

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU PŘI ŘEZÁNÍ U TECHNOLOGIE AWJ A WJM

EVALUATION OF SURFACE QUALITY WHEN USING AWJ AND WJM CUTTING METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MARTIN PECHÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN SLANÝ

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Pecháček Martin, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM

v anglickém jazyce:

Evaluation of Surface Quality When Using AWJ And WJM Cutting Methods

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úvod

1. Popis a rozbor systému obrábění vodním paprskem s abrazivem
2. Principy vzniku řezné spáry
3. Hodnocení vlivů vstupujících do procesu řezání, které ovlivňují kvalitu povrchu
4. Nové trendy vedoucí ke zvýšení kvality povrchu v místě řezu
5. Zhodnocení výhod a nevýhod u povrchu vzniklých při použití NMO
6. Technicko-ekonomické zhodnocení NMO

Závěr

Cíle diplomové práce:

Teoretické zvládnutí problematiky nekonvenčních metod obrábění se zaměřením na technologii vysokotlakého vodního paprsku.

Seznam odborné literatury:


1. MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie. Košice: Technická univerzita Košice, Strojnícká fakulta. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. Viena, vydavateľstvo a tlačiareň, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. URBÁNEK, J. Automatizace výrobních procesů. Brno: PC DIR, 1994.
4. KRAJNÝ, Z. Vodný luč v praxi – WJM. Bratislava: EPOS, 1998. ISBN 80-8057-091-4.
5. HUMÁR, A. Technologie I: Technologie obrábění – 3. část. [online]. [cit. 2007-11-02]. 57 s. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné na [www: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory).

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Slaný

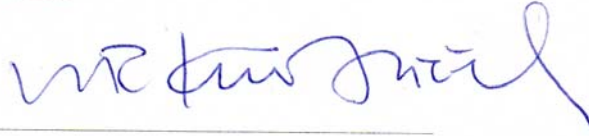
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 19.11.2009





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná studie pojednává o technologii hydroabrazivního dělení materiálu a vlivu rychlosti posuvu řezací hlavy na topografii povrchu řezných hran z hlediska drsnosti. Z normy ČSN EN ISO 4288 bylo vybráno 8 parametrů charakterizujících stav kvality povrchu po řezání AWJ. Jako zkušební materiál byl zvolen nelegovaný titan s označením ASTM B265 grade 2, při jehož řezání AWJ byla měněna rychlost posuvu a následně vyhodnocena skladba povrchu pro zjištění distribuce jednotlivých parametrů v různých hloubkách řezu. Bylo zjištěno, že rychlost posuvu u metody AWJ má výrazný vliv na topografii povrchu a že se vzrůstající rychlostí a hloubkou řezu dochází ke zvětšování šířek prvků profilu. Dále byly výsledky dvou vybraných rychlostí posuvu porovnány s technologií laserového paprsku, při čemž bylo prokázáno, že řezání AWJ je pro zkoumaný materiál vzhledem k výsledné drsnosti povrchu a nulovému tepelnému ovlivnění materiálu výhodnější.

Klíčová slova

vysokotlaký hydroabrazivní paprsek, rozbor technologie, faktory, trendy, rychlost posuvu řezací hlavy, měření drsnosti povrchu, parametry drsnosti povrchu, titan ASTM B265 grade 2, laserový paprsek

ABSTRACT

This study deals with technology of abrasive water jet material cutting and influence of cutting head feed rate on surface topography of cut walls with regards to roughness. Eight parameters were chosen based on the CSN EN ISO 4288 standard representing quality of surface after AWJ cutting. When AWJ cutting the chosen material – commercially pure ASTM B265 grade 2 titanium – feed rate was being changed and in order to obtain information about each parameter's distribution in various depths of the cut, surface composition was evaluated. It was found out that feed rate has significant influence on surface and that the profile elements' width grows when increasing the feed rate and cut depth. Furthermore, two selected feed rate results were compared to laser beam technology and conclusion for the selected material was made that AWJ cutting is more preferable due to final roughness and no heat affect on the material.

Key words

high-pressure abrasive water jet, analysis of technology, factors, trends, feed rate of cutting head, measuring of surface roughness, parameters of surface roughness, titanium ASTM B265 grade 2, laser beam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 88 s., 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu Ing. Martinovi Slanému za připomínky a rady při vypracování diplomové práce, doc. Ing. Janu Valíčkoví, Ph. D. za pomoc při návrhu a realizaci zkoušek, cenné rady a podkladové materiály, panu Petru Kretíkovi – zástupci firmy PTV – za podkladové materiály, doc. Ing. Leoši Bumbálkovi, Ph. D. za přínosné konzultace v oblasti metrologie, Ing. Michalovi Zeleňákovi za rady při zpracování dat a v neposlední řadě také svým rodičům a přítelkyni za jejich podporu.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 TECHNOLOGIE DĚLENÍ MATERIÁLU.....	11
1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění.....	11
2 ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ KAPALINOVÉHO PAPERU.....	13
3 POPIS A ROZBOR SYSTÉMU OBRÁBĚNÍ VODNÍM A HYDROABRAZIVNÍM PAPEREM.....	14
3.1 Technologie WJ a AWJ.....	14
3.2 Charakteristika technologie AWJ.....	15
3.3 Vznik nástroje.....	17
3.3.1 Voda.....	17
3.3.2 Úprava vody.....	17
3.3.3 Rozvod nízkotlaké vody.....	18
3.3.4 Komprese.....	18
3.3.5 Útlum rázů v kapalině.....	19
3.3.6 Rozvod vysokotlaké vody.....	20
3.3.7 Filtrace vysokotlaké vody.....	20
3.3.8 Vodní tryska.....	21
3.3.9 Abrasivo.....	22
3.3.10 Směšování s abrazivem.....	22
3.3.11 Hydroabrazivní trubice.....	23
3.4 Působení nástroje.....	24
3.4.1 Šíření paprsku okolním prostředím.....	24
3.4.2 Interakce s děleným materiálem.....	25
3.4.3 Útlum hydroabrazivního paprsku.....	27
3.5 Faktory vstupující do procesu řezání, jež ovlivňují kvalitu povrchu.....	28
3.6 Trendy vedoucí ke zvýšení kvality v místě řezu.....	30
3.6.1 Oscilační řezání.....	30
3.6.2 Návrh zpětnovazebního řízení dělicího procesu.....	31
4 HODNOCENÍ NEROVNOSTÍ POVRCHU.....	32
4.1 Drsnost povrchu.....	32
4.1.1 Definice parametrů profilu drsnosti povrchu.....	34
4.1.1.1 Výškové parametry – výstupky a prohlubně.....	36
4.1.1.2 Výškové parametry – průměrné hodnoty pořadnice.....	36
4.1.1.3 Délkové parametry.....	38
4.2 Metody měření drsnosti povrchu.....	38
4.2.1 Dotykové měřicí přístroje.....	39
4.2.2 Bezdotykové měřicí přístroje.....	39
4.2.3 Ostatní měřicí přístroje.....	40
4.3 Hodnocení kvality povrchu u metody AWJ.....	40
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MATERIÁLU.....	42
5.1 Materiál vzorků.....	42
5.2 Příprava vzorků hydroabrazivním dělením.....	43

5.3	Příprava vzorků laserovým dělením.....	47
5.4	Metodika měření topografie povrchu.....	50
5.5	Hodnocení parametrů drsnosti povrchů vytvořených užitím AWJ.....	52
5.6	Hodnocení parametrů drsnosti povrchů vytvořených užitím laseru.....	67
5.7	Porovnání výsledků obdržných jednotlivými dělicími metodami	71
5.8	Hodnocení ovlivnění stavu materiálu po dělení jednotlivými nekonvenčními metodami	73
6	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	76
	Závěr.....	79
	Seznam použitých zdrojů	81
	Seznam použitých zkratk a symbolů	85
	Seznam příloh.....	88

ÚVOD

Již od počátku lidského bytí se člověk snaží vyvíjet různé nástroje a hledat rozličné zdroje energie k jejich pohonu tak, aby se jeho život stal snazším, pohodlnějším a bezpečnějším a později také aby ulehčily jeho práci, popřípadě vykonaly tu, kterou by bylo pro něj provést zcela nemožné.

V raných dějinách lidstva byla většina nástrojů nejprve vyráběna ze dřeva, kamene a dalších v přírodě lehce dostupných materiálů. S objevem železa člověk získal možnost produkovat více sofistikovaných výrobků, které v mnoha směrech předčily ty do té doby známé, a to hlavně díky jedinečným vlastnostem tohoto kovu.

V současné době jsou však produkovány výrobky z daleko pevnějších a odolnějších, a tudíž nesnadno nebo jen velice těžko obrobitelných materiálů. Ve snaze vyřešit problémy s jejich obráběním je třeba, aby nově vyvíjené nástroje zahrnovaly materiály, jako jsou například legované oceli, různé karbidy, diamant či keramiky.

K obdobnému vývoji došlo také u metod používaných k pohonu těchto nástrojů a zařízení. Ty byly zpočátku poháněny především buď lidskou, anebo zvířecí silou. Když se člověku podařilo využít síly vody, větru a páry a později i elektřiny, výrobní kapacity byly dále rozšířeny o nové stroje, které pracovaly s větší účinností a ve většině případů i s větší přesností.

S každým objevem nového nástroje, nástrojového materiálu nebo zdroje energie se zvětšují jak účinnost procesu zpracování, tak možnosti výroby. Od 20. století je proto výzkum stále více soustředěn tímto směrem, což vyúsťuje v zavádění nových výrobních procesů užívaných nejen pro úběr, ale i pro tváření a spojování materiálů.

Konvenční metody obrábění, jako jsou například řezání, soustružení, frézování nebo vrtání, jsou v dnešní době prováděny pomocí mechanické energie vyvozené elektrickými motory a použitím nástrojů z velmi tvrdých materiálů.

Naproti tomu metody nekonvenční využívají i dalších zdrojů energií a úběru materiálu lze jejich použitím dosáhnout například čistě chemickou, elektrochemickou nebo tepelnou reakcí. Tyto metody vstupují do popředí především v případech, kdy je obrábění určitého druhu materiálu tradičními metodami technicky složité, nevýhodné nebo neekonomické. Do těchto metod lze zařadit také dělení materiálů pomocí vysokotlakého vodního (WJ – Water Jet) nebo hydroabrazivního paprsku (AWJ – Abrasive Water Jet). (1)

Tato technologie umožňuje zpravidla obrábět téměř jakýkoli průmyslový materiál (od papíru, plastů, přes horniny, oceli, tvrdokovy, kompozitní materiály až po těžkoobrobitelné keramiky) intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky. Vysoká výtoková rychlost vodního paprsku zaručuje vysokou účinnost dělicího procesu. Navíc díky ekologické nezávadnosti řezacího média

a univerzálnosti použití, předčí řadu jak konvenčních, tak nekonvenčních metod obrábění. (1, 2)

Předkládaná studie je rozdělena do dvou základních částí – teoretické a praktické. V první části je uveden stručný výpis technologií dělení materiálu se zaměřením na nekonvenční metody. Následuje rozdělení technologií kapalinového paprsku, popis a rozbor systému obrábění jak vysokotlakým vodním, tak hydroabrazivním paprskem a také jejich interakce s materiálem. Je provedeno vyhodnocení vlivů vstupujících do procesu řezání, jež ovlivňují kvalitu povrchu v místě řezu a nastíněny některé nové trendy vedoucí k jejímu zvýšení. Závěrem teoretické části je popsáno hodnocení nerovností povrchu z hlediska mikroskopického, tj. drsnosti, společně s měřičskými metodami, které k tomuto účelu slouží.

V experimentální části této práce je provedena analýza kvality povrchu vzorků vytvořených hydroabrazivním a laserovým řezáním za účelem vyhodnocení jak výškových, tak délkových parametrů drsnosti povrchu v závislosti na změně technologického parametru rychlosti posuvu řezací hlavy. Cílem těchto experimentů je zhodnocení výstupních charakteristik daného materiálu po procesu dělení vybranými metodami se zaměřením se na AWJ a jejich porovnání, na základě kterých by mohla být v budoucnu provedena jejich optimalizace.

V závěru studie je vypracováno technicko-ekonomické zhodnocení vybraných metod obrábění.

1 TECHNOLOGIE DĚLENÍ MATERIÁLŮ

Ve strojírenství je jednou ze strategických úloh výrobní a výzkumné sféry neustálé zdokonalování výroby součástek, a to především z důvodu vysoké pracnosti potřebné na jejich výrobu. Dělení materiálů, jež patří mezi základní technologické operace obrábění a lze jej ve velkém měřítku nalézt na prvním nebo druhém místě každého technologického postupu, rozhoduje nejen o efektivnosti a celkové ceně výrobku, ale také o jeho dalším nezbytném zpracování. Při dělení materiálu dochází k oddělování určitého objemu materiálu, který odpovídá objemu přídávku pro další zpracování a objemu hotové součásti. Ačkoli se při dělení odřezává pouze malé množství materiálu – několik milimetrů krychlových objemu – stejně jako další operace se významně podílí na jeho celkové spotřebě a využití. (2, 3)

Metody dělení materiálu lze rozdělit na *konvenční* a *nekonvenční*. Mezi nejpoužívanější konvenční procesy lze zahrnout:

- dělení rozřezáváním (pilovým listem, pásem, kotoučem),
- dělení rozbrušovacím kotoučem,
- dělení třecím (frikčním) kotoučem,
- dělení stříháním a lámáním,
- dělení rotačních součástí upichovacím nožem na soustruhu,
- tepelné dělení (plamenem, elektrickým obloukem). (4)

Jak již bylo předznamenáno v úvodu této studie, nekonvenční metody obrábění, a tedy i dělení materiálu, využívají kromě mechanických a tepelných principů také dalších druhů energií a vystupují do popředí především v případech, kdy je užití tradičních technologií příliš složité, neekonomické, málo produktivní nebo téměř nemožné. (1)

1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění (1, 2, 5)

Nekonvenční metody obrábění lze dělit z několika různých hledisek, přičemž nejvíce užívaným a nejrozšířenějším je dělení dle druhu hlavního energetického úběru materiálu. Z tohoto hlediska je možné tyto metody rozčlenit do 4 základních skupin na:

1. mechanické,
2. chemické,
3. elektrochemické a elektrické,
4. tepelné a elektrotepelné.

Mezi mechanické metody patří například obrábění vodním a hydroabra-
zivním paprskem (WJM, AWJM), obrábění ultrazvukem (USM) nebo obrábění
proudem brusiva (AJM). K chemickým metodám lze zařadit chemické nebo
fotochemické leptání (CM, PCM). Ve skupině elektrochemických a elektrických
metod lze nalézt procesy využívající elektrolýzu, jako jsou například
elektrochemické obrábění nebo broušení (ECM, ECG). Poslední skupina
tepelných a elektrotepelných metod zahrnuje obrábění laserem (LBC), plazmou
(PAM), svazkem elektronů (EBM) nebo elektrojiskrové obrábění (EDM). Tímto
však výčet těchto metod zdaleka nekončí.

2 ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ KAPALINOVÉHO PAPRSKU

Obrábění kapalinovými paprsky není již v dnešní době zcela neznámý proces. Dle technologické specifikace výroby a dle druhu obráběného materiálu je volena procesní kapalina o různých rozsazích tlaku a vzniklý paprsek dále upravován tak, aby bylo dosaženo požadavků, které jsou kladeny na vyráběnou součást.

Obecné dělení kapalinových paprsků je zobrazeno na následujícím obr. 2.1 (6). Vyznačená linie znázorňuje technologii, jež byla použita k nařezání vzorků pro experimentální část této studie.



Obr. 2.1 Rozdělení kapalinových paprsků (6)

V dalších kapitolách teoretické části bude věnována pozornost hlavně vysokotlakému kontinuálnímu vodnímu paprsku čistému (WJ) a s příměsí abraziva – hydroabrazivnímu (AWJ).

3 POPIS A ROZBOR SYSTÉMU ŘEZÁNÍ VODNÍM A HYDROABRAZIVNÍM PAPERSEM

Dělení materiálu vodním paprskem je proces založený na mechanicko-fyzikální podstatě, při kterém vysokotlaká voda, jež je generována speciálním čerpadlem, prochází dýzou vodní trysky o malém průměru, čímž je urychlován její průtok a vytváří úzký paprsek s vysokou řeznou účinností. Následkem vysoké kinetické energie na jednotku plochy dochází k průniku do materiálu obrobku, k jeho odbrušování a odplavování z místa řezu. Abrazivo jako přísada tento účinek znásobuje. S přibývajícím hloubkou (v závislosti na tvrdosti materiálu) dochází k brzdění paprsku a k jeho postupnému vychylování z původního směru. Důvodem je tření mezi jeho a obráběnou plochou. (1, 2)

V současnosti je tento flexibilní nástroj schopen řezat téměř všechny známé průmyslové materiály.

3.1 Technologie WJ a AWJ

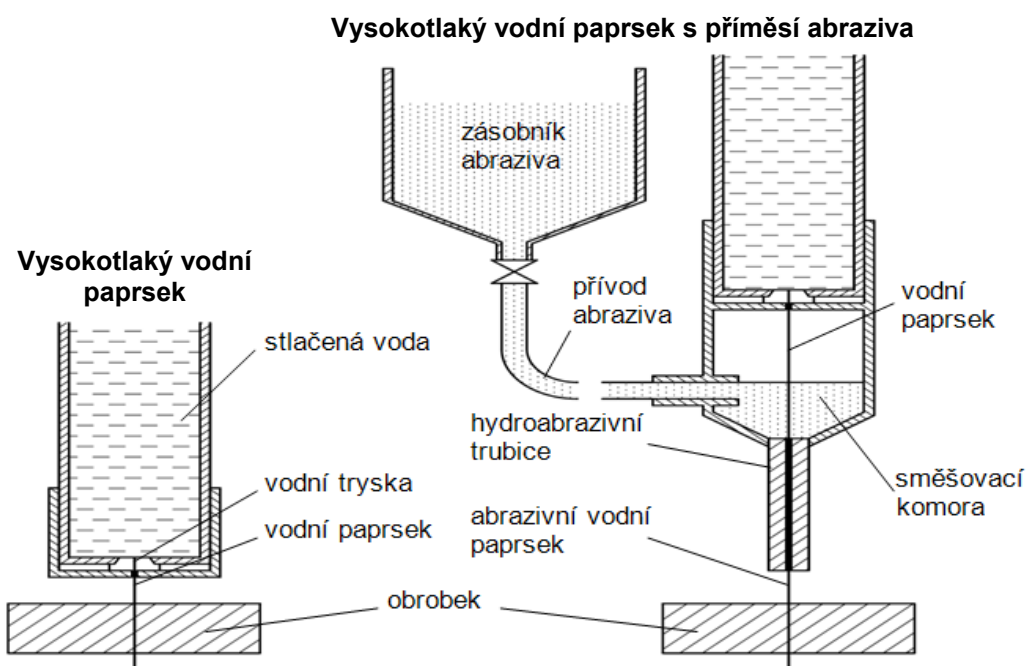
V současné době je vodní paprsek využíván v mnoha modifikacích (jak je znázorněno na obr. 2.1), přičemž v praxi k dělení materiálu slouží především 2 typy, které lze rozlišit podle použitého řezacího média. Jedná se o vysokotlaký:

- čistý vodní paprsek (*WJ – Water Jet*),
- vodní paprsek s příměsí abraziva (*AWJ – Abrasive Water Jet*).

První typ je určen k dělení měkčích materiálů, jako jsou například papír, gumy, pryže, lina, různé pěnové materiály atd. za použití tlaku vody v rozmezí 60÷415 MPa (1, 5, 7). Druhý typ se uplatňuje při dělení materiálů tvrdších – sklo, keramika, kámen, oceli, spékané a vrstvené materiály atd. – a to za použití tlaku vody obvykle do 415 MPa (1, 5, 7). Nově vyvíjená řezací centra AWJ však dokážou pracovat s tlaky v rozmezí až 650÷800 MPa, což má velice kladný vliv nejen z hlediska provozních a finančních úspor, ale také z hlediska dosahované geometrie řezaných součástek (8, 9).

Principiální rozdíl mezi technologií čistého vodního a hydroabrazivního paprsku je ukryt v nitru řezací hlavy. Zatímco u prvního typu je řezací hlava zakončena vodní tryskou, u typu druhého čistý vodní paprsek vstupuje do směšovací komory, do které je pod tlakem přisáván jemný brusný materiál. Zde dochází k promísení této suspenze a k následnému urychlení a usměrnění abrazivních částic v hydroabrazivní trubici (viz. obr. 3.1). (1, 2, 10)

Dalším rozdílem těchto technologií je samozřejmě také průměr vystupujícího paprsku, který je u technologie WJ odvislý od průměru dýzy použité vodní trysky a u AWJ od vnitřního průměru hydroabrazivní trubice. V prvním případě se průměr paprsku pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,8 mm a v druhém od 1,2 do 2,5 mm. Svoji roli zde sehrává také opotřebení obou zmiňovaných komponent. (1)

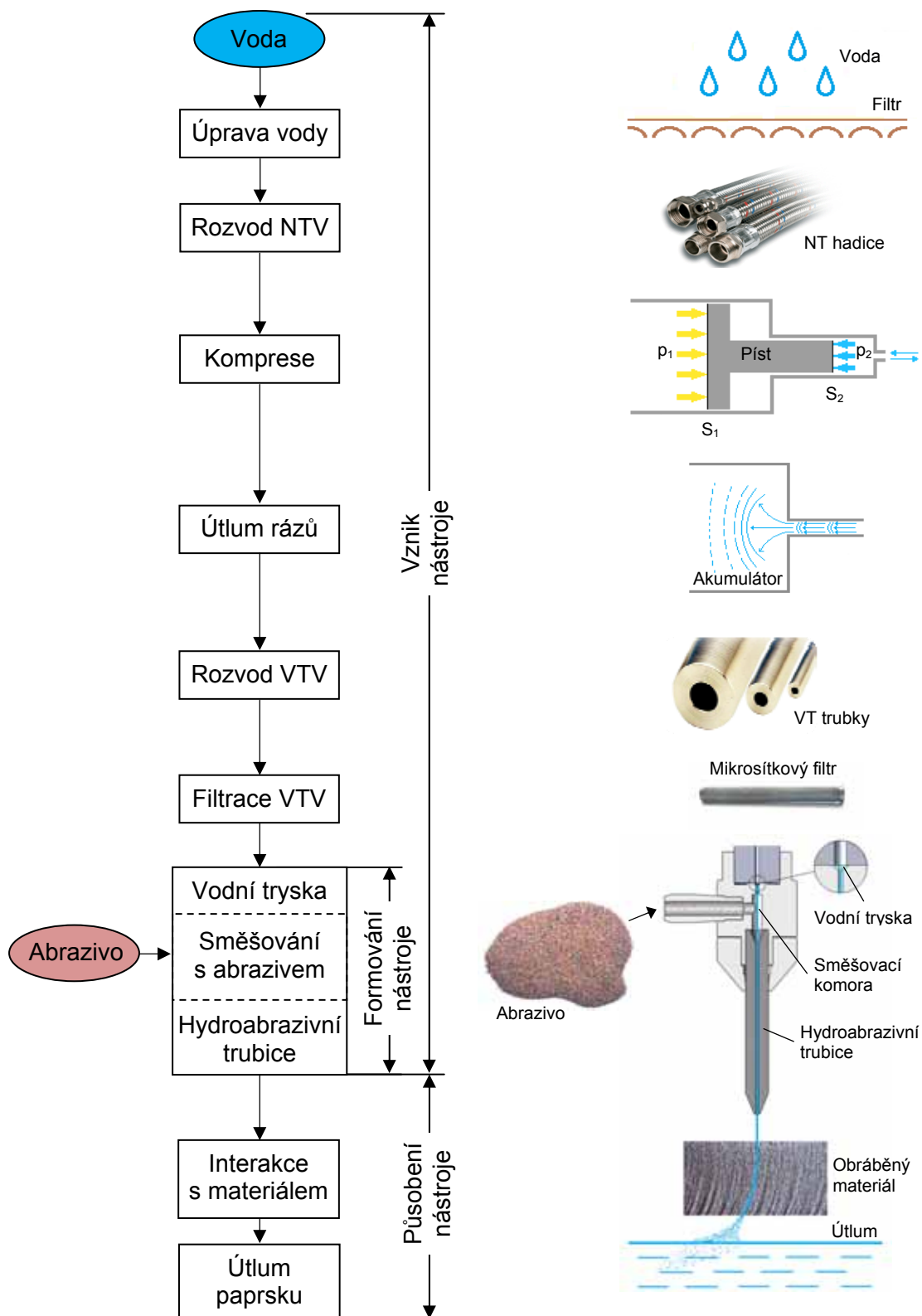


Obr. 3.1 Schematické znázornění principiálního rozdílu mezi technologií čistého vodního a hydroabrazivního paprsku (1, 10)

3.2 Charakteristika technologie AWJ

Zařízení pro technologii vysokotlakého hydroabrazivního paprsku sestává z velkého množství kvalitních součástí, na něž jsou kladeny různorodé požadavky, které zaručují udržitelnost vysokého pracovního tlaku, dlouhou životnost, odolnost proti korozi a v neposlední řadě také krátký čas výměny v případě poruchy.

Na schematickém znázornění (obr. 3.2) a v následujících kapitolách je uveden stručný popis a funkce nejdůležitějších komponent podílejících se na vzniku a formování unikátního nástroje AWJ, spolu s jeho šířením okolním prostředím (vzduchem), interakcí s materiálem a útlumem v lapači.



Obr. 3.2 Schematické znázornění vzniku, formování a působení AWJ (11, upraveno)
 NT – nízkotlaké, VT – vysokotlaké, NTV – nízkotlaká voda, VTV – vysokotlaká voda

3.3 Vznik nástroje

3.3.1 Voda

Základním krokem k zajištění nejefektivnějšího chodu celého zařízení je výběr pracovní kapaliny. Ta musí splňovat určité požadavky, jako jsou např.:

- nízká viskozita,
- dobrá přístupnost a nízká cena,
- minimální agresivita ke kovovým částem zařízení,
- schopnost zabezpečit nejlepší kvalitu obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku atd. (11, 12)

Z globálního hlediska tyto požadavky nejlépe splňuje právě voda. Její kvalita a vlastnosti ovšem velmi ovlivňují nejen životnost vodní trysky, ale také součástek multiplikátoru, zejména těsnících elementů plunžrového pístu a zpětného ventilu. Mezi požadavky, které by měla použítá voda splňovat, patří především:

- číslo pH v rozmezí 6÷8,
- nízká tvrdost (tj. nízký obsah rozpuštěných pevných částic, jako jsou např. Ca, CaO, Mg, MgO, Fe, Mn, Si a další). (7, 13)

Jestliže se tedy při analýze vody v místě odběru zjistí, že neodpovídá určitým požadavkům, je třeba ji před upotřebením podrobit úpravě.

3.3.2 Úprava vody (1, 10, 12)

Typ úpravy je odvislý od kvality místní vody. Ta je nejprve filtrována pomocí nízkotlakých filtrů vyrobených buď z bavlny, nebo syntetických vláken umístěných v plastových nádobách (viz. obr. 3.3). Tyto filtry jsou schopny zabránit průstupu nečistot až do velikosti 0,5 μm .



Obr. 3.3 Nízkotlaké vodní filtry

Pokud je obsah rozpuštěných pevných látek i po filtraci příliš vysoký, mohou následovat další procesy úpravy kapaliny, jako jsou iontová výměna změkčovadlem, reverzní osmóza nebo deionizace.

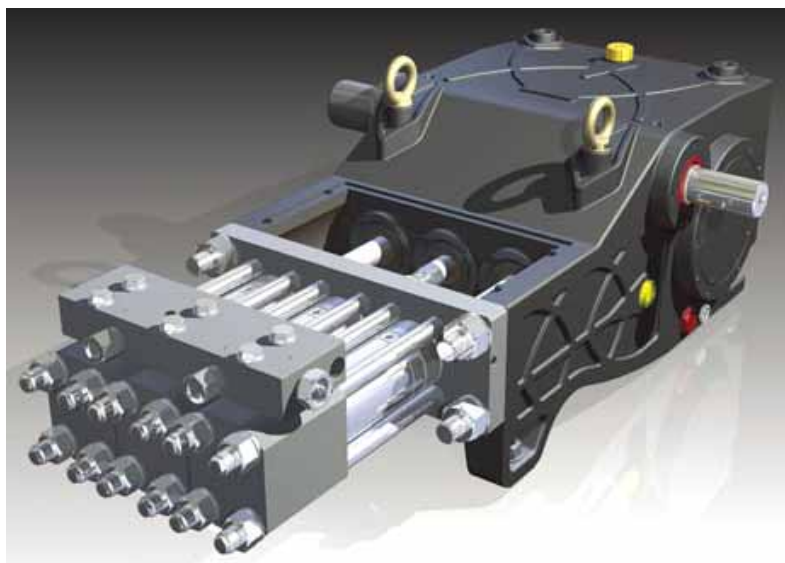
3.3.3 Rozvod nízkotlaké vody

Voda je po její úpravě přiváděna do zařízení mnohonásobně intenzifikujícího její tlak pomocí pancěrovaných hadic standardních průměrů. Užití těchto komponent je opodstatněno zvýšeným přivodním tlakem vody vyvozeným průběžným čerpadlem, které předchází této jednotce. Tlak kapaliny by se měl pohybovat v rozmezí 0,35 až 0,6 MPa (7).

