

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Studium vlivu technologie pulzujícího vodního paprsku na povrch materiálu

Disertační práce

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303V002 Strojírenská technologie
Školitel: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.
Doktorand: Ing. Jiří Klich

Ostrava 2016

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

KLICH, Jiří. *Studium vlivu technologie pulzujícího vodního paprsku na povrch materiálu*. Ostrava 2016. 99 s. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Školitel: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Technologie vysokorychlostních kapalinových paprsků doznala v posledních třiceti letech nebývalého rozmachu a rozšířila se jako univerzální nekonvenční technologie do téměř všech průmyslových odvětví. Výzkum vlastností a chování kapalinových paprsků a jejich další vývoj však nadále probíhají se stejnou intenzitou. Jedním z nových směrů, kterým se výzkum ubírá, jsou pulzující kapalinové paprsky. Budoucí využití těchto paprsků se předpokládá ve stavebnictví a strojírenství, zvláště pak v automobilovém a leteckém průmyslu.

Disertační práce se zabývá studiem vlivu pulzujícího vodního paprsku při jeho dopadu na povrch materiálu. Teoretická část se věnuje vývoji kapalinových paprsků, klasifikaci jednotlivých druhů a jejich využití v komerční sféře. Jsou zde uvedeny jednotlivé části vysokotlakého řetězce, které jsou nutné pro generování pulzujícího vodního paprsku. V teoretické části je rovněž podrobně popsán princip působení pulzujícího vodního proudu na povrch obráběného materiálu včetně mechanismů porušování, které se celého procesu desintegrace účastní.

Experimentální část obsahuje návrh a popis zkoušek porušování vybraných kovových materiálů (korozi-vzdorná ocel, hliníková slitina a měď) pulzujícím vodním paprskem včetně následného vyhodnocení pro jednotlivá měření. První část je věnována experimentálnímu stanovení erozních účinků pulzujícího paprsku, v další části je pak provedena analýza vlivu jednotlivých technologických faktorů paprsku na zkoumaný povrch pomocí tzv. plánovaného experimentu. Jako míra účinku pulzujícího paprsku na obráběný povrch byly zvoleny vybrané parametry drsnosti a objemový úběr materiálu.

PhD THESIS ANNOTATION

KLICH, Jiří. *Study of the influence of pulsating water jet technology on material surface*. Ostrava 2016. 99 s. PhD thesis. VSB – Technical univerzity Ostrava. Thesis supervisor: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Last thirty years, technology of high speed liquid jets has gone through unprecedented expansion and it has been applied in almost all industrial sectors as a universal unconventional technology. However, the research into properties and behavior of liquid jets and their further development continue with the same intensity. Pulsating water jets represent one of new directions which the research focuses on. It is expected that these jets will be applied in the construction and mechanical engineering, most especially in the automotive and aviation industries.

The thesis studies the effect of the pulsating water jet impacting the surface of a material. The theoretical part focuses on the development of liquid jets, classification of particular liquid jet types and their commercial application. Individual parts of the high pressure chain which are essential for the generation of pulsating water jet are presented. In addition, the principle of pulsating water jet impact on the surface of a machined material, including mechanisms of disintegration, is described in the theoretical part.

The experimental part consists of the design and description of tests of disintegration of selected metal materials (stainless steel, aluminium alloy and copper) with the pulsating water jet, including consequent evaluation of individual measurements. The first part deals with experimental determination of erosive effects of the pulsating water jet. In the following part, effect of individual technological factors of the jet on the studied surface is analyzed using the so-called Design of Experiments. Particular roughness parameters and the volume of material removal were selected in order to determine the effect of the pulsating water jet on a machined material.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval mému školiteli Doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D, vedoucímu Institutu fyziky VŠB - TU v Ostravě a zejména Ing. Josefu Foldynovi, CSc., a Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. z oddělení Dezintegrace materiálů Ústavu geoniky za řadu podnětných připomínek v průběhu řešení i při zpracování disertační práce. Dále bych chtěl poděkovat všem kolegyním a kolegům, kteří mi byli nápomocni. Poděkování patří v neposlední řadě také vedení Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. v Ostravě za vytvoření vhodných podmínek pro experimentální práce. Své ženě a dětem děkuji za podporu, toleranci a trpělivost.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
ÚVOD	14
1 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	16
2 SOUČASNÝ STAV	17
2.1 KLASIFIKACE KONTINUÁLNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ	18
2.1.1 <i>Vodní paprsek</i>	18
2.1.2 <i>Abrazivní vodní paprsek</i>	18
2.2 KLASIFIKACE PULZUJÍCÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ	22
2.2.1 <i>Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí</i>	22
2.2.2 <i>Přerušované paprsky</i>	23
2.2.3 <i>Modulované paprsky</i>	24
3 MODULOVANÝ PULZUJÍCÍ VODNÍ PAPERSEK POUŽITÝ PŘI EXPERIMENTECH	26
3.1 FORMOVÁNÍ PAPERSEKŮ	26
3.2 PRINCIP PŮSOBENÍ PAPERSEKŮ	28
3.3 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	32
3.3.1 <i>Vysokotlaké vodní čerpadlo</i>	32
3.3.2 <i>Vysokotlaký systém s integrovaným akustickým generátorem</i>	33
3.3.3 <i>Ultrazvukový generátor</i>	34
3.3.4 <i>Trysky</i>	34
3.3.5 <i>Polohovací zařízení</i>	35
4 PARAMETRY POVRCHŮ A JEJICH MĚŘENÍ	36
4.1 2D PARAMETRY POVRCHU	36
4.2 POUŽITÉ MĚŘICÍ METODY	38
4.2.1 <i>Optický profilometr MicroProf FRT</i>	39
4.2.2 <i>Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100</i>	40
4.2.3 <i>Optický mikroskop Nikon Eclipse 80i</i>	41
5 EXPERIMENT I - STANOVENÍ EROZNÍCH ÚČINKŮ STACIONÁRNÍHO PWJ	42
5.1 ZKUŠEBNÍ MATERIÁL	43
5.2 EXPERIMENTÁLNÍ POSTUP	44
5.3 EROZE OCELOVÉHO POVRCHU PO PŮSOBENÍ PWJ	45
5.4 ANALÝZA POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	47
5.5 DÍLČÍ ZÁVĚR	49

6	NASTAVENÍ ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	50
6.1	ZKUŠEBNÍ MATERIÁL	50
6.2	NASTAVENÍ LADÍČÍ MATICE	51
6.3	NASTAVENÍ VZDÁLENOSTI TRYSKY OD POVRCHU	53
6.4	NASTAVENÍ ÚHLU DOPADU	53
6.5	NASTAVENÍ ROZSAHU RYCHLOSTI POSUVU	54
6.6	DÍLČÍ ZÁVĚR.....	55
7	EXPERIMENT II - PLÁNOVANÝ EXPERIMENT VÝZNAMNOSTI JEDNOTLIVÝCH FAKTORŮ NA EROZNÍ ÚČINKY PWJ.....	56
7.1	MATERIÁLY POUŽITÉ PŘI PLÁNOVANÉM EXPERIMENTU.....	58
7.1.1	<i>Hliníková slitina AlMgSi0,5</i>	58
7.1.2	<i>Měď Cu-ETP</i>	58
7.2	REALIZACE PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU	59
7.3	ANALÝZA VLIVU FAKTORŮ NA POVRCH	63
7.4	DÍLČÍ ZÁVĚR.....	68
8	EXPERIMENT III – STUDIUM VLIVU VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PWJ NA TOPOGRAFII POVRCHU.....	69
8.1	STUDIUM VLIVU VÝZNAMNÝCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PWJ NA POVRCH MATERIÁLU.....	70
8.1.1	<i>Oblast zpevnění</i>	74
8.1.2	<i>Oblast zdrsnění</i>	76
8.1.3	<i>Oblast materiálového úběru</i>	76
8.2	OBLAST ZDRSNĚNÍ POVRCHU – PODROBNÁ ANALÝZA	77
8.3	DÍLČÍ ZÁVĚR.....	81
9	VYUŽITELNOST VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ	83
	ZÁVĚR	85
	CONCLUSION.....	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	89
	SEZNAM PUBLIKACÍ	94
	PŘÍLOHY.....	99

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Oblasti aplikace kapalinových paprsků [3].	17
Obr. 2 Schéma vzniku vodního paprsku, abrazivního vodního paprsku a abrazivního suspenzního paprsku [12].	19
Obr. 3 Plunžrové čerpadlo [4].	20
Obr. 4 Schéma multiplikátoru [5].	20
Obr. 5 Znázornění účinků jednotlivých pulzů nebo pulzů s nízkou frekvencí na rozpojovaný materiál [2].	23
Obr. 6 Znázornění účinků pulzujícího přerušovaného paprsku na rozpojovaný materiál [2].	24
Obr. 7 Znázornění účinků pulzujícího modulovaného paprsku na rozpojovaný materiál [2].	24
Obr. 8 Princip tvorby pulzujícího vodního paprsku [27].	27
Obr. 9 Pulzující plochý vodní paprsek generovaný tlakem 20 MPa (stupnice reprezentuje vzdálenost od výstupu z trysky v mm) [35].	27
Obr. 10 Pulzující ploché vodní paprsky generované při různých tlacích (ekvivalentní průměr trysky* 1,1 mm, úhel rozstříku 10°). Stupnice vlevo udává vzdálenost od trysky v mm. Tečky označují rozsah vzdáleností od trysky s maximálními erozními účinky paprsku [30].	28
Obr. 11 Fáze dopadu kapaliny na pevný povrch [21].	29
Obr. 12 Schéma dopadu kapky vody na povrch materiálu [38].	30
Obr. 13 Schéma sestavy zařízení na generování PWJ v ÚGN v Ostravě [41].	32
Obr. 14 Vysokotlaké plunžrové čerpadlo Hammelmann HDP 253 [42].	33
Obr. 15 Schéma vysokotlakového systému s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzací [2].	33
Obr. 16 Ultrazvukový 20 kHz generátor Ecoson.	34
Obr. 17 Srovnání běžné válcové trysky (vlevo) a trysky k vytváření plochého paprsku.	35
Obr. 18 Robotizované pracoviště pro výzkum vlastností a chování vodních paprsků.	35
Obr. 19 Šikmost posuzovaného profilu R_{sk} [52].	37
Obr. 20 Špičatost posuzovaného profilu R_{ku} [52].	38
Obr. 21 Optický profilometr MicroProf FRT	39

Obr. 22 Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 na ÚGN [53].	40
Obr. 23 Optický polarizační a fluorescenční mikroskop Nikon Eclipse 80i s motorizovaným skenovacím stolem März-häuser Scan-24-410 a systémem pro zpracování a analýzu obrazu NIS Elements [54].	41
Obr. 24 Tvar a rozměry testovaného vzorku v milimetrech.	43
Obr. 25 Skutečný obraz povrchu erodovaného vzorku po 2 125 dopadech pulzujícího vodního paprsku znázorňující erodovaná místa při různých zvětšeních. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm [55].	45
Obr. 26 Vývoj eroze povrchu vzorku po daném počtu impaktů pulzujícího vodního paprsku. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm.	46
Obr. 27 Skutečný obraz povrchu erodovaného vzorku po 10 625 (vlevo) a 106 250 (vpravo) dopadech pulzujícího vodního paprsku. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm.	47
Obr. 28 Vztah mezi výškovými parametry topografie povrchu R_a a R_z a počtem impaktů pulzujícího vodního paprsku na povrch vzorku. Pracovní tlak 10 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 40 mm.	48
Obr. 29 Vztah mezi výškovými parametry topografie povrchu R_a a R_z a počtem impaktů pulzujícího vodního paprsku na povrch vzorku. Pracovní tlak 20 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm. Regresní rovnice pro $R_z = 0,1088 \cdot n^{0,2185}$ a pro $R_a = 0,0152 \cdot n^{0,2131}$, kde n je počet impaktů.	48
Obr. 30 Vztah mezi výškovými parametry topografie povrchu R_a a R_z a počtem impaktů pulzujícího vodního paprsku na povrch vzorku. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm.	49
Obr. 31 Nastavení ladicí matice na akustickém generátoru.	51
Obr. 32 a) Schematické znázornění trajektorie trysky při jejím pohybu nad zkušebním vzorkem, b) Desintegrační účinek paprsku na povrchu hliníkové slitiny při různém nastavení vnitřní geometrie akustické komory.	52
Obr. 33 Schéma různých úhlů působení PWJ na povrch materiálu.	53
Obr. 34 Desintegrační účinek paprsku při různých rychlostech posuvu (tlak $p = 40$ MPa, ekvivalentní průměr trysky $\varnothing 2$ mm, vzdálenost trysky od povrchu $L = 73$ mm; rychlosti posuvu u jednotlivých drážek jsou uvedeny v $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$).	54

Obr. 35 Graf závislosti parametru Ra na rychlosti posuvu v_p a příčné profily drážek 1 – 4 z Obr. 34.	55
Obr. 36 Obecné schéma plánovaného experimentu dle Millera [59]	56
Obr. 37 Ishikawův diagram – analýza příčin a následků.....	57
Obr. 38 a) 3D vizualizace drážek účinků PWJ na zkoumaný materiál, b) vyznačení měřených oblastí v drážce, c) grafické znázornění naměřených podélných profilů drážky desintegrovaného povrchu vzorku.....	62
Obr. 39 a) 3D vizualizace skenu drážky a části základního materiálu, b) znázornění oblasti úběru materiálu (modře vyznačená plocha), c) histogram, d) řez vzorkem, kde je vyznačen profil drážky a odebraný objem materiálu.	63
Obr. 40 Paretův diagram znázorňující vlivy jednotlivých faktorů a jejich interakcí na objemový úběr materiálu (svislá červená čára – programem generovaná hranice významnosti).	64
Obr. 41 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Ra	65
Obr. 42 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Rq	66
Obr. 43 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Rz	66
Obr. 44 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Rsk	67
Obr. 45 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Rku	68
Obr. 46 Závislost drsnosti povrchu Ra na posuvové rychlosti nad povrchem v_p	70
Obr. 47 Závislost objemového úběru materiálu V na rychlosti posuvu v_p	71
Obr. 48 Profil drážky vytvořený pulzujícím vodním paprskem při tlaku: a) 20 MPa, b) 30 MPa, c) 40 MPa	72
Obr. 49 Metalografický výbrus příčného profilu vzorku hliníkové slitiny AlMgSi0,5 erodovaného pulzujícím vodním paprskem (tlak 40 MPa, ekvivalentní průměr trysky 2 mm, vzdálenost trysky od povrchu 73 mm; rychlost posuvu $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$).....	73
Obr. 50 Metalografický výbrus vzorku hliníkové slitiny zobrazený pomocí konfokálního mikroskopu ve dvou zvětšeních. Jsou dobře patrné převisy a nově vzniklé dutiny způsobené překrytím původního materiálu.....	74
Obr. 51 3D vizualizace drážky - oblast zpevnění.....	75
Obr. 52 3D vizualizace drážky - oblast zdrsňení	76
Obr. 53 3D vizualizace drážky - oblast materiálového úběru.....	77

Obr. 54 Závislost parametru drsnosti R_a na změně rychlosti posuvu v_p při tlaku 20MPa.	78
Obr. 55 Závislost parametru drsnosti R_a na změně rychlosti posuvu v_p při tlaku 30MPa.	79
Obr. 56 Závislost parametru drsnosti R_a na změně rychlosti posuvu v_p při tlaku 40MPa.	79
Obr. 57 Naměřený parametr R_{sk} při změně rychlosti posuvu v_p pro tlak kapaliny 20, 30 a 40 MPa. Červená vodorovná úsečka zobrazuje oblast rozdělující hodnoty R_{sk} větších nebo menších než 0.	80
Obr. 58 Naměřený parametr R_{ku} při změně rychlosti posuvu v_p pro tlak kapaliny 20, 30 a 40 MPa. Červená vodorovná úsečka zobrazuje oblast rozdělující hodnoty R_{ku} větších nebo menších než 3.	81

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli X6CrNiMoTi17-12-2	43
Tab. 2 Mechanické vlastnosti austenitické korozivzdorné oceli X6CrNiMoTi 17-12-2.....	43
Tab. 3 Technologické parametry použité při hledání optimálního nastavení zařízení.	50
Tab. 4 Chemické složení slitiny hliníku AlMgSi0,5	51
Tab. 5 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku AlMgSi0,5.....	51
Tab. 6 Chemické složení mědi Cu-ETP	59
Tab. 7 Mechanické vlastnosti mědi Cu-ETP.....	59
Tab. 8 Faktory a jejich úrovně.....	59
Tab. 9 Nastavení technologických parametrů plánovaného experimentu.....	60
Tab. 10 Plánovaný experiment (M – měď, H – hliníková slitina).....	61
Tab. 11 Nastavení technologických parametrů.	69
Tab. 12 Parametry drsnosti povrchu při rychlosti posuvu $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	71

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Seznam použitých symbolů a jednotek

c	Rychlost šíření rázové vlny	$[m \cdot s^{-1}]$
f	Frekvence ultrazvukového generátoru	$[kHz]$
i	Konstanta pro dopadající vodu	$[-]$
k	Konstanta udávající počet faktorů	$[-]$
l_r	Základní délka	$[mm]$
L	Vzdálenost trysky od povrchu	$[mm]$
n	Počet impaktů	$[-]$
p	Tlak kapaliny	$[MPa]$
p_i	Impaktní tlak	$[MPa]$
p_s	Stagnační tlak	$[MPa]$
R_a	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	$[\mu m]$
R_q	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	$[\mu m]$
R_{ku}	Špičatost posuzovaného profilu	$[-]$
R_p	Největší výška výstupku profilu	$[\mu m]$
R_{sk}	Šikmost posuzovaného profilu	$[-]$
R_v	Největší hloubka prohlubně profilu	$[\mu m]$
R_z	Největší výška profilu	$[\mu m]$
v	Rychlost dopadu kapaliny	$[m \cdot s^{-1}]$
v_p	Rychlost posuvu	$[mm \cdot s^{-1}]$
v_s	Rychlost šíření zvuku	$[m \cdot s^{-1}]$
Z_p	Výška největšího výstupku v rozsahu základní délky l_r	$[\mu m]$
Z_v	Hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r	$[\mu m]$
α	Úhel působení paprsku na povrch	$[^\circ]$
β	Úhel mezi povrchem kapky a povrchem materiálu	$[^\circ]$
δ_5	Prodloužení	$[\%]$
$\Delta\tau$	Doba působení impaktního tlaku	$[s]$
ρ	Měrná hmotnost	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\sigma_{0,2}$	Mez kluzu	$[MPa]$
σ_m	Mez pevnosti	$[MPa]$

Seznam použitých zkratek

AV ČR	Akademie věd České republiky
AWJ	Abrasive Water Jet – abrazivní vodní paprsek
DOE	Design of Experiments – plánovaný experiment
NASA	National Aeronautics and Space Administration – Národní úřad pro letectví a kosmonautiku USA
PWJ	Pulsating Water Jet – pulzující vodní paprsek
RMS	Root Mean Square deviation – střední kvadratická úchylka
ÚGN	Ústav geoniky
WJ	Water Jet – vodní paprsek

ÚVOD

Člověk pozoroval účinky vodních toků a proudů při erozi Země odpradávná. I když prokazatelně využíval energii vody ve svůj prospěch už před mnoha tisíci lety, k prvnímu významnějšímu využití vodních proudů došlo až v 19. století, společně s masivním vývojem čerpací techniky v té době. Zpočátku se voda používala k vymílání a odplavování lehčích nánosů hlušiny při těžbě zlata a dalších minerálů [1]. Počátkem 20. století pak byly využity první vodní paprsky s velmi nízkým tlakem při dobývání rašelinových ložisek ve středním Prusku a po 1. světové válce byl podobný způsob aplikace vyvinut také v Sovětském Svazu. Již od roku 1915 byl tento způsob uplatňován také při těžbě uhlí [2]. V 50. a 60. letech minulého století prováděl Dr. Norman Franz pokusy s řezáním dřeva vodou o vysokém tlaku (asi 200 MPa), nebyl však schopen dosáhnout nepřetržitého proudu. Další rozvoj technologie kapalinového paprsku tak nastal teprve s vývojem zařízení, které vytváření kontinuálního proudu vody o vysokém tlaku umožňovalo. První komerční zařízení na řezání vodním paprskem pracovalo při tlacích 200 až 400 MPa [3]. V roce 1979 byl na trh uveden mnohem účinnější tzv. abrazivní vodní paprsek s příměsí drobných zrn tvrdých minerálů, který byl původně vyvinut za účelem řezání keramických obkladů k izolaci povrchu raketoplánu pro americkou NASA.

Kontinuální (nepřetržité) kapalinové paprsky prodělaly za posledních 30 let prudký vývoj a dnes jsou běžně využívány v komerční sféře pro řezání a čištění nejrůznějších materiálů ať už jako čistý vodní paprsek, nebo paprsek s příměsí abrazivních materiálů. Poměrně novým směrem, kterým se ubírá výzkum a vývoj kapalinových paprsků, jsou tzv. pulzující vodní paprsky, jejichž účinky na materiálech jsou předmětem mé disertační práce. První zmínky o pulzujících vodních paprscích, se objevily už v 70. letech minulého století, k jejich významnému rozvoji však došlo až o 20 let později. Pulzující paprsky využívají účinků impaktního tlaku kapaliny generovaného dopadem na materiál. Impaktní tlak je několikanásobně vyšší než statický tlak, kterým na materiál působí kontinuální proud. Vyšší erozní účinky pulzujícího paprsku jsou tak způsobeny opakovaným působením impaktního tlaku, smykovým a únavovým namáháním přetržitého vodního proudu na materiál.

Při volbě technologie povrchové úpravy je kladen velký důraz nejen na výslednou kvalitu upravované plochy, ale i na celkovou ekonomickou náročnost a nízkou ekologickou zátěž životního prostředí. Povrchové úpravy materiálů patří mezi běžné technologické procesy, které umožňují povrchu zlepšit své funkční vlastnosti, získat zcela nové atributy, případně dosáhnout estetického vzhledu. Povrchové úpravy tak mohou přispět např. ke zvýšení odolnosti proti korozi a opotřebení, k úpravě elektrické vodivosti, ke změně optických

vlastností, třecích schopností apod. Pulzující vodní paprsek může být úspěšně využit nejen k úpravě povrchových vlastností, ale také k odstraňování povrchových vrstev a v řadě dalších aplikací. Jeho výhodou oproti kontinuálnímu paprsku je využití výrazně nižších pracovních tlaků k dosažení stejných výsledků a nižší náklady na pořízení a provoz vysokotlakých zařízení.

V předkládané práci uvádím princip působení pulzujícího vodního paprsku na povrch materiálů, popisuji a analyzuji topografii nově vytvořených povrchů u vybraných kovových obrobků a hodnotím vliv technologických parametrů pulzujícího paprsku na výslednou strukturu a texturu povrchu. Praktická část práce obsahuje tři samostatné, ovšem vzájemně související experimenty: (i) stanovení erozních účinků stacionárního pulzujícího vodního paprsku na povrch korozivzdorné oceli, (ii) zjišťování významnosti jednotlivých faktorů procesu na erozní účinky pulzujícího paprsku prostřednictvím plánovaného experimentu a (iii) studium vlivu zjištěných významných faktorů procesu na topografii povrchu.

1 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Nekonvenční technologie obrábění pomocí pulzujícího vodního paprsku využívá jako nástroj modulovaný proud vody. Charakteristiku topografie povrchu obrobené plochy a úběr materiálu ovlivňuje množství technologických faktorů. Analýzou geometrie nově vytvořeného povrchu po dopadu pulzujícího vodního paprsku lze popsat závislost nastavení jeho technologických parametrů na výsledný efekt.

Cílem doktorské práce je tedy studium vlivu těchto parametrů na celkový vzhled a texturu povrchů. Podstatou je popis technologického nástroje pulzujícího vodního paprsku, vypracování koncepce řešení, výběr experimentálních postupů a volba experimentálních metod, vlastní měření, analýza, interpretace dat získaných z experimentů a návrh modelu pro predikci povrchu materiálu vytvořeného působením pulzujícího vodního paprsku. Veškeré kroky vedoucí k cíli lze shrnout v následujících etapách.

Etapy vedoucí k cíli doktorské práce:

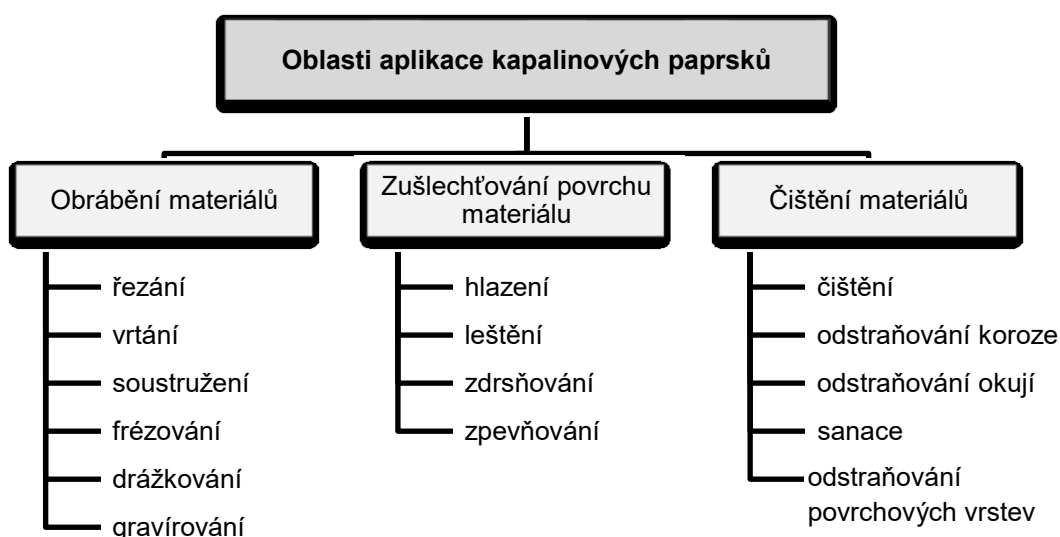
1. Rešerše poznatků, shrnutí a zhodnocení současného stavu.
2. Klasifikace technologických parametrů a výběr měřících metod pro analýzu povrchu.
3. Teoretická východiska, vypracování koncepce a návrhu pro řešení problematiky.
4. Příprava vzorků, provedení experimentů a analýza a interpretace získaných dat.
5. Popis povrchu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem.
6. Návrh modelu pro predikci povrchu materiálu.

2 SOUČASNÝ STAV

V dnešní době je využití vody jako pracovního nástroje realizováno v různých modifikacích. Vysokorychlostní vodní paprsek představuje především účinný řezný nástroj působící samostatně nebo v kombinaci s jinými procesy. Je to moderní, efektivní a ekologický prostředek k obrábění širokého spektra materiálů disponující výhodami, které neposkytuje žádná jiná technologie. Mezi jeho hlavní výhody patří tvorba tzv. studeného řezu, čímž nedochází k tepelnému ovlivnění obráběného materiálu. Další z předností je působení minimálních řezných sil na obrobek. Na rozdíl od jiných paprskových metod (laser, plasma) zde nedochází k odpařování obráběného materiálu. Technologie je téměř bezprašná a umožňuje proto bezpečně obrábět i zdraví škodlivé materiály. Velkou výhodou vodního paprsku je také jeho univerzálnost, která umožňuje obrábět (řezat, soustružit, frézovat apod.) téměř jakýkoliv známý materiál při jednom upnutí obrobku.

Postupný výzkum a vývoj kapalinových paprsků umožnil rozšíření technologie i do dalších oblastí lidské činnosti. Možnosti jejího využití v současnosti jsou přehledně znázorněny na Obr. 1.

Kapalinové paprsky lze rozdělit podle jejich přetržitosti v čase na kontinuální a pulzující. Dále pak lze paprsky rozdělit podle přítomnosti příměsí na paprsky čisté nebo abrazivní [6]. Jednotlivé druhy a typy kapalinového paprsku jsou podrobně popsány v literatuře (např.[3], [6], [7] a [8]) v dalším textu tedy udávám jen stručný nástin pro pochopení a objasnění problematiky.



Obr. 1 Oblasti aplikace kapalinových paprsků [3].

2.1 KLASIFIKACE KONTINUÁLNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ

Nejběžnějším používaným typem je paprsek kontinuální, který se využívá v různých odvětvích průmyslu. Jedná se o kontinuální proud kapaliny (nejčastěji vody) pohybující se velmi vysokou rychlostí. Pokud je kontinuální paprsek tvořen pouze vodou bez jakýchkoliv příměsí, jedná se o vodní paprsek (WJ – Water Jet). Jsou-li do kontinuálního paprsku přidány abrazivní částice, používá se označení abrazivní vodní paprsek (AWJ – Abrasive Water Jet).

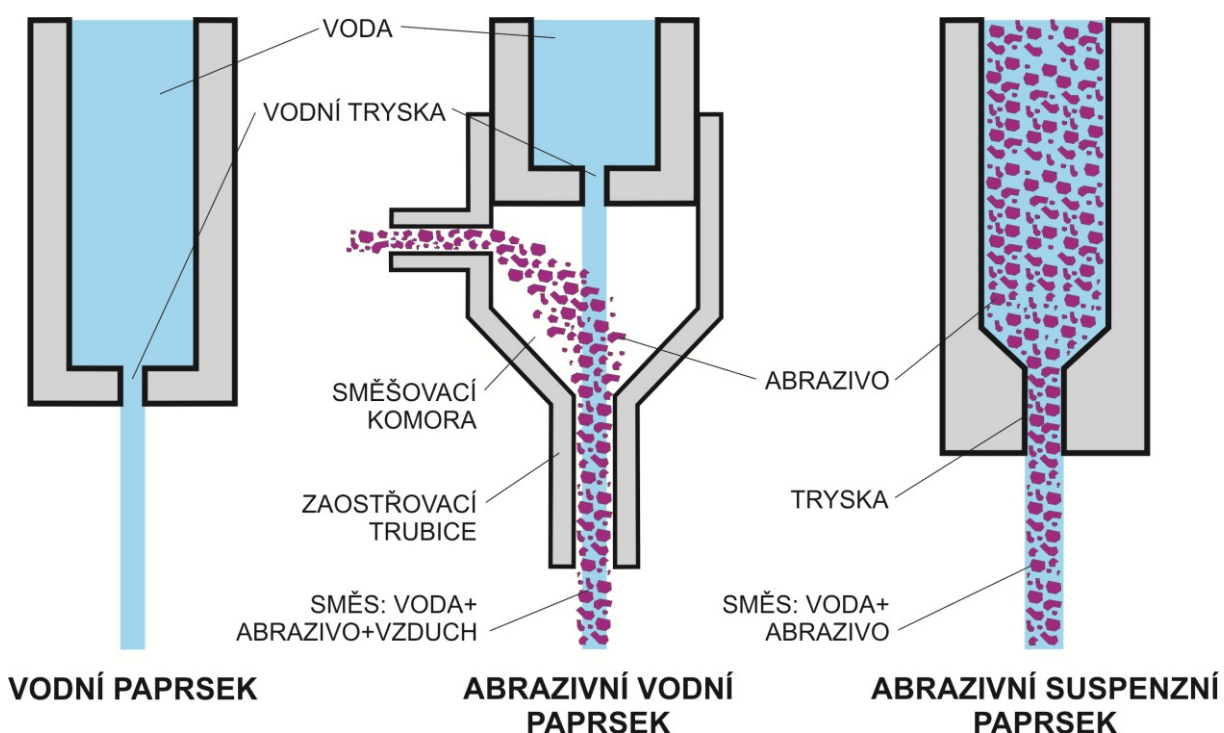
2.1.1 Vodní paprsek

Počátek využívání kontinuálních paprsků v praxi patřil čistému vodnímu paprsku. Řezání touto technologií spočívá v mechanickém odebírání materiálu po dopadu úzkého proudu vody pohybujícího se značnou rychlostí na malou plochu řezaného materiálu. Obrovská kinetická energie proudu je po dopadu přeměněna na energii tlakovou působící na materiál. Rychlost vodního proudu v paprsku dosahuje běžně trojnásobku rychlosti zvuku. Paprsek vody proniká do obráběného materiálu, postupně ztrácí svoji kinetickou energii a při vzájemném pohybu trysky a řezaného materiálu se vychyluje. Při tlakovém namáhání na řezné ploše postupně dochází k odstraňování částí materiálu a k jeho destrukci. Řezání probíhá jen do určité hloubky a je ovlivněno fyzikálně mechanickými vlastnostmi materiálu a konkrétním nastavením technologických parametrů paprsku. V závislosti na typu řezaného materiálu se běžně používaný pracovní tlak pohybuje od 60 MPa až do 600 MPa. Vodní paprsek se používá pro řezání měkkých případně tenkých materiálů, jako je např. papír, dřevo, plasty, tenké kovové plechy, potraviny, apod. [3], [6], [9], [10]. Jelikož zařízení používaná na generování vysokorychlostního vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku jsou z části totožná, celý proces tvorby paprsku je podrobněji popsán v další kapitole.

2.1.2 Abrazivní vodní paprsek

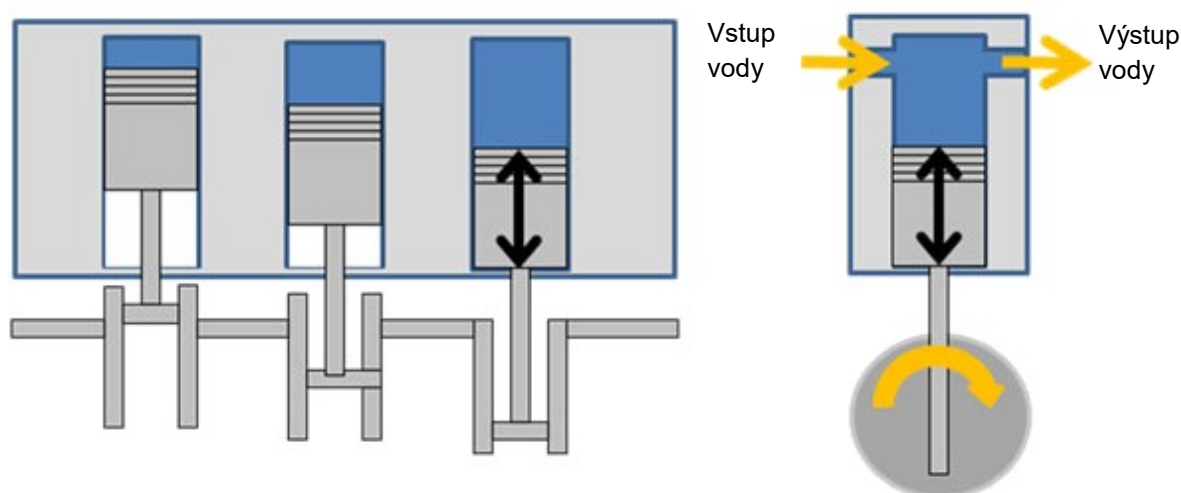
Potřeba zvýšení účinnosti vodního paprsku vedla k vývoji abrazivního vodního paprsku (AWJ). Technologie AWJ spočívá podobně jako u vodního paprsku na principu generování vysokého tlaku vody protékající tryskou malého průměru, čímž voda získá velmi vysokou kinetickou energii. Do vysokorychlostního vodního proudu jsou pak přidávány abrazivní částice několikanásobně zvyšující jeho účinek. Hlavní oblasti procesu vzniku, formování a působení nástroje na obráběný materiál jsou schematicky znázorněny na Obr. 2. Jednotlivé etapy vzniku, formování a působení AWJ na materiál jsou hojně popsány v literatuře [3], [6], [11].

