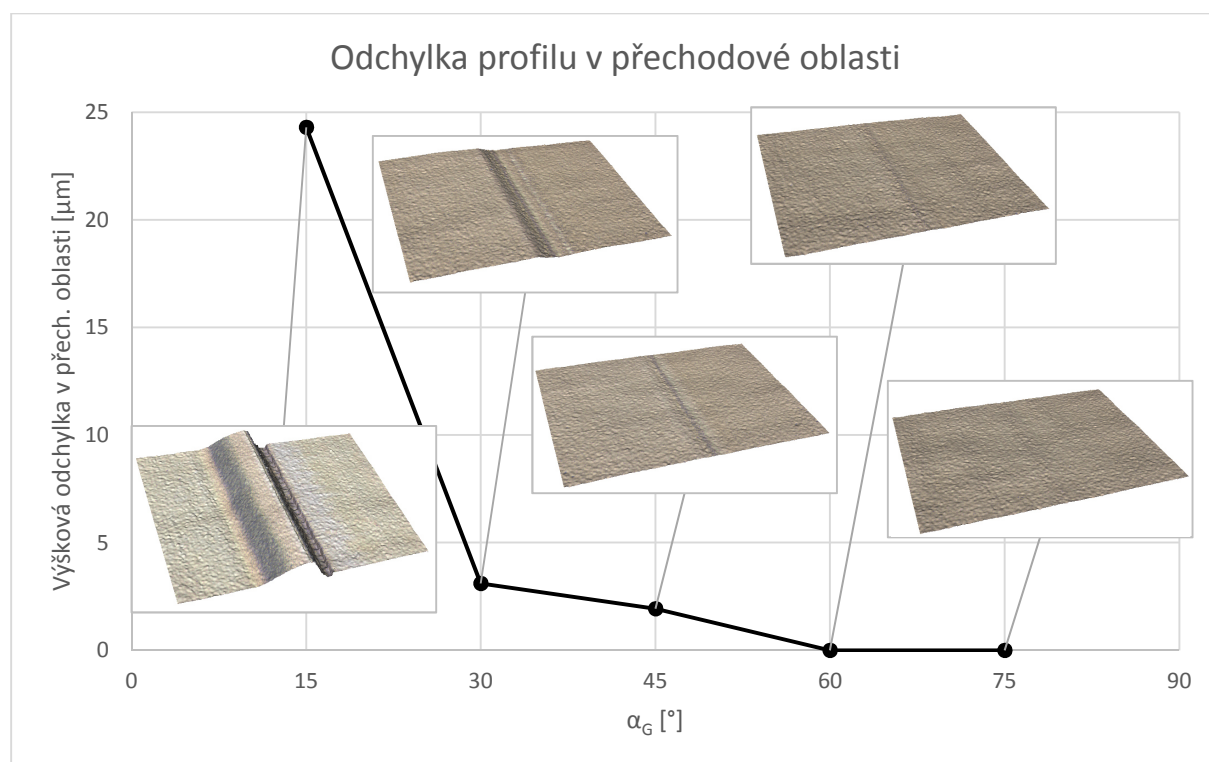
C (V_{50} ; $\alpha_G = 60^\circ$)

D (V_{50} ; $\alpha_G = 75^\circ$)



4.2.1.2 Varianta s navázáním modifikovaných tvarů pod úhlem α_G

U experimentu, kde se modifikovaný tvar následně navazoval na další v řadě (Obrázek 4-4b), byl pouze testován vliv úhlu α_G na velikost odchylky v přechodové oblasti. V případě této varianty došlo k velmi malým přechodovým odchylkám. Graf 4-2 prezentuje velikost výškových odchylek v přechodových oblastech včetně naměřených detailů ve stanoveném rozsahu α_G . Již při úhlu $\alpha_G = 30^\circ$ bylo dosaženo výškové odchylky 3,1 μm . Při úhlech $60^\circ < \alpha_G < 75^\circ$ byla naměřená velmi zanedbatelná odchylka, která nebyla vyčíslena (viz níže zobrazené detaily v grafu 4-2).



Graf 4-2 Vliv úhlu α_G na velikost výškových odchylek v přechodové oblasti u varianty s navázáním následujících modifikovaných tvarů – detaily (500x)

4.3 Výroba utvařečů třísek pomocí synchronního polohování kinematiky laserového systému

Návrh technologie výroby utvařečů třísek za pomoci synchronního polohování kinematiky laserového systému popisuje autorem navržený způsob laserového mikroobrábění, který využívá nestandardního rozmítání laserového paprsku k výrobě tvarových geometrických entit. Základní princip níže charakterizovaného návrhu dává další potenciál v jeho využití, kde umožňuje další nestandardní úpravy, např. tvorbu drážek břitů pro odchod třísek na břitech mikronástrojů.

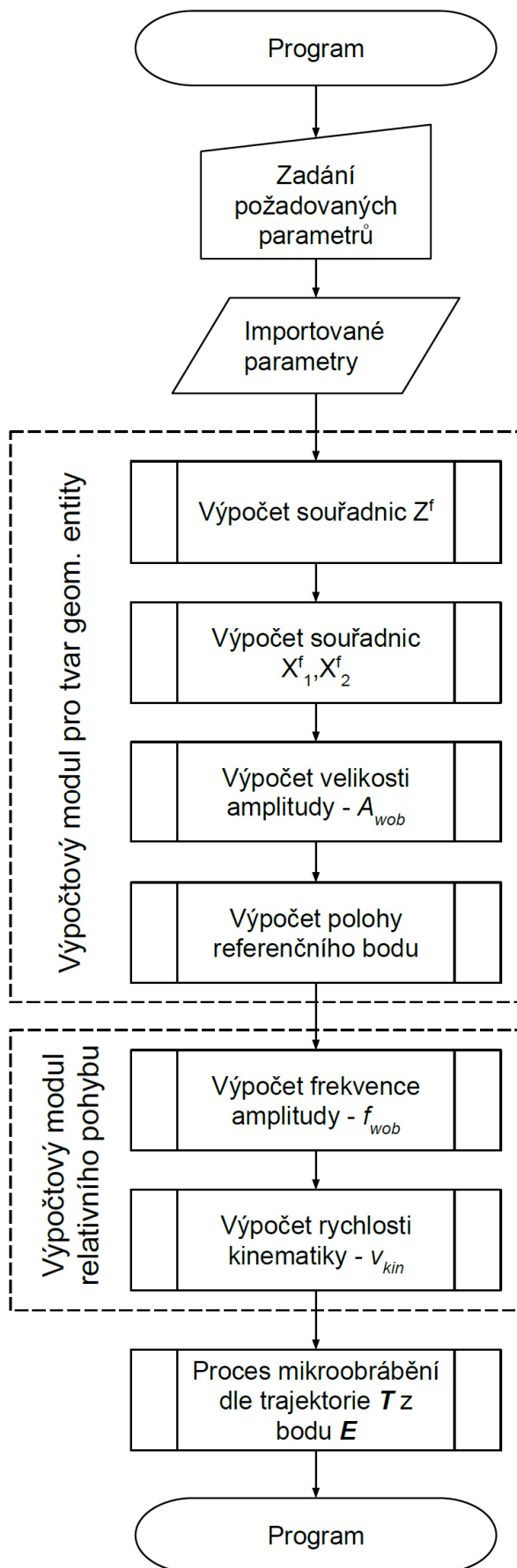
V případě výroby utvařečů třísek v obecných plochách monolitního řezného nástroje při synchronním polohování nelze využít geometrické entity ve formě CAD modelů, protože řídicí subsystém neumožňuje synchronizaci rozmítání laserového paprsku dle 3D CAD modelu s kinematikou laserového systému. Stejný problém nastává u importovaných objektů s příponou *.dxf či *.dwg. Jediným způsobem umožňující synchronizaci rozmítání pomocí galvo skeneru s kinematikou laserového systému je jednoduché rozmítání laserového paprsku na základě tzv. „wobble“ parametrů. Tento způsob je stručně definován v kap. 2.1.5.2. Právě možnost nastavení dynamického relativního pohybu je klíčem k návrhu nové technologické varianty laserového mikroobrábění.

Aby tato jednoduchá funkcionalita standardních galvo skenerů mohla vytvářet požadované tvary, konkrétně řezy utvařečů třísek, musí být „wobble“ parametry dynamicky nastavovány v závislosti na definovaném průřezu utvařečů třísek, který je nutné charakterizovat matematickým popisem křivek. V níže uvedeném vývojovém diagramu (Obrázek 4-6) je stanovena posloupnost dějů nově vzniklého technologického způsobu laserového mikroobrábění, který je definován pomocí vstupních parametrů a předdefinovaných postupů. Tyto předdefinované postupy jsou v těle programu opticky rozdělené do dvou hlavních výpočtových modulů:

1. výpočtový modul pro nadefinování tvaru geometrické entity
2. výpočtový modul pro vyšetření relativního pohybu

Cílem prvního modulu je získání velikosti amplitudy zvoleného „wobble“ parametru A_{wob} a jeho polohy referenčního bodu (parametr Ref) na základě matematicky vyjádřených křivek. Další výpočtový modul již navazuje na vypočítané hodnoty z již předešlého modulu, kde je důležité vyšetřit relativní pohyb mezi kmitáním galvo skeneru, tzv. výpočet frekvence amplitudy f_{wob} a výpočet rychlosti kinematiky v_{kin} . Po vyšetření všech parametrů z těchto dvou výpočtových modulů se může přistoupit k poslednímu předdefinovanému postupu, který již slouží k samostatnému procesu mikroobrábění, jenž načítá veškeré procesní parametry laserového systému včetně dat o trajektoriích na jednotlivých břitech monolitního řezného nástroje – zápisy hodnot z maticového formátu T a E .

V následujících podkapitolách třetí úrovně je charakterizován postup řešení výroby utvařečů třísek pro uvedený typ polohování.



Obrázek 4-6 Vývojový diagram pro výrobu utvařečů třísek

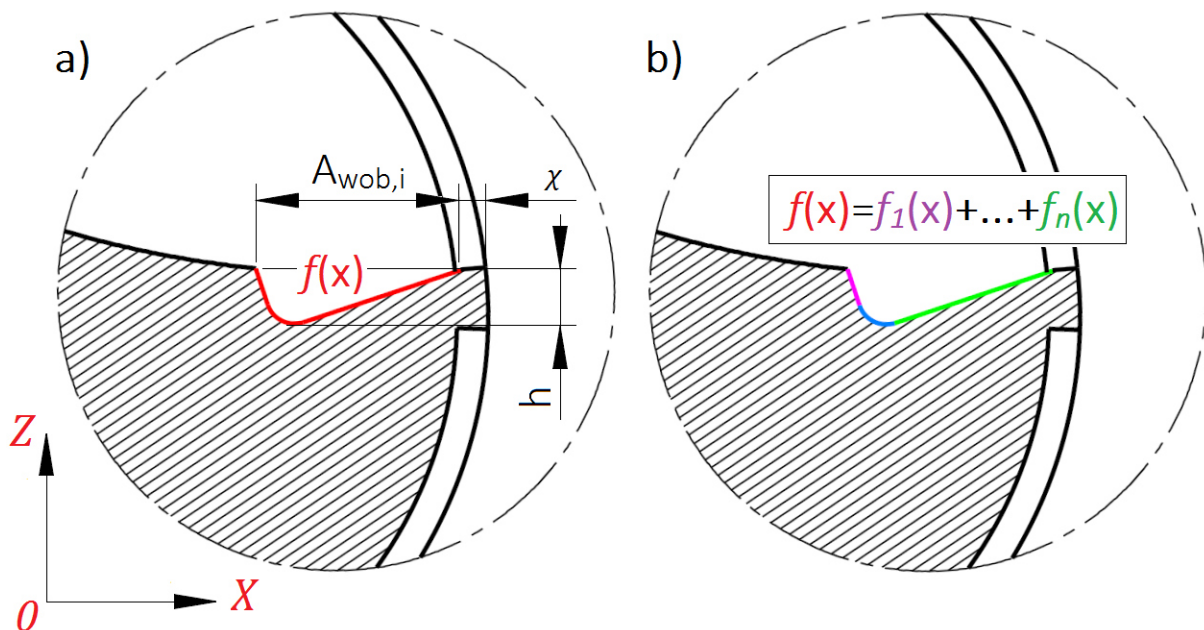
4.3.1 Výpočtový modul pro nadefinování tvaru geometrické entity

Postup řešení této nové technologické varianty zahrnuje nadefinování vstupních a importování již vyšetřených parametrů. Ohledně importovaných parametrů lze hovořit o datech nesoucích informace o bodech jednotlivých břitů monolitního řezného nástroje - matice T , a souřadnicích k jejich počátečním bodům – matice E . Ohledně nadefinování vstupních parametrů se jedná především o parametry procesní, ovlivňující velikost energie v pulsu E_p laserového paprsku. Mezi další vstupní parametry, které je nutné stanovit, jsou:

- χ definovaná šířka fazety
- h hloubka definovaného utvařeče třísek
- z_{abl} hloubka ablace na jednu vrstvu
- $f(x)$ křivka vyjadřující průřez tvaru utvařeče třísek

Výše uvedený vstupní parametr, konkrétně hloubka ablace z_{abl} , závisí na relativním pohybu rozmítání laserového paprsku a kinematiky laserového systému, protože synchronizace těchto pohybů ovlivňuje hloubku dosažené ablace z_{abl} . Způsob, jakým je tento parametr vyšetřen, je charakterizován v kapitole 4.3.2.

Křivka $f(x)$ definuje okrajové podmínky, jež vytvářejí výsledný průřez tvaru potřebného utvařeče třísek. Tato křivka $f(x)$ zde slouží k vyšetření množiny bodů ležících v rovině kolmé na osu nástroje – XZ (dle stanoveného značení víceosé kinematiky viz obrázek 3-4). Na základě těchto souřadnic jsou následně vyšetřeny potřebné parametry pro velikost amplitudy i -té vrstvy $A_{wob,i}$ v určité vzdálenosti od řezných hran břitů monolitních řezných nástrojů. Obrázek 4-7a znázorňuje křivku $f(x)$ jako obecný průřez tvaru utvařeče třísek. V případě složitějšího průřezu tvaru lze křivku $f(x)$ rozdělit na části, jejichž následné matematické vyjádření je jednodušší (obrázek 4-7b).



Obrázek 4-7 a) křivka $f(x)$ definující tvar průřezu utvařeče v rovině kolmé na osu nástroje, b) dekompozice funkce křivky $f(x)$ pro jednodušší definování tvaru průřezu

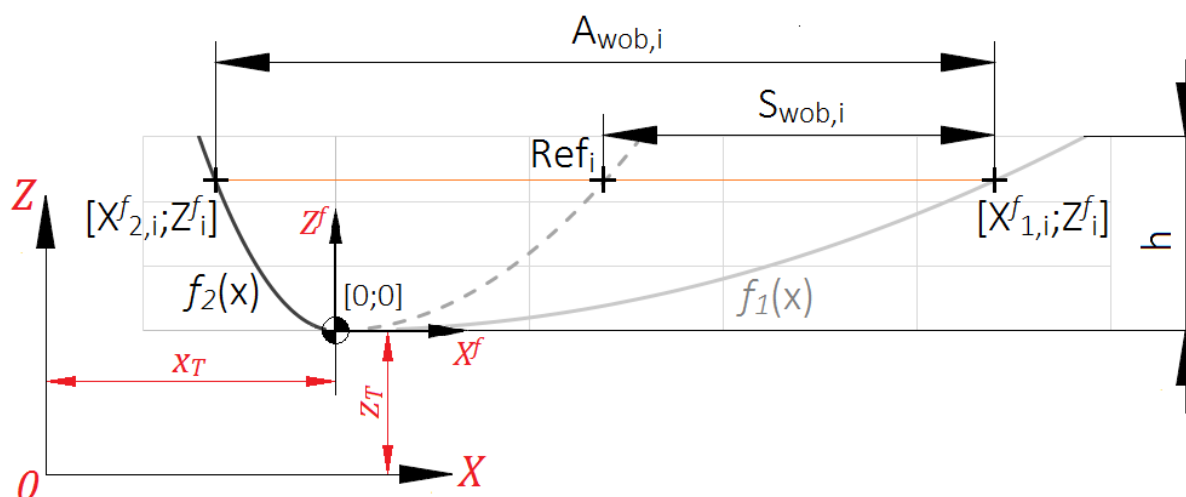
Tímto způsobem lze vytvořit rozličné variace tvarů průřezů, které vznikají kombinací jednoduchých křivek, např.

- přímka, kružnice, elipsa,
- exponenciální/logaritmické křivky,
- polynomické křivky,
- hyperbolické křivky,
- ostatní.

Jedinou podmínkou při definování tvaru průřezu je nutnost dodržení spojitosti křivek $f(x)$. Pro vysvětlení principu tohoto výpočtového modulu je nutné nadefinovat následující proměnné parametry:

- Z_i^f souřadnice Z^f i-té vrstvy
- $X_{1,i}^f$ kořen 1 souřadnice X^f i-té vrstvy dle $f(x)$
- $X_{2,i}^f$ kořen 2 souřadnice X^f i-té vrstvy dle $f(x)$
- $A_{wob,i}$ velikost amplitudy i-té vrstvy
- $S_{wob,i}$ střední velikost amplitudy i-té vrstvy
- Ref_i poloha referenčního bodu amplitudy i-té vrstvy

Tyto nově definované parametry jsou znázorněny na obrázku 4-8. Pro potřeby vyšetření všech těchto parametrů je zaveden nový souřadný systém, jehož nulový bod je vůči nulovému bodu nástroje (Obrázek 3-4) posunut ve směru os x_T a z_T .



Obrázek 4-8 Schématické vyjádření výpočtového modulu tvaru průřezu geometrické entity v rovině kolmé na osu nástroje XZ

V první řadě, dle vývojového diagramu v obrázku 4-6, je proveden výpočet souřadnic Z_i^f . Jelikož jsou v této fázi neznámé veškeré souřadnice bodů k určení velikosti amplitudy i-té vrstvy $A_{wob,i}$, kde $i = 1 \dots n$, na základě křivky $f(x)$, je proto nutné nejprve vyšetřit souřadnic Z_i^f , protože

$$Z_i^f = f(h; z_{abl}). \quad (4-1)$$

Dle závislosti ve vztahu 4-1 je vypočtena skupina hodnot náležících souřadnic Z_i^f . Než dojde k výpočtu této části hodnot, je nejprve nutné stanovit počet generovaných hodnot i . Velikost této hodnoty zároveň určuje počet vykonaných cyklů v předdefinovaných postupech celého vývojového diagramu. Počet generovaných hodnot i je vyjádřen následovně,

$$i = \frac{h}{z_{abl}}. \quad (4-2)$$

Pro následný matematický zápis bude nadále užíván tvar $i = 1 \dots n$. Při znalosti počtu generovaných hodnot i je nutné, pro snadné vyšetření všech bodů a jeho souřadnic, stanovit počáteční bod křivky $f(x)$, který leží ve svém extrému, viz obrázek 4-8. Po těchto krocích lze určit skupinu hodnot náležících souřadnici Z^f_i , kde

$$Z^f_i = h - z_{abl} \cdot i, \text{ pro } i = 1 \dots n. \quad (4-3)$$

V této fázi lze nyní vypočítat další skupinu hodnot, které naleží kořenům $X^f_{1,i}$ a $X^f_{2,i}$, na základě souřadnice Z^f_i a křivky $f(x)$, protože

$$X^f_{1,i}, X^f_{2,i} = f(f(x), Z^f_i), \text{ pro } i = 1 \dots n. \quad (4-4)$$

Nyní podle vztahů 4-3 a 4-4 lze vypočítat množinu bodů ležících na křivce $f(x)$. Z těchto dat je následně vyšetřena velikost amplitudy $A_{wob,i}$ pro příslušné vrstvy $i = 1 \dots n$, kterou lze vyjádřit pomocí kořenů souřadnic $X^f_{1,i}$ a $X^f_{2,i}$. V tomto případě je nutné vyjádřit absolutní hodnoty kořenů souřadnic $X^f_{1,i}$ a $X^f_{2,i}$, proto vztah k vypočtení velikosti amplitudy $A_{wob,i}$ je následující

$$A_{wob,i} = |X^f_{1,i}| + |X^f_{2,i}|, \text{ pro } i = 1 \dots n. \quad (4-5)$$

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 4.3, tak rozmitání laserového paprsku pomocí „wobble“ parametrů je funkcí jednoduchou. Použitím příkazů umožňujících tento způsob rozmitání laserového paprsku by se s takto vyšetřenými parametry vytvářel pouze tvar průřezu, který by byl symetrický podle osy Z^f v místě určené obsluhou laserového systému.