3.3.4 Komprese

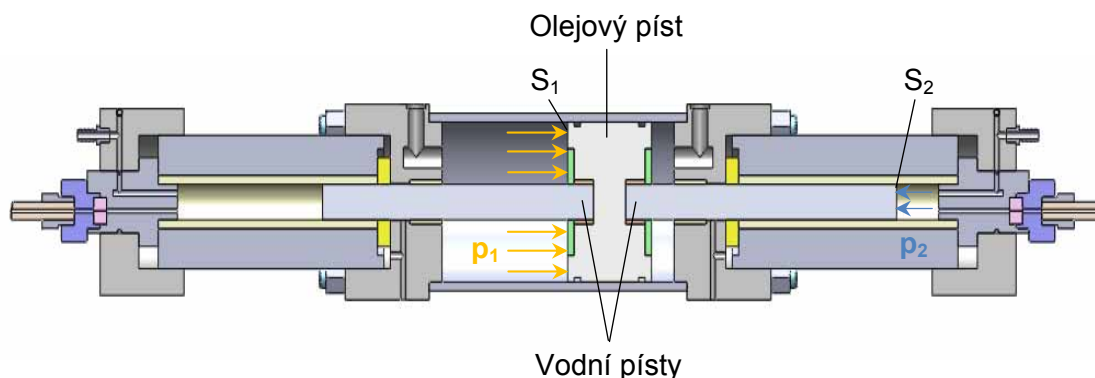
Pro vytvoření paprsku s vysokou řeznou účinností je zapotřebí tlak přiváděné vody několikanásobně zvýšit a zajistit jeho plynulé nepřetržité generování. K tomuto účelu slouží buď zařízení s triplexovým plunžrem, nebo multiplikační jednotka, zkráceně multiplikátor. (14, 15)

První typ zařízení je vývojově starší a zpočátku se používal převážně k odstraňování nečistot a starých nátěrů z různých povrchů, k jejich zdrsňování nebo aktivaci pro následné nanesení ochranného nátěru nového. Pracovní tlak těchto zařízení dříve nepřekračoval 200 MPa. Po jeho inovaci však došlo k navýšení tlaku kapaliny až na 350 MPa, což umožnilo použití tohoto zařízení také k dělení materiálů. (12, 14, 15)



Obr. 3.4 Zařízení s triplexovým plunžrem (16)

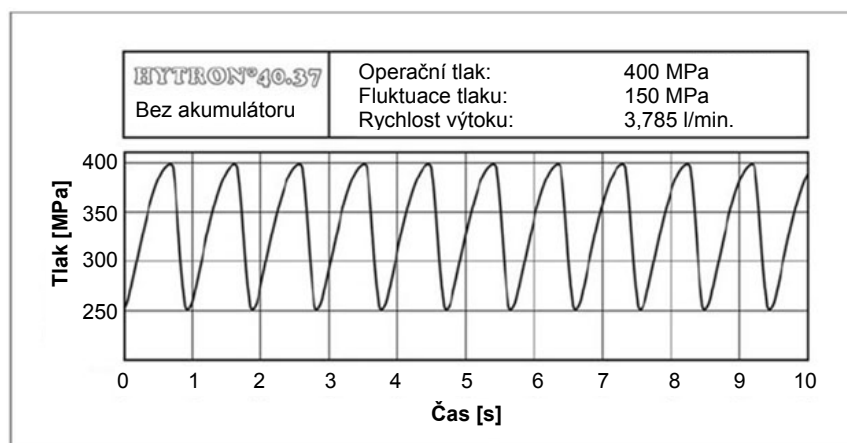
Druhý typ zařízení byl vyvinut speciálně pro účely řezání. Intenzifikace tlaku kapaliny je založena na rovnováze sil působících na odlišně velké plochy 2 spojených pístů – většího olejového a menšího vodního (tzv. plunžru). Při obvyklém multiplikačním poměru 20:1 dochází k navýšení tlaku přivedené vody až na 415 MPa. Přičemž tento tlak je odvozen od pracovního tlaku oleje, jehož maximální hodnoty se pohybují okolo 21 MPa. (1, 10, 12, 15, 17)



Obr. 3.5 Multiplikátor v řezu (10, 15)

3.3.5 Útlum rázů v kapalině

Jak již může být zřejmé z přecházejících obrázků (obr. 3.2 a 3.5), generování stlačené kapaliny neprobíhá zcela nepřetržitě. Při každém kroku vodního plunžru je třeba krátkého časového úseku k dosažení požadovaného tlaku kapaliny před jejím průchodem zpětným ventilem do vysokotlakého potrubí. Z tohoto důvodu vznikají v pracovním médiu tlakové špičky (obr. 3.6), které spolu s vyrovnáváním tlaku vody uvnitř vodního válce a ve vodním potrubí vyvolávají rázové vlny, které je nutno co nejrychleji utlumit tak, aby nedošlo k porušení potrubí. (10, 15)



Obr. 3.6 Kolísání tlaku vody před ústím do akumulátoru (15, přeloženo, upraveno)

K tomuto účelu je v blízkosti za multiplikátorem alokována vysokotlaká tlustostěnná nádoba vyrobená z nerezavějící oceli – akumulátor (obr. 3.7). Průměr dutiny uvnitř nádoby je několikanásobně větší než vnitřní průměr rozvodového potrubí, a proto pulzy, když projdou potrubím a vyústí do akumulátoru, zanikají.



Obr. 3.7 Akumulátor

3.3.6 Rozvod vysokotlaké vody (1, 12)

Přívod stlačené vody k řezací hlavě umístěné na portálu stolu je zajišťován pomocí tlustostěnných trubek standardizovaných průměrů a propojovacích prvků vyrobených z vysokopevných nerezových ocelí. Potrubí je řešeno tak, že se flexibilně přizpůsobí pohybu řezací hlavy.

3.3.7 Filtrace vysokotlaké vody

Filtrace vysokotlaké kapaliny je nezbytným procesem k zabránění poškození vodní trysky a také k prodloužení její životnosti. V důsledku opotřebení stykových ploch a těsnících částí multiplikátoru jsou do vody uvolňovány a jí odplavovány mikročástice různých materiálů. V těsné blízkosti řezací hlavy je proto mezi 2 konce vysokotlakých armatur umístěn liniový mikrosítkový filtr (obr. 3.8 a)), jehož hlavním úkolem je zachycení těchto částic. Důležitá je samozřejmě i samotná kontrola, popř. čištění nebo výměna, tohoto filtru, neboť při jejím opomenutí může dojít k uvolnění usazenin nebo utržení části filtru, a tím k okamžitému zničení vodní trysky.

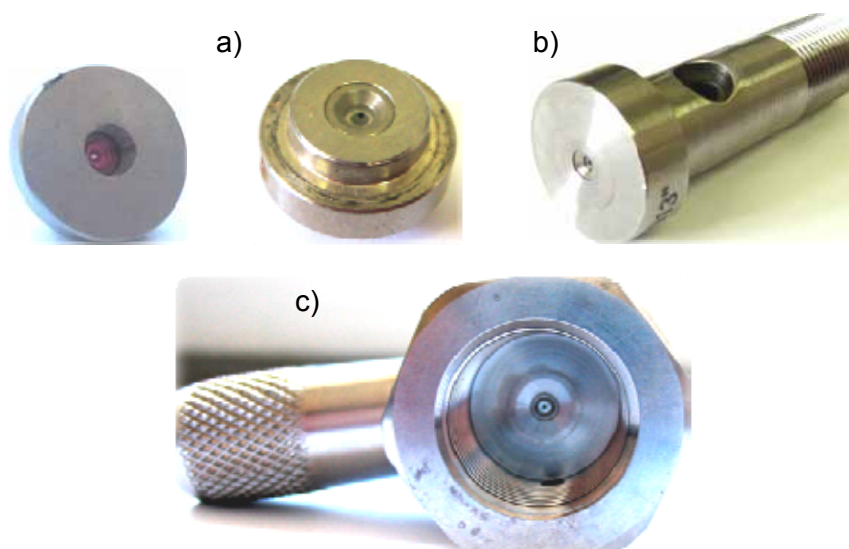


Obr. 3.8 a) Sestava liniového filtru,
b) mikrosítkový filtr (uvnitř a))

3.3.8 Vodní tryska

Na vstupu do řezací hlavy je umístěna vodní tryska. Jejím hlavním úkolem je vytvoření a zformování homogenního vodního paprsku se současným zvýšením výtokové rychlosti protékající kapaliny. Jedná se tedy o přeměnu potenciální energie stlačeného média na kinetickou energii vytryskávajícího paprsku. Jak je psáno v literatuře (2, 11), kvalita a způsob této transformace mají zásadní vliv na celkovou účinnost nástroje. Úroveň přeměny energie je odvislá především od kvality opracování dýzy vodní trysky a od její životnosti.

V dnešní době se pro řezání jak čistým vodním paprskem, tak paprskem hydroabrazivním používají vodní trysky vyráběné z rozličných materiálů. Pro nižší pracovní tlaky jsou určeny trysky kovové, popř. ze slinutých karbidů, pro vyšší tlaky jsou to pak trysky ze safíru, rubínu nebo polykrystalického diamantu (1, 2, 10, 12). V prvním případě se jedná buď o kompaktní celek, nebo vložku řezací hlavy, zatímco v druhém jde o malý „korálek“ vetknutý do montážního lůžka, vyměnitelné vložky (cartridge) nebo přímo do těla řezací hlavy (obr. 3.9).



Obr. 3.9 Příklady vodních trysek pro vyšší pracovní tlaky: a) safírová a diamantová vodní tryska v montážních lůžcích, b) diamantová vodní tryska ve vyměnitelné vložce, c) diamantová vodní tryska vetknutá v těle řezací hlavy

Životnost vodní trysky je odvislá především od druhu použitého materiálu, kvality úpravy vody a v neposlední řadě také od pracovního tlaku. V současnosti stoupá nejvíce poptávka po diamantových vodních tryskách, ač jsou řádově dražší než ostatní typy. To je zapříčiněno zejména jejich dlouhou životností, která je uváděna 800 až 2000 hodin (ve většině případů však i více jak 3000 hodin) a několikanásobně tak překračuje dobu provozu jak safírové, tak rubínové vodní trysky (18).

3.3.9 *Abrazivo*

Do řezného procesu vstupuje jako druhořadý nástroj. Avšak bez jeho použití by nebylo možné řezat tvrdší materiály, neboť malé částičky abraziva přimísené do plochy vodního paprsku zvyšují jeho mechanický účinek, a tím ve velkém měřítku rozšiřují sortiment dělených materiálů. (1)

Mezi nejdůležitější faktory, které je nutno zvážit při výběru správného druhu abraziva patří zejména:

- cena – finance spojené s nákupem abraziva představují až 50 % celkových provozních nákladů;
- tvrdost – tvrdší abraziva zaručují vyšší účinnost dělicího procesu, ale způsobují rychlejší opotřebení hydroabrazivní trubice;
- velikost a tvar abrazivních zrn – větší zrna vytváří na povrchu dělicích stěn větší rýhy (striace), čímž dochází k zhoršení jakosti povrchu, ale při jejich použití se zkrátí čas potřebný na prořezání materiálu (a naopak); také tvar zrn ovlivňuje jak jakost dělených ploch, tak i dosahovanou hloubku řezu;
- hmotnostní tok – se zvětšujícím se hm. tokem se zvětšuje kinetická energie paprsku, a tím dosahovaná hloubka řezu; po překročení kritického množství se však dosahovaná hloubka řezu snižuje a může dojít až k ucpání hydroabrazivní trubice;
- ekologická nezávadnost – abraziva užitá k řezání AWJ by měla splňovat požadavky zdravotní a ekologické nezávadnosti;
- recyklovatelnost – možnost opětovného užití abraziva (jeho části), jež se již zúčastnilo řezacího procesu. (1, 2, 11, 19)

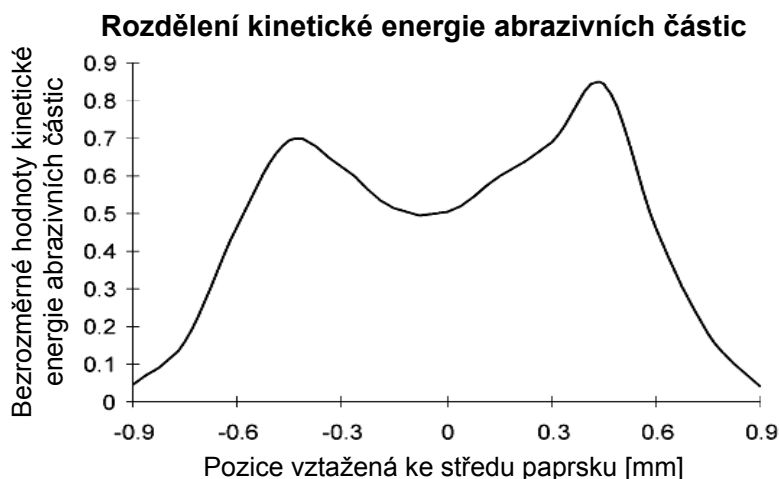
Abraziva, jež nejlépe splňují uvedené parametry, jsou dnes v praxi nejčastěji používána a při větším objemu výroby také recyklována. Jedná se o granátová abraziva (australský, indický granát) a o olivínové písky. Zrnitost těchto abraziv je udávána v amerických jednotkách MESH, přičemž nejhojněji užívaná se pohybuje v rozmezí MESH 80÷120 – průměrná velikost zrna 180÷125 μm (20).

3.3.10 *Směšování s abrazivem*

Mísení zrnků abraziva s vodním paprskem je velmi složitý proces. Začíná ve směšovací komoře umístěné uvnitř řezací hlavy a pokračuje v hydroabrazivní trubici. Kromě 2 uvedených fází také vzduch, užitý pro přívod abrazivních částic, sehrává při mixování svoji roli. Neboť jak uvádí literatura (21), čistý vodní i hydroabrazivní paprsek je téměř z 95-ti % tvořen plynnou fází (složení je odvislé od tlaku vody a její výtokové rychlosti).

Při průchodu vodního paprsku o vysoké rychlosti 600÷900 m/s směšovací komorou vzniká podtlak, kterým je nasáváno abrazivo ze zásobníku spolu se vzduchem. Rychlost jednotlivých zrn při vstupu do komory přitom nepřesahuje 6 m/s a rychlost vzduchu je menší než 25 m/s. V hydroabrazivní trubici dochází následně k předávání kinetické energie mezi vodním paprskem a pevnými částicemi. Zatímco jsou tedy zrnka abraziva urychlována, vodní paprsek svoji rychlost ztrácí a za spoluúčasti vzduchu je fragmentován v kapky a rozptýlen do celého průměru hydroabrazivní trubice. (1, 21, 22)

Stejně jako rozdělení koncentrací jednotlivých zrn, tak i rozdělení jejich kinetických energií uvnitř hydroabrazivního paprsku není jednotné. Dle výzkumu provedeného F. L. Chenem a E. Sioresem (23) je nejvyšší koncentrace pevných částic s největší energií alokována uvnitř paprsku od 1/3 do 2/3 jeho poloměru (graficky znázorněno na následujícím obr. 3.10).



Obr. 3.10 Rozdělení kinetické energie abrazivních částic v podélném řezu hydroabrazivním paprskem (23, přeloženo)

3.3.11 Hydroabrazivní trubice

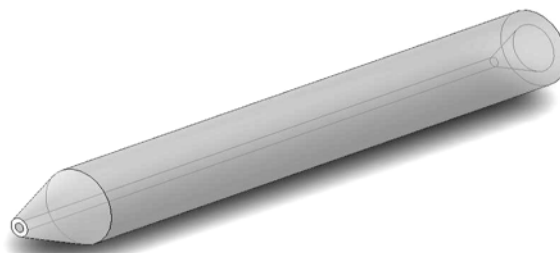
V předchozích odstavcích je popsáno, že v této trubici dochází ke směšování zrněk abraziva a vzduchu s vodním paprskem a k předávání kinetické energie. Navíc v ní dochází také k usměrňování jak těchto zrněk, tak samotného paprsku do místa řezu. Z toho lze také odvodit, proč se pro tuto trubici používají i další přívlastky, jako jsou *směšovací* nebo *fokusační*. V této studii je používán zejména název *hydroabrazivní*, a to z důvodu, že až právě v této trubici je vytvářena finální podoba hydroabrazivního nástroje.

Trubice je vyráběna slinováním v několika provedeních, které se odlišují délkou, vnějším a vnitřním průměrem a také použitým materiálem (viz. tab. 3.1). Pro všechny typy je ale společný požadavek vysoké jak erozní, tak abrazní

odolnosti (25). Neustálým prouděním směsi vody, vzduchu a abraziva však přesto trubice opotřebením postupně podléhá, což se v důsledku projevuje nesoudržností paprsku, nedodržením předepsaných tolerancí a ztrátami (2, 11). Z důvodu křehkosti je také třeba trubici chránit pomocí různých detekčních kolizních systémů, neboť při nárazu do obráběného materiálu či do svorky, kterou je uchycen, by mohlo dojít k jejímu okamžitému zničení (24).

Tab. 3.1 Druhy hydroabrazivních trubic a jejich životnosti (24, přeloženo, upraveno)

Materiál	Životnost [hod.]	Popis
Standardní karbid wolframu	4÷6	Nízká výkonnost a poměr cena/výkon. Tendence k mimosovému opotřebení. Nutnost časté výměny.
Levný kompozitní karbid	35÷60	Vhodné pro hrubé dělicí řezy.
Kompozitní karbid střední životnosti	80÷90	Vhodné pro všechny druhy aplikací.
Prémiový kompozitní karbid	100÷150	Nejlepší ze srovnávaných. Trubice z tohoto materiálu vykazuje předvídatelné osovové opotřebení. Vhodné jak pro precizní, tak každodenní práci.



Obr. 3.11 Hydroabrazivní trubice

3.4 Působení nástroje

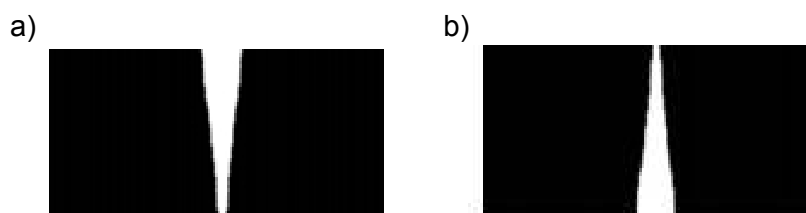
3.4.1 Šíření paprsku okolním prostředím

Ihned po výstupu z hydroabrazivní trubice dochází ke ztrátám kinetické energie paprsku z důvodu kontaktu s okolním prostředím. Paprsek částečně expanduje a „rozděluje se“ na vnitřní jádro a vnější obal. Zatímco jádro si téměř zachovává svoji koherenci až do styku s materiálem, obal ve vyšší míře ztrácí svoji rychlost a dochází v něm k odštěpování jednotlivých kapek vody a zrněk abraziva. Ty v závislosti na výtokové rychlosti paprsku postupně mění svůj směr, tzn., vychylují se z původního. Důsledkem tohoto jevu může být otryskání vrchních řezných hran obrobku. Především z tohoto důvodu je neustále vyvíjena snaha minimalizovat vzdálenost mezi výstupem hydroabrazivní trubice a obrobkem, v angl. zvaná *stand-off*. (2, 11, 22)

3.4.2 Interakce s děleným materiálem

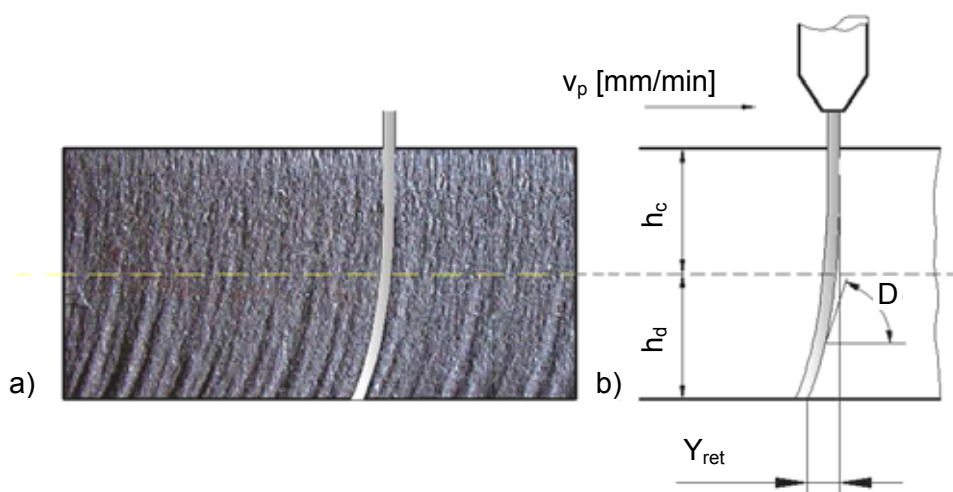
Dělení materiálu vysokotlakým hydroabrazivním paprskem je ve své podstatě erozní proces, který zahrnuje 2 různé mechanismy eroze v závislosti na tom, zda je erodovaný materiál křehký nebo tvárný. Tvárná eroze je definována jako proces řezání, při němž zrnka abraziva postupně odřezávají nebo odlupují částice materiálu, což nakonec způsobí jeho objemový úběr. Na druhou stranu eroze křehká je popisována jako lámání, při kterém je materiál odebrán tvorbou, množením a protínáním prasklin, které vznikají před a okolo abrazivní částice. Ve skutečnosti je ale proces řezání jakéhokoli materiálu metodou AWJ kombinací jak křehkých, tak tvárných erozních mechanismů opotřebení. Tyto mechanismy ovšem nepůsobí jednotlivě, ale v různých kombinacích. Také jejich účinky nejsou během procesu úběru materiálu konstantní, ale různě alterují v závislosti na čase a hloubce řezu. (2, 11, 12, 23, 25)

Výsledkem jejich působení vzniká řezná spára, jejíž tvar, velikost a geometrie odvisí od nastavení vstupních hodnot parametrů obrábění AWJ. Z technologických faktorů mají na její výsledný tvar a velikost největší vliv posuvová rychlost a vzdálenost hydroabrazivní trubice od obrobku. Při velké rychlosti posuvu a větším zdvihu dochází k rozšíření řezné spáry na horní straně řezu, neboť paprsek nesetrvává dostatečně dlouhou dobu v jednom místě – obr. 3.12 a). Naopak je-li použito nižší rychlosti posuvu a menšího zdvihu, řezná spára je celkově užší. Úběr materiálu se však zvýší na straně spodní. To je způsobeno především mírnou kuželovitostí paprsku a dostatkem času k jejímu projevení – obr. 3.12 b). Paralelních řezných hran lze dosáhnout buď použitím minimálního zdvihu a optimalizací posuvové rychlosti, nebo náklonem řezné hlavy, který odpovídá odklonu řezné hrany obrobku. (1, 10, 26)



Obr. 3.12 Základní typy tvarů řezných spár:
a) V-tvar, b) A-tvar

Na povrchu dělicích stěn řezné spáry je tvořen reliéf, který lze rozdělit na 2 části - horní *hladkou zónu*, kde převládá především řezné opotřebení, a spodní *rýhovanou zónu*, která se vyznačuje opotřebením deformačním. Rýhy (striace) ve spodní části obrobku vznikají vychylováním hydroabrazivního paprsku v důsledku ztráty kinetické energie třením jeho povrchu o povrch nově vytvářený. (1, 2, 10, 12, 23, 25, 26, 27, 29, 30)



Obr. 3.13 a) Povrch vytvořený hydroabrazivním paprskem s rozdělením na hladkou a rýhovanou zónu, b) označení těchto zón a parametrů vychýlení stopy paprsku (27)
 h_c – velikost hladké zóny, h_d – velikost rýhované zóny, Y_{ret} – velikost zpoždění (retardace) stopy paprsku, D – deviační úhel

Dle článku (28) napsaného M. Hashishem, vynálezcem přidávání abraziva do plochy vodního paprsku, je možné velikosti těchto zón vypočítat pomocí empirických vztahů (3.1) a (3.2). Lze předeslat, že mnoho veličin v nich obsažených je buď obtížné, anebo téměř nemožné stanovit, což omezuje uplatnění těchto rovnic v praxi (2). V uvedených vztazích také nejsou zahrnuty všechny procesní vlivy řezání, takže se vypočtená hodnota od skutečné může značně lišit (12).

Velikost zóny řezného opotřebení h_c – horní hladká část stěny obrobku:

$$h_c = \frac{\frac{v_a \cdot d_a}{C_k}}{\left(\frac{\pi \cdot \rho_p \cdot v_p \cdot d_a^2}{14 \cdot m_a} \right)^{\frac{2}{5}} + \frac{v_e}{C_k}}, \quad (3.1)$$

kde v_a – rychlost pohybu abrazivních částic [m·s⁻¹],
 C_k – koeficient charakteristické rychlosti [-],
 d_a – průměr hydroabrazivní trubice [m],
 ρ_p – hustota abrazivního materiálu [kg·m⁻³],
 v_p – rychlost posuvu řezné hlavy [m·s⁻¹],
 m_a – hmotnostní tok abraziva [kg·s⁻¹],
 v_e – kritická rychlost abrazivních částic [m·s⁻¹].

Velikost zóny deformačního opotřebení h_d – dolní rýhovaná část stěny obrobku:

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_a \cdot \sigma_y \cdot v_p}{2 \cdot C_1 \cdot m_a \cdot (v_a - v_e)^2} + \frac{C_f \cdot v_a}{d_a \cdot (v_a - v_e)}}, \quad (3.2)$$

kde σ_y – mez kluzu řezaného materiálu [MPa],

C_1 – koeficient řezaného materiálu [-],

C_f – koeficient odporu stěny materiálu [-].

Výslednou hloubku řezu h lze poté stanovit sečtením výsledků předchozích 2 rovnic:

$$h = h_e + h_d \quad (3.3)$$

V posledních několika letech tohoto století bylo provedeno mnoho výzkumů týkajících se morfologie povrchů vytvořených metodou AWJ. Jejich důsledkem bylo vyčlenění nejvrchnějšího regionu hladké zóny v samostatnou oblast – *iniciační zónu*. V ní dochází k prvnímu styku hydroabrazivního paprsku s materiálem a její tvar a geometrie do značné míry ovlivňují jeho další šíření obrobkem (2, 29, 30). Jak uvádí literatura (31), v této zóně dochází k řeznému opotřebení při malých stykových úhlech, zatímco v zóně hladké při úhlech velkých. Dle pramenů (1, 2, 28, 29, 30) je možné také přerozdělením hladké a rýhované oblasti získat další – *přechodovou zónu*, kde dochází ke změně opotřebení řezného na deformační. Z globálního hlediska lze tedy povrch vytvořený hydroabrazivním paprskem rozdělit na 4 části, jak je to graficky znázorněno na následujícím obr. 3.14.



Obr. 3.14 Povrch vytvořený hydroabrazivním paprskem s vyznačením iniciační, hladké, přechodové a rýhované zóny

3.4.3 Útlum hydroabrazivního paprsku

K útlumu paprsku dochází nejčastěji v lapači vody a odpadu umístěným pod opěrným roštem. Jedná se o nerezovou nádrž naplněnou vodou, která není

spojena s konstrukcí stolu. Výška vodní hladiny se v současnosti pohybuje okolo 70 cm a je odvozena od maximálního pracovního tlaku, který je možné na zařízení vyvinout. V případě nedostatku prostoru lze použít i nižší lapače naplněné kovovými broky, popř. jiným vhodným materiálem, jak je to uvedeno v literatuře (1).

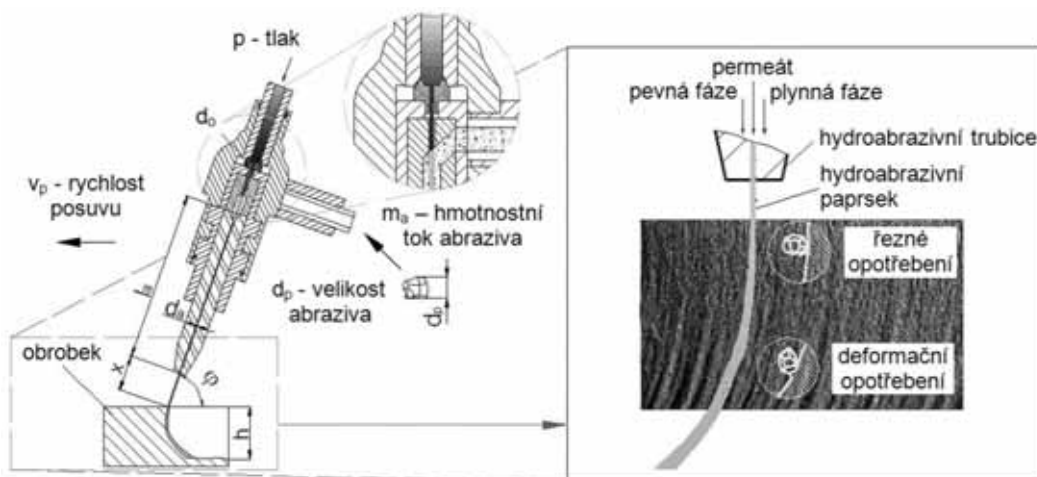
3.5 Faktory vstupující do procesu řezání, jež ovlivňují kvalitu povrchu (1, 2, 29, 30)

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 3.4.2 vysokotlaký hydroabrazivní paprsek vytváří na povrchu obrobku reliéf se dvěma zřetelně rozeznatelnými zónami – horní hladkou, kde převládá řezné opotřebení a od určité hloubky dolní hrubou, která se vyznačuje opotřebením deformačním. Poměr velikostí obou zón je odvislý od faktorů, které vstupují do procesu vlastního dělení materiálů touto metodou. Uvedené parametry ovšem neovlivňují jen výslednou kvalitu povrchu dělených stěn, ale také celkovou efektivitu úběru materiálu dělicího procesu.

Jak je vidno z následujícího obr. 3.15, do procesu dělení materiálů hydroabrazivním paprskem vstupuje velké množství faktorů. Ty lze obecně rozdělit do 2 základních skupin na přímé a nepřímé.