Hlavní technologickou kapalinou je voda, která musí splňovat přísné požadavky na kvalitu. Voda se nejprve zbavuje nečistot ve filtrech. Pro snížení míry opotřebování trysek, vysokotlakých těsnění, otočných kloubových spojů, ovládní ventilů atd., se často provádí také její změkčování, případně deionizace. Takto zpracovaná voda se přivede do vysokotlakého čerpadla, ve kterém se její tlak zvýší na stovky MPa. Účinek vodního paprsku při jeho působení na materiál je značně podmíněný právě velikostí tlaku vody. Pro generování vysokého tlaku se v zásadě používají dvě různá vysokotlaká čerpadla lišící se principem činnosti.



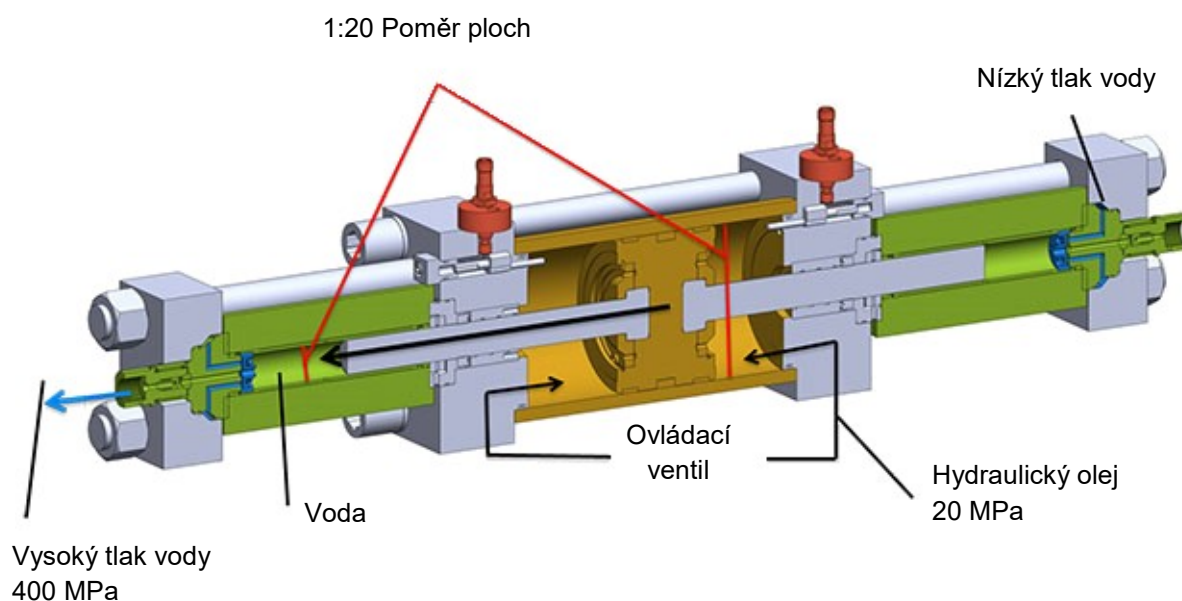
Obr. 2 Schéma vzniku vodního paprsku, abrazivního vodního paprsku a abrazivního suspenzního paprsku [12].

Tzv. plunžrové čerpadlo (Obr. 3) pracuje na principu postupného tlakování vody v jednotlivých válcích. Čerpadlo obsahuje obvykle tři nebo pět válců, v nichž se pohybují písty (plunžry) v závislosti na natočení klikové hřídele. Tlak vody generovaný tímto čerpadlem dosahuje hodnot mezi 100 – 400 MPa a je tedy možné jej použít i pro aplikace řezání, nejčastěji se však používá při čištění povrchů a odstraňování povrchových vrstev, kde je potřeba vyšších průtoků (desítky $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$) a nižších tlaků (kolem 200 MPa) [3].



Obr. 3 Plunžrové čerpadlo [4].

Dalším typem je čerpadlo se zesilovačem tlaku (tzv. multiplikátorem), kde se maximální tlak vody pohybuje mezi 400 až 600 MPa (u speciálních aplikací až 1000 MPa). Činnost hydraulického multiplikátoru je založena na rovnováze sil působících na nestejně plochy diferenciálního pístu (viz Obr. 4). Zde se využívají rozdíly pracovních ploch vysokotlaké a nízkotlaké části pístu. Čerpadlo pracuje jako dvojčinné, po dosažení krajní úvrati se píst začne pohybovat opačným směrem. Průtoky vysokotlaké vody u multiplikátorového čerpadla jsou nižší v porovnání s čerpadlem plunžrovým a dosahují několika $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 4 Schéma multiplikátoru [5].

Tlaková voda je dále vysokotlakým potrubím přivedena do kompenzátoru (akumulátoru tlaku), kde se eliminuje kolísání tlaku způsobené čerpadlem [6]. Využívá se přitom stlačitelnosti vody při vysokých tlacích, která např. při 400 MPa dosahuje přibližně 13% [13]. Voda se dále přivádí přes tlustostěnné vysokotlaké potrubí s malým vnitřním průměrem k řezné hlavici obsahující trysku. Vysokotlaké potrubí i armatury se vyrábí ze speciálních velmi pevných korozivzdorných ocelí [3].

Vodní tryska se nachází v řezné hlavě. V současné době se vodní trysky vyrábějí především z rubínu, safíru a diamantu, pro aplikace s nižšími požadovanými tlaky vody také ze speciálních ocelí, slinutých karbidů a keramiky. Při průchodu tryskou dochází ke změně tlakové energie vody na kinetickou energii paprsku. Tryska vytváří souvislý kompaktní proud vody, který je základem řezného nástroje – vodního paprsku.

V případě abrazivního vodního paprsku je součástí řezné hlavy také tzv. směšovací komora, kde probíhá proces přimíchávání abrazivního materiálu do čistého vodního paprsku o vysoké rychlosti. Ten protéká komorou, do které je samostatným potrubím přiváděno abrazivo z dávkovače a zásobníku. Komora má specifický tvar a velikost. Při přechodu paprsku do rozšiřujícího se prostoru směšovací komory vzniká podtlak, kterým je ze zásobníku přisáváno abrazivo. To je pak ve směšovací komoře strháváno proudem vody a v zaostřovací trubici dále urychlováno a usměrňováno. Prostřednictvím procesu mísení je také dosaženo rovnoměrného rozptýlení zrn abraziva v proudu vody [6], [9]. Při výstupu ze zaostřovací trysky má již abrazivo potřebnou kinetickou energii pro řezání materiálu, který je umístěn zpravidla pod tryskou. Při řezání dochází k postupnému útlumu řezné síly paprsku v závislosti na tloušťce a typu materiálu obrobku.

Jelikož náklady na abrazivo představují největší cenovou položku při použití AWJ, je nutné výběru správného abraziva věnovat patřičnou pozornost [14]. Od původního a v minulosti velmi rozšířeného abraziva - křemičitého písku - bylo později upuštěno kvůli nebezpečí vzniku závažných respiračních chorob u obsluhy zařízení. V současnosti jsou nejpoužívanějším, nejúčinnějším a bezpečným typem abraziva granátové minerální částice, při speciálních požadavcích však lze aplikovat i mnoho dalších materiálů (olivín, korund, strusky, led, sůl, cukr apod.) Přimícháním abrazivních částic do vysokotlakého proudu vody výrazně vzroste výkon řezání [6].

Pracovní plochu, na které je umístěn obrobek, většinou tvoří rošt, pod kterým je nádrž s vodou, kde se zachytává zbytková energie paprsku. Nádrž je minimálně 0,5 metru hluboká, což je při běžných parametrech abrazivního paprsku dostatečná hloubka pro eliminaci jeho zbytkové energie. Na dno nádoby je také možno umístit předměty různých tvarů z tvrdých materiálů, které pomáhají rozptylovat zbylou energii paprsku. Kalná voda po řezání se

z nádrže odčerpává do odkalovací kaskády, kde se odděluje voda od pevných látek. Usazený kal složený z abraziva a odebraného materiálu se odváží jako odpad nebo se abrazivo recykluje a použije při dalším řezání [15].

2.2 KLASIFIKACE PULZUJÍCÍCH VODNÍCH PAPERKŮ

Jeden ze současných směrů výzkumu a vývoje kapalinových paprsků se vydává cestou nižších pracovních tlaků při dosažení srovnatelných výsledků s výsledky získanými vysokotlakým zařízením. Tato kritéria splňuje technologie pulzujícího vodního paprsku (PWJ). Patří mezi inovační technologie umožňující povrchové úpravy materiálů. Její účinky na povrchy různých materiálů jsou v mnoha případech odlišné od klasických technologií. Konkrétním nástrojem používaným při opracování povrchů je pulzující vodní paprsek, který po dopadu na materiál vytváří specifickou geometrii topografie obrobeneho povrchu. Pulzující paprsky využívají impaktního tlaku, který je několikanásobně vyšší než tlak stagnační, kterým na materiál působí běžné kontinuální paprsky, čímž se v materiálu dosahuje vyšších erozních účinků [2], [16], [17]. Mezi přednosti technologie PWJ patří řez bez tepelně ovlivněné oblasti, nízká prašnost a ekologičnost provozu. Vlastnosti provozu technologie pulzujícího vodního paprsku sledují dnešní trendy ekonomického a ekologického řešení povrchových úprav materiálů.

Podle způsobu generování lze pulzující vodní paprsek rozdělit do tří základních kategorií: (i) jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí, (ii) přerušované paprsky a (iii) modulované paprsky.

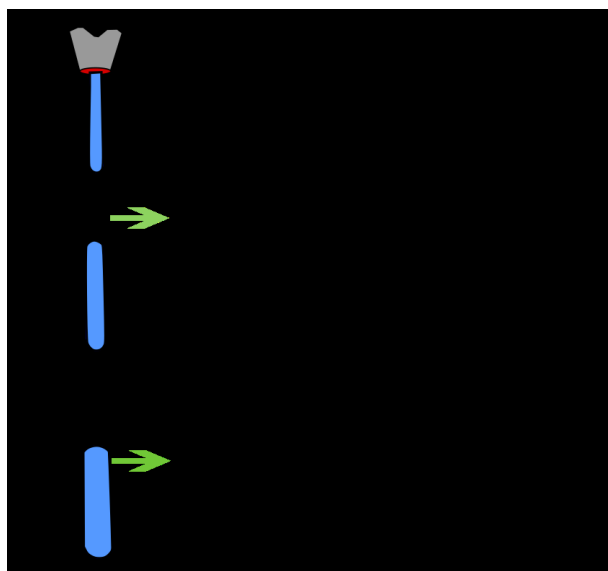
2.2.1 *Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí*

Pro generování jednotlivých pulzů nebo pulzů s nízkou frekvencí se využívá nárazové zařízení s volným pístem, které vytváří pulzující vodní paprsek pomocí volného pístu narážejícího na stojící sloupec vody v trysce. Pomocí mechanických impaktorů, výbušnin nebo střel dochází k rychlé akceleraci pístu prudkým uvolněním energie uložené ve stlačeném plynu. Takto vytvořený paprsek má vysoký statický tlak, krátkou dobu trvání pulzu, malý objem kapaliny obsažený v jednom pulzu a celkově nízkou účinnost [20].

Mnohem vyšší účinnost (až 90%) mají zařízení vytlačující pulzy tlakem, kde má paprsek naopak dlouhou dobu trvání a velký objem kapaliny obsažené v jednom pulzu. Tato zařízení jsou v podstatě nepřetržitě pracující multiplikátory. Pulzující paprsek je vytvářen pomocí stlačeného vzduchu, který pohání nízkotlaký píst, přímo spojený s vysokotlakým pístem mnohem menšího průměru, který stlačuje vodu a vytlačuje ji tryskou ven [2]. Dále

může být pulzující paprsek vytvářen pomocí hydraulického generátoru pulzací a to tak, že kapalina je ve vysokotlaké nádobě stlačena na vysoký tlak a otevřením rychlostního ventilu se vytvoří sloupec kapaliny s vysokou kinetickou energií [21].

Pulzující paprsek generovaný jako jednotlivé pulzy je tvořen separovanými sloupci vody, které při dopadu na obráběný materiál vytvářejí impaktní tlak p_i , který poklesne na tlak stagnační p_s . [2]. Po odeznění dopadu sloupce vody klesá tlak v místě dopadu na nulu [18]. Jednotlivé cykly zatěžování se opakují v závislosti na rychlosti, s jakou je zařízení schopno generovat pulzy, a nezávisí na vzdálenosti od trysky (viz Obr. 5) [19].

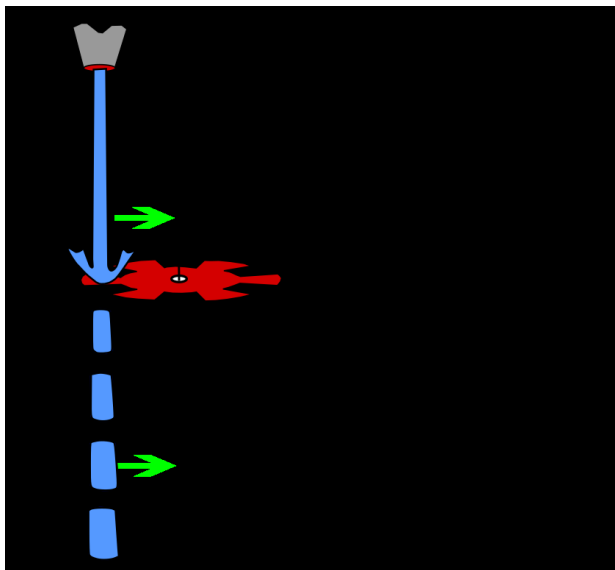


Obr. 5 Znárodnění účinků jednotlivých pulzů nebo pulzů s nízkou frekvencí na rozpojovaný materiál [2].

2.2.2 Přerušované paprsky

Přerušovaný pulzující paprsek je zpočátku kontinuální paprsek, který se teprve po průchodu přerušovačem rozčlení na jednotlivé sloupce vody a vzniká paprsek pulzující (viz Obr. 6) [22]. Největší nevýhodou přerušovaných paprsků je ztráta části energie vodního paprsku vlivem přerušování a s tím i spojená nízká účinnost těchto paprsků. Jako přerušovač lze použít rotující kotouč s otvory nebo laser [23].

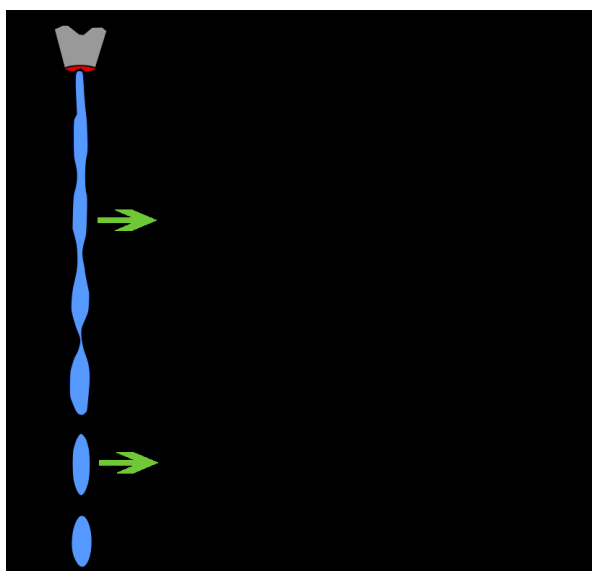
Po výstupu z trysky se paprsek chová jako kontinuální, má konstantní hodnotu rychlosti. Po průchodu přerušovačem se rozdělí na jednotlivé sloupce vody, které při dopadu na obráběný materiál generují impaktní tlak p_i , který se mění na stagnační p_s a po ukončení dopadu sloupce vody je tlak nulový [24]. Tento cyklus se periodicky opakuje s frekvencí odpovídající přerušování paprsku [2].



Obr. 6 Znáornění účinků pulzujícího přerušovaného paprsku na rozpojovaný materiál [2].

2.2.3 Modulované paprsky

Modulované paprsky reprezentují odlišný způsob generování pulzujícího paprsku [25]. Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí a přerušované paprsky, jsou tvořeny navzájem oddělenými sloupci vody, které však mají konstantní rychlost [26]. Naopak modulovaný paprsek vychází z trysky s proměnnou rychlostí, v jejímž důsledku se v určité vzdálenosti od trysky navzájem oddělují (viz Obr. 7) [27].



Obr. 7 Znáornění účinků pulzujícího modulovaného paprsku na rozpojovaný materiál [2].

Modulovaný paprsek se po výstupu z trysky chová jako kontinuální proud kapaliny s proměnnou axiální rychlostí (cyklicky modulovaný v čase [28]). Rozdílné rychlosti způsobují, že rychlejší a pomalejší části jednotlivého cyklu mají tendenci se spojit a vytvářet tak v paprsku shluky kapaliny [29]. Tento typ pulzujícího paprsku (modulovaný paprsek) netrpí hydraulickým rázem a extrémními změnami reaktivních sil, jako je tomu u systémů generující jednotlivé pulzy, ani zde nedochází ke ztrátě energie, jako u přerušovaných paprsků. Periodickým generováním impaktního tlaku se mnohonásobně zvyšuje efektivnost tohoto vodního paprsku oproti běžnému kontinuálnímu paprsku [30].

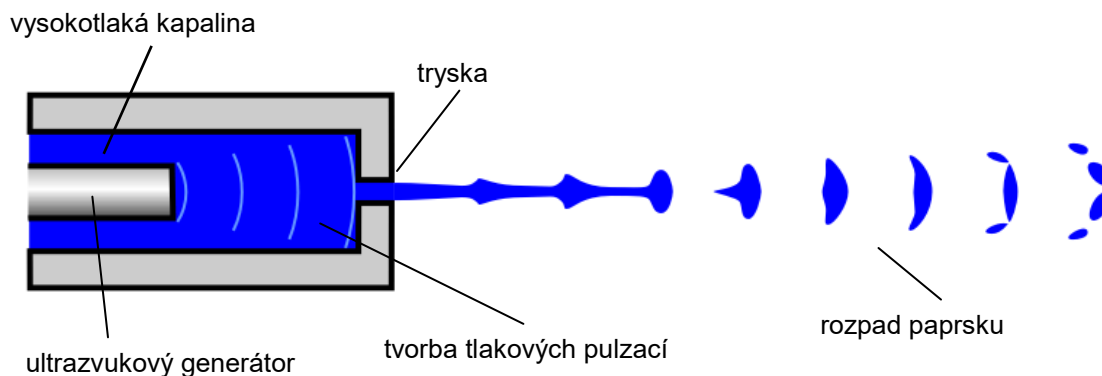
3 MODULOVANÝ PULZUJÍCÍ VODNÍ PAPERSEK POUŽITÝ PŘI EXPERIMENTECH

V předchozí kapitole jsem obecně naznačil několik možných způsobů generování pulzujících paprsků či jednotlivých pulzů. V této kapitole se budu detailně zabývat konkrétním uspořádáním pulzujícího vodního paprsku, které bylo použito při mých experimentech v rámci disertační práce, včetně mechanismů působení pulzujícího vodního paprsku při jeho dopadu na materiál a použitých zařízení. Dále prezentovaná technologie pulzujícího vodního paprsku byla vyvinuta v Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. (ÚGN) v Ostravě.

3.1 FORMOVÁNÍ PAPERSKU

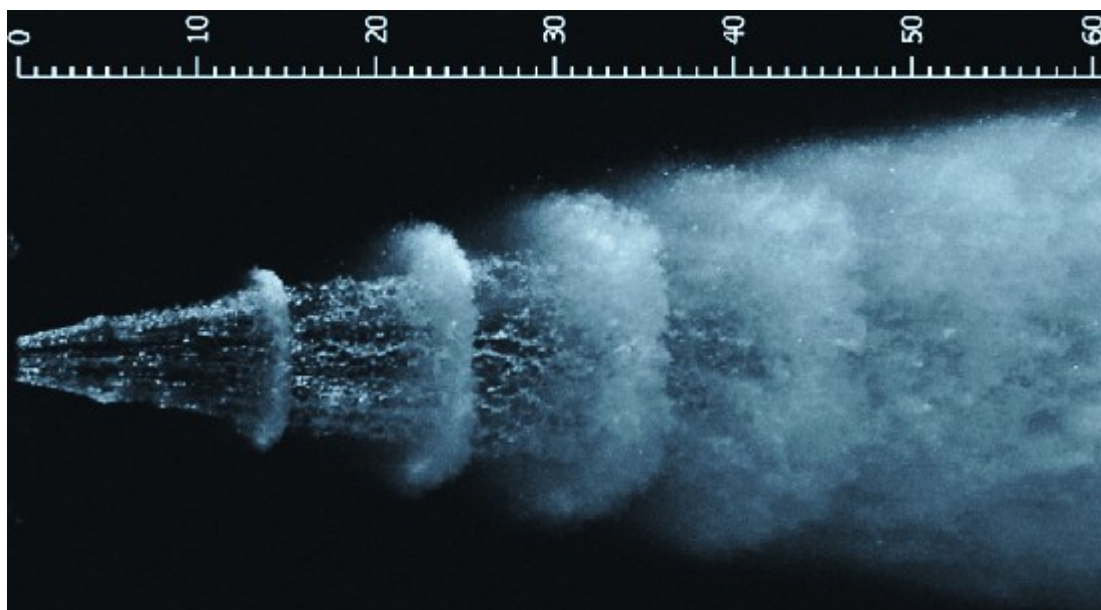
V současnosti existuje několik typů zařízení, které mohou generovat modulovaný pulzující vodní paprsek. Kromě vnitřních mechanických modulátorů průtoku [31], různých typů Helmholtzova oscilátoru [32] či samorezonujících trysek [33] byly zkoumány také ultrazvukové trysky [17], [34]. Hlavním nedostatkem všech prezentovaných zařízení je velmi nízká životnost pohyblivých prvků modulátorů průtoků, nízká úroveň modulace u hydrodynamických generátorů a nutnost používat speciální pracovní nástroje, dále pak vysoké opotřebení součástí trysek v důsledku intenzivní kavitační eroze a silná závislost úrovně modulace na nastavení pozice vibrujícího hrotu v ultrazvukové trysce. Výzkum různých způsobů vytváření pulzujícího vodního paprsku přispěl ke vzniku nové originální metody, která byla vyvinuta na ÚGN a posléze patentována. Tato metoda je založena na vytváření akustických vln působením akustického budiče na tlakovou kapalinu a jejich přenosu vysokotlakým systémem k trysce.

Experimentálně bylo ověřeno, že generováním dostatečně velkých tlakových pulzací tlakové kapaliny před výstupem z trysky (tzv. modulací) je možno vytvářet pulzující vodní paprsek. Pulzující paprsek vystupuje z trysky jako paprsek kontinuální a do pulzů se formuje až v určité vzdálenosti od výstupu z trysky. Díky tlakovým pulzacím vytéká kontinuální proud z trysky proměnnou rychlostí. Rychlejší části paprsku v určité vzdálenosti od výstupu z trysky „dostihnou“ části pomalejší, čímž se původně kontinuální paprsek rozčlení na jednotlivé pulzy [2]. Na Obr. 8 je znázorněn princip tvorby pulzujícího vodního paprsku.



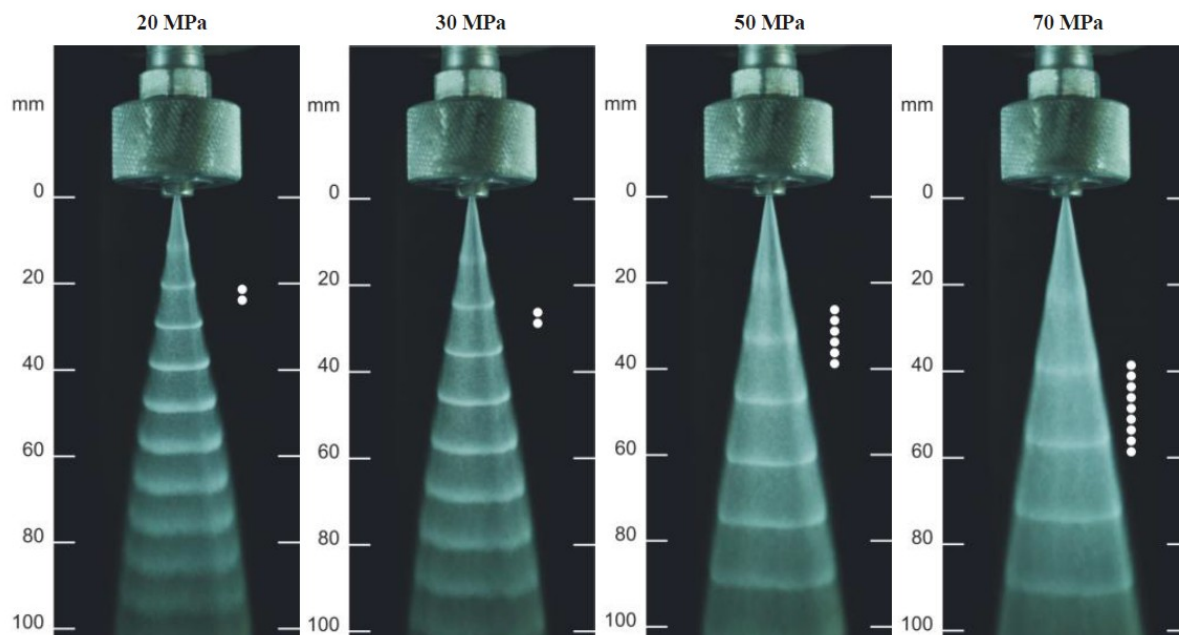
Obr. 8 Princip tvorby pulzujícího vodního paprsku [27].

Obr. 9 zachycuje pulzující vodní paprsek vycházející z trysky jako kontinuální proud vody (vzdálenost zhruba 0 až 20 mm od trysky), který se v určité vzdálenosti od trysky (20 až 40 mm) formuje do jednotlivých shluků. V konečné fázi se pak paprsek rozpadá vlivem okolní atmosféry na drobné kapičky (40 až 60 mm).



Obr. 9 Pulzující plochý vodní paprsek generovaný tlakem 20 MPa (stupnice reprezentuje vzdálenost od výstupu z trysky v mm) [35].

Na formování pulzujícího vodního paprsku a jeho desintegrační účinky má velký vliv nejen ultrazvukový generátor, ale i tvar trysky a tlak vody. Na Obr. 10 jsou zobrazeny pulzující vodní paprsky generované při čtyřech různých tlacích vody. S rostoucím tlakem se zvětšuje i vzdálenost od trysky, ve které má PWJ maximální erozní účinky.



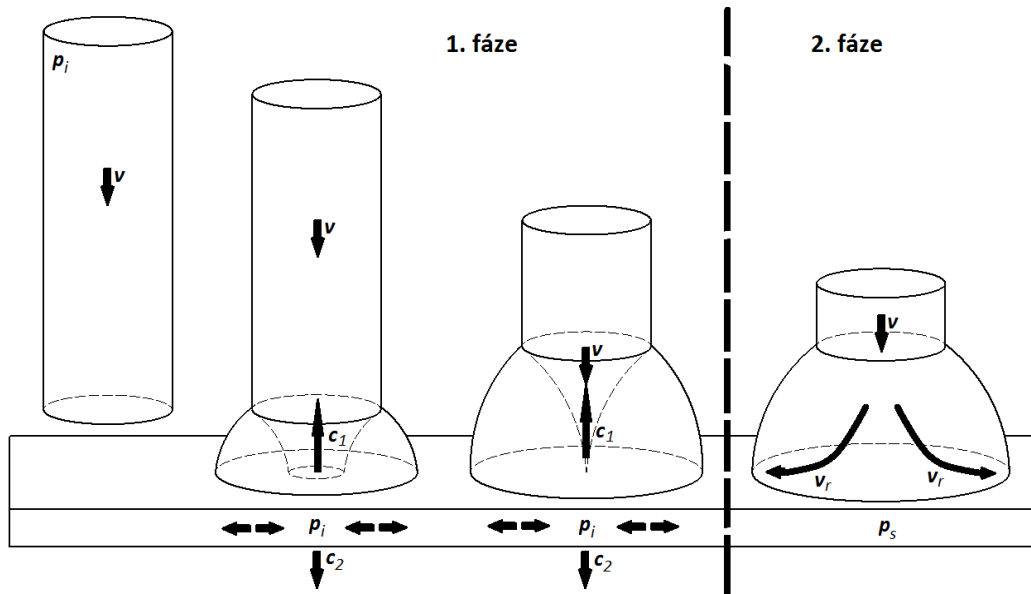
Obr. 10 Pulzující ploché vodní paprsky generované při různých tlacích (ekvivalentní průměr trysky* 1,1 mm, úhel rozstříku 10°). Stupnice vlevo udává vzdálenost od trysky v mm. Tečky označují rozsah vzdáleností od trysky s maximálními erozními účinky paprsku [30].

3.2 PRINCIP PŮSOBENÍ PAPERSKU

Při střetu vysokorychlostní kapaliny s povrchem obrobku může dojít k vážnému poškození povrchu materiálu i jeho vnitřní struktury. Při dopadu kapaliny pohybující se vysokou rychlostí na pevný povrch totiž vzniká krátkodobý přechodový jev, který probíhá ve dvou fázích, viz Obr. 11.

První fáze dopadu kapaliny trvá řádově několik mikrosekund a odpovídá době potřebné k přesunutí vlny poklesu tlaku z místa vnějšího kontaktu paprsku a dopadové plochy do středu dopadajícího paprsku. V druhé fázi dochází ke snížení tlaku, kdy po dopadu sloupce vody je následně tlak nulový [34].

* Velikost plošného průřezu otvoru ploché trysky odpovídající velikosti plošného průřezu otvoru válcové trysky.



Obr. 11 Fáze dopadu kapaliny na pevný povrch [21].

V první fázi, při dopadu kapaliny pohybující se vysokou rychlostí na tuhé těleso, se kapalina chová jako stlačitelná a generuje díky tzv. hydraulickému rázu (water hammer) impaktní tlak p_i (1),

$$p_i = \frac{v\rho_1c_1\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

kde v je rychlost dopadu kapaliny, ρ_1 a ρ_2 jsou hustoty a c_1 a c_2 rychlosti šíření rázové vlny v kapalině a pevné látce. Impaktní tlak p_i zodpovídá za velkou část poškození způsobeného nárazem kapaliny na pevný povrch. Impaktní tlak p_i je v závislosti na tlaku před tryskou přibližně 4krát až 20krát vyšší než tlak stagnační p_s . [35]

Pro výpočet impaktního tlaku generovaného nárazem vysokorychlostní kapaliny na pevný povrch je nutné použít správné hodnoty rychlostí šíření rázové vlny c_1 a c_2 . Obecně je rychlost šíření rázové vlny c vztažena k akustické rychlosti v_s (tj. rychlosti šíření zvuku) následujícím vztahem

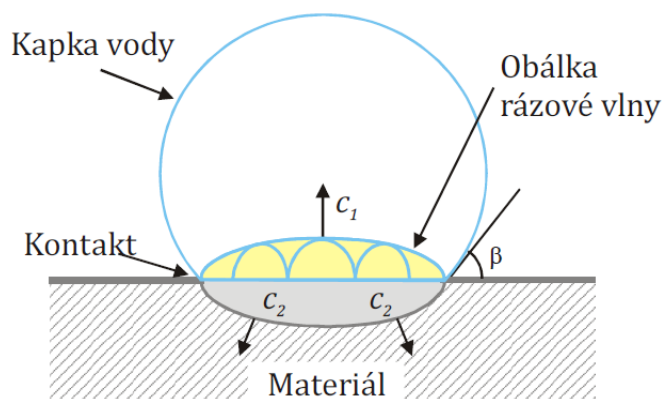
$$c = v_s + iv \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

kde konstanta i má hodnotu 2 pro vodu dopadající rychlostí do $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [36]. Akustická rychlost pro vodu, v_s je přibližně $1480 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [37].

Pro většinu kovů jsou hodnoty ρ_2 a c_2 o řád větší než hodnoty ρ_1 a c_1 pro vodu. Pokud tedy kapalina pohybující se vysokou rychlostí dopadá na kovový povrch, je možno velikost impaktního tlaku vyjádřit s dostatečnou přesností jako

$$p_i = \rho_1 c_1 v \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Na Obr. 12 je znázorněno počáteční stádium nárazu kapky vody na pevný materiál, kdy se hranice kontaktu (rozhraní vzduch – voda – pevný materiál) pohybuje rychleji než rychlost šíření rázové vlny v kapalině. Kapalina pod obálkou rázové vlny je komprimována a materiál pod touto plochou je vystaven vysokému tlaku [38].



Obr. 12 Schéma dopadu kapky vody na povrch materiálu [38].

Podle Thomase & Bruntona [39] nezávisí velikost impaktního tlaku na geometrii kapky. Doba jeho působení $\Delta\tau$ (4) je velmi krátká a je ovlivněna velikostí a tvarem dopadající kapky nebo čela paprsku. Odpovídá době, po kterou se šíří vlna poklesu tlaku z místa vnějšího kontaktu paprsku a dopadové plochy do středu dopadajícího paprsku. Dobu působení impaktního tlaku je možno vyjádřit následujícím vztahem

$$\Delta\tau = \frac{3rv}{2c_1^2} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

kde r je poloměr zakřivení kapky nebo válce (kapaliny) v místě kontaktu s dopadovou plochou [40].