Pro dodržení požadovaného tvaru průřezu utvařečů třísek je nutné upravit algoritmus tak, aby pro každou i -tou vrstvu vypočítal novou polohu referenčního bodu Ref_i každé i -té amplitudy. Změna poloh referenčních bodů je nutná u všech druhů amplitud, znázorněných v obrázku 2-12, protože referenční body všech způsobů rozmitání leží v jejich středech.

K vyšetření polohy referenčního bodu Ref_i každé i -té amplitudy je nejprve nutné stanovit střední velikost amplitudy i -té vrstvy $S_{wob,i}$, která je vyjádřena vztahem

$$S_{wob,i} = \frac{A_{wob,i}}{2}, \text{ pro } i = 1 \dots n. \quad (4-6)$$

Stanovením střední velikosti amplitudy $S_{wob,i}$ lze graficky vyjádřit křivku (obrázek 4-8, přerušovaná křivka), na které leží referenční body Ref_i každé i -té amplitudy. Výpočetně lze tento bod vyjádřit následovně,

$$Ref_i = X^f_{1,i} - S_{wob,i}, \text{ pro } i = 1 \dots n. \quad (4-7)$$

V této fázi jsou nyní vyšetřeny veškeré parametry ovlivňující tvar průřezu geometrické entity pro tvorbu utvařečů třísek vlivem synchronního polohování kinematiky laserového systému. K nadefinování „wobble“ parametrů je kromě velikosti amplitudy i -té vrstvy $A_{wob,i}$ a polohy referenčního bodu i -té amplitudy Ref_i nutné ještě vyšetřit rychlost rozmitání laserového paprsku, zejména jeho frekvenci kmitání f_{wob} spolu s relativním pohybem kinematiky laserového systému dle bodů na břitech monolitního řezného nástroje - matice T .

4.3.2 Výpočtový modul relativního pohybu

Mezi dva hlavní parametry, které definují rozmítání laserového paprsku za pomoci „wobble“ funkce, patří velikost amplitudy A_{wob} a frekvence kmitání této amplitudy f_{wob} . V případě proměnné velikosti amplitudy $A_{wob,i}$, kvůli měnícímu se tvaru průřezu, je nutné dodržet proměnnou frekvenci kmitání $f_{wob,i}$ v takových hodnotách, aby hloubka ablace z_{abl} byla v každé mikroobráběné vrstvě konstantní. Pokud by frekvence kmitání $f_{wob,i}$ byla ponechána na konstantní hodnotě při současném zmenšování velikosti amplitudy $A_{wob,i}$, tak by vlivem měnícího se průřezu tvaru utvařeče třísky docházelo ke zmenšování vzdálenosti mezi středy jednotlivých pulsů ve směru rozmítané amplitudy a tím by docházelo ke zvyšování faktoru překrytí pulsů S_p , který by měl za následek prudké zvyšování hloubky ablace z_{abl} .

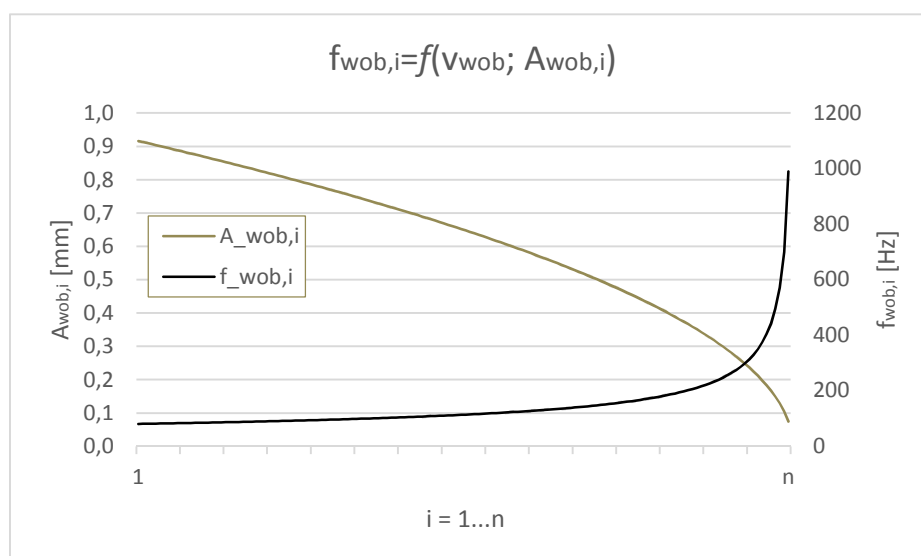
Frekvence rozmítání f_{wob} je ze své základní podstaty definována jako obrácená hodnota časové periody, která charakterizuje počet cyklů za jednotku času (Hz). V případě konkrétních hodnot parametrů $A_{wob,i}$ (určující velikost dráhy) a $f_{wob,i}$ lze získat hodnotu rychlosti polohování galvo zrcátek příslušného galvo skeneru - parametr v_{wob} .

Na základě návrhu této nové technologie vznikla hypotéza, že dodržением konstantní rychlosti polohování galvo zrcadel v_{wob} lze dosáhnout konstantního zachování hloubky ablace z_{abl} , který je ekvivalentní se standardními rozmítacími technikami šrafování. Současné vědecké zdroje neobsahují tuto hypotézu, proto byl autorem navržen experiment, jenž potvrdil zachování hloubky ablace z_{abl} , resp. tvaru průřezu dle $f(x)$ a hloubky průřezu h při dodržení konstantní rychlosti polohování galvo zrcadel v_{wob} .

Po zvolení konstantní hodnoty parametru v_{wob} , která může být nastavena dle okrajových podmínek laserového systému, konkrétněji dle limitních parametrů použitého galvo skeneru, lze stanovit vztah pro výpočet proměnné frekvence rozmítání $f_{wob,i}$ v závislosti na velikosti amplitudy i -té vrstvy $A_{wob,i}$, kde

$$f_{wob,i} = \frac{v_{wob}}{A_{wob,i}}, \text{ pro } i = 1 \dots n. \quad (4-8)$$

Na základě tohoto vztahu jsou získány průběhy obou hlavních parametrů, které se podílejí na konstantní hloubce ablace z_{abl} . Příklad získaných průběhů je znázorněn v grafu 4-3.



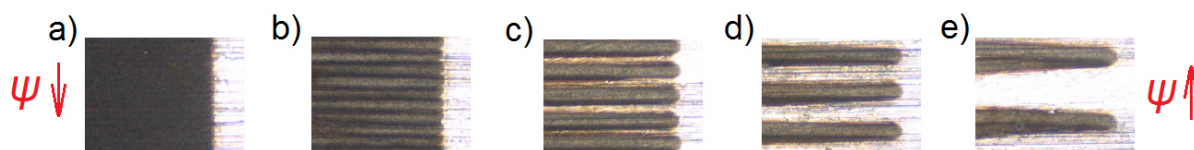
Graf 4-3 Průběhy frekvence rozmítání $f_{wob,i}$ a velikosti amplitudy $A_{wob,i}$ při konstantním parametru v_{wob}

V případě znalosti frekvence rozmítání $f_{wob,i}$ je v dalším kroku nutné vytvořit vazbu s rychlostí kinematiky laserového systému v_{kin} . Podobně jako v případě dodržení konstantní rychlosti polohování galvo zrcadel v_{wob} je docílena konstantní hloubka ablace z_{abl} v celém průřezu tvaru utvařeče třísek, tak lze obdobným způsobem vytvořit vazbu mezi proměnnou frekvencí rozmítání $f_{wob,i}$ a rychlostí kinematiky laserového systému v_{kin} . Vytvořením určité vazby, konkrétně poměrného parametru ψ , kde

$$\psi = \frac{f_{wob,i}}{v_{kin,i}}, \Rightarrow v_{kin,i} \text{ pro } i = 1 \dots n \quad (4-9)$$

Lze získat proměnnou hodnotu rychlosti kinematiky laserového systému $v_{kin,i}$. U tohoto způsobu nadefinování relativního pohybu tvořeného galvo skenerem a kinematikou laserového systému pomocí poměrného parametru ψ je nutné stanovit použitelnou oblast rozsahu ψ_{opt} , a to především ze dvou důvodů. První z nich je vliv velikosti hodnoty ψ na hloubku ablace z_{abl} a dalším je kritérium na požadovanou kvalitu mikroobrobeného povrchu v podobě výsledné hodnoty drsnosti profilu R_a na dně mikroobrábeného utvařeče.

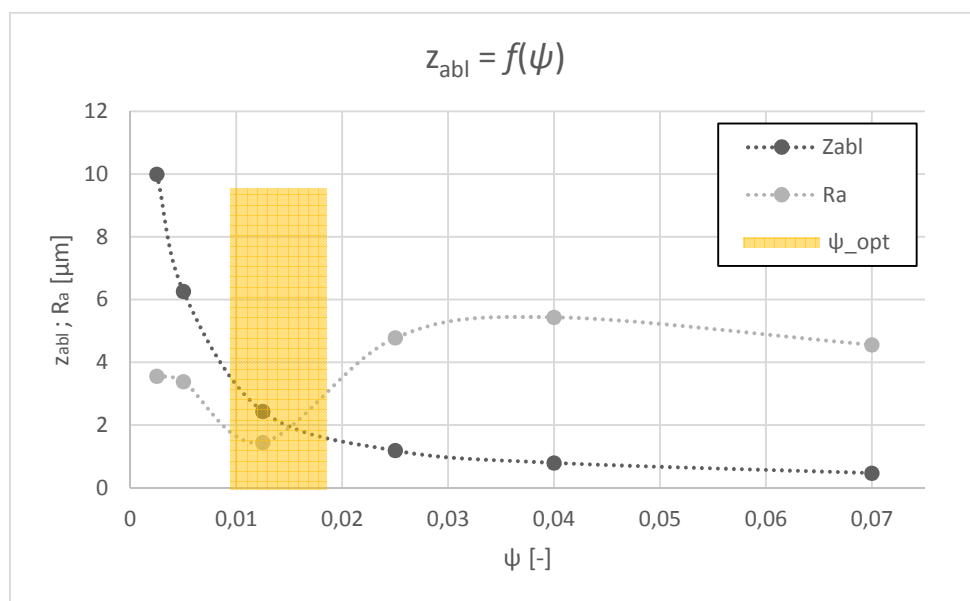
Změna velikosti poměrného parametru ψ je prezentována v obrázku 4-9, kde je zobrazen detail pravého okraje lineárního rozmítání pomocí galvo skeneru ve směru X_{galvo} společně s kinematikou laserového systému ve směru osy Y (dle obrázku 2-13a). Pro ukázkou velikosti parametru ψ byla mikroobrobena jedna vrstva $i = 1$. V tomto případě je dle zobrazených detailů v obrázku 4-9c-e patrné, že nedochází k překrytí vznikajících šrafů, tudíž strategie rozmítání laserového paprsku bude při vyšších hodnotách parametru ψ zcela neefektivní (nízké hodnoty z_{abl}) a dále je zde předpoklad zhoršující se drsnosti vznikajícího utvařeče třísek.



Obrázek 4-9 Vliv velikosti parametru ψ na strategii rozmítání laserového paprsku

Na základě výše uvedených předpokladů byl autorem navržen experiment, který měl stanovit použitelnou oblast rozsahu ψ_{opt} . K provedení experimentu byl vybrán poměrně široký rozsah hodnot parametru ψ , kde $0,0025 < \psi < 0,07$. Druh strategie rozmítání laserového paprsku byl lineární ve směru X_{galvo} (obrázek 2-12a). Vliv parametru ψ na hloubku ablace z_{abl} a profilovou drsnost povrchu R_a byl proveden na již výše testovaném slinutém karbidu K10 při $F_{opt} = 0,798 \text{ J/cm}^2$ na IIIH.

Výsledné hodnoty navrženého experimentu shrnuje graf 4-4. Zde se potvrdily oba předpoklady. Při zvyšujícím se parametru ψ klesá hloubka ablace z_{abl} . Druhým předpokladem byla zhoršující se profilová drsnost R_a na dně utvařeče třisek při vysokých hodnotách parametru ψ . Zde se jedná o hodnoty $\psi > 0,025$. V případě nižších hodnot parametru $\psi < 0,01$ docházelo k vysokému nárůstu hloubky ablace z_{abl} , kde vlivem vysokých úběrů na vrstvu docházelo k degradování kvality povrchu - hodnoty profilové drsnosti R_a na dně utvařeče třisek opět vzrostly. V oblasti hodnot parametru $\psi < 0,009$ hrozí i riziko HAZ, ve které již kvůli malým rychlostem kinematiky laserového systému mohou nastávat tepelné kumulace.



Graf 4-4 Vliv velikosti parametru ψ na hloubku ablace z_{abl} a profilovou drsnost povrchu R_a

Z tohoto pohledu lze usoudit, že nejhodnější rozsah hodnot parametru ψ_{opt} pro slinutý karbid K10 leží v intervalu $<0,009; 0,017>$, hloubka ablace je v rozmezí $3,4 > z_{abl} > 1,72 \mu\text{m}$ a profilová drsnost povrchu $1,45 < R_a < 3,15 \mu\text{m}$.

Dosažené hodnoty drsnosti jsou významně ovlivněny zvoleným typem rozmítání laserového paprsku dle „wobble“ funkce ve směru X_{galvo} (obrázek 2-12a), přičemž tento typ neumožňuje další optimalizaci drsnosti povrchu. V případě úprav řezných nástrojů pomocí výše popsaného principu je nutné navrhnout taková opatření, která přispějí ke zlepšení ($R_a 0,6-0,8 \mu\text{m}$).

Zlepšení parametrů drsnosti lze dosáhnout volbou jiných typů rozmítacích strategií (obrázek 2-12c-e), která umožňují např. proměnné natáčení rozmítaného paprsku pod úhlem φ_{wob} . Rozsah nastavení ostatních typů rozmítacích strategií, včetně jejich kombinací se synchronním polohováním kinematiky laserového systému, zahrnuje velmi širokou oblast problematiky určené k řadě dalších obsáhlých experimentů.

5 Ověření naplnění cílů disertační práce

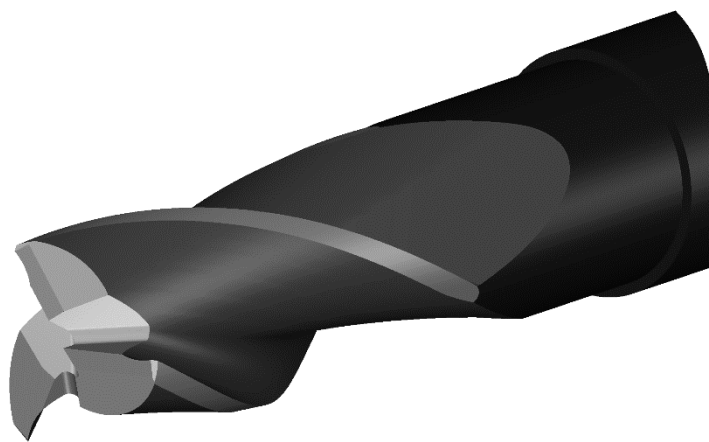
Smyslem této kapitoly je ověření výše navržených metodik u všech parciálních cílů, které jakožto celek umožňují efektivní zvládnutí technologie radiálního laserového mikroobrábění v oblasti makrogeometrických úprav na obecných plochách monolitních řezných nástrojů, jež jsou polohovány s vysokou přesností vůči řezným břitům.

V následujících podkapitolách je charakterizována posloupnost všech technologických procesů, které obsahují komplexní informace pro aplikování radiálního laserového mikroobrábění na monolitních řezných nástrojích.

5.1 Případová studie pro ověření navržených metodik

Pro ověření navržených metodik byl autorem zvolen typový případ monolitního řezného nástroje, konkrétně se jednalo o monolitní čelní válcovou frézu o třech břitech vyrobenou z broušeného polotovaru ze slinutého karbidu. Pro případ ověření byly vybrány 2 ks těchto monolitních nástrojů. Jmenovité parametry zvolených nástrojů jsou dle obrázku 3-2 následující:

- $\varnothing dh_6 = 12 \text{ mm}$
- $\varnothing D = 11 \text{ mm}$
- $z_n = 3$
- $\omega = 30^\circ$
- $L = 25 \text{ mm}$
- rovnoměrné dělení břitů



Obrázek 5-1 Případ pro ověření - čelní válcová fréza o třech břitech

Výkresová dokumentace monolitní čelní válcové frézy je součástí přílohy 10.2.1.

Vybraný nástroj byl vyroben ze slinutého karbidu s označením CTS 12D od společnosti Ceratizit. V tabulce 9-1 jsou mechanické vlastnosti a podíl pojivové fáze uváděné výrobcem.

Tabulka 5-1 Mechanické vlastnosti slinutého karbidu CTS 12D od fy Ceratizit [78]

	WC [%]	Co [%]	HV30:	Pevnost [MPa]	Hustota [g/cm ³]
CTS 12D	94	6	1820	3600	14,80

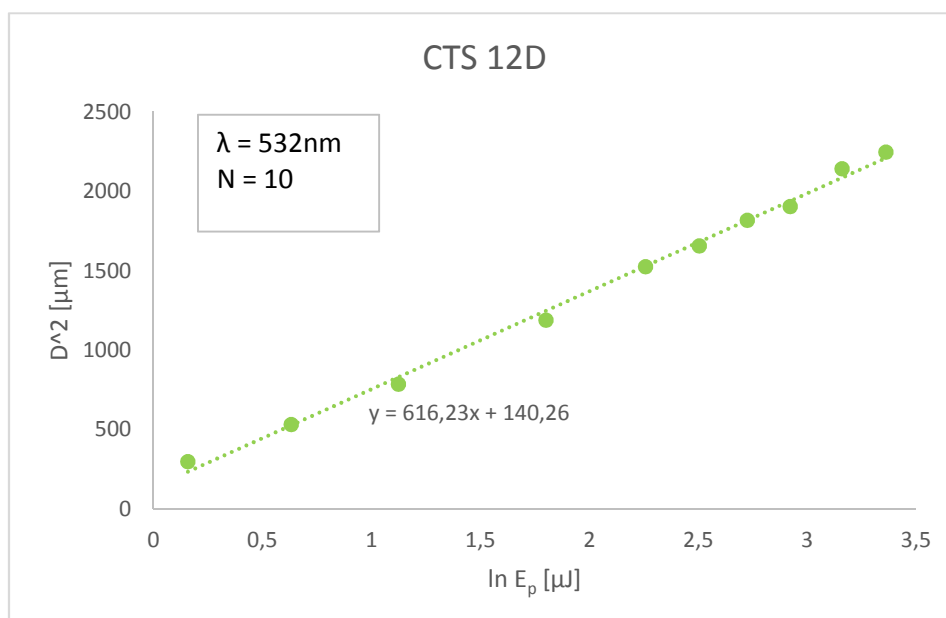
U obou kusů uvedených monolitních řezných nástrojů jsou představeny makrogeometrické úpravy (konkrétně utvařeče třísek) na čelech všech břitů pomocí radiálního laserového mikroobrábění. Utvařeče třísek jsou vytvořeny pomocí odlišných způsobů polohování kinematiky laserového systému, o nichž pojednává kapitola 4 (zejména obrázek 4-1), ve které byly charakterizovány autorem navržené principy výroby těchto makrogeometrických entit. Realizace těchto úprav je bezpodmínečně závislá na zvládnutí parciálního cíle řešeného v kap. 3, který pojednává o přesném zaměření všech břitů monolitního řezného nástroje vůči laserovému paprsku v pracovním prostoru stroje. Navržený způsob precizního zaměření břitů umožňuje polohovat makrogeometrické entity v konstantní vzdálenosti od řezné hrany v celé délce všech břitů.