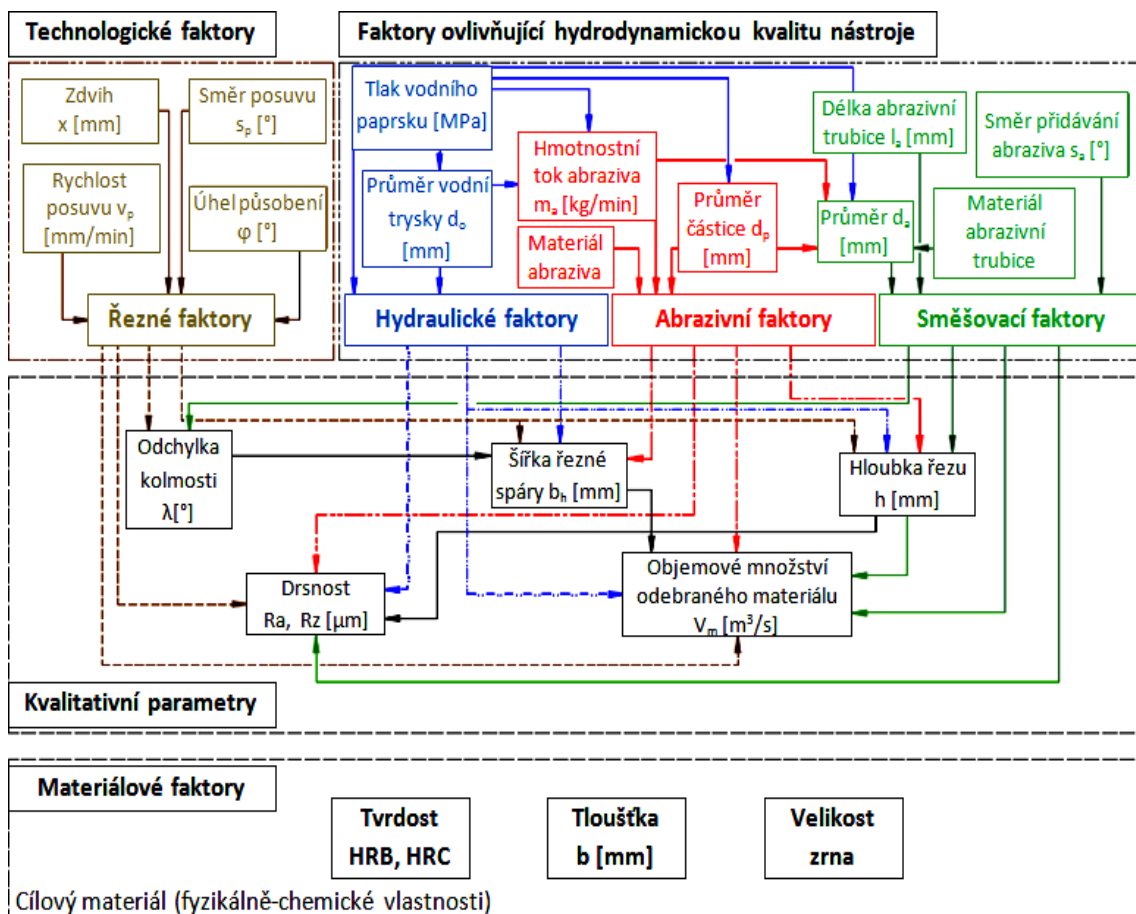
Do skupiny nepřímých faktorů, které ovlivňují především kvalitu a energetickou účinnost výchozího nástroje, patří hydrodynamické a směšovací parametry a parametry abraziva (viz. obr. 3.16). Pomocí nich vstupuje hydroabrazivní paprsek do procesu vlastního úběru materiálu.

Mezi faktory přímé se řadí rychlost posuvu řezné hlavy v_p , její zdvih x , úhel dopadu AWJ φ , směr posuvu s_p , počet přechodů n_p a tloušťka materiálu b . Prostřednictvím těchto faktorů je generována topografie plochy řezu jako obalová plocha trajektorie pohybu hydroabrazivního paprsku.



Obr. 3.15 Vliv faktorů AWJ na kvalitu dělicího procesu a jakost topografie povrchu (29)

Jednotlivé faktory, jak je uvedeno v pramenech (2, 29), ovšem nemají konstantní vliv během celého dělicího procesu, nýbrž dochází k jejich vzájemné interakci a ke změnám účinků v závislosti na hloubce řezu a dalších parametrech. Na obr. 3.16 je uvedeno grafické znázornění vzájemného působení nejdůležitějších faktorů na kvalitu obrobené plochy.



Obr. 3.16 Grafické znázornění vzájemného působení faktorů na kvalitu obrobené plochy (29)

Na základě faktorové analýzy provedené ve zmíněných studiích (2, 29), mezi nejdůležitější parametry, které mají největší vliv na finální topografii dělených stěn, patří hloubka řezu, posuvová rychlost řezné hlavy, druh abrazivního materiálu, jeho zrnitost a hmotnostní tok, tlak pracovní kapaliny a v neposlední řadě také poměr průměrů vodní trysky a hydroabrazivní trubice.

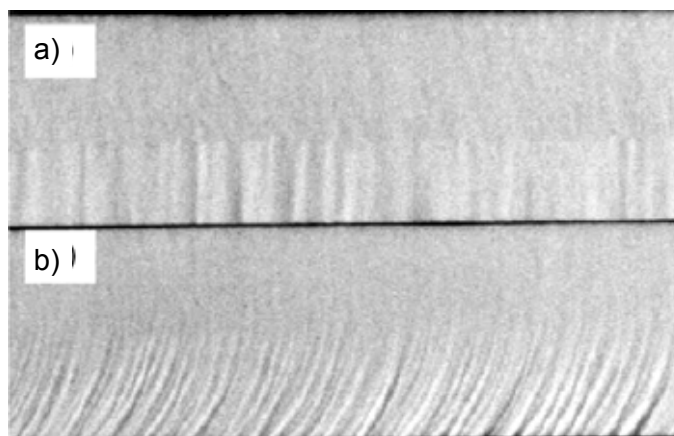
Jedním z technologicky nejsnadněji regulovatelných parametrů výrazně ovlivňující kvalitu topografie plochy řezu je rychlost posuvu řezné hlavy, která je spolu s jejími dopady na kvalitu povrchu z hlediska mikroskopického (drsnosti) také předmětem výzkumu experimentální části této studie.

3.6 Trendy vedoucí ke zvýšení kvality povrchu v místě řezu

Stejně jako v jiných odvětvích průmyslu také u metody dělení materiálů hydroabrazivním paprskem jsou neustále vyvíjeny snahy o zdokonalení jak výrobního procesu a jeho efektivnosti, tak jeho výstupních charakteristik. Ty vedou k dalším a dalším výzkumům nejen vstupních parametrů, jejich závislostí, vlivů vstupujících do procesu vlastního dělení, ale také získávané geometrie řezaných ploch a jejich topografie. Zatímco geometrie je již v dnešní době do značné míry vyřešena pomocí různých kompenzačních matematických modelů, jež jsou součástí řídicího programu CNC zařízení, topografie plochy řezu je stále předmětem bádání. V následujících podkapitolách jsou uvedeny 2 metody vedoucí jak ke zlepšení topografie plochy řezu, tak ke zvýšení dynamičnosti celého procesu dělení.

3.6.1 Oscilační řezání (23, 32)

Efektivní technika oscilací řezné hlavy ve směru jejího posuvu, jež byla vyvinuta v poslední dekádě 20. století za účelem zvýšení kvality řezaného povrchu obrobku, dokáže zvětšit hloubku hladké zóny h_c o více než 30 % v případě keramických materiálů a o více než 40 % v případě měkkých ocelí za totožných vstupních procesních podmínek oproti řezání bez oscilací.



Obr. 3.17 Srovnání povrchů keramiky vytvořených hydroabrazivním paprskem:

- a) při použití oscilací řezné hlavy, $v_p = 20$ mm/min,
- b) bez použití oscilací řezné hlavy, $v_p = 15$ mm/min (23)

Experimentální výsledky ukazují, že za použití oscilací řezné hlavy mezi 15 a 20 stupni jejího náklonu od svislé osy v rovině řezu lze redukovat deviační úhel striací až k nulové hodnotě. Zároveň díky tomu dochází ke snížení frekvence jejich výskytu, což v důsledku přináší „vyhlazení“ hrubé zóny ve spodní části řezu a zlepšení jak jejího profilu drsnosti, tak zejména vlnitosti.

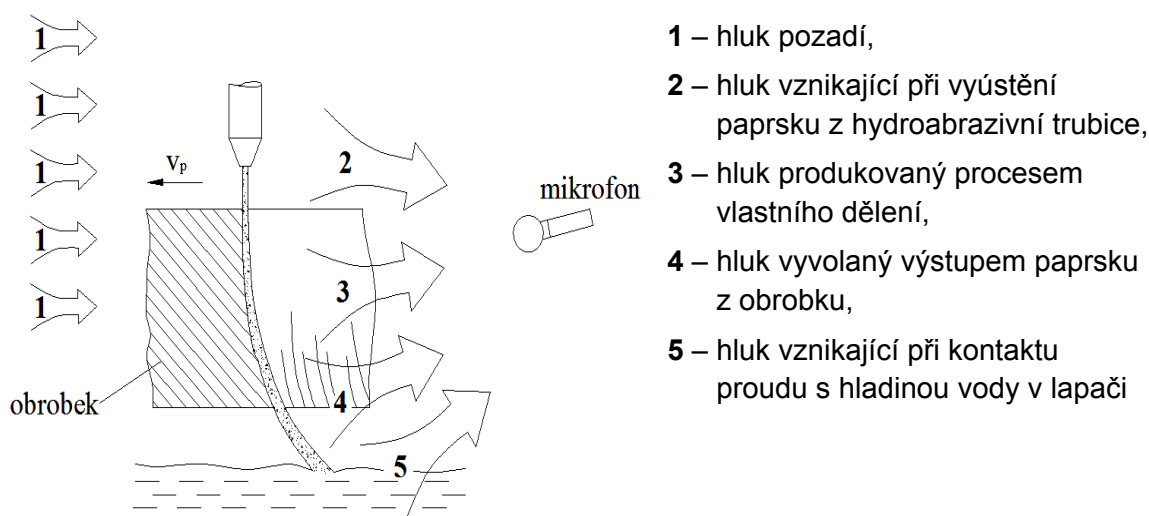
Dále bylo také zjištěno, že při postupném zvyšování oscilační frekvence řezné hlavy se zvětšuje hloubka hladké zóny. To se děje do určité specifické hodnoty, po jejímž překročení velikost této zóny opět klesá. Nicméně bylo dokázáno, že se zvyšující se rychlostí posuvu je nutné zvyšovat i oscilační frekvenci.

3.6.2 Návrh zpětnovazebního řízení dělicího procesu (2)

Ve studii (2) zpracované Janem Valíčkem a Sergejem Hlochem, je představena metoda optické detekce topografie povrchu stěn generovaných hydroabrazivním paprskem za účelem analýzy jejich geometrických parametrů, které následně slouží pro návrh způsobu automatizované kontroly a řízení jakosti. Na základě analýzy a interpretace získaných dat z povrchu jimi byla odvozena topografická funkce Ra_d pro predikci a řízení technologie hydroabrazivního dělení.

V práci je proveden návrh zpětnovazebního ovlivnění technologie procesu dělení materiálů podle průběžného měření hladiny akustického tlaku L_{aeq} . Řídicím systémem je zajištěna regulace parametru finální drsnosti stěny dělicího řezu pomocí regulace posuvu řezné hlavy, která je ve funkčním vztahu jak k hladině akustického tlaku: $L_{aeq} = f(v_p)$, tak k drsnosti: $Ra = f(v_p)$. Za tímto účelem je vypracováno analytické řešení regulačního procesu, navržen regulační obvod se zpětnou vazbou a vybrán vhodný PI regulátor. Vše je poté ověřeno v simulačním prostředí Matlab-Simulink. Dosažené výsledky splňují jak teoretické předpoklady, tak požadavky současné technologické praxe v oblasti topografie finálního povrchu vytvořeného touto metodou.

Jejich návrh má mnoho výhod, mezi něž patří především jednoduchost měření v provozních podmínkách a cenová dostupnost technického vybavení.



Obr. 3.18 Zdroje emisí akustického tlaku při hydroabrazivním dělení materiálů (2)

4 HODNOCENÍ NEROVNOSTÍ POVRCHU

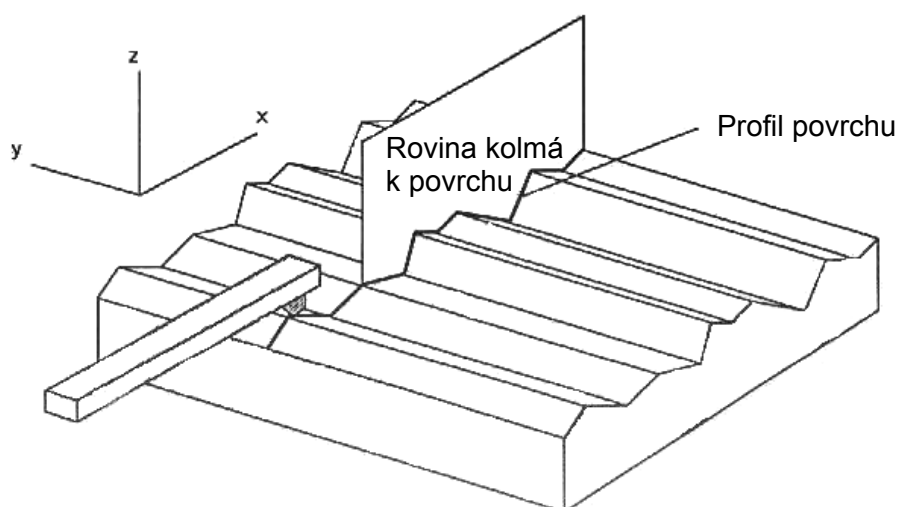
S rozvojem vědy a techniky a s uplatňováním jejich výsledků dochází ke zvětšování významu problematiky jakosti povrchů součástí. Ta do značné míry ovlivňuje jak jejich životnost, tak spolehlivost a závisí na ni především přesnost chodu, hlučnost, odolnost proti korozi a opotřebení, ztráty třením či únavová pevnost těchto komponent. (33)

Reliéf vzniklý na povrchu obrobků je nejen nositelem jednotlivých informací, ale je také obrazem jeho tvorby danou technologií. Hodnocením parametrů drsnosti lze predikovat sled operací nutný k dosažení finální požadované kvality povrchu a také optimalizovat, či zdokonalit proces jeho tvorby.

Jelikož pro hodnocení struktur povrchů vzniklých řezáním hydroabrazivním paprskem nebo laserem nejsou normy doposud ani zavedeny, ani sestaveny, je při měření obsaženém v této studii vycházeno z všeobecně užívaných norem ČSN EN ISO 4287 (34) a ČSN EN ISO 4288 (35).

4.1 Drsnost povrchu

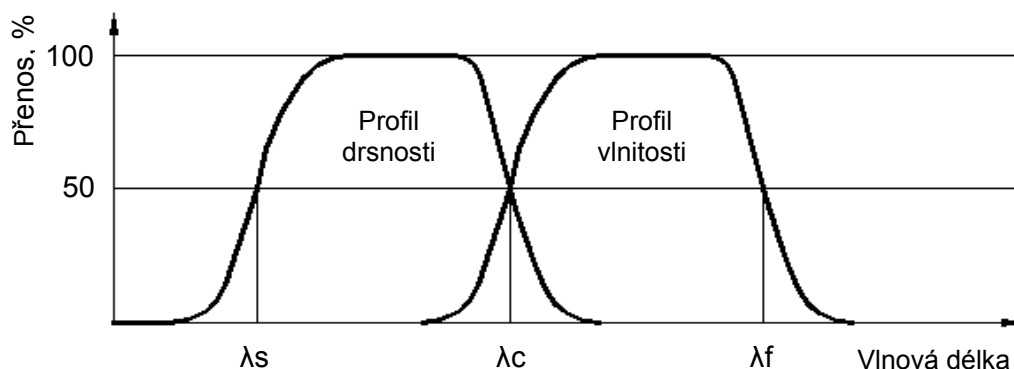
Posuzování struktury povrchu součástí je řešeno redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu (obr. 4.1). V rovině řezu je tímto způsobem získán profil povrchu, který je složen z profilu vlnitosti, profilu drsnosti a kratších a delších složek vln přítomných na povrchu. Jednotlivé složky je možné od sebe separovat filtrací, a to použitím různých druhů filtrů o rozličných vlnových délkách tak, jak je znázorněno jejich přenosovou charakteristikou na obr. 4.2.



Obr. 4.1 Profil povrchu (34)

Používané filtry lze rozdělit na:

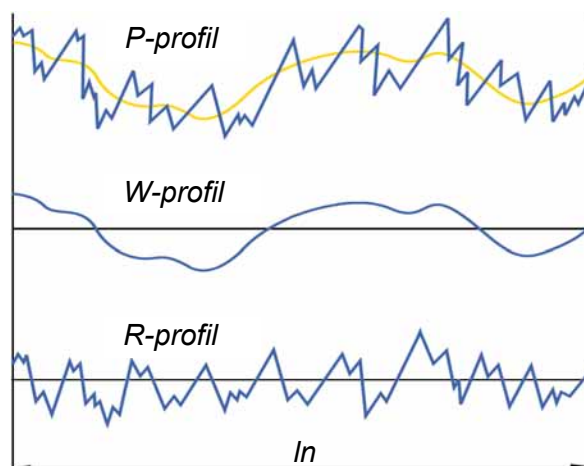
- λ_s filtr – filtr definující rozhraní mezi drsnostmi a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu;
- λ_c filtr – filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti;
- λ_f filtr – filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu. (33, 34)



Obr. 4.2 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti (34)

Dle normy ČSN EN ISO 4287 (34) lze rozlišit 3 typy profilů povrchu (graficky znázorněno na následujícím obr. 4.3):

- **základní profil** – *P-profil (primary profile)*
- profil vzniklý aplikací filtru λ_s pro odfiltrování krátkovlnných složek;
- **profil drsnosti** – *R-profil (roughness profile)*
- profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek užitím filtru λ_c ;
- **profil vlnitosti** – *W-profil (waviness profile)*
- profil odvozený postupnou aplikací λ_f filtru pro odstranění dlouhovlnných složek a λ_c filtru pro odstranění krátkovlnných složek.



Obr. 4.3 Základní profil a z něho odvozené profily vlnitosti a drsnosti (36)

Pro objektivní měření a vyhodnocení jakosti povrchu má velký význam správný výběr jak základní, tak vyhodnocované délky. Základní délka musí být dostatečně velká, aby v jejím rozsahu byly měřené parametry statisticky významné, ale současně ne tolik, aby zahrnovala nepodstatné detaily povrchu či vlivy vlnitosti nebo úchylek tvaru. Vyhodnocovaná délka je dle normy (35) složena z jedné nebo více délek základních, přičemž nejčastěji je užíváno násobku pěti (obr. 4.4). Kromě vyhodnocované délky je do snímané dráhy měřicího přístroje také zahrnuta délka rozběhu a délka doběhu, z nichž nejsou parametry povrchu vyhodnocovány. Veškeré tyto délky lze stanovit v souladu s literárními prameny (34, 35, 36) dle schématu uvedeného v příloze 1.



Obr. 4.4 Základní a vyhodnocovaná délka, délka rozběhu a doběhu (36)

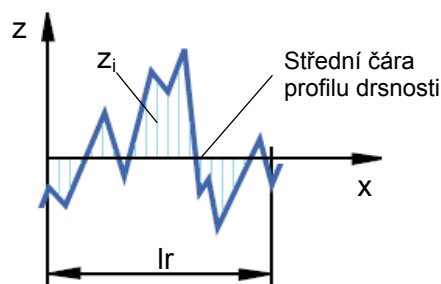
4.1.1 Definice parametrů profilu drsnosti povrchu (33, 34, 36)

Charakter drsnosti povrchu je možné vyjádřit celou škálou parametrů, jež jsou blíže specifikovány v normě ČSN EN ISO 4287 (34). Pro samotnou definici těch, které byly vybrány pro objasnění vlivu procesního faktoru rychlosti posuvu řezné hlavy, je nutné nejprve uvést alespoň nejdůležitější terminologii a významy elementů určených k jejich popisu.

Střední čára profilu drsnosti

Jedná se o čáru odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λc . Má tvar jmenovitého profilu a rozděluje skutečný profil tak, že v rozsahu základní délky je součet druhých mocnin jeho úchylek od této čáry nejmenší.

$$\int_0^{l_r} z(x)^2 dx = \min. \quad (4.1)$$



Obr. 4.5 Střední čára profilu drsnosti

Prvek profilu

Je tvořen výstupkem profilu a přilehlou prohlubní. Výstupek profilu představuje část posuzovaného profilu z povrchu ven směřující, zatímco prohlubeň profilu část směřující dovnitř (viz. obr. 4.6).

Výška výstupku profilu Z_p

- vzdálenost mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku (obr. 4.6)

Hloubka prohlubně profilu Z_v

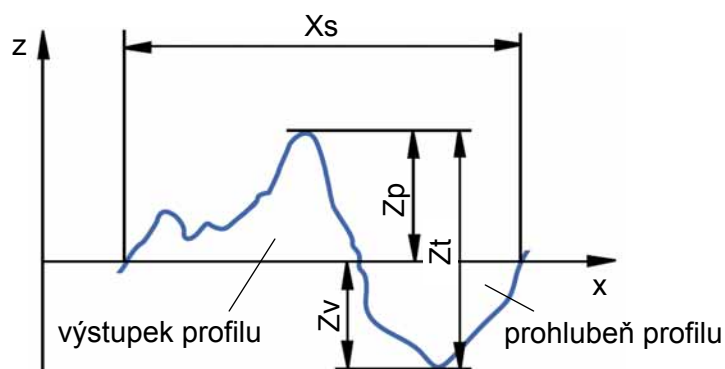
- vzdálenost mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu (obr. 4.6)

Výška prvku profilu Z_t

- součet výšky výstupku profilu Z_p a hloubky prohlubně profilu Z_v (obr. 4.6)

Šířka prvku profilu X_s

- délka úseku osy X protínající prvek profilu (obr. 4.6)



Obr. 4.6 Prvek profilu

V následujících podkapitolách jsou uvedeny definice jednotlivých parametrů, jež byly použity k vyhodnocení drsnosti povrchu řezných hran vytvořených jak hydroabrazivním, tak laserovým dělením.

4.1.1.1 Výškové parametry – výstupky a prohlubně

Největší výška výstupku profilu R_p

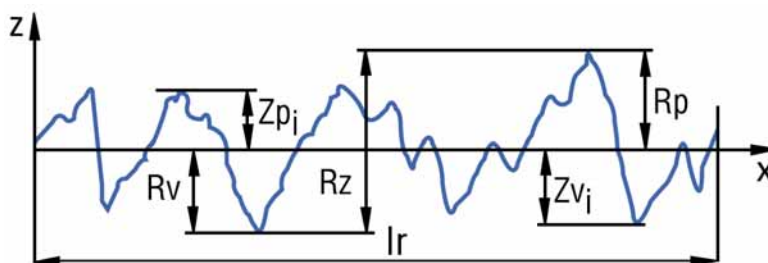
- výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (obr. 4.7)

Největší hloubka prohlubně profilu R_v

- hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (obr. 4.7)

Největší výška profilu R_z

- součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu (R_p) a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu (R_v) v rozsahu základní délky (obr. 4.7)



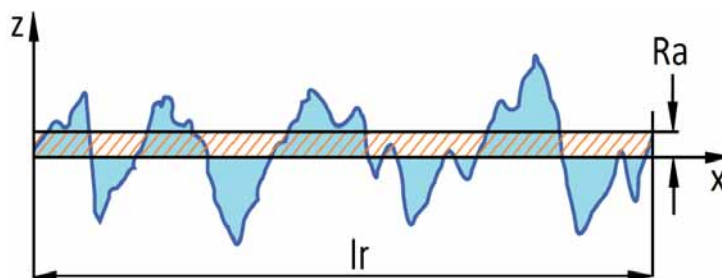
Obr. 4.7 Parametry profilu drsnosti povrchu R_p , R_v a R_z

4.1.1.2 Výškové parametry – průměrné hodnoty pořadnic

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Je jednou z nejpoužívanějších charakteristik drsnosti povrchu ve strojírenské praxi. Jedná se o přednostní výškový parametr, jež je získáván jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ od střední čáry v rozsahu základní délky.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4.2)$$



Obr. 4.8 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Jak uvádí literatura (33), je třeba si uvědomit, že parametr R_a je pouze statistickou hodnotou, jež udává střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotli-

vých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry. Nelze z něj však vyčíst, jak povrch vytvořený určitou technologií vlastně vypadá a při hodnocení profilu drsnosti členitých, pórovitých nebo hlubšími rýhami porušených povrchů může vést i k mylným představám. Navíc je dobře známo, že dva povrchy se stejnou hodnotou Ra mohou mít zcela rozdílné funkční vlastnosti.

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu Rq

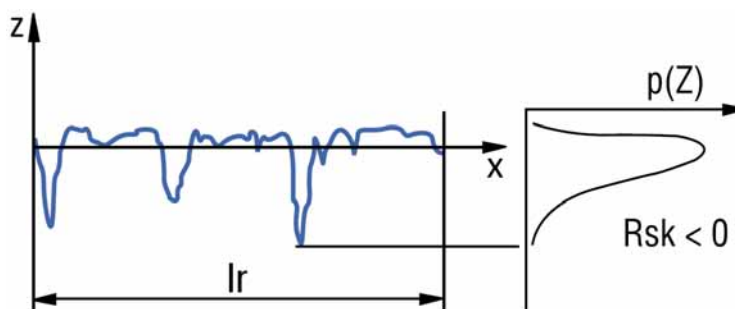
- kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^2(x)| dx} \quad (4.3)$$

Šikmost posuzovaného profilu Rsk

Je vyjádřena podílem průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky (viz. obr. 4.9).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[\frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right] \quad (4.4)$$



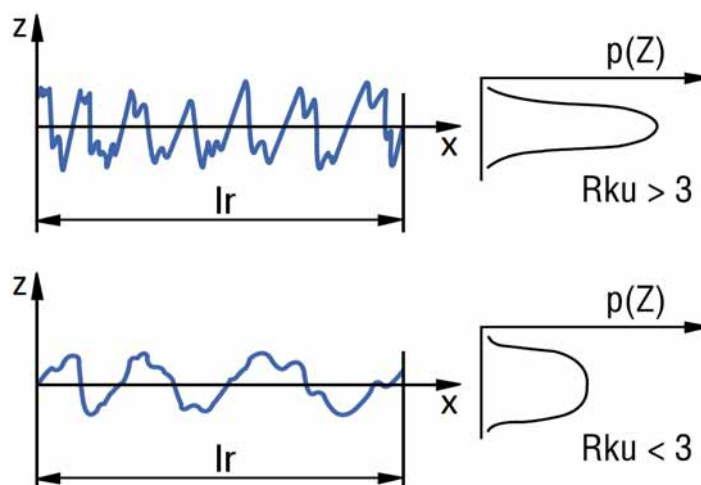
Obr. 4.9 Šikmost posuzovaného profilu Rsk

Tato veličina udává posunutí funkce hustoty pravděpodobnosti oproti Gaussovu normálnímu rozložení (obr. 4.9) a umožňuje tak lépe rozlišit povrchy se stejnou hodnotou Ra z hlediska tvaru profilu. Je-li vrchol této funkce posunut směrem k výstupkům nerovností ($Rsk < 0$), vypovídá to o větších a hlubších prohlubních na povrchu, zatímco je-li vrchol posunut směrem k prohlubním ($Rsk > 0$), ukazuje to na povrch s více a členitějšími výstupky.

Špičatost posuzovaného profilu Rku

Je dána podílem průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky a udává rozšíření nebo zúžení funkce hustoty pravděpodobnosti proti Gaussovu normálnímu rozložení.

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[\frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (4.5)$$

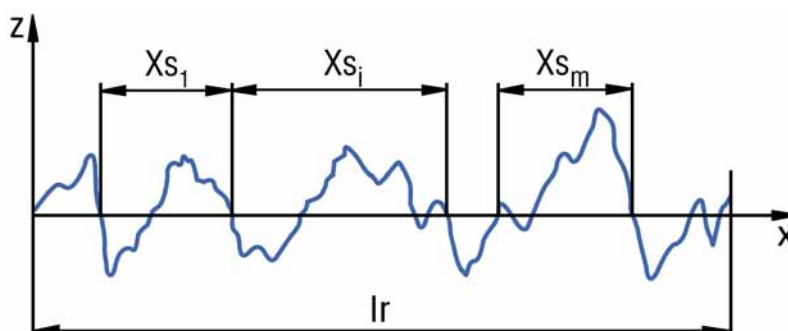
Obr. 4.10 Špičatost posuzovaného profilu Rku

4.1.1.3 Délkové parametry

Průměrná šířka prvků profilu RSm

Je základní charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru získaná jako aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky.

$$Rsm = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (4.6)$$

Obr. 4.11 Průměrná šířka prvků profilu RSm

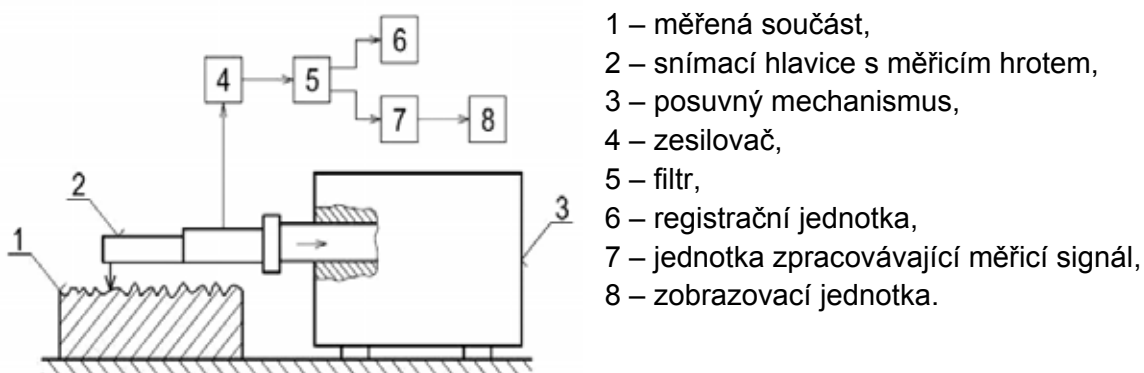
4.2 Metody měření drsnosti povrchu

Měření parametrů drsnosti povrchu je v dnešní době možno provádět mnoha různými metodami, z nichž každá má své výhody a nevýhody. Jak uvádí literární zdroj (37) jednotlivé měřicí zařízení lze rozdělit do 3 základních skupin:

- dotykové měřicí přístroje (*stylus instruments*),
- bezdotykové (optické) měřicí přístroje (*optical instruments*),
- ostatní měřicí přístroje.

4.2.1 Dotykové měřicí přístroje (11, 33, 37)

V současnosti patří mezi nejrozšířenější měřicí prostředky, a to hlavně ve strojírenské praxi. Tyto přístroje zprostředkovávají přímé měření a hodnoty z nich získané často slouží ke komparaci s hodnotami obdrženy jinými metodami. Jejich hlavními výhodami jsou vysoká přesnost, citlivost, reprodukovatelnost měření, možnost převodu analogového signálu do digitální formy a také poskytnutí veškerých parametrů profilu drsnosti dle mezinárodních norem. Nicméně použitím těchto přístrojů, jejichž hrot je vyroben z velmi tvrdého materiálu (např. syntetický polykrystalický diamant), dochází v mnoha případech k částečnému poškození povrchové vrstvy měřené součásti, a tím i ke zkreslení naměřených údajů. Mezi další nevýhody lze zahrnout poměrně vysokou cenu těchto zařízení a jejich relativní křehkost. Na obr. 4.12 je zobrazeno schéma dotykového měřicího přístroje.



