



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# STUDIUM VLIVU TECHNOLOGIE PULSUJÍCÍHO VODNÍHO PAPRSKU (PWJ) NA POVRCH KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

STUDY OF THE EFFECT OF PULSATING WATER JET TECHNOLOGY (PWJ) ON THE SURFACE OF  
METALLIC MATERIALS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Král

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alice Chlupová, Ph.D.

BRNO 2022

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství  
Student: **Bc. Dominik Král**  
Studijní program: Materiálové inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Alice Chlupová, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

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

### **Studium vlivu technologie pulsujícího vodního paprsku (PWJ) na povrch kovových materiálů**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V rámci řešení diplomové práce se bude studovat vliv pulsujícího vodního paprsku (PWJ) na povrch kovových materiálů. Tato technologie byla vyvinuta především pro úběr materiálů, nicméně jeví se i jako vhodná varianta pro povrchové zpracování materiálů zvyšující únavovou odolnost. Během studia budou stanoveny parametry vhodné při použití metody (PWJ) pro úpravu povrchu materiálu a bude studována jak odezva mikrostruktury, tak ovlivnění některých mechanických vlastností (tvrdosti) v podpovrchové vrstvě.

#### **Cíle diplomové práce:**

Určit vliv parametrů vodního paprsku na erozní stádia, zejména pak vliv stand-off-distance, tj. vzdálenost trysky od povrchu materiálu předem upraveného různými technikami (drsné a jemné frézování, broušení) na topografii kovového vzorku vystaveného působení pulzujícího vodního paprsku. Určit typické znaky pro jednotlivé fáze od zpevnění až po hloubkovou erozi. Pomocí metalografických výbrusů posoudit profil erozních drah, určit výslednou drsnost povrchu, stanovit vliv tryskání na zvýšení tvrdosti povrchu a pomocí elektronové mikroskopie studovat vývoj mikrostruktury materiálu v podpovrchových vrstvách.

#### **Seznam doporučené literatury:**

FOLDYNA, J. Use of Acoustic Waves for Pulsating Water Jet Generation, Chapter from book: Acoustic Waves - From Microdevices to Helioseismology, (2011) ISBN: 978-953-307-572-3, <https://doi.org/10.5772/18862>



HLOCH S., M. SRIVASTAVA, A. NAG, M. MÜLLER, M. HROMASOVÁ, J. SVOBODOVÁ, T. KRUML, A. CHLUPOVÁ and D. ČUHA. Effect of pressure of pulsating water jet moving along stair trajectory on surface morphology and microhardness, *Wear* 452–453 (2020) 203278, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203278>

HLOCH S., P. ADAMČÍK, A. NAG, M. SRIVASTAVA, D. ČUHA, M. MÜLLER, M. HROMASOVÁ and J. KLICH. Hydrodynamic ductile erosion of aluminium by a pulsed water jet moving in an inclined trajectory, *Wear* 428–429 (2019) 178-192, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.015>

SRIVASTAVA M., S. HLOCH, R. TRIPATHI and D. KOZAK. Ultrasonically generated pulsed water jet peening of austenitic stainless-steel surfaces, *Journal of Manufacturing Processes*, 32 (2018) 455-468, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.016>

LEHOCKÁ D., D. KLICHOVÁ, J. FOLDYNA, S. HLOCH, P. HVIZDOŠ, M. FIDES and F. BOTKO. Comparison of the influence of acoustically enhanced pulsating water jet on selected surface integrity characteristics of CW004A copper and CW614N brass, *Measurement* 110 (2017) 230-238, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.005>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Cílem předložené práce je pojednat o vlivu technologie pulzujícího vodního paprsku na povrch kovových materiálů – zejména na povrch oceli EA4T. Budou popsány jednotlivé experimentální metody, které byly v průběhu řešení práce použity. Bude popsána technologie vodního paprsku, kdy bude věnována pozornost hlavně pulzujícímu vodnímu paprsku. V experimentální části práce dojde k popisu a vyhodnocení dosažených výsledků.

### **Klíčová slova**

pulzující vodní paprsek, vodní klastry, eroze, stand-off-distance

## **Abstract**

The aim of the presented work is to discuss the influence of a Pulsating Water Jet on the surface of metallic materials – especially on the surface of EA4T steel.