Druhá fáze dopadu kapaliny nastává po odeznění impaktního tlaku. V okamžiku, kdy je překročena mez tlakové deformace kapaliny, kapalina začíná proudit radiálně kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy. V průběhu druhé fáze dopadu se

kapalina chová jako nestlačitelná a tlak v centrální ose paprsku poklesne na mnohem nižší tzv. Bernoulliho stagnační tlak p_s , (5) který pak trvá relativně dlouhou dobu. Ten je dán kinetickou energií objemové jednotky

$$p_s = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

Mez tlakové deformace kapaliny lze vyjádřit jako

$$\frac{v}{c_1} = \sin \beta \quad [-] \quad (6)$$

kde β je úhel, který svírá povrch kapky s povrchem materiálu, viz Obr. 12 [38].

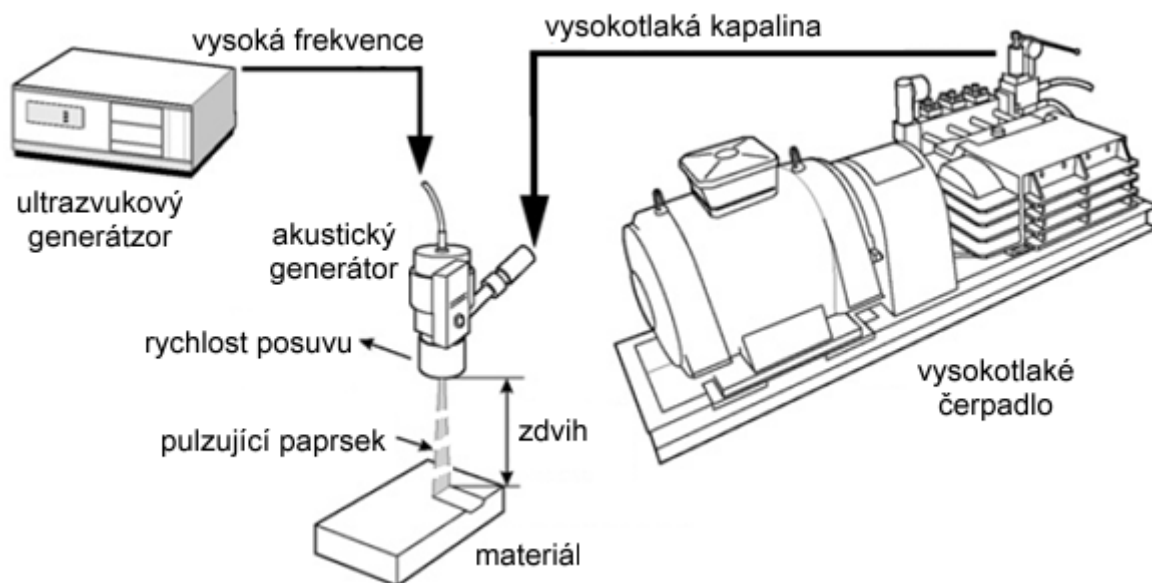
Rychlost radiálního toku kapaliny po povrchu materiálu je ovlivněna tvarem čela paprsku. V případě, že čelo paprsku svírá s povrchem materiálu nenulový úhel, může být rychlost toku kapaliny podél povrchu až pětinašobně vyšší než je dopadová rychlost paprsku [39]. Při dopadu sférické kapky (anebo sférického čela pulzujícího paprsku) k výše uvedenému zvyšování radiální rychlosti bude docházet, protože nenulový úhel rozhraní kapalina/pevná látka je vždy zajištěn. V důsledku radiálního toku kapaliny působí na povrch dezintegrovaného materiálu nejen normálové síly od dopadu paprsku, ale i síly smykové, vyvolané vysokorychlostním prouděním kapaliny po povrchu. Je-li povrch nerovný či jakkoliv porušený, radiální proudění kapaliny působící na tyto nerovnosti může vyvolat tak vysoké smykové síly, že jsou schopny vytvořit na drsném povrchu i vysoce pevných materiálů lokální smykové trhliny [38].

Výhodou pulzujícího kapalinového paprsku oproti kontinuálnímu paprsku je skutečnost, že při dopadu jednotlivých pulzů se na dopadové ploše cyklicky generuje impaktní tlak, který je několikanásobně vyšší než stagnační tlak generovaný dopadem kontinuálního paprsku za jinak stejných podmínek. Navíc dochází také k únavovému a smykovému namáhání materiálu cyklickým zatěžováním dopadové plochy a působením radiálního vysokorychlostního toku kapaliny po povrchu. To pak dále zvyšuje účinnost pulzujícího kapalinového paprsku v porovnání s kontinuálním paprskem [35].

Studium topografie povrchu materiálů vytvořených pulzujícím vodním paprskem je důležité pro pochopení erozivních účinků této nekonvenční technologie obrábění. Jednou z cest výzkumu je sledování závislosti mezi technologickými parametry a nově vzniklým povrchem obráběného materiálu.

3.3 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

Zařízení pro generování pulzujícího vodního paprsku v ÚGN v Ostravě (viz Obr. 13), které bylo využito k provedení experimentu, je tvořeno vysokotlakým čerpadlem, vysokotlakým vedením pro rozvod vody, ultrazvukovým generátorem, akustickým generátorem, vodní tryskou a polohovacím zařízením (robotickým manipulátorem).



Obr. 13 Schéma sestavy zařízení na generování PWJ v ÚGN v Ostravě [41].

3.3.1 Vysokotlaké vodní čerpadlo

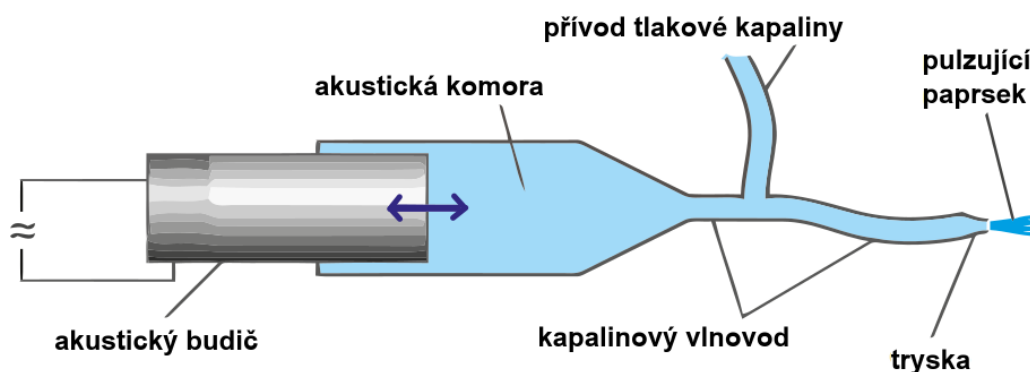
Pro technologii pulzujícího vodního paprsku, která je využita v disertační práci, bylo použito pětipístové plunžrové čerpadlo HDP 253 firmy Hammelmann o maximální tlaku 160 MPa a maximálním průtoku 67 litrů vody za minutu (Obr. 14). Do vlastního akustického generátoru pulzujícího paprsku se tlaková voda z čerpadla přivádí pomocí ohebných vysokotlakých hadic.



Obr. 14 Vysokotlaké plunžrové čerpadlo Hammelmann HDP 253 [42].

3.3.2 Vysokotlaký systém s integrovaným akustickým generátorem

Patentovaný způsob tvorby pulzací [25] představuje efektivní přenos vysokofrekvenční pulzační energie vysokotlakým systémem na větší vzdálenosti. Je založen na generování akustických vln působením akustického převodníku na stlačenou kapalinu a jejich přenos přes tlakový systém k trysce. Vysokotlaký systém s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzací se skládá z válcové akustické komory připojené ke kapalinovému vlnovodu. Ten je připojen ke zdroji tlakové kapaliny a na konci je opatřen tryskou. Schematický náčrt akustického generátoru tlakových pulzací je uveden na Obr. 15.



Obr. 15 Schéma vysokotlakého systému s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzací [2].

Tlakové pulzace generované akustickým budičem v akustické komoře naplněné tlakovou kapalinou jsou zesilovány mechanickým zesilovačem pulzací a přiváděny kapalinovým vlnovodem do trysky. K přenosu energie pulzů z generátoru do trysky se využívá stlačitelnost kapaliny spolu s naladěním akustického systému [43].

Dřívější laboratorní zkoušky prokázaly minimálně dvojnásobně vyšší výkonnost pulzujícího vodního paprsku při rozpojování materiálů v porovnání s kontinuálním paprskem stejných parametrů [44], v závislosti na porušovaném materiálu a jeho konkrétním stavu však může dosahovat i daleko vyšších hodnot 0.

3.3.3 Ultrazvukový generátor

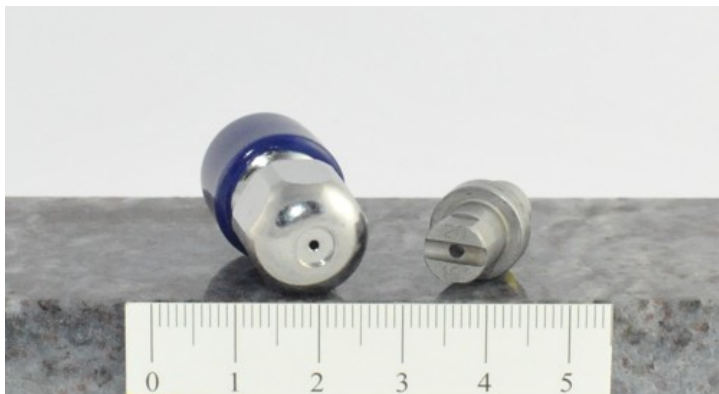
Zařízení pro generování pulzujícího vodního paprsku v ÚGN v Ostravě využívá ultrazvukových generátorů firmy Ecoson. Generátor použitý při experimentech má budicí frekvenci 20 kHz a maximální výkon 800 W (Obr. 16) [46].



Obr. 16 Ultrazvukový 20 kHz generátor Ecoson.

3.3.4 Trysky

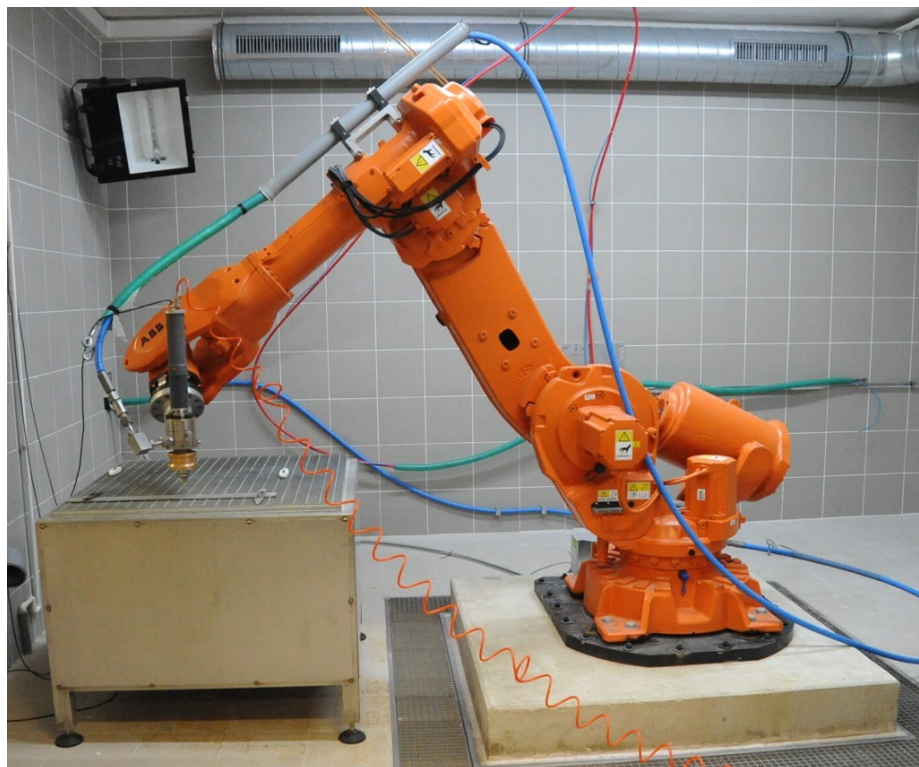
Tryska je zásadní částí vysokotlakého řetězce, kde se z vysokotlaké kapaliny vytváří vysokorychlostní paprsek. Podle typu požadovaného paprsku a jeho očekávané funkce se volí trysky různých velikostí a tvarů [47]. Životnost trysek, pak závisí především na konstrukčním materiálu a na pracovním tlaku. Při experimentech popisovaných v této práci byly použity ploché trysky firmy Hammelmann s ekvivalentními průměry 1,1 mm a 2,0 mm a válcová tryska StoneAge Attack o průměru 1,60 mm (viz. Obr. 17) [48].



Obr. 17 Běžná válcová tryska StoneAge Attack o průměru 1,60 mm (vlevo) a tryska k vytváření plochého paprsku Hammelmann s ekvivalentním průměrem 2,0 mm (vpravo).

3.3.5 Polohovací zařízení

Pro přesné polohování a pohyb řezné hlavy lze u vysokorychlostních paprsků použít různých manipulátorů, jako například XY stolů nebo robotů. Při svých experimentech jsem pro manipulaci s řeznou hlavou vodního paprsku využil robotický manipulátor ABB IRB 6640-180/2.55 Master (Obr. 18) [49]. Technické specifikace polohovacího zařízení jsou uvedeny v Tab. 3 v Příloze č. 1.



Obr. 18 Robotizované pracoviště pro výzkum vlastností a chování vodních paprsků.

4 PARAMETRY POVRCHŮ A JEJICH MĚŘENÍ

Nově vytvářené povrchy vznikají kombinací nastavení různých technologických podmínek při obrábění. Funkčnost povrchu je ovlivněna výrobními metodami, jež zanechávají na povrchu texturu charakteristickou pro danou technologii obrábění [50]. Na každý funkční povrch jsou kladeny požadavky na rozměrovou a geometrickou přesnost a na jeho jakost. Stav a kvalita povrchu obrobeneho materiálu pak mají vliv na únavovou pevnost, odolnost proti opotřebení, protikorozi stabilitu, spolehlivost případně hlučnost při vzájemném pohybu apod. Nevhodně zvolená jakost povrchu může vést ke zbytečnému zvyšování výrobních nákladů nebo i k poruše.

Vývoj nových měřicích zařízení a rozvoj moderních metod měření rozšiřuje oblasti sledování vlastností a textury povrchů. Následující kapitoly jsou věnovány dvourozměrným parametrům povrchu, použitým měřicím metodám a zařízením.

4.1 2D PARAMETRY POVRCHU

Parametry profilu povrchu zajišťují kvantifikovanou formu popisu vlastností topografie povrchu. Mezi tyto parametry patří tzv. P-parametry (parametry vypočítané ze základního profilu), R-parametry (parametry vypočítané z profilu drsnosti) a W-parametry (parametry vypočítané z profilu vlnitosti). Jednotlivé parametry profilu povrchu se podle normy ČSN EN ISO 4287 [51] dále dělí na výškové parametry, délkové parametry, tvarové parametry a na křivky a odvozené parametry. Ve strojírenské praxi se pro hodnocení kvality povrchu využívají především R-parametry profilu drsnosti. Některé z nich jsou v dalším textu podrobněji definovány podle normy ČSN EN ISO 4287 [51]:

Největší výška výstupku profilu R_p je výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky.

Největší hloubka prohlubně R_v je hloubka nejnižší prohlubně Z_v profilu v rozsahu základní délky

Největší výška profilu R_z (7) je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r .

$$R_z = Z_p + Z_v \quad (7)$$

kde je: Z_p výška největšího výstupku v rozsahu základní délky l_r [μm];

Z_v hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r [μm].

Průměrná aritmetická úchylna profilu Ra (8) je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky lr . Patří mezi nejčastěji používané charakteristiky drsnosti povrchu ve strojírenské praxi, i když vypovídací schopnost parametru Ra je nízká, jelikož nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (8)$$

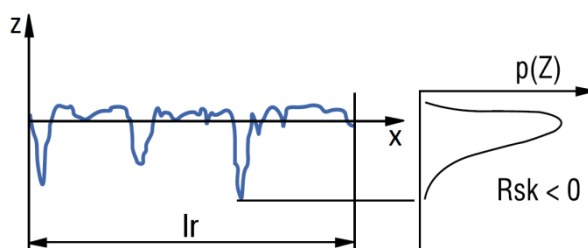
Průměrná kvadratická úchylna profilu Rq (RMS) (9) je kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky lr . Hodnota Rq je citlivější na nežádoucí výstupky a prohlubně kontrolovaného povrchu, a proto zpravidla ukazuje vyšší hodnoty než parametr Ra . Je definována zápisem

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^2(x)| dx} \quad (9)$$

Šikmost posuzovaného profilu Rsk (10) je vyjádřena podílem průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky (Obr. 19)

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right] \quad (10)$$

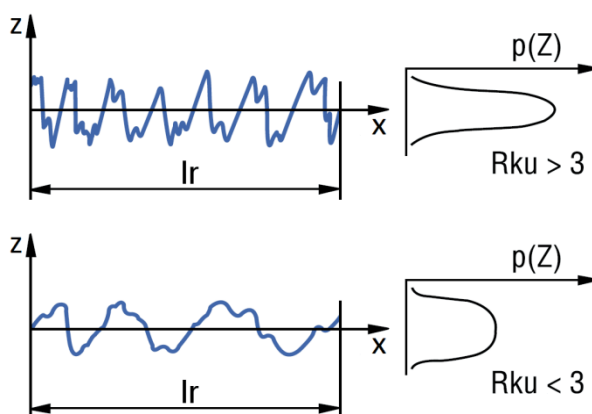
Tato veličina udává posunutí funkce hustoty pravděpodobnosti oproti Gaussovu normálnímu rozložení (Obr. 19) a umožňuje tak lépe rozlišit povrchy se stejnou hodnotou Ra z hlediska tvaru profilu. Je-li vrchol této funkce posunut směrem k výstupkům nerovností ($Rsk < 0$), vypovídá to o větších a hlubších prohlubních na povrchu, zatímco je-li vrchol posunut směrem k prohlubním ($Rsk > 0$), ukazuje to na povrch s více a členitějšími výstupky. Negativní odchylka parametru Rsk odpovídá dobrým vlastnostem nosnosti profilu [51].



Obr. 19 Šikmost posuzovaného profilu Rsk [52].

Špičatost posuzovaného profilu Rku (11) 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 souřadnic profilu, kdy parametr $Rku = 3$. Pro profil s ostřejšími výstupky a rýhy je $Rku > 3$ a naopak u profilu s oblými a méně častými výstupky je $Rku < 3$, viz (Obr. 20).

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (11)$$



Obr. 20 Špičatost posuzovaného profilu Rku [52].

4.2 POUŽITÉ MĚŘICÍ METODY

Pro vyhodnocení povrchu zkoumaných vzorků a zjištění příslušných parametrů byly využity nedestruktivní bezdotykové optické metody měření, které je možné provést opakovaně, aniž by tím došlo k poškození studovaného povrchu. Optické metody jsou pomocí světelného svazku schopny nepřímou kopírovat zdrsňený povrch a dávat velký počet technicky užitečných informací o jeho charakteru. Optická měření jsou často jednodušší a rychlejší, než u kontaktních profilometrů. Používají se především k měření menších ploch, v rozsahu od několika mm až po mikronovou oblast.

K analýze povrchů byl použit optický profilometr MicroProf FRT, konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100, případně optický mikroskop Nikon Eclipse 80i. Všechna zařízení se nacházejí v Ústavu geoniky v Ostravě.

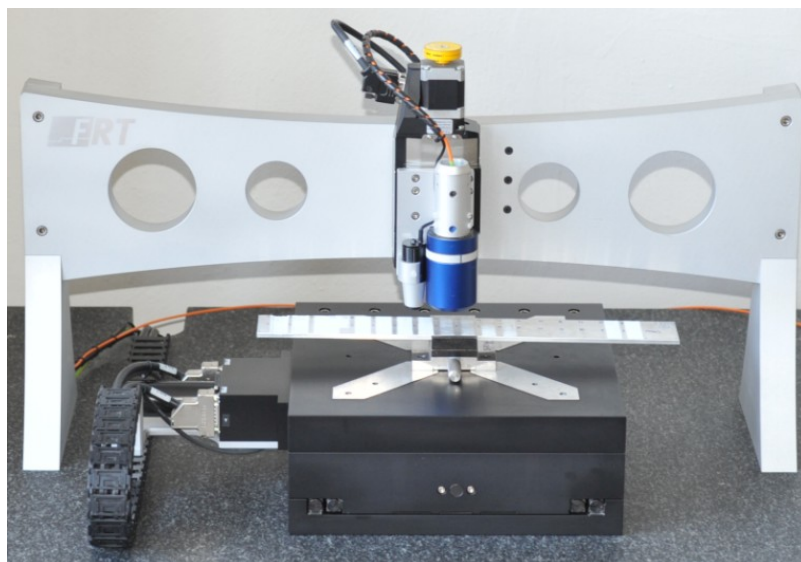
4.2.1 Optický profilometr MicroProf FRT

Optický profilometr MicroProf FRT (viz. Obr. 21), je zařízení, které umožňuje měření nejen profilu povrchu, ale i skenování plochy zkoumaného povrchu materiálu. Měřicí senzor je pevně umístěn na konstrukci zařízení a pohybuje se pouze v ose z. Vzorek je umístěn na odměřovacím stolku, který zajišťuje přesný pohyb definovanou rychlostí ve směru os x a y.

Získaný trojrozměrný obraz topografie povrchu umožňuje provést rozsáhlejší analýzu textury povrchu, jako je například výpočet objemového úběru materiálu. Z měřených profilů struktury povrchu byly vypočteny vybrané výškové parametry drsnosti.

Optická metoda je založena na principu bílého světla, které je ze zdroje přiváděno optickým vláknem ke spojné čočce. Spojná čočka zaostřuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztažnou rovinou. Po dopadu na studovaný povrch vzorku je zaostřené světlo odraženo zpět do čočky a optickým vláknem přivedeno do spektrometru. Hodnota vlnové délky maxima intenzity světla vystupujícího ze spektrometru je pomocí kalibrační tabulky převedena na hodnotu vzdálenosti mezi senzorem a povrchem vzorku. Tím je získávána informace o výškové nerovnosti povrchu.

Technické specifikace prezentovaného optického profilemetru MicroProf FRT jsou uvedeny v Tab. 1 v Příloze č. 1.



Obr. 21 Optický profilometr MicroProf FRT

4.2.2 Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100

Základním principem konfokálního mikroskopu LEXT OLS 3100 (viz Obr. 22) je tvorba obrazu bod po bodu, tzv. řádkováním. Jedná se o bezkontaktní optickou metodu. Pomocí řádkování a přesně definovanému posuvu objektivu v ose Z jsou snímány optické řezy v rovině XY. Konfokální obrazy jsou vždy zaostřené a představují jednotlivé optické řezy vzorkem. Přesného zobrazení dosahuje konfokální mikroskop LEXT OLS 3100 díky použití laserového svazku o vlnové délce 408 nm s optickými prvky uzpůsobenými pro tuto krátkou vlnovou délku tak, aby se optimalizovala kvalita zobrazení a omezily se případné odchylky. Složení trojrozměrných obrazů vychází z možnosti postupného snímání desítek až stovek optických řezů v ose Z. Konfokální mikroskop LEXT využívá navíc novou inteligentní softwarovou funkci výpočtu ohnisek, která k vytvoření obrazu celé plochy vzorku vybírá pouze její nejlépe zobrazené části, čímž zobrazování nejen výrazně urychluje, ale umožňuje také získat velmi přesný trojrozměrný obraz. [53]

Prezentovaný konfokální laserový rastrovací mikroskop umožňuje zobrazení povrchů materiálů a součástí od přehledového zobrazení, které je složené z více zorných polí, až po submikronové s výjimečnou rozlišovací schopností v ploše 120 nm a v řezu 40 nm sledovaného povrchu. Měřicí zařízení dále umožňuje získat simultánní 3D zobrazení vzorků ve skutečných barvách tím, že kombinuje laserové trojrozměrné zobrazení s plnobarevným zobrazením obrazu. Bližší technické specifikace konfokálního mikroskopu LEXT OLS 3100 jsou uvedeny v Tab. 2 v Příloze č. 1.



Obr. 22 Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 na ÚGN [53].

4.2.3 Optický mikroskop Nikon Eclipse 80i

Optický mikroskop umožňuje rozeznat struktury, které nejsou viditelné pouhým okem. Skládá se z osvětlovací části (zdroj světla, kondenzor, clona), mechanické části (podstavec, stojan a stolek s křížovým posunem) a optické části – objektivů. Pro snímání mikroskopických obrazů byl použit optický polarizační mikroskop Nikon Eclipse 80i, vybavený motorizovaným skenovacím stolem Märzhäuser Scan-24-410 a barevnou CCD kamerou NIKON DS-5M, viz Obr. 23. Přehledové mikroskopické obrazy vzorků byly pořízeny v odraženém světle optického mikroskopu Nikon Eclipse 80i, technikou světlého pole, automatickým plošným skládáním obrazových polí, s využitím systému pro zpracování a analýzu obrazu NIS Elements AR v. 3.0.



Obr. 23 Optický polarizační a fluorescenční mikroskop Nikon Eclipse 80i s motorizovaným skenovacím stolem Märzhäuser Scan-24-410 a systémem pro zpracování a analýzu obrazu NIS Elements [54].

5 EXPERIMENT I - STANOVENÍ EROZNÍCH ÚČINKŮ STACIONÁRNÍHO PWJ

Veškeré experimentální práce byly realizovány na zařízeních ÚGN (viz předchozí kapitoly). Cílem úvodního experimentu bylo stanovení erozních účinků stacionárního pulzujícího vodního paprsku dopadajícího na povrch vzorku z korozivzdorné oceli. Byl zkoumán vliv opakovaných impaktů pulzů vody a rychlosti dopadu (tj. pracovního tlaku) na erozi kovového povrchu. Byl analyzován a diskutován vývoj erozní stopy v závislosti na počtu impaktů.

Experimentální zařízení pro zkoumání eroze účinků pulzujícího vodního paprsku dopadajícího na povrch kovových vzorků se skládalo z vysokotlakého čerpadla, akustického generátoru pulzujícího paprsku a XY stolu pro přesné umístění trysky nad testovanými vzorky. Povrchová eroze vzorků byla hodnocena optickým profilometrem a mikroskopy. [55]

Vysokotlaká voda byla dodána do generátoru pulzujícího vodního paprsku pomocí plunžrového čerpadla. Generátor byl vybaven komerčně dostupnou tryskou StoneAge Attack o průměru 1,60 mm. Pracovní tlak byl měřen před vstupem do generátoru pomocí tlakového snímače Kristal RAG25A1000BC1H.

Byl použit generátor pulzujícího vodního paprsku navržený pro maximální provozní tlak 100 MPa. Generátor byl vybaven piezoelektrickým převodníkem vibrací na provozní frekvenci zhruba 20 kHz a ultrazvukově řízen generátorem Ecoson WO-UG_630-20 s maximálním výstupním výkonem 800 W. Generátor umožňoval přesné nastavení doby provozu od 1 ms s přesností na 1 ms. Tato funkce byla použita pro kontrolu počtu impulzů ovlivňujících povrch testovacího vzorku.

Vzorky narušené pulzujícím vodním paprskem byly zkoumány pomocí optického profilometru MicroProf FRT k určení povrchových vlastností erodovaných vzorků, vzhled erodovaných míst byl studován pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLS 3100 a optickým mikroskopem Nikon Eclipse 80i.

5.1 ZKUŠEBNÍ MATERIÁL

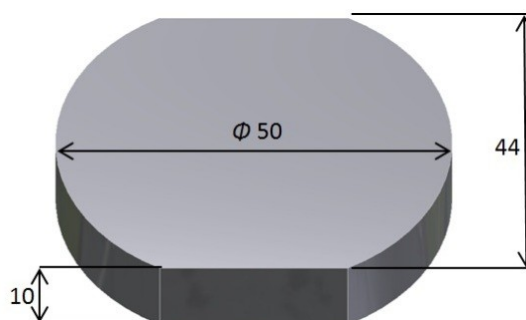
Zkušební vzorky byly připraveny z austenitické korozivzdorné oceli X6CrNiMoTi17-12-2 (AISI 316Ti, DIN 1.4571). Tato chromnikmolybdenová ocel má dobré mechanické vlastnosti při lisování, ohýbání, tažení a je žárovečná (max. teplota při užití 650°C). Obsah molybdenu zajišťuje vyšší odolnost proti roztokům kyselin, zabraňuje vzniku rizika hluboké místní koroze a má vyšší mez kluzu i pevnosti. Používá se na korozně více namáhané konstrukce v prostředí se zvýšenou přítomností chloridů, na chemická potrubí či konstrukce v přímořském prostředí [56]. Základní vlastnosti oceli jsou uvedeny v Tab. 1 a Tab. 2. Pro vyřezání zkušebních vzorků z 10 mm plechu byla použita technologie abrazivního vodního paprsku z důvodu eliminace tepelného ovlivnění materiálu. Tvar a rozměry zkušebních vzorků jsou uvedeny na Obr. 24. K broušení horního povrchu vzorků byla použita standardní magnetická bruska. Následně byla použita metalografická bruska Struers Tegra Pol 35 a brusivo o velikosti zrn 320, 800, 1000 a 1200. Nakonec byl horní povrch vzorku leštěný diamantovou pastou o velikosti zrna 3 μm a 1 μm k dosažení zrcadlového lesku.

Tab. 1 Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli X6CrNiMoTi17-12-2

C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Ti [%]	Mn [%]	Si [%]
0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2 – 2,5	max. 0,7	max. 2	max.1

Tab. 2 Mechanické vlastnosti austenitické korozivzdorné oceli X6CrNiMoTi 17-12-2

Mez kluzu $\sigma_{0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Prodloužení δ_5 [%]	Tvrдость [HB]
>220	500 - 700	>45	215



Obr. 24 Tvar a rozměry testovaného vzorku v milimetrech.

5.2 EXPERIMENTÁLNÍ POSTUP

Vyleštěný povrch vzorku byl po dobu deseti sekund vystaven působení kontinuálního paprsku nastaveného na požadovaný tlak. Během těchto deseti sekund byl zapnut generátor pulzací na přesně stanovenou dobu a poté zase vypnut. Tím se docílilo požadovaného počtu impaktů. Předběžné testy ukázaly, že vystavení povrchu vzorku kontinuálnímu paprsku po dobu 10 sekund neprodukuje žádnou zjiřitelnou erozi vzorku za zkušebních podmínek použitých v experimentu.

Experimenty byly provedeny při provozním tlaku vody 10, 20 a 30 MPa (tomu odpovídající rychlosti paprsku byly přibližně 130, 180 a 220 m·s⁻¹). Vzdálenost trysky od povrchu byla 40 mm pro zkoušky při provozním tlaku 10 MPa a 50 mm pro zkoušky při tlacích 20 a 30 MPa. Tyto vzdálenosti byly určeny jako optimální pro dané experimentální podmínky v předchozích testech. Tlakové pulzace v generátoru pulzujícího vodního paprsku byly vytvořeny při frekvenci 21,25 kHz (odečet z displeje ultrazvukového generátoru), amplituda vibrací ultrazvukové sonotrody ve vysokotlaké vodě byla nastavena na 7 μ m.

Devět oblastí každého vzorku bylo vystaveno působení pulzujícího paprsku podle předem daného schématu. Doba působení pulzujícího vodního paprsku na povrchu byla měněna od 0,05 do 5 sekund. To poskytlo širokou škálu počtu impaktů vodních impulzů na povrchu vzorku, a to od 1060 do 106250 impaktů. Kromě toho byla jedna z oblastí na každém vzorku vystavena působení nepřetržitého (kontinuálního) proudu při stejných parametrech po dobu 10 sekund, aby bylo účinky kontinuálního a pulzujícího paprsku možné porovnat.

Oblasti 5 x 5 mm, které byly předtím vystaveny působení pulzujícího vodního paprsku, byly naskenovány optickým profilometrem MicroProf FRT s rozlišením 5 μ m. Z této oblasti pak byla vybrána dvě pole 2 x 2 mm, na nich zjiřřovány výškové povrchové parametry *Ra* a *Rz* a hodnoty následně zprůměrovány.

Pro získání skutečného trojrozměrného barevného povrchu byl použit konfokální mikroskop. Plochy vystavené působení pulzujícího vodního paprsku byly postupně skenovány při zvětšení 5x, 10x, 20x, 50x a 100x a následně analyzovány (Obr. 25 a Obr. 27). Velikost zobrazené oblasti byla 2,56 x 2,56 mm při pětinasobném zvětšení.

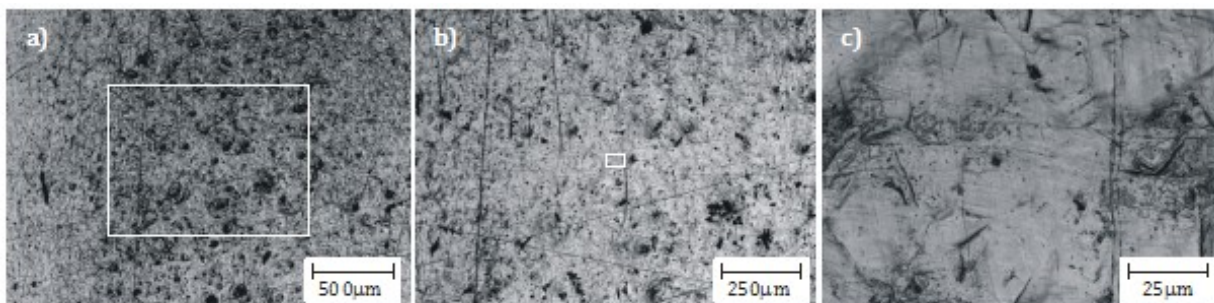
Optický mikroskop Nikon Eclipse 80i vybavený motorizovaným skenovacím stolem Märzhäuser SCAN-24-410 a barevnou CCD kamerou Nikon DS-5M připojenou k PC byl použit k získání mikroskopických obrazů. Ty pak byly automaticky skládány ze 4 x 4 mikroskopických snímků pomocí zpracování a analýzy obrazu systémem NIS Elements v.