Obr. 4.12 Schematické znázornění principu dotykového profilometru (11, 37)

4.2.2 Bezdotykové měřicí přístroje (2, 33, 37)

Jedná se o optická měřicí zařízení, v nichž je snímací hrot nahrazen paprskem elektromagnetického záření, čímž je vyloučeno poškození povrchu měřené součásti. Paprsek dopadající na povrch může být reflektován 3 různými způsoby: odrazem, rozptylem nebo jejich kombinací. Vzájemná interakce mezi paprskem a měřeným vzorkem odvisí především od drsnosti povrchu a od použité vlnové délky záření. Hlavními výhodami těchto zařízení jsou bezkontaktnost, a tím nedestruktivnost, dále možnost kontinuální kontroly, měření větší části povrchu než u metod kontaktních a opakovatelnost procesu. Jejich ústřední nevýhodou ovšem je, že měření topografie povrchu je měření nepřímé. To má za následek nutnost porovnání experimentálně získaných výsledků z těchto přístrojů s hodnotami obdrženy kontaktním profilometrem.

4.2.3 Ostatní měřicí přístroje (2, 33, 37)

Do této skupiny lze zahrnout celou řadu zařízení využívajících metod, jež fungují na jiném principu, než ty doposud zmíněné. Mezi ně patří například:






- a. AFM (*atomic force microscopy*) – tato metoda využívá miniaturního velmi ostrého snímacího hrotu (*tip*), jež není v přímém kontaktu s měřeným povrchem; konstantní „přítlačná“ síla (10^{-9} N), která zajišťuje jeho stálou polohu nad vzorkem, je vyvozena piezoelektrickým článkem; proti ní působí meziatomární síly měřeného materiálu; vlivem nerovností je hrot vychylován a jeho pohyb zaznamenáván;
- b. SEM (*scanning electron microscopy*) – je založena na interakci vysoce-energetického paprsku elektronů s povrchem vzorku a na měření energie elektronů povrchem odražených a emitovaných;
- c. pneumatické měření nerovností povrchu – měřením průtoku nebo tlaku vzduchu na výstupu z trysky přitlačené k povrchu měřené součásti lze určit stupeň jejích nerovností.

4.3 Hodnocení kvality povrchu u metody AWJ

Jak již bylo předesláno v úvodu této kapitoly, všeobecně přijaté normy pro hodnocení topografie povrchu vytvořené hydroabrazivním dělením doposud nebyly ani zavedeny, ani sestaveny. Nicméně dle zjištěných informací a některých literárních zdrojů (38, 39) existuje již řadu let rozdělení dosahovaných kvalit řezu, jež se označují Q1 až Q5. Přičemž kvalita řezu Q1 je definována jako nejhorší (dělicí řez) a kvalita řezu Q5 jako nejlepší. Většina firem zabývajících se a dodávajících technologii vodního paprsku toto značení používá, ovšem u každé z nich lze mezi jednotlivými stupni kvality nalézt rozdíly. Je tomu tak především ze dvou důvodů:

1. Přesný rozsah ani specifikace jednotlivých parametrů přesnosti a drsnosti povrchu pro každý stupeň není nikde přesně definován, tudíž si každá společnost určuje vlastní dle provedených zkoušek a svých normativů.
2. Každá společnost dodává spolu se svým zařízením také svůj kalkulační software, ve kterém je integrován matematický model pro výpočty jednotlivých stupňů kvality. Ten se liší nejen samotným zpracováním, ale také zohledněním parametrů vstupujících do procesu řezání, které mají na kvalitu řezu vliv.

Tab. 4.1 Orientační popis stupňů kvality řezu užívaných firmou CHPS s. r. o. (39)

Stupeň kvality	Popis	Ukázka	Parametr drsnosti R_a v horní kontuře [μm]	Parametr drsnosti R_a ve spodní kontuře [μm]	Tvarová přesnost v horní kontuře [mm]	Tvarová přesnost ve spodní kontuře [mm]	Velikost úkosu
Q1	Dělicí řez		4,0 - 6,3	do 40	+/- 0,2	výrazně nepřesné	výrazný
Q2	Hrubý řez		cca. 4,0	do 25	+/- 0,2	dle typu a tloušťky materiálu	dle typu a tloušťky materiálu
Q3	Středně kvalitní řez		cca. 4,0	do 12,5	+/- 0,15	dle typu a tloušťky materiálu	dle typu a tloušťky materiálu
Q4	Kvalitní řez		cca. 3,2	cca. 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	většinou minimální
Q5	Nejlepší řez		pod 3,2	cca. 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	většinou mírný podřez

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MATERIÁLU

V předkládané experimentální části této studie je provedena analýza kvality povrchu vzorků vytvořených hydroabrazivním a laserovým řezáním za účelem porovnání jak výškových, tak délkových parametrů drsnosti v závislosti na změně technologického parametru rychlosti posuvu řezací hlavy. Cílem těchto experimentů je zhodnocení výstupních charakteristik daného materiálu po procesu dělení vybranými metodami se zaměřením se na AWJ a jejich porovnání, na základě kterých by mohla být v budoucnu provedena jejich optimalizace.

5.1 Materiál vzorků

Vstupním materiálem pro provedení obou experimentů byl nelegovaný titan dodávaný ve vyžíhaném stavu ve formě plátových desek o rozměrech 2000 x 3000 x 10 mm s označením ASTM B265-99 grade 2. Jeho chemické složení je uvedeno v tab. 5.1, fyzikální a mechanické vlastnosti v tab. 5.2.

Tab. 5.1 Chemické složení titanu ASTM B265-99 grade 2
– Maximální obsahy přimíslených prvků (40)

Chem. složení	Fe	C	N	O	H
Max. [wt. %]	0,30	0,08	0,03	0,25	0,015

Tab. 5.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti titanu ASTM B265-99 grade 2 (40)

Fyzikální a mechanické vlastnosti	Označení	Jednotka	Hodnota
Hustota	ρ	kg.m ⁻³	4512
<i>Bod tání</i>	T _M	° C	1677
<i>Tepelná vodivost</i>	λ_T	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	16,3
<i>Youngův modul pružnosti</i>	E	GPa	102
<i>Pevnost v tahu</i>	R _m	MPa	345
<i>Smluvní mez kluzu</i>	R _{p0,2}	MPa	275
<i>Tažnost</i>	A	%	20
<i>Tvrdost dle Brinella</i>	HB	-	160

Tento materiál vyniká výbornou svařitelností, dobrou pevností, tažností a velmi vysokou korozní odolností. Je využíván především pro aplikace v leteckém, kosmickém a chemickém průmyslu a všude tam, kde je požadována snadná tvářitelnost. Stejně jako ostatní materiály ze skupiny titanu a jeho slitin má i tento typ velmi nízkou tepelnou vodivost, což do značné míry ztěžuje jeho obrobiteľnost. (40, 41)

5.2 Příprava vzorků hydroabrazivním dělením

Vytvoření zkušebních vzorků bylo provedeno na výrobním zařízení firmy PTV na pracovišti Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. Ostrava. Byl použit CNC stůl WJ2020B-1Z-D (obr. 5.1), vysokotlaké čerpadlo PTV-37-60 Pump (obr. 5.2) a nová koncepce diamantové řezací hlavy s cartridgeovou konstrukcí (obr. 5.3).



Obr. 5.1 CNC stůl WJ2020B-1Z-D od firmy PTV



Obr. 5.2 Vysokotlaké čerpadlo PTV-37-60 Pump (bez krytáže)



Obr. 5.3 Cartridgeová konstrukce diamantové řezné hlavy od firmy PTV

Pracovní stůl řady D patří mezi nejběžněji vyráběné. Základní ocelová konstrukce je doplněna prvky z hliníkových profilů. Přesné polohování portálu je zajišťováno pomocí lineárních vedení s kuličkovými vozíky. Polohování řezné hlavy vůči obrobku (osa Z) je uskutečňováno skrze přesné planetové převodovky poháněné servomotory. Pro ochranu proti korozi způsobené vodním činitelem je celá konstrukce zakrytována užitím nerezových plechů a gumových a plastických komponent. Pracovní plocha tohoto typu stolu je 2000 x 2000 mm.

Uvedené vysokotlaké čerpadlo má výkon 37 kW. Ke kompresi kapaliny využívá dvojčinný multiplikátor, jehož násobící poměr je 1:20. Maximální dosažitelný provozní tlak vody se pohybuje okolo 415 MPa a její maximální průtočné množství je až 3,68 l/min (to závisí také na průměru použité vodní trysky – viz. příloha 2).

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 3.3.8, v této nové koncepci řezací hlavy je diamantová vodní tryska vetknuta ve vyměnitelné vložce (obr. 3.9 b)). Hlavním rozdílem oproti předchozím řešením je, že přímo v této vložce je alokována i směšovací komora s nově navrženou geometrií. Díky vhodné volbě tvaru a mechanismu montáže vložky bylo dosaženo zatím nejlepší souososti vodní trysky a hydroabrazivní trubice, čímž došlo k navýšení řezného výkonu ve většině případů až o 20 %.

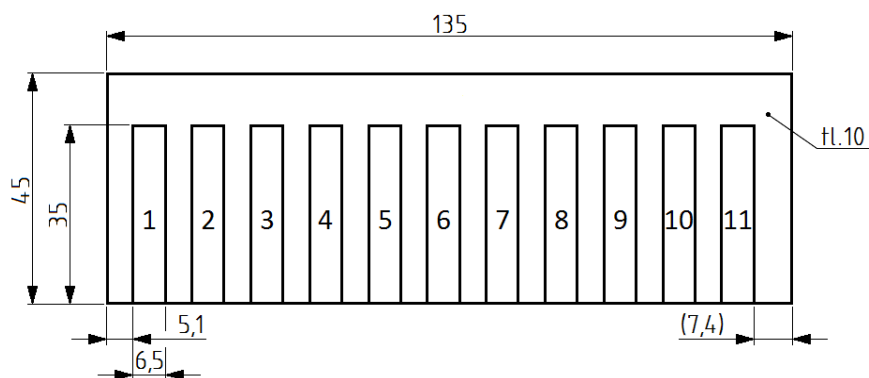
Před samotným hydroabrazivním dělením vzorků byla z rozměrného plátu na pásové pile uříznuta deska, jejíž rozměry činily 45 x 135 x 10 mm. Z této desky bylo poté hydroabrazivním paprskem vyřezáno 11 vzorků o rozměrech 35 x 6,5 x 10 mm (obr. 5.4).

Veškeré vstupní hodnoty parametrů použité při experimentu byly konstantní, jen rychlost posuvu řezné hlavy byla měněna od 50 do 550 mm/min, přičemž jednotlivé rychlosti byly odstupňovány krokem 50 mm/min. Výpis nastavení jednotlivých faktorů je uveden v tab. 5.3.

Tab. 5.3 Technologické parametry při hydroabrazivním řezání zkušebních vzorků

Technologické parametry	Označení	Jednotka	Hodnota
Rychlost posuvu	v_p	mm.min ⁻¹	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550
Tlak kapaliny	p	MPa	400
Průměr vodní trysky	d_o	mm	0,30
Průměr hydroabrazivní trubice	d_a	mm	0,762
Délka hydroabrazivní trubice	l_a	mm	76
Zdvih	x	mm	3
Úhel sklonu řezné hlavy	φ	°	90
Hmotnostní tok abraziva	m_a	g.min ⁻¹	400
Velikost abraziva (zrnitost)	d_p	MESH	80
Materiál abraziva	-	-	granát Barton

Jak je psáno v podkapitole 3.5, rychlost posuvu řezné hlavy patří k technologicky nejdůležitějším a nejsnáze regulovatelným parametrům výrazně ovlivňujícím výslednou kvalitu povrchu stěn. Cílem tohoto experimentu je tedy objasnění vlivu tohoto procesního faktoru na parametry drsnosti povrchu.



Obr. 5.4 Rozměry výchozí desky a jednotlivých vzorků

Pro výpočet maximální hodnoty rychlosti posuvu při uvedených vstupních hodnotách byl použit kalkulátor rychlostí poskytnutý firmou PTV. Výsledná rychlost pro stupeň kvality Q5 (dělicí řez) pro titan o tloušťce 10 mm byla spočítána na 560 mm/min. Ke komparaci matematického modelu navrženého touto firmou byl výpočet porovnán užitím volně stažitelné verze programu obdobného od firmy Omax (42). Výsledná hodnota rychlosti posuvu z něj byla

přibližně o 26 mm/min vyšší (viz. obr. 5.5). Po provedení prvního zkušebního řezu rychlostí posuvu $v_p = 560$ mm/min bylo zjištěno, že v některých místech spodní části řezné hrany zůstávají drobné, stále propojené výčnělky. Proto byla rychlost snížena na 550 mm/min, kdy již došlo k plnému prořezání. Z uvedeného vyplývá, že matematický model, který tvoří jádro výpočetního programu firmy Omax není tak přesný jako ten od firmy PTV. Za zmínku totiž také stojí fakt, že rychlost posuvu pro dosažení nejkvalitnějšího řezu (stupeň kvality Q1) stanovená tímto kalkulátorem o tři čtvrtiny převyšuje rychlost vypočtenou pomocí kalkulátoru firmy PTV (viz. obr. 5.5). V podkapitole 5.5 je možno také vidět rozdíl v parametrech drsnosti povrchu obdržných při rychlostech 100 a 200 mm/min, které se těmto rychlostem blíží nejvíce.

PTV calculator v.1.6 Beta

Nastavení stroje Tabulky Vyber jazyk O programu

Tlak vody (bar)	4000 bar
Průměr vodní trysky (inch)	.012 inch
Průměr abrazivní trysky (inch)	.03 inch
Množství abraziva (g/min)	400 g/min
Typ abraziva	Garnet GMA 80 mesh
Počet současně řezajících hlav	1
Systém s diamantovou tryskou	Ano
Systém s tlakovou dopravou	Ano
Typ materiálu	Titan
Tloušťka materiálu (mm)	10 mm
Požadovaná kvalita řezu	Maximální kvalita
Doporučená rychlost	130 mm/min
Požadovaná kvalita řezu	Dělicí
Doporučená rychlost	560 mm/min

WJWR Linear feed rate calculator V2.4

Waterjet Web Reference Calculator

Material Setup: Material: Titanium, Thickness: 10 mm

Pump and Nozzle Setup: Pressure: 4000 bar, Abrasive Flow Rate: 0.40 kg/min, Orifice (Jewel) Diameter: 0.30 mm, Mixing Tube Diameter: 0.762 mm

Units: Metric (selected), English

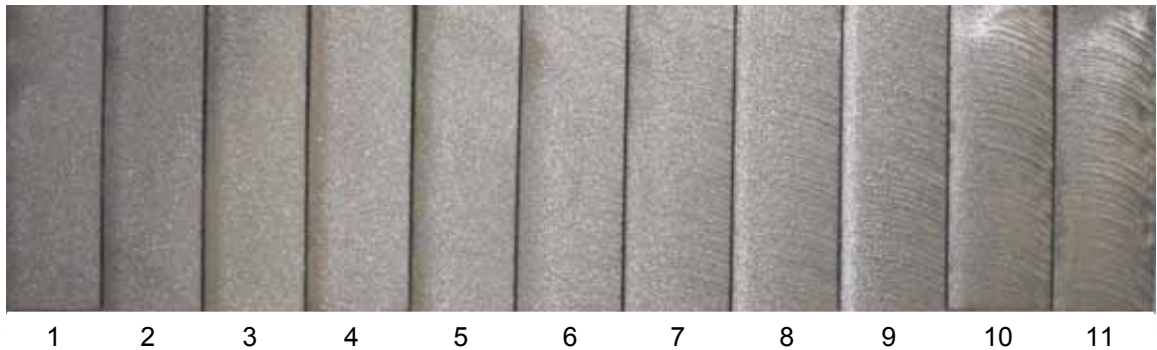
Cutting Speeds: Typical LINEAR cutting speed for a smooth surface finish (mm/min): **220.86**; Linear cutting speed to just barely cut through material (mm/min): **585.97**

Power: Actual Cutting Power: **17.62** kW

Close Help & Pump Info www.waterjets.org

Obr. 5.5 Hodnoty rychlosti posuvu řezné hlavy pro dělicí (Q5) a nejkvalitnější řez (Q1) získané pomocí kalkulátorů firmy PTV a Omax

Na obrázku 5.6 je uveden detail řezných ploch jednotlivých vzorků vytvořených metodou AWJ, přičemž číslování od 1 do 11 odpovídá rychlostem posuvu řezné hlavy od 50 do 550 mm/min.



Obr. 5.6 Detail řezných ploch jednotlivých zkušebních vzorků vytvořených AWJ

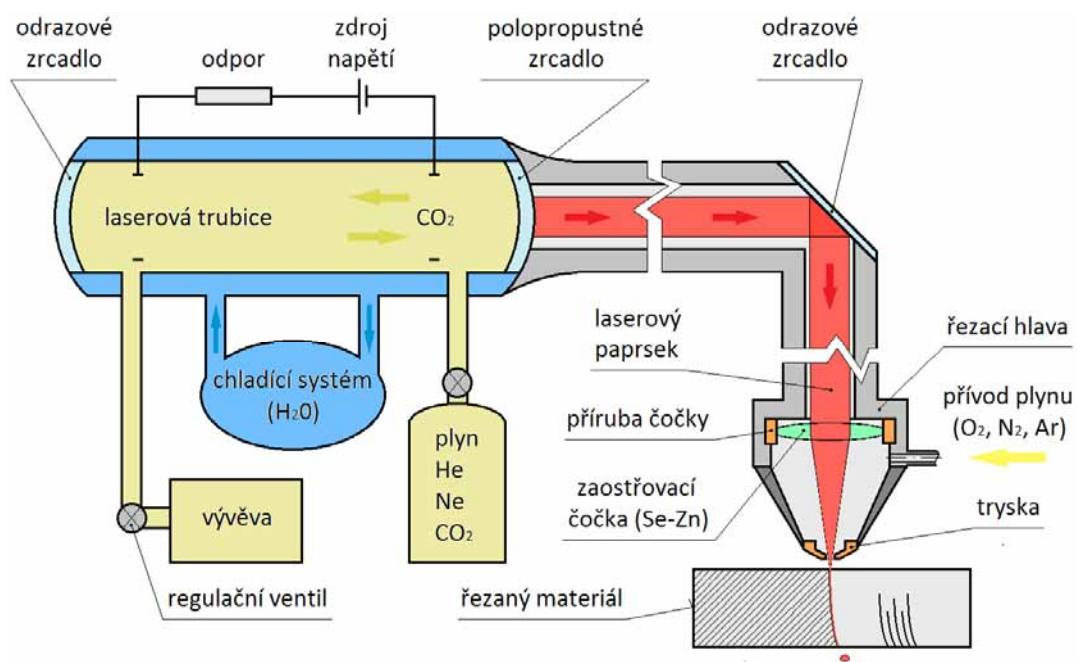
5.3 Příprava vzorků laserovým dělením

Vytvoření zkušebních vzorků užitím laseru bylo provedeno na výrobním zařízení italské firmy Prima Industrie na pracovišti firmy Metakov s. r. o., Spišská Nová Ves, Slovenská republika. Pro experiment byl použit CNC 2D laser zmíněné společnosti typ PLATINO 2040/CP3500 (obr. 5.7).



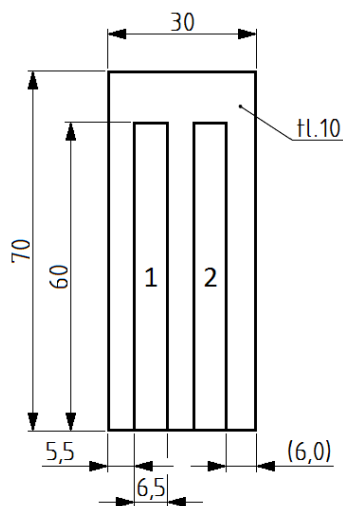
Obr. 5.7 CNC 2D laser Prima Industrie, typ PLATINO 2040/CP3500

Tento stroj patří v současnosti k nejpreciznějším laserovým zařízením s krokem odměřování 0,001 mm a přesností polohování a opakovaného vynesení +/- 0,03 mm. Lze jím řezat objemnou škálu materiálů rozmanitých tloušťek. Tento typ disponuje výkonem 3500 W a k řezání využívá plynový CO₂ laser (schematické znázornění jeho principu na obr. 5.8). Maximální rychlost posuvu řezací hlavy je až 80 m/min. Pracovní prostor zařízení má velikost 2000 x 4000 x 150 mm.



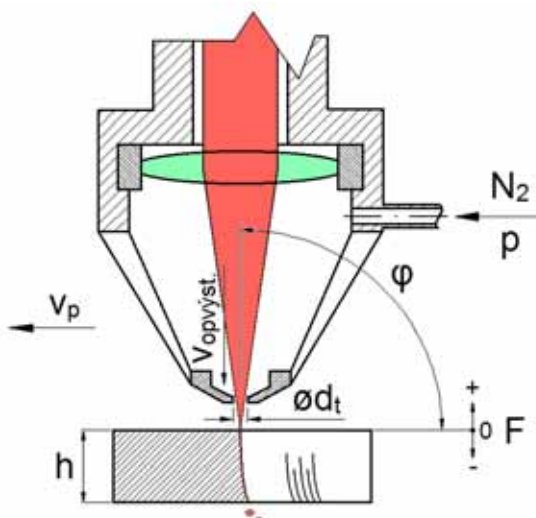
Obr. 5.8 Schematické znázornění principu plynového CO₂ laseru

Před samotným laserovým řezáním vzorků byla z rozměrného plátu opět uříznuta menší deska, jejíž rozměry činily 70 x 30 x 10 mm. Z této destičky byly poté vyřezány 2 zkušební vzorky o velikosti 60 x 6,5 x 10 mm (obr. 5.9).



Obr. 5.9 Rozměry výchozí destičky a jednotlivých vzorků

Stejně jako u metody hydroabrazivního dělení materiálu i u laserového řezání vstupuje do dělicího procesu mnoho faktorů (viz. obr. 5.10). Vstupní hodnoty parametrů použité při tomto experimentu jsou uvedeny v tab. 5.4. Veškeré parametry byly v průběhu řezání konstantní, jen rychlost posuvu řezné hlavy byla pozměňována. Vše bylo prováděno kvalifikovanou obsluhou za účelem dosáhnout co nejlepších výsledků. Jelikož byl ale tento experiment proveden jako předběžný test pro optimalizaci procesních faktorů řezání daného typu titanu laserem, k dispozici jsou pouze 2 vzorky. Výsledky kvality povrchu z nich obdržené jsou v této studii vyhodnoceny a užity ke komparaci s výsledky získanými metodou AWJ.



Obr. 5.10 Vybrané faktory vstupující do procesu dělení materiálu laserovým paprskem (význam jednotlivých parametrů viz. tab. 5.4)

Tab. 5.4 Technologické parametry při řezání zkušebních vzorků laserem

Technologické parametry	Označení	Jednotka	Vz. č. 1	Vz. č. 2
Rychlost posuvu	v_p	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	450	550
Výkon řezání	P	W	3500	
Režim provozu laseru	-	-	kontinuální	
Frekvence	f	Hz	0	
Průměr trysky	d_t	mm	2,0	
Vzdálenost trysky od povrchu vzorku	x	mm	1,5	
Ohnisko – fokusace	F	mm	-7	
Úhel sklon řezné hlavy	φ	$^\circ$	90	
Typ ochranného plynu	-	-	N ₂	
Tlak ochranného plynu	p	MPa	1,6	
Výstupní rychlost ochranného plynu	V_{opvyst}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	500	

Na obr. 5.11 zobrazen detail řezných ploch vytvořených laserovým dělením, přičemž číslování 1 a 2 odpovídá rychlostem posuvu řezací hlavy 450 a 550 mm/min.



Obr. 5.11 Detail řezných ploch zkušebních vzorků vytvořených laserem

5.4 Metodika měření topografie povrchu

Měření zkušebních vzorků vytvořených jak hydroabrazivním, tak laserovým řezáním byly provedeno kontaktním profilometrem Surftest SJ 402 od firmy Mitutoyo (obr. 5.12) na VŠB – TU v Ostravě.



Obr. 5.12 Měřicí zařízení Surftest SJ 402 od firmy Mitutoyo propojené s PC

Tento přístroj se svým softwarovým vybavením patří v současnosti mezi jedny z nepreciznějších a náleží do skupiny zařízení s přímým způsobem měření, tzn., že při měření je měřicí hrot (stylus) v kontaktu s testovaným vzorkem. Ten je upnut do speciálního svěráku, který tvoří součást posuvného X-Y stolu umístěného na granitové základní desce měřicího zařízení. Hlava s posuvným hrotem je uchycena na sloupkovém vedení umožňujícím její výškové přestavení v ose Z. Rozsah pohybu hrotu, a tím i maximální snímaná délka, je 50 mm ve směru osy X.

Nerovnosti povrchu způsobují výchylky hrotu, které jsou snímány a poté prostřednictvím A/D převodníku přeměněny na digitální signál. Ten je nositelem informací o měřeném povrchu. Tento signál je následně zpracován pomocí připojeného PC a softwaru Surfpack – SJ, který je dodáván s tímto přístrojem.

Měření bylo uskutečněno za okolních podmínek uvedených v tab. 5.5. K snímání byl použit hrot vyrobený z polykrystalického diamantu s vrcholovým úhlem 60° a se zaoblením špičky $2 \mu\text{m}$. Před samotným měřením bylo nutné přístroj zkalibrovat pomocí etalonu se známými parametry drsnosti povrchu. Správné nastavení základních délek l_r bylo poté provedeno pomocí zkušebních měření na každém vzorku a pomocí schématu v příloze 1 pro neperiodický povrch. Hodnoty parametrů použité pro měření a vyhodnocení profilu drsnosti jsou uvedeny v tab. 5.6 a tab. 5.7. Vzorky byly proměřovány přibližně v jejich středu v ekvidistantách osy Y v 19-ti měřicích liniích s krokem 0,5 mm tak, aby bylo umožněno získání informací o distribuci nerovností v různých úrovních jejich hloubky (obr. 5.13). Z každé linie byl získán signál, který byl vyhodnocen a zpracován.

Tab. 5.5 Podmínky měření

Parametry	Označení	Jednotka	Hodnota
<i>Teplota</i>	T	$^\circ\text{C}$	20
<i>Tlak</i>	p	kPa	100,51



Obr. 5.13 Fotografie povrchu vzorku č. 1 vytvořeným na zařízení AWJ s vyznačením 19-ti měřicích linií s krokem 0,5 mm

Tab. 5.6 Parametry použité pro měření a vyhodnocení drsnosti povrchu vzorků vytvořených AWJ řezáním

Parametry	Označení	Jednotka	Hodnota
<i>Typ filtru</i>	-	-	Gaussův
<i>λ_c filtr profilu</i>	λ_c	mm	2,50
<i>λ_s filtr profilu</i>	λ_s	mm	8,00
<i>Základní délka</i>	l_r	mm	2,50
<i>Délka rozběhu</i>	-	mm	1,25
<i>Délka doběhu</i>	-	mm	1,25
<i>Vyhodnocovaná délka</i>	l_n	mm	12,50
<i>Celková délka</i>	l_t	mm	15,00
<i>Rychlost pohybu hrotu</i>	v_h	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	0,50

Tab. 5.7 Parametry použité pro měření a vyhodnocení drsnosti povrchu vzorků vytvořených laserovým řezáním

Parametry	Označení	Jednotka	Hodnota
<i>Typ filtru</i>	-	-	Gaussův
<i>λ_c filtr profilu</i>	λ_c	mm	8,00
<i>λ_s filtr profilu</i>	λ_s	mm	25,00
<i>Základní délka</i>	l_r	mm	8,00
<i>Délka rozběhu</i>	-	mm	4,00
<i>Délka doběhu</i>	-	mm	4,00
<i>Vyhodnocovaná délka</i>	l_n	mm	40,00
<i>Celková délka</i>	l_t	mm	48,00
<i>Rychlost pohybu hrotu</i>	v_h	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	0,50

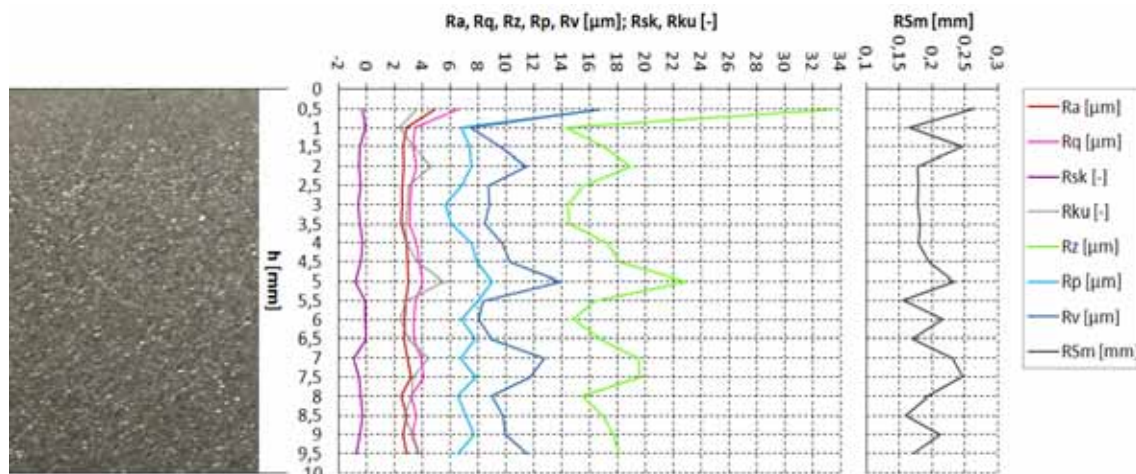
5.5 Hodnocení parametrů profilu drsnosti povrchů vytvořených užitím AWJ

V následujícím textu je pomocí grafických znázornění průběhů hodnot vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu (viz. podkapitoly 4.1.1.1, 4.1.1.2, 4.1.1.3) provedeno jejich vyhodnocení v závislosti na hloubce řezu h pro různé rychlosti posuvu řezné hlavy v_p .