The individual experimental methods that were used during the solution will be described. The technology of the water jet will be described, where attention will be paid mainly to the pulsating water jet. In the experimental part of the work there will be a description and evaluation of the achieved results.

### **Keywords**

Pulsating Water Jet, water clusters, erosion, stand-off-distance

KRÁL, Dominik. *Studium vlivu technologie pulsujícího vodního paprsku (PWJ) na povrch kovových materiálů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139693>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Alice Chlupová.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Studium vlivu technologie pulsujícího vodního paprsku (PWJ) na povrch kovových materiálů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval své vedoucí diplomové práce, paní Ing. Alici Chlupové, Ph.D., za pomoc a trpělivost při zpracovávání této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval pracovníkům Ústavu fyziky materiálů (IPM), Akademie věd České republiky v Brně, kteří mi byli nápomocni při zpracování mé diplomové práce.

# Obsah

1. Úvod .....	1
2. Cíle práce .....	2
3. Materiál a experimentální metody .....	3
3.1 Ocel EA4T – vlastnosti a mikrostruktura .....	3
3.2 Světelná mikroskopie .....	4
3.2.1 Pozorování ve světlém poli – BF .....	4
3.2.2 Pozorování v tmavém poli – DF .....	4
3.2.3 Použití polarizovaného světla .....	5
3.2.4 Diferenciální interferenční kontrast .....	5
3.3 Elektronová mikroskopie .....	7
3.3.1 Pružný rozptyl .....	7
3.3.2 Nepružný rozptyl .....	8
3.3.3 Vakuum .....	8
3.3.4 Rastrovací elektronová mikroskopie (REM) .....	8
3.3.5 Difrakce zpětně rozptýlených elektronů (EBSD) .....	10
3.3.6 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM) .....	13
3.4 Měření tvrdosti dle Vickerse .....	15
3.5 Technologie vodního paprsku .....	17
3.5.1 Kontinuální vodní paprsek (CWJ) .....	17
3.5.2 Abrazivní vodní paprsek (AWJ) .....	19
3.5.3 Pulzující vodní paprsek (PWJ) .....	20
4. Výsledky experimentů a diskuse .....	30
4.1 Mikrostruktura oceli EA4T .....	30
4.2 Aplikace PWJ a použité technologické podmínky .....	32
4.3 Analýza erozních drážek .....	33
4.3.1 Vzhled erozních drážek pomocí SM .....	33
4.3.2 Vzhled erozních drážek pomocí REM .....	34
4.3.3 Hloubka a šířka erozních drážek .....	35
4.3.4 Vyhodnocení tvaru drážek s ohledem na definovaná stádia eroze .....	37
4.4 Profily po průchodu PWJ – REM .....	39
4.5 EBSD analýza materiálu .....	42
4.6 EBSD – kernelova misorientace .....	44
4.7 TEM – analýza vnitřní mikrostruktury .....	46
4.8 Měření tvrdosti dle Vickerse .....	51

5. Závěry.....	54
6. Použitá literatura.....	55
7. Seznam zkratk a symbolů.....	58
8. Seznam obrázků.....	59
9. Přílohy .....	62

# 1. Úvod

V rámci řešení diplomové práce (DP) se bude studovat vliv pulzujícího vodního paprsku (PWJ) na povrch kovových materiálů.

Tato technologie byla vyvinuta především pro úběr materiálů, nicméně se jeví i jako vhodná varianta pro povrchové zpracování materiálů zvyšující únavovou odolnost.

Během studia budou stanoveny parametry vhodné při použití metody (PWJ) pro úpravu povrchu materiálu a bude studována jak odezva mikrostruktury, tak ovlivnění některých mechanických vlastností (tvrdosti) v podpovrchové vrstvě.



## 2. Cíle práce

Určit vliv parametrů vodního paprsku na erozní stádia, zejména pak vliv stand-off-distance, tj. vzdálenost trysky od povrchu materiálu předem upraveného různými technikami (drsné a jemné frézování, broušení) na topografii kovového vzorku vystaveného působení pulzujícího vodního paprsku. Určit typické znaky pro jednotlivé fáze od zpevnění až po hloubkovou erozi. Pomocí metalografických výbrusů posoudit profil erozních drah, určit výslednou drsnost povrchu, stanovit vliv tryskání na zvýšení tvrdosti povrchu a pomocí elektronové mikroskopie studovat vývoj mikrostruktury materiálu v podpovrchových vrstvách.