2.3. Snímky byly pořízeny v odraženém světle mikroskopu. Touto cestou byly získány velké složené mikroskopické snímky pro vizuální hodnocení povrchu (Obr. 26).

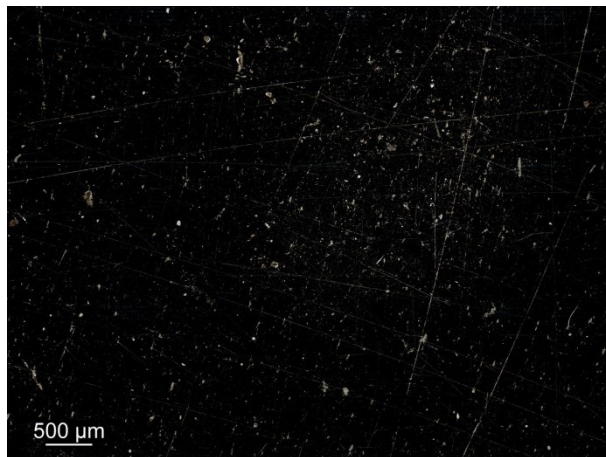
5.3 EROZE OCELOVÉHO POVRCHU PO PŮSOBENÍ PWJ

Z Obr. 25 je patrné, že eroze testované korozivzdorné oceli začíná zdrsňením povrchu, který má podobu drobných povrchových depresí. Některé z nich rychle rostou co do velikosti v důsledku dalších impaktů a objevují se nové. Byl zaznamenán i další efekt deformace - viditelné hranice zrn (viz obr. 5.2c.). Některá erodovaná místa také vykazují plastické deformace, což lze vidět na levém snímku Obr. 27. Pokud se počet impaktů pulzujícího paprsku zvyšuje, povrch zdrsňený prohlubněmi a hranicemi zrn je dále erodován působením impaktního tlaku a smykovým působením vody proudící po povrchu. Objevují se jamky, které se následně rozšiřují a spojují s narůstajícím počtem impaktů, až vytvoří erozní kráter. V této fázi lze erozi charakterizovat významným materiálovým úběrem. Následné opakované dopady pulzujícího vodního paprsku erozní kráter prohlubují. Pravý snímek Obr. 27 znázorňuje vzhled dna erozního kráteru. Vývoj eroze na povrchu vzorku opakovaným působením pulzujícího vodního paprsku od povrchových depresí až k eroznímu kráteru je patrný na Obr. 26.

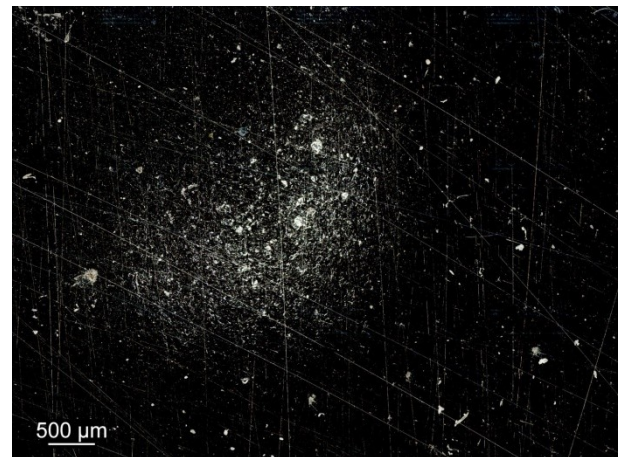
V souladu se zjištěními Thomase & Bruntona [39] lze pozorovat tři fáze eroze způsobené opakovaným dopadem pulzů pulzujícího vodního paprsku. První fázi (nazývanou také jako počáteční inkubační fáze) lze charakterizovat plastickou deformací na povrchu materiálu, kde ještě neprobíhá eroze ve smyslu materiálového úběru. Během druhé fáze se jamky vlivem úběru materiálu rozrůstají a pokrývají oblast dopadu. Ve třetí fázi eroze pak dochází k vytvoření erozního kráteru. Drsnost povrchu se dále nezvyšuje, pouze narůstá objem odebraného materiálu.



Obr. 25 Skutečný obraz povrchu erodovaného vzorku po 2 125 dopadech pulzujícího vodního paprsku znázorňující erodovaná místa při různých zvětšeních. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm [55].



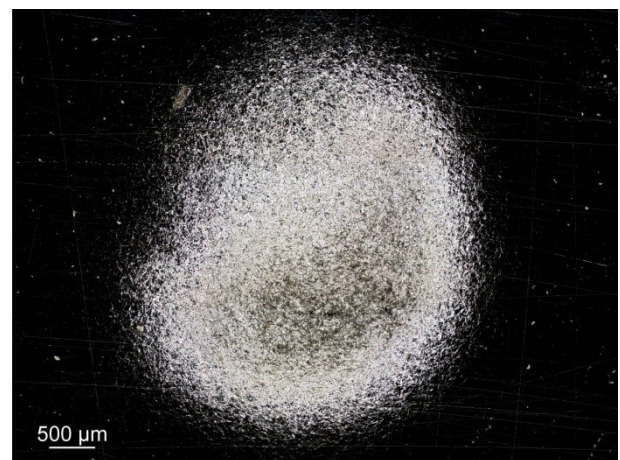
2 125 impaktů



4 250 impaktů



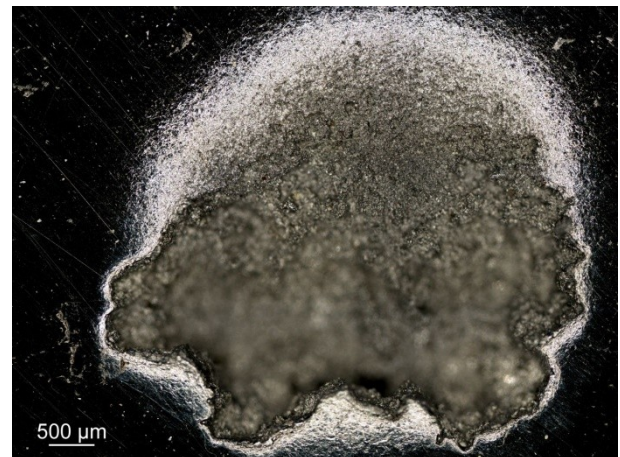
10 625 impaktů



21 250 impaktů

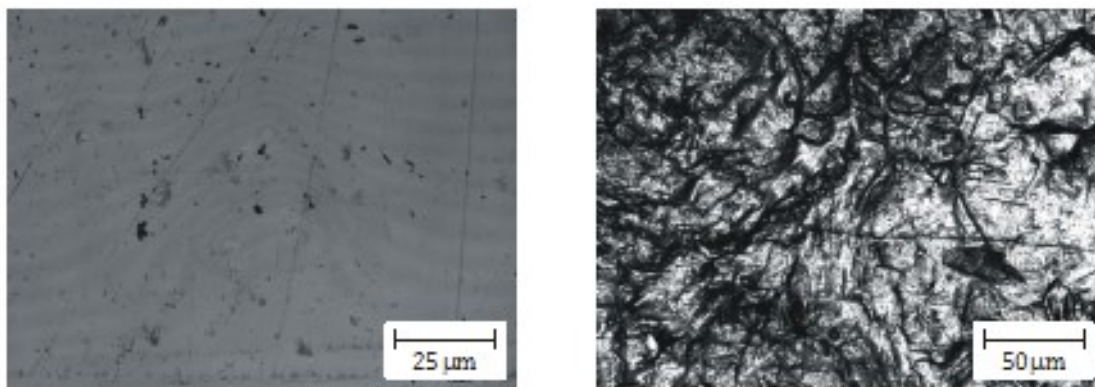


42 500 impaktů



106 250 impaktů

Obr. 26 Vývoj eroze povrchu vzorku po daném počtu impaktů pulzujícího vodního paprsku. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm.



Obr. 27 Skutečný obraz povrchu erodovaného vzorku po 10 625 (vlevo) a 106 250 (vpravo) dopadech pulzujícího vodního paprsku. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm.

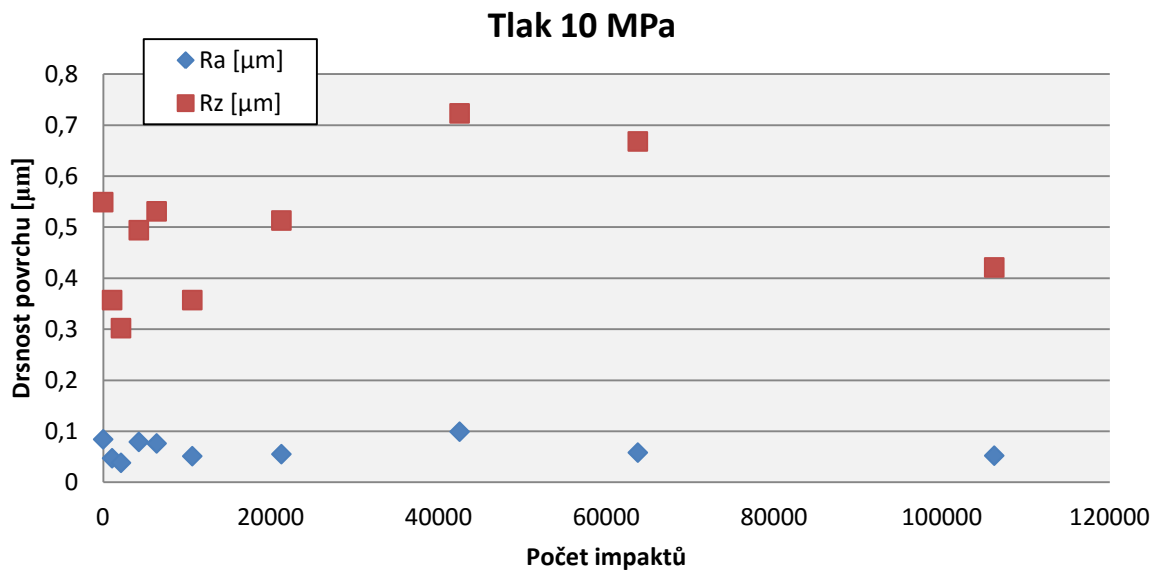
5.4 ANALÝZA POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ

Charakteristický povrch vystavený měnícímu se počtu impaktů pulzujícího vodního paprsku byl vyhodnocen z hlediska topografie povrchu. Výsledky jsou znázorněny na Obr. 28 až Obr. 30. Při pracovním tlaku 10 MPa se ani při 106 250 impaktech pulzujícího paprsku na povrchu neprojevuje žádná významná eroze. Obr. 28 ukazuje téměř konstantní hodnoty R_a a R_z v závislosti na počtu impaktů. Výrazněji se eroze projevuje při pracovním tlaku 20 MPa (Obr. 29). Lze zde sledovat i rostoucí trend drsnosti povrchu v závislosti na počtu impaktů, který vyjadřují regresní rovnice (12) a (13)

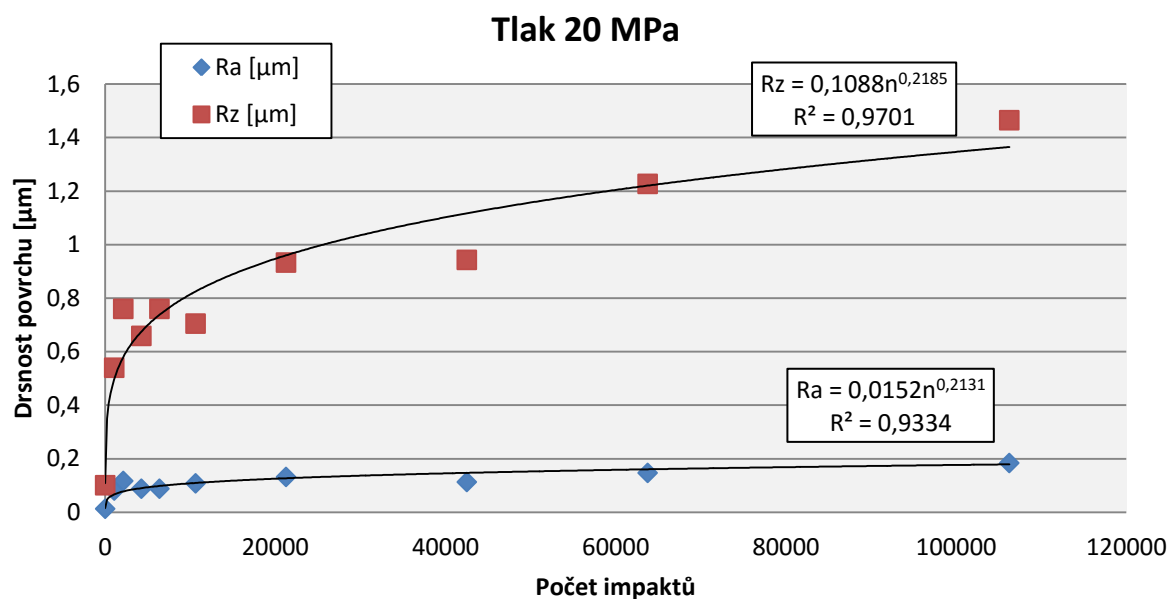
$$R_z = 0,1088 \cdot n^{0,2185} \quad [\mu\text{m}] \quad (12)$$

$$R_a = 0,0152 \cdot n^{0,2131} \quad [\mu\text{m}] \quad (13)$$

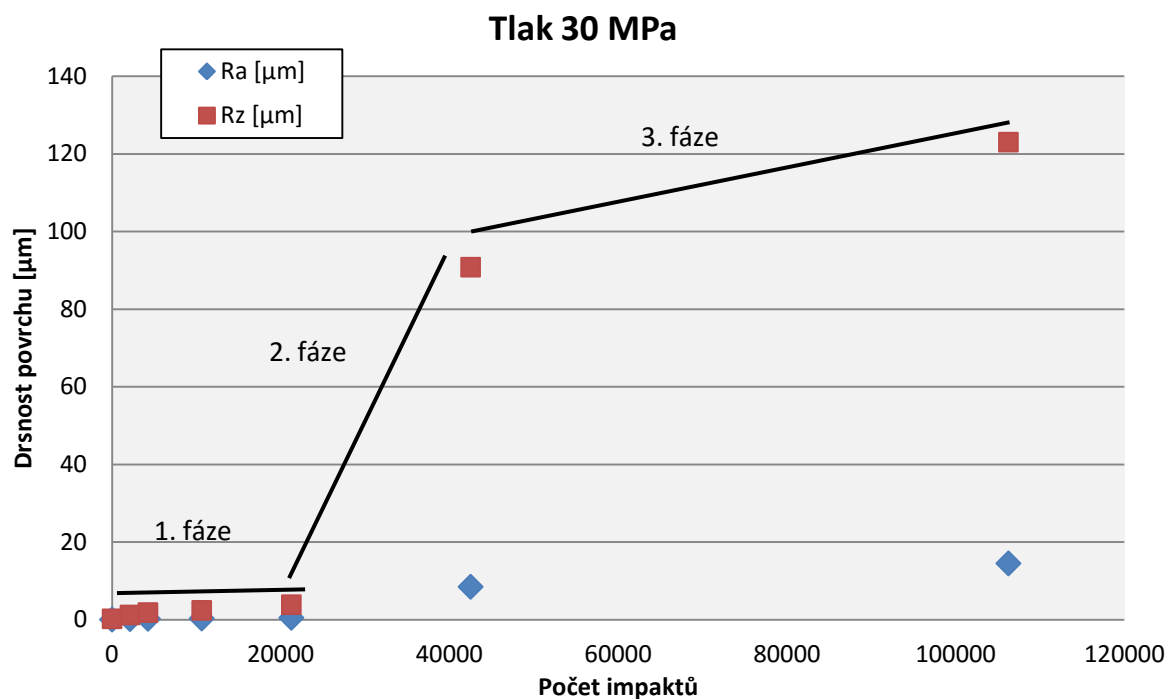
kde n je počet impaktů. Na Obr. 30 je možné rozlišit tři oblasti eroze pro pracovní tlak 30 MPa. První oblast do zhruba 20 000 impaktů vykazuje mírně rostoucí hodnoty R_a a R_z . To odpovídá první fázi eroze. Oblast od 20 000 do 40 000 impaktů je charakterizována prudkým zvýšením hodnot obou parametrů R_a a R_z . To odpovídá druhé fázi eroze, jak je popsáno výše. Třetí oblast (nad 40 000 impaktů) odpovídá třetí fázi eroze. Lze ji charakterizovat zvýšeným materiálovým úběrem a jen mírným zvyšováním hodnot R_a a R_z .



Obr. 28 Vztah mezi výškovými parametry topografie povrchu Ra a Rz a počtem impaktů pulzujícího vodního paprsku na povrch vzorku. Pracovní tlak 10 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 40 mm.



Obr. 29 Vztah mezi výškovými parametry topografie povrchu Ra a Rz a počtem impaktů pulzujícího vodního paprsku na povrch vzorku. Pracovní tlak 20 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm. Regresní rovnice pro $Rz = 0,1088 \cdot n^{0,2185}$ a pro $Ra = 0,0152 \cdot n^{0,2131}$, kde n je počet impaktů.



Obr. 30 Vztah mezi výškovými parametry topografie povrchu Ra a Rz a počtem impaktů pulzujícího vodního paprsku na povrch vzorku. Pracovní tlak 30 MPa, průměr vodní trysky 1,60 mm, vzdálenost trysky od povrchu 50 mm.

5.5 DÍLČÍ ZÁVĚR

Experimentální část zaměřená na stanovení erozivních účinků stacionárního pulzujícího vodního paprsku dopadajícího na povrch vzorku z korozivzdorné oceli prokázala, že eroze způsobená opakovanými dopady pulzující vody se vyskytuje ve třech etapách. Počáteční fáze eroze vykazuje pouze plastické deformace v povrchu. Druhou fází lze charakterizovat tvorbou erozních jamek, jejich sloučením a vznikem erozního kráteru, který pak zvětšuje svou hloubku ve třetí fázi eroze. Bylo zjištěno, že druhý stupeň eroze nenastal ani po 106 250 dopadech pulzujícího vodního paprsku generovaného při tlaku 10 až 20 MPa. Na druhé straně dopady pulzujícího vodního paprsku generovaného při tlaku 30 MPa vytvářejí všechny tři fáze eroze v rozmezí od 1 062 impaktů do 106 250.

Další kroky výzkumu v této oblasti je vhodné zaměřit na studium vlivu dalších technologických parametrů, které ovlivňují povrch materiálu a jeho vlastnosti.

6 NASTAVENÍ ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

Před provedením dalších experimentů bylo zapotřebí provést časově náročné ladění a optimalizaci celé experimentální soustavy, proto je této činnosti věnována samostatná kapitola.

Materiál pro realizaci ladicích zkoušek musel vykazovat dostatečnou korozivzdornost, jelikož řezným nástrojem je voda. Bylo také zapotřebí, aby byl materiál komerčně běžně dostupný a měl vhodné mechanické vlastnosti (dostatečně měkký materiál). Zkoušky desintegračních účinků pulzujícího vodního paprsku při ladění experimentálního zařízení byly nakonec provedeny na hliníkové slitině [56] AlMgSi0,5 (EN AW-6060, DIN 3.3206), který stanovené podmínky splňuje. Nastavení vstupních technologických parametrů použitých při ladění experimentální soustavy je uvedeno v Tab. 3. Rozsah hodnot sledovaných parametrů byl stanoven na základě zkušeností pracovníků oddělení Desintegrace materiálů ÚGN dle požadavků plánovaného experimentu.

Tab. 3 Technologické parametry použité při hledání optimálního nastavení zařízení.

Parametry	Hodnoty
Tlak vody p [MPa]	20; 30; 40
Plochá tryska – ekvivalentní průměr \varnothing [mm]	1,1; 2,0
Plochá tryska – úhel rozstříku [°]	10
Úhel působení paprsku na povrch α [°]	70; 80; 90; 100; 110
Vzdálenost trysky od povrchu L [mm]	10-60, 50-100
Frekvence akustického generátoru f [kHz]	20
Rychlost posuvu v_p [mm·s ⁻¹]	5
Materiál	AlMgSi0,5

6.1 ZKUŠEBNÍ MATERIÁL

Zkušební řezy (drážky) byly vytvořeny v hliníkové slitině [58] AlMgSi0,5 o rozměrech 5 mm x 50 mm x 500 mm. Jedná se o konstrukční materiál s dobrou tvárností, lešitelností a odolností proti korozi, neprojevuje se u něj sklon ke koroznímu praskání pod napětím. Obrobitelnost řeznými nástroji je nevyhovující v žíhaném stavu a vyhovující ve vytvrzeném stavu. Chemické a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 4 a Tab. 5. Používá se pro součásti se střední pevností dlouhodobě pracující při teplotách 50 až -70°C, např. kabiny

letadel, vozidla, ve stavebnictví (krytiny, nýtované mosty, stožáry), v potravinářství, pro jemnou mechaniku apod.

Tab. 4 Chemické složení slitiny hliníku AlMgSi0,5

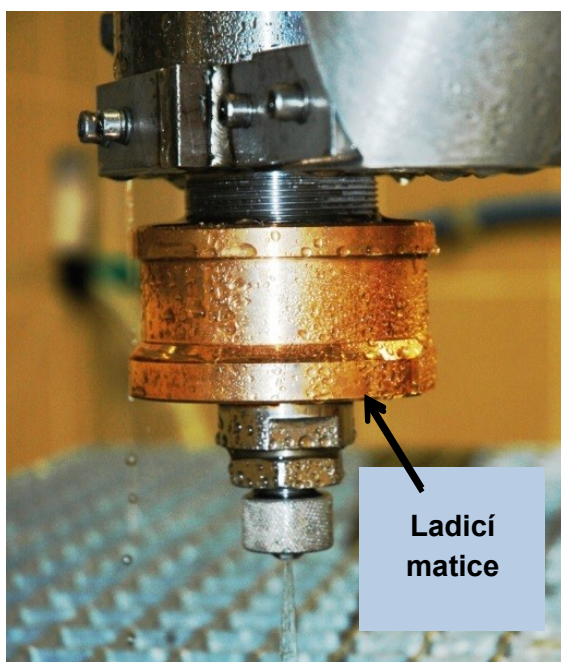
Fe [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mg [%]	Ti [%]	Mn [%]	Si [%]	Zn [%]
0,1 – 0,3	max. 0,05	max. 0,1	0,35 – 0,6	max. 0,1	max. 0,1	0,3 – 0,6	max. 0,15

Tab. 5 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku AlMgSi0,5

Mez kluzu $\sigma_{0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Prodloužení δ_5 [%]	Tvrдость [HB]
140 - 150	170 - 190	6	70

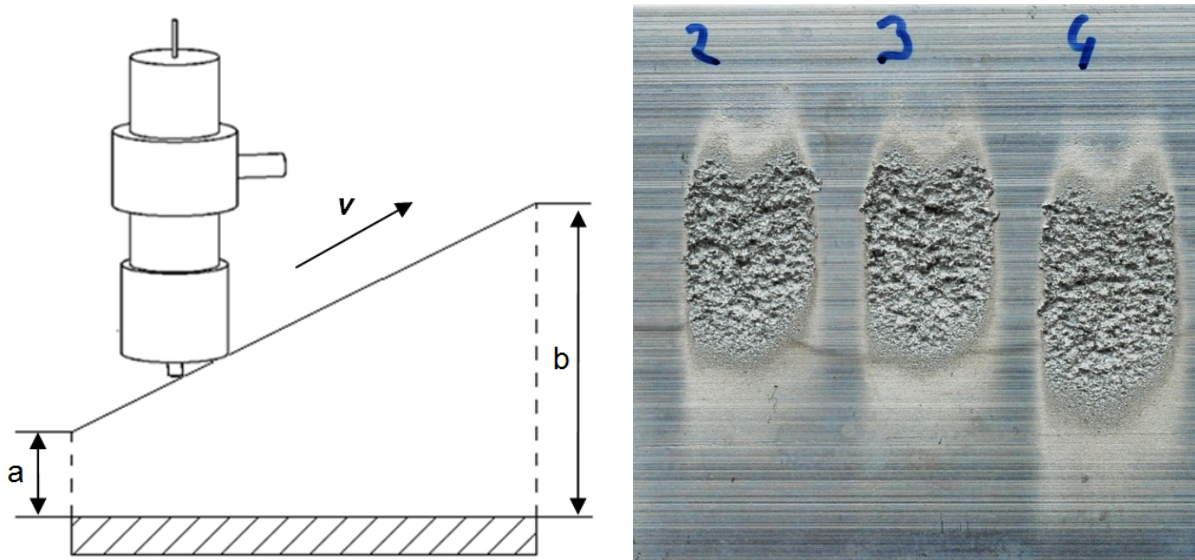
6.2 NASTAVENÍ LADÍČÍ MATICE

V první fázi ladění bylo nutné najít polohu ladicí matice akustického generátoru pro správné nastavení vnitřní geometrie akustické komory tak, aby paprsek na výstupu měl co největší desintegrační účinek. Nastavení geometrie se provádí otáčením ladicí matice na řezné hlavě akustického generátoru (Obr. 31).



Obr. 31 Nastavení ladicí matice na akustickém generátoru

Nastavení vnitřní geometrie akustické komory začalo při plně zašroubované ladicí matici ($A=0$). Pomocí upínek byl hliníkový vzorek připevněn na rošt pracovního stolu. Nastavil se požadovaný tlak vody a zjistil se desintegrační účinek paprsku průjezdem po nakloněné úsečce nad vzorkem. Trajektorie pohybu trysky je znázorněna na Obr. 32 a). Pohyb trysky zajišťovalo robotické rameno s přesně naprogramovanou trajektorií. Rychlost posuvu trysky nad povrchem materiálu byla $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jelikož se desintegrační účinek paprsku projevuje až v určité vzdálenosti od trysky (viz 3.1 Formování paprsku), začal paprsek erodovat materiál teprve v určitém místě přejezdu nad vzorkem. Pro tlak 20 a 30 MPa byla počáteční vzdálenost trysky od povrchu materiálu 10 mm a hlavice s tryskou postupně stoupala až do výšky 60 mm. Při tlaku 40 MPa nebylo při tomto uspořádání desintegrace povrchu dosaženo. Proto byla provedena změna rozsahu vzdálenosti trysky od povrchu materiálu na 50 mm a pokračovalo se do výšky 100 mm. Od plně zašroubované matice ($A=0$) se dále postupovalo vždy o jednu otáčku pro každou drážku (tj. 2 mm podle stoupání závitu) po krocích ($A=2$ až $A=20$) pro všechna nastavení ladicí matice. Pro každý použitý tlak tak vzniklo 11 erodovaných drážek, které se vizuálně porovnály (viz Obr. 32 b). Pro nastavení použité u nejvíce erodovaného vzorku se provedla kontrolní drážka a následné nastavení ladicí matice o $A=1$ na každou stranu. Pro každou kombinaci tlaku a velikosti trysky tak bylo vytvořeno 14 erodovaných drážek určených k přesnému nastavení ladicí matice. Pro stanovení její optimální polohy, která zajišťuje nastavení vnitřní geometrie akustické komory, bylo celkově vytvořeno 84 drážek pro tři použité tlaky a dvě velikosti trysky.



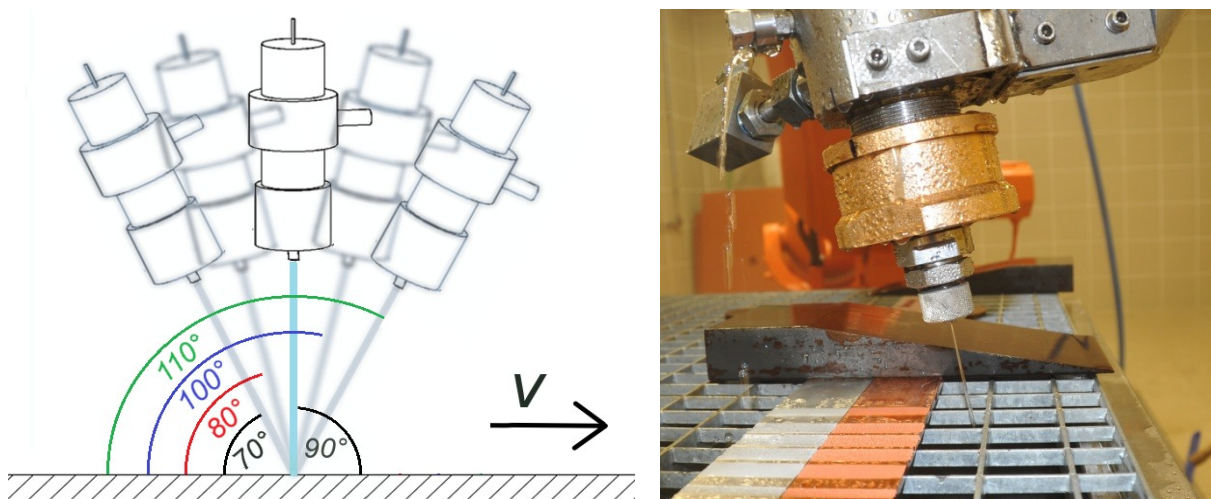
Obr. 32 a) Schematické znázornění trajektorie trysky při jejím pohybu nad zkušebním vzorkem, b) Desintegrační účinek paprsku na povrchu hliníkové slitiny při různém nastavení vnitřní geometrie akustické komory.

6.3 NASTAVENÍ VZDÁLENOSTI TRYSKY OD POVRCHU

Z předchozí části experimentu, kdy se tryska pohybovala po nakloněné úsečce, byla určena přibližná vzdálenost trysky od povrchu L pomocí nastavení ladicí matice. Pro zajištění největšího desintegračního účinku paprsku při následných experimentech bylo nutné provést optimalizaci vzdálenosti trysky od povrchu zkoumaného materiálu. Na základě zjištěné vzdálenosti byly provedeny přejezdy rovnoběžně se vzorkem v určité vzdálenosti, odstupňované podle potřeby pro každý tlak (pro tlak 20 MPa posun o $\Delta L = 1$ mm, pro tlak 30 MPa posun o $\Delta L = 2$ mm a pro tlak 40 MPa posun o $\Delta L = 5$ mm). Tímto způsobem byla stanovena optimální vzdálenost, kdy jsou jednotlivé pulzy dostatečně rozvinuty a mají největší desintegrační účinek. U použité ploché trysky s ekvivalentním průměrem $\varnothing 1,1$ mm byla pro tlak 20 MPa stanovena vzdálenost trysky od povrchu $L = 18$ mm, pro tlak 30 MPa vzdálenost $L = 26$ mm a pro tlak 40 MPa pak vzdálenost $L = 35$ mm. U ploché trysky s ekvivalentním průměrem $\varnothing 2$ mm pro tlak 20 MPa vzdálenost $L = 20$ mm, pro tlak 30 MPa vzdálenost $L = 52$ mm a pro tlak 40 MPa vzdálenost $L = 73$ mm.

6.4 NASTAVENÍ ÚHLU DOPADU

Dalším vstupním parametrem, který ovlivňuje účinnost PWJ je úhel působení paprsku na povrch vzorku. Proto byl proveden dílčí experiment za účelem stanovení nastavení úhlu dopadu pulzujícího vodního paprsku, při kterém bude mít voda dopadající na povrch vzorku největší desintegrační účinek. Na základě předchozích zkušeností bylo vybráno 5 úhlů dopadu ($70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ, 110^\circ$), viz Obr. 33.

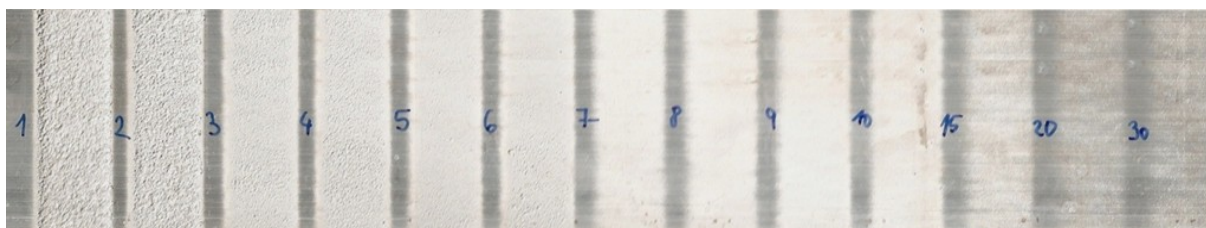


Obr. 33 Schéma různých úhlů působení PWJ na povrch materiálu.

Následně byly provedeny erozní zkoušky. Technologické parametry použité při hledání optimálního experimentálního nastavení zařízení jsou uvedeny v Tab. 3. Konkrétní poloha ladicí matice a vzdálenost trysky od povrchu byly shodné s hodnotami stanovenými v předchozích částech experimentu ladění soustavy. Výsledkem zkoušek desintegrace při různých úhlech působení PWJ na hliníkovou slitinu bylo zjištění, že nejnižší desintegrační účinky paprsku jsou při jeho působení pod úhly 70° a 110° . Naopak k největší erozi materiálu docházelo při působení paprsku pod úhly 80° a 90° . Tyto úhly byly následně vybrány do plánovaného experimentu.