Vzorek č. 1 – $v_p = 50 \text{ mm/min}$

Z průběhu hodnot (obr. 5.14), kterých nabývá parametr drsnosti R_a lze vyčíst, že po počátečním výkyvu k $5 \mu\text{m}$ (v hloubce 0,5 mm) dochází k poklesu a ustálení tohoto parametru pod hodnotou $3 \mu\text{m}$. Toto je možné objasnit tím, že ve vrchní části každého vzorku se nachází tzv. iniciační zóna (viz. podkapitola 3.4.2). V této oblasti dochází nejen k prvnímu styku hydroabrazivního

paprsku s materiálem, ale je také místem, které podléhá kromě řezného i deformačnímu opotřebení. Podle literatury (43) je tato deformace způsobená právě počátečním stykem paprsku s materiálem a vyplývá z mechanické povahy tohoto nástroje. Přičemž jeho výstupní charakteristiky nejsou ovlivněny částicemi materiálu odebranými ze stěny vzorku. V této oblasti je znatelný nárůst nejen tohoto parametru, ale i parametrů Rq , Rz , Rp a Rv . Po překročení její hranice dojde k poklesu hodnot všech zmíněných parametrů.



Obr. 5.14 Grafické znázornění závislosti vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 50$ mm/min (vzorek č. 1)

Hodnoty parametru drsnosti Rq jsou o něco vyšší než v případě předchozího parametru Ra . Ve své podstatě ale kopírují jeho průběh. Jak vyplývá z definice Rq uvedené v podkapitole 4.1.1.2, tento parametr je kvadratickou analogií parametru Ra a zároveň směrodatnou odchylkovou souřadnicí jednotlivých bodů profilu povrchu. Literatura (33) uvádí, že parametry drsnosti Ra a Rq jsou prakticky rovnocenné především při úvaze nepřesnosti vlastního měření. V méně jasných případech určení klesajícího nebo stoupajícího charakteru závislosti Ra tento parametr zvýrazňuje její lokální minima a maxima. Parametr Rq má proto spíše kontrolní funkci a v následujícím již nebude samostatně vyhodnocován.

Hodnoty parametru drsnosti Rsk po celé výšce vzorku nepřekračují nulovou hranici ($Rsk < 0$). To vypovídá o tom, že povrch je tvořen členitějšími a většími prohlubněmi s malým počtem výstupků. Povrch vzorku má díky záporné hodnotě tohoto parametru velmi dobré nosné vlastnosti.

Jak je znázorněno na obr. 4.12 (viz. podkapitola 4.1.1.2), pro parametr Rku , který udává rozšíření nebo zúžení funkce pravděpodobnosti proti Gaussovu normálnímu rozložení, je mezní hodnotou hodnota 3. Pod touto hranicí se jedná o povrchy méně členité se zaoblenými špičkami výstupků (menší špičatost), zatímco při jejím překročení o povrchy s větší členitostí a ostřejšími výstupky (větší špičatost). V případě tohoto vzorku hodnoty parametru Rku

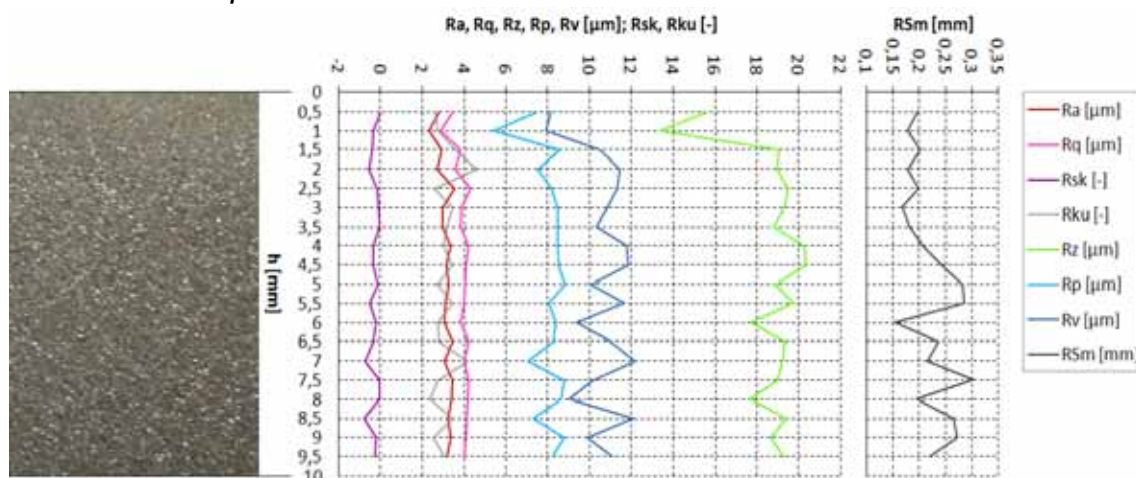
oscilují okolo této meze, přičemž větší množství z nich je nad ní. Z toho vyplývá, že profil drsnosti povrchu vzorku je členitější s četnějšími špičatými výstupky a prohlubněmi. Nutno dodat, že z předchozího hodnocení parametru šikmosti profilu Rku se jedná spíše o větší množství prohlubní než výstupků – $Rsk < 0$. Nelze si také nevšimnout toho, že prohlubně s nejostřejšími zakončeními leží ve hloubce 2 mm, tedy v těsné blízkosti hranice iniciační a hladké zóny, a dále v hloubkách 5 a 7 mm, kde jsou globální minima závislosti parametru Rsk .

Vyhodnocením průběhu parametru Rz lze v počáteční oblasti nalézt obdobný trend jako u parametru Ra a Rq . V iniciační zóně opět dochází k vysokému nárůstu hodnot a poté k jejich poklesu – překročení hranice iniciační zóny a začátek zóny hladké – a kolísání okolo hodnoty 17 μm , přičemž maximální hodnota, které tento parametr nabývá je pod 24 μm vyjma iniciační zóny. Jelikož je tento parametr součtem parametrů Rp a Rv , je nyní na místě i zhodnocení jeho skladby – tj., jaký podíl z jeho hodnot tvoří velikost výstupků a jaký velikost prohlubní.

Ze závislostí parametrů Rp a Rv na obr. 5.14 a z dosavadního hodnocení parametrů drsnosti je zřejmé, že povrch je tvořen větším množstvím prohlubní než výstupků. Maximální velikosti prohlubní dosahují vyšších hodnot v celé výšce vzorku vyjma iniciační oblasti, kde jsou velikosti jak výstupků, tak prohlubní srovnatelné. V této oblasti lze vyzorovat obdobný nárůst jejich hodnot jako u parametrů Ra a Rq . Po překročení hranice iniciační zóny dochází k oscilaci závislostí okolo 7 μm v případě Rp a 10 μm v případě Rv .

Při hodnocení drsnosti povrchu v podélném směru pomocí parametru RSm lze z jeho průběhu vyčíst počáteční zvýšení hodnot v iniciační zóně a následné zakolísání při přechodu do zóny hladké. Dále, přibližně do hloubky 4 mm je vývoj hodnot parametru RSm téměř stagnující. Od této hodnoty ke spodku vzorku již dochází k mírné oscilaci okolo hodnoty 0,2 mm.

Vzorek č. 2 – $v_p = 100 \text{ mm/min}$



Obr. 5.15 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 100 \text{ mm/min}$ (vzorek č. 2)

Stejně jako u vzorku č. 1 i u vzorku č. 2 dochází v počáteční fázi průběhu parametru Ra k jeho navýšení v iniciační zóně následované poklesem při překročení její hranice a opětovným zvýšením a oscilací nad hodnotou $3 \mu\text{m}$.

Vyhodnocením parametru šikmosti Rsk je obdržen velmi podobný výsledek jako u předchozího vzorku. Jeho hodnoty totiž ani v tomto případě nepřekračují nulovou hranici v celé jeho výšce, z čehož lze usuzovat, že profil povrchu je tvořen zejména prohlubněmi.

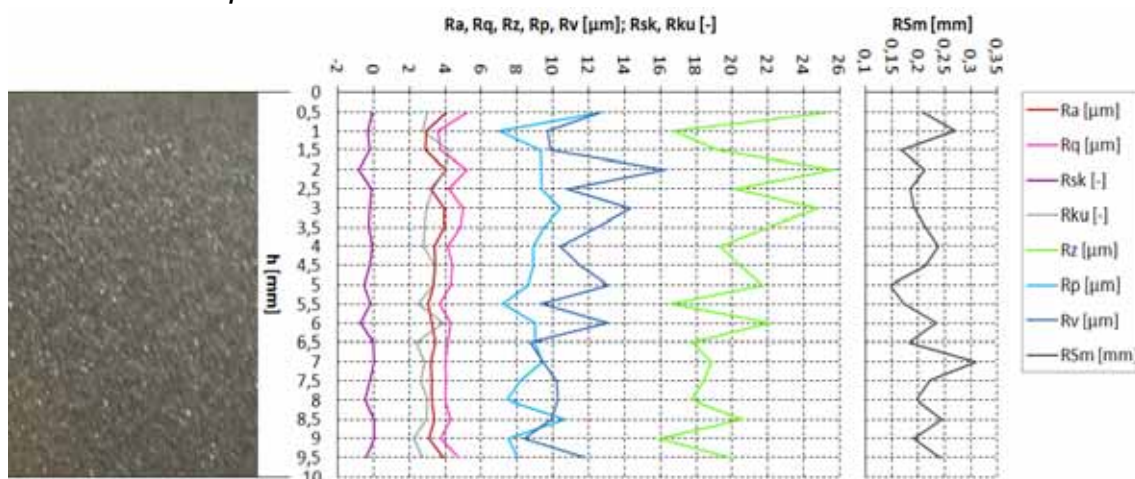
Z průběhu hodnot parametru špičatosti Rku je vidno, že jeho hodnoty opět oscilují okolo hranice 3, přičemž nejostřejší (nejšpičatější) zakončení prohlubní ($Rsk < 0$) je znovu v těsné blízkosti hranice mezi iniciační a hladkou zónou (2 mm) a v místech globálních minim závislosti parametru Rsk .

Závislost parametru Rz je v tomto případě velmi dobře zřetelná. Po překročení hranice iniciační zóny přibližně v 1 mm dochází k jejímu nárůstu na úroveň $17 \mu\text{m}$ a následnému kolísání okolo této hodnoty, přičemž jeho maximální leží pod $21 \mu\text{m}$.

Skladba parametru Rz je obdobná jako u vzorku č. 1. Maximální velikosti prohlubní dominují nad maximálními velikostmi výstupků. Po překročení hranice iniciační zóny tyto parametry oscilují okolo hodnot $8 \mu\text{m}$ v případě Rp a $11 \mu\text{m}$ v případě Rv .

Velikost parametru RSm do 4 mm hloubky řezu jen mírně osciluje pod hodnotou $0,2 \text{ mm}$. Od ní dochází již k většímu rozptylu mezi hodnotami $0,15$ a $0,30 \text{ mm}$.

Vzorek č. 3 – $v_p = 150 \text{ mm/min}$



Obr. 5.16 Grafické znázornění závislosti vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 150 \text{ mm/min}$ (vzorek č. 3)

I u vzorku č. 3 je vývoj parametru Ra obdobný. Nárůst hodnot v iniciační zóně následovaný poklesem, lehkým zakolísáním hodnot s přibývajícím hloubkou řezu a ustálení jen s nepatrnou oscilací nad hodnotou $3 \mu\text{m}$. V závěrečné fázi závislosti – zhruba od hloubky 9 mm – dochází k jeho opětovnému zvýšení.

Hodnoty parametru R_{sk} ani při této rychlosti posuvu nepřekračují nulovou hranici v celé výšce vzorku, což značí, že povrch je tvořen převážně prohlubněmi. Při porovnání se dvěma předchozími vzorky je však vidět zřetelný posun závislosti blíže k nulové hodnotě. Lze tedy říci, že jak velikosti, tak i členitost a četnost výskytu prohlubní se zmenšuje.

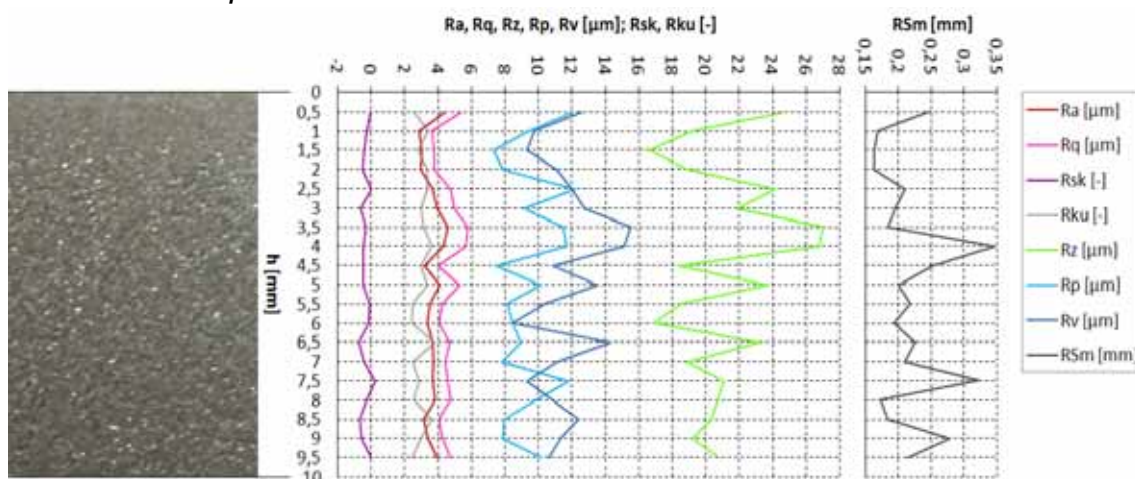
Průběh hodnot parametru špičatosti R_{ku} vypovídá o tom, že členitost povrchu je největší a zakončení výstupků i prohlubní profilu drsnosti nejostřejší ($R_{ku} > 3$) opět v oblasti hladké zóny v blízkosti přechodu hranice ze zóny iniciační (1,5÷2 mm) a poté v hloubce řezu 6 mm, kde je výskyt největších prohlubní (lokální minimum R_{sk}). Zbylé oblasti jsou tvořeny převážně méně členitými a zaoblenějšími prvky profilu – většina hodnot $R_{ku} < 3$.

Hodnoty závislosti parametru R_z po přechodu hranice iniciační zóny, kde jsou navýšeny, vykazují pokles a opětovné zvýšení. Následuje oscilace hodnot, přičemž ta maximální je menší než 26 μm .

Skladba parametru R_z je i při této rychlosti obdobná jako v předchozích případech – maximální velikosti prohlubní (R_v) dominují nad maximálními velikostmi výstupků (R_p). Při porovnání se vzorky č. 1 a 2 je ale zřetelné přiblížení těchto závislostí. Z obr. 5.16 lze vyvodit, že max. velikosti výstupků se zvětšují ve větším měřítku než max. velikosti prohlubní. Z oscilace jednotlivých parametrů je možné také usuzovat, že velikosti výstupků jsou více uniformní.

Závislost parametru R_{Sm} osciluje mezi hodnotami 0,15 a 0,31 mm, přičemž oscilace nedosahuje tak výrazného rozptýlu jako v případě vzorku č. 2.

Vzorek č. 4 – $v_p = 200 \text{ mm/min}$



Obr. 5.17 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 200 \text{ mm/min}$ (vzorek č. 4)

Z obr. 5.17 lze vypožorovat, že průběh závislosti parametru R_a u vzorku č. 4 je velmi podobný závislosti obdržené u vzorku č. 3, přičemž přibližně v hloubce řezu 3,5 mm je dosaženo maxima o velikosti 4,5 μm . Ve zbývajícím výšce vzorku hodnoty tohoto parametru jen mírně oscilují pod hodnotou 4 μm .

Hodnoty parametru R_{sk} ani při této rychlosti posuvu nepřekračují nulovou hranici v celé výšce vzorku vyjma hloubky řezu 7,5 mm, kde k jejímu překročení dochází. Tato plusová hodnota je ovšem tak malá, že z ní nelze vyvozovat přílišnou změnu šikmosti profilu. To tedy znamená, že i při této rychlosti jsou nosné vlastnosti profilu drsnosti povrchu velmi dobré v celé jeho tloušťce v důsledku výskytu většího počtu hlubších a členitějších prohlubní.

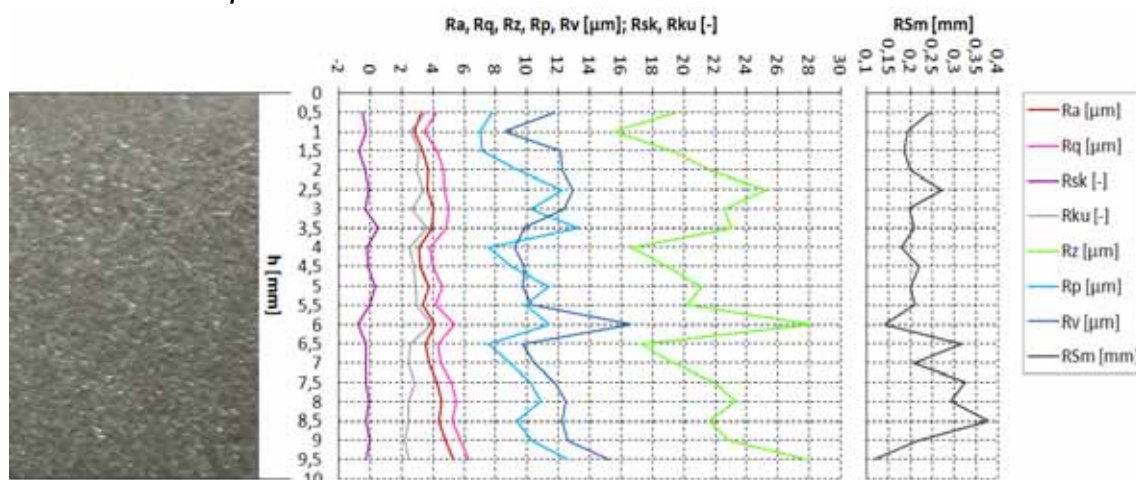
Z průběhu závislosti parametru R_{ku} je možné vysledovat, že přibližně do poloviny výšky vzorku, tj. do 5 mm, se hodnoty pohybují nad hranicí 3. Povrch je více členitý se špičatými zakončeními prohlubní a výstupků. Zatímco od této hloubky řezu dále dochází jen ve 2 místech k překmitu pře tuto hodnotu. Z toho vyplývá, že povrch je od této velikosti méně členitý a jak výstupky, tak prohlubně se vyznačují zejména zaoblenými zakončeními.

Závislost parametru R_z je velmi podobná předchozímu vzorku. Maximální hodnota, které nabývá je 27 μm v hloubce řezu 3,5÷4 mm. S ohledem na parametry R_a a R_q lze říci, že v této oblasti je obdržena drsnost s nejhorsím výsledkem (globální maxima R_a a R_q).

Skladba parametru R_z je i při této rychlosti obdobná jako v předchozích případech – maximální velikosti prohlubní (R_v) dominují nad maximálními velikostmi výstupků (R_p). Závěr, který lze formulovat, je stejný jako u vzorku č. 3. Jediný rozdíl je v tom, že oscilace závislosti parametru R_p dosahuje vyšších amplitud. To je způsobeno především nehomogenitou povrchu v důsledku jeho aperiodičnosti, která se s narůstající rychlostí posuvu zvětšuje.

Hodnoty parametru R_{Sm} se pohybují pod hranicí 0,25 mm. Výjimkami jsou hodnoty obdržené v hloubkách řezu 4, 7 a 9 mm, kde dochází k přechodu přes tuto mez.

Vzorek č. 5 – $v_p = 250 \text{ mm/min}$



Obr. 5.18 Grafické znázornění závislosti vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 250 \text{ mm/min}$ (vzorek č. 5)

Ze závislosti parametru R_a uvedeného na obr. 5.18 je již u tohoto vzorku možné vyčíst určité změny. Po přechodu iniciační zóny (nárůst následovaný poklesem hodnot) jeho velikost osciluje pod hranicí 4 μm až do hloubky řezu přibližně 6,5÷7 mm. Od ní má téměř ryze stoupající charakter. Společně s faktem, že se již na povrchu vzorku začínají objevovat velmi mělké rýhy, lze usuzovat na začátek rýhované zóny. Obdobné navyšování hodnot je možné pozorovat také u parametrů R_q , R_p , R_v i R_{Sm} .

Jak uvádí literární zdroje (2, 43 a další), v rýhované zóně dochází převážně k deformačnímu opotřebením. Začínají se objevovat větší mikroporuchy materiálu způsobené změnou tlaku AWJ a ztrátou kinetické energie.

Mezi touto a hladkou zónou se nachází zóna přechodová, jež se vyznačuje střídavým řezným a deformačním opotřebením, jejichž účinek se mění v závislosti na čase, hloubce řezu a dalších parametrech. Důsledkem toho je také obtížné stanovení jejich přesných hranic. Stejně jako iniciační i přechodová zóna není v dnešní době zcela dobře prozkoumanou oblastí. Z těchto důvodů není v této práci přechodová zóna uvažována.

Závislost parametru R_{sk} je velmi podobná jako u vzorku č. 4. Povrch je tvořen převážně hlubšími a členitějšími rýhami. Výjimku tvoří jen oblasti 2 globálních maxim, jež se nachází v hloubce řezu 3,5 a 5 mm a svojí velikostí překračují nulovou hranici. V blízkých okolích těchto 2 maxim lze předpokládat vyšší počet členitějších výstupků, jejichž výšky převládají nad hloubkami prohlubní. Tomu odpovídá i to, že hodnoty parametru R_v v těchto oblastech převyšují hodnoty parametru R_p .

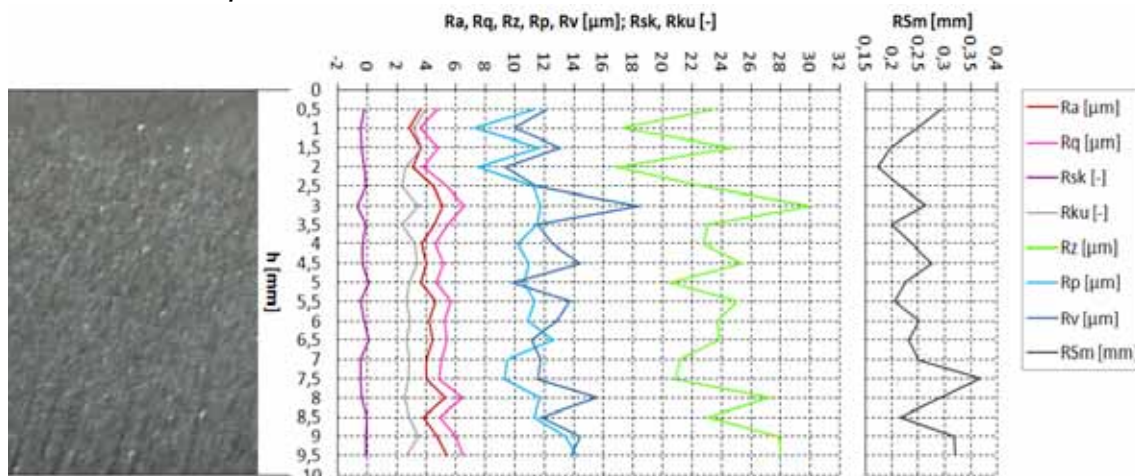
Průběh závislosti parametru R_{ku} osciluje až do hloubky 6,5 mm v okolí hodnoty 3, tzn., že se střídají zaoblená zakončení výstupků a prohlubní se zakončeními ostrými. Od této hloubky řezu se hodnoty R_{ku} pohybují již pod touto hranicí, což značí ryze zaoblení prvků profilu a jeho menší členitost.

Na obr. 5.18 je možné pozorovat oscilaci hodnot parametru R_z o velké amplitudě a malé frekvenci. Přičemž s přibývajícím hloubkou dochází k výkyvům k vyšším hodnotám. Maximální velikosti, které tento parametr nabývá, jsou alokovány přibližně v hloubkách 6 a 9,5 mm, tedy před začátkem rýhované zóny a ve výstupní oblasti.

Při sledování závislostí parametrů R_v a R_p je možné si všimnout, že i při této rychlosti v celé výšce vzorku stále dominují velikosti nejhlubších prohlubní nad velikostmi nejvyšších výšek výstupků. Jak již bylo ale zmíněno u parametru R_{sk} , v místech výskytu 2 globálních maxim tohoto parametru dochází k převýšení hodnot parametru R_p nad R_v .

Závislost parametru R_{Sm} osciluje přibližně do hloubky řezu 6,5 mm v rozsahu 0,15 až 0,27 mm. Od ní je znatelný její nárůst až k hodnotě 0,38 mm následovaný poklesem ve výstupní oblasti řezu.

Vzorek č. 6 – $v_p = 300$ mm/min



Obr. 5.19 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 300$ mm/min (vzorek č. 6)

Ze závislosti parametru Ra je možné vypočítat mírnou oscilaci hodnot mezi 3 a 4 μm do hloubky řezu přibližně 2 mm. Následuje nárůst hodnot až k 5 μm (v hloubce řezu 3 mm), poté pokles a jen mírné kolísání průběhu v okolí hodnoty 4 μm až do 7,5 mm výšky vzorku. Od této hodnoty se toto mírné kolísání mění na kolísání o větší amplitudě. Na povrchu vzorku jsou od této výšky již znatelné hlubší prohlubně (viz. obr. 5.19).

Vyhodnocením závislosti parametru Rsk je obdržen obdobný výsledek jako u vzorku č. 5. Pouze dvě hodnoty v celé výšce vzorku přesahují nulovou mez, a to přibližně v polovině výšky vzorku (5 mm) a v hloubce řezu 6,5 mm. V těchto oblastech dochází k nárůstu počtu větších a členitějších výstupků, které převažují nad prohlubněmi. Z porovnání závislostí parametrů Rp a Rv je zřejmé, že jejich maximální výšky dosahují vyšších hodnot než maximální výšky prohlubní ($Rp > Rv$). Z globálního hlediska má však i tento povrch dobré nosné vlastnosti.

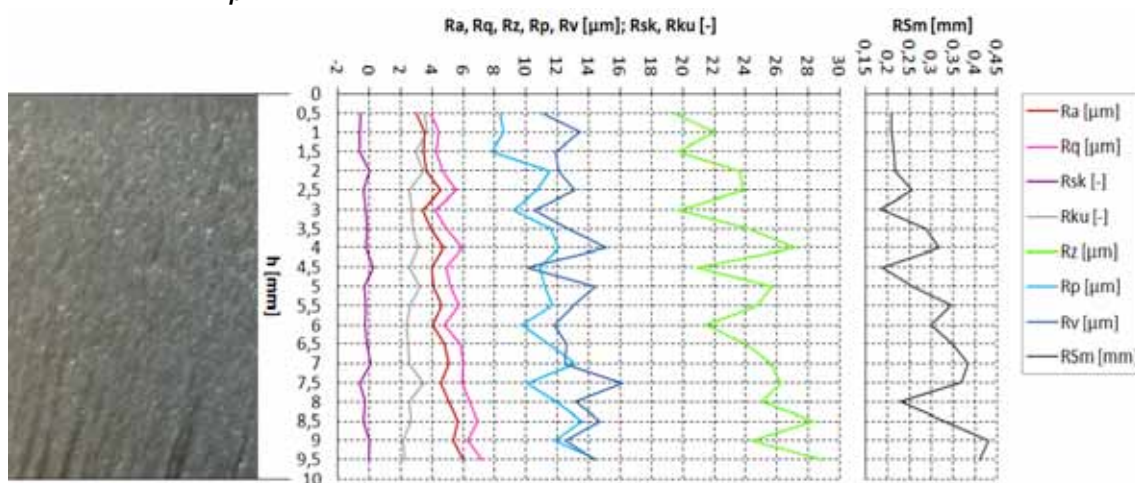
Hodnoty závislosti parametru Rku zpočátku oscilují opět okolo hodnoty 3 (střídání zaoblených zakončení výstupků a prohlubní se zakončeními ostrými), a to přibližně až do poloviny výšky vzorku, od které dochází k jejich ustálení pod touto hodnotou – zakončení jak výstupků, tak prohlubní je oblejší a profil se vyznačuje menší členitostí. K jedinému výkyvu nad hodnotu 3 poté dochází pouze v hloubce řezu 9 mm.

Při pozorování průběhu hodnot parametru Rz je možné si všimnout jeho značné oscilace o větší amplitudě v počáteční fázi (do výšky 2,5 mm), která se skokem mění v oscilaci o amplitudě nižší, ale zato okolo vyšší střední hodnoty. Ač je maximální hodnoty tohoto parametru dosaženo již v hloubce 3,5 mm (30 μm), z obr. 5.19 je zřejmé, že jeho průměrná hodnota se s přibývajícím hloubkou řezu zvětšuje.

Z průběhů závislostí parametrů R_p a R_v je zřejmé jejich větší přiblížení oproti předchozím vzorkům – maximální hodnoty velikostí výstupků se zvětšují.

Závislost parametru RSm po počátečním nárůstu a poklesu jen mírně osciluje mezi hodnotami 0,20 a 0,27 mm až do hloubky řezu 7,5 mm, od níž dochází k výraznějšímu nárůstu velikosti její amplitudy a k výkyvům k vyšším hodnotám (jak již bylo uvedeno, od této hloubky jsou na povrchu vzorku znatelné hlubší rýhy).

Vzorek č. 7 – $v_p = 350$ mm/min



Obr. 5.20 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 350$ mm/min (vzorek č. 7)

Ze závislosti parametru Ra , Rq , Rz , Rp nebo Rv na obr. 5.20 není již zcela zřejmý nárůst hodnot v iniciační zóně. To ovšem neznamená, že by se na vzorku č. 7 (a dalších) tato oblast nevyskytovala, jen je již natolik malá, že z uvedeného grafického znázornění ji nelze stanovit. Všeobecně platí, že se vzrůstající rychlostí posuvu dochází ke zmenšování tohoto pásma v důsledku menšího deformačního přetvoření, které jsou schopné abrazivní částice vytvořit za kratší časový úsek. K dosažení uspokojivějších výsledků by bylo nutné buď zjemnit počáteční rozdělení měřících linií například po kroku 0,25 mm, nebo k měření použít jiné metody – viz. podkapitola 4.2 nebo také literatury (2, 33).