Veškeré požadavky na výsledný stav, konkrétně na kvalitu opracování, přesnost tvaru makrogeometrických entit, polohu makrogeometrických entit podél břitů v celé řezné délce, jsou zaneseny v technických dokumentacích, které jsou součástí přílohy 10.2.

5.1.1 Stanovení procesních parametrů laserového mikroobrábění z hlediska ablačního procesu

Postup v této podkapitole vychází z autorem navržených metodik – kap. 2.2.2.1 a 2.3.2.2. Vzhledem k aplikování laserového mikroobrábění na novou skupinu slinutých karbidů bylo nutné přistoupit k celkovému vyšetření ablačních procesů. Tento celek zahrnuje experimentální vyšetření ablačního prahu F_{th} dle 2.1.4.1, nadefinování okrajových podmínek na základě výkonové charakteristiky laserového zdroje a zjištění skutečného nárůstu parametru dV/dt v závislosti na rozmítací rychlosti v_f .

Proces mikroobrábění byl proveden na IIIH ($\lambda = 532 \text{ nm}$) pomocí laserového zdroje charakterizovaném v kap. 2.4.1.2.



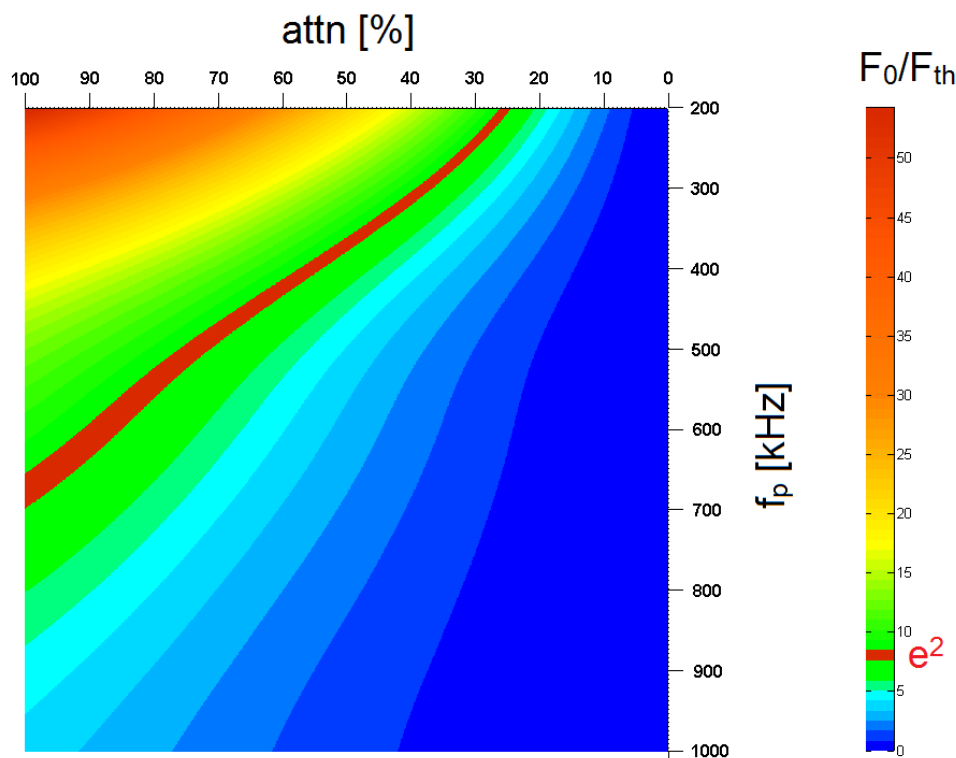
Graf 5-1 Vyšetření ablačního prahu F_{th} pro slinutý karbid CTS 12D při IIIH

Dle grafu 5-1 byly dle vztahů 2-10, 2-11 dopočítány parametry w_0 a F_{th} pro $N = 10$. Údaje jsou vyneseny v tabulce 5-2. V této tabulce je dále zaznamenána optimální hustota energie F_{opt} (vztah 2-19), která je potřebná ke stanovení okrajových podmínek použitého laserového zdroje.

Tabulka 5-2 Výsledné hodnoty parametrů definující ablační proces materiálu CTS 12D

λ [nm]	F_{th} [J/cm ²]	w_0 [μm]	F_{opt} [J/cm ²]
532	0,0823	17,55	0,608

Dle hodnot z tabulky 5-2 a výkonové charakteristiky použitého laserového zdroje (kap. 2.4.1.2) jsou vyšetřeny okrajové podmínky – viz graf 5-2.



Graf 5-2 Okrajové podmínky laserového systému pro parametry:
 $\lambda = 532\text{nm}$; $\tau_p = 12\text{ps}$; $f_p <200;1000>\text{kHz}$; $F_{th} = 0,082\text{ J/cm}^2$; $w_0 = 17,55\text{ }\mu\text{m}$

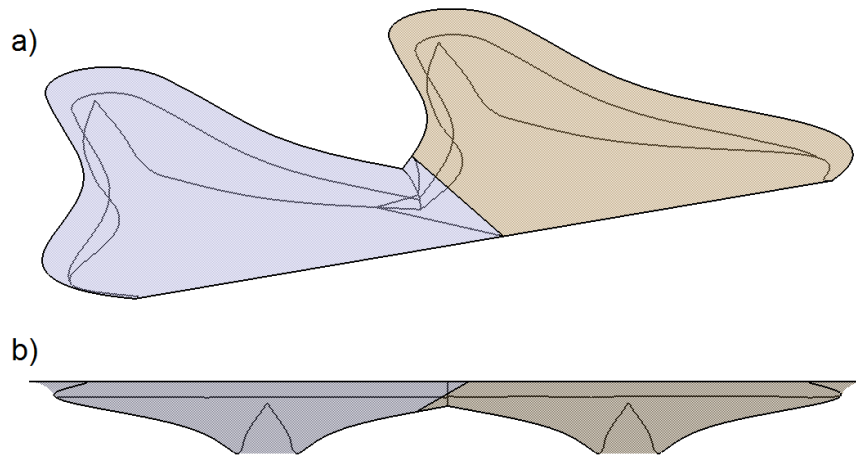
Z uvedeného grafu 5-2 je stanovena poměrová hodnota parametrů $F_0/F_{th} = e^2$, při které $F_{opt} = 0,608\text{ J/cm}^2$. Z průběhu plošného grafu je patrné, že $F_0/F_{th} = e^2$ lze kvůli nízkému ablačnímu prahu F_{th} řezného materiálu CTS 12D využít do opakovací frekvence $f_p = 670\text{ kHz}$, přičemž parametr průměrného výkonu P_{av} ($Attn = 100\%$) dosahuje maximálních hodnot ($P_{av} = 3,82\text{ W}$ při $f_p = 670\text{ kHz}$). Výsledné procesní parametry budou zvoleny později až na základě velikosti průřezu makrogeometrické entity (kap. 5.1.2).

5.1.2 Tvorba prototypu segmentového utvařeče třísek

Postup v této podkapitole vychází z autorem navržené metodiky – kap. 4.2. Segmentový utvařeč třísek je vyroben za pomoci indexace kinematiky laserového stroje vůči monolitnímu řeznému nástroji. Celkový utvařeč třísek je tvořen 19 segmenty na každém břitu.

V případě výroby segmentových utvařečů třísek za pomoci indexace polohy po trajektorii dle zápisu T (vztah 3-37), byla velikost kroku dT stanovena menší než je šířka vytvářené geometrické entity, aby bylo možné potvrdit či vyvrátit správnost tvaru geometrické entity v přechodové oblasti (obrázek 4-3), jež byla autorem experimentálně řešena v kap. 4.2.1. Na základě experimentálního zkoumání ideální geometrie přechodové oblasti vzájemně navazujících makrogeometrických entit byla vybrána varianta s navázáním modifikovaných

tvary pod úhlem α_G (kap. 4.2.1.2). Dle grafu 4-2 byl vybrán vyhovující úhel $\alpha_G = 60^\circ$, při němž již dochází k nulovým výškovým odchylkám vznikajícím v přechodových oblastech. Touto tvarovou modifikací lze plynule na sebe vzájemně navázat segmentové makrogeometrické entity při indexaci kinematiky stroje. Použitý úhel α_G včetně aplikované makrogeometrické entity je zobrazen na obrázku 5-2.



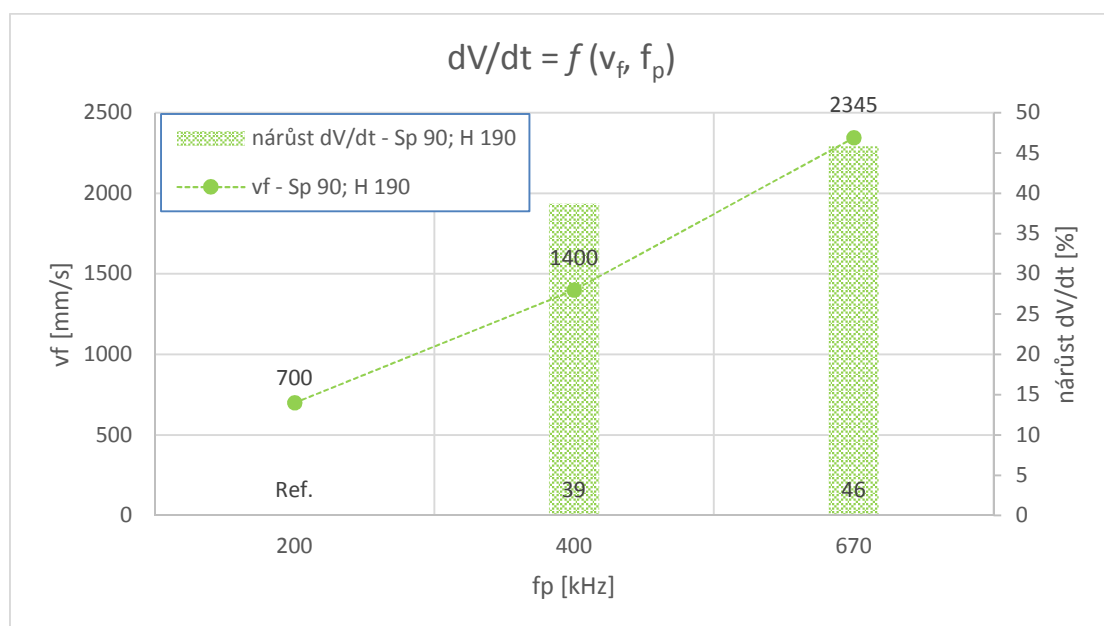
Obrázek 5-2 Navázání tvarů dvou geometrických entit v přechodové oblasti, kde $\alpha_G = 60^\circ$
a) pohled shora, b) pohled z boku

Výkresová dokumentace k této modifikaci monolitního nástroje je v příloze 10.2.2.

Na základě průběhu $F_0/F_{th} = e^2$ (graf 5-2) a tvaru jednoho segmentu geometrické entity (obrázek 5-2) byl vyšetřen celý rozsah opakovací frekvence $200 < f_p < 670$ kHz, při které byl zjištěn skutečný nárůst parametru dV/dt v závislosti na rozmítací rychlosti v_f pro IIIH. Volba rozmítací strategie pro radiální mikroobrábění u liniového šrafování byla nastavena s těmito parametry

- $S_p = 90\%$,
- $H = 190\%$.

Postup řešení je shodný dle kap. 2.4.5.2.



Graf 5-3 Skutečný nárůst parametru dV/dt v závislosti na rozmítací rychlosti v_f pro IIIH

Vlivem rapidně se zmenšujícího průřezu segmentové makrogeometrické entity (obrázek 5-2) nebyla volba maximálních hodnot rozmítací rychlosti v_f (dle grafu 5-3) zcela efektivní – nárůst dV/dt o pouhých 46% oproti referenčnímu nastavení při $f_p = 200$ kHz. Z tohoto důvodu byly autorem zvoleny následující procesní parametry (tabulka 5-3), které u této případové studie adekvátně zatěžovaly opto-mechanické prvky v galvo skeneru.

Tabulka 5-3 Shrnující procesní parametry pro laserové mikroobrábění segmentových makrogeometrických entit

λ [nm]	E_p [μ J]	w_0 [μ m]	F_{opt} [J/cm ²]	f_p [kHz]	v_f [mm/s]	dV/dt [mm ³ /min]
532	5,88	17,55	0,608	400	1400	0,127

5.1.3 Tvorba prototypu plynulého utvařeče třísek

Postup v této podkapitole vychází od autora navržené metodiky – kap. 4.3. Plynulý utvařeč třísek je vyroben za pomoci synchronního polohování kinematiky laserového stroje vůči monolitnímu reznému nástroji.

V případě výroby plynulých utvařečů třísek za pomoci synchronního polohování po trajektorii dle zápisu T (vztah 3-37) je nutné navrhnout jeho tvarový průřez. Tento průřez plynulého utvařeče třísek je pro případ ověření definován dle křivky $f(x)$ – obrázek 4-7a. Pro jednodušší vyjádření tvaru dle křivky $f(x)$ bylo přistoupeno k dekompozici tvaru průřezu utvařeče třísek (dle obrázku 4-7b) na dvě samostatné křivky, proto

$$f(x) = f_1(x) + f_2(x), \quad (5-1)$$

kde obě křivky jsou parabolami:

$$f_1(x) = 0,21x^2 - 0,3, \quad (5-2)$$

$$f_2(x) = 13x^2 - 0,3. \quad (5-3)$$

Výkresová dokumentace k této modifikaci monolitního nástroje je v příloze 10.2.3.

Procesní parametry pro tvorbu prototypu plynulého utvařeče byly zvoleny dle uvedené metodiky z kap. 4.3 pro rozmítání laserového paprsku za pomoci „wobbling“ v ose X_{galvo} (dle obrázku 2-12a), kde po nadefinování hlavních parametrů $A_{wob,i}$ a $f_{wob,i}$ došlo k určení $v_{kin,i}$ dle poměrného parametru ψ (graf 4-4). Na základě grafu 4-4, kde byla řešena optimální hodnota ψ_{opt} a výsledné optimální hustoty energie F_{opt} (dle tabulky 5-2), byly stanoveny veškeré potřebné parametry pro tvorbu plynulého utvařeče třísek.

Tabulka 5-4 Shrnující procesní parametry pro laserové mikroobrábění plynulého utvařeče třísek

λ [nm]	ψ [-]	F_{opt} [J/cm ²]	h [mm]	z_{abl} [μ m]	i [-]	směr rozmítání
532	0,013	0,608	0,3	2,3	130	X_{Galvo}

5.2 Evaluace dosažených výsledků po laserovém mikroobrábění

Z hlediska kladených požadavků na výsledný stav mikroobrobených utvařečů třísek bylo přistoupeno k vyhodnocení dle přiložených výkresových dokumentací (10.2.2 a 10.2.3). Analýza a vyhodnocení výsledků bylo prováděno bezkontaktní metodou na měřicím zařízení Alicona IFM SL. Dle výkresových dokumentací byly vyhodnocovány tvarové, rozměrové a polohové přesnosti včetně kvality mikroobrobených entit.

Shrnující soubor protokolů k ověření dle výkresové dokumentace je zanesen do přílohy č. 10.3.

5.2.1 Tvarová a rozměrová přesnost

Tato podkapitola shrnuje výsledky obou typů vyrobených makrogeometrických úprav (tabulka 5-5), jak pro případ segmentového utvařeče, tak pro utvařeč třísek plynulý.

Tabulka 5-5 Shrnující tabulka naměřených hodnot tvaru a polohy

Segmentový utvařeč třísek				
No.	Rozměr	Tol	Měřeno	Poznámka / Pozice měření
1	0,15	±0,02	0,150	příloha č. 10.3.1
2	0,1	±0,01	0,104	
3	1,37	±0,02	1,356	
4	1	-0,1	0,937	
5	R0,2	±0,05	R0,215	příloha č. 10.3.2 / Circle 6
6	R0,08	±0,05	R0,089	příloha č. 10.3.2 / Circle 5
7	10°	±1°	9,74°	příloha č. 10.3.2 / Angle 1
8	0,2	+0,02	0,210	příloha č. 10.3.2 / Distance 1
Plynulý utvařeč třísek				
No.	Rozměr	Tol	Měřeno	Poznámka / Pozice měření
9	0,25	±0,02	0,237	příloha č. 10.3.4
10	0,1	±0,01	0,095	
11	1,37	±0,02	1,377	
12	0,3	+0,02	0,306	příloha č. 10.3.5 / Distance 1
13	R0,15	±0,02	R0,150	příloha č. 10.3.5 / Circle 2
14	Rmin	-	R0,036	příloha č. 10.3.5 / Circle 3

5.2.2 Kvalita mikroobrobených entit

Tato podkapitola shrnuje výsledky obou typů vyrobených makrogeometrických úprav (tabulka 5-6), jak pro případ segmentového utvařeče, tak pro utvařeč třísek plynulý.

Tabulka 5-6 Shrnující tabulka naměřených hodnot profilové drsnosti povrchu

Segmentový utvařeč třísek			
No.	Rozměr	Měřeno	Poznámka
15	R _a 0,8	R_a 0,35	příloha č. 10.3.3
Plynulý utvařeč třísek			
No.	Rozměr	Měřeno	Poznámka
16	R _a 0,8	R_a 1,23	příloha č. 10.3.6

5.3 Shrnutí evaluace výsledků

Na základě celkové evaluace výsledného stavu (poloha, rozměry tvarů, kvalita finálního povrchu) bylo vyhodnoceno, že cíle disertační práce byly naplněny a ověřeny. Pro realizaci případové studie bylo nutné aplikování všech od autora navržených metodik, které byly naplní parciálních cílů této disertační práce.

Na obrázcích 5-3 a 5-4 jsou prezentovány nasnímané skeny obou vyrobených variant, které byly pořízeny za pomoci měřicího zařízení Alicona IFM SL. Makrosnímek v obrázku 5-5 již zachycuje obě vyrobené varianty včetně detailů.