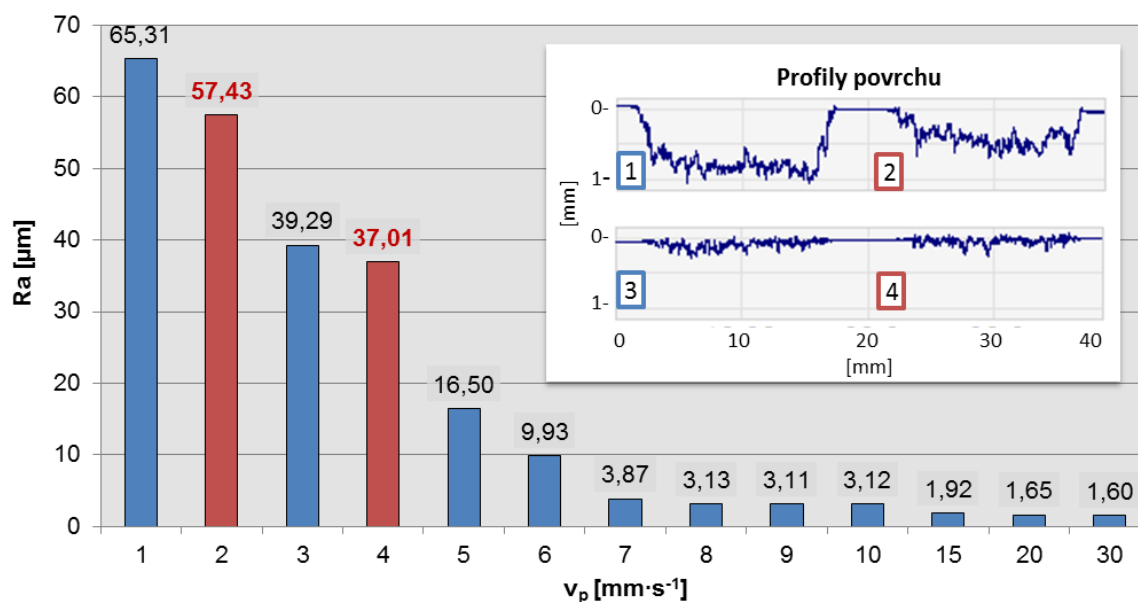
6.5 NASTAVENÍ ROZSAHU RYCHLOSTI POSUVU

Posledním proměnným parametrem při hledání optimálního technologického nastavení je rychlost posuvu paprsku nad porušovaným materiálem. Při zkouškách různých rychlostí posuvu byla použita tryska s ekvivalentním průměrem $\varnothing 2$ mm, tlak 40 MPa a vzdálenost trysky od povrchu $L = 73$ mm. Celkem bylo na zkušebním materiálu z hliníkové slitiny vytvořeno 13 drážek (viz Obr. 34). Počáteční rychlost posuvu byla stanovena na $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a postupně se zvyšovala s krokem $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až na rychlost $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Následně byly vytvořeny další drážky při rychlostech posuvu 15, 20 a $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Již při rychlosti posuvu $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ se však desintegrační účinek pulzujícího vodního paprsku při daných podmínkách značně snížil.



Obr. 34 Desintegrační účinek paprsku při různých rychlostech posuvu (tlak $p = 40$ MPa, ekvivalentní průměr trysky $\varnothing 2$ mm, vzdálenost trysky od povrchu $L = 73$ mm; rychlosti posuvu u jednotlivých drážek jsou uvedeny v $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$).

Textura vytvořených drážek byla změřena na optickém profilometru MicroProf FRT. Vyhodnoceny byly výškové parametry drsnosti povrchu R_a , R_q a R_z (viz Přílohu č. 2). Z naměřených údajů je zřejmé, že dostatečně vysoký desintegrační účinek paprsku je pro dané podmínky dosažen při rychlosti posuvu mezi 1 až $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. U těchto drážek byly vyhotoveny profily povrchu, které jsou zobrazeny společně s grafem závislosti parametru R_a na rychlosti posuvu na Obr. 35.



Obr. 35 Graf závislosti parametru R_a na rychlosti posuvu v_p a příčné profily drážek 1 – 4 z Obr. 34.

6.6 DÍLČÍ ZÁVĚR

Experimentální nastavení zkušebního zařízení pro další experimenty proběhlo v několika navazujících krocích. Bylo zapotřebí určit polohu ladicí matice a stanovit optimální vzdálenosti trysky od povrchu L . Pro trysku s ekvivalentním průměrem \varnothing 1,1 mm je $L = 18$ mm pro tlak 20 MPa, pro tlak 30 MPa je $L = 26$ mm a pro tlak 40 MPa je $L = 35$ mm. U ploché trysky s ekvivalentním průměrem \varnothing 2 mm je $L = 20$ mm pro tlak 20 MPa, pro tlak 30 MPa je $L = 52$ mm a pro tlak 40 MPa je $L = 73$ mm. Největšího desintegračního účinku bylo dosaženo při úhlech působení PWJ 80° a 90°. Pro následující experimenty byly záměrně vybrány rychlosti posuvu $v_p = 2$ a 4 mm·s⁻¹ (znázorněny červeně v Obr. 35), aby se účinky PWJ mohly projevit i u nižších pracovních tlaků (20 a 30 MPa).

7 EXPERIMENT II - PLÁNOVANÝ EXPERIMENT VÝZNAMNOSTI JEDNOTLIVÝCH FAKTORŮ NA EROZNÍ ÚČINKY PWJ

Cílem této části disertační práce bylo zjistit, jak silný vliv mají jednotlivé faktory na erozní účinky pulzujícího vodního paprsku a tomu odpovídající parametry topografie povrchu. Vhodným prostředkem k tomuto zjištění bylo využití tzv. plánovaného experimentu, který je znám spíše pod svým anglickým názvem Design of Experiments – DOE [59].

Princip DOE je založen na situaci, kdy experimentátor nemá dostatek znalostí, aby mohl jediným experimentem nalézt optimální nastavení procesu. Proto začíná s řadou experimentů, v jejichž průběhu se postupně dozvídá více informací a dostává se tak do blízkosti optima. Plánovaný experiment však není jen vlastním návrhem experimentu, je to souhrn řady činností, které lze rozdělit do pěti etap (viz Obr. 36). [60]



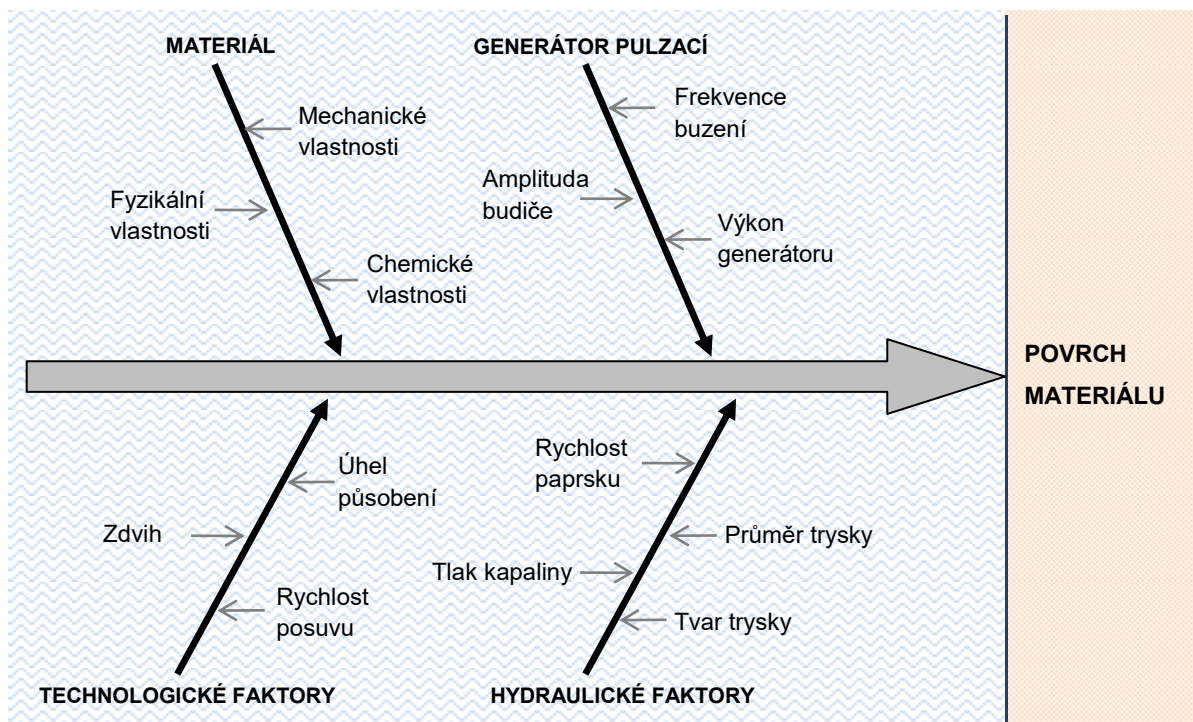
Obr. 36 Obecné schéma plánovaného experimentu dle Millera [59]

Vlastní experiment byl realizován experimentálně-statistickým způsobem. Na základě pravidel DOE dochází ke změně hodnot zkoumaných faktorů a je definován vliv jejich vzájemného působení. Při použití metody DOE je snížen počet provedených experimentů na minimum v porovnání s klasickým experimentem, který předpokládá provedení zkoušek při všech možných kombinacích zkoumaných faktorů, čímž se neúměrně zvyšuje časová náročnost experimentu. DOE navíc zvyšuje spolehlivost výsledků. Lze stanovit přesnější závěry, které přispějí k optimalizaci nastavení technologie PWJ.

Při plánovaném experimentu se postupovalo podle schématu DOE (Obr. 36). Použitá metodika se skládala z následujících kroků:

1. Plánování (příprava) experimentu zahrnovala určení úlohy. Bylo zapotřebí vybrat faktory, které mají vliv na výslednou kvalitu povrchu erodovaného materiálu. Tyto faktory byly vybrány na základě praktických zkušeností pracovníků oddělení

desintegrace materiálů ÚGN, kteří se zařízením PWJ dlouhodobě pracují, na podkladě informací z vlastních zkoušek experimentálního nastavení zkušebního zařízení (viz kapitolu 6 Nastavení zkušebního zařízení) a informací z odborné literatury [55]. Při výběru faktorů byl využit Ishikawův diagram (viz Obr. 37). Tento diagram příčin a následků slouží jako nástroj umožňující vyloučit ty faktory, u kterých je znám mechanismus jejich účinku.



Obr. 37 Ishikawův diagram – analýza příčin a následků

V případě technologie pulzujícího vodního paprsku byly pomocí Ishikawova diagramu nalezeny základní skupiny faktorů ovlivňující výsledný povrch materiálů. Patří sem technologické faktory, hydraulické faktory, faktor generátoru pulzací a materiálový faktor. Tyto základní skupiny dále ovlivňují dílčí faktory. Pro plánovaný experiment bylo nutno vybrat ty, u kterých není známa významnost vlivu na výsledný povrch materiálu. Jsou to tryska, tlak kapaliny, rychlost posuvu, úhel působení a materiál vzorků. Zbylé faktory nebyly vybrány z důvodu nemožnosti měnit jejich nastavení (faktory pevně dané použitým zařízením), nebo přímo závisí na jiných faktorech.

2. Vlastní návrh experimentu byl realizován pomocí programu Minitab.
3. Provedení experimentu a jeho dílčích etap probíhalo v laboratořích ÚGN v Ostravě. Měření kvality povrchu bylo provedeno pomocí optického profilometru.
4. Analýza výsledků byla provedena pomocí programů Minitab, Excel a SPIP.
5. Aplikace výsledků je shrnuta v závěru práce.

7.1 MATERIÁLY POUŽITÉ PŘI PLÁNOVANÉM EXPERIMENTU

Materiály vybrané pro erozní zkoušky musely splňovat některá kritéria tak, aby byly experimenty proveditelné v podmínkách laboratoří ÚGN. Výběr materiálů musel zabezpečit vysokou korozní odolnost ve vlhkém prostředí kvůli dalšímu měření a vyhodnocování. Dále musel být zvolený materiál jednoduše dostupný a běžně používaný v různých odvětvích průmyslu z důvodu využitelnosti v praxi. Materiál musel být co nejvíce homogenní, aby byly zaručeny stejné vlastnosti ve všech směrech. Požadována byla nízká pevnost materiálu kvůli snadnější erozi, která je závislá na čase potřebném k provedení (zrychlení) experimentu. Na základě stanovených kritérií byla vybrána slitina hliníku AlMgSi_{0,5} a měď Cu-ETP (DIN 2.0065, EN CW004A). Oba uvedené materiály splňují potřebné vlastnosti a zároveň mají odlišné fyzikálně mechanické vlastnosti, na nichž lze porovnávat vliv zkoumaných materiálů na účinnost PWJ.

7.1.1 Hliníková slitina AlMgSi_{0,5}

Zkušební drážky byly vyřezány v hliníkové slitině AlMgSi_{0,5} o rozměrech 5 x 25 x 500 mm. Tento materiál byl již dříve využit pro realizaci zkoušek při stanovení experimentálního nastavení zkušebního zařízení. Základní vlastnosti materiálu AlMgSi_{0,5} jsou uvedeny v Tab. 4 a Tab. 5 v podkapitole 6.1.

7.1.2 Měď Cu-ETP

Měď je přírodní materiál vyznačující se velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Je to měkký a tažný kov, který se dobře mechanicky zpracovává. Výrobky jsou odolné proti korozi. Zkušební drážky byly vyřezány v mědi Cu-ETP o rozměrech 5 x 25 x 500 mm. V Tab. 6 a Tab. 7 je uvedeno chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu.

Tab. 6 Chemické složení mědi Cu-ETP

Cu [%]	O [%]	Pb [%]	Bi [%]
99,9	max. 0,04	max. 0,005	max. 0,0005

Tab. 7 Mechanické vlastnosti mědi Cu-ETP

Mez kluzu $\sigma_{0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Prodloužení δ_5 [%]	Tvrдость [HV]
180	240-300	8	65 - 95

7.2 REALIZACE PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU

Pomocí programu Minitab byl proveden návrh plánovaného experimentu 2^k (kde k je počet faktorů). Základem tohoto návrhu bylo pět faktorů o dvou úrovních. Vybranými faktory byly technologické parametry pulzujícího vodního paprsku (tlak vody, rychlost posuvu trysky nad povrchem, ekvivalentní průměr trysky, úhel dopadu paprsku na povrch vzorku) a materiálové parametry zastoupené dvěma různými kovovými materiály vzorků. V Tab. 8 jsou tyto faktory uvedeny společně s jednotlivými úrovněmi.

Tab. 8 Faktory a jejich úrovně

Faktory		Dolní úroveň	Horní úroveň
		-1	1
x1	Tlak vody [MPa]	20	40
x2	Rychlost posuvu [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	2	4
x3	Průměr trysky [mm]	1,1	2,0
x4	Úhel dopadu [°]	80	90
x5	Materiál	AlMgSi0,5	Cu-ETP

Tímto návrhem bylo vytvořeno 32 kombinací faktorů. Nastavení vstupních technologických parametrů plánovaného experimentu je uvedeno v Tab. 9. Pro zpřesnění výsledků bylo navrženo opakování (3 krát). Celkově tedy návrh experimentu počítal s 96 vzorky. Pro velký počet a časovou náročnost byl experiment rozdělen do tří bloků.

Tab. 9 Nastavení technologických parametrů plánovaného experimentu.

Parametry	Hodnoty
Tlak kapaliny p [MPa]	20, 40
Tryska plochá – ekvivalentní průměr \varnothing [mm]	1,1 a 2,0
Tryska plochá – úhel rozstříku [°]	10
Úhel dopadu paprsku na povrch vzorku [°]	80, 90
Vzdálenost trysky od povrchu L [mm]	18, 20, 35, 73
Frekvence ultrazvukového generátoru f [kHz]	20
Rychlost posuvu nástroje nad povrchem v_p [mm·s ⁻¹]	2 a 4
Materiál	AlMgSi0,5, Cu-ETP

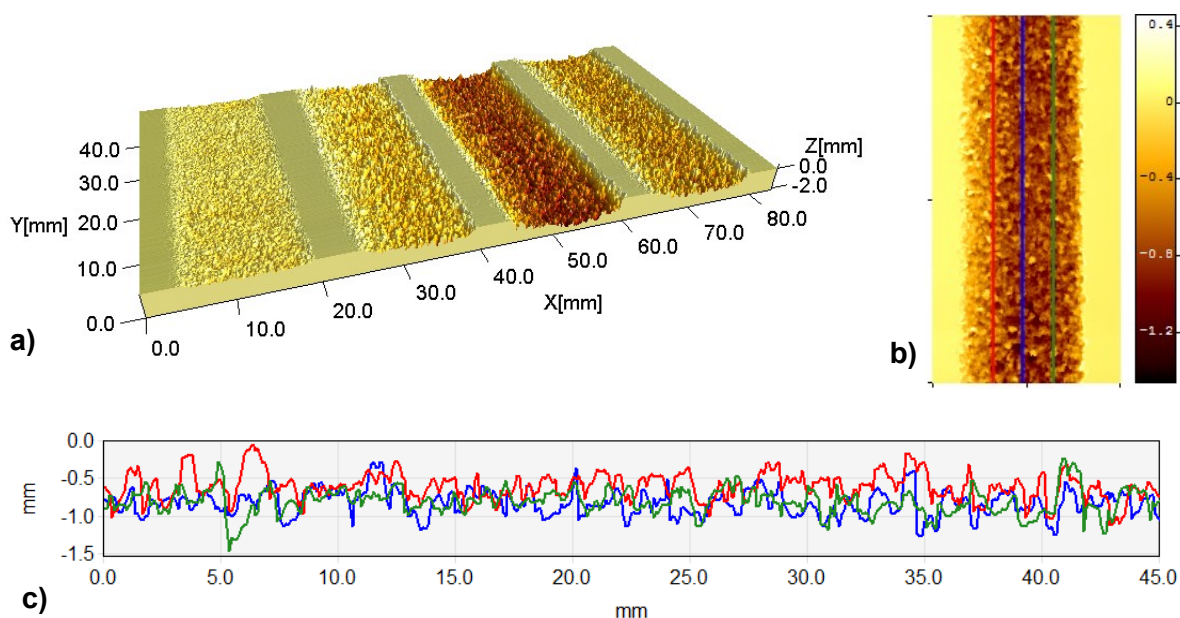
Pro každou vytvořenou drážku byla nastavena jiná kombinace faktorů přesně podle schématu plánovaného experimentu (viz Tab. 10).

Tab. 10 Plánovaný experiment (M – měď, H – hliníková slitina)

BLOK 1										
Vzorek č.	x1	x2	x3	x4	x5	Tryska Ø [mm]	Tlak vody [MPa]	Úhel [°]	Rychlost posuvu [mm·s ⁻¹]	Materiál
1	-1	-1	-1	-1	-1	1,1	20	90	2	M
2	-1	-1	-1	-1	1	1,1	20	90	2	H
3	-1	-1	-1	1	-1	1,1	20	90	4	M
4	-1	-1	-1	1	1	1,1	20	90	4	H
5	-1	-1	1	-1	-1	1,1	20	80	2	M
6	-1	-1	1	-1	1	1,1	20	80	2	H
7	-1	-1	1	1	-1	1,1	20	80	4	M
8	-1	-1	1	1	1	1,1	20	80	4	H
9	-1	1	-1	-1	-1	1,1	40	90	2	M
10	-1	1	-1	-1	1	1,1	40	90	2	H
11	-1	1	-1	1	-1	1,1	40	90	4	M
12	-1	1	-1	1	1	1,1	40	90	4	H
13	-1	1	1	-1	-1	1,1	40	80	2	M
14	-1	1	1	-1	1	1,1	40	80	2	H
15	-1	1	1	1	-1	1,1	40	80	4	M
16	-1	1	1	1	1	1,1	40	80	4	H
17	1	-1	-1	-1	-1	2,0	20	90	2	M
18	1	-1	-1	-1	1	2,0	20	90	2	H
19	1	-1	-1	1	-1	2,0	20	90	4	M
20	1	-1	-1	1	1	2,0	20	90	4	H
21	1	-1	1	-1	-1	2,0	20	80	2	M
22	1	-1	1	-1	1	2,0	20	80	2	H
23	1	-1	1	1	-1	2,0	20	80	4	M
24	1	-1	1	1	1	2,0	20	80	4	H
25	1	1	-1	-1	-1	2,0	40	90	2	M
26	1	1	-1	-1	1	2,0	40	90	2	H
27	1	1	-1	1	-1	2,0	40	90	4	M
28	1	1	-1	1	1	2,0	40	90	4	H
29	1	1	1	-1	-1	2,0	40	80	2	M
30	1	1	1	-1	1	2,0	40	80	2	H
31	1	1	1	1	-1	2,0	40	80	4	M
32	1	1	1	1	1	2,0	40	80	4	H

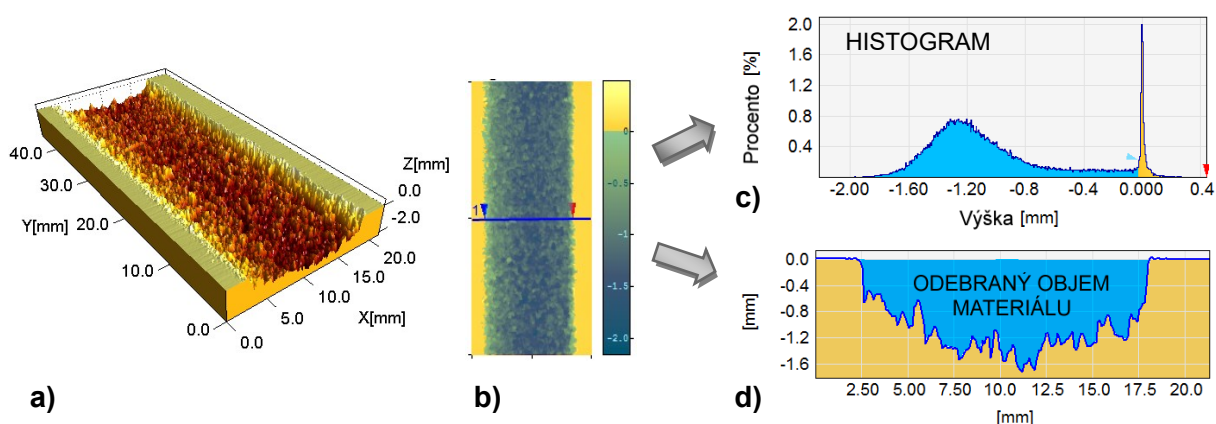
Faktory byly seřazeny podle obtížnosti jejich změny během experimentu tak, aby bylo možné provést jeden blok experimentu během jednoho dne při co nejmenších změnách podmínek. Jako nejobtížněji měnitelný faktor (největší časová náročnost) byla zvolena montáž trysky. Část zařízení, která drží trysku, se musela demontovat, přetěsnit a znovu kalibrovat zdvih. Druhý faktor, který byl také časově náročný, byla změna tlaku na čerpadle, protože bylo třeba znovu nastavit polohu ladící matice. Faktory posuvu a úhlu se měnily pomocí zadání konstant do řídicího programu robotického ramene. Změna materiálu byla vyřešena umístěním dvou pásů různých materiálů vedle sebe, viz Obr. 33. Faktor materiálu se tedy měnil pouhým přejezdem PWJ přes oba zkoumané povrchy.

Vyhotovené drážky byly skenovány na optickém profilometru MicroProf FRT. Naskenovaná data byla analyzována pomocí softwaru SPIP (Scanning Probe Image Processor). Na Obr. 38 a) je 3D vizualizace čtyř rozdílných drážek, výběr zkoumané oblasti desintegrovaného materiálu (Obr. 38 b) a naměřené profily struktury povrchu (Obr. 38 c). Vzdálenost měřících bodů pro každou drážku byla nastavena na 4 μm ve směru posuvu paprsku (osa y) a 100 μm ve směru kolmém na posuv (osa x). U každé vytvořené drážky bylo nasnímáno 20 profilů povrchu, ze kterých se vypočítala průměrná hodnota vybraných parametrů. Takto byly získány parametry drsnosti z topografie povrchu. Pro vyhodnocení plánovaného experimentu byly vybrány základní R-parametry: R_a , R_q , R_z , R_{sk} a R_{ku} , definované dle normy ČSN EN ISO 4287 [51].



Obr. 38 a) 3D vizualizace drážek účinků PWJ na zkoumaný materiál, b) vyznačení měřených oblastí v drážce, c) grafické znázornění naměřených podélných profilů drážky desintegrovaného povrchu vzorku.

Dalším sledovaným parametrem v plánovaném experimentu byl odebraný objem materiálu V [mm³]. Jeho výpočet byl proveden pomocí softwaru SPIP. Při vyhodnocení odebraného objemu materiálu z jednotlivých drážek se postupovalo v několika krocích. Nejprve bylo zapotřebí získat 3D sken topografie drážky a základního materiálu. Do roviny základního povrchu materiálu byla umístěna nulová hladina. Obr. 39 a) znázorňuje 3D vizualizaci drážky vytvořené pulzujícím vodním paprskem, kde je patrný úběr materiálu. Na Obr. 39 b) je vyznačena oblast úběru materiálu (modře vyznačená plocha), která se nacházela pod nulovou hranicí základního materiálu. Pomocí histogramu byla rozdělena sledovaná oblast na část nad a pod rovinou umístěnou do nulové hladiny povrchu materiálu, viz Obr. 39 c). Software spočítá objem mezi skutečným povrchem drážky a mezi rovinou povrchu vzorku. Na Obr. 39 d) je zakreslen profil drážky, kde modře vyznačená oblast znázorňuje odebraný objem materiálu.

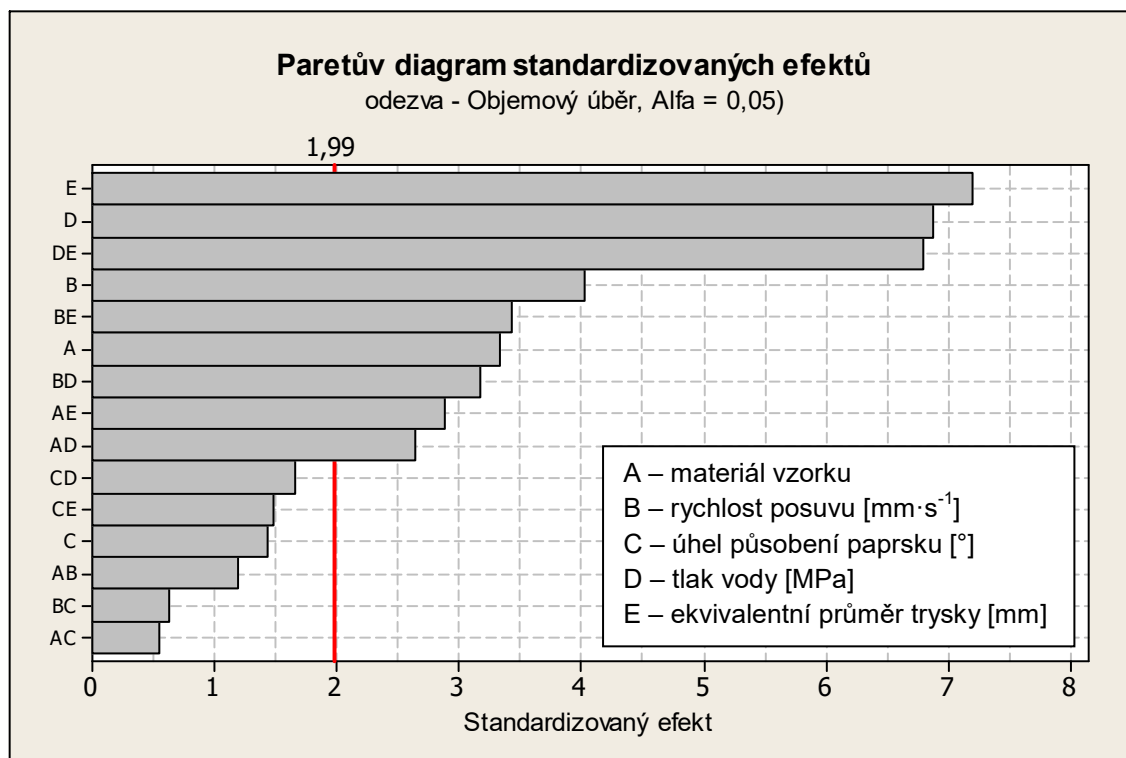


Obr. 39 a) 3D vizualizace skenu drážky a části základního materiálu, b) znázornění oblasti úběru materiálu (modře vyznačená plocha), c) histogram, d) řez vzorkem, kde je vyznačen profil drážky a odebraný objem materiálu.

7.3 ANALÝZA VLIVU FAKTORŮ NA POVRCH

Plánovaný experiment byl z důvodu časové náročnosti rozdělen do tří bloků. Vypočítané hodnoty jednotlivých bloků jsou uvedeny v tabulkách 1, 2 a 3 v příloze č. 2. Pro přehledné vyhodnocení výsledků byl zvolen Paretův diagram, který umožňuje oddělit „opravdové“ či „významné“ faktory od těch, které jsou jenom výsledkem tzv. „experimentálního šumu“ [59].

Vlivy zvolených faktorů a jejich interakcí jsou zobrazeny na Obr. 40 až Obr. 45, kde jsou přehledně seřazeny podle velikosti významu do Paretova diagramu. Výpočet byl proveden programem Minitab. Při analýze vlivu faktorů na objemový úběr pomocí Paretova diagramu byla zvolena hladina významnosti $\alpha = 0,05$.

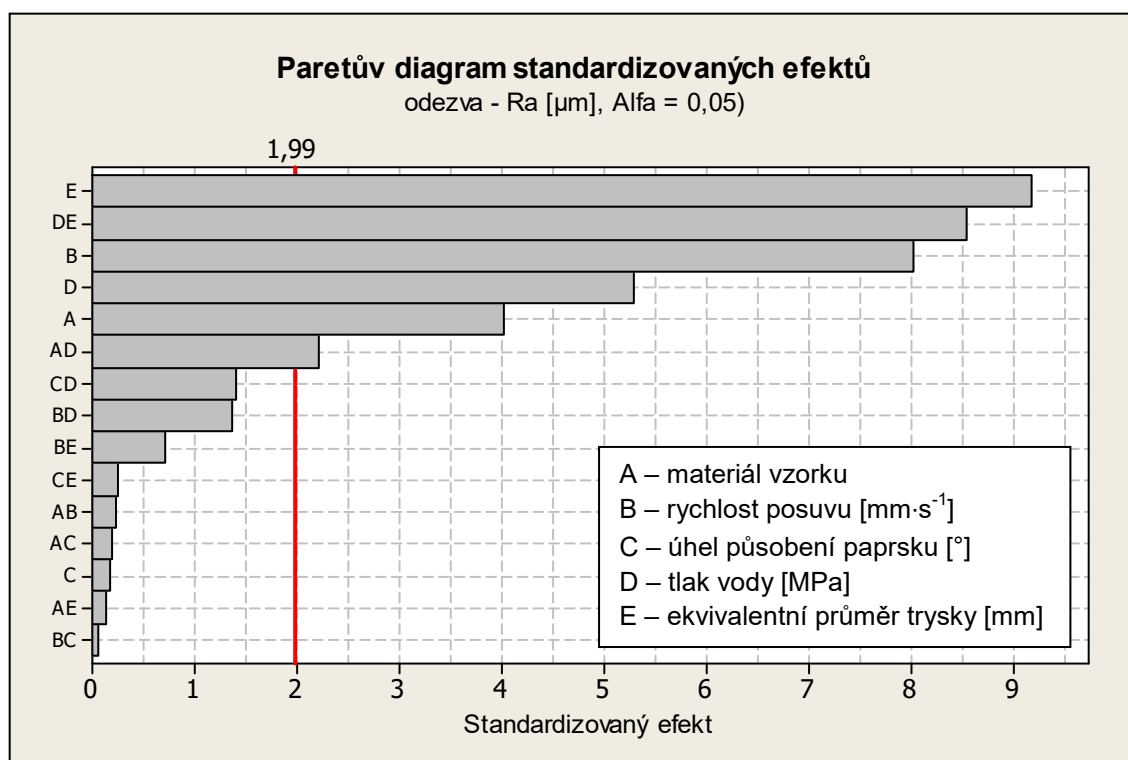


Obr. 40 Paretův diagram znázorňující vlivy jednotlivých faktorů a jejich interakcí na objemový úběr materiálu (svislá červená čára – programem generovaná hranice významnosti).

Velikost standardizovaného efektu udává vliv faktoru na zkoumaný parametr. V diagramu je červeně znázorněna hranice rozdělující oblast na faktory a jejich interakce, které mají význam, nebo jsou bezvýznamné. Čím je hodnota standardizovaného efektu u daného faktoru vyšší, tím větší má vliv na studovaný parametr. V grafu na Obr. 40 je patrný vliv faktorů na objemový úběr materiálu. Z diagramu je zřejmé, že nejvýznamnější vliv na objemový úběr materiálu má faktor E - ekvivalentní průměr trysky. Při použití menší trysky ($\varnothing = 1,1$ mm) a zachování konstantního nastavení zkušebního zařízení, je průtočné množství vody nižší, nežli při použití větší trysky ($\varnothing = 2,0$ mm). Vzniklý proud pulzujícího vodního paprsku má méně energie na erozi materiálu, nedosahuje tak velkého plošného rozstříku, tudíž eroduje menší plochu. Jako druhý významný faktor se jeví D - tlak vody. Ten ovlivňuje síly působící na povrch a taktéž ovlivňuje průtočné množství vody a plochu rozstříku. Třetím nejvýznamnějším parametrem je kombinace faktoru D a E (tlak vody, ekvivalentní průměr trysky). Méně výrazným parametrem, nikoliv však zanedbatelným je faktor B - rychlost

posuvu. Ta ovlivňuje dobu působení PWJ na povrch vzorku. Čím je delší doba trvání, neboli čím je rychlost posuvu menší, tím je povrch více erodován. Na povrch dopadne více energie (viz kapitolu 5 Experiment I - Stanovení erozních účinků stacionárního PWJ). Nezanedbatelný vliv měl také faktor A, zvolený materiál vzorků. Další více či méně významné parametry jsou kombinace silných faktorů s méně silnými. Jako nejméně významný parametr se podle experimentu jeví změna úhlu působení pulzujícího vodního paprsku. V předchozích experimentech disertační práce (6.4 Nastavení úhlu dopadu) bylo ověřeno, že změna úhlu působení paprsku má vliv na erozní účinek. Ovšem ve srovnání s ostatními vybranými faktory je tento vliv ve zvoleném rozsahu zanedbatelný.