Z obr. 5.20 je možné vyčíst, že hodnoty parametru Ra oscilují okolo hodnoty 4 μm přibližně do hloubky řezu 6 mm, od které je již dobře zřetelný vzrůstající charakter této závislosti. Na povrchu vzorku se začínají tvořit mělké rýhy, jejichž hloubka stoupá se vzrůstající hloubkou řezu.

Průběh hodnot parametru Rsk je obdobný jako u vzorku č. 5 a 6. Hodnoty tohoto parametru přesahují v celé výšce vzorku pouze 2x nulovou hranici (hloubka řezu 4,5 a 7 mm), přičemž od 9 mm výšky vzorku leží na ní.

Závislost parametru Rku osciluje přibližně do poloviny výšky vzorku okolo hodnoty 3. Poté její hodnoty klesají a ustalují pod tuto hodnotu.

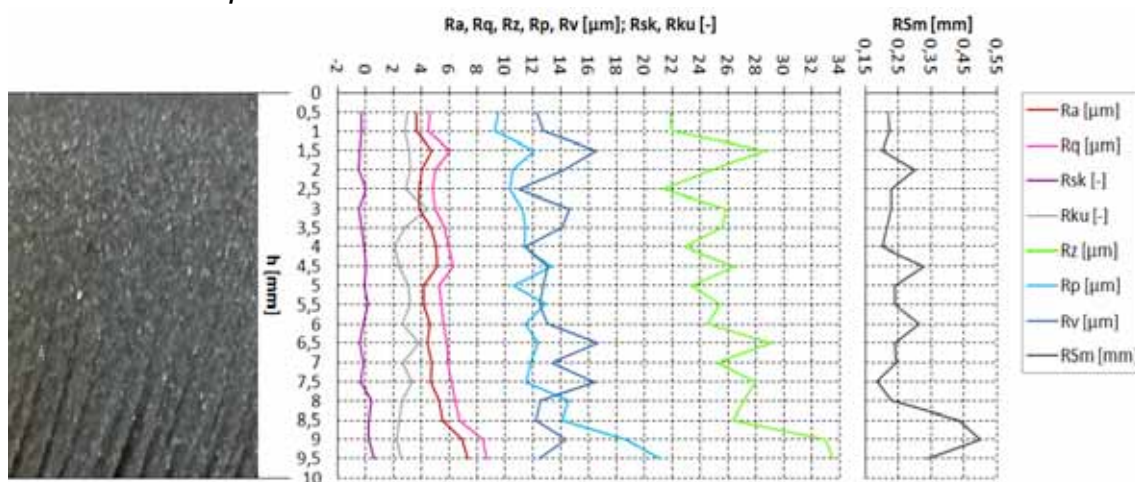
K jedinému výkyvu nad tuto mez poté dochází pouze v hloubce řezu 7,5 mm. Závěr pro tuto závislost je proto stejný jako v případě vzorku č. 6.

Oscilace hodnot parametru Rz s přibývajícím hloubkou řezu sice nemění výrazně svoji frekvenci, ale střední hodnota okolo které probíhá, se zvětšuje.

I při této rychlosti posuvu dominují v celé výšce vzorku velikosti nejhlubších prohlubní (Rv) nad velikostmi nejvyšších výšek výstupků (Rp). Výjimkou jsou pouze hloubky řezu 4,5 a 7 mm, kde dochází k převýšení hodnot parametru Rp nad Rv . V těchto hodnotách, stejně jako u předchozího vzorku, leží 2 zmíněná globální maxima parametru Rsk , která překračují nulovou mez.

Hodnoty parametru RSm do hloubky řezu 1,5 mm jen mírně narůstají. Dále začínají oscilovat, přičemž s přibývajícím hloubkou dochází ke zvyšování amplitudy a ke snižování frekvence této oscilace.

Vzorek č. 8 – $v_p = 400$ mm/min



Obr. 5.21 Grafické znázornění závislosti vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 400$ mm/min (vzorek č. 8)

Z průběhu parametru Ra je možné vyzorovat jeho postupný nárůst až k hodnotě 4,5 μm po překročení hranice iniciační zóny, kolísání okolo této hodnoty jen s malou amplitudou a frekvencí v hladké zóně (do hloubky řezu 5 mm) a poté postupné narůstání na maximální hodnotu 7 μm v zóně rýhované.

Hodnoty závislosti parametru Rsk jsou v celé výšce vzorku ve velmi blízkém okolí nulové hranice, přičemž již od hloubky řezu 4,5 mm dochází k jejímu překročení a postupné oscilaci kolem ní, která je přibližně od 8 mm výšky vzorku zakončena v kladné části. Lze z toho usoudit, že profil drsnosti povrchu je tvořen jak prohlubněmi, tak výstupky, jejichž hloubky/výšky nedosahují již tak velkých rozdílů. Jak plyne z definice Rsk , je-li hodnota tohoto parametru nulová i posunutí funkce hustoty pravděpodobnosti je nulové, tzn., že se jedná o Gaussovo normální rozložení. Od hloubky řezu 8 mm je ale $Rsk > 0$, což odpovídá většímu množství vyšších a členitějších výstupků. Jak je vidět

z průběhu závislostí parametrů R_p a R_v , maximální velikosti výstupků jsou od této hodnoty větší než maximální velikosti prohlubní ($R_p > R_v$).

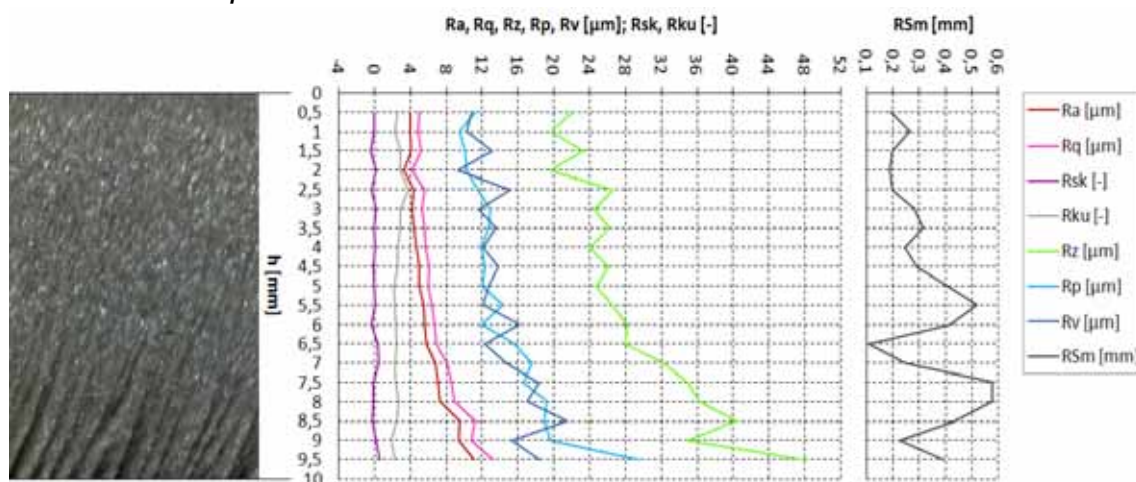
Závislost parametru R_{ku} osciluje do 7,5 mm výšky vzorku okolo hranice 3, přičemž jak její amplituda, tak i frekvence se s přibývajícím hloubkou mění. Od této hloubky jsou již všechny hodnoty, kterých parametr R_{ku} nabývá pod touto hranicí. Nelze si nepovšimnout toho, že nejvyšších hodnot nabývá tento parametr v místech největších prohlubní ($R_{sk} < 0$) a naopak nejnižších v místech největších výstupků. Z toho lze odvodit, že v oblastech výskytu větších a členitějších rýh jsou tyto rýhy ostře zakončené, zatímco v oblastech s větší četností vyšších a členitějších výstupků jsou tyto výstupky s oblými vrchy.

Průběh parametru R_z je obdobný jako v případě parametru R_a , jen jeho oscilace probíhá při vyšších hodnotách a s větší amplitudou a frekvencí.

Při hodnocení závislostí parametrů R_p a R_v je zřejmé jejich přibližování a částečné prolínání, které, jak již bylo zmíněno, ve výstupní oblasti vyúsťuje nárůstem maximálních hodnot výstupků nad maximální hodnoty prohlubní.

Z grafu na obr. 5.21 znázorňujícím závislost parametru R_{Sm} je zřejmá jeho oscilace v rozsahu hodnot 0,20 a 0,32 mm až do hloubky řezu 7,5 mm. Od ní dochází k jeho nárůstu až k hodnotě 0,50 mm.

Vzorek č. 9 – $v_p = 450$ mm/min



Obr. 5.22 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 450$ mm/min (vzorek č. 9)

Závislost parametru R_a zobrazená na obr. 5.22 vykazuje jen mírnou oscilaci okolo hodnoty 4 μm do hloubky řezu 2,5 mm, od které má již ryze vzrůstající charakter.

Průběh hodnot parametru R_{sk} v tomto případě osciluje okolo nulové hranice v celé výšce vzorku, přičemž nejvyšších kladných hodnot dosahuje v hloubce řezu 9,5 mm. Z toho vyplývá, že povrch vzorku je tvořen jak menším počtem prohlubní, tak menším počtem výstupků. Z hodnocení závislosti parametru R_{ku} také plyne, že i jejich členitost je menší a jak zakončení prohlubní,

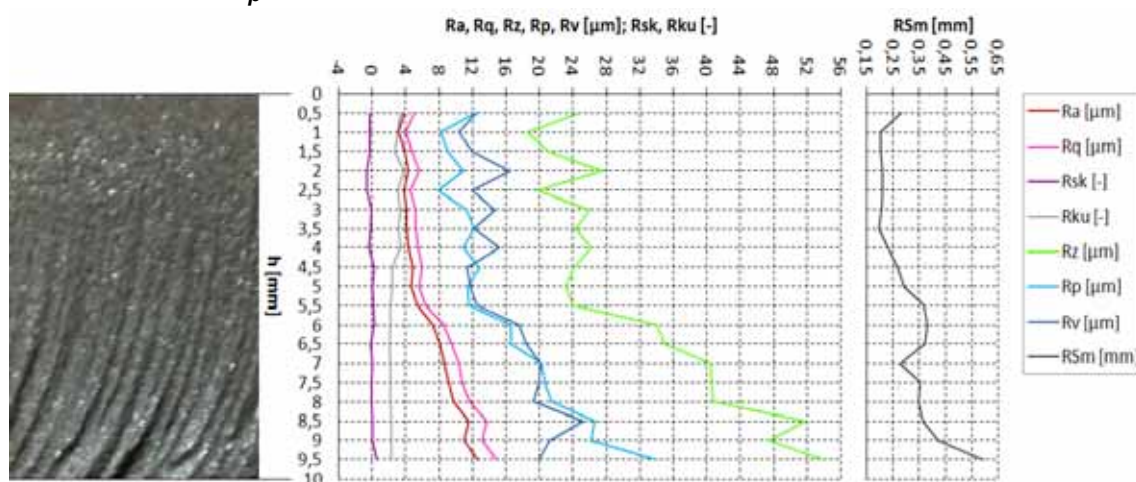
tak zakončení výstupků je oblé – $Rku < 3$. Jedinou výjimku tvoří okolí hloubky řezu 2,5 mm, kde se vyskytují ostřeji zakončené prohlubně – $Rsk < 0$ a $Rku > 3$.

Hodnoty závislosti parametru Rz zpočátku oscilují mezi hodnotami 20 a 23 μm (hladká zóna). V hloubce řezu 2,5 mm dochází k nárůstu a oscilaci mezi hodnotami 24 a 26 μm (přechodová zóna) a od hloubky 5 mm má tato závislost již ryze rostoucí charakter (rýhovaná zóna).

Z hodnocení závislostí parametrů Rp a Rv je zřejmé jejich prolínání v celé výšce tohoto vzorku, přičemž maximální hodnoty výstupků dosahují svých nejvyšších hodnot v oblastech lokálních maxim závislosti Rsk a maximální hodnoty prohlubní dosahují svých nejvyšších hodnot v oblastech lokálních minim této závislosti.

Hodnoty závislosti RSm zpočátku oscilují s malou amplitudou a frekvencí v rozsahu hodnot 0,19 a 0,32 mm. To se děje přibližně do hloubky řezu 4,5 mm, od které dochází ke zvýšení amplitudy – kolísání od 0,1 do 0,58 mm.

Vzorek č. 10 – $v_p = 500$ mm/min



Obr. 5.23 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 500$ mm/min (vzorek č. 10)

Z grafického znázornění na obr. 5.23 je vidět jen mírná oscilace závislosti parametru Ra okolo hodnoty 4 μm do hloubky řezu 2,5 mm, od které již dochází k pozvolnému nárůstu hodnot. Ten se přibližně v hloubce 5 mm mění na strmější.

Závislost Rsk zpočátku nabývá záporných hodnot (větší počet hlubších členitějších prohlubní). Od hloubky řezu 4,5 mm dochází k mírné oscilaci okolo nulové hranice, která je zakončena maximální kladnou hodnotou tohoto parametru v hloubce řezu 9,5 mm.

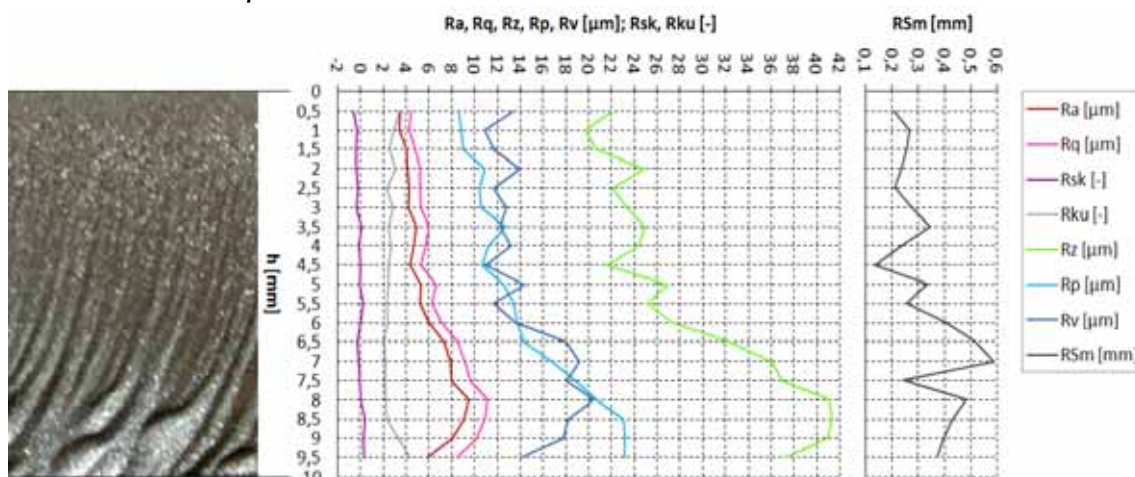
Z posouzení závislosti parametru Rku , jehož hodnoty se pohybují nad mezí 3 až do hloubky řezu 4 mm a od této hloubky dále pod touto hodnotou, lze vyvodit, že dna prohlubní jsou členitější s ostrými zakončeními, zatímco vrcholky výstupků jsou méně členité se zakončeními oblými.

Hodnoty závislosti parametru Rz zpočátku oscilují mezi hodnotami 19 a 27 μm (hladká zóna). V hloubce řezu 3 mm dochází k nárůstu a oscilaci mezi hodnotami 23 a 26 μm (přechodová zóna) a od hloubky 5 mm má již tato závislost převážně rostoucí charakter (rýhovaná zóna).

Z hodnocení závislostí parametrů Rp a Rv je zřejmé jejich prolínání od hloubky řezu 4,5 mm, kdy dochází také k nárůstu počtu členitějších výstupků (Rsk kolísá okolo nulové hranice). Od hloubky řezu 7,5 mm, kdy dochází k nárůstu počtu výstupků ($Rsk > 0$) dominují maximální hodnoty výšek výstupků nad maximálními hodnotami hloubek prohlubní ($Rp > Rv$).

Závislost parametru RSm vykazuje po počátečním navýšení a poklesu téměř lineární průběh nad hodnotou 0,2 mm až do hloubky řezu 3,5 mm. Od ní již dochází k postupnému navyšování až na maximální hodnotu 0,62 mm naměřenou ve spodní části vzorku.

Vzorek č. 11 – $v_p = 550 \text{ mm/min}$



Obr. 5.24 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 550 \text{ mm/min}$ (vzorek č. 11)

Ze závislosti parametru Ra uvedeného na obr. 5.24 je u tohoto vzorku v porovnání s předchozími možné vyzorovat změny ve výstupní oblasti. Postupný nárůst hodnot se přibližně od hloubky řezu 4,5 mm mění ve strmější a při překročení 8 mm výšky vzorku začíná strmě klesat. Obdobný trend lze vyzorovat také u závislostí parametrů Rq , Rz , Rv a RSm .

Jediným vysvětlením, které přichází v úvahu je přítomnost hlubších žlábků, které při této rychlosti vznikají právě ve výstupní oblasti. Ačkoli z makroskopického hlediska jejich výskyt snižuje kvalitu řezné plochy, z hlediska mikroskopického je povrch těchto žlábků hydroabrazivně obroben na stupeň kvality vyšší než např. rýhy v této zóně v případě předchozího vzorku. Přítomnost těchto žlábků zlepšuje drsnost povrchu v této oblasti tím, že dochází ke snížení zmíněných parametrů.

Stejně jako u předchozího vzorku nabývá zpočátku závislost R_{sk} záporných hodnot (větší počet členitějších prohlubní). Od hloubky řezu 3,5 mm dochází k mírné oscilaci okolo nulové hranice, která přechází přibližně od 8 mm výšky vzorku do kladných hodnot. Zmíněné žlábků v této oblasti jsou tedy tvořeny převážně členitějšími výstupky.

Z posouzení závislosti parametru R_{ku} , jehož hodnoty se pohybují téměř v celé výšce vzorku pod hodnotou 3, vyjma začátku a konce této závislosti, lze vyvodit, že pouze v oblasti iniciační zóny (hloubka řezu 0,5 mm) je povrch tvořen prohlubněmi ($R_{sk} < 0$) a ve výstupní oblasti (od hloubky řezu 9 mm) výstupky ($R_{sk} > 0$) s ostrými zakončeními. Zbytek povrchu je tvořen jak prohlubněmi, tak výstupky, jejichž zakončení jsou oblá ($R_{ku} < 3$).

Průběh hodnot parametru R_z osciluje se zvyšující se střední hodnotou přibližně do hloubky řezu 5,5 mm. Od ní strmě stoupá až do 8 mm výšky vzorku, v 8,5 mm dosahuje své maximální hodnoty ($R_z = 41 \mu\text{m}$) a poté klesá.

Hodnocením závislosti parametrů R_p a R_v je obdržen obdobný závěr jako u vzorku č. 10. Jediný rozdíl je v tom, že od hloubky řezu 8 mm má závislost parametru R_v ryze klesající charakter. Jak již bylo zmíněno, povrch žlábků v této oblasti je tvořen převážně výstupky, jejichž maximální výšky dominují nad maximálními hloubkami prohlubní ($R_p > R_v$).

Z grafu na obr. 5.21 znázorňujícím závislost parametru R_{Sm} je zřejmá jeho oscilace posouvající se s přibývajícím hloubkou řezu k vyšším hodnotám. Od 8 mm výšky vzorku dochází k poklesu hodnot tohoto parametru.

Závěry

Z dílčích závěrů popsaných u každého vzorku je nyní možné specifikovat závěry z globálního hlediska, a to jak se mění vybrané parametry drsnosti povrchu v závislosti na hloubce řezu při vzrůstající rezné rychlosti.

Jak je vidět z obr. 5.14 – 5.24, při narůstající hloubce řezu a zvyšující se rychlosti dochází ke zhoršování jakosti povrchu, a to nejen z pohledu makroskopického, kdy se již na povrchu vzorků začínají objevovat okem viditelné rýhy (v případě materiálu zvoleného pro tuto studii je to přibližně od rychlosti posuvu $v_p = 250 \text{ mm/min}$), ale také z hlediska mikroskopického. Z tohoto pohledu dochází ke změnám jakosti povrchu již daleko dříve – v podstatě s každým navýšením rychlosti posuvu. Nejde ovšem jen o změny výškových či délkových parametrů drsnosti, nýbrž také o změny skladby profilu drsnosti povrchu, tj. změny rozložení, členitosti a výskytu jak výstupků, tak prohlubní, jimiž je tento profil tvořen.

Při rychlostech posuvu $v_p = 50 \text{ mm/min}$ až $v_p = 300 \text{ mm/min}$ dochází ve vrchní části těchto vzorků ke zřetelnému nárůstu nejen výškových parametrů drsnosti R_a , R_q , R_z , R_p , R_v , ale také parametru délkového R_{Sm} . Jak již bylo zmíněno, ve vrchní části řezu se u každého vzorku nachází iniciační zóna.

ve které k těmto nárůstům dochází. Od rychlosti posuvu $v_p = 350$ mm/min již tato zóna není velmi dobře zřetelná. To ovšem neznámá, že by se tato oblast s přibývajícím rychlostí posuvu vytrácela, nýbrž dochází k jejímu zmenšování v důsledku kratšího časového úseku, jež paprsek setrvává v jednom místě.

Z průběhů závislostí jednotlivých parametrů profilu drsnosti lze usuzovat, že až do rychlosti posuvu $v_p = 200$ mm/min se povrchy vzorků skládají pouze z této zóny a ze zóny hladké (ani z hlediska makroskopického nejsou na těchto vzorcích pozorovatelné výrazné rýhy). Po překročení hranice iniciační zóny dochází k oscilaci hodnot závislostí parametrů R_a , R_q , R_z , R_p i R_v bez výraznějšího zvýšení. V případě parametru R_a není ani u jednoho vzorku překročena hranice $5 \mu\text{m}$, v případě R_z hranice $27 \mu\text{m}$. Hodnoty parametru R_{Sm} ovšem se zvyšující se hloubkou řezu a narůstající rychlostí posuvu nabývají vyšších hodnot. Zatímco u vzorku č. 1 dochází jen k mírnému rozptylu mezi $0,15$ a $0,25$ mm, u vzorku č. 4 je již tento rozptyl mezi hodnotami $0,15 \pm 0,35$ mm. Ze závislostí parametrů R_{ku} a R_{sk} je zřejmé, že profil drsnosti povrchu je u těchto vzorků v celé jejich výšce tvořen především hlubšími a členitějšími rýhami, které jsou ostře zakončeny ($R_{sk} < 0$, $R_{ku} > 3$). Přičemž nejhlubší rýhy lze nalézt na povrchu vzorku č.1. S rostoucí rychlostí posuvu se jak jejich hloubky, tak členitost zmenšují. Ze závislostí parametrů R_p a R_v je také znatelné přibližování těchto závislostí, což značí, že maximální hloubky prohlubní (R_v) i maximální výšky výstupků (R_p) se se vzrůstající rychlostí posuvu začínají vyrovnávat.

Od rychlosti posuvu $v_p = 250$ mm/min se na površích vzorků vyskytuje rozpoznatelné rýhování ve spodní části řezu – vznik rýhované zóny, které se s přibývajícím rychlostí posuvu posouvá výše k horní ploše vzorků. Na základě grafických znázornění závislostí parametrů drsnosti na obr. 5.18 – 5.24 je tedy možné potvrdit, že i hladká zóna se s narůstající rychlostí posuvu zmenšuje, zatímco velikost zóny rýhované roste.

Od již zmíněné rychlosti posuvu $v_p = 250$ mm/min do rychlosti posuvu $v_p = 350$ mm/min je již znatelnější vzrůstající charakter závislostí výškových parametrů R_a , R_q a R_z , a to především ve spodní části vzorků, tedy v rýhované zóně. V případě parametru R_a není ani u jednoho vzorku překročena hranice $6 \mu\text{m}$, v případě R_z hranice $30 \mu\text{m}$. Závislosti parametru R_{Sm} dosahují v nižších hloubkách řezu obdobných hodnot jako v případě prvních 4 vzorků, zatímco v rýhované zóně je jejich nárůst rapidnější a se zvětšující se rychlostí posuvu roste i jejich maximální hodnota v této oblasti. Ze závislostí parametrů R_{ku} a R_{sk} je v případě těchto rychlostí posuvů zřejmé, že profil drsnosti povrchu je i u těchto vzorků v celé jejich výšce tvořen převážně hlubšími a členitějšími prohlubněmi, jejichž zakončení jsou ostrá převážně v horní polovině hloubky řezu ($R_{sk} < 0$, $R_{ku} > 3$). Z obr. 5.18 – 5.20 je možné ale také vyzorovat nárůst četnosti výstupků oproti počtu prohlubní ve spodní části řezu ($R_{sk} = 0$

oproti $R_{sk} < 0$ jak je tomu v případě 4 prvních vzorků). Tyto výstupky jsou převážně oble zakončeny ($R_{ku} < 3$). Při sledování závislosti parametrů R_p a R_v je možné říci, že i nadále dochází k jejich přibližování a postupnému prolínání.

Při dalším zvyšování rychlosti posuvu až na hodnotu $v_p = 550$ mm/min je velmi dobře znatelný vzrůstající charakter závislosti výškových parametrů R_a , R_q , R_z a také R_p a R_v , a to především ve spodní části vzorků, tedy v rýhované zóně. Jedinou výjimku tvoří jen vzorek č. 11, který byl vytvořen při nejvyšší rychlosti posuvu. Jak již bylo zmíněno, u tohoto vzorku došlo k vytvoření „žlábků“ ve spodní části řezu, které mají lepší charakteristiky drsnosti povrchu, a tudíž ve spodní části řezu tohoto vzorku po nárůstu hodnot uvedených parametrů dochází k jejich poklesu. Výjimku tvoří parametr R_p , který i nadále vzrůstá. Hodnoty parametru R_{Sm} i v případě těchto rychlostí dosahují nižších hodnot ve vrchních částech řezů (ty jsou již ovšem vyšší než u předchozích vzorků) a s postupným přibýváním hloubky dosahují hodnot vyšších. Přičemž nejvyšší hodnoty parametru R_{Sm} je dosaženo při rychlosti $v_p = 500$ mm/min v hloubce řezu 9,5 mm. Při hodnocení skladby a špičatosti profilu drsnosti pomocí parametrů R_{sk} a R_{ku} lze konstatovat, že při těchto rychlostech se vyskytují členitější a větší prohlubně především v horních částech řezů. Velikost těchto oblastí se s narůstající rychlostí posuvu zmenšuje. Tyto prohlubně jsou převážně ostře zakončeny ($R_{ku} > 3$). Ve spodních částech řezu se střídají oblasti větší četnosti výskytu prohlubní s oblastmi četnějších výskytů výstupků, přičemž oba tyto elementy jsou již oble zakončeny ($R_{ku} < 3$). Výstupní oblast je u těchto vzorků zakončena četnějším výskytem zaoblených výstupků ($R_{sk} > 0$, $R_{ku} < 3$). Výjimku tvoří opět vzorek č. 11, kde jsou tyto výstupky zakončeny ostře ($R_{ku} > 3$). O zvýšeném počtu výstupků také do jisté míry vypovídá parametr R_p , jehož závislost se již častěji prolíná se závislostí parametru R_v a ve výstupní oblasti dochází k navýšení jeho hodnot nad hodnoty tohoto parametru.

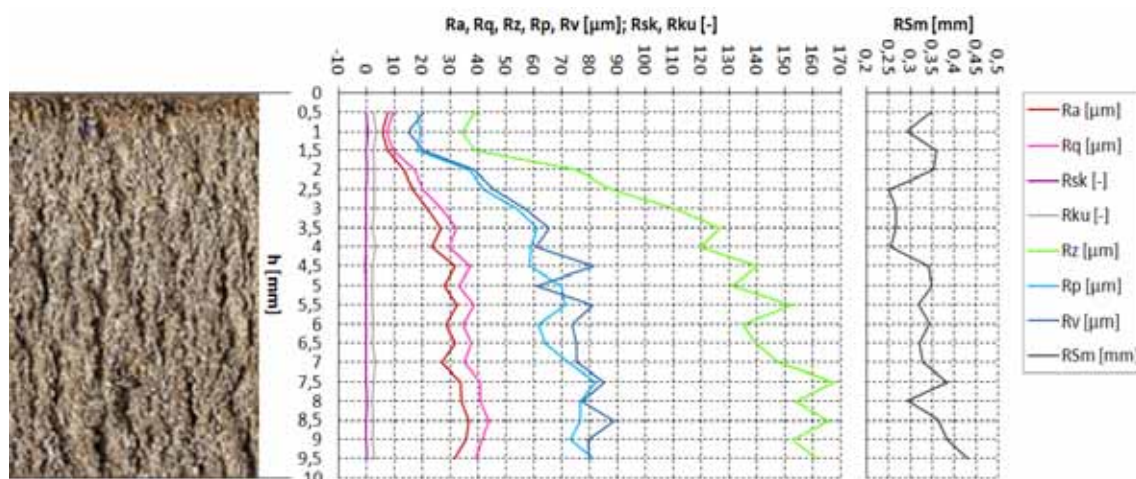
5.6 Hodnocení parametrů profilu drsnosti povrchů vytvořených užitím laseru

Obdobně jako v případě AWJ, je i u laseru provedeno vyhodnocení vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu v závislosti na hloubce řezu h pro různé rychlosti posuvu řezné hlavy v_p . Jelikož se ale jedná o předběžný test, k dispozici jsou pouze 2 vzorky.

Vzorek č. 1 – $v_p = 450$ mm/min

Z průběhu parametru R_a graficky znázorněného na obr. 5.25 je možné v počáteční fázi vyzorovat obdobný vývoj jako u AWJ. Do 1,5 mm hloubky

řezu dochází jen k mírnému zakolísání jeho hodnot. Od této hloubky dále má již závislost vzrůstající charakter, přičemž své maximální hodnoty dosahuje v hloubce řezu 8,5 mm a ke spodku vzorku poté klesá. Stejný vývoj jako u parametru R_a lze nalézt také u parametrů R_q , R_p , R_v a R_z .



Obr. 5.25 Grafické znázornění závislosti vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 450$ mm/min (vzorek č. 1)

Hodnoty závislosti parametru R_{sk} jsou v celé výšce vzorku ve velmi blízkém okolí nulové hranice. Dochází u nich jen k velmi mírné oscilaci nad a pod tuto hodnotu. Z toho je možné vyvodit, že šikmost profilu povrchu při této rychlosti není nijak výrazná. Na povrchu vzorku nepřevládají ani místa s vyšším výskytem výstupků, ani s vyšším výskytem prohlubní.