Obrázek 5-3 Ukázka kompletního skenu jednoho břitu upraveného segmentovými utvařeči třísek: a) detail b) celek



Obrázek 5-4 Ukázka kompletního skenu jednoho břitu upraveného plynulým utvařečem třísek: a) detail b) celek

Na druhou stranu je nutné dodat, že i přes úspěšné ověření případové studie u obou nástrojů přesto existuje prostor pro optimalizaci celkového procesu, především dle dvou kritérií:

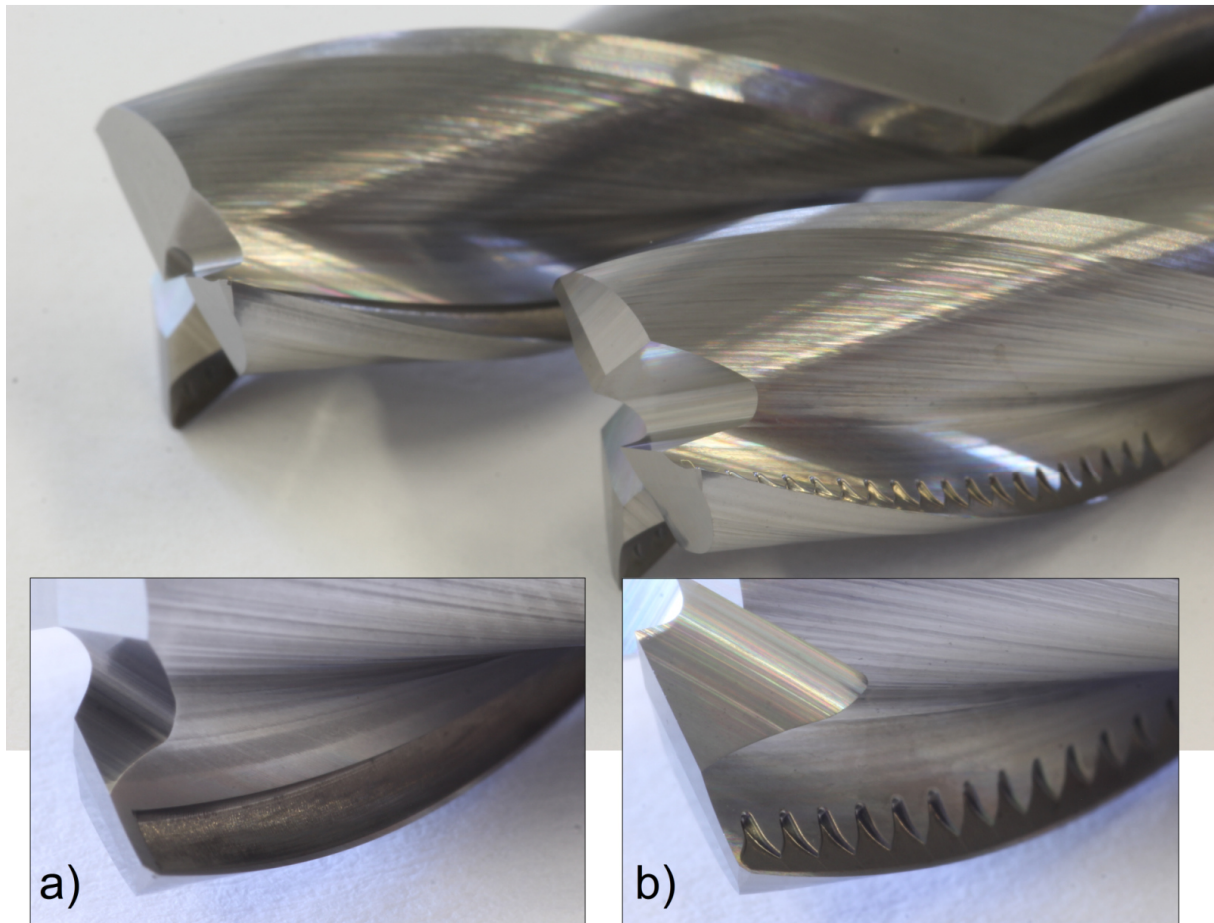
- čas výroby,
- výsledná kvalita povrchu.

V případě prototypové varianty se segmentovými utvařeči třísek (obrázek 5-5b) se dosáhlo velmi dobré kvality výsledného povrchu (R_a 0,35 μ m), ale poměrně dlouhého výrobního času – 3:05h / 3 břity. Hlavní příčinou, která ovlivnila čas výroby, byla obava z kolize víceosé kinematiky s fokusační čočkou během výroby prototypu. Z tohoto důvodu nebyl laserový paprsek vůči obecné ploše čela každého břitu v požadovaném normálovém směru, čímž by došlo k významné redukci výrobního času o cca 60-75%. V tomto případě laserový paprsek dopadal na plochy čel nástroje pod úhlem 60° (úhel stoupání šroubovice na nástroji byl $\omega = 30^\circ$). Tento úhel dopadu laserového paprsku do obecné plochy měl za následek trojnásobný nárůst počtu vrstev, které jsou potřebné k nadefinování mikroobráběného průřezu pro rozmítací strategii laserového paprsku, aby po mikroobrábění vznikl požadovaný tvar.

Do budoucna lze výrobu segmentových makrogeometrických prvků řešit následujícími kroky:

- zajištěním normální polohy laserového paprsku vůči mikroobráběné ploše rezného nástroje a tím redukování počtu vrstev potřebných k mikroobrobábění
- ochranou před potenciálními kolizemi za pomoci řídicího systému, který by vyhodnocoval případná rizika

- zvětšením ohniskové vzdálenosti
 - přenastavením variabilního „beam expander“
 - jiným typem fokusační čočky



Obrázek 5-5 Makrosnímek zachycující výsledek obou variant vyrobených utvařečů třísek: a) plynulý, b) segmentový

V případě prototypové varianty s plynulými utvařeči třísek (obrázek 5-5a) se dosáhlo dobrého výrobního času – 1:42h / 3 břity, ale poměrně vysoké hodnoty profilové drsnosti povrchu (R_a 1,23 μ m). Tato hodnota profilové drsnosti je významně ovlivněna zvoleným typem rozmítání laserového paprsku dle „wobble“ funkce ve směru X_{galvo} (viz Kap 4.3.2).

Z důvodu vysoké hodnoty dosažené drsnosti R_a není tento způsob rozmítání vhodný pro mikroobrábění povrchů na řezných nástrojích, z čehož vyplývá, že pro zlepšení tohoto stavu je třeba navrhnout příslušná opatření spočívající v jiném způsobu rozmítání (viz obrázek 2-12c-e).

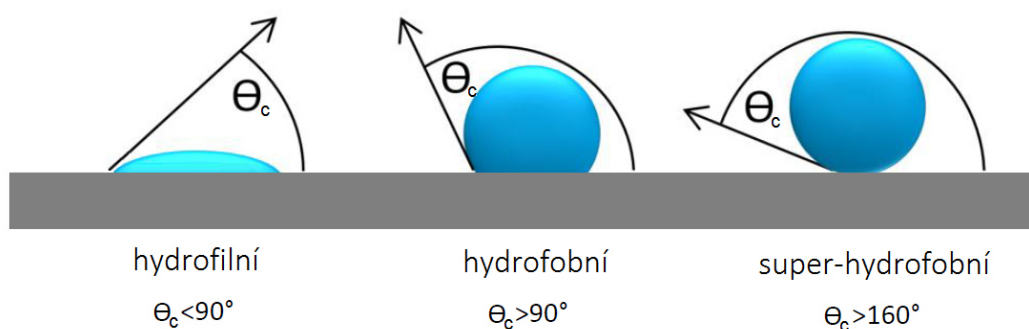
Primárním cílem této prototypové varianty nebyla optimalizace mikroobrobeného povrchu z hlediska kvality obrobeného povrchu, ale ověření nově navrženého principu.

6 Budoucí trendy laserového mikroobrábění v oblasti monolitních řezných nástrojů

Průlom v nasazení laserového mikroobrábění do oblasti řezných nástrojů nastává zejména v rozšiřujících se možnostech miniaturizace tvorby geometrických entit a se snižováním tepelného zatížení řezného materiálu. Pomocí laserového mikroobrábění lze vytvářet nové, nestandardní a především funkční varianty makro a mikrogeometrických prvků na řezných nástrojích. Mezi hlavní oblasti, které jsou v současnosti řešeny předními světovými vývojovými centry, lze zařadit: funkcionalizaci povrchů vlivem mikrostrukturování [83], tangenciální mikroobrábění monolitních řezných nástrojů, komplexní výrobu mikronástrojů a oblast miniaturizace: např. technologie mikrovrtání [64], sensorika [84], aj.

6.1 Funkcionalizace povrchů vlivem jeho mikrostrukturování

Mikrostrukturování povrchů má významný vliv v mnoha oblastech průmyslu. Hlavním významem této technologie je úprava tribologických vlastností u vysoce namáhaných povrchů. Skupina zdrojů [53; 80; 85; 86; 87] se věnuje návrhu povrchových mikrostrukturálních entit, procesních parametrů a výrobních strategií, jejichž výsledkem je ovlivnění povrchových napětí kapalin s cílem dosažení např. hydrofilních, hydrofobních a super-hydrofobních povrchových vlastností, které jsou kvantifikovány kontaktním úhlem θ_c (Obrázek 6-1).

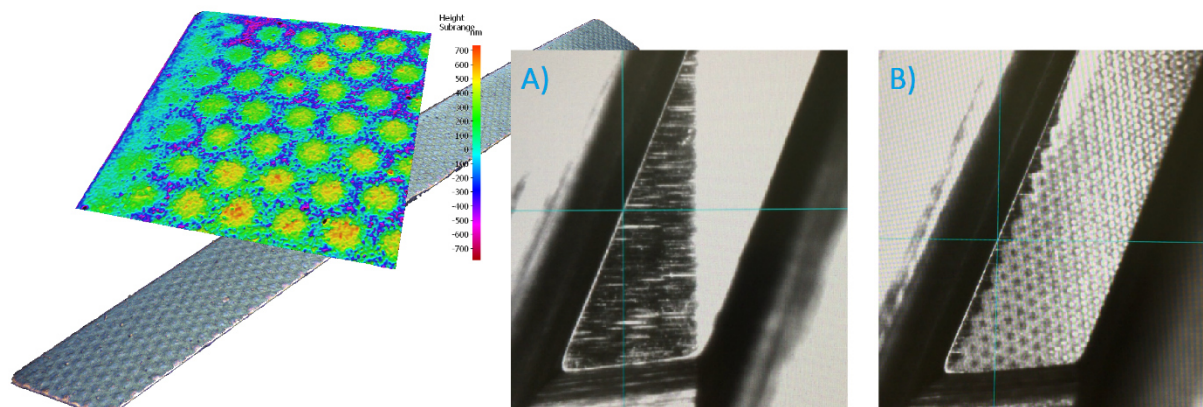


Obrázek 6-1 Definování hydrofobních vlastností [86]

V oblasti monolitních řezných nástrojů lze kombinovat mikrostrukturování povrchů substrát – tenká vrstva a např. tím zlepšit adhezivní vlastnosti tenkých vrstev na jejich břitech [55]. V oblasti čelních, resp. hřbetních ploch břitů řezných monolitních nástrojů lze mikrostrukturami docílit snížení kontaktních ploch s odcházející třískou, resp. obrobem povrchem obrobku. Problematické mikrostrukturování VBD se věnuje mnoho literatur, např. [82; 89; 90], ale žádné zdroje se nezabývají povrchovým mikrostrukturováním monolitních řezných nástrojů. Hlavním důvodem je především problematické polohování laserového paprsku vůči tvarovým plochám na nástroji, kde je nutné docílit konstantní relativní polohy laserového paprsku a upravované obecné plochy monolitního řezného nástroje. Toto problematické polohování lze řešit skrze víceosý přístup polohování monolitních řezných nástrojů, jenž byl autorem navržen jako jeden z parciálních cílů (kap. 3) této práce. Dále je u mikrostrukturování obecných ploch nutné zajistit, aby konfigurace laserového systému (např. fokusační čočka, laserový zdroj, optická trať, aj.) dosahovala především dostatečné hloubky ostrosti Z při velmi precisním polohování.

Při použití víceosého přístupu polohování a zajištění konstantní relativní polohy laserového paprsku vůči upravované obecné tvarové ploše monolitního řezného nástroje lze vytvářet

povrchové mikrostruktury v definovaných vzdálenostech, např. od řezných břitů nástrojů (Obrázek 6-2b).



Obrázek 6-2 Mikrostruktura na válcové fazetě monolitního řezného nástroje:
a) stav před mikrostrukturováním, b) stav po mikrostrukturování

V tomto případě se jednalo o vodící válcové fazety na monolitním vrtáku, které byly opatřeny polygonovou sítí [55].

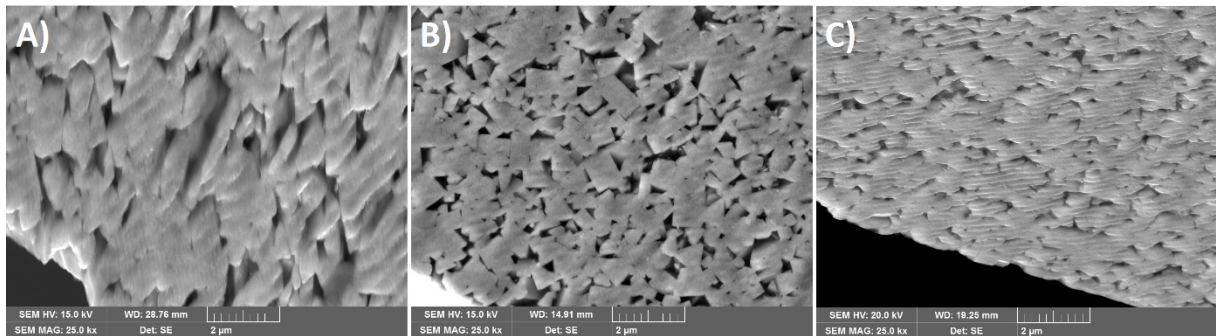
6.2 Precisní ostření monolitních řezných nástrojů

Tangenciálním laserovým mikroobráběním lze v oblasti monolitních řezných nástrojů docílit mnohých nestandardních geometrických úprav. Tomuto tangenciálnímu způsobu mikroobrábění se okrajově věnuje kap. 1.3.2. V případě aplikování tohoto typu mikroobrábění na zhotovených obecných plochách monolitního řezného nástroje za pomoci broušení je nejdříve bezpodmínečně nutné použití víceosého přístupu polohování, jehož návrh řešení byl parciálním cílem této práce. Pokud jsou monolitní řezné nástroje vyrobeny konvenčním broušením, tak jsou jejich tvarové odchylky větší, než jsou geometrické entity vytvořené laserovým mikroobráběním. Tyto tvarové odchylky obecných ploch monolitních řezných nástrojů neumožňují zachování konstantní relativní polohy laserového paprsku vůči řeznému nástroji, a proto je nutné nejprve zaměřit všechny břity monolitních řezných nástrojů v pracovním prostoru laserového stroje.

Po zaměření všech řezných břitů lze využít tangenciální mikroobrábění, které se uplatňuje v oblasti precisního ostření monolitních řezných nástrojů. U takto upravených břitů lze docílit lepších hodnot parametru r_β , protože laserový paprsek nepůsobí na karbidické zrno žádnými mechanickými silami, tudíž zde nedochází k nežádoucímu vydrolování. Při zvolení vhodných procesních parametrů laserového paprsku jsou karbidická zrna přeříznuta bez nežádoucí oxidace substrátu [51]. Precisní způsob ostření břitů monolitních řezných nástrojů je do budoucna velmi zajímavou technologií, protože umožňuje rektifikaci břitů vyrobených z tvrdých řezných materiálů, např. cermetů, které mají významný sklon k vydrolování během procesu mechanického broušení.

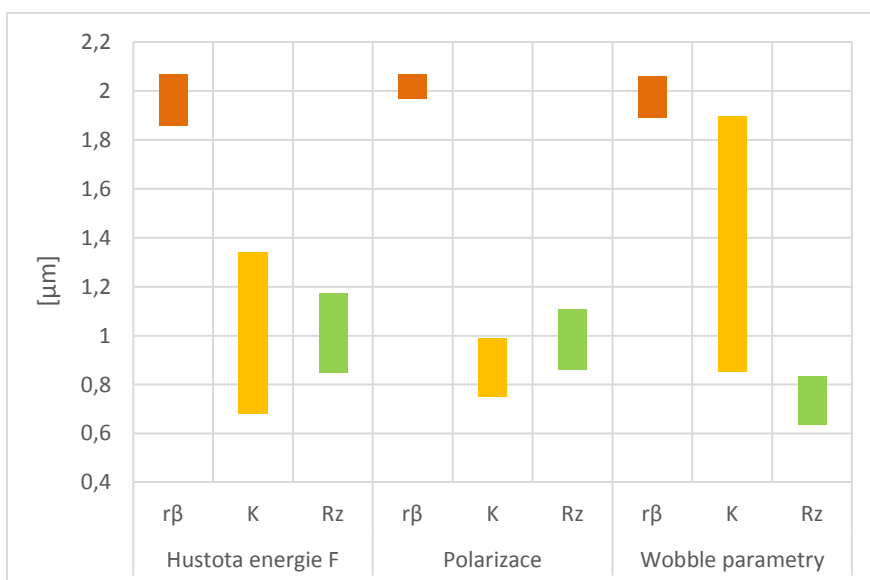
Zdroj [91] se zabýval vlivem hustoty energie F laserového paprsku a nastavením strategie rozmítání na finální parametry mikrogeometrie břitu. Cílem bylo nalezení vhodných parametrů tangenciálního mikroobrábění, při kterých bylo docíleno kvalitativně nejlepšího řezu karbidických zrn WC (Obrázek 6-3). Při nižších hustotách energií F nedocházelo k přeřezávání karbidických zrn (Obrázek 6-3a), kdežto při vysokých hodnotách F docházelo již k významnému natavování hranic zrn (Obrázek 6-3c) a ke značně vysoké oxidaci mikroobrobených povrchů karbidů. Vyhodnocením EDX analýzy byly stanoveny ideální

hodnoty hustoty energií F při minimálním nárůstu oxidických podílů vůči referenčnímu broušenému povrchu monolitního řezného nástroje.



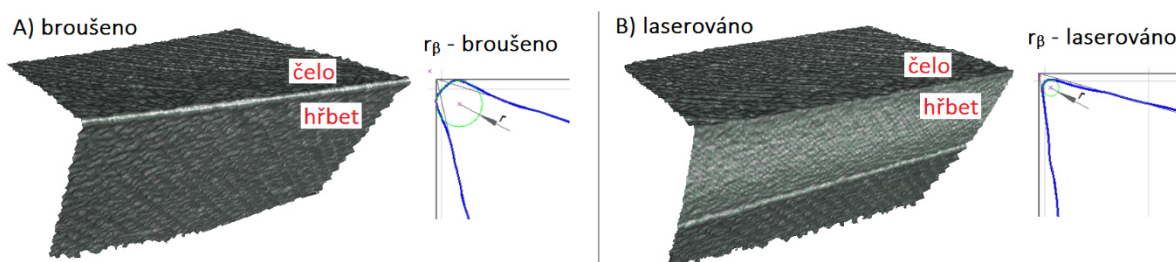
Obrázek 6-3 Vliv hustoty energie F na kvalitu řezu karbidických zrn WC při $\lambda = 532$ nm, $w_0 = 12,5$ μm : a) $F = 2$ J/cm², b) $F = 5$ J/cm², c) $F = 10$ J/cm² [91]

Na základě experimentu byly stanoveny různé vlivy procesních parametrů: hustoty energie F , polarizace laserového paprsku, hodnoty „wobble“ parametrů, na parametry mikrogeometrie břitů: poloměr zaoblení řezné hrany r_β , K faktor a profilová drsnost na upravených hřbetních plochách – parametr R_z . Tyto vlivy shrnuje graf 6-1.



Graf 6-1 Vliv procesních parametrů na parametry mikrogeometrie břítu [91]

Porovnání precisišního ostření tangenciálním mikroobráběním a broušeného břítu se věnuje zdroj [92], kde byl monolitní řezný nástroj vybroušen s poloměrem zaoblení řezné hrany $r_\beta = 7$ μm a drsností povrchu hřbetu $R_a = 0,4$ μm . Úpravou laserovou technologií bylo dosaženo parametrů $r_\beta = 1,8$ μm , resp. $R_a = 0,08$ μm .