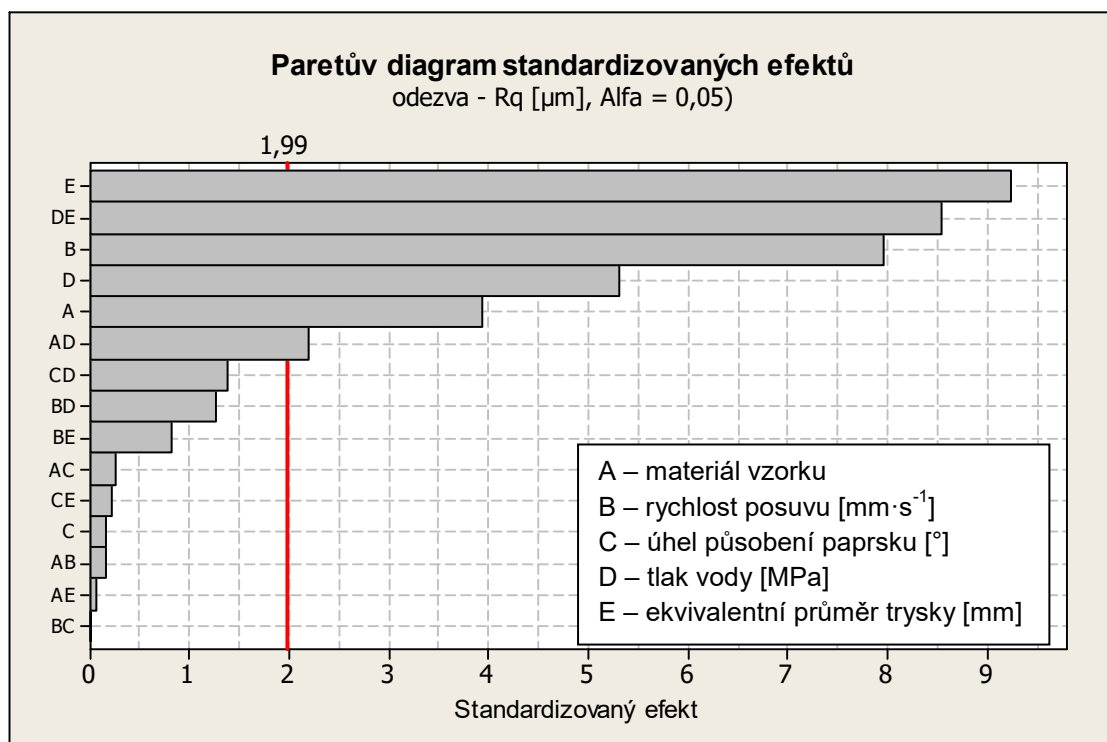
Jaký vliv mají jednotlivé technologické parametry na topografii, ukazují následující grafy, kde byl sledován vliv faktorů na vybrané *R*-parametry (*Ra*, *Rq*, *Rz*, *Rsk* a *Rku*).



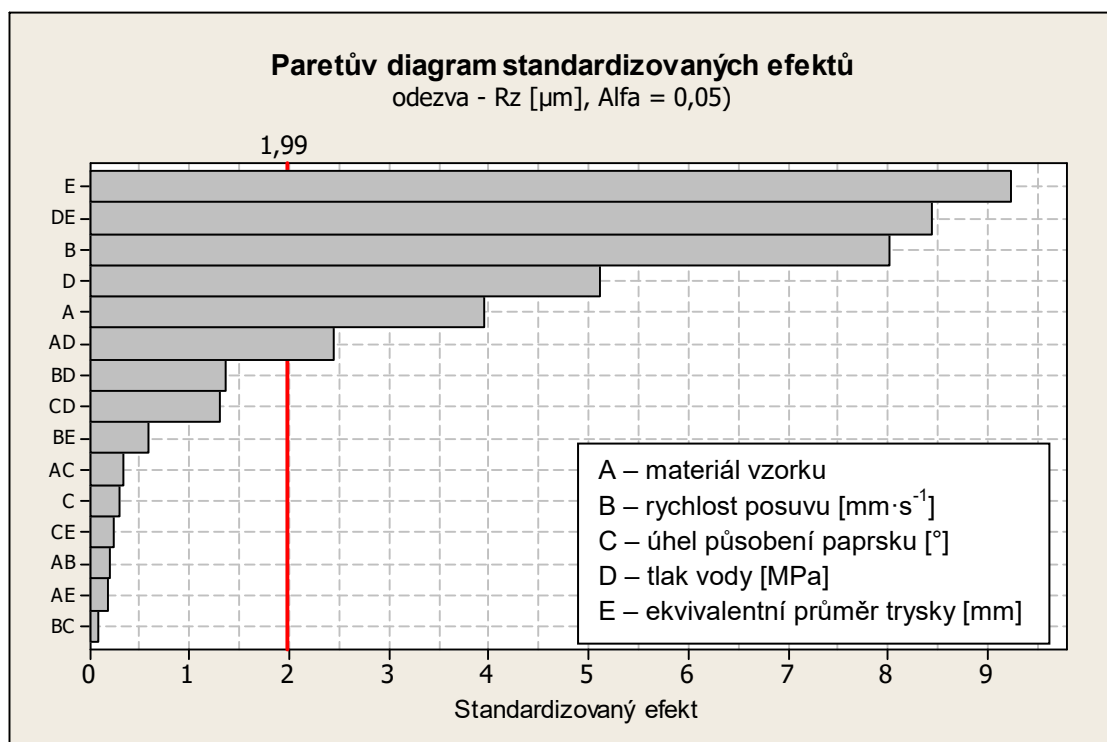
Obr. 41 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu *Ra*.

Největší vliv na drsnost povrchu *Ra* má velikost ekvivalentního průměru použité trysky (Obr. 41). Jako druhý významný faktor je kombinace faktorů tlaku vody a ekvivalentního průměru trysky. Třetím velmi významným faktorem je rychlost posuvu. Další a stále dostatečně významné se jeví faktory tlaku vody, materiálu vzorků a kombinace faktorů materiálu a tlaku vody. Jako nevýznamné faktory se jeví především ostatní kombinace faktorů a zcela nevýznamným faktorem je opět úhel působení paprsku. U dalších

parametrů drsnosti povrchu jako jsou Rq (Obr. 42) a Rz (Obr. 43) mají faktory velmi podobný vliv a liší se jen nepatrně.



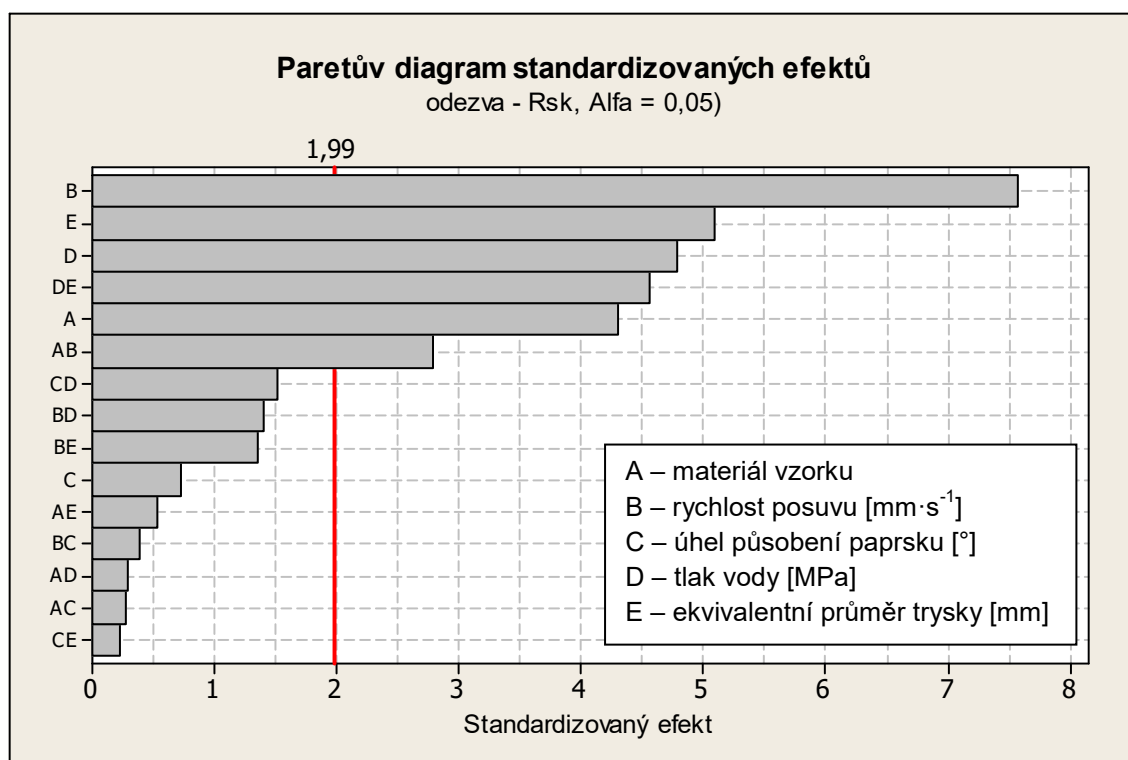
Obr. 42 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Rq .



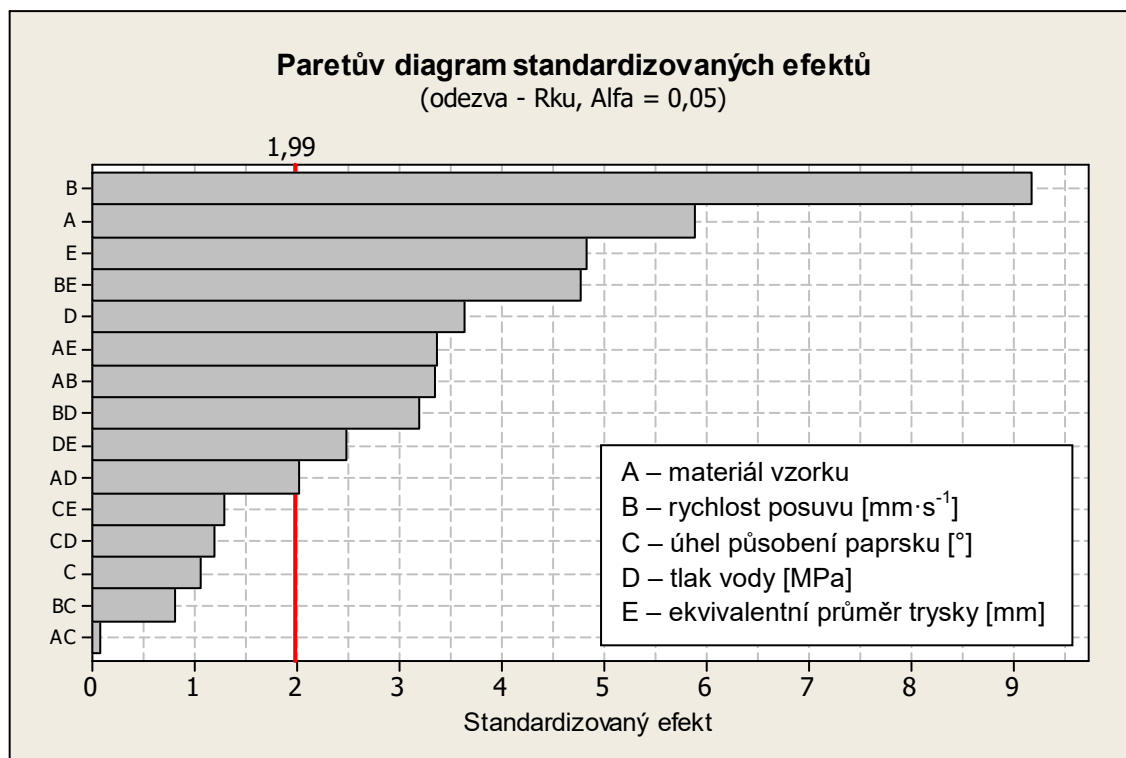
Obr. 43 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Rz .

Další parametry topografie, které popisují vlastnosti sledovaného povrchu, jsou šikmost Rsk a špičatost Rku . Parametr Rsk vypovídá o tom, jestli má povrch větší počet výstupků nebo naopak více prohlubní vzhledem k základnímu profilu. Parametr Rku udává členitost povrchu. Tyto doplňkové výškové parametry pomáhají rozlišit povrchy s jinak stejnou hodnotou drsnosti Ra .

Pokud bude sledován vliv stejných faktorů na parametr Rsk , lze podle Paretova diagramu na Obr. 44 zjistit, že velmi výrazný vliv má faktor B - rychlost posuvu. Opět se ukazuje, že nejméně významným faktorem je úhel působení paprsku. Obdobná situace nastává u parametru Rku (Obr. 45), kde je znovu nejvýznamnějším faktorem posuvová rychlost a nejméně významným úhel působení paprsku. U ostatních parametrů a jejich kombinací již není jejich význam tak zřetelný.



Obr. 44 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu Rsk .



Obr. 45 Paretův diagram znázorňující vlivy faktorů na parametr drsnosti povrchu R_{ku} .

7.4 DÍLČÍ ZÁVĚR

Plánovaný experiment zaměřený na zjištění významu technologických parametrů pulzujícího vodního paprsku na parametry drsnosti povrchu R_a , R_q a R_z ukazuje, že největší vliv ze sledovaných faktorů má ekvivalentní průměr vodní trysky. Následuje kombinace faktorů tlaku vody a průměru trysky. Třetím nejvýznamnějším faktorem je rychlost posuvu trysky nad povrchem vzorku. V případě sledování vlivu faktorů na objemový úběr materiálu, má největší vliv velikost trysky, dále pak tlak vody a kombinace faktorů ekvivalentní průměr trysky a tlak vody. Ostatní faktory a jejich kombinace se významově podílí na tvorbě nového povrchu podstatně méně, některé pak vůbec. Například faktor úhlu působení paprsku je v tomto případě zanedbatelný. Při sledování vlivu faktoru na šikmost R_{sk} a špičatost R_{ku} zkoumaného profilu drsnosti povrchu, má největší vliv posuvová rychlost paprsku.

Pomocí prezentovaného experimentu DOE byly stanoveny faktory výrazně ovlivňující výsledek procesu úpravy povrchu pulzujícím vodním paprskem a pak faktory, které lze naopak považovat za „experimentální šum“ bez vlivu na sledovaný parametr.

8 EXPERIMENT III – STUDIUM VLIVU VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PWJ NA TOPOGRAFII POVRCHU

V rámci tohoto experimentu byl výzkum účinků pulzujícího vodního paprsku zaměřen na studium vlivu vybraných technologických parametrů na povrch materiálu. Na základě výsledků plánovaného experimentu, pomocí kterého byla určena významnost vstupních technologických parametrů na účinnost PWJ, byly určeny jako významné proměnné parametry tlak kapaliny p a rychlost posuvu nástroje nad povrchem v_p . Pro parametr tlaku byly vybrány hodnoty 20, 30 a 40 MPa. Tlak vody přímo ovlivňuje další parametry, které jsou na něm závislé. Je to například rychlost paprsku na výstupu z trysky, množství (objem) vody za jednotku času apod. Nastavení vstupních technologických parametrů je uvedeno v Tab. 11. Pro studium účinků PWJ byla opět použita hliníková slitina AlMgSi0,5. Tryska byla zvolena plochá s ekvivalentním průměrem 2 mm a úhlem rozstříku 10°. S touto tryskou byl systém PWJ stabilní a mnohokrát úspěšně testovaný. Optimální byla i oblast způsobené eroze. Odstup trysky od povrchu byl při použití této trysky dostatečně velký, aby se paprsek dokázal rozprostřít na větší plochu než by tomu bylo v případě použití menšího průměru trysky. Oblast ovlivnění byla dostatečně velká pro pozorování, pro měření topografie povrchu i pro další analýzu pomocí metalografických výbrusů.

V první fázi experimentu opět proběhlo ladění zkušebního zařízení. Postup ladění je podrobně popsán v kapitole 6. Následovalo provedení vlastního experimentu, kdy bylo vytvořeno celkem 70 zkušebních drážek (stopy po paprsku) v hliníkových vzorcích. Ty byly následně proměřeny na optickém profilometru FRT MicroProf. Naměřené hodnoty byly opět analyzovány pomocí softwaru SPIP. Pro vyhodnocení experimentu byly vybrány základní parametry topografie povrchu: R_a , R_z , R_p , R_v , R_{sk} , R_{ku} . (ČSN EN ISO 4287) [51].

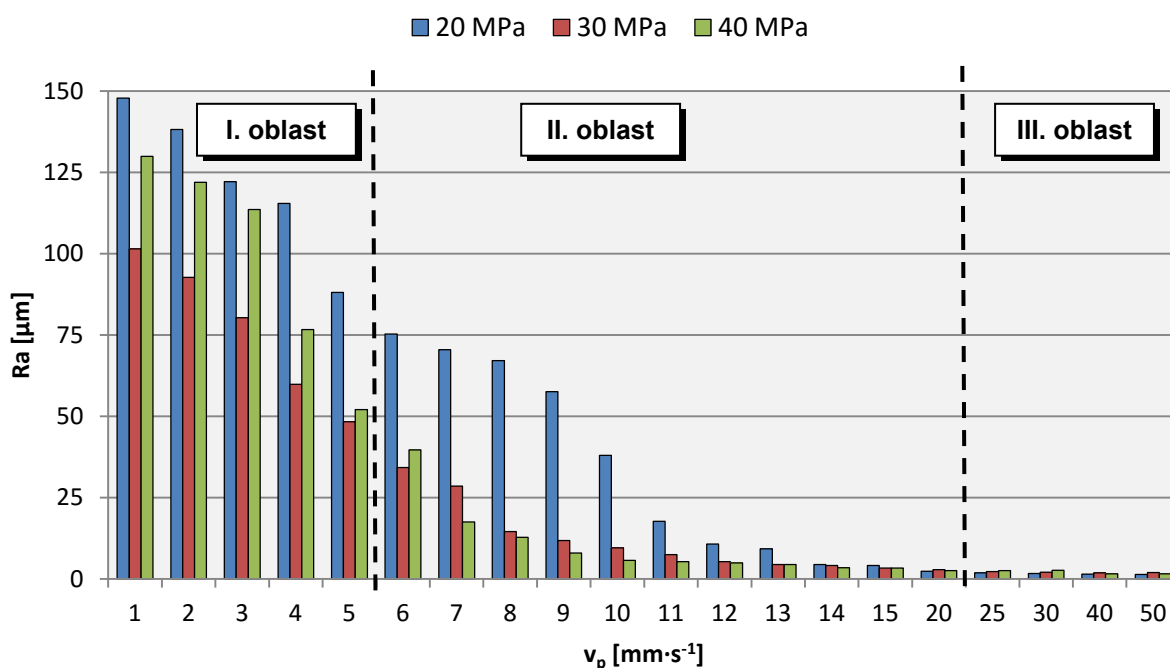
Tab. 11 Nastavení technologických parametrů.

Parametry	Hodnoty
Tlak kapaliny p [MPa]	20, 30, 40
Tryska plochá – ekvivalentní průměr \varnothing [mm]	2,0
Tryska plochá – úhel rozstříku [°]	10
Úhel dopadu paprsku na povrch vzorku [°]	90
Vzdálenost trysky od povrchu L [mm]	20, 52, 73
Frekvence ultrazvukového generátoru f [kHz]	20
Rychlost posuvu nástroje nad povrchem v_p [mm·s ⁻¹]	1 až 50
Materiál	AlMgSi0,5

8.1 STUDIUM VLIVU VÝZNAMNÝCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PWJ NA POVRCH MATERIÁLU

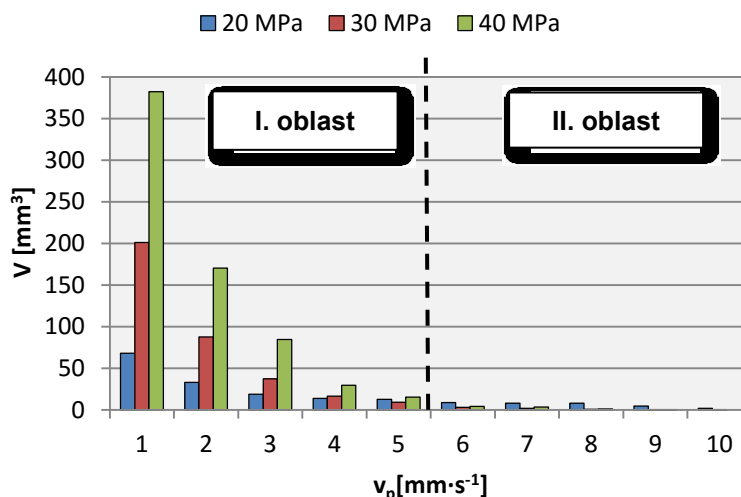
Cílem experimentu bylo zjistit kvalitu povrchu při různých kombinacích technologických parametrů tlaku kapaliny a rychlosti posuvu. Stanovily se jednotlivé oblasti účinku pulzujícího vodního paprsku. Podle Thomase a kol. [39] a Foldyny a kol. [55] mohou tyto oblasti být tři. První oblast je významná svým velkým objemovým úběrem a velkou drsností povrchu. Následuje oblast s minimálním objemovým úběrem a změnou drsnosti povrchu. Ve třetí oblasti dochází k ovlivnění povrchové vrstvy materiálu bez materiálového úběru a bez výrazného zvýšení drsnosti [61].

Na Obr. 46 je zobrazena závislost drsnosti povrchu R_a na posuvové rychlosti pro jednotlivé tlaky. Je zřejmé, že se vzrůstající posuvovou rychlostí klesá parametr drsnosti R_a u všech tří tlaků. Největší drsnosti povrchu dosahuje paprsek při rychlosti $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a nejmenší při rychlosti posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 46 Závislost drsnosti povrchu R_a na posuvové rychlosti nad povrchem v_p .

Obr. 47 ukazuje objemový úběr materiálu v závislosti na rychlosti posuvu při různých tlacích. Do rychlosti posuvu cca $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ dochází k významnému úběru materiálu. Od hodnoty rychlosti $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ se úběr materiálu rychle zmenšuje a se vrůstající rychlostí je téměř nulový (neměřitelný).



Obr. 47 Závislost objemového úběru materiálu V na rychlosti posuvu v_p .

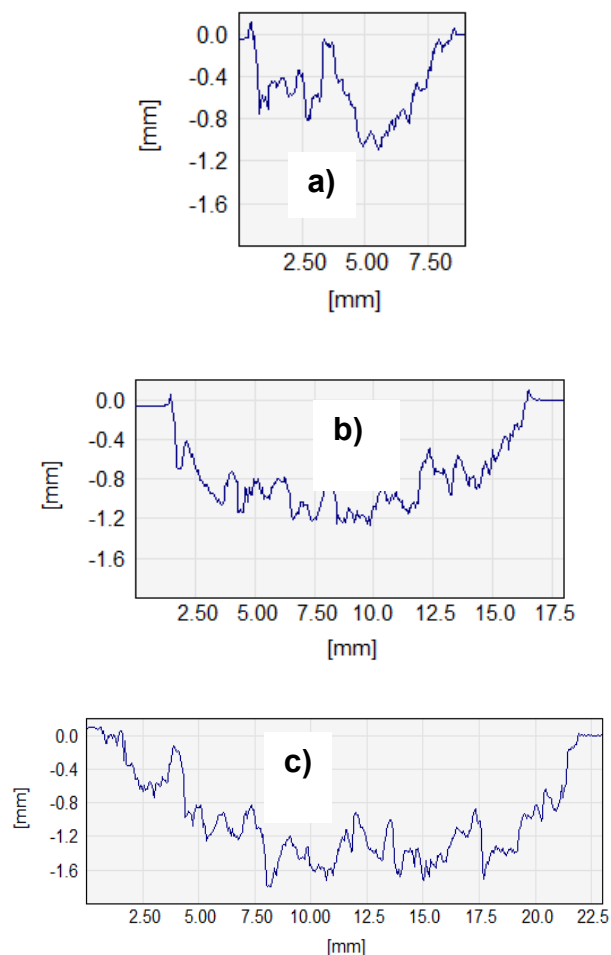
Pomocí grafů na Obr. 46 a Obr. 47 lze určit hranice tří oblastí účinků pulzujícího vodního paprsku. První oblast se nachází v rozmezí rychlostí 1 až 5 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. V této oblasti je velmi patrný objemový úběr. Druhá oblast je vymezena rychlostmi 6 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 20 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Dochází zde k malému objemovému úběru a paprsek vytváří zdrsňený povrch. Třetí oblast pak začíná od rychlosti posuvu 25 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a nevykazuje žádný objemový úběr materiálu. Změna drsnosti povrchu je zanedbatelná. Hodnoty drsnosti se téměř neliší od hodnot původního povrchu. Pouze pod mikroskopem lze pozorovat drobné změny na povrchu ve formě zviditelnění hranice zrn [61].

Při různých tlacích se paprsek ve vztahu k drsnosti povrchu chová jinak především v první oblasti účinku paprsku. Nejnižší tlak 20MPa zde na povrchu způsobuje největší drsnost. Při tlaku 30 MPa drsnost klesá, ovšem při tlaku 40MPa drsnost opět stoupá, i když nedosahuje hodnot jako při tlaku 20 MPa. Zdálo by se, že má paprsek při vyšším tlaku menší účinnost. Při objemovém úběru je však situace opačná. Nejvyšší tlak způsobuje největší úběr a nejmenší tlak zase nejmenší úběr. Účinnost paprsku se tedy se zvyšujícím se tlakem ve skutečnosti zvětšuje. V Tab. 12 jsou hodnoty parametrů R_p a R_v , které ukazují, jak je drsnost tvořena, a potvrzují, že při tlaku 20 MPa má povrch vyšší nerovnosti než při tlaku 40 MPa.

Tab. 12 Parametry drsnosti povrchu při rychlosti posuvu $v = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Tlak [MPa]	R_z [μm]	R_p [μm]	R_v [μm]	R_{sk} [-]	R_{ku} [-]
20	363,79	153,70	193,23	-0,72	5,371
30	101,59	41,27	50,14	-0,55	6,31
40	66,17	27,95	38,22	-0,76	8,61

Výsledná drsnost povrchu je ovlivněna také mnoha jinými faktory. Například způsobem tvorby pulzů a jejich tvarem, procesem dopadu na povrch a následným šířením po povrchu. Při dopadu jednoho pulzu na povrch dojde k narušení a vytlačení materiálu. Následuje radiální proudění po povrchu vysokou rychlostí, kdy jsou vytlačené části materiálu ustříhnuty [55]. Tím se sníží velikost výstupků a prohlubní R_p a R_v a zvětší se objemový úběr materiálu. Při různých tlacích tento mechanismus funguje s odlišnou účinností. Při tlaku 20 MPa má pulzující vodní paprsek dostatečný impaktní tlak na povrch a vytvoří povrch s vysokými hodnotami výškových parametrů. Nemá ale dostatečnou rychlost a sílu v druhé fázi, kdy dochází k radiálnímu proudění a nedokáže tudíž vytvořené nerovnosti odstranit (viz Obr. 48 a). Při vyšších tlacích se v první fázi opět vytvoří povrch s vysokými hodnotami výškových nerovností, které jsou ale následně odstraněny radiálním prouděním, které má dostatečnou energii odstranit tyto nerovnosti z povrchu materiálu, viz Obr. 48 b) a Obr. 48 c).



Obr. 48 Profil drážky vytvořený pulzujícím vodním paprskem při tlaku: a) 20 MPa, b) 30 MPa, c) 40 MPa

Určení oblastí účinku paprsku je důležité pro správné nastavení technologických parametrů při dalších experimentech. Vhodným nastavením je tak možné docílit požadovaných vlastností povrchu z hlediska drsnosti plochy. To je velmi důležité pro aplikaci následných technologických operací v procesu výroby součástí - především při nanášení různých typů povlaků na povrch. Každá povlakovací technologie vyžaduje pro své úspěšné provedení specifickou strukturu povrchu, která je převážně určována výškovými parametry drsnosti Ra , Rz , Rsk a Rku .

Parametr šikmosti Rsk dosahuje hodnot od $-0,56$ do $-0,76$ (Tab. 12) při rychlosti posuvu $v = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, což je povrch s členitějšími a většími prohlubněmi a s málo výstupky. Takový povrch se snadno neopotřebí, tudíž by mohl být vhodný jako nosná plocha [62].

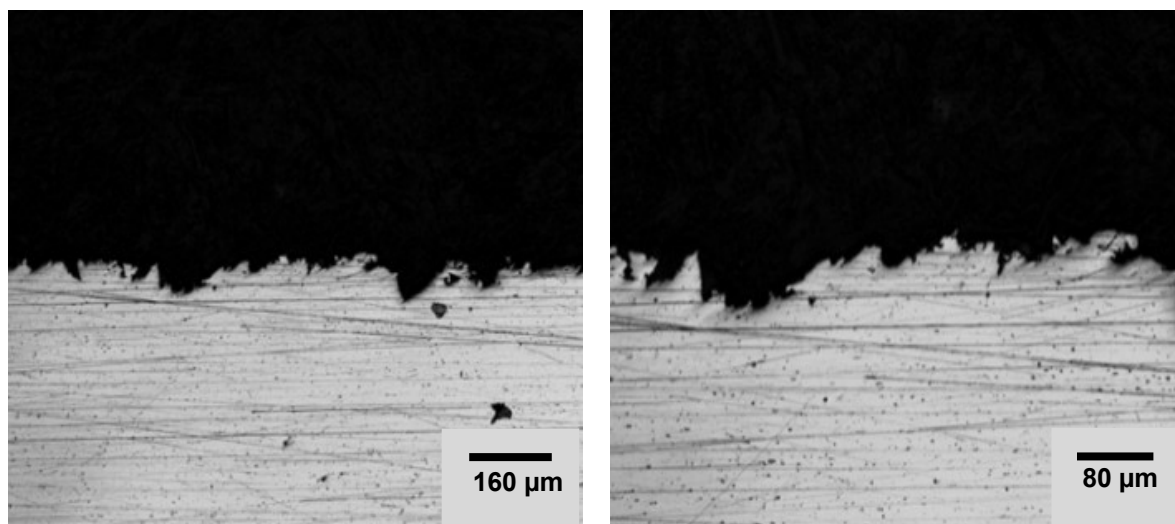
Parametr špičatosti Rku ukazuje na členitost povrchu. Pokud je parametr $Rku > 3$, jedná se o povrch více členitý s mnoha prudkými změnami profilu. Naproti tomu hodnoty $Rku < 3$ ukazují na povrch více vyhlazený [62]. Hodnoty parametru špičatosti posuzovaného profilu Rku se pohybují od $5,89$ do $8,61$ při rychlosti posuvu $v = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Tab. 12).

Z analýzy dat tedy vyplývá, že povrch vytvořený technologií pulzujícího vodního paprsku by mohl mít dobrý kotvící profil pro následné nanášení povlaků [62].

Pro další analýzu dezintegrovaného povrchu byly vybrány tři erodované povrchy s různou intenzitou eroze (rychlosti posuvu 2 , 12 a $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, tlak 40 MPa) a z nich připraveny vzorky pro metalografický výbrus o rozměrech $30\times 5\times 5 \text{ mm}$ (Obr. 49). Tyto výbrusy byly nasnímány konfokálním mikroskopem v různém zvětšení a následně analyzovány. Na Obr. 50 je metalografický výbrus vzorku erodovaného materiálu. Povrch je tvořen výstupky a prohlubněmi vytvořenými plastickou deformací. Paprsek vytlačuje materiál a vznikají tak časté převisy a částečně uzavřené dutiny.



Obr. 49 Metalografický výbrus příčného profilu vzorku hliníkové slitiny AlMgSi_{0,5} erodovaného pulzujícím vodním paprskem (tlak 40 MPa , ekvivalentní průměr trysky 2 mm , vzdálenost trysky od povrchu 73 mm ; rychlost posuvu $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$).



Obr. 50 Metalografický výbrus vzorku hliníkové slitiny zobrazený pomocí konfokálního mikroskopu ve dvou zvětšeních. Jsou dobře patrné převisy a nově vzniklé dutiny způsobené překrytím původního materiálu.

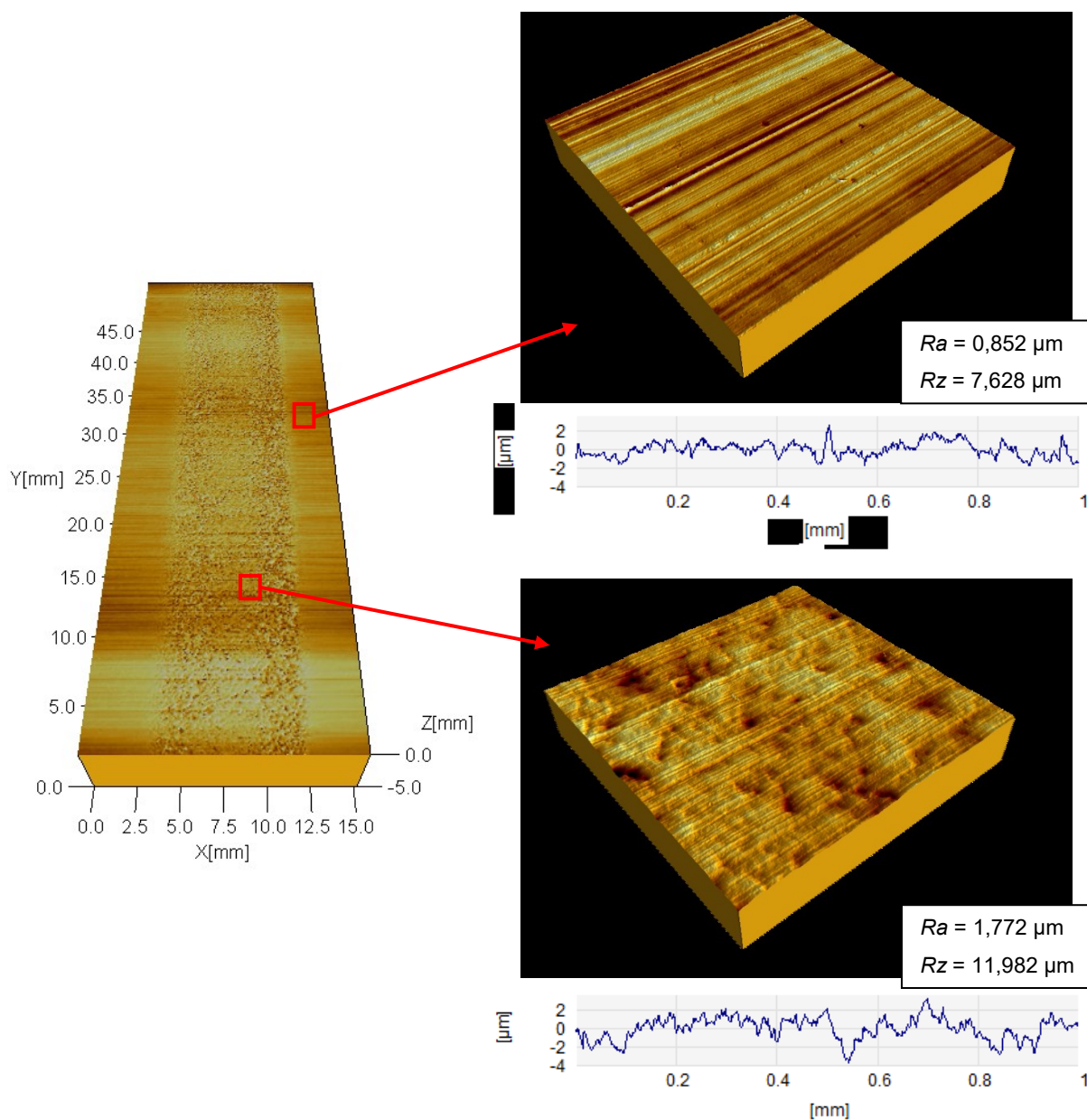
Na základě grafů na Obr. 46 a Obr. 47 byly stanoveny hranice tří oblastí účinků pulzujícího vodního paprsku: (i) oblast zpevnění, (ii) oblast zdrsnění a (iii) oblast materiálového úběru, jejichž bližší popis přináší následující kapitoly.