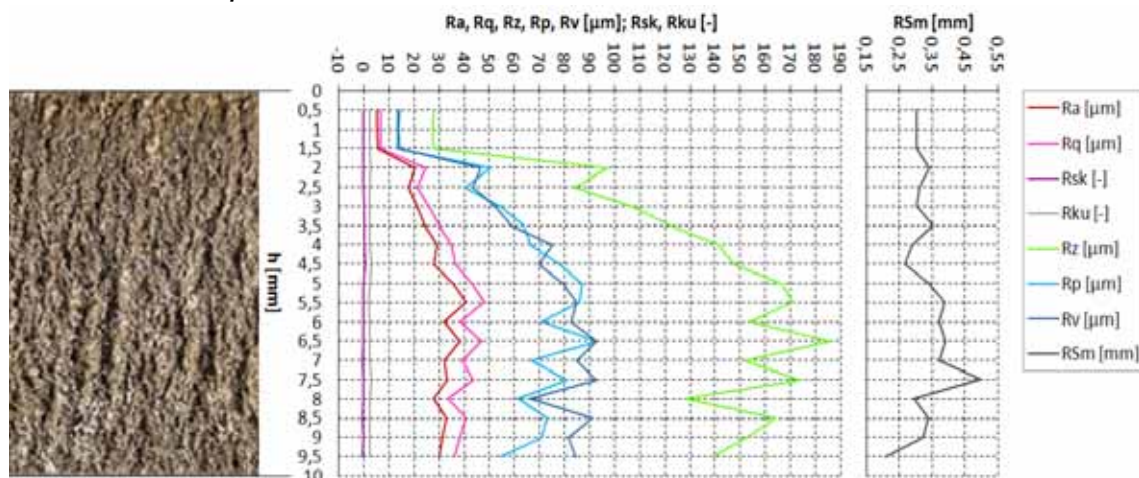
Závislost parametru R_{ku} leží, až na jedinou výjimku v hloubce řezu 1 mm, pod hranicí hodnoty 3. Jak zakončení výstupků, tak prohlubní jsou tedy zaoblená a profil drsnosti povrchu se vyznačuje menší členitostí.

Parametr R_z vykazuje velmi podobné chování jako parametr R_a . Po počáteční mírné oscilaci hodnot do hloubky řezu 1,5 mm následuje prudký nárůst, který se s přibývajícím hloubkou mění v pozvolnější a po dosažení maximální hodnoty v hloubce řezu 7,5 mm začíná pomalu klesat.

Z vyobrazených závislostí parametrů R_p a R_v lze vyčíst, že přibližně do 4 mm výšky vzorku nejsou mezi maximální velikostí výstupků a prohlubní výrazné rozdíly. Po překročení této hloubky je však vidět zřetelnější oscilace těchto parametrů, přičemž maximální velikosti výstupků (R_p) v převážné většině případů dominují nad maximálními velikostmi prohlubní (R_v).

Závislost parametru R_{Sm} do hloubky řezu 1,5 mm osciluje mezi hodnotami 0,3 a 0,35 mm. Od této hloubky začíná klesat a mezi hloubkami řezu 2,5 a 4 mm má téměř konstantní průběh. Z obr. 5.25 je také vidět, že přibližně do 4 mm výšky vzorku dochází k výraznému nárůstu uvedených parametrů výškových. Od 4 mm parametr R_{Sm} jen mírně osciluje a od hloubky řezu 8,5 mm narůstá až ke svému maximu.

Vzorek č. 2 – $v_p = 550$ mm/min



Obr. 5.26 Grafické znázornění závislostí vybraných parametrů profilu drsnosti povrchu na hloubce řezu h při rychlosti posuvu řezné hlavy $v_p = 550$ mm/min (vzorek č. 2)

Z průběhů parametrů drsnosti povrchu graficky znázorněných na obr. 5.25 je možné v počáteční fázi do hloubky řezu 1,5 mm vidět jejich obdobný vývoj jako u předchozího vzorku. Závislost parametru Ra je v této oblasti téměř konstantní a poté až do hloubky 5,5 mm, kde dosahuje své maximální hodnoty, výrazně narůstá. Od ní dochází k oscilaci hodnot tohoto parametru a pozvolnému poklesu.

Hodnoty parametru Rsk nabývají až do poloviny výšky vzorku pouze kladných hodnot a od ní až ke spodku jen mírně oscilují v záporné oblasti v blízkosti nulové hranice. Toto značí, že do poloviny výšky vzorku je profil drsnosti povrchu tvořen převážně větším počtem členitějších a vyšších výstupků, zatímco od ní hlouběji se začíná vyskytovat o něco větší počet hlubších prohlubní.

Závislost parametru Rku leží u tohoto vzorku v celé jeho výšce pod hranicí 3, z čehož vyplývá, že jak zakončení výstupků v první polovině vzorku ($Rsk > 0$), tak zakončení prohlubní v jeho druhé části ($Rsk < 0$) je zaoblené a profil drsnosti povrchu je méně členitý.

Parametr Rz vykazuje i v tomto případě velmi podobné chování jako parametr Ra . Jak již bylo zmíněno, i jeho průběh je do hloubky řezu 1,5 mm téměř konstantní. Od ní ale dochází k prudkému nárůstu jeho hodnot, a to až do 5,5 mm výšky vzorku. Následuje oscilace závislosti a její postupný pokles.

Z grafických znázornění závislostí parametrů Rp a Rv na obr. 5.26 lze vidět jejich vzájemné prolínání až do hloubky řezu 5,5 mm, které naznačuje, že až do této hloubky není rozdíl mezi maximální výškou výstupků a maximální hloubkou prohlubní nikterak velký. Zatímco od ní dále si parametr Rp zachovává oscilační charakter okolo hodnoty 88 μm a jeho hodnoty dominují nad hodnotami parametru Rv , velikost parametru Rv postupně klesá. To znamená,

že v této části vzorku maximální výšky výstupků oscilují bez klesajícího charakteru, zatímco maximální velikosti prohlubní se zmenšují.

Stejně jako závislosti výškových parametrů i závislost délkového parametru R_{Sm} má do hloubky řezu 1,5 mm téměř konstantní průběh. Od ní dále přibližně do poloviny výšky vzorku osciluje mezi hodnotami 0,25 a 0,35 mm (oblast nejvyššího nárůstu výškových parametrů), následuje vzrůst hodnot a jejich pokles ve výstupní oblasti, tj. asi od 8,5 mm ke spodku vzorku.

Závěry

Z uvedených hodnocení lze usoudit, že i u řezání laserovým paprskem se ve vrchní části řezu nachází obdoba iniciační zóny, která se vyskytuje u řezání AWJ. U laseru je tato zóna označována jako vstupní. Rozdílem ovšem je, že u AWJ v této zóně dochází k nárůstu hodnot parametrů drsnosti, zatímco u laseru je v této zóně drsnost povrchu nejlepší.

S přibývajícím hloubkou řezu je možné u obou vzorků najít i další zóny. Ihned za vstupní oblastí dochází k výraznému nárůstu hodnot parametrů R_a , R_q , R_z , R_p , R_v , který se mění v oscilaci a v oblasti výstupu v postupný pokles. Ze závislostí uvedených pro tyto 2 vzorky lze konstatovat, že s měnící se rychlostí posuvu se mění i velikosti těchto zón.

S přibývajícím hloubkou řezu dochází také k nárůstu hodnot parametru R_{Sm} . Ovšem u vzorku č. 1 nárůst pokračuje až k jeho spodku, zatímco u vzorku č. 2 závislost tohoto parametru ve výstupní oblasti postupně klesá.

Se vzrůstající rychlostí posuvu nabývají výškové parametry R_a , R_q , R_z , R_p , R_v vyšších hodnot. Obdobně tomu je i u délkového parametru R_{Sm} , který však mění svůj vývoj ve výstupní části. Z tak malého počtu vzorků ale nelze usuzovat, zdali i při dalším zvýšení rychlosti dochází ke snižování hodnot tohoto parametru v této oblasti.

Při zvýšení rychlosti posuvu ze 450 na 550 mm/min došlo také k nárůstu počtu výstupků oproti počtu prohlubní v první polovině hloubky řezu ($R_{sk} > 0$).

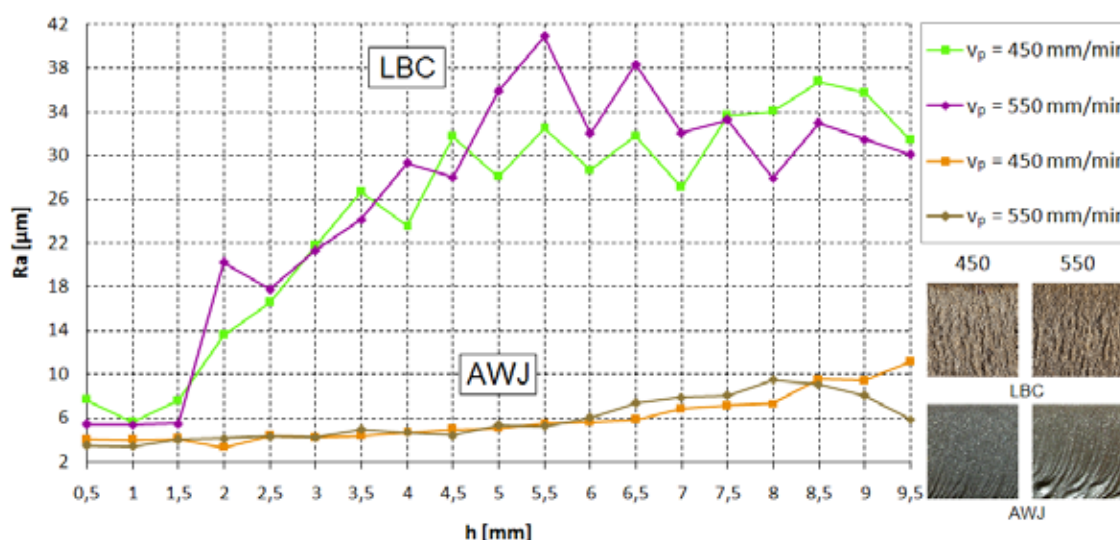
Špičatost profilu drsnosti povrchu udávaná parametrem R_{ku} se u obou vzorků, až na jednu jedinou výjimku z 38 měření, pohybuje pod hranicí 3, což značí, že členitost povrchu je menší a jak výstupky, tak prohlubně jsou oble zakončeny.

Podrobnější vyhodnocení jednotlivých vybraných parametrů drsnosti v závislosti na vzrůstající rychlosti posuvu není možné provést právě z důvodu velmi malého počtu vzorků, a tím i malého objemu potřebných dat. Jak je vidět z obr. 5.25 a 5.26 zaslouží si tato oblast svoji pozornost nejen z důvodu měnících se parametrů drsnosti R_a , R_z , R_p , R_v a R_{Sm} , jejichž změny jsou na první pohled zřetelné, ale také kvůli měnící se skladbě profilu drsnosti povrchu, která je udávána parametrem R_{sk} .

5.7 Porovnání výsledků obdržných jednotlivými nekonvenčními metodami dělení materiálu

Po vykonaných vyhodnoceních drsnosti povrchu pro technologie použité pro vytvoření zkušebních vzorků je nyní nasnadě provést také porovnání dosažené kvality vzorků, jež jimi byly nařezány při identických rychlostech posuvu řezacích hlav. Ostatní vstupní parametry byly během těchto zkoušek konstantní (viz. podkapitola 5.2 a 5.4, tab. 5.3 a tab. 5.4).

Komparace kvality povrchů je tedy provedena pro rychlosti posuvu $v_p = 350$ mm/min a $v_p = 450$ mm/min pomocí parametrů profilu drsnosti povrchu R_a , R_z a RSm , které jsou v současné době přednostními charakteristikami používanými ve strojírenské praxi.

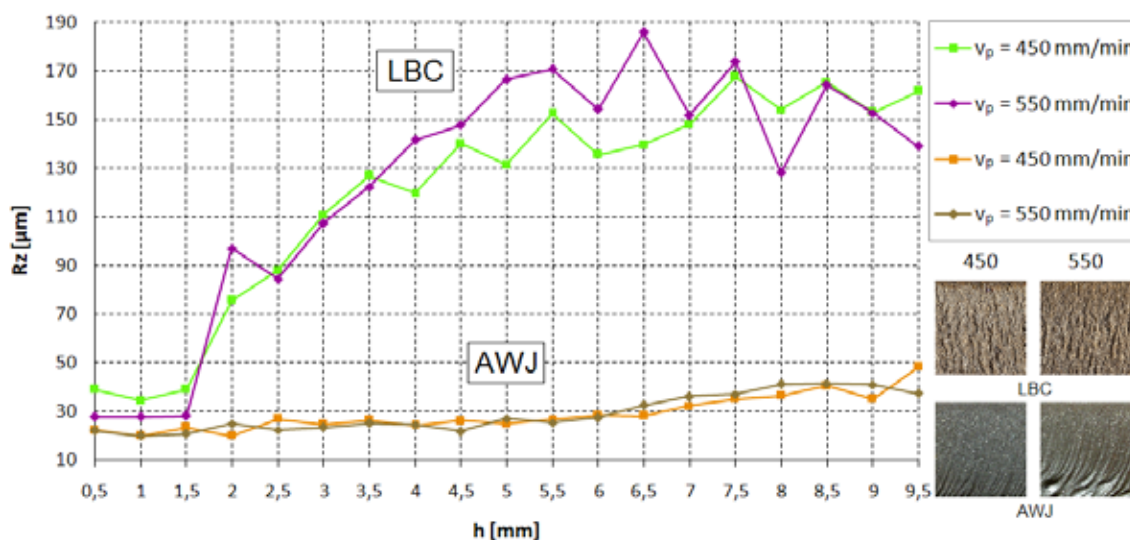


Obr. 5.27 Grafické znázornění průběhů parametru drsnosti povrchu R_a v závislosti na hloubce řezu h po hydroabrazivním a laserovém řezání při identických rychlostech posuvu řezací hlavy v_p

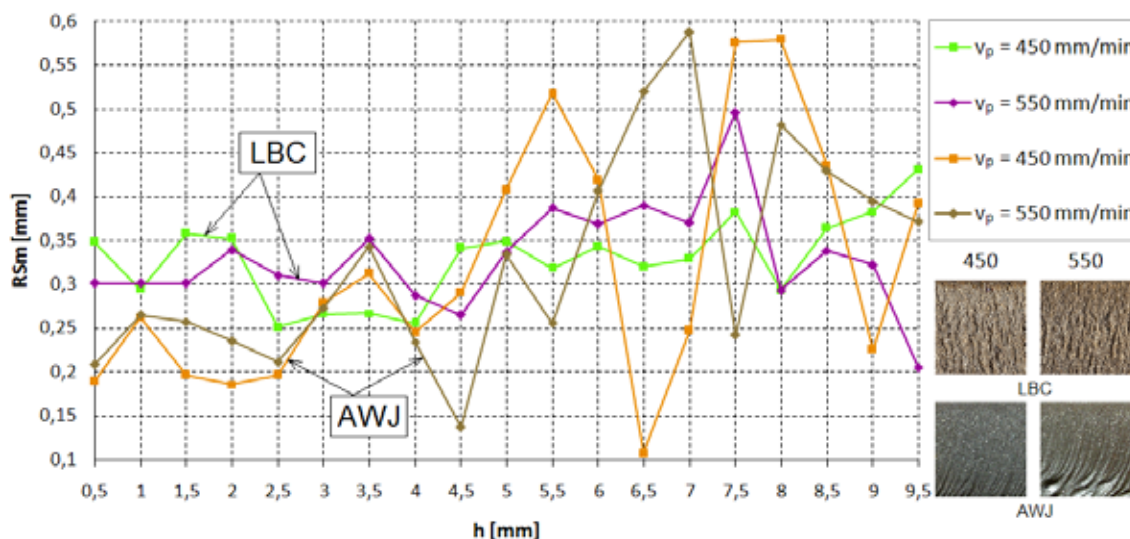
Jak je vidno z obr. 5.27, do hloubky řezu je velikost parametru R_a pro identické rychlosti v obou případech téměř 2x větší u vzorků vytvořených laserem oproti vzorkům vytvořených AWJ. S narůstající hloubkou se ovšem zvyšují i rozdíly a při rychlosti posuvu $v_p = 450$ mm/min dosahují hodnoty parametru R_a naměřené na vzorku vytvořeném laserem až trojnásobně vyšších hodnot, zatímco při rychlosti posuvu $v_p = 550$ mm/min jsou jeho hodnoty navýšeny až více než čtyřnásobně.

Při srovnání maximálních výšek profilu R_z (obr. 5.28) je trend jeho jednotlivých závislostí obdobný jako v případě parametru R_a . Zatímco do hloubky řezu jsou hodnoty u vzorků dělených laserem ani ne dvojnásobně vyšší než u AWJ, s přibývajícím hloubkou řezu se rozdíly mezi nimi rapidně zvyšují.

Při rychlosti posuvu $v_p = 450$ mm/min je u vzorku řezaného laserem dosaženo více než trojnásobného a při rychlosti posuvu $v_p = 550$ mm/min téměř pětinásobného navýšení hodnot tohoto parametru oproti AWJ.



Obr. 5.28 Grafické znázornění průběhů parametru drsnosti povrchu Rz v závislosti na hloubce řezu h po hydroabrazivním a laserovém řezání při identických rychlostech posuvu řezací hlavy v_p



Obr. 5.29 Grafické znázornění průběhů parametru drsnosti povrchu RSm v závislosti na hloubce řezu h po hydroabrazivním a laserovém řezání při identických rychlostech posuvu řezací hlavy v_p

U parametru RSm (obr. 5.29), hodnotícím délkový rozestup prvků profilu, je tomu ovšem již jinak. Při rychlosti posuvu $v_p = 450$ mm/min má vzorek vytvořený na AWJ prokazatelně nižší hodnoty jen do hloubky řezu 2,5 mm. Poté dochází k jejich navýšení a k oscilaci, jejíž amplituda se zvyšuje s přibývajícím

hloubkou řezu. Zatímco u vzorku děleného laserem je rozptyl hodnot parametru RSm mezi 0,25 a 0,44 mm, u vzorku děleného na zařízení AWJ je jejich rozptyl od 0,11 do 0,58 mm, tedy více jak dvakrát vyšší. U vzorků vyrobených při rychlosti posuvu $v_p = 550$ mm/min je vývoj parametru RSm obdobný. U vzorku řezaného AWJ nabývá tento parametr nižších hodnot, než byly obdrženy u vzorku vytvořeného laserem zhruba do 5,5mm výšky obrobku, avšak jejich oscilace je téměř dvakrát vyšší. Od této hloubky řezu dále zaznamenávají hodnoty RSm u obou vzorků vyšší rozptyl. Vzorek vytvořený na AWJ dosahuje vyšších hodnot než vzorek vytvořený laserem.

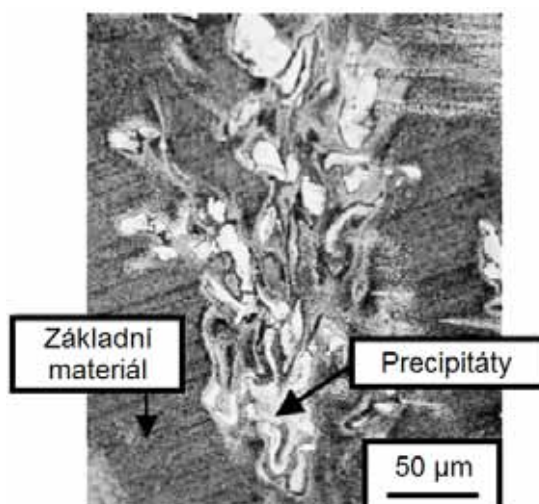
Po globálním hodnocení uvedených parametrů profilu drsnosti povrchů vytvořených AWJ a laserem lze konstatovat, že na zařízení AWJ bylo dosaženo přibližně trojnásobně vyšší kvality drsnosti z hlediska výškových parametrů Ra a Rz , zatímco o kvalitě drsnosti povrchu z hlediska délkového parametru RSm je možno polemizovat. Jisté ale je, že ve vrchní části vzorků dělených AWJ nabývá tento parametr o něco nižších hodnot a poté střídavě vyšších a nižších, než je tomu u vzorků řezaných laserem. Jejich rozptyl je také daleko vyšší než u vzorků dělených laserem.

5.8 Hodnocení ovlivnění stavu materiálu po dělení jednotlivými nekonvenčními metodami

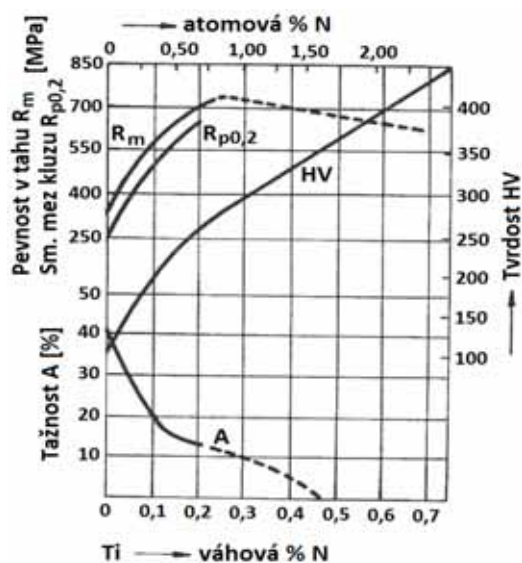
Jak je již na první pohled zřejmé, použité dělicí metody mají jak své výhody, tak své nevýhody nejen co se týče dosahované kvality z hlediska drsnosti řezných hran (viz. výše), ale také celkového ovlivnění struktury materiálu. Zatímco u AWJ při řezání jakéhokoli materiálu nedochází ani k vytváření zbytkových pnutí, ani k vytváření tepelně ovlivněné oblasti, a tím ke strukturním změnám, při řezání laserem tyto jevy nastávají. A to právě v důsledku působení tepla. Podstatou této technologie je totiž lokální ohřev materiálu nad jeho bod tavení a následné shoření – oxidační řezání (používaným plynem je O_2), nebo vyfouknutí – tavné řezání (používanými plyny jsou N_2 , Ar, He), roztavené části. Rozdílem těchto 2 metod je především dosahovaná kvalita řezu, velikost tepelně ovlivněné oblasti a rozdílné rozsahy používaných rychlostí posuvu řezací hlavy. Všechny uvedené parametry jsou vyšší u řezání oxidačního. Při dělení tak specifického materiálu jakým je titan, ovšem k hoření dochází i v atmosféře dusíku. Jak uvádí literatura (40), titan je jediným doposud známým materiálem, který hoří v plynné fázi tohoto prvku. Navíc, jak se píše v knize (44), je s tímto prvkem při zahřátí nad 700 °C vysoce reaktivní. Obdobnou reaktivitu s titanem lze nalézt také u prvků O, H a C. Řada odborníků proto doporučuje dělení tohoto materiálu laserem při použití ochranné atmosféry

argonu. Jak již bylo ale zmíněno v podkapitole 5.3, jedná se o předběžný test a k dispozici byl pouze plyn N_2 !

Jak dokazují studie (45, 46), při tomto způsobu řezání titanu, ač má tento materiál velmi malou tepelnou vodivost, dochází k vytvoření docela velké tepelně ovlivněné zóny (její velikost odvisí především od použitého výkonu laseru a od rychlosti posuvu; s narůstající rychlostí posuvu se zmenšuje) a ke kontaminaci základního materiálu dusíkem v této oblasti. Ve studii (46) byl řezán identický materiál za použití stejné ochranné atmosféry. Následující obr. 5.30 dokazuje, že na povrchu řezných hran a těsně pod ním dochází k reakci přehřátého kovu s plynným dusíkem, což vede ke vzniku precipitátů TiN v povrchové vrstvě. Tyto precipitáty, jakožto sekundární fáze, zabraňují pohybu dislokací, čímž základní materiál vytvrzují.



Obr. 5.30 Vznik precipitátů TiN v důsledku reakce přehřátého kovu s plynem N_2 (46)



Obr. 5.31 Vliv dusíku na mechanické vlastnosti titanu (44)

Na obr. 5.31 je vyobrazeno grafické znázornění závislosti mechanických vlastností čistého titanu při vzrůstajícím obsahu dusíku. Jak je z něho vidět, již při malých obsazích dochází ke ztrátě houževnatosti a k nárůstu pevnosti a tvrdosti titanu, což vede ke zkřehnutí jeho povrchové vrstvy, a tím tedy i k její degradaci.

Dalším defektem použití dusíku jako „ochranné“ atmosféry bylo také vytvoření přibližně 1÷2 mm výronku (strusky) na spodní straně řezné hrany (obr. 5.32). Při použití argonu jako ochranného plynu totiž k jeho vzniku nedochází (46).



Obr. 5.32 Výronek na spodní straně řezné hrany u vzorku č. 2 řezaného laserem

V důsledku velmi velké dosažené drsnosti řezných hran nebylo možné provést měření tvrdosti jejich povrchové vrstvy na žádném ze 2 vzorků pro autora dostupnými metodami.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Každá z vybraných nekonvenčních technologií zpracování materiálů, ať už se jedná o hydroabrazivní nebo laserový paprsek, se vyznačuje jak určitými výhodami, tak i neodmyslitelnými nevýhodami (tab. 6.1).

Tab. 6.1 Porovnání výhod a nevýhod AWJ a plynového laseru (1, 2, 5, 47, 48)

	AWJ	CO ₂ laser
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> - vysoká energetická účinnost (50÷80 %) - možnost dělení prakticky všech technických materiálů - dělení kompozitních a sendvičových materiálů s odlišnými vlastnostmi - řezání vlnitých materiálů - dělení materiálů až do tloušťky 360 mm - vysoká přesnost výrobků - relativně studený řez bez tepelně ovlivněné oblasti, a tím bez změn struktury materiálu - v řezu nedochází ke zvyšování napětí ani ke vzniku mikrotrhlin - malé ztráty materiálu prořezem - kvalitní řez bez otřepů - řezná hrana bez výronku - materiál není nijak chemicky ovlivňován - bezprašný proces bez vznikajících škodlivých látek - ekologičnost - změnou tlaku je možné materiál oplachovat, otryskávat nebo řezat - vysoká životnost vodních trysek (u diamantové až 3000 hod.) 	<ul style="list-style-type: none"> - vysoká produktivita - vysoká přesnost výrobků o menších a středních tloušťkách materiálu - možnost řezání velmi malých otvorů a kontur s ostrými úhly - vysoká opakovatelná přesnost řezání - vysoká rychlost posuvu řezné hlavy - tvrdost materiálu nemá vliv na rychlost dělení - velmi úzká řezná spára (0,1÷1 mm)
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> - vysoké investiční a provozní náklady - relativně nízké rychlosti posuvu řezné hlavy u tvrdých materiálů - průřez paprsku omezuje výřezy kontur s ostrými vnitřními úhly - koroze materiálu v řezné spáře jako důsledek opískování a působení vodního vlivu - vysoká hlučnost (vyšší než 105 dB) 	<ul style="list-style-type: none"> - nízká energetická účinnost (10 %) - vysoké investiční a provozní náklady - problémové řezání reflektivních materiálů - omezení řezané tloušťky materiálu max. do 25÷30 mm - vznik tepelně ovlivněné oblasti, a tím i ovlivnění struktury materiálu - možnost vzniku tepelných deformací - v některých případech vznik okují - u některých materiálů vznik výronku ve spodní části řezné hrany - u materiálů jako jsou plasty nebo hliník nutnost odsávání z důvodu vzniku toxických výparů

Jak je vidno z uvedené tabulky, jednou velkou nevýhodou obou zmíněných technologií jsou vysoké jak počáteční investiční, tak provozní náklady.

Při jejich bližším prozkoumání však lze zjistit, že cena zařízení operujícího s AWJ se pohybuje od 2,5 mil. Kč výše a je tudíž zhruba třetinová oproti zařízení pro řezání laserovým paprskem. Ovšem při komparaci provozních nákladů je na tom laser o něco lépe. U AWJ je nárůst těchto nákladů způsoben především vysokou spotřebou a cenou abraziva, která může tvořit až 50 % veškerých výdajů. Na celkové sumě se také podepisuje vysoká spotřeba vody, která se pohybuje od jednotek až po 700 litrů za jednu motohodinu. Svůj podíl mají ale také vysoká cena vodních trysek a hydroabrazivních trubic, které se provozem opotřebovávají, stejně jako jednotlivé komponenty sestavy vysokotlakého čerpadla, především multiplikátoru. Celková cena je navíc silně odvislá od řezaného materiálu, jeho tloušťky, požadované kvality a objemu zakázky. Konečná částka za 1 hodinu provozu se poté pohybuje od 2500 Kč výše.

Ani u laseru však nejsou provozní náklady natolik nižší, aby byl upřednostňován před AWJ i za cenu tepelného ovlivnění řezných hran obrobku. U plynového CO₂ laseru se na celkové částce nejvíce promítá jak spotřeba laserového plynu (směs CO₂, N₂ a He), která se pohybuje od 2 do 16 l/hod, tak především plynu ochranného nebo řezacího, jehož množství narůstá od 500 do 2000 l/hod (47). Dalšími prvky, které vyžadují častější obměnu v důsledku opotřebení, jsou plynové trysky a filtry zachytávající prach a větší částice. Stejně jakou u AWJ se však celková částka odvíjí od druhu řezaného materiálu, jeho tloušťky, požadované kvality a objemu zakázky. Konečná částka za 1 hodinu se u tohoto zařízení pohybuje od 2000 Kč výše.

Nejen z předchozích porovnání výhod a nevýhod a počátečních a provozních nákladů použitých technologií, ale také z dosažených výsledků této práce se může zdát, že AWJ je ve většině případů i za cenu o něco vyšších výdajů během provozu lepší volbou. Toto ovšem není zcela přesné. Každá technologie má své vhodné oblasti použití. Jak uvádí literatura (47), řezání laserem má své přednosti, díky možnostem volit vyšší posuvové rychlosti řezací hlavy a dosahovat velmi dobrých výsledků, především při dělení plátových ocelí o tloušťkách od 3 do 10 mm. Zatímco uplatnění AWJ stoupá s přibývajícím sílou materiálu nad 10 mm a hlavně při řezání materiálů jako jsou žuly, keramiky, titan atd., které jsou laserem buď jen obtížně dělitelné, nebo jejich zpracování touto metodou není vůbec možné.