Obrázek 6-4 Porovnání mezi řeznou hranou (A) a upravenou laserem (B): zvětšeno 500x [92]

6.3 Tvorba monolitních řezných mikronástrojů

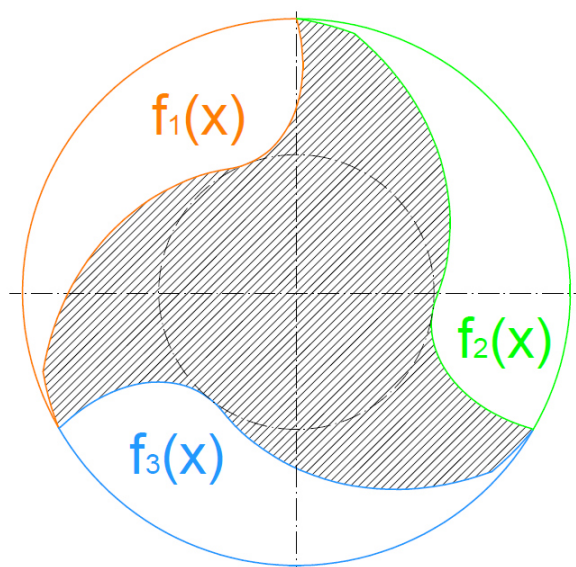
Na výrobě kompletních geometrií monolitních řezných mikronástrojů, kde $\varnothing D = 0,05-3$ mm, se zejména uplatňuje tangenciální způsob laserového mikroobrábění se synchronizací kinematiky laserového systému. Koncept technologie kompletní výroby mikronástrojů představily zdroje [5; 32; 33; 38; 93], které využívají jako polotovary nástroje tzv. „roubíkы“, jež jsou kombinací SK (upínací část) a PCD (řezná část). V tomto případě je využito vysokého stupně synchronizace kinematiky a galvo skeneru, který umožňuje výrobu požadovaných obecných ploch. V případě výroby mikronástrojů ze supertvrdých řezných materiálů se jedná o „high-end“ technologii v oblasti laserového mikroobrábění. Příklady navržených a realizovaných monolitních řezných mikronástrojů za pomoci laserového mikroobrábění jsou uvedeny na obrázku 6-5.



Obrázek 6-5 Ukázky tří navržených mikronástrojů z PCD [93]

U výroby monolitních řezných mikronástrojů je především využito tangenciálního laserového mikroobrábění, u kterého při výrobě jednotlivých geometrických prvků nástroje, zejména u drážek na třísky, dochází k rozmítání laserového paprsku dle tvaru průřezu brusného kotouče. V závěru výroby dochází k výrobě ostatních ploch na řezném mikronástroji.

Výrobu drážek pro třísky lze realizovat i za pomoci radiálního laserového mikroobrábění dle skupiny algoritmů, jenž v kap. 4 slouží k výrobě utvářečů třísek pomocí synchronního polohování kinematiky laserového systému. Tento princip lze na tvorbu monolitních řezných mikronástrojů rovněž aplikovat – viz obrázek 6-6.



Obrázek 6-6 Uzavřené průřezy jednotlivých drážek definované křivkami

7 Závěr

V této disertační práci byly představeny nové přístupy obsahující ucelené metodické návrhy, jež jsou zaměřeny do oblasti technologie laserového mikroobrábění monolitních řezných nástrojů. Progresivní technologie laserového mikroobrábění je v oblasti řezných nástrojů využitelná pro svou celou řadu benefitů. Oproti výhodám zde existují i omezení, mezi které patří především nízká produktivita technologie laserového mikroobrábění a její složitá integrace do procesního řetězce výroby monolitních řezných nástrojů.

Na základě uvedených omezení byl vymezen hlavní cíl této disertační práce, který kladl důraz na zefektivnění činností jednotlivých subsystémů laserového stroje umožňující snazší integraci technologie laserového mikroobrábění v uvedené oblasti. K zefektivnění činností jednotlivých laserových sub-systémů byly nadefinovány tři oblasti parciálních cílů, které jakožto celek významně usnadňují zmíněnou integraci. Hlavním přínosem těchto navržených metodických přístupů je rozšíření know-how, které v současné době umožní lepší využití laserového mikroobrábění na břitech řezných nástrojů s rovinným čelem (např. VBD). Dle představených metodických prvků lze technologii laserového mikroobrábění efektivně využívat i v oblasti monolitních řezných nástrojů se specifickými tvarovými plochami, které jsou definovány na základě samotné makro a mikrogeometrie modifikovaného nástroje.

Hlavní přínosy této disertační práce lze shrnout v následujících bodech:

- Studie ablačních procesů řezných materiálů
 - V oblasti ablačních procesů řezných materiálů byla navržena metodika, jejímž přínosem je stanovení okrajových podmínek laserového zdroje dle jeho výkonové charakteristiky ve vztahu k mikroobráběnému materiálu za účelem získání nejhodnějších procesních parametrů, při kterých je dosaženo co nejefektivnější ablace.
 - Dle výše uvedené metodiky a získaných procesních parametrů byl navržen program, jehož algoritmy umožňují variovat veškeré potřebné procesní parametry ablačního procesu. Přínosem navrženého programu je časově úspornější testování ablačních procesů řezných materiálů.
- Metodika zaměření břitů monolitního řezného nástroje v pracovním prostoru laserového stroje
 - Byla představena obecná metodika umožňující optickou, velmi precizní geometrickou (rozměrovou a tvarovou) analýzu všech břitů monolitních řezných nástrojů. Hlavním přínosem této metodiky je získání geometrických informací o průběhu ostří na břitech monolitních řezných nástrojů v pracovním prostoru laserového stroje, které slouží k řízení laserového paprsku.
 - Výše zmíněná metodika splňuje veškeré očekávané nároky, jimiž jsou: přesnost snímání a její vysoká opakovatelnost měření, dostatečná rychlost provedení s využitím všech dostupných automatizačních prostředků a jejich algoritmů, které významně usnadňují integraci laserového mikroobrábění v oblasti výroby monolitních řezných nástrojů.

- Tvorba makrogeometrických prvků na monolitních řezných nástrojích využívající oba způsoby polohování kinematiky laserového systému vůči laserovému paprsku
 - Dále byl v práci představen a využit princip tvorby makrogeometrických prvků na monolitních řezných nástrojích, který umožňuje dva způsoby polohování kinematiky laserového systému (X, Y, Φ) vůči rozmítání laserového paprsku pomocí galvo-skeneru (X_{galvo}, Y_{galvo}). Polohování kinematiky laserového systému vůči galvo-skeneru lze provádět v režimech indexace a synchronizace. Oba principy byly demonstrovány na výrobě utvařečů třísek. Ověřením tohoto cíle byly prohloubeny znalosti ve využívání víceosého přístupu polohování v kombinaci s vyšetřenými ablačními procesy.
 - Výhodou uvedeného principu je možnost synchronizování více os: mechanických os (X, Y, Φ) spolu s optickými (X_{galvo}, Y_{galvo}), což lze aplikovat v oblasti úprav monolitních řezných nástrojů mnoha způsoby (mikrostrukturování ploch, rektifikace řezných hran, výroba mikronástrojů, aj.). Tento pokročilý způsob synchronizace umožňuje řízení pohybu laserového paprsku se zapojením všech os laserového stroje.

8 Literatura

- [1] DENKENA, B., BIERMANN, D. *Cutting edge geometries*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 63: (2014) 631-653
- [2] *Laser products catalog 2015*. Altechna [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.altechna.com/download/catalog/Altechna_Catalog_2015.pdf>
- [3] ČERMÁK, A., STANKEVIČ, V., KOŽMÍN, P. Micromachining with usage of LASER. In *Strojírenská technologie*. 2015. ISBN: 978-80-261-0304-2
- [4] SCHAEFFER, R., PFLANZ, T., *UV Micromachining: Shorter Pulses or Shorter Wavelength?* Medical Device & Diagnostic Industry [online]. 01.08.2008 [cit. 2017-01-12] Dostupné z WWW: <<http://www.mddionline.com/article/uv-micromachining-shorter-pulses-or-shorter-wavelength>>
- [5] CHRISTIAN, W., *The Current Machine Tool Challenge*. DIPLAT Newsletter 1. November 2013. [cit. 2017-01-25] Dostupné z WWW: <<http://www.fp7-diplat.eu/downloads/>>
- [6] ČERMÁK, A. *Tools manufacturing using a laser*. Vyzvaná přednáška na FTMC - Vilnius, 11.2014.
- [7] *Mody, divergence, obří impulsy*. CVUT-FBMI [online]. [cit. 2015-06-12]. <<https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Mody,%20divergence,ob%C5%99%C3%AD%20%20impulzy.pdf>>
- [8] KOŽMÍN, Pavel, ŠRACHTA, Petr. *Komplexní hodnocení jakosti povrchu*. MM spektrum [online]. 13.05.2014 [cit. 2014-06-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-hodnoceni-jakosti-povrchu.html>>
- [9] ČERMÁK, Adam. *Progresivní metody ve využívání laseru v mikroobrábění*. Workshop, Plzeň. April 2014, University of West Bohemia in Pilsen. Faculty of Mechanical Engineering
- [10] *Coherent Light*. [online]. [cit. 2015-06-12]. Dostupné z WWW: <http://www.suggestkeyword.com/Y29oZXJlbnQgbGlnaHQ/Obrázek_2-4>
- [11] KRAMOLIŠ, L. *Laserové řezání s podporou vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 129s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. Dostupný z WWW: <<ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>>
- [12] HAJNOVÁ, Anna. *Diagnostika laserových svazků*. Olomouc, 2010. Diplomová práce (Ing.). Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci
- [13] *M2 factor*. RP Photonics encyclopedia [online]. [cit. 2015-06-12]. Dostupné z WWW: <http://www.rp-photonics.com/m2_factor.html>
- [14] *Practical Considerations in the Design of Visible and UV Laser Based Micromachining Systems*. Coherent [online]. [cit. 2015-08-05] Dostupné z WWW: <https://www.coherent.com/downloads/Best_Practices_Whitepaper.pdf>
- [15] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [16] AURICH, ZIMMERMANN, LEITZ. *The preparation of cutting edges using a marking laser*. German Academic Society for Production Engineering [online]. 2010 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.springer.com/>>
- [17] B. JAEGGI, B. NEUENSCHWANDER, M. SCHMID, et al., *Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals*, Physics Procedia, Volume 12, 2011, Pages 164-171, ISSN 1875-3892
- [18] DOLD, C.,. *Picosecond laser processing of diamond cutting edges*. VDI-Verlag (2013). Dissertation 2013. Dostupné z WWW: <<https://e-collection.library.ethz.ch/>>

- [19] **RUSS, S., GEBS, R., BAUER, L., et al.**, *Shorter than Short: How Does the Pulse Duration Influence the Process Efficiency of Conductive Materials?* WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [20] **LEITZ, REDLINGSHOFER, REG et. al**, *Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses*. Phys. Proc. 12 (2011) 230-238“
- [21] **G. EBERLE, K. WEGENER**, *Ablation Study of WC and PCD Composites Using 10 Picosecond and 1 Nanosecond Pulse Durations at Green and Infrared Wavelengths*, Physics Procedia, Volume 56, 2014, Pages 951-962, ISSN 1875-3892
- [22] **J. CHENG, C. LIU, S. SHANG, et al.**, *A review of ultrafast laser materials micromachining*, Optics & Laser Technology, Volume 46, March 2013, Pages 88-102, ISSN 0030-3992,
- [23] **BROWN, M., ARNOLD, C.**, *Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification*. Online-Ausg. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-10523-4.
- [24] **E. UHLMANN, B. MULLANY, D. BIERMANN, et al.** *Process chains for high-precision components with micro-scale features*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 65, Issue 2, 2016, Pages 549-572, ISSN 0007-8506
- [25] **G. RACIUKAITIS, M. BRIKAS, P. GECYS, et al.** *Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers*. Proc. SPIE 7005, High-Power Laser Ablation VII, 70052L (May 14, 2008)
- [26] **J. MEIJER, K. DU, A. GILLNER, et al.** *Laser Machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, Pages 531-550, ISSN 0007-8506
- [27] **B. DENKENA, B. BREIDENSTEIN, L. WAGNER, et al.** *Influence of shot peening and laser ablation on residual stress state and phase composition of cemented carbide cutting inserts*, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 36, January 2013, Pages 85-89, ISSN 0263-4368
- [28] **BREIDENSTEIN, B., GEY, C. DENKENA, B.** (2013), *Surface integrity of laser machined carbide cutting tools within the PVD-coating process chain*. Mat.-wiss. u. Werkstofftech., 44: 704–709.
- [29] **A. BAUER, T. KIEDROWSKI, J. KONIG**, *Thermal Effects in Ultra-Short Pulsed Laser Ablation of Metals*. Robert Bosch GmbH. Stuttgart Laser Technology Forum (2014)
- [30] **F. DAUSINGER, H. HUGEL, V. KONOV**, *Micromachining with ultrashort laser pulses: from basic understanding to technical applications*, Proc. SPIE 5147, ALT'02 International Conference on Advanced Laser Technologies, 106 (November 14, 2003)
- [31] **L. LI, M. HONG, M. SCHMIDT, M. ZHONG, et. al**, *Laser nano-manufacturing – State of the art and challenges*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 2, 2011, Pages 735-755, ISSN 0007-8506
- [32] **M. WARHANEK, P. BUTLER-SMITH, C. DOLD, J.-F. BUCOURT**, *Pulsed Laser Ablation Opens Up New Borders for the Manufacturing of Solid PCD Tools*, Aerospace Innovation Forum, Bordeaux, October 2015
- [33] **M. WARHANEK, C. WALTER, M. HIRSCHI, J. BOOS, et. al**, *Comparative analysis of tangentially laser-processed fluted polycrystalline diamond drilling tools*, Journal of Manufacturing Processes, Volume 23, August 2016, Pages 157-164, ISSN 1526-6125
- [34] **J.-P. HERMANI, CH. BRECHER, M. EMONTS**. *Nanosecond Laser Processing of Diamond Materials*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [35] **WEGENER K., DOLD C., HENERICHS M., WALTER CH.**, *Laser Prepared Cutting Tools*, Physics Procedia, Volume 39, 2012, Pages 240-248, ISSN 1875-3892

- [36] CH. BRECHER, M. EMONTS, J.-P. HERMANI, T. STORMS, *Laser Roughing of PCD*, Physics Procedia, Volume 56, 2014, Pages 1107-1114, ISSN 1875-3892
- [37] C. DOLD, M. HENERICHS, P. GILGEN, K. WEGENER, *Laser Processing of Coarse Grain Polycrystalline Diamond (PCD) Cutting Tool Inserts using Picosecond Laser Pulses*, Physics Procedia, Volume 41, 2013, Pages 610-616, ISSN 1875-3892
- [38] P. BUTLER-SMITH, M. WARHANEK, D. AXINTE, M. FAY, , et. al, *The influences of pulsed-laser-ablation and electro-discharge-grinding processes on the cutting performances of polycrystalline diamond micro-drills*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 65, Issue 1, 2016, Pages 105-108, ISSN 0007-8506,
- [39] A. RICHMANN, S. KURZEN, B. CARRON, B. RICHERZHAGEN, *Cutting diamond tools using the LaserMicroJet® technology on a 5-axis machine*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [40] T. KRAMER, B. NEUENSCHWANDER, B. JÄGGI, et. al, *Influence of Pulse Bursts on the Specific Removal Rate for Ultra-fast Pulsed Laser Micromachining of Copper*, Physics Procedia, Volume 83, 2016, Pages 123-134, ISSN 1875-3892,
- [41] B. LAUER, B. JAEGGI, B. NEUENSCHWANDER, *Influence of the Pulse Duration onto the Material Removal Rate and Machining Quality for Different Types of Steel*, Physics Procedia, Volume 56, 2014, Pages 963-972, ISSN 1875-3892,
- [42] B. NEUENSCHWANDER, B. JAEGGI, M. SCHMID, *From fs to Sub-ns: Dependence of the Material Removal Rate on the Pulse Duration for Metals*, Physics Procedia, Volume 41, 2013, Pages 794-801, ISSN 1875-3892
- [43] B. NEUENSCHWANDER, B. JAEGGI, M. ZIMMERMANN, *High Throughput Laser Processing with Ultra-Short Pulses by High Speed Line-Scanning in Synchronized Mode*, Bern University of Applied Sciences. Stuttgart Laser Technology Forum (2014)
- [44] F. SIEGEL, U. KLUG, R. KLING, *Extensive Micro-Structuring of Metals using Picosecond Pulses – Ablation Behavior and Industrial Relevance*, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol.4; No.2 (2009)
- [45] S. MISHRA, V. YADAVA, *Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A review*, Optics and Lasers in Engineering, Volume 73, October 2015, Pages 89-122, ISSN 0143-8166,
- [46] M. PFEIFFER, A. ENGEL, S. WEIBMANTEL, et al., *Microstructuring of Steel and Hard Metal using Femtosecond Laser Pulses*, Physics Procedia, Volume 12, 2011, Pages 60-66, ISSN 1875-3892,
- [47] B. NEUENSCHWANDER, B. JAEGGI, M. SCHMID, G. HENNIG, *Surface Structuring with Ultra-short Laser Pulses: Basics, Limitations and Needs for High Throughput*, Physics Procedia, Volume 56, 2014, Pages 1047-1058, ISSN 1875-3892
- [48] RAČIUKAITIS, G., BRIKAS M., GEČYS P., et. al, *Use of High Repetition Rate and High Power Lasers in Microfabrication: How to Keep the Efficiency High?* JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol.4; No.3 (2009)
- [49] *Polarization*. Newport [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.newport.com/Polarization/144921/1033/content.aspx>>
- [50] *Laser products catalog 2015*. Altechna [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.altechna.com/download/catalog/Altechna_Catalog_2015.pdf>
- [51] ČERMÁK, A., KOŽMÍN, P., ŠRACHTA, P. *Potential usage of laser technologies for development of cutting tool microgeometries*. In MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1- 6. ISBN: 978-80-261-0636-4