### 3. Materiál a experimentální metody

Materiálem pozorovaným v této diplomové práci je ocel EA4T (25CrMo4). Mezi metody, které budou využity pro studium mikrostruktury materiálu v diplomové práci patří: světelná mikroskopie, elektronová mikroskopie (rastrovací i transmisní), difrakce zpětně rozptýlených elektronů (mapy orientace) a měření tvrdosti dle Vickerse. Metoda, která bude použita pro povrchové zpracování materiálu je technologie pulzujícího vodního paprsku (PWJ).

#### 3.1 Ocel EA4T – vlastnosti a mikrostruktura

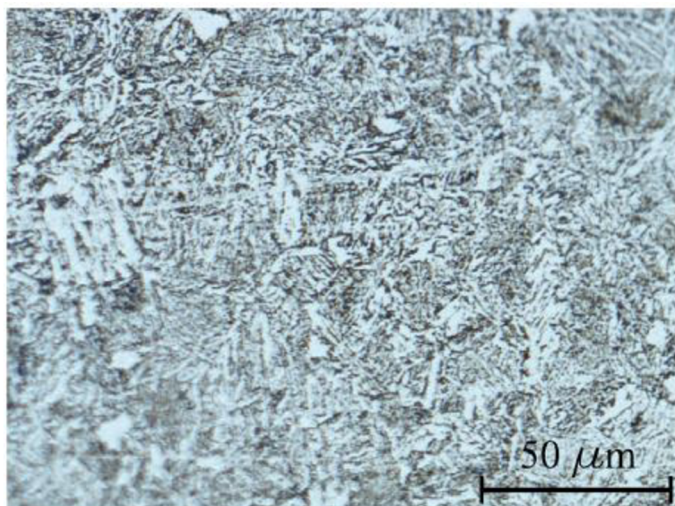
Materiál EA4T je nízkouhlíková ušlechtilá chrom – molybdenová ocel určená k tepelnému zpracování – zušlechťování. Chemické složení oceli EA4T (25CrMo4) je uvedeno v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1: Chemické složení oceli EA4T [1]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	V
0.22-0.29	0.15-0.4	0.5-0.8	max. 0.02	max. 0.015	0.9-1.2	0.15-0.3	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.06

Ocel EA4T se používá především pro výrobu vysokorychlostních železničních náprav, které jsou důležitými součástmi podvozků lokomotiv a kolejových vozidel. Železniční nápravy jsou v průběhu provozu namáhány střídavým zatížením a vlivem korozního prostředí. Poškození železničních náprav může být příčinou závažných nehod drážních vozidel. [2]

Na obrázku č. 1 je snímek mikrostruktury materiálu EA4T vybroušeného a naleptaného, který byl pozorován pomocí světelné mikroskopie publikovaný v [3]. Ze snímku je patrná jehlicovitá struktura typická pro kalenou ocel, tj. feritické desky s částicemi cementitu – bainitu. Pro detailnější posouzení velikosti a rozložení částic cementitu na hranicích feritických desek je nezbytné použít elektronovou mikroskopii.



Obrázek č. 1: Mikrostruktura oceli EA4T – pozorováno pomocí světelné mikroskopie [3]

## 3.2 Světelná mikroskopie

Světelná mikroskopie (SM) patří mezi jednoduché zobrazovací metody nacházející uplatnění v širokém spektru odvětví. K zobrazení objektů se využívají světelné paprsky – tedy viditelná část elektromagnetického záření. Vlnová délka elektromagnetického záření, které je možné pozorovat lidským okem, leží v rozmezí 380 nm – 740 nm. Obecně v mikroskopii platí, že rozlišitelná vzdálenost je dána velikostí vlnové délky použitého světla. [4]

Zobrazovací systém světelného mikroskopu je tvořen soustavou optických čoček. Čočky jsou umístěny tak, aby došlo ke vzniku vysokého kontrastu, vysoké rozlišovací schopnosti, dostatečné hloubky ostroty a požadovaného zvětšení. Jednotlivé části metalografického mikroskopu v normálním uspořádání je vidět na obrázku č. 2. [4]