8.1.1 Oblast zpevnění

Pokud pulzující vodní paprsek nemá dostatek času nebo energie při působení na povrch opracovávaného materiálu, nedojde k jeho erozi. Dochází pouze k ovlivnění povrchové vrstvy. Tento proces je znám jako mechanické zpevňování (peening). Využívá se pro zvyšování užitečných vlastností obrobků jako je např. větší výdrž při cyklickém zatěžování nebo růst tvrdosti povrchu. V práci [61] je popsáno využití pulzujícího vodního paprsku při mechanickém zpevnění povrchové vrstvy korozivzdorného materiálu. Po aplikaci paprsku došlo ke zvýšení životnosti vzorku při zkoušce cyklické únavy více než 2,5 krát. V článku [63] se zase autor zabývá peeningem slitiny hliníku vysokorychlostním vodním paprskem. Výsledkem je zpevnění povrchové vrstvy a měřitelné zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy. Tato metoda byla použita také při zpevňování povrchu uhlíkových ocelí [64], [65]. Pokud se do povrchové vrstvy materiálu pomocí peeningu vnese tlakové napětí je materiál odolnější proti vzniku mikrotrhlin a životnost takto upravených výrobků se několikanásobně zvýší.

Při vlastním experimentu bylo takových povrchů dosaženo při rychlostech $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy došlo k větší či menší plastické deformaci, která je dobře pozorovatelná pomocí konfokálního mikroskopu. Na Obr. 51 je patrná stopa po působení

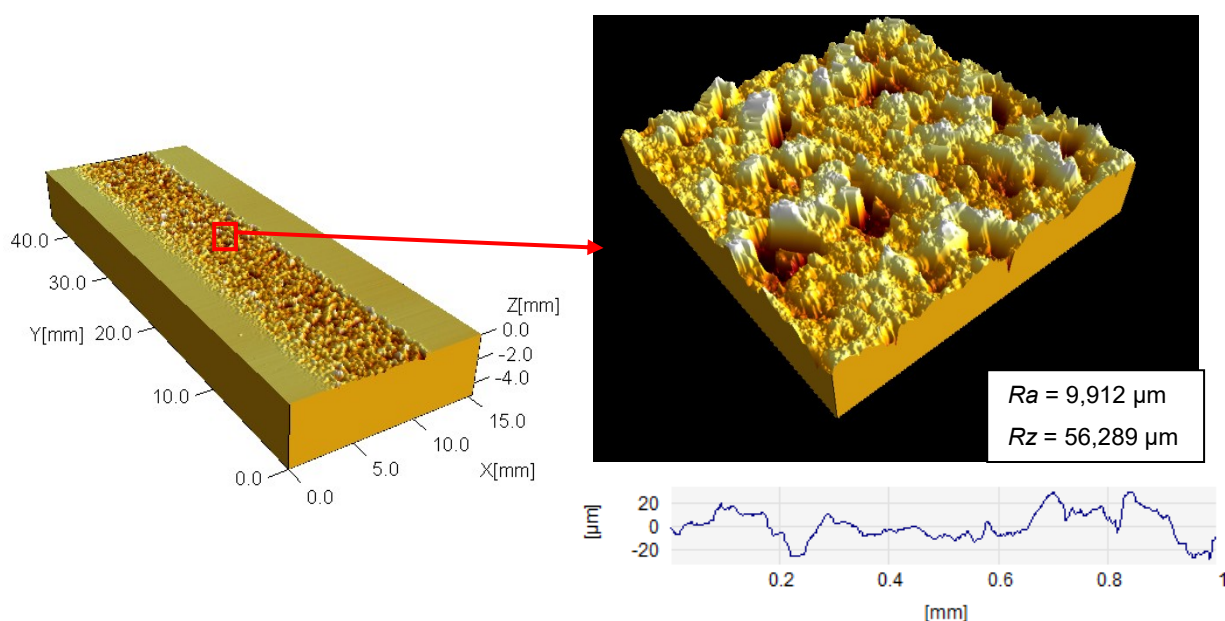
PWJ. Při větším zvětšení lze pozorovat rozdíl mezi základním materiálem a částí materiálu ovlivněného PWJ. Na povrchu se vytvoří jemné prohlubně a částečně se zdeformuje původní struktura. V profilu lze rozeznat ostré výstupky původního povrchu, které vytvořil proces extruze při výrobě profilu. Ty se přetvářejí a působením PWJ dochází k zaoblení ostrých výstupků povrchu. Změna výškových parametrů drsnosti povrchu je měřitelná. Z původních hodnot $Ra = 0,852 \mu\text{m}$ a $Rz = 7,628 \mu\text{m}$ narostla na $Ra = 1,772 \mu\text{m}$ a $Rz = 11,982 \mu\text{m}$. Celkově nedošlo k měřitelné erozi a objemovému úběru materiálu.



Obr. 51 3D vizualizace drážky - oblast zpevnění

8.1.2 Oblast zdrsnění

Druhá oblast účinku PWJ má za následek výraznější změny v topografii povrchu. Dochází k vytlačování částí materiálu a vznikají nové výstupky a prohlubně. Tvoří se erozní krátery, které se spojují do větších celků a zvyšují drsnost povrchu (viz Obr. 52). Původní struktura povrchu je již nerozeznatelná, nebo jen velmi těžko. Podle intenzity účinků PWJ pak hodnoty drsnosti rostou k hodnotám $Ra = 9,912 \mu\text{m}$ a $Rz = 56,289 \mu\text{m}$ a objem odebraného materiálu se rovněž mění podle intenzity účinků paprsku. Vzhledem k velkému komerčnímu potenciálu se budu touto fází eroze PWJ zabývat podrobněji ještě v další části disertační práce (kapitola 8.2).

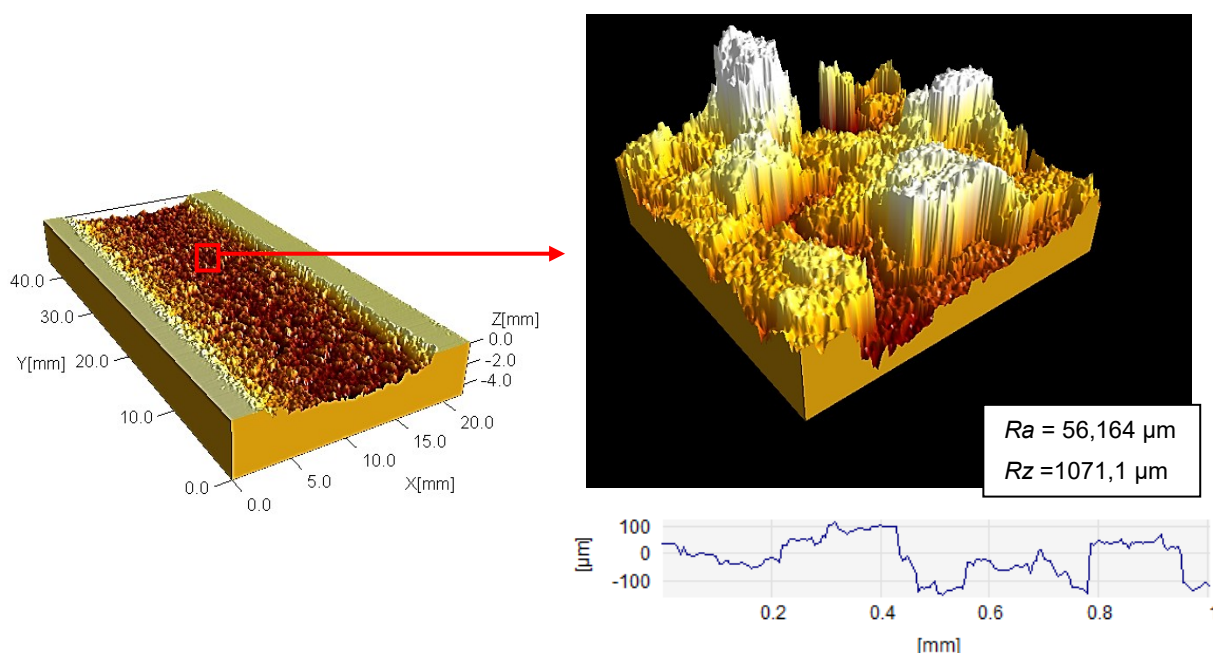


Obr. 52 3D vizualizace drážky - oblast zdrsnění

8.1.3 Oblast materiálového úběru

Pokud jsou technologické parametry nastaveny tak, že má pulzující vodní paprsek dostatek energie (vysoký tlak, malá posuvová rychlost), dojde k velmi intenzivní erozi, která má za následek významný objemový úběr materiálu nejen z povrchu vzorku, ale i z celého objemu materiálu. Paprsek vytvoří v základním materiálu hlubokou drážku, jejíž parametry drsnosti dosahují vysokých hodnot (viz Obr. 53). Ty již nemají dostatečnou vypovídací hodnotu a je potřeba povrch hodnotit pomocí velikosti materiálového úběru (objemu odstraněného materiálu). Na erodovaném povrchu vznikají útvary s velkým výškovým rozdílem (Obr. 53). Při ještě vyšších intenzitách PWJ se drsnost již dále výrazně nezvyšuje,

pouze dochází k dalšímu objemovému úběru materiálu. Takto silná eroze je dobře využitelná například pro řezání materiálu, odstraňování velkých vrstev (frézování), sanace betonových konstrukcí, ošetření kluzkých ploch okrasných kamenů apod.



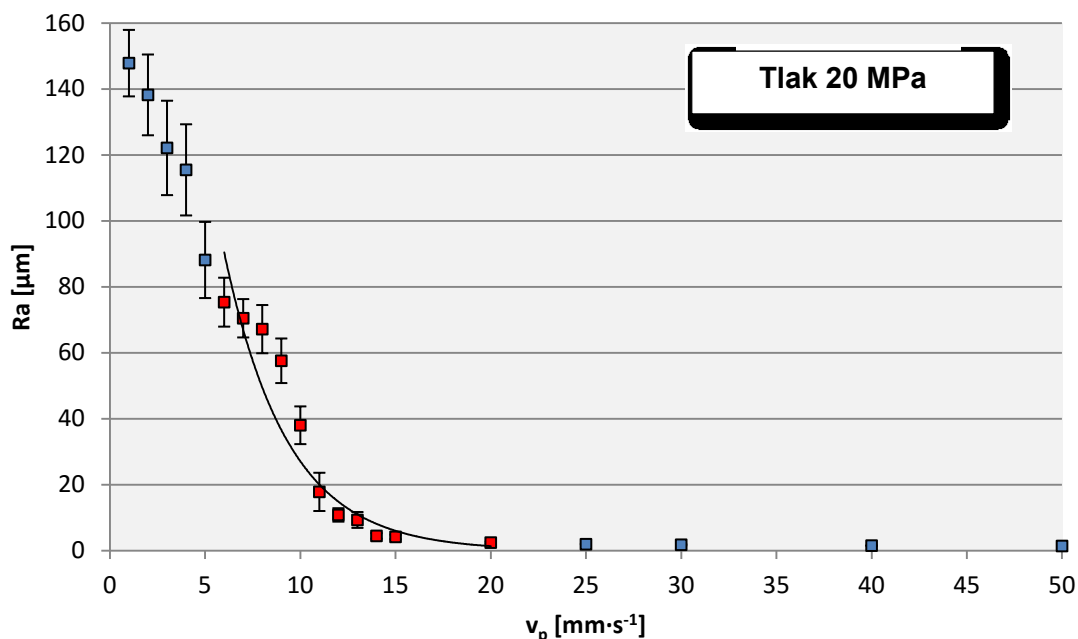
Obr. 53 3D vizualizace drážky - oblast materiálového úběru

8.2 OBLAST ZDRSNĚNÍ POVRCHU – PODROBNÁ ANALÝZA

Jelikož z pohledu průmyslové praxe je využití pulzujícího vodního paprsku ke zdrsňování povrchů, ať už se jedná o finální úpravu nebo přípravu povrchů pro následující výrobní operace, velmi zajímavou oblastí, věnují se zde této problematice poněkud podrobněji. V předchozích kapitolách byly zvoleny hranice parametru posuvové rychlosti pro vytvoření povrchu s konkrétním rozmezím hodnot výškových parametrů. Tyto hranice lze operativně posunout směrem na jednu nebo druhou stranu podle požadavků na konkrétní aplikaci. Pro podmínky experimentů bylo zvolené rozpětí od $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ do $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a to pro všechny tlaky stejně (viz Obr. 34).

Určitou představu o změnách hodnot výškových parametrů v závislosti na rostoucí rychlosti posuvu lze získat grafickým zobrazením získaných hodnot výškových parametrů v závislosti na rychlosti posuvu paprsku (viz Obr. 54, Obr. 55 a Obr. 56). Střední aritmetická úchylka Ra je nejčastěji používaný normovaný (ČSN EN ISO 4287) výškový parametr drsnosti, který kvantifikuje kvalitu obrobeného povrchu. Regresní rovnice byly proto vytvořeny na základě závislosti parametru Ra na změně rychlosti posuvu paprsku. Kromě

uvedeného parametru byly sledovány a analyzovány i výškové parametry drsnosti Rq a Rz . Jejich grafické znázornění a regresní rovnice jsou uvedeny v příloze č. 3.

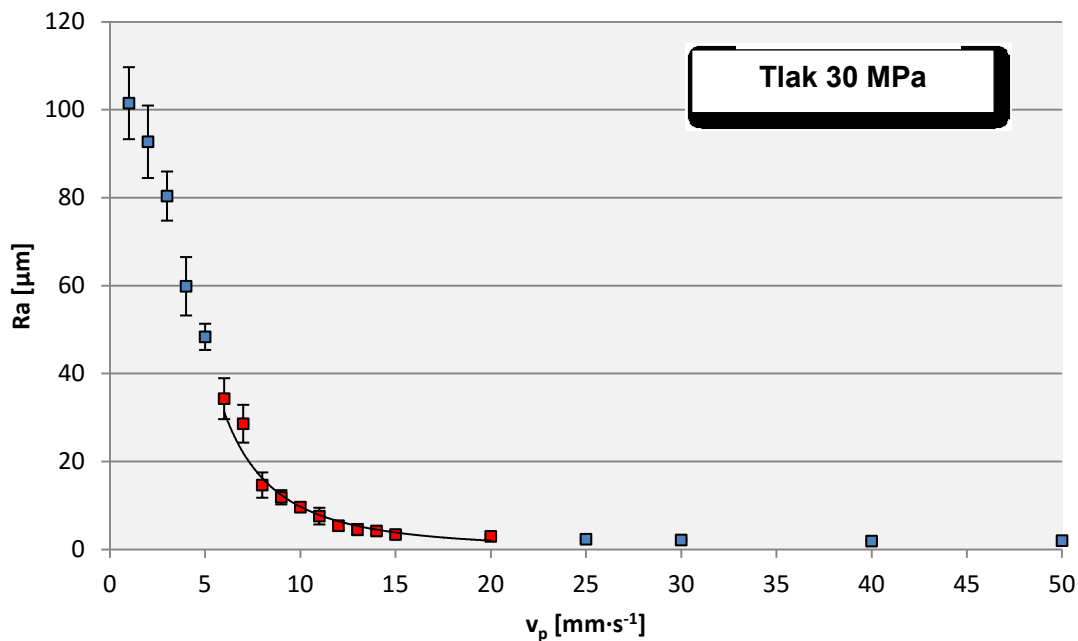
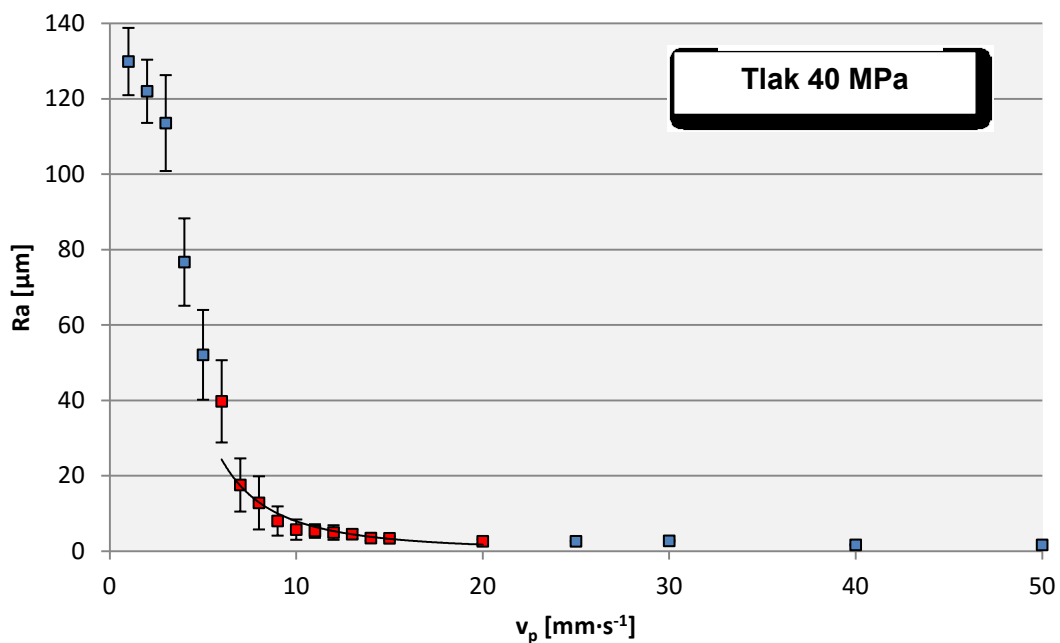


Obr. 54 Závislost parametru drsnosti Ra na změně rychlosti posuvu v_p při tlaku 20MPa.

Jednotlivé body v grafu na Obr. 54 představují průměrné naměřené hodnoty se směrodatnou odchylkou střední aritmetické úchylky Ra pro danou rychlost posuvu nástroje nad povrchem v_p při tlaku kapaliny 20MPa. Červené body grafu znázorňují vymezenou oblast, kde dochází ke zdrsňování povrchu ($6 - 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), ze které byla vypočítána závislost mezi parametrem drsnosti Ra a rychlostí posuvu paprsku. Tuto závislost lze zapsat ve tvaru:

$$Ra = 552,52e^{-0,302v_p} \quad [\mu\text{m}] \quad (14)$$

Rovnice (14) platí pro střední aritmetickou úchylku Ra při tlaku kapaliny 20MPa. Pro rovnici byl vypočítán koeficient determinace $R^2 = 0,91$.

Obr. 55 Závislost parametru drsnosti R_a na změně rychlosti posuvu v_p při tlaku 30MPa.Obr. 56 Závislost parametru drsnosti R_a na změně rychlosti posuvu v_p při tlaku 40MPa.

Z Obr. 55 a Obr. 56 lze vysledovat stejný trend u znázorněných bodů reprezentujících naměřené hodnoty střední aritmetické úchyly R_a pro danou rychlost posuvu nástroje nad povrchem v_p , jako na Obr. 54. Se vzrůstající rychlostí posuvu v_p klesá hodnota drsnosti povrchu R_a podle rovnic:

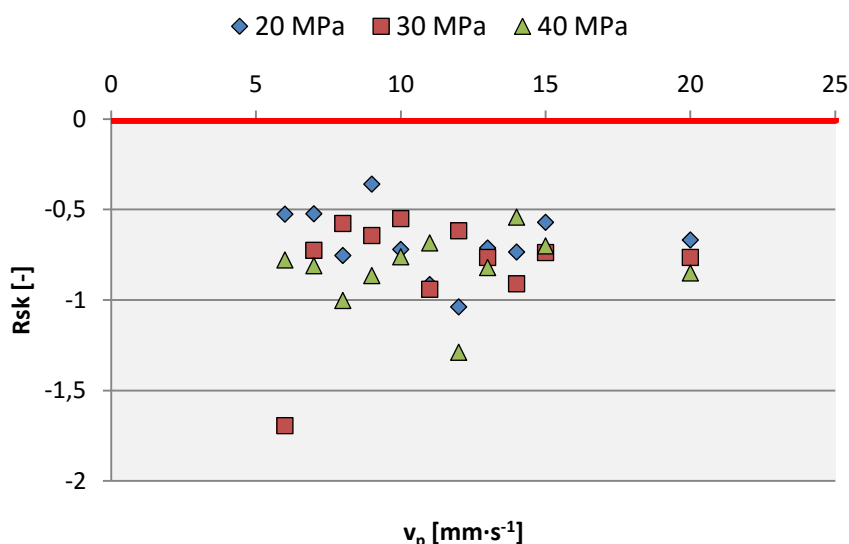
$$Ra = 1889,9v_p^{-2,289} \quad [\mu\text{m}] \quad (15)$$

$$Ra = 1227,5v_p^{-2,188} \quad [\mu\text{m}] \quad (16)$$

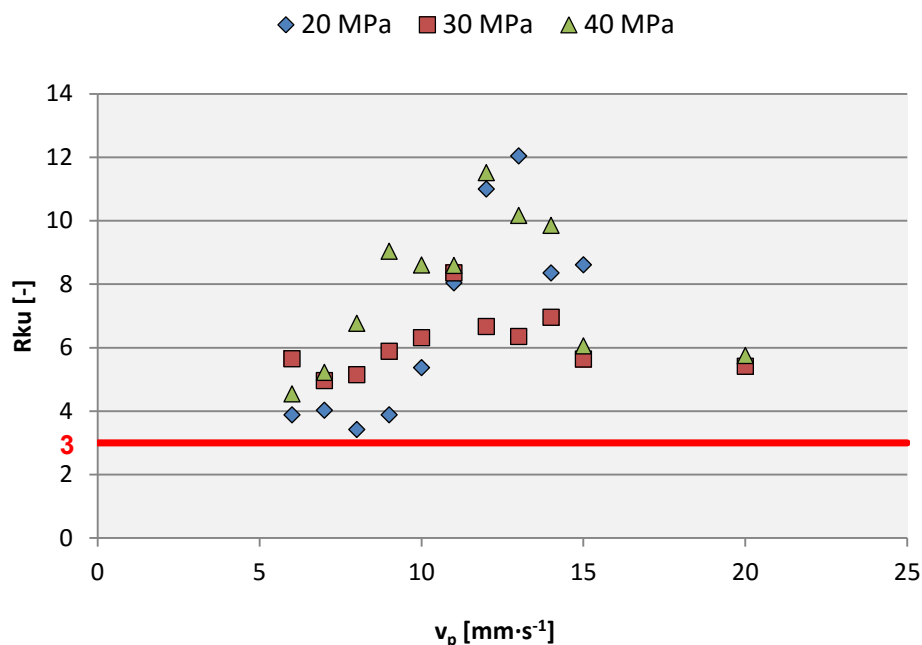
Rovnice (15) platí pro střední aritmetickou úchylku Ra při tlaku kapaliny 30MPa, koeficient determinace $R^2 = 0,95$. Rovnice (16) platí pro parametr drsnosti Ra při tlaku kapaliny 40MPa. Pro tuto rovnici byl vypočítán koeficient determinace $R^2 = 0,91$. Z takto získaných rovnic je možno (ovšem jen v daném rozmezí) predikovat výsledky parametrů drsnosti při zvolené rychlosti posuvu.

Pro úplnou analýzu povrchu byly dále sledovány při tlaku kapaliny 20, 30 a 40 MPa parametry drsnosti Rsk (šikmost) a Rku (špičatost). Obr. 57 graficky znázorňuje parametr Rsk při změně rychlosti posuvu paprsku v_p . Naměřené hodnoty jsou menší než 0, povrch je tudíž tvořen členitějšími a většími prohlubněmi. Povrch má málo výstupků a nedošlo by tedy k jeho rychlému opotřebení. Dá se předpokládat, že dosažený profil vyhovuje požadavkům na nosnou plochu, pro mechanické kotvení nejrůznějších povlaků, barev apod.

Obr. 58 znázorňuje parametr Rku , který ukazuje členitost povrchu. Naměřené hodnoty jsou větší než 3, jedná se tedy o povrch více členitý s mnoha prudkými změnami profilu. Lze tedy předpokládat, že povrch vytvořený technologií pulzujícího vodního paprsku při daném experimentálním nastavení má dobrý kotvicí profil pro následné nanášení povlaků.



Obr. 57 Naměřený parametr Rsk při změně rychlosti posuvu v_p pro tlak kapaliny 20, 30 a 40 MPa. Červená vodorovná úsečka zobrazuje oblast rozdělující hodnoty Rsk větších nebo menších než 0.



Obr. 58 Naměřený parametr Rku při změně rychlosti posuvu v_p pro tlak kapaliny 20, 30 a 40 MPa. Červená vodorovná úsečka zobrazuje oblast rozdělující hodnoty Rku větších nebo menších než 3.

8.3 DÍLČÍ ZÁVĚR

Tato část byla zaměřena na zjištění erozního účinku pulzujícího vodního paprsku na povrch vzorků ze slitiny hliníku při změně dvou jeho nejvýznamnějších parametrů zjištěných v předchozích experimentech (tlak vody a rychlost posuvu paprsku - viz kapitola 7 – plánovaný experiment). Byly zjištěny hranice tří oblastí účinku pulzujícího vodního paprsku: (i) oblast intenzivní eroze a objemového úběru materiálu, (ii) oblast zdrsnění povrchu s malým úběrem materiálu a (iii) oblast s pozorovatelným vlivem PWJ na povrch ovšem bez materiálového úběru.

Pomocí výškových parametrů Ra , Rq , Rz , Rsk a Rku byla definována drsnost povrchu materiálu v závislosti na posuvové rychlosti. S rostoucí posuvovou rychlostí nástroje nad povrchem v_p [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$] se drsnost (Ra , Rq a Rz) povrchu snižuje. Pro jednotlivé tlaky vody v oblasti zdrsnění povrchu byly stanoveny regresní křivky popisující v daném rozsahu závislost mezi rychlostí posuvu paprsku a drsností nově vzniklého povrchu po aplikaci PWJ.

Pro predikci a dosažení požadovaných parametrů drsnosti lze v závislosti na tlaku vody a rychlosti posuvu paprsku nad plochou konkrétního materiálu experimentálně stanovené regresní křivky dostatečně využít. Tyto křivky je ovšem možno aplikovat pouze ve sledovaném úseku posuvových rychlostí paprsku a to jen pro testovaný materiál. Pro stanovení obecnějších závislostí parametrů PWJ s ohledem na případné řízení a automatizaci procesu porušování povrchů a ovlivnění jejich vlastností pomocí vodních paprsků bude nezbytné provést další rozsáhlé a časově náročné experimenty na dalších materiálech, což ovšem přesahuje možnosti této práce. Provedené experimenty jsou však dobrým vodítkem pro další testy a naznačují směr, kterým by se budoucí badatelé mohli ubírat.

9 VYUŽITELNOST VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ

Technologie kontinuálního vodního paprsku se pro úpravu povrchů nejrůznějších materiálů běžně užívá. Její určitou nevýhodou je však vysoká pořizovací cena vysokotlakého zařízení a celý proces úpravy povrchů zejména u tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů je poměrně pomalý. Pulzující vodní paprsky nejsou v současnosti příliš rozšířeny, ovšem jejich potenciál zejména při čištění, úpravě povrchů a odstraňování povrchových vrstev je značný. Na rozdíl od klasického kontinuálního paprsku využívá technologie pulzujících paprsků nižších tlaků vody při zachování účinků srovnatelných s kontinuálními paprsky. To umožňuje používat mnohem levnější a běžně dostupná vysokotlaká čerpadla. Vzhledem k rozdílnému charakteru porušování materiálů pracuje navíc pulzující paprsek mnohem rychleji, což významnou měrou přispívá ke zlevnění a zrychlení celého procesu. Na rozdíl od abrazivního vodního paprsku, jehož schopnosti při řezání materiálů jsou vzhledem k rychlosti řezání a kvalitě řezné plochy nepřekonatelné, se pulzující paprsek pravděpodobně neprosadí jako řezný nástroj, ale právě úprava povrchů ve všech možných variantách nakonec zřejmě bude oblastí, ve které lze očekávat jeho masivní nasazení.

Jednou z konkrétních aplikací, která je v ÚGN v současnosti intenzivně vyvíjena za přispění výzkumu provedeného v předkládané dizertační práci, je nahrazení technologie kontinuálního vodního paprsku v automobilovém průmyslu při zdršňování povrchu válců spalovacích motorů pro následné povlakování tepelně a abrazivně vysoce odolným nástřikem. Důvodem pro změnu technologie je snaha zredukovat spotřebu energií, vody a pracovního času na minimum. Toho lze dosáhnout tak, že se použije menší čerpadlo dodávající tlak kolem 60 MPa (zatím se běžně používá tlak 300 MPa) a generátor pulzací. Desintegrační účinek by měl být zhruba stejný jako při užití kontinuálního paprsku. Aby nanášené povlaky správně plnily svou funkci, je nutné připravit povrch, který bude splňovat předepsané parametry drsnosti a další požadavky na strukturu povrchu. Pro dosažení těchto vlastností je nutné znát závislosti účinků jednotlivých technologických parametrů paprsku na výsledný povrch. Při výrobě dochází ke snížení spotřeby energií, vody a času na provedení požadovaného úkonu. Ve výsledku jsou tyto operace levnější a ekologičtější. Současně dochází k odstranění otřepů a očištění od řezných kapalin z předchozího obrábění.

Výzkum provedený v rámci mé disertační práce přispívá k pochopení vlivu technologických parametrů PWJ na obrobený povrch. Byly určeny vstupní technologické parametry, které mají hlavní vliv na výslednou topografii povrchu. Analýzou naměřených výsledků byly získány první závislosti parametru R_a na rychlosti posuvu paprsku a tlaku vody, pomocí kterých lze predikovat kvalitu nově vytvořeného povrchu.

Další vývoj v oblasti úpravy povrchů pulzujícím vodním paprskem bude zaměřen na rozšíření znalostí o účincích pulzujícího paprsku na další typy materiálů a o závislostech technologických parametrů na strukturu povrchu. V předkládané práci je zatím jen velmi malý záběr problému pulzujících vodních paprsků. Další rozšíření těchto znalostí povede k širšímu uplatnění v praxi a postupnému nahrazování technologií, které jsou neekonomické, nejsou šetrné k životnímu prostředí nebo mají nežádoucí účinky na zdraví.

ZÁVĚR

Dizertační práce studovala vliv pulzujícího vodního paprsku při jeho dopadu na povrch materiálů. Teoretická část se zaměřila na přehled současných poznatků o technologii vysokorychlostního vodního paprsku, zvláště pak jeho varianty – pulzujícího vodního paprsku.

Praktická část zahrnovala tři rozsáhlé experimenty, které byly realizovány na zařízeních Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě, kde byl vyvinut a patentován způsob pro generování pulzujícího vodního paprsku. V první části byly stanoveny erozní účinky pulzujícího vodního paprsku dopadajícího na povrch leštěného vzorku z korozivzdorné oceli. Byl zkoumán vliv opakovaných impaktů pulzů vody a rychlosti dopadu na erozi kovového povrchu. Bylo prokázáno, že eroze způsobená opakovanými dopady pulzující vody probíhá ve třech fázích. Jednotlivé erozní fáze na povrchu lze stanovit na základě povrchových charakteristik, jako jsou například parametry drsnosti R_a a R_z v závislosti na počtu impaktů pulzujícího vodního paprsku. Z experimentu bylo zjištěno, že počáteční fáze eroze vykazuje pouze plastické deformace na povrchu. Ve druhé fázi se tvoří erozní jamky a erozní krátery. Ve třetí fázi eroze pak dochází k dalšímu prohlubování erozní kráteru.

Druhá část experimentů se zaměřila na studium vlivu jednotlivých technologických parametrů pulzujícího vodního paprsku, jako jsou tlak vody, počet pulzů, rychlost posuvu trysky nad povrchem, průměr vodní trysky, úhel působení paprsku a vzdálenost trysky od povrchu, které ovlivňují vzhled a vlastnosti povrchu materiálů. Pomocí plánovaného experimentu, který byl realizován na hliníkové slitině a mědi, byly stanoveny faktory výrazně ovlivňující výsledek procesu úpravy povrchu pulzujícím vodním paprskem: ekvivalentní průměr vodní trysky, tlak vody a rychlost posuvu trysky nad povrchem vzorku a jejich vzájemné kombinace.

Pro efektivní využití a řízení pulzujícího vodního paprsku je vhodné zabývat se predikčními modely, které zajistí, aby byl znám výsledek požadované technologické operace na základě definovaných vstupních parametrů. Tato problematika byla obsahem třetí části experimentů, kdy byly zjištěny konkrétní hranice tří oblastí účinku pulzujícího vodního paprsku: oblast intenzivní eroze a objemového úběru materiálu, oblast zdrsňení povrchu s malým úběrem materiálu a oblast zpevnění povrchu. Pro oblast zdrsňení byl vytvořen analytický popis povrchu generovaného pulzujícím vodním paprskem. Pomocí výškových parametrů R_a , R_q , R_z , R_{sk} a R_{ku} byla definována drsnost povrchu materiálu v závislosti na posuvové rychlosti pro různé tlaky vody. S rostoucí posuvovou rychlostí nástroje nad povrchem v_p [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$] se drsnost (R_a , R_q a R_z) povrchu snižuje. Z pohledu intenzity eroze

pulzujícího vodního paprsku se s vzrůstajícím tlakem zvyšuje objem odebraného materiálu. S rostoucí rychlostí posuvu se objem odebraného materiálu snižuje. Na základě provedené analýzy byly stanoveny rovnice pro predikci kvality povrchu. Tyto predikční modely jsou použitelné jen na malou oblast technologických parametrů. Obecnější a širší predikční modely jsou velmi komplikované a v současné době, kdy ještě není zcela znám mechanismus působení pulzujícího paprsku, obtížně proveditelné.