- [52] GOLYSHEV, A.A., ORISHICH, A.M., SHULYATYEV, V.B. *Effect of the laser beam polarization state on the laser cut surface quality*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [53] LIN, C.Y., CHENG, C.W., OU, K.L. *Micro/nano-structuring of medical stainless steel using femtosecond laser pulses*. Physics Procedia 39 (2012) 661-668
- [54] ELIAS, Carlos Nelson. *Factors Affecting the Success of Dental Implants, Implant Dentistry - A Rapidly Evolving Practice*, Prof. Ilser Turkyilmaz (Ed.), ISBN: 978-953-307-658-4 (2011), InTech
- [55] HOFMEISTER s.r.o., Břit ve tvaru klínu s povrchovou mikrostrukturou u řezného nástroje. Původci: Pavel KOŽMÍN, Jiří SYROVÁTKA, Adam ČERMÁK. Česká republika. PUV 2016-32605. 7. 12. 2016
- [56] Next Scan Technology™, *Next Scan Technology Delivers Novel Scanning Solutions to Enable Highest Throughput*. Stuttgart Laser Technology Forum (2014)
- [57] HyperSCAN™ [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.lincolnlaser.com/scan-heads.html>>
- [58] Y. REG, Ch. KÄGELER, M. SCHMIDT, *Experimental studies on effects at micro-structuring of highly reflecting metals using nano- and picosecond-lasers*, Physics Procedia, Volume 5, 2010, Pages 245-253, ISSN 1875-3892
- [59] Ch. DANIEL, J. MANDERLA, S. HALLMANN, et al. *Influence of an Angular Hatching Exposure Strategy on the Surface Roughness During Picosecond Laser Ablation of Hard Materials*, Physics Procedia, Volume 83, 2016, Pages 135-146, ISSN 1875-3892
- [60] *Installation and Operation intelliSCAN_{se}*. Scanlab [online]. [cit. 2015-08-02]. Dostupné z WWW: <http://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Dateien/Data-Sheets/Scan-Systems/intelliSCANse_EN.pdf>
- [61] JAEGBI B., NEUENSCHWANDER B., et al., *Ultra-high-precision surface structuring by synchronizing a galvo scanner with an ultra-shortpulsed laser system in MOPA arrangement*, Proc. SPIE 8243, (2012)
- [62] WARHANEK, M., *CNC, galvo-scanhead and laser synchronization*. DIPLAT 4th Newsletter. July 2015. [cit. 2017-01-27] Dostupné z WWW: <<http://www.fp7-diplat.eu/wp-content/uploads/2015/10/Newsletter4.pdf>>
- [63] SCHAEFFER, R., *USP Lasers: A hot topic in laser manufacturing*. Industrial Laser Solutions for manufacturing [cit. 2017-02-14] Dostupné z WWW: <<http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-4/features/usp-lasers-a-hot-topic-in-laser-manufacturing.html?cmpid=ArchiveLinks>>
- [64] VÚTS, a.s., *Progresivní laserové technologie*. č. TA04011000. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2015.
- [65] J. KLEINBAUER, M. WOLF, R. FLEISCHHAKER, et al. *Ultrafast Thin-Disk Amplifiers*. TRUMPF Lasers. Stuttgart Laser Technology Forum (2014)
- [66] C. SCHNITZLER, *Power Scaling of Ultrashort-Pulse Lasers with InnoSlab Technology*. Amphos GmbH. Stuttgart Laser Technology Forum (2014)
- [67] T. GRAF, *Laser Technologies for the Manufacturing of Tomorrow*. Universität Stuttgart – institut für strahlwerkzeuge. Stuttgart Laser Technology Forum (2014)
- [68] Z. KUANG, D. LIU, W. PERRIE, et al. *Fast parallel diffractive multi-beam femtosecond laser surface micro-structuring*, Applied Surface Science, Volume 255, Issues 13–14, 15 April 2009, Pages 6582-6588, ISSN 0169-4332
- [69] A. GILLNER, M. JÜNGST, P. GRETZKI, *Multi Parallel Ultrashort Pulse Laser Processing*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich

- [70] A. GILLNER, *Highly Productive USP Laser Processing with Multi-beam Optics*. Annual Report 2015 – Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT.
- [71] G.R.B.E. RÖMER, A.J. Huis in't VELD, J. MEIJER, M.N.W. GROENENDIJK, *On the formation of laser induced self-organizing nanostructures*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 58, Issue 1, 2009, Pages 201-204, ISSN 0007-8506
- [72] ČERMÁK, A. *Micromachining Focusing on Efficiency of Process Control*. In *Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0509-1
- [73] S. TATRA, R. VAZQUEZ, A. OTTO, *Computational Study on the Effect of the Pulse Length on Laser Ablation Processes*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [74] M. DOMKE, G. PIREDDA, S. STROJ, *Calculating the Optimal Combination of Pulse-to-pulse and Fluence for Scribing and Surface Ablation with Ultrashort Pulsed Lasers*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [75] M. KONG, C. MIRON, D. AXINTE, et al, *On the relationship between the dynamics of the power density and workpiece surface texture in pulsed laser ablation*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 61, Issue 1, 2012, Pages 203-206, ISSN 0007-8506
- [76] WARHANEK, M., *Simulation of Pulsed Laser Ablation*. DIPLAT 3rd Newsletter. May 2015. [cit. 2017-01-20] Dostupné z WWW: <<http://www.fp7-diplat.eu/downloads/>>
- [77] CRISTEA. *Roughness Measurements with InfiniteFocus*. Alicona Imaging GmbH. Přednáška, 1. podzimní škola povrchového inženýrství, Plzeň 2012
- [78] www.ceratizit.com/products/rods-preforms/carbide-grades/ [cit. 06-14-2017]
- [79] L. ROMOLI, C.A.A. RASHED, G. LOVICU, et al. *Ultrashort pulsed laser drilling and surface structuring of microholes in stainless steels*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 63, Issue 1, 2014, Pages 229-232, ISSN 0007-8506
- [80] R. KLING, *Nanotexturation inspired by Nature*. Centre Technologique Optique et Lasers. Stuttgart Laser Technology Forum (2014)
- [81] R. WEBER, Ch. FREITAG, T. V. KONONENKO, et al. *Short-pulse Laser Processing of CFRP*, Physics Procedia, Volume 39, 2012, Pages 137-146, ISSN 1875-3892
- [82] N. KAWASEGI, H. SUGIMORI, H. MORIMOTO, et al. *Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior*, Precision Engineering, Volume 33, Issue 3, 2009, Pages 248-254, ISSN 0141-6359
- [83] A. MALSHE, K. RAJURKAR, A. SAMANT, et al. *Bio-inspired functional surfaces for advanced applications*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 62, Issue 2, 2013, Pages 607-628, ISSN 0007-8506
- [84] N. SUGITA, K. ISHII, T. FURUSHO, et al. *Cutting temperature measurement by a micro-sensor array integrated on the rake face of a cutting tool*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 64, Issue 1, 2015, Pages 77-80, ISSN 0007-8506
- [85] D. CONRAD, L. RICHTER, *Ultra-short Pulse Laser Structuring of Molding Tools*, Physics Procedia, Volume 56, 2014, Pages 1041-1046, ISSN 1875-3892
- [86] S. WÄCHTER, D. CONRAD, S. SÄNDIG, et. al. *Structuring of Injection Molding Tools with Ultrashort Laser Pulses for Surface Functionalization after Casting*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [87] B. WU, M. ZHOU, J. LI, et al. *Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser*, Applied Surface Science, Volume 256, Issue 1, 2009, Pages 61-66, ISSN 0169-4332

- [88] J. **SAMPEDRO**, R. **FERRE**, E. **FERNÁNDEZ**, et al. *Surface Functionalization of AISI 316 Steel by Laser Texturing of Shaped Microcavities with Picosecond Pulses*, Physics Procedia, Volume 39, 2012, Pages 636-641, ISSN 1875-3892
- [89] P.A. **BARBOSA**, M. **BERTOLETE**, R.E. **SAMAD**, et al. *Investigation of Femtosecond Laser Texturing in Cemented Carbide Cutting Tools*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich
- [90] T. **SUGIHARA**, T. **ENOMOTO**, *Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface—Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns*, Precision Engineering, Volume 33, Issue 4, 2009, Pages 425-429, ISSN 0141-6359
- [91] A. **ČERMÁK**, P. **KOŽMÍN**. *Multi-axis Positioning Approach for Precise Sharpening of Monolithic Cutting Tools by USP Laser Processing*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2017, Munich
- [92] A. **ČERMÁK**, P. **KOŽMÍN**, *Vliv tangenciálního laserového mikroobrábění na rektifikaci řezných hran*. Interní zpráva fa HOFMEISTER s.r.o., Plzeň, 2016, 7 s.
- [93] M. **WARHANEK**, J. **PFAFF**, P. **MARTIN**, et al. *Geometry Optimization of Polycrystalline Diamond Tools for the Milling of Sintered ZrO₂*, Procedia CIRP, Volume 46, 2016, Pages 290-293, ISSN 2212-8271
- [94] E. **AUDOUARD**, G. **MINCUZZI**, A. **LETAN**, et al. *Optimization of Key Parameters for Efficient Processing with 100W Femtosecond Lasers*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2017, Munich
- [95] K. **SUGIOKA**. *Advanced Femtosecond Laser Processing for Electronic and Biological Applications*. RIKEN institut, 4th UKP Workshop – Fraunhofer Institute for Laser Technology, Aachen 4/2017
- [96] **DAHOTRE**, Narendra B. a Sandip P. **HARIMKAR**. *Laser fabrication and machining of materials*. New York, N.Y.: Springer, c2008. ISBN 9780387723440.
- [97] G. **GIANNUZZI**, C. **GAUDIUSO**, A. **ANCONA**, et al. *Incubation Effect during Laser Irradiation of Stainless Steel with Bursts of fs-pulses*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2017, Munich

9 Publikační činnost autora

Seznam publikovaných článků a příspěvků

- (i) ČERMÁK, A. *Interakce slinutého karbidu s laserovým paprskem o nanosekundové délce pulzu. Strojírenská technologie*, 2013, roč. 4, č. 18, s. 225-228. ISSN: 1211-4162
- (ii) ČERMÁK, A., KOŽMÍN, P., SYROVÁTKA, J. *Aspekty při využívání laserových zařízení v procesu 3D mikroobrábění. In Sborník příspěvků multioborové konference LASER 53. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., 2013. s. 35-36. ISBN: 978-80-87441-10-7*
- (iii) ČERMÁK, A., ZETEK, M., KOŽMÍN, P. *Úprava makrogeometrie řezných nástrojů nízkonákladovým laserem. In 5. Mezinárodní konference ICTKI 2014. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2014. s. 27-31. ISBN: 978-80-7414-679-4*
- (iv) ČERMÁK, A. *The Possibilities of Edge Preparation of Cutting Tools Using a LASER. In Soutěžní přehledka studentských a doktorských prací 2014. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 1-5. ISBN: 978-80-261-0359-2*
- (v) ČERMÁK, A., KOŽMÍN, P., SYROVÁTKA, J et al. *Aplikace laseru při výrobě řezných nástrojů. Třešť - Vysočina, 2014. In Sborník příspěvků multioborové konference LASER 54. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., 2014. s. 35-36. ISBN: 978-80-87441-13-8*
- (vi) ČERMÁK, A., STANKEVIČ, V., KOŽMÍN, P. et al. *Micromachining with usage of LASER. In Strojírenská technologie. 2015. ISBN: 978-80-261-0304-2*
- (vii) ČERMÁK, A. *Laser micromachining focusing on efficiency of process control. In Soutěžní přehledka studentských a doktorských prací. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0509-1*
- (viii) ČERMÁK, A., KOŽMÍN, P. *Programming options of laser micromachining centre leading to effective setting of processes. In Sborník příspěvků multioborové konference LASER 55. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., 2015. s. 10-11. ISBN: 978-80-87441-16-9*
- (ix) ČERMÁK, A. *Advanced kinematic analysis of general surface designed for modification of cutting tool geometries by laser micromachining center. In Soutěžní přehledka studentských a doktorských prací 2016. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0619-7*
- (x) ČERMÁK, A., ŠRACHTA, P., KOŽMÍN, P. *Aplikace UKP laseru v průmyslové praxi. In Sborník příspěvků multioborové konference LASER 56. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., 2016. s. 18-19. ISBN: 978-80-87441-18-3*
- (xi) ČERMÁK, A., KOŽMÍN, P., ŠRACHTA, P. *Potential usage of laser technologies for development of cutting tool microgeometries. In MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0636-4*

- (xii) ČERMÁK, A. *Multi-axis Positioning Approach of Monolithic Cutting Tools for Laser Micromachining*. In *Elektronický sborník příspěvků SVOČ 2017*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0702-6
- (xiii) ČERMÁK, A., KOŽMÍN, P. *Multi-axis positioning approach for precise sharpening of monolithic cutting tools by USP laser processing*. WLT - Lasers in Manufacturing Conference 2017, Munich.

Seznam nepublikovaných článků a příspěvků

- (xiv) A. ČERMÁK, P. KOŽMÍN, *Vliv tangenciálního laserového mikroobrábění na rektifikaci řezných hran*. Interní zpráva fa HOFMEISTER s.r.o., Plzeň, 2016, 7 s.
- (xv) ČERMÁK, A. *Analýza stavu laserem mikroobrobených povrchů u cermetových VBD*. Plzeň, 2014. Článek v rámci předmětu – Speciální metrologie

Publikace v přípravě

- (xvi) STANKEVIČ, V., ČERMÁK, A., RAČIUKAITIS, G., KOŽMÍN, P., MIKALAUSKAS, S., INDRIŠIUNAS, S. *Processing of Ultra-hard Materials with Picosecond Pulses: From Research Work to Industrial Applications*. 36th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics ICALEO 2017, Atlanta, GA USA (k datu 11. 8. 2017 nepublikováno - v recenzním řízení)

Užitný vzor

- (xvii) HOFMEISTER s.r.o., *Břit ve tvaru klínu s povrchovou mikrostrukturou u řezného nástroje*. Původci: Pavel KOŽMÍN, Jiří SYROVÁTKA, Adam ČERMÁK. Česká republika. PUV 2016-32605. 7. 12. 2016

Prezentace

prezentovány byly výstupy ze seznamu publikací (ii-xiii) včetně následujících

- (xviii) ČERMÁK, A. *Tools manufacturing using a laser*. FTMC - Vilnius, 3. 11. 2014. Vyzvaná přednáška
- (xix) ČERMÁK, A. *Progresivní metody ve využívání laseru v mikroobrábění*. Plzeň, 2014. Prezentace v rámci předmětu – Experimentální metody v obrábění pro doktorské studium
- (xx) ČERMÁK, A. *Mechatronika a charakteristika laserového víceosého mikroobráběcího centra*. Plzeň, 2014. V rámci předmětu – Aktuální otázky využití mechatroniky v oboru

10 Přílohy

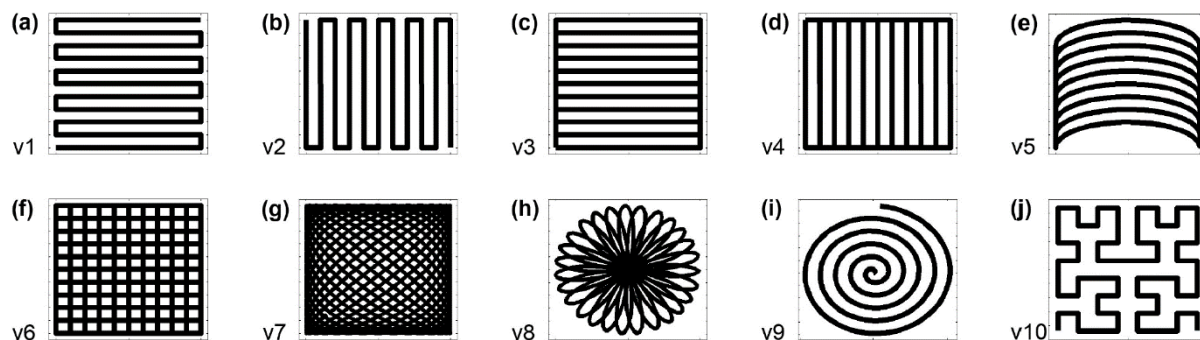
Obsah příloh

10.1	Přílohy ke kapitole č. 2	I
10.1.1	Jednotlivé způsoby rozmítání laserového paprsku.....	I
10.1.2	Princip CPA technologie	I
10.1.3	Aplikování pokročilé testovací matice	II
10.2	Výkresová dokumentace pro ověření cíle disertační práce.....	III
10.2.1	Základní výkres čelní válcové frézy.....	III
10.2.2	Segmentový utvařec třísek.....	IV
10.2.3	Plynulý utvařec třísek.....	V
10.3	Shrnující soubor protokolů z měření.....	VI
10.3.1	Segmentový utvařec třísek – protokol z měření polohy a rozměrů	VI
10.3.2	Segmentový utvařec třísek – protokol z měření tvaru průřezu geometrické entity.....	VII
10.3.3	Segmentový utvařec třísek – protokol z měření drsnosti	VIII
10.3.4	Plynulý utvařec třísek – protokol z měření polohy a rozměrů	IX
10.3.5	Plynulý utvařec třísek – protokol z měření tvaru průřezu geometrické entity.....	X
10.3.6	Plynulý utvařec třísek – protokol z měření drsnosti	XI

10.1 Přílohy ke kapitole č. 2

10.1.1 Jednotlivé způsoby rozmitání laserového paprsku

Další způsoby nestandardního rozmitání se věnuje zdroj [18].

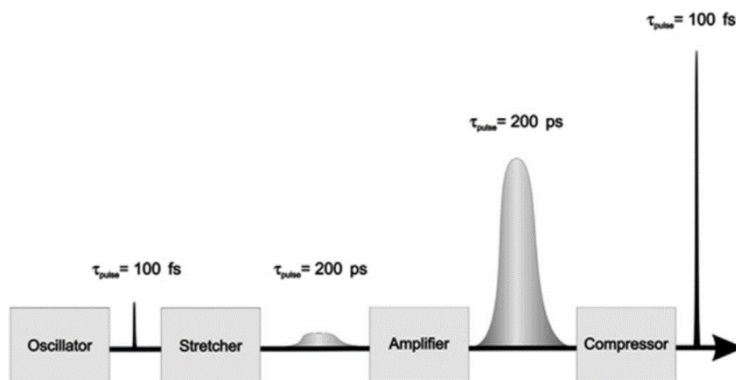


Obrázek 0-1 Souhrn variant rozmitání laserového paprsku [18]

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| a. horizontální meandr | Matematické varianty |
| b. vertikální meandr | g. Lissajousova křivka |
| c. uzavřený horizontální meandr | h. spirografická křivka |
| d. uzavřený vertikální meandr | i. Archimedova spirála |
| e. segmentový obloukový šrafování | j. Hilbertova křivka |
| f. křížový šrafovací vzor | |

10.1.2 Princip CPA technologie

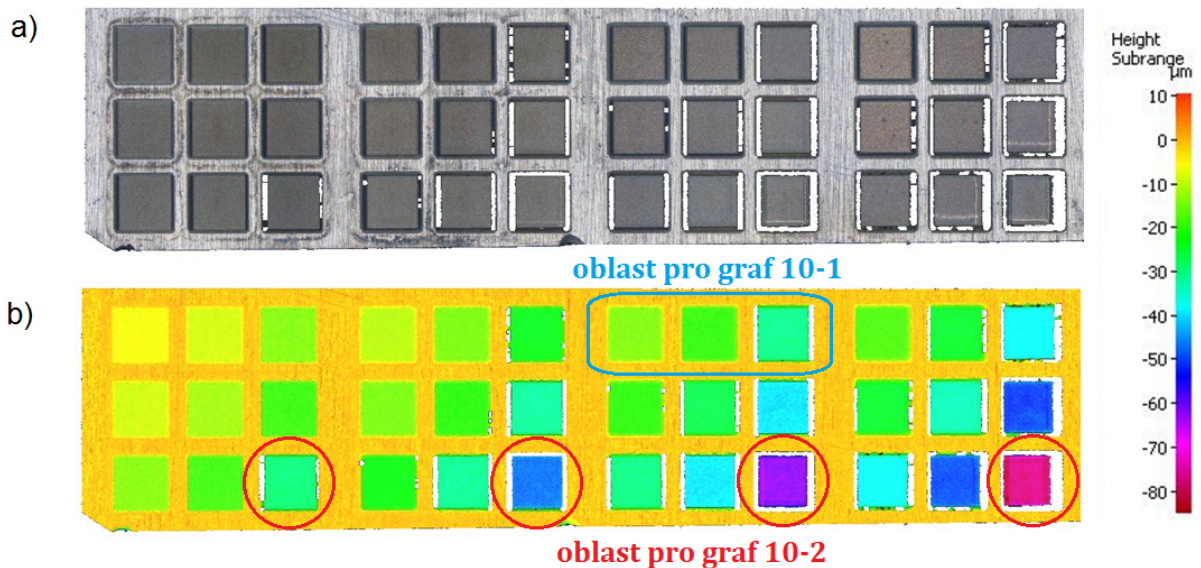
Technologie CPA (Chirped pulsed amplification) je používána pro zesilování energie laserových pulsů. Přímé zesilování energie laserového záření by vedlo ke zničení optických komponentů. Obrázek 10-2 demonstruje princip technologie CPA, při které nejprve dojde k prodloužení délky pulsů τ_p o $10^3 - 10^4$ násobek původní hodnoty, čímž se zredukuje jeho špičkový výkon P_p . Tento „natažený“ laserový puls je následně zesílen za pomoci amplifikátoru (zesilovače) a nakonec je komprimován do své původní délky pulsů τ_p [45].