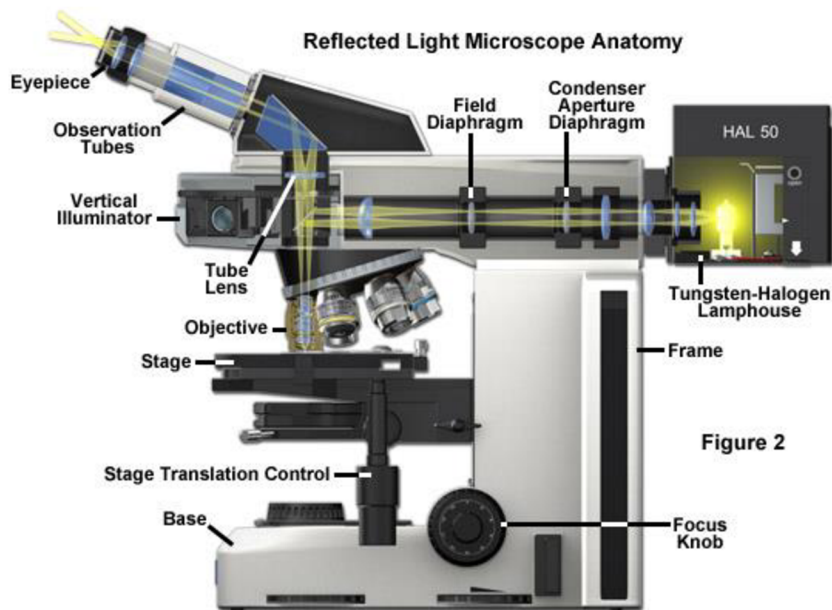


Figure 2

Obrázek č. 2: Metalografický mikroskop v normálním uspořádání [5]

V oblasti světelné mikroskopie existují 4 hlavní způsoby vyvolání kontrastu při materiálových aplikacích. Jde o pozorování ve světlém poli, pozorování v tmavém poli, použití polarizovaného světla a použití diferenciálního interferenčního kontrastu. Při pozorování vzorků dochází často k využití více způsobů za účelem nepřehlédnutí různých detailů.

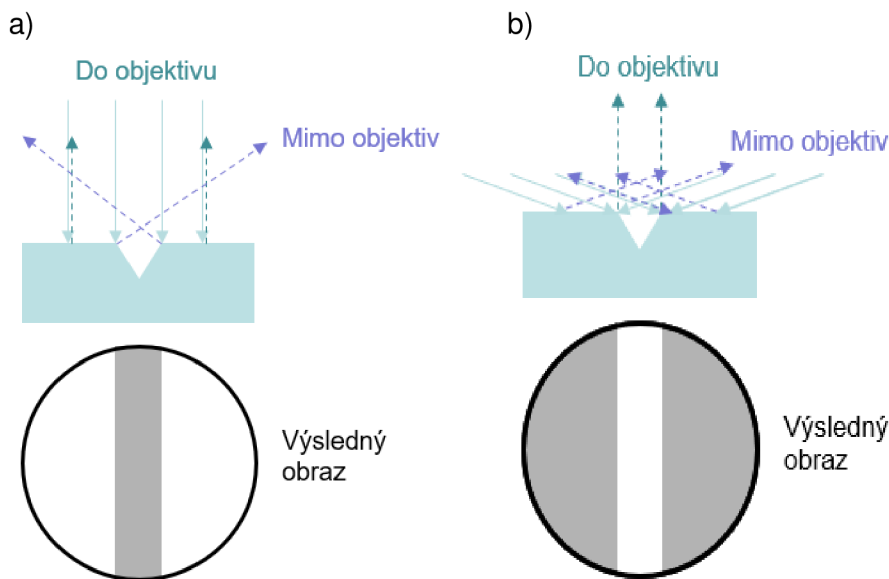
### 3.2.1 Pozorování ve světlém poli – BF

Pozorování ve světlém poli je základním způsobem pozorování ve světelné mikroskopii. Dochází k využití kolmého osvětlení a následného pozorování světla, které se odrazí. Světelné paprsky odražené od nerovností povrchu dopadají mimo objektiv a na výsledném obraze se jeví jako tmavá místa (obrázek č. 3a).

### 3.2.2 Pozorování v tmavém poli – DF

Při pozorování v tmavém poli se používá symetrické šikmé osvětlení pozorovaného vzorku. Zpět do objektivu vstupují pouze paprsky, které se odrážejí od nerovností

povrchu pozorovaného vzorku. Naopak paprsky, které se odrážejí od kolmých ploch (na osu objektivu), se do objektivu nevracejí (obrázek č. 3b).