Povrchy vytvořené pulzujícím vodním paprskem mají specifické vlastnosti, které by se daly využít při povrchových úpravách nejen strojních součástí. Proto by dalším krokem ve výzkumné činnosti mělo být zkoumání vlastností jako je přilnavost povlaků, korozivzdornost, pevnost a další.

Prezentované výsledky lze využít k optimalizaci technologie pulzujícího vodního paprsku při vytváření požadované topografie povrchu různých materiálů. Zejména jde o hledání vazby mezi vybranými technologickými parametry pulzujícího vodního paprsku při jejich experimentálním nastavení a mezi topografií výsledného povrchu.

CONCLUSION

This thesis studied effects of pulsating water jet impact on the surface of materials. The theoretical part is focused on an overview of current knowledge about the technology of high-speed water jet, especially its variant - pulsating water jet.

The practical part included three large-scale experiments, which were conducted by the equipment of the Institute of Geonics in Ostrava, where a method for generating a pulsating water jet was developed and patented. Erosion effects of pulsating water jet impinging on the polished stainless steel sample surface were determined in the first part. The influence of repeated impacts of water pulses and impact velocity on the erosion of the metal surface was investigated. It has been demonstrated, that the erosion caused by repeated impacts pulsating water takes place in three stages. Each erosion phase on the surface can be determined based on the surface characteristics such as roughness parameters Ra and Rz in relation to the number of pulsating water jet impacts. From the experiment, it was found that the initial phase erosion exhibits only plastic deformation on the surface. Erosion wells and erosion craters are formed in the second phase. The third phase of erosion can be characterised by further deepening of erosion crater.

The second part of experiments was focused on the study of individual technological parameters of the pulsating water jets, such as water pressure, number of pulses, the traverse speed of the nozzle above the surface, nozzle diameter, impact angle and stand-off distance from the surface, which affects the appearance and surface properties of materials. Factors influencing strongly the results of a surface treatment process by pulsating water jet were determined using the planned experiment. The tests were carried out on aluminium alloy and copper. The factors are: the equivalent nozzle diameter, water pressure and traverse speed of the nozzle over the sample surface and their combinations.

It is advisable to deal with prediction models for effective utilization and management of pulsating water jet, to be able to know the result of the required technological operation on the basis of defined input parameters. This issue was solved in the third part of the experiments. Specific boundaries for three areas of action of pulsating water jet (i.e. areas of intense erosion and volumetric material removal, roughening of the surface with little material removal and hardening of the surface) were found. An analytical description of the surface generated by the pulsating jet was created for the area of roughening. The surface roughness of the material was defined with height parameters Ra , Rq , Rz , Rsk and Rku depending on traverse speed for different water pressures. The roughness (Ra , Rq , and Rz) of the surface decreases with increasing traverse speed over the surface v_p [mm s^{-1}]. From

the viewpoint of the intensity of pulsating water jet erosion, the volume of removed material increases with increasing pressure and decreases with increasing traverse speed. Equations for predicting the surface quality were established based on the performed analysis. These predictive models are applicable only in a small area of the technological parameters. General and wider predictive models are very complicated and currently difficult to implement, because the mechanism of action of pulsating water jet it is not fully understood yet.

Surfaces created by pulsating water jet have specific characteristics that could be used not only in surface treatment for machine parts. Therefore, the next step in the research should be oriented at investigating of surface properties such as adhesion of coatings, corrosion resistance, strength and more.

Published results can be used to optimize the technology of pulsating water jet for creation of required surface topography of different materials. They concern in particular in the search for links between selected technological parameters of the pulsating water jet in the experimental setup and the resulting surface topography.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LONGRIDGE, C. C. Hydraulic mining. Publ. *Mining Journal*. 1910.
- [2] FOLDYNA, J. *Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků. Kandidátská disertační práce*. Akademie věd České republiky, Ústav geoniky Ostrava. 1996. 67 s., přílohy 29 s.
- [3] KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: Miroslav Mračko, 2001, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [4] WARDJet. How it works. [Online]. [Cit. 2016-05-20]. Dostupné na [www: <http://cdn.wardjet.com/images/waterjet-university/03-How-It-Works_files/image004.jpg](http://cdn.wardjet.com/images/waterjet-university/03-How-It-Works_files/image004.jpg)
- [5] WARDJet. Hight pressure waterjet cutting. [Online]. [Cit. 2016-05-20]. Dostupné na [www: <http://www.wardjet.com/03-how-it-works>](http://www.wardjet.com/03-how-it-works)
- [6] SUMMERS, D.A. *Waterjetting Technology*. CRC Press, 2003, 642 s. ISBN 0-419-19660-9.
- [7] VALÍČEK, J., HLOCH, S. *Měření a snímání kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava: VŠB-TUO 2008, 127s. ISBN 978-80-254-3588-5.
- [8] HASHISH, M. An Investigation of Milling With Abrasive-Waterjets. *ASME of Engineering for Industry*, May 1989, vol. 111, pp. 158-166.
- [9] MOMBER, W.A., KOVACEVIC, R. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. In: Springer Science & Business Media, 2012, Technology & Engineering, 394 s. ISBN 978-1-4471-1574-8.
- [10] CICCUCU, R. Water jet in rock and mineral engineering. University of Cagliari. [Online]. [Cit. 2015-05-25]. Dostupné na [www: <http://www2.udec.cl/alfatl/alfateclimin/documentos/cd_Arequipa/arequipa.pdf>](http://www2.udec.cl/alfatl/alfateclimin/documentos/cd_Arequipa/arequipa.pdf)
- [11] HLOCH, S., VALÍČEK, J. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava, 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
- [12] SITEK, L., FOLDYNA, J., ŠVEHLA, B. Vodní paprsek ve strojírenství. [Water jet in mechanical engineering.] *Strojárstvo - strojírenství*. Roč. 8, č. 5, 2004, pp. 100-101, ISSN 1335-2938.
- [13] KOLLÉ, J. Compressed-water pulse generators and applications. [Online]. [Cit. 2016-05-10]. Dostupné na [www: <http://ttinc10.qwestoffice.net/papers/water%20cannon.pdf>](http://ttinc10.qwestoffice.net/papers/water%20cannon.pdf)
- [14] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Košice: Vienala, 2000. 275 s, ISBN 80-7099-430-4.
- [15] GOKHAN, A. Performance of recycling abrasives in rock cutting by abrasive water jet. *Journal of Central South University*, 2015, vol. 22, pp. 1055-1061, ISSN 2095-2899.
- [16] FOLDYNA, J. SITEK, L., ŠVEHLA, B., ŠVEHLA, S. Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects. In: *Ultrasonics Sonochemistry*, roč. 11, 2004, č. 3-4, pp. 131-137.

- [17] VIJAY, M. M. 1992. Ultrasonically generated cavitating or interrupted jet, U. S. Patent No. 5,154,347.
- [18] VIJAY, M. M., FOLDYNA, J. „Ultrasonically modulated pulsed jets“. In 12th International Conference on Jetting Technology, page 15/36, 1994.
- [19] CHAINE, G. L. - CONN, A. F.: Passively-interrupted impulsive water jets. Proceedings of the 6th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, England, 1983, pp. 34-1 - 34-9.
- [20] VIJAY, M. M. FOLDYNA, J. REMISZ, J.: Ultrasonic Modulation of High-Speed Water Jets. Geomechanics 93, Proceedings of the International Conference Geomechanics 93. Rotterdam, Editor A. A. Balkema Publisher, 1994a, pp. 327-332.
- [21] BRUNTON, J., H. High Speed Liquid Impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 260, No. 1110, (Jul. 28, 1966), pp. 79-85.
- [22] SAMI, S. - ANDERSON, C. Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet. *Proceedings of the 7th International Symposium on Jet Cutting Technology*, BHRA, Cranfield, Bedford, England, Paper B4, 1984, pp. 91-98.
- [23] LUISET B., SANCHETTE, F., BILLARD, A., SCHUSTER, D. Mechanisms of stainless steels erosion by water droplets , *Wear* 303, 2013, pp. 459–464.
- [24] YIYU, L., FEI, H., XIAOCHUAN, L., XIANG, A. On the failure pattern of sandstone impacted by high-velocity water jet , *International Journal of Impact Engineering* 76, 2015, pp. 67-74.
- [25] FOLDYNA, J., ŠVEHLA, B. Method of generation of pressure pulsations and apparatus for implementation of this method. Czech patent, No. 299 412. 2008.
- [26] VIJAY, M. M., FOLDYNA, J. Ultrasonically modulated pulsed water jets: Effect of the frequency on the performance. In *Proceedings of the International Conference Geomechanics 96*, page 303/308, 1997.
- [27] FOLDYNA, J., SITEK, L., HABAN, V. Acoustic wave propagation in high-pressure system. *Ultrasonics*. 2006. vol. 44, p. E1457–E1460.
- [28] VIJAY, M. M., REMISZ, J., FOLDYNA, J., GRATTAN-BELLEW, P. E. Preweakening of Hard Rocks with Ultrasonically Modulated High Speed Pulsed Jets. Proceedings of the 12th International Conference on Jet Cutting Technology. Rouen, France, 1994.
- [29] ŘÍHA, Z., FOLDYNA, J. Ultrasonic pulsations of pressure in a water jet cutting tool *Tehnicki Vjesnik*, 2012. vol. 19, iss. 3, p. 487-491
- [30] FOLDYNA, J., ŘÍHA, Z., SITEK, L., ŠVEHLA, B. Simulace přenosu tlakových pulsací vysokotlakým systémem. Proceedings of the Conference ANSYSYS 2007. Part I. - CFD/FSI. Praha-Průhonice, TechSoft Engineering, spol. s r.o. Praha, 2007. p. 157-163. ISBN 978-80-239-9450-6.
- [31] NEBEKER, E. B. 1987. Percussive jets - State-of-the-art. *Proceedings of the 4th U.S. Water Jet Symposium*. St. Louis: WJTA, pp. 28-41.

- [32] SHEN, Z., WANG, Z. M. Theoretical analysis of a jet-driven Helmholtz resonator and effect of its configuration on the water jet cutting properties. *Proceedings of the 9th International Symposium on Jet Cutting Technology*, Cranfield: BHRA, 1988, pp. 189-201.
- [33] CHAHINE, G. L., CONN, A. F., JOHNSON, V. E., FREDERICK, G. S. Cleaning and cutting with self-resonating pulsed water jets. *Proceedings of the 2nd U.S. Water Jet Symposium*, St. Louis: WJTA, 1983, pp. 167-173.
- [34] VIJAY, M. M., FOLDYNA, J. Ultrasonically modulated pulsed jets: Basic study. In N. G. Allen (Ed.), *12th International Conference on Jet Cutting Technology*, London: BHR Group Conference Series, Mechanical Engineering Publications Limited, 1994, pp. 15-35.
- [35] FOLDYNA, J., SITEK, L., SCUCCA, J., MARTINEC, P., VALICEK, J., PALENIKOVA, K. Effects of Pulsating Water Jet Impact on Aluminium Surface. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, No. 20, 6174-6180, 2009.
- [36] HEYMANN, F. J. High-speed impact between a liquid drop and a solid surface. *Journal of Applied Physics*, 40 (13), 1969, pp. 5113-5122.
- [37] MOMBER, A. W. 2004. Wear of rocks by water flow. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (41), pp. 51-68.
- [38] HANCOX, N. L., BRUNTON, J. H. The erosion of solids by the repeated impact of liquid drops. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 260 (1110), 1966, pp. 121-139.
- [39] THOMAS, G. P., BRUNTON, J. H. Drop impingement erosion of metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 314 (1519), 1970, pp. 549-565.
- [40] BOWDEN, F. P., FIELD, J. E.. The brittle fracture of solids by liquid impact, by solid impact, and by shock. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 282 (1390), 1964, pp. 331-352.
- [41] FOLDYNA, J. Rozvoj technologie pulsujících vodních paprsků. In *Sborník příspěvků mezin. konf. Vodní paprsek/Water Jet 2009* [CD], ÚGN 2009, pp. 48 - 63, ISBN 978-80-86407-81-4.
- [42] Hammelmann stationary unit with electric motor. [Online]. [Cit. 2016-05-15]. Dostupné na [www: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hammelmann_Stationary_unit_with_electric_motor.jpg>](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hammelmann_Stationary_unit_with_electric_motor.jpg)
- [43] FOLDYNA, J., ŘÍHA, Z., SITEK, L. Studium šíření tlakových pulsací vysokotlakým systémem. *Sborník Konference ANSYS 2009*, Plzeň, 2009.
- [44] FOLDYNA, J., SITEK, L., JEKL, P., MARTINEC, P., NOVÁKOVÁ, D., WOLF, I., A KOL. Testing of pulsating jets in a granodiorite quarry. In *Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał zwięzłych*, Kraków: AGH, 2007, pp. 67-80.

- [45] SITEK, L., BODNÁROVÁ, L., FOLDYNA, J., KLICH, J. Využití nových poznatků při sanacích betonových konstrukcí vysokorychlostními vodními paprsky. [Use of new knowledge when removing concrete structures by high-speed water jets.] *Sanace betonových konstrukcí - mezinárodní symposium 2012. Sborník přednášek /22./*. Brno: VUT Brno, FAST - AdMaS, 2012. s. 143-152. ISSN 1211-3700.
- [46] FOLDYNA, J., et al.: Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface. In: *Journal of Material Processing Technology*, 2009, 209, pp. 6175-6180.
- [47] StoneAge Engineering the Power of Water. [Online]. [Cit. 2016-05-20]. Dostupné na [www: <http://www.stoneagetools.com/nozzles>](http://www.stoneagetools.com/nozzles)
- [48] Hammelmann. [Online]. [Cit. 2016-05-20]. Dostupné na [www: <http://www.hammelmann.de/en/produkte/anwendungstechnik/standard/dueseneinsaetze.php>](http://www.hammelmann.de/en/produkte/anwendungstechnik/standard/dueseneinsaetze.php)
- [49] ABB. IRB 6640 industrial robot. [Online]. [Cit. 2016-05-20]. Dostupné na [www: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6640/irb-6640-data>](http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6640/irb-6640-data)
- [50] BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B.: Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu. *Kvalita a geometrické specifikace produktů*, 2005. pp.1-3, ISBN 1801-5352.
- [51] 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.
- [52] Hommel-etamic. [Online]. [Cit. 2016-05-25]. Dostupné na [www: <http://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf>](http://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf)
- [53] JIŘÍKOVSKÝ, K. Laserový konfokální řádkovací mikroskop. *MM Průmyslové spektrum*. [Online]. [Cit. 2016-05-25]. Dostupné na [www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop.html>](http://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop.html)
- [54] Nikon instruments. Eclipse 80i. [Online]. [Cit. 2016-05-25]. Dostupné na [www: <https://www.nikoninstruments.com/cz_CZ/Products/Upright-Microscopes/Research/Eclipse-80i>](https://www.nikoninstruments.com/cz_CZ/Products/Upright-Microscopes/Research/Eclipse-80i)
- [55] FOLDYNA, J., KLICH, J., HLAVÁČEK, P., ZELEŇÁK, M., ŠČUČKA, J. Erosion of metals by pulsating water jet. *Tehnički vjesnik* 19, 2,2012, pp. 381-386.
- [56] Steel numbers. Austenitic stainless steel. [Online]. [Cit. 2016-05-5]. Dostupné na [www: <http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=107>](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=107)
- [57] Steel numbers. [Online]. [Cit. 2016-05-5]. Dostupné na [www: <http://www.steelnumber.com/en/number_en10027_eu.php>](http://www.steelnumber.com/en/number_en10027_eu.php)
- [58] Steel numbers. Aluminium. [Online]. [Cit. 2016-05-5]. Dostupné na [www: <http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1149>](http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1149)
- [59] MILLER, I. DOE. *Návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB*. Praha: INTERQUALITY, 2010. 122 s. ISBN 978-80-902770-5-2.
- [60] MILANI, A. S., WANG, H., FREY, D. D., ABEYARATNE, R. C. Evaluating Three DOE Methodologies: Optimization of a Composite Laminate under Fabrication Error, *Quality Engineering*, 2008. 21:1, pp. 96-110.

- [61] HLAVÁČEK, P., KRUML, T., FOLDYNA, J., TOBIÁŠ, J., MAN, J. Effect of pulsating water jet peening on stainless steel. *Vodní paprsek 2015 - výzkum, vývoj, aplikace*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, v.v.i, 2015 - (Sitek, L.; Klichová, D.), pp. 29-36, ISBN 978-80-86407-56-2.
- [62] NOVÁK, Z. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum*. [Online]. [Cit. 2016-04-10]. Dostupné na [www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html>](http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html)
- [63] AZHARI A.,SCHINDLER, CH., LI, B. Effect of waterjet peening on aluminum alloy 5005, *Int J Adv Manuf Technol*. 2013, pp. 785–795.
- [64] HAN, B., JU, D.Y., JIA, W.P. Influence of water cavitation peening with aeration on fatigue behaviour of SAE1045 steel. *Applied Surface Science* 253. 2007. pp. 9342-9346.
- [65] AZHARI, A., SCHINDLER, CH., HILBERT, K., GODARD, C., KERSCHER, E. Influence of waterjet peening and smoothing on the material surface and properties of stainless steel 304, *Surface & Coatings Technology* 258. 2014, pp. 1176–1182.

SEZNAM PUBLIKACÍ

- I. **KLICH, J., VALÍČEK, J., HLOCH, S.** Proposal of data bank for prediction of hydroabrasive dividing materials parameters. In *Technological engineering*, 1/2009, vol. 6, pp. 22-25, ISSN 1336-5967.
- II. VALÍČEK, J., HLAVÁČEK, P., **KLICH, J., HLOCH, S.** Methods of measurement and analysis of surface topography created by hydroabrasive waterjet. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2009*, Ostrava, Czech Republic, 4. - 5. 11. 2009, pp. 170-178, ISBN 978-80-86407-81-4.
- III. VALÍČEK, J., HLAVÁČEK, P., **KLICH, J., HLOCH, S.** Metody měření a analýza topografie povrchů vytvořených hydroabrazivním paprskem. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2009*, Ostrava, Czech Republic, 4. - 5. 11. 2009, pp. 170-178, ISBN 978-80-86407-81-4.
- IV. SITEK, L., FOLDYNA, J., WOLF, I., **KLICH, J., MAZÁČOVÁ, R.** Preparation of concrete substrate for repair by continuous and pulsating oscillating water jets. In *Sborník přednášek SANACE 2010*, Mezinárodní sympozium /22./, Brno, 19.-21.5.2010, pp. 317-326, ISSN 1211-3700.
- V. **KLICH, J.** Study of the surface topography created by pulsating water jet. *Ph. D. Workshop Proceedings 2010*, 25.11.2010, Ostrava, pp. 97-101, ISBN 978-80-86407-96-8.
- VI. **KLICH, J., VALÍČEK, J., SITEK, L., FOLDYNA, J., HARNIČÁROVÁ, M., HLAVÁČEK, P.** Study of surface topography generated by the action of pulzating waterjet. *Proceedings of the 17th International Conference Engineering Mechanics 2011*, Fuis (ed.), Svratka, Czech Republic, 9. - 12.5.2011, Institute of Thermomechanics, ASCR, v.v.i., 2011: pp. 291-294, ISBN 978-80-87012-33-8.
- VII. SITEK, L., FOLDYNA, J., **KLICH, J., MARTINEC, P., NOVÁKOVÁ, D.** Precursors and carriers of nanoparticles prepared by water jet disintegration. Abstracts of Conference Proceedings, *Nano Ostrava 2011*. Ostrava: VŠB-TUO, 2011, pp. 34-34. ISBN 978-80-7329-264-5.
- VIII. **KLICH, J., FOLDYNA, J., HLAVÁČEK, P., ZELENÁK, M., ŠČUČKA, J.** Erosion of metals by pulzating water jet. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2011*, Ostravice, Czech Republic, 3. - 5. 10. 2011, pp. 165-174, ISBN: 978-80-86407-23-4.
- IX. **KLICH, J., FOLDYNA, J., HLAVACEK, P., ZELENAK, M., SCUČKA, J.** Influence of number of pulzes impact on surface topography generated by the action of pulzating water jet. *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2011*, Fukuoka, Japan, 6.-7.12.2011, pp. 69-74, ISBN 978-4-9902356-1-1.
- X. KLICHOVA, D., **KLICH, J., VALICEK, J.** Design of the database for prediction of cutting of parameters abrasive water jet technology. *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2011*, Fukuoka, Japan, 6.-7.12.2011, pp. 63-67, ISBN 978-4-9902356-1-1.

- XI. **KLICH, J.**, SITEK, L., FOLDYNA, J., ŠČUČKA, J. Pulsating water jet as a tool for basalt surface treatment. *Book Chapter in Monography Mining Techniques* (AGH, Poland), 20. - 23.9.2011, pp. 63-72, ISBN 978-83-930353-4-2.
- XII. ZELENÁK, M. VALÍČEK, J. HLOCH, S. KOZAK, D. SAMARDŽIČ, I. HARNIČÁROVÁ, M. KLICH, J. HLAVÁČEK, P. CINCIO, R. Comparison of mechanical properties of surface layers with use of nanoindentation and microindentation tests. *Metalurgia* 51, 3, 2012, pp. 309-312, ISSN 0543-5846.
- XIII. SITEK, L., BODNÁROVÁ, L., FOLDYNA, J., **KLICH, J.** Use of new knowledge when removing concrete structures by high-speed water jets. *Sborník přednášek XXII. mezin. symposia Sanace 2012* (Brno, 23. – 25.5.2012), SSBK 2012, pp. 143 - 152, ISSN 1211-3700.
- XIV. SITEK, L., FOLDYNA, J., **KLICH, J.**, BODNÁROVÁ, L., WOLF, I. Application of oscillating waterjets to in situ removing and decomposed surface layers of concrete. *Tunel*. Roč. 21, č. 2, 2012, pp. 16-26, ISSN 1211-0728.
- XV. ZELENÁK, M. VALÍČEK, J., **KLICH, J.**, ŽIDKOVÁ, P. Comparison of surface roughness quality created by abrasive water jet and CO2 laser beam cutting. *Technickí vjesnik - Technical Gazette*. Roč. 19, č. 3, 2012, pp. 481-485, ISSN 1330-3651.
- XVI. SITEK, L., FOLDYNA, J., MARTINEC, P., **KLICH, J.**, MAŠLÁŇ, M. On the preparation of precursors and carriers of nanoparticles by water jet technology. *Technickí vjesnik - Technical Gazette*. Roč. 19, č. 3, 2012, pp. 465-474, ISSN 1330-3651.
- XVII. HELA, R., BODNÁROVÁ, L., NOVOTNÝ, M., SITEK, L., **KLICH, J.**, WOLF, I., FOLDYNA, J. Comparison of the actual costs during removal of concrete layer by high-speed water jets. *Journal of Business Economics and Management*, Roč. 13, č. 4, 2012, pp. 763-775, ISSN 1611-1699.
- XVIII. HARNIČÁROVÁ, M., VALÍČEK, J., ZAJAC, J., HLOCH, S., ČEP, R., DŽUBÁKOVÁ, I., TOFIL, S., HLAVÁČEK, P., **KLICH, J.**, ČEPOVÁ, L. Techno-economical comparison of cutting material by laser, plasma and oxygen. *Technickí vjesnik - Technical Gazette*. Roč. 19, č. 4, 2012, pp. 813-817, ISSN 1330-3651.
- XIX. FOLDYNA, J., **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P., ZELENÁK, M., ŠČUČKA, J. Erosion of metals by pulsating water jet. *Technickí vjesnik - Technical Gazette*. Roč. 2, č. 19, 2012, pp. 381-386, ISSN 1330-3651.
- XX. ZELENÁK, M., **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P., FOLDYNA, J., SITEK, L. Visualisation of Abrasive Particles in Suction Part of Abrasive Cutting Head. *CIM 2013 Computer Integrated Manufacturing and High Speed Maching*. Zagreb : Croatian Assosiation of Production Engineering, 19. - 22.06.2013, pp. 245-250, ISBN 978-953-7689-02-5.
- XXI. **KLICH, J.**, SITEK, L., ZELENÁK, M., HLAVÁČEK, P., FOLDYNA, J., BODNÁROVÁ, L., VÁLEK, J. Effects of water jet on heat-affected concretes - laboratory tests. *Sanace betonových konstrukcí 2013*. Brno 15. - 17.5.2013. pp. 140-148, ISBN 978-80-905471-0-0.

- XXII. **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P., ZELENÁK, M., SITEK, L., FOLDYNA, J. Testing of Commercial Cutting Heads for Abrasive Water Jet Technology. *CIM 2013 Computer Integrated Manufacturing and High Speed Maching*. Zagreb 19. - 22.6.2013, pp. 149-154, ISBN 978-953-7689-02-5.
- XXIII. SITEK, L., BODNÁROVÁ, L., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., HLAVÁČEK, P., ZELENÁK, M. Laboratory research on disintegration of concretes exposed to high temperature by water jets. *Nowoczesne metody eksploatacji wegla skal zwiezlych*. Medzinarodowa konferencja techniki urbania /8./, Krynica, 24. - 27.9.2013, pp. 26-35, ISBN 978-83-930353-1-1.
- XXIV. **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P., ŠČUČKA, J., SITEK, L., FOLDYNA, J., GEORGIOVSKÁ, L., SOUČEK, K., STAŠ, L., BORTOLUSSI, A. Processing and finishing of granite surfaces. *Nowoczesne metody eksploatacji wegla skal zwiezlych*. Medzinarodowa konferencja techniki urbania /8./, Krynica, 24. - 27.9.2013, pp. 36-43, ISBN 978-83-930353-1-1.
- XXV. FOLDYNA, J., ZELENÁK, M., **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P., SITEK, L. The measurement of the velocity of abrasive particles at the suction part of the cutting head. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2013*. Karolinka, Czech Republic, 22. - 24. 10. 2013, pp. 47-55, ISBN 978-80-86407-43-2.
- XXVI. HLAVÁČEK, P., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., SITEK, L. Measurement and evaluation of pulsating water jet peening intensity. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2013*. Karolinka, Czech Republic, 22. - 24. 10. 2013, pp. 67-74, ISBN 978-80-86407-43-2.
- XXVII. **KLICH, J.**, KLICHOVÁ, D., HLAVÁČEK, P. Effects of pulsating water jet on materials with variously modified surface. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2013*. Karolinka, Czech Republic, 22. - 24. 10. 2013, pp. 103-110, ISBN 978-80-86407-43-2.
- XXVIII. ŠČUČKA, J., BÓDI, Z., HLAVÁČEK, P., **KLICH, J.**, MARTINEC, P., FOLDYNA, J. Removal of polyurea spray coatings from the surface of cement concrete by water jet technology. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2013*. Karolinka, Czech Republic, 22. - 24. 10. 2013, pp 241-248, ISBN 978-80-86407-43-2.
- XXIX. SITEK, L., BODNÁROVÁ, L., FOLDYNA, J., **KLICH, J.** Use of new knowledge during pre-treatment of surface of concrete structures by high-speed water jets. *Beton*. Roč. 13, č. 2, 2013, pp. 66-71, ISSN 1213-3116.
- XXX. SITEK, L., BODNÁROVÁ, L., VÁLEK, J., ZELENÁK, M., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., NOVOTNÝ, M. Effects of Water Jet on Heat-Affected Concretes. *Procedia Engineering*. Roč. 57, č. 1, 2013, pp. 1036-1044, ISSN 1877-7058.
- XXXI. CÁRACH, J., HLAVÁČEK, P., VASILKO, K., **KLICH, J.**, HLOCH, S. Some results of tangential turning with an abrasive water jet. *TEAM 2013. Proceedings of the 5th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society*. Prešov, Slovak Republic, 4.-6.11.2013, pp. 350-354, ISSN 1847-9065.

- XXXII. CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., **KLICH, J.**, ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D., ŠOMŠÁK, M. Description of technology and factors influencing material removal by abrasive water jet turning. *TEAM 2013. Proceedings of the 5th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society*. Prešov, Slovak Republic, 4.-6.11.2013, pp. 440-443, ISSN 1847-9065.
- XXXIII. LEHOCKÁ, D., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., HLOCH, S., ZELENÁK, M., CÁRACH, J., ANDREJ, A. Aluminium and copper disintegration using pulsating water jet. *Strojárstvo*. Roč. 17, č. 6, 2014, pp. 1-6, ISSN 0562-1887.
- XXXIV. HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., VASILKO, K., CÁRACH, J., SAMARDŽIČ, I., KOZAK, D., ŠČUČKA, J., **KLICH, J.**, KLICHOVÁ, D. Abrasive Waterjet (AWJ) Titanium Tangential Turning Evaluation. *Metalurgija*. Roč. 53, č. 4, 2014, pp. 537-540, ISSN 0543-5846.
- XXXV. CÁRACH, J. HLAVÁČEK, P., VASILKO, K., **KLICH, J.**, HLOCH, S. Tangenciálne sústruženie hydroabrazívnym prúdom. [Tangential Turning by Hydroabrasive Flow.] *Strojárstvo - strojírenství*. Roč. 2, č. 2, 2014, pp. 84-87, ISSN 1335-2938.
- XXXVI. BODNÁROVÁ, L., SITEK, L., FOLDYNA, J., **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P. Laboratory Experiments on Effects of Water Jet on Heat-Affected Concretes. *Applied Mechanics and Materials*. Roč. 459, č. 459, 2014, pp. 650-657, ISSN 1660-9336.
- XXXVII. LEHOCKÁ, D., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., HLOCH, S., CÁRACH, J. Erosion effects evaluation of pulsating water jet on brass EN 12164. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2015*, Velké Losiny, Czech Republic, 6. - 8. 10. 2015, pp. 131-143, ISBN 978-80-86407-56-2.
- XXXVIII. LEHOCKÁ, D., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., HLOCH, S., ZELENÁK, M., CÁRACH, J. Copper and Copper Alloys Disintegration Using Pulsating Water Jet. *CIM 2015 - Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining - Conference Proceedings*. Zagreb : Croatian Association of Production Engineering, 2015, Scientific Conference on Production Engineering. Vodice, 10.-13.6.2015.
- XXXIX. HLAVÁČEK, P., **KLICH, J.**, KUBINA, L., SITEK, L. Utilization of waterjets in processing of rock materials. Międzynarodowa Konferencja - TECHNIKI URABIANIA /9./ *Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał zwięzłych*. Krynica, Krakow 29.9. - 2.10.2015, pp. 34-44, ISBN 978-83-930353-5-9.
- XL. BODNÁROVÁ, L., VÁLEK, J., SITEK, L., FOLDYNA, J., **KLICH, J.** Concrete damaged by high temperature – possibilities of treatment with high speed water jet. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2015*, Velké Losiny, Czech Republic, 6. - 8. 10. 2015, pp. 7-12, ISBN 978-80-86407-56-2.
- XLI. CÁRACH, J., HLOCH, S., **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P., KLICHOVÁ, D. Hydro-abrasive machining of rotating workpieces from graphite and aluminium alloy. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2015*, Velké Losiny, Czech Republic, 6. - 8. 10. 2015, pp. 13-22, ISBN 978-80-86407-56-2.
- XLII. **KLICH, J.**, KLICHOVÁ, D. Study of surface topography of material eroded by pulsating water jet. *Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Water Jet 2015*, Velké Losiny, Czech Republic, 6. - 8. 10. 2015, pp. 103-112, ISBN 978-80-86407-56-2.

- XLIII. LEHOCKÁ, D., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., HLOCH, S., CÁRACH, J. AISI 304 stainless steel disintegration using a water jet intensified by mechanical vibrations with frequency of 20kHz. *International Scientific and Expert Conference TEAM 2015 /7./*. Belgrade 15.-16.10.2015, pp. 320-323, ISBN 978-86-7083-877-2.
- XLIV. HLOCH, S., FOLDYNA, J., ZELENÁK, M., **KLICH, J.**, HVIZDOŠ, P. Bone cement demolition by pulsating liquid jets. *International Scientific and Expert Conference TEAM 2015 /7.* Belgrade, 15.-16.10.2015, pp. 535-537, ISBN 978-86-7083-877-2.
- XLV. HLAVÁČEK, P., CÁRACH, J., HLOCH, S., VASILKO, K., KLICHOVÁ, D., **KLICH, J.**, LEHOCKÁ, D. Sandstone Turning by Abrasive Waterjet. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Roč. 48, č. 6, 2015, pp. 2489-2493, ISSN 0723-2632.
- XLVI. FOLDYNA, J., ZELENÁK, M., **KLICH, J.**, HLAVÁČEK, P., SITEK, L., ŘÍHA, Z. The measurement of the velocity of abrasive particles at the suction part of the cutting head. *Technicki vjesnik - Technical Gazette*. Roč. 22, č. 6, 2015, pp. 1441-1446, ISSN 1330-3651.
- XLVII. KLICHOVÁ, D., **KLICH, J.**, GURKOVÁ, L. Study of quality of nine aluminium alloys surfaces created using abrasive waterjet. *MM Science Journal*, 2016, March, pp. 892-895, ISSN 1803-1269.
- XLVIII. LEHOCKA, D., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., HLOCH, S., KROLCZYK, J.B., CARACH, J., KROLCZYK, G.M. Copper alloys disintegration using pulsating water jet *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Volume 82, March, 2016, pp. 375-383, ISSN 0263-2241.
- XLIX. KLICHOVA, D., **KLICH, J.** Study of the effect of material machinability on quality of surface created by abrasive water jet. *Procedia Engineering*, Volume 149, 2016, pp. 177-182, ISSN 1877-7058.
- L. LEHOCKÁ, D., **KLICH, J.**, FOLDYNA, J., HLOCH, S., HVIZDOŠ, P., FIDES, M., BOTKO, F., CÁRACH, J. Surface integrity evaluation of brass CW614N after impact of acoustically excited pulsating water jet. *Procedia Engineering*, Volume 149, 2016, pp. 236-244, ISSN 1877-7058.

PŘÍLOHY

Příloha č. 1 Technické specifikace použitých zařízení

Příloha č. 2 Výsledky plánovaného experimentu

Příloha č. 3 Výsledky z III. experimentu