V tab. 6.2 na následující stránce je závěrem provedeno srovnání vybraných nekonvenčních technologií z hlediska požadavků na vlastnosti materiálu a vybrané ukazatele stavu povrchu. Nutno podotknout, že dosahované drsnosti povrchu reprezentované parametrem *Ra*, jež je uvedena u laseru, nelze dosáhnout při všech uvedených tloušťkách materiálu (viz. *CO₂ laser – nevýhody* v úvodu této kapitoly).

Tab. 6.2 Charakteristické požadavky na materiál obrobku a vybrané ukazatele stavu povrchu (1, upraveno)

Proces	Požadavky na vlastnosti materiálu	Integrita povrchu	Intenzita úběru materiálu [cm ³ /h]	Rozměrové tolerance [mm]	Dosahovaná drsnost povrchu Ra [μm]
USM	tvrdost nad 35 HRC	mírná	19,7	0,008	0,3÷0,8
AJM	žádné	bez zvýšených napětí	1,0	0,05	bez údajů
AWJ	žádné	bez tepelného ovlivnění	180÷720	0,05	3,2÷10
ECM	elektricky vodivý	bez zvýšených napětí, bez otřepů, lesklý	983	0,05	0,4÷6,3
EDM	elektricky vodivý	tepelně ovlivněný povrch, bez otřepů	49÷197	0,015÷0,13	3÷12
CM	chemicky aktivní	bez zvýšených napětí, bez otřepů, lesklý	1,0	0,05	bez údajů
LBM	žádné	tepelně ovlivněný povrch	0,007	0,03	0,8÷6,3
EBM	žádné	tepelně ovlivněný povrch	0,10	0,03	0,4÷6,3
PAM	chemicky aktivní	tepelně ovlivněný povrch, bez zvýšených napětí	4916	1,27	bez údajů

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce je provedeno rozdělení technologií kapalinového paprsku se zaměřením na vysokotlaký vodní a hydroabrazivní paprsek. Technologie AWJ, která byla použita pro vytvoření vzorků pro experimentální část, je podrobně rozebrána jak z hlediska jednotlivých komponent samotného zařízení, tak z hlediska vzniku paprsku a jeho interakce s materiálem. V dalším je učiněn rozbor faktorů, jež vstupují do procesu řezání a ovlivňují výslednou kvalitu dělicích stěn a nastíněny některé nové trendy vedoucí k jejímu zvýšení. Závěrem teoretické části je přiblížena problematika hodnocení nerovností povrchu spolu s uvedením parametrů drsnosti, jež byly vybrány pro experimentální část této studie, a měřicích přístrojů, jež k měření těchto parametrů slouží.

Cílem experimentální části diplomové práce byla analýza a zhodnocení kvality povrchu z hlediska jeho drsnosti po řezání technologií AWJ při změně technologického parametru rychlosti posuvu řezací hlavy pro zadaný materiál a dále také porovnání získaných výsledků a výstupních charakteristik s výsledky obdrženy ze vzorků dělených technologií laserového paprsku.

Za tímto účelem bylo technologií AWJ nařezáno 11 vzorků se vzrůstající rychlostí posuvu od 50 do 550 mm/min s krokem 50 mm/min. K porovnání s technologií laserového paprsku byly nařezány 2 vzorky (předběžný test) rychlostmi posuvu 450 a 550 mm/min. Jednotlivé vzorky byly proměřeny v 19 měřicích liniích s krokem 0,5 mm tak, aby bylo umožněno získání informací o distribuci nerovností v různých úrovních jejich hloubky. Z normy ČSN EN ISO 4287 bylo vybráno 8 parametrů, jejichž hodnocením bylo možné zmapovat změny, ke kterým dochází, při narůstající rychlosti posuvu u vybraných technologií v závislosti na hloubce řezu.

Lze konstatovat, že jak u technologie AWJ, tak u laseru má rychlost posuvu výrazný vliv na topografii povrchu nejen z hlediska výškových a délkových parametrů profilu drsnosti, ale také z hlediska její skladby.

Z provedených měření a vyhodnocení vyplývá, že s přibývajícím hloubkou řezu dochází k nárůstu hodnot výškových parametrů R_a , R_q , R_z , R_p i R_v . Zatímco u rychlostí posuvu do 200 mm/min jsou tyto nárůsty jen pozvolné a nedosahují výraznějších změn mezi vrchní a spodní částí řezu, již od rychlosti posuvu 250 mm/min výše dochází k jejich výraznějšímu růstu. Parametry R_a , R_q a R_z nabývají s rostoucí rychlostí vyšších hodnot především ve spodní části řezu (začátek nárůstu hodnot je s narůstající rychlostí posuvu posouván směrem k vrchní části vzorků). Jedinou výjimkou jsou průběhy těchto parametrů naměřené u vzorku vyrobeného nejvyšší rychlostí posuvu $v_p = 550$ mm/min, kdy dochází k jejich poklesu ve spodní části řezu. To je způsobeno přítomností

„žlábků“, které se při této rychlosti tvoří ve spodní části vzorku jako důsledek velkého stupně retardace hydroabrazivního paprsku, jež ztrácí kinetickou energii (tato rychlost je pro tuto tloušťku materiálu udávána jako dělicí). Tyto „žlábků“ jsou však velmi jemně vybroušeny, což má za následek jak pokles hodnot parametru R_a a R_q , tak i pokles R_z .

S narůstající hloubkou řezu a se zvyšující se rychlostí dochází také ke zvětšování šířek prvků profilu – nárůst hodnot parametru R_{Sm} . Hodnoty parametru R_{sm} dosahují svých maximálních hodnot převážně ve spodní části řezu, zatímco v horní části řezu povětšinou oscilují mezi hodnotami nižšími.

Rychlost posuvu má také výrazný vliv na skladbu profilu drsnosti povrchu. Do rychlosti posuvu 200 mm/min je profil drsnosti v celé výšce vzorků tvořen převážně hlubšími a členitějšími prohlubněmi s ostrými zakončeními. Při zvyšování rychlosti posuvu od 250 do 350 mm/min dochází již výskytu ojedinělých oblastí s vyšší četností členitějších oblí zakončených výstupků. V rozmezí rychlostí posuvů 400 až 550 mm/min je vrchní část řezu tvořena především většími prohlubněmi jak s oblými, tak s ostrými zakončeními, zatímco ve spodní části s přibývajícím hloubkou dochází k četnějšímu nárůstu výskytů větších oblých výstupků. Výjimkou je opět vzorek vytvořený při nejvyšší rychlosti posuvu 550 mm/min, u kterého je ve spodní části vyšší výskyt ostře zakončených výstupků.

Obdobné závěry není možné stanovit u vzorků řezaných laserem, neboť k vyhodnocení byly k dispozici pouze 2 kusy. Z grafických znázornění uvedených v kapitole 5 ale jasně plyne výrazný vliv rychlosti posuvu i u této technologie, a tak se tu nabízí prostor pro provedení dalších experimentů řezání daného materiálu užitím této nekonvenční metody.

Zhodnocením parametrů profilu drsnosti povrchů vytvořených AWJ a laserem lze konstatovat, že na zařízení AWJ bylo dosaženo přibližně trojnásobně vyšší kvality drsnosti z hlediska výškových parametrů R_a a R_z , zatímco o kvalitě drsnosti povrchu z hlediska délkového parametru R_{Sm} je možno polemizovat. Jisté ale je, že ve vrchní části vzorků dělených AWJ nabývá tento parametr o něco nižších hodnot a poté střídavě vyšších a nižších, než je tomu u vzorků řezaných laserem. Jejich rozptyl je však daleko větší než u laserem dělených vzorků.

Nejen v důsledku obdržených parametrů drsnosti povrchu, ale také z hlediska nulového tepelného ovlivnění plyne výhodnost použití metody AWJ pro zadaný materiál.

Výsledky získané v této práci budou použity k dalšímu studiu technologie AWJ vedoucímu k její optimalizaci a také jako porovnání pro navrhované testy u laserového paprsku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice : Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta - edícia vedeckej a odbornej literatúry, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. VALÍČEK, Jan; HLOCH, Sergej. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. 1. vydání. Ostrava : ÁMOS Mgr. Zdeňka Pustínová, 2008. 128 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
3. VASILKO, Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov : Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, 2007. 338 s. ISBN 987-80-8073-759-7.
4. HUMÁR, Anton. *Technologie I. : Technologie obrábění - 2. část* [online]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2010-02-25]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
5. HUMÁR, Anton. *Technologie I. : Technologie obrábění - 3. část* [online]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005 [cit. 2010-02-25]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
6. SITEK, Libor. *Analýza procesu rozpojování hornin vysokorychlostními vodními paprsky na základě laboratorních měření*. Ostrava, 2000. 110 s. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
7. *PTV.cz : Produkty* [online]. Hostivice : 2006 [cit. 2010-02-12]. Čerpadla. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/cerpadla/index.html>>.
8. HOOGSTRATE, A. M.; SUSUZLU, T.; KARPUSCHEWSKI, B. High Performance Cutting with Abrasive Waterjets beyond 400 MPa. *CIRP Annals : Manufacturing Technology*. 2006, Vol. 55, Issue 1, s. 339-342. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>. ISSN 1660-2773.
9. *Flowcorp.com : Products* [online]. Kent (Washington, USA) : ©2006-2010 [cit. 2010-03-10]. 94,000 psi HyperJet® Pump. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.com/waterjet-products.cfm?id=574##>>
10. PECHÁČEK, Martin. *Obrábění vodním paprskem*. Brno, 2006. 54 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
11. HLAVÁČEK, Petr. *Měření textury povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením jemnozrných materiálů*. Ostrava, 2009. 61 s. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
12. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi*. Bratislava : Miroslav Mračko, 1998. 384 s. ISBN 80-8057-091-4.

13. Tvrdost vody In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 20. 6. 2007, 3. 4. 2010 [cit. 2010-04-05]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tvrdost_vody>.
14. *Flowcorp.com : Resources* [online]. Kent (Washington, USA) : ©2006-2010 [cit. 2010-04-05]. How High Pressure Water is Created. Dostupné z WWW:<<http://www.flowcorp.com/waterjet-resources.cfm?id=340>>.
15. *Wardjet.com : Waterjet University* [online]. Tallmadge (Ohio) : ©2010 [cit. 2010-04-05]. Chapter 3 - How It Works. Dostupné z WWW: <<http://www.wardjet.com/03-how-it-works.html>>.
16. *B2b-waterjet.com, Ultra High Pressure Pumps of Taiwan OH Precision High Pressure Pump Manufacturer : Products & Service* [online]. Jhubei City (Taiwan) : 2009 [cit. 2010-04-05]. Ultra High Pressure Pump H-210. Dostupné z WWW: <<http://www.b2b-waterjet.com/h-210.htm>>.
17. *Flowcorp.com : Resources* [online]. Kent (Washington, USA) : ©2006-2010 [cit. 2010-04-05]. Intensifier Based Pumps. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.com/waterjet-resources.cfm?id=336>>.
18. *Flowcorp.com : Resources* [online]. Kent (Washington, USA) : ©2006-2010 [cit. 2010-04-06]. Pure Waterjet Cutting Heads. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.com/waterjet-resources.cfm?id=337>>.
19. MARTINEC, Petr, et al. *Abrasives for AWJ cutting*. Ostrava : Academy of Sciences, 2002. 80 s.
20. *PTV.cz : Produkty* [online]. Hostivice : 2006 [cit. 2010-04-04]. Abrazivo. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/abrazivo/>>.
21. TAZIBT, A.; PARSY, F.; ABRIAK, N. Theoretical analysis of the particle acceleration process in abrasive water jet cutting. *Computational Material Science*. February-March 1996, Volume 5, Issue 1-3, s. 243-254. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
22. OSMAN, A. H., et al. Experimental analysis of high-speed air–water jet flow in an abrasive water jet mixing tube. *Flow Measurement and Instrumentation*. March 2004, Volume 15, Issue 1, s. 37-48. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
23. CHEN, F. L.; SIORES, E. The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. August 2001, Volume 41, Issue 10, s. 1479-1486. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
24. *Flowcorp.com : Resources* [online]. Kent (Washington, USA) : ©2006-2010 [cit. 2010-04-06]. Abrasive Waterjets. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.com/waterjet-resources.cfm?id=344>>.
25. ZENG, Jiyue; KIM, Thomas J. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. *Wear*. May 1996, Volume 193, Issue 2, s. 207-217. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.

26. *Omax.com : Abrasivejet or Waterjet Taper* [online]. Kent (Washington, USA) : ©2010 [cit. 2010-04-07]. Taper. Dostupné z WWW: <<http://www.omax.com/taper.php>>.
27. VALÍČEK, J.; HLOCH, S.; OHLÍDAL, M. Optická detekce mikrotopografie povrchu vytvořeného abrazivním vodním paprskem. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2007, roč. 2007, č. 2, s. 253-261. Dostupný také z WWW: <http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/2007/number2/mag14/mag14.pdf>. ISSN 1338-1156.
28. HASHISH, Mohamed. Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets. *Transcript of the ASME : Journal of Engineering Material & Technology*. January 1984, vol. 106, no. 1, s. 88-100.
29. HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan; GOMBÁR, Miroslav. Hodnotenie významnosti faktorov technológie abrazivného vodného prúdu. In *Metal : 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů*. Hradec nad Moravicí, 2007 [cit. 2010-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.metal2010.com/data/metal2007/sbornik/Lists/Papers/180.pdf>>.
30. HLOCH, Sergej, et al. Technologické faktory vysokorychlostného hydroabrazivního prúdu a ich vplyv na povrch finálneho výrobku - ďalšie trendy výskumu. *Manufacturing Engineering : Výrobné inžinierstvo*. 2007, číslo 1, s. 21-23. Dostupný také z WWW: <<http://web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf07/1-str-21-23.pdf>>. ISSN 1335-7972.
31. HASCALIK, Ahmet; CAYDAS, Ulas; GÜRÜN, Hakan. Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*. 2007, Volume 28, Issue 6, s. 1953-1957. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
32. SIORES, E., et al. Enhancing Abrasive Waterjet Cutting of Ceramics by Head Oscillation Techniques. *CIRP Annals : Manufacturing Technology*. 1996, Volume 45, Issue 1, s. 327-330. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
33. BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. 1. vydání. Praha : SNTL, 1989. 340 s. typ. č.: L13-B2-IV-41/22881.
34. ČSN EN ISO 4287:1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 24 s.
35. ČSN EN ISO 4288:1996. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 16 s.
36. *Hommel-Etamic.cz* [online]. ©2002-2005 [cit. 2010-04-11]. Plakát - Drsnost povrchu. Dostupné z WWW: <<http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>>.
37. THOMAS, Tom R. *Rough surfaces*. 2nd edition. London : Imperial College Press, 1999. 278 s. ISBN 1-86094-100-1.

38. *Wardjet.com : Waterjet University* [online]. Tallmadge (Ohio) : ©2010 [cit. 2010-04-15]. Chapter 2 – Waterjet Relationship Parameters. Dostupné z WWW: <<http://www.wardjet.com/02-waterjet-relationship-parameters.html>>.
39. *CHPS.cz : Vodní paprsek* [online]. Chomutov : ©2010 [cit. 2010-05-11]. Kvalita a cena. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena.html>>.
40. CARDARELLI, Francois. *Materials Handbook : A Concise Desktop Reference*. 2nd edition. London : Springer-Verlag Ltd., 2008. 1340 s. ISBN 978-1-84628-668-1.
41. CALLISTER, Jr., William D. *Material Science and Engineering*. 7th edition. New York (NY, USA) : John Willey & Sons, 2007. 975 s. ISBN 978-0-471-73696-7.
42. STAFF, M. *Waterjets.org : Downloads* [online]. ©2005 [cit. 2010-04-05]. Waterjet Web Reference Calculator. Dostupné z WWW: <http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=54>.
43. HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*. Vydanie prvé. Prešov : Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach so sídlom v Prešove, 2008. 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
44. PÍŠEK, František; JENÍČEK, Ladislav; RYŠ, Přemysl. *Nauka o materiálu I : Nauka o kovech*. 2. přepr. vyd. Praha : Academia, 1973. 595 s.
45. MURAVĚV, V. I., et al. Effect of Gas-Laser Cutting on Formation of Texture, Structure, and Chemical Composition of Cut Surfaces of Titanium Preforms. *Metal Science and Heat Treatment : Titanium and Its Alloys*. January 2005, Volume 47, Numbers 1-2, s. 22-25. ISSN 0026-0673.
46. ALMEIDA, I. A., et al. Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd: YAG laser parameters. *Journal of Material Processing Technology*. October 2006, Vol. 179, Issue 1-3, s. 105-110. Dostupný také z WWW: <www.sciencedirect.com>.
47. *Teskolaser.com : Metal & laser cutting tips* [online]. ©2000-2005 [cit. 2010-05-19]. Standard metal cutting processes: laser cutting vs. water jet cutting. Dostupné z WWW: <http://www.teskolaser.com/waterjet_cutting.html>.
48. ALBRO, Jeff. *Jeffalbro.net : CNC* [online]. ©2005-2007 [cit. 2010-05-19]. Comparison of 2D CNC Machines. Dostupné z WWW: <<http://www.jeffalbro.net/cnc/2d-comparison/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
AFM	[-]	Abrasive Force Machining (obrábění paprskem abraziva)
AFM	[-]	Atomic Force Microscopy (mikroskopie na bázi atomových sil)
AJM	[-]	Abrasive Jet Machining (obrábění paprskem abraziva)
AWJ	[-]	Abrasive Water Jet (abrazivní vodní paprsek)
AWJM	[-]	Abrasive Water Jet Machining (obrábění abrazivním vodním paprskem)
b	[mm]	tloušťka materiálu
b_n	[mm]	šířka řezné spáry
C_1	[-]	koeficient druhu materiálu
C_f	[-]	koeficient odporu stěny materiálu
C_k	[-]	koeficient charakteristické rychlosti
CM	[-]	Chemical Machining (chemické obrábění)
CNC	[-]	Computer Numerical Control (číslicové řízení s počítačovou podporou)
D	[°]	deviační úhel
d_a	[mm]	vnitřní průměr hydroabrazivní trysky
d_o	[mm]	vnitřní průměr vodní trysky
d_p	[MESH, mm]	velikost abraziva
d_t	[mm]	vnitřní průměr plynové trysky (u laseru)
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
EBM	[-]	Electron Beam Machining (obrábění svazkem elektronů)
ECG	[-]	Electrochemical Grinding (elektrochemické broušení)
ECM	[-]	Electrochemical Machining (elektrochemické obrábění)
EDM	[-]	Electrodischarge Machining (elektrojiskrové obrábění)
f	[Hz]	frekvence
F	[mm]	ohnisková vzdálenost
h	[mm]	hloubka řezu
h_c	[mm]	velikost hladké zóny

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
h_d	[mm]	velikost rýhované zóny
l_a	[mm]	délka hydroabrazivní trubice
L_{aeq}	[dB]	hladina akustického tlaku
LBC	[-]	Laser Beam Cutting (řezání laserem)
l_n	[mm]	vyhodnocovaná délka
l_r	[mm]	základní délka
l_t	[mm]	celková délka posuvu měřicího hrotu
m_a	[g/min]	hmotnostní tok abraziva
n_p	[-]	počet přechodů vodního paprsku
NT	[-]	nízkotlaká, -ý, -é
NTV	[-]	nízkotlaká voda
p	[MPa]	tlak
P	[W, kW]	výkon
PAM	[-]	Plasma Arc Machining (obrábění plasmou)
PCM	[-]	Photochemical Machining (fotochemické obrábění)
R_a	[μ m]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_{a_d}	[μ m]	topografická funkce pro výpočet R_a
R_{ku}	[-]	špičatost posuzovaného profilu
R_m	[MPa]	pevnost v tahu
R_p	[μ m]	největší výška výstupku profilu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_q	[μ m]	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
R_{sk}	[-]	šikmost posuzovaného profilu
R_{Sm}	[-]	průměrná šířka prvků profilu
R_v	[μ m]	největší hloubka prohlubně profilu
R_z	[μ m]	největší výška profilu
S	[m ²]	obsah, plocha
s_a	[°]	směr přidávání abraziva
SEM	[-]	Scanning Electron Microscopy (mikroskopie na bázi snímání elektronů)
s_p	[-]	směr posuvu vodního paprsku
T	[° C]	teplota
T_M	[° C]	teplota tání
USM	[-]	Ultrasonic Machining (ultrazvukové obrábění)
v_a	[m·s ⁻¹]	rychlost pohybu abrazivní částic
v_e	[m·s ⁻¹]	kritická rychlost abrazivních částic

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
v_h	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost posuvu měřicího hrotu
V_m	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	objemové množství odebraného materiálu
v_{opvyst}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	výstupní rychlost ochranného plynu
v_p	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost posuvu řezací hlavy
VT	[-]	vysokotlaká, -ý, -é
VTV	[-]	vysokotlaká voda
WJ	[-]	Water Jet (vodní paprsek – čistý)
WJM	[-]	Water Jet Machining (obrábění vodním paprskem)
x	[mm]	zdvih, vzdálenost trysky od obrobku
X_s	[mm]	šířka prvku profilu
Y_{ret}	[mm]	velikost retardace stopy paprsku
Z_p	$[\mu\text{m}]$	výška výstupku profilu
Z_t	$[\mu\text{m}]$	výška prvku profilu
Z_v	$[\mu\text{m}]$	hloubka prohlubně profilu
λ	$[\text{°}]$	odchylka kolmosti řezné hrany
λ_t	$[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	tepelná vodivost
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota
ρ_p	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota abrazivního materiálu
σ_y	[MPa]	mez kluzu materiálu
φ	$[\text{°}]$	úhel sklonu řezací hlavy

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – Stanovení základní a vyhodnocované délky a velikosti filtru λc pro periodické a aperiodické povrchy (36)
- Příloha 2 – Stanovení maximálního průtočného množství vody v závislosti na jejím pracovním tlaku a na průměru vodní trysky

Příloha 1: Stanovení základní a vyhodnocované délky a velikosti filtru λ_c pro periodické a aperiodické povrchy (dle ČSN EN ISO 4288:1998 a ČSN EN ISO 3274:1998)

periodický povrch
(soustružení, frézování)



Střední vzdálenost rýh
elementů drsnosti

Měřicí podmínky Podle DIN EN ISO 4288:1998 a DIN EN ISO 3274:1998	
Mezní vlnová délka	λ_c (lc)
Základní délka	lr
Měřená délka	ln
Celková délka	lt
Rádus hrotu	$r_{Sp\ max}$
Digitalizovaná vzdálenost	Δx_{max}

aperiodický povrch
(broušení, vyjiskřování)



Aritmetická
střední hodnota



Maximální výška
drsnosti profilu

RSm mm	λ_c mm	lr / ln / lt mm	$r_{Sp\ max} / \Delta x_{max}$ μm	Ra μm	Rz μm
> 0,013... 0,04	0,08	0,08/0,40/0,48	2/0,5	> (0,006)... 0,02	> (0,025)... 0,01
> 0,04... 0,13	0,25	0,25/1,25/1,50	2/0,5	> 0,02... 0,1	> 0,1... 0,5
> 0,13... 0,4	0,8	0,80/4,00/4,80	2 nebo 5/0,5	> 0,10... 2,0	> 0,5... 10
> 0,4... 1,3	2,5	2,50/12,5/15,0	5/1,5	> 2,00... 10,0	> 10... 50
> 1,3... 4,0	8,0	8,00/40,0/48,0	10/5,0	> 10,0... 80,0	> 50... 200

**Příloha 2: Stanovení maximálního průtočného množství vody [gal/min, l/min]
v závislosti na jejím pracovním tlaku a na průměru vodní trysky (PTV)**

Tlak [PSI] [MPa]	Vnitřní průměr vodní trysky [in/mm]																				
	0,003 0,076	0,004 0,100	0,005 0,127	0,006 0,152	0,007 0,178	0,008 0,203	0,009 0,229	0,010 0,254	0,011 0,279	0,012 0,305	0,013 0,330	0,014 0,356	0,015 0,381	0,016 0,406	0,017 0,432	0,018 0,457	0,019 0,483	0,020 0,508	0,021 0,533	0,022 0,559	0,023 0,584
20 000 137,9	0,026 0,10	0,048 0,18	0,074 0,28	0,100 0,38	0,140 0,53	0,188 0,71	0,238 0,90	0,293 1,11	0,357 1,35	0,425 1,61	0,499 1,89	0,576 2,18	0,663 2,51	0,753 2,85	0,853 3,23	0,954 3,61	1,059 4,01	1,181 4,47	1,300 4,92	1,429 5,41	1,561 5,91
25 000 172,4	0,029 0,11	0,055 0,21	0,082 0,31	0,119 0,45	0,161 0,61	0,211 0,80	0,267 1,01	0,330 1,25	0,399 1,51	0,473 1,79	0,557 2,11	0,647 2,45	0,740 2,80	0,843 3,19	0,951 3,60	1,059 4,01	1,189 4,50	1,321 5,00	1,450 5,49	1,590 6,02	1,741 6,59
30 000 206,9	0,032 0,12	0,058 0,22	0,090 0,34	0,129 0,49	0,177 0,67	0,230 0,87	0,291 1,10	0,359 1,36	0,436 1,65	0,518 1,96	0,608 2,30	0,705 2,67	0,808 3,06	0,922 3,49	1,038 3,93	1,165 4,41	1,300 4,92	1,440 5,45	1,585 6,00	1,741 6,59	1,902 7,20
35 000 241,3	0,034 0,13	0,063 0,24	0,098 0,37	0,140 0,53	0,190 0,72	0,248 0,94	0,314 1,19	0,388 1,47	0,470 1,78	0,560 2,12	0,658 2,49	0,761 2,88	0,875 3,31	0,993 3,76	1,123 4,25	1,258 4,76	1,403 5,31	1,553 5,88	1,715 6,49	1,881 7,12	2,055 7,78
40 000 275,8	0,037 0,14	0,066 0,25	0,103 0,39	0,151 0,57	0,203 0,77	0,267 1,01	0,336 1,27	0,415 1,57	0,502 1,90	0,597 2,26	0,703 2,66	0,814 3,08	0,935 3,54	1,062 4,02	1,199 4,54	1,345 5,09	1,501 5,68	1,662 6,29	1,831 6,93	2,011 7,61	2,198 8,32
45 000 310,3	0,040 0,15	0,071 0,27	0,111 0,42	0,159 0,60	0,217 0,82	0,283 1,07	0,357 1,35	0,441 1,67	0,534 2,02	0,634 2,40	0,745 2,82	0,864 3,27	0,991 3,75	1,128 4,27	1,273 4,82	1,427 5,40	1,590 6,02	1,762 6,67	1,942 7,35	2,132 8,07	2,330 8,82
50 000 344,8	0,042 0,16	0,074 0,28	0,116 0,44	0,166 0,63	0,227 0,86	0,296 1,12	0,375 1,42	0,465 1,76	0,563 2,13	0,668 2,53	0,785 2,97	0,911 3,45	1,044 3,95	1,189 4,50	1,342 5,08	1,506 5,70	1,678 6,35	1,857 7,03	2,048 7,75	2,248 8,51	2,457 9,30
55 000 379,3	0,045 0,17	0,077 0,29	0,122 0,46	0,174 0,66	0,238 0,90	0,312 1,18	0,394 1,49	0,486 1,84	0,589 2,23	0,700 2,65	0,824 3,12	0,954 3,61	1,096 4,15	1,247 4,72	1,408 5,33	1,577 5,97	1,760 6,66	1,947 7,37	2,148 8,13	2,357 8,92	2,576 9,75
60 000 413,7	0,045 0,17	0,082 0,31	0,127 0,48	0,182 0,69	0,248 0,94	0,325 1,23	0,412 1,56	0,510 1,93	0,616 2,33	0,732 2,77	0,859 3,25	0,996 3,77	1,144 4,33	1,303 4,93	1,469 5,56	1,649 6,24	1,836 6,95	2,034 7,70	2,243 8,49	2,462 9,32	2,692 10,19
65 000 448,2	0,048 0,18	0,085 0,32	0,132 0,50	0,190 0,72	0,259 0,98	0,338 1,28	0,428 1,62	0,528 2,00	0,642 2,43	0,764 2,89	0,896 3,39	1,038 3,93	1,192 4,51	1,355 5,13	1,530 5,79	1,715 6,49	1,910 7,23	2,119 8,02	2,336 8,84	2,563 9,70	2,801 10,60
70 000 482,7	0,050 0,19	0,087 0,33	0,137 0,52	0,198 0,75	0,269 1,02	0,351 1,33	0,444 1,68	0,550 2,08	0,666 2,52	0,790 2,99	0,927 3,51	1,078 4,08	1,236 4,68	1,406 5,32	1,588 6,01	1,781 6,74	1,984 7,51	2,198 8,32	2,423 9,17	2,660 10,07	2,906 11,00
75 000 517,2	0,50 0,19	0,090 0,34	0,143 0,54	0,206 0,78	0,277 1,05	0,365 1,38	0,460 1,74	0,568 2,15	0,687 2,60	0,819 3,10	0,962 3,64	1,115 4,22	1,279 4,84	1,456 5,51	1,643 6,22	1,844 6,98	2,053 7,77	2,275 8,61	2,507 9,49	2,753 10,42	3,009 11,39
80 000 551,6	0,053 0,20	0,095 0,36	0,148 0,56	0,211 0,80	0,288 1,09	0,375 1,42	0,476 1,80	0,587 2,22	0,711 2,69	0,845 3,20	0,993 3,76	1,152 4,36	1,321 5,00	1,503 5,69	1,699 6,43	1,902 7,20	2,122 8,03	2,349 8,89	2,592 9,81	2,843 10,76	3,107 11,76
85 000 586,1	0,055 0,21	0,098 0,37	0,151 0,57	0,219 0,83	0,296 1,12	0,388 1,47	0,491 1,86	0,605 2,29	0,732 2,77	0,872 3,30	1,022 3,87	1,186 4,49	1,363 5,16	1,551 5,87	1,749 6,62	1,963 7,43	2,185 8,27	2,423 9,17	2,671 10,11	2,930 11,09	3,202 12,12
87 000 600,0	0,055 0,21	0,098 0,37	0,153 0,58	0,219 0,83	0,301 1,14	0,391 1,48	0,497 1,88	0,613 2,32	0,742 2,81	0,882 3,34	1,036 3,92	1,199 4,54	1,379 5,22	1,569 5,94	1,770 6,70	1,984 7,51	2,211 8,37	2,449 9,27	2,703 10,23	2,964 11,22	3,242 12,27