Obrázek č. 3: Pozorování ve světlém (a) a tmavém (b) poli světelného mikroskopu

### 3.2.3 Použití polarizovaného světla

Světlo, kterým se osvětluje pozorovaný vzorek, je příčné elektromagnetické vlnění. Je popsáno vektorem elektrické intenzity a vektorem magnetické indukce, kdy vektor elektrické intenzity je kolmý na směr šíření vlnění. Vektor intenzity elektrického pole má však nahodilý směr i velikost v dané rovině. Polarizací rozumíme jev, kdy dojde k omezení roviny kmitání vektoru intenzity elektrického pole. Použitím polarizovaného světla je možné odlišit dvojlomné a nedvojlomné fáze. [6]

### 3.2.4 Diferenciální interferenční kontrast

K tomuto způsobu není nutná přítomnost dvojlomné fáze, a tak lze DIC vyvolat na všech vzorcích, které mají na svém povrchu reliéf. Obraz vzniklý pomocí DIC se jeví jako třídimenzionální. Z tohoto důvodu se uvedená metoda používá pro zobrazení výškového reliéfu. [7]

### Aplikace světelné mikroskopie na diplomovou práci

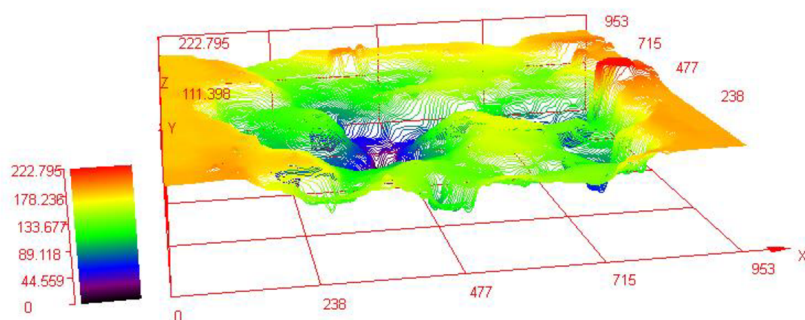
V rámci pozorování vzorků světelnou mikroskopií při zpracování předložené diplomové práce byl využit světelný mikroskop Olympus DSX1000, který je možné vidět na obrázku č. 4.



Obrázek č. 4: Světelný mikroskop Olympus DSX1000 [8]

Výše zmíněný mikroskop umožňuje všechny metody pozorování, které byly uvedeny v kapitole 3.2. Mimo jiné je však vybaven i zařízením pro záznam 3D obrazu. Toho bylo využito i pro zmapování a měření stop po otryskání povrchu vzorků pulzujícím vodním paprskem – zkráceně PWJ (z anglického Pulsating Water Jet). [8]

Na obrázku č. 5 je uveden příklad 3D obrazu, který mapuje stopu po PWJ.



Obrázek č. 5: 3D mapa stopy po PWJ pořízená pomocí světelného mikroskopu Olympus DSX1000.