Obrázek 0-2 Princip CPA technologie [45]

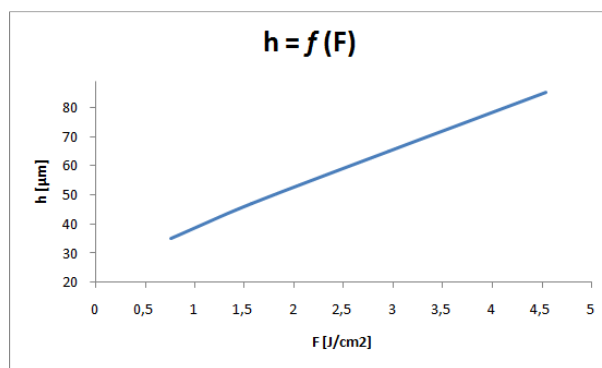
10.1.3 Aplikování pokročilé testovací matice

Ukázka použití metodické přístupu experimentálního testování ablace materiálu dle vlastního návrhu.

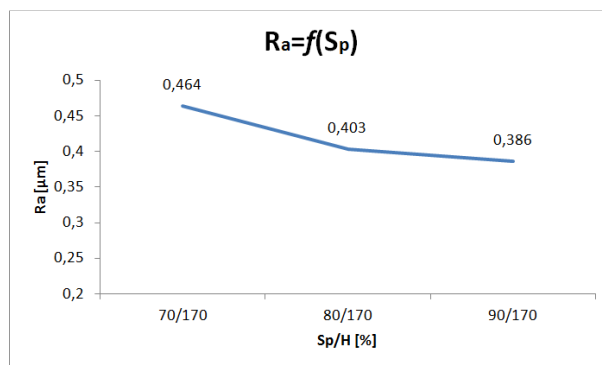


Obrázek 0-3 Ukázka 1 řádku pokročilé matice na řezném materiálu – slinutý karbid
: a) "truecolor" b) "pseudocolor" s barevnou škálou hloubky ablace

V obrázku 10-3b je pomocí pseudo zabarvení znázorněná proměnná hloubka vlivem variace proměnných. Dle uvedeného vzorku lze získat závislosti ablaci a kvality povrchu pro všechny zmíněné proměnné, které byly vydefinovány na vstupu maticového algoritmu. Pro názornost získávání závislostí lze vyšetřit např.: $Z_{abl}=f(F)$ - graf 10-1; $R_a=f(S_p)$ - graf 10-0.



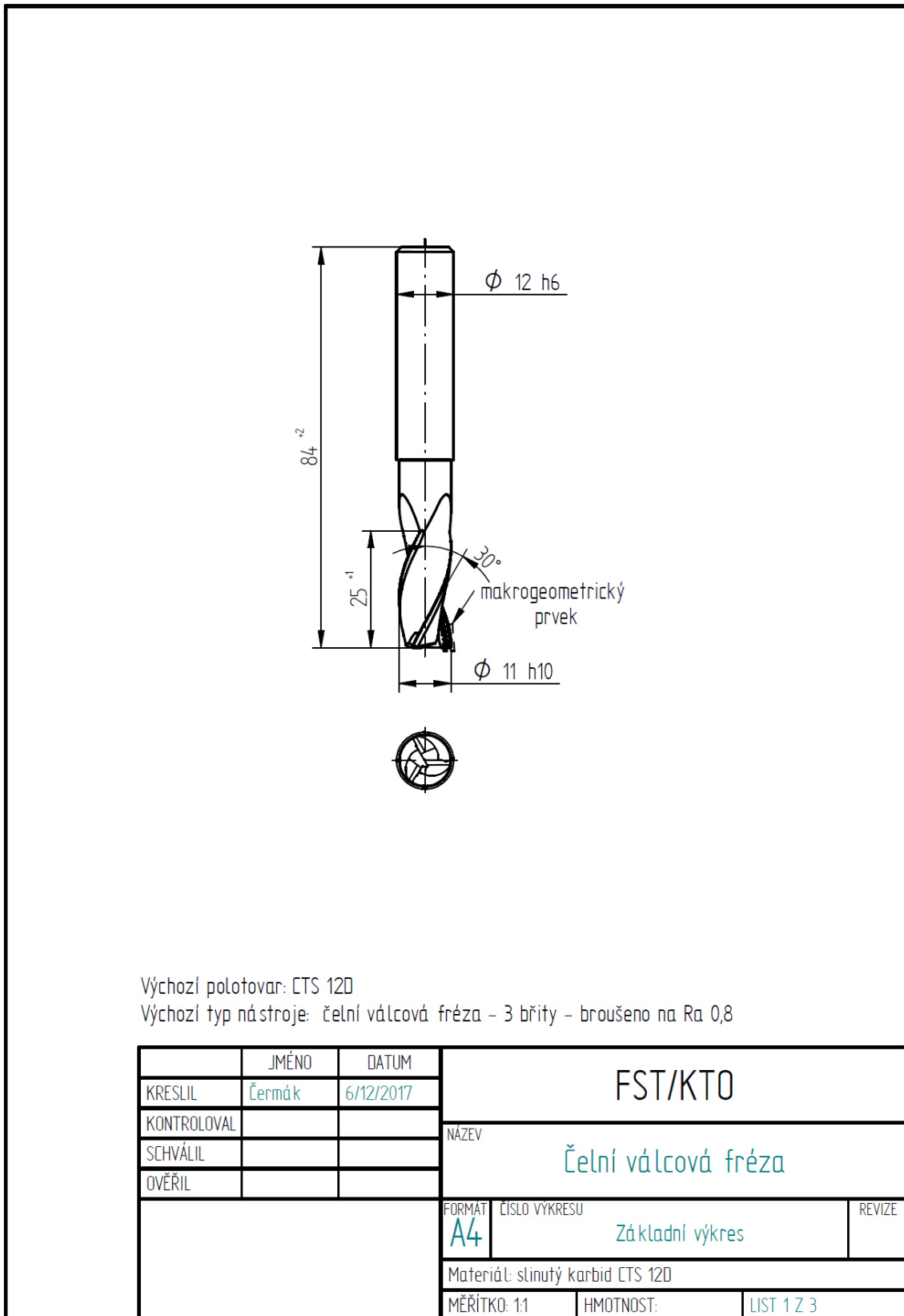
Graf 0-1 $Z_{abl} = f(F)$



Graf 0-2 $R_a = f(S_p)$

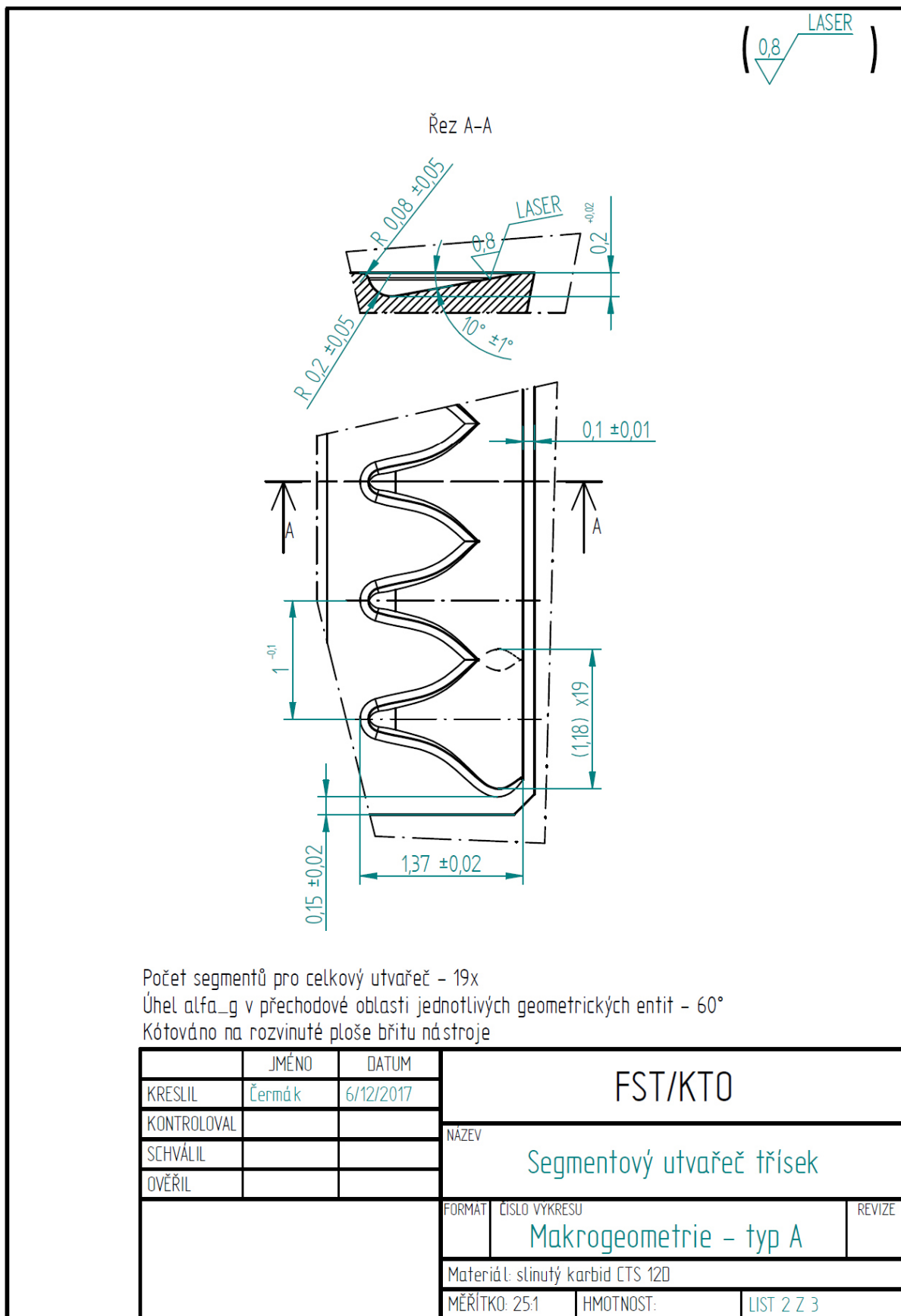
10.2 Výkresová dokumentace pro ověření cíle disertační práce

10.2.1 Základní výkres čelní válcové frézy



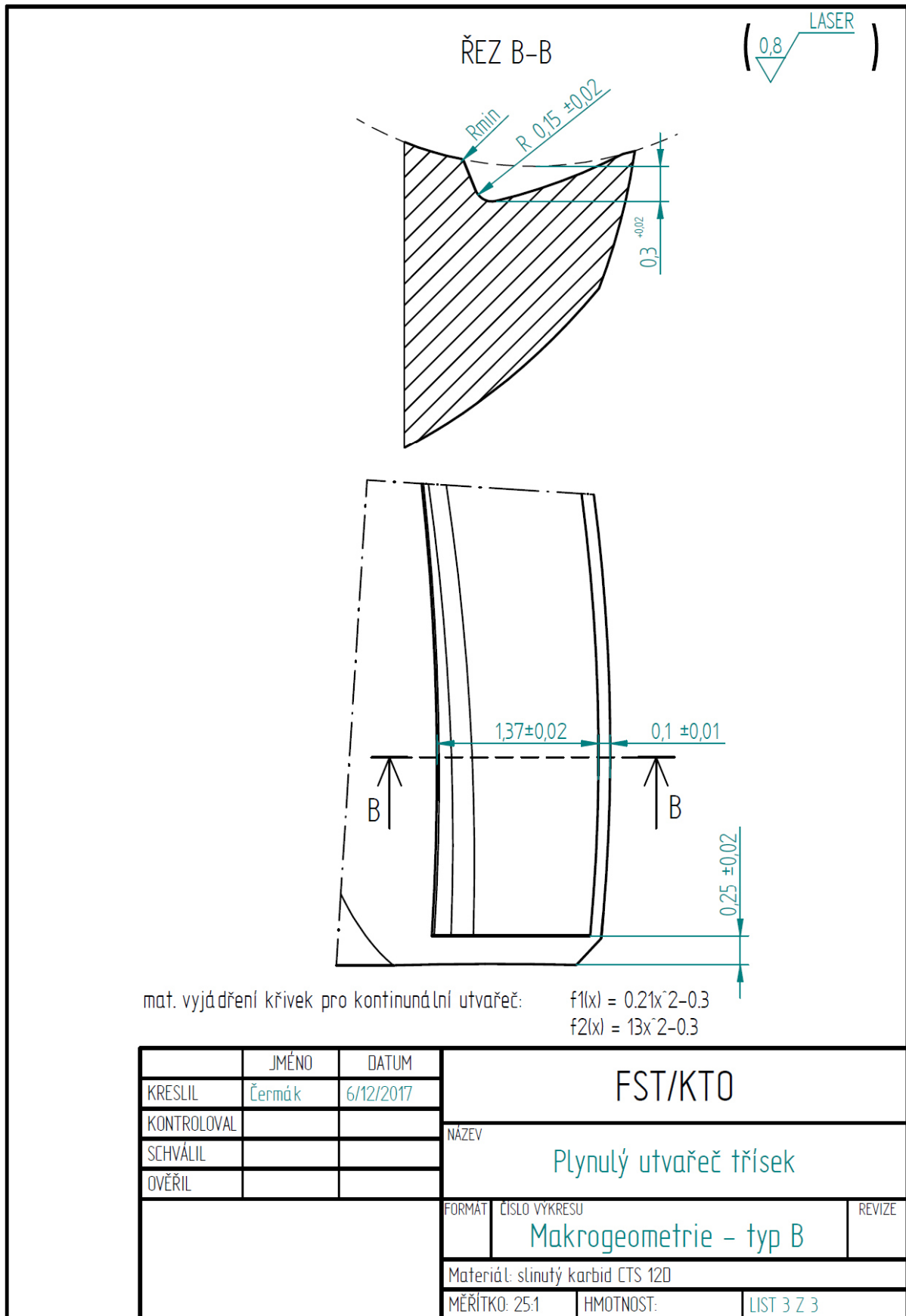
Obrázek 0-4 Základní výkres nástroje

10.2.2 Segmentový utvařeč třísek



Obrázek 0-5 Výkres segmentového utvařeče třísek

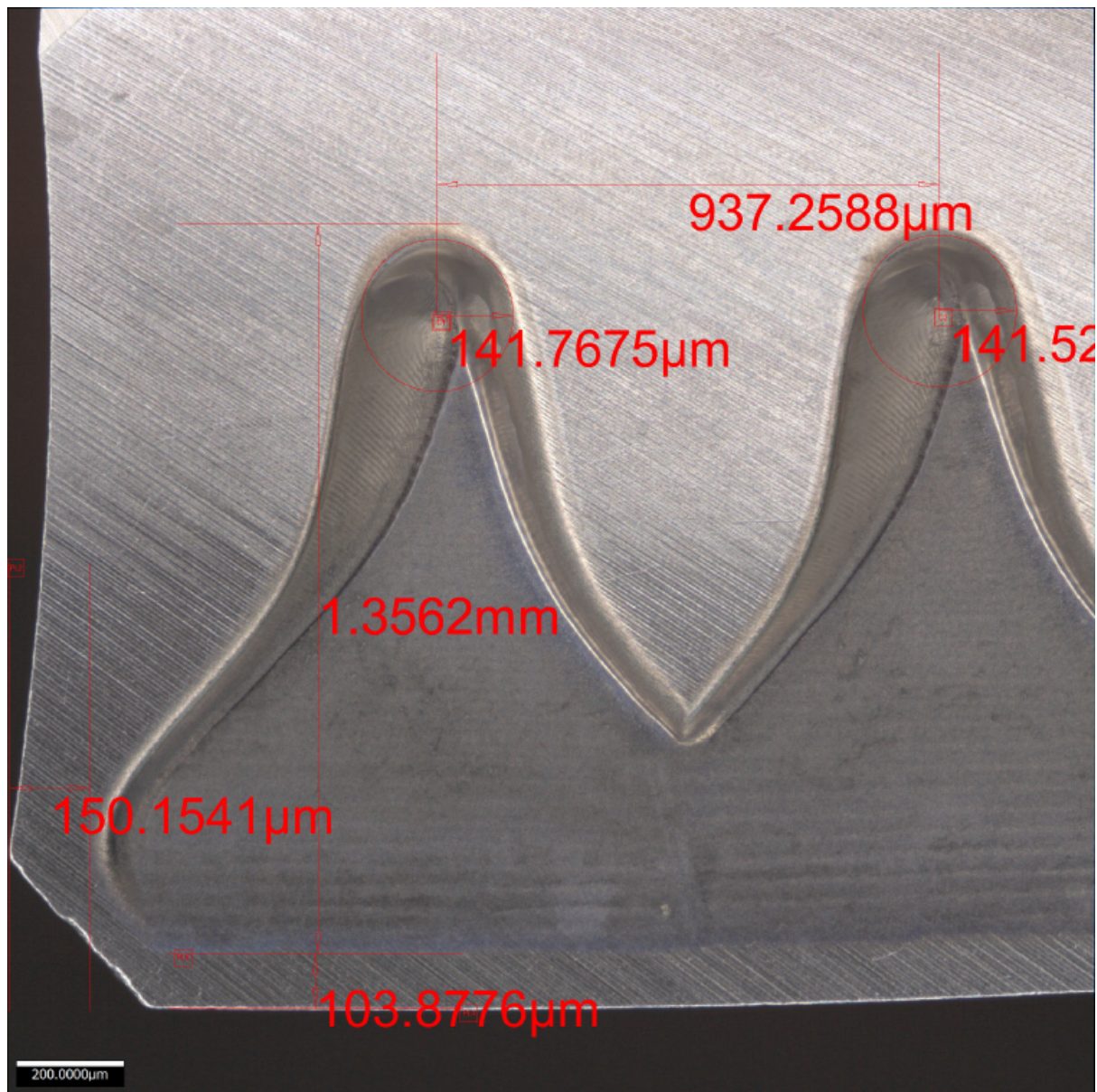
10.2.3 Plynulý utvařec třisek



Obrázek 0-6 Výkres plynuleho utvařec třisek

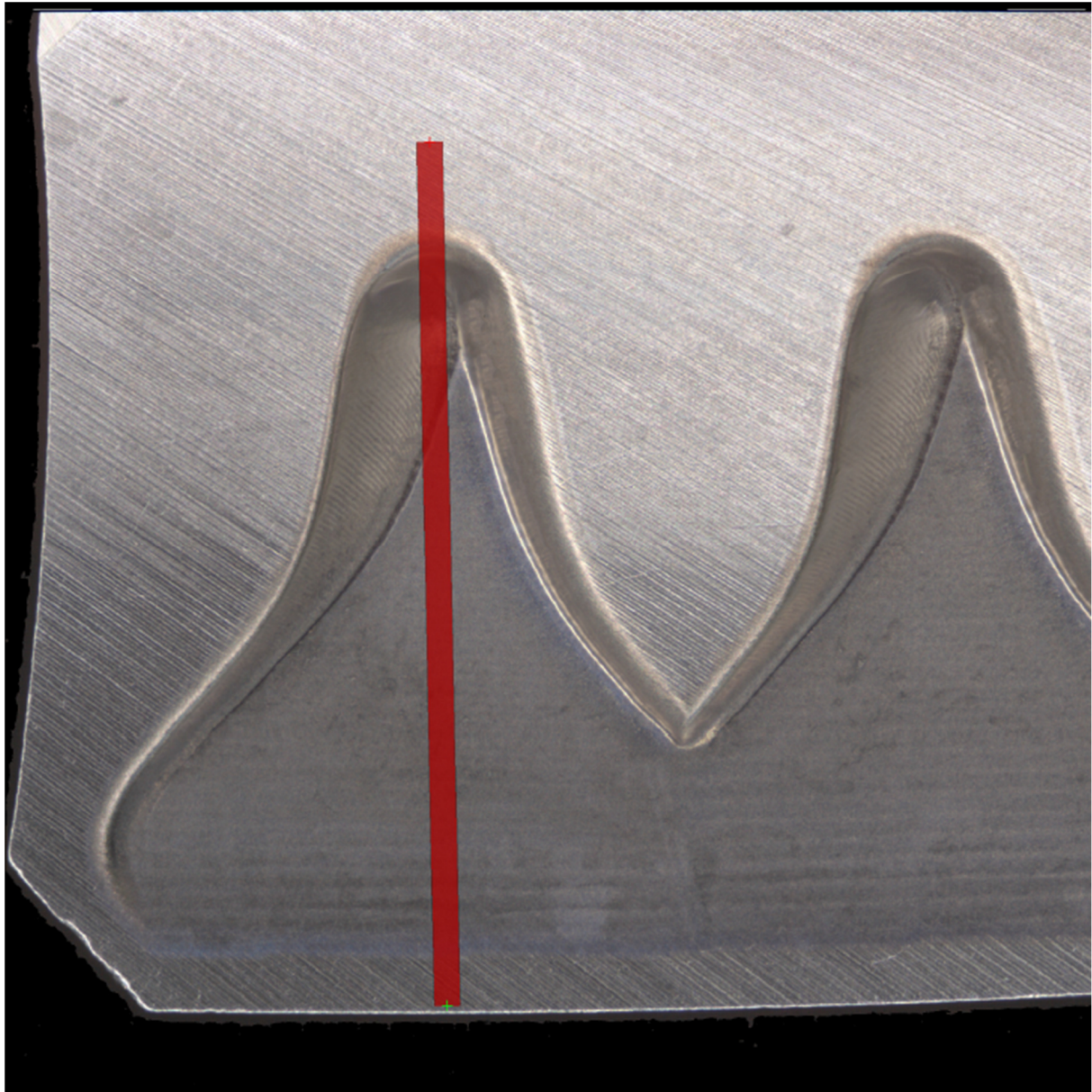
10.3 Shrnující soubor protokolů z měření