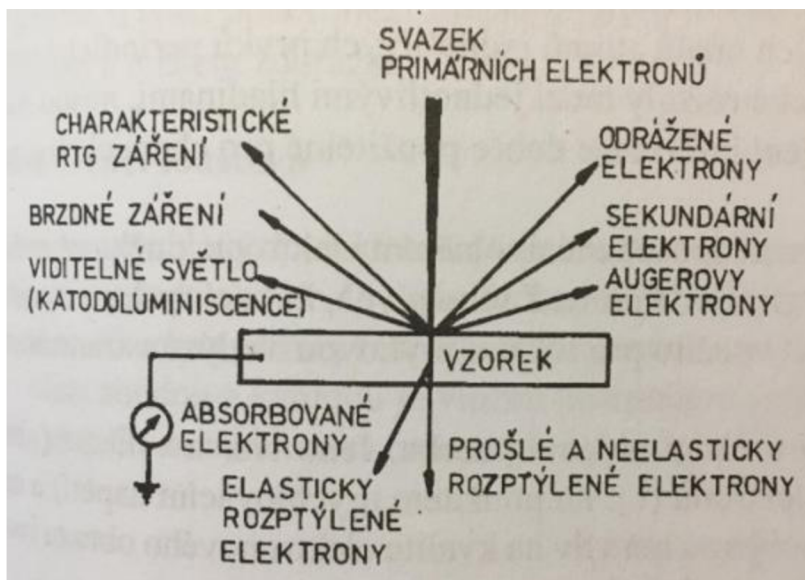


### 3.3 Elektronová mikroskopie

V elektronovém mikroskopu dochází k využití svazku elektronů, který je fokusovaný elektromagnetickými nebo elektrostatickými čočkami. Obraz je poté tvořený díky snímání signálů. Tyto signály jsou tvořeny elektrony, které interagují se vzorkem. Pomocí elektronové mikroskopie lze zobrazit mnohem menší objekty než při použití mikroskopie světelné. Vlnová délka elektronů v elektronových mikroskopech je řádově  $10^{-12}$  m. [4]

Elektrony jsou emitovány emitorem. Existují 2 základní varianty emitůrů – termoemisní zdroj (TE) a zdroj s emisí stimulovanou elektrickým polem (FEG). Po uvolnění elektronů z emitoru, jsou elektrony urychlovány napětím a jejich dráha je korigována pomocí čoček. [4] [9]

Primární svazek elektronů dopadá na povrch vzorku a část z nich povrchem i prochází. Elektrony vstupující do objemu vzorku a v tomto ozářeném objemu vyvolávají signály, které vznikají v důsledku jejich pružných a nepružných rozptylů (obrázek č. 6). Obecně je možné elektronové mikroskopy rozdělit na transmisní a rastrovací. [4]



Obrázek č. 6: Signály vznikající při pozorování v elektronové mikroskopii [4]

#### 3.3.1 Pružný rozptyl

Při pružném rozptylu skoro nedochází ke ztrátě energie dopadajících elektronů. Nastává jenom změna dráhy elektronů, a to kvůli difrakci na krystalografických rovinách – platnost Braggova zákona. Elektrony, jež jsou rozptýleny tímto způsobem odcházejí ze vzorku s poměrně malými energetickými ztrátami oproti energii vstupujících elektronů primárního svazku. [9]

### 3.3.2 Nepružný rozptyl

V případě nepružného rozptylu dochází k interakci elektronů primárního svazku s elektronovým obalem atomů vzorku. Nepružný rozptyl je doprovázený ztrátou energie elektronů primárního svazku. Tímto rozptylem vznikají například jevy, jež vytvářejí signály použitelné pro mikroanalýzu při použití charakteristického rentgenového záření. [9]

### 3.3.3 Vakuum

Elektronové mikroskopy jsou zařízení, která pracují za vysokého vakua. V elektronových mikroskopech je tlak snížený podstatně pod hodnotu atmosférického tlaku pomocí vakuových vývěv. Vakuum zajišťuje částicím volný pohyb v prostoru, kdy nedochází ke srážkám částic s molekulami nebo atomy plynů. Nedochází tedy k ovlivňování primárního svazku elektronů srážkami s případnými molekulami vzduchu, kdy by při přítomnosti molekul vzduchu mohlo docházet k absorpci a rozptylu elektronů primárního svazku. [9]

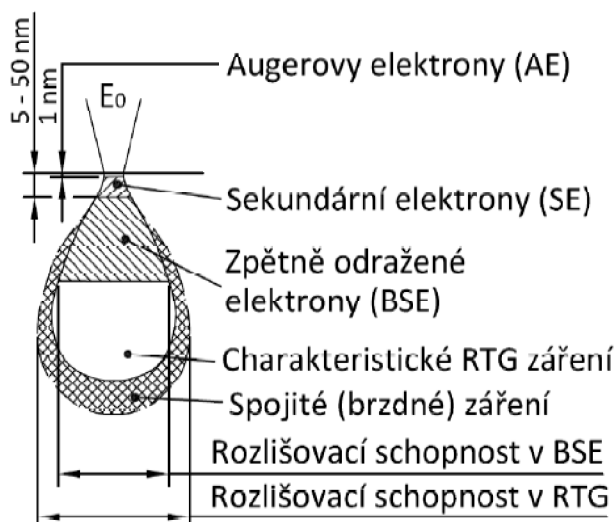
### 3.3.4 Rastrovací elektronová mikroskopie (REM)

Rastrovací (řádovací) elektronová mikroskopie je využívána od šedesátých let dvacátého století pro pozorování povrchu vzorků