10.3.1 Segmentový utvařec třísek – protokol z měření polohy a rozměrů

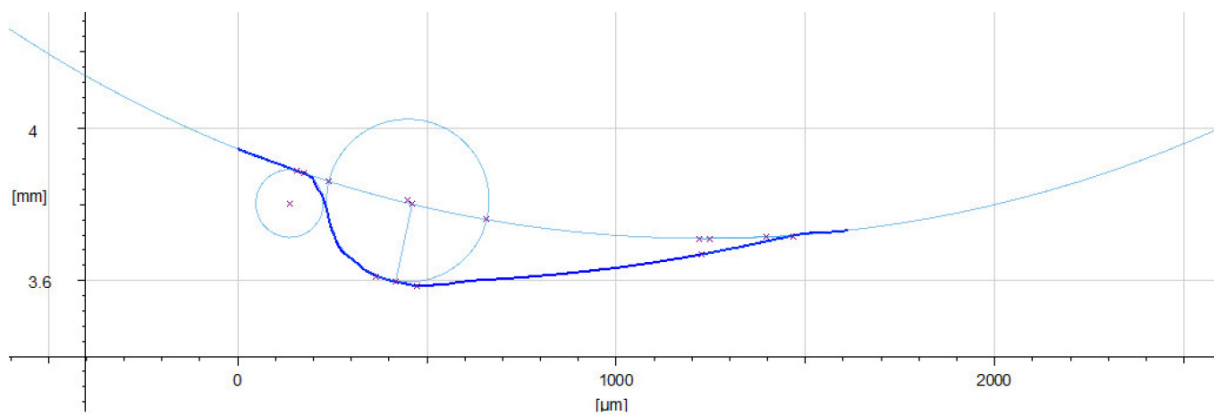


Obrázek 0-7 Měření polohy a rozměrů - segmentový utvařec třísek

10.3.2 Segmentový utvařec třísek – protokol z měření tvaru průřezu geometrické entity



Obrázek 0-8 Měření tvaru průřezu geometrické entity - segmentový utvařec třísek



Obrázek 0-9 Měření tvaru průřezu geometrické entity - segmentový utvařec třísek

Tabulka 0-1 Souhrn naměřených hodnot

Circle

	Radius [μm]	C.x [μm]	C.y [mm]	mean Deviation [μm]	min. Deviation [μm]	max. Deviation [μm]	Circumference [μm]	Area [μm^2]
Circle 1	3332.7209	1233.4382	7.0424	409.2376	-1.8923	1.0369	20940.1028	34893758.8854
Circle 5	89.3109	135.3357	3.8020	1791.3675	-6.1353	2.0114	561.1572	25058.7416
Circle 6	215.1753	448.4587	3.8099	1244.2200	-2.0885	4.5587	1351.9862	145457.0121

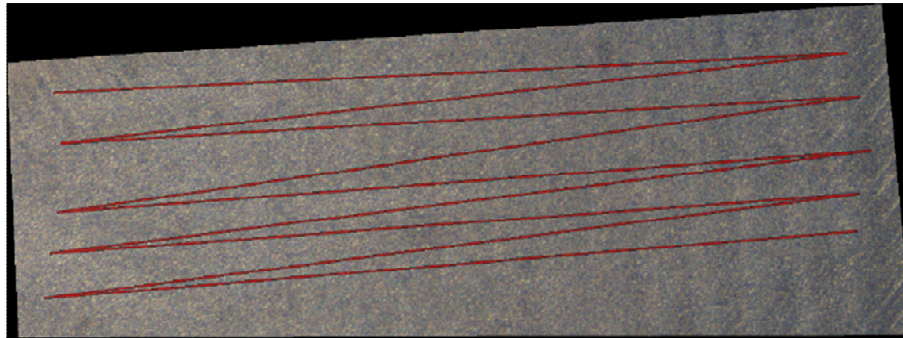
Distance

	Distance [μm]	Farthest Point X [μm]	Farthest Point Y [mm]	Angle [$^\circ$]
Distance 1	209.5742	460.0963	3.8009	77.6554

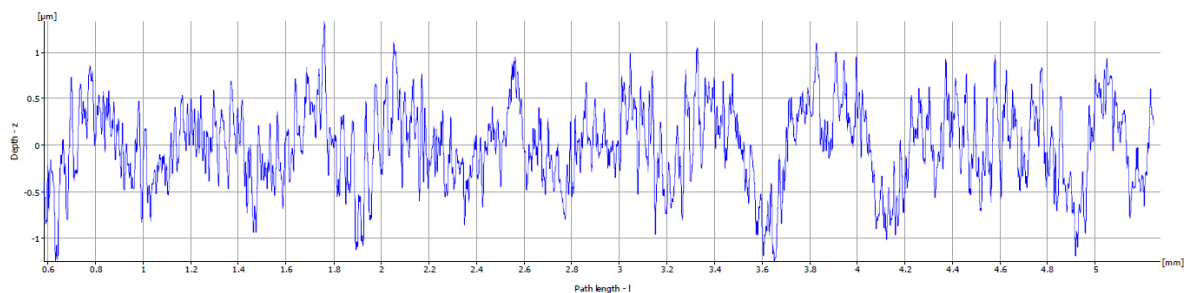
Angle

	Angle [$^\circ$]	Apex X [mm]	Apex Y [mm]
Angle 1	9.7396	1.4679	3.7156

10.3.3 Segmentový utvařec třísek – protokol z měření drsnosti



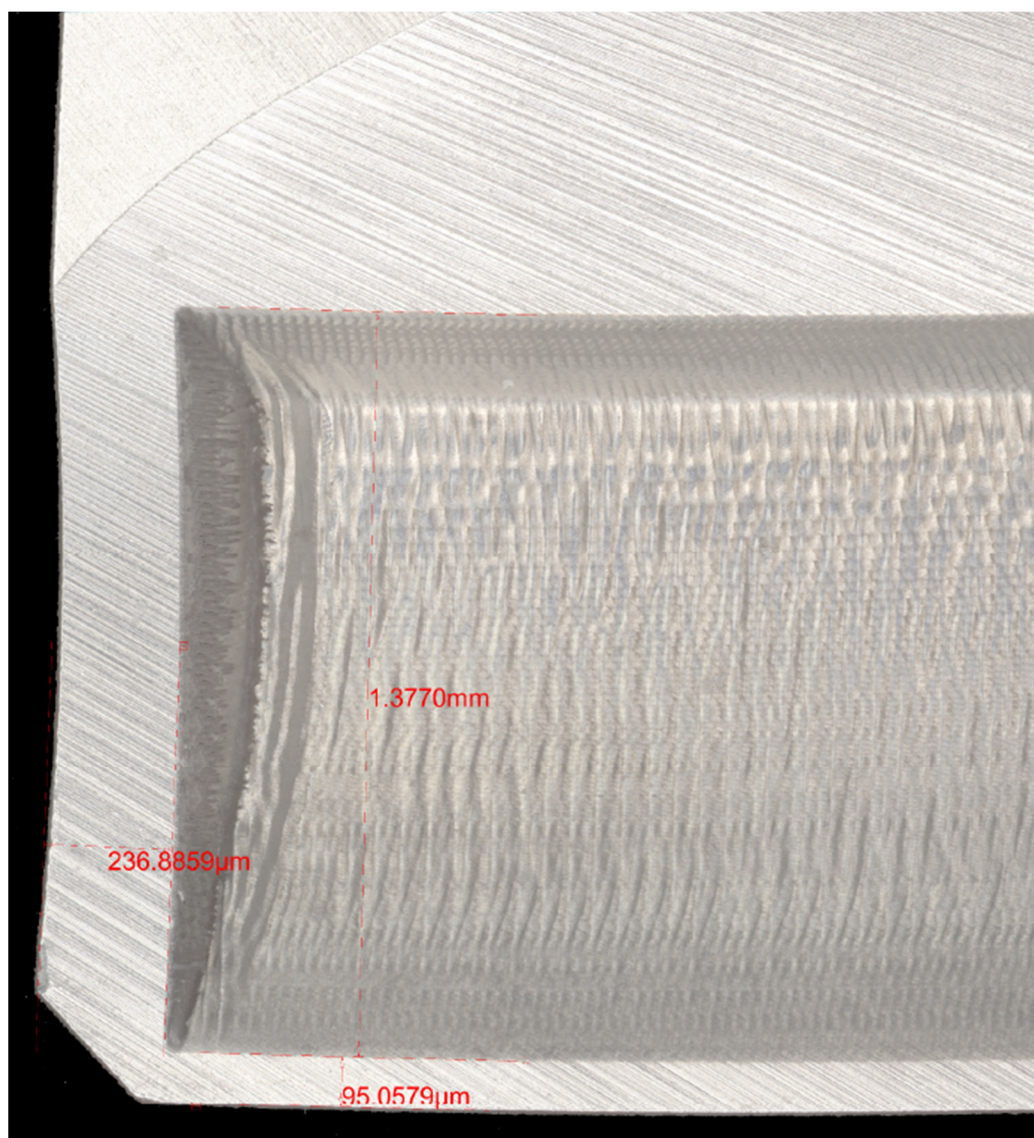
Obrázek 0-10 Měření drsnosti povrchu - segmentový utvařec třísek



Ra: 353.7683nm
Rq: 437.9503nm
Rz: 2.2229 μm

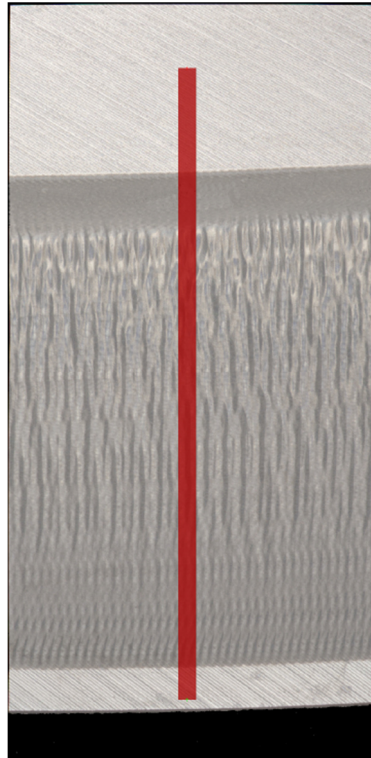
Filter: high pass - roughness profile
Lc:= 800.0000 μm

10.3.4 Plynulý utvařec třísek – protokol z měření polohy a rozměrů

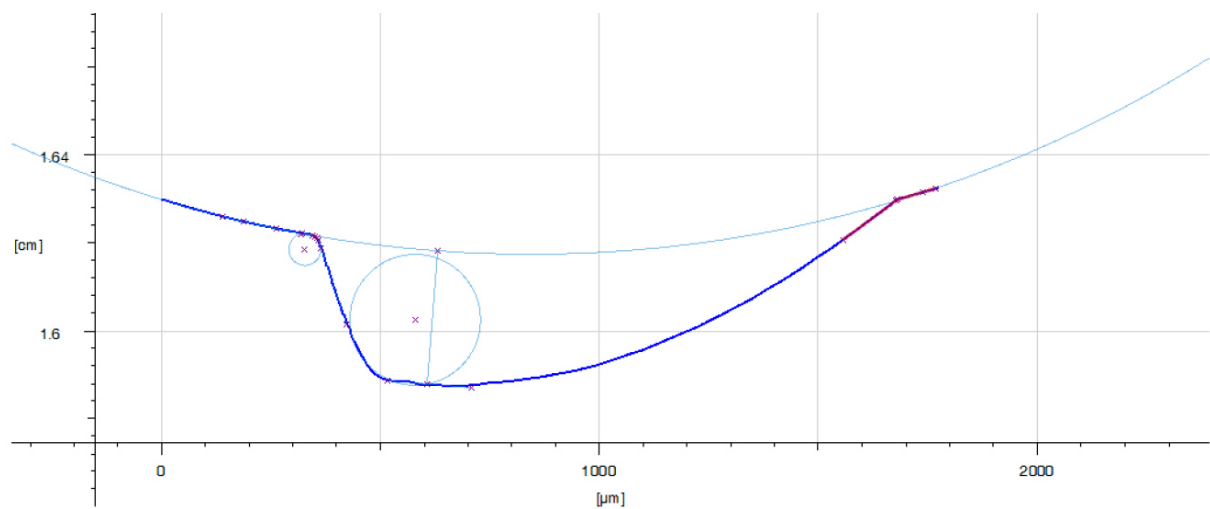


Obrázek 0-11 Měření polohy a rozměrů - plynulý utvařec třísek

10.3.5 Plynulý utvařec třísek – protokol z měření tvaru průřezu geometrické entity



Obrázek 0-12 Měření tvaru průřezu geometrické entity - plynulý utvařec třísek



Obrázek 0-13 Měření tvaru průřezu geometrické entity - plynulý utvařec třísek

Tabulka 0-2 Souhrn naměřených hodnot

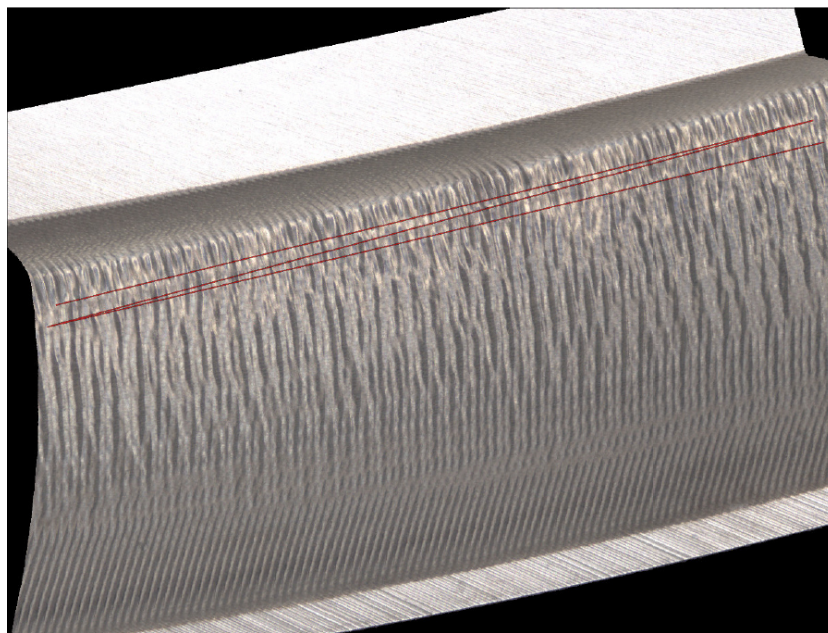
Circle

	Radius [μm]	C.x [μm]	C.y [cm]	mean Deviation [μm]	min. Deviation [μm]	max. Deviation [μm]	Circumference [μm]	Area [μm^2]
Circle 1	2911.9328	842.9993	1.9086	279.3402	-0.9638	1.0919	18296.2134	26638671.9750
Circle 2	149.5473	578.3349	1.6024	3483.7862	-7.3705	9.6562	939.6337	70259.8642
Circle 3	36.7010	325.8799	1.6185	855.4675	-1.3808	2.3168	230.5994	4231.6189

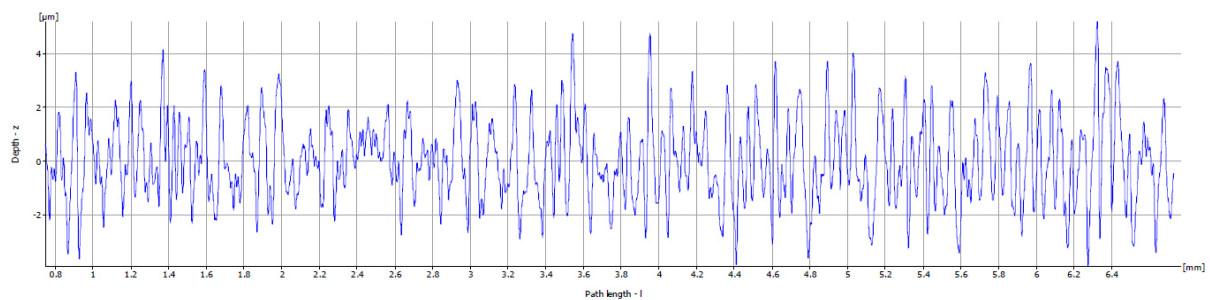
Distance

	Distance [μm]	Farthest Point X [μm]	Farthest Point Y [cm]	Angle [°]
Distance 1	305.5798	628.4205	1.6182	85.7217

10.3.6 Plynulý utvařec třísek – protokol z měření drsnosti



Obrázek 0-14 Měření drsnosti povrchu - plynulý utvařec třísek



Ra: 1.2328 μm
 Rq: 1.5349 μm
 Rz: 7.7005 μm

Filter: high pass - roughness profile
 Lc:= 800.0000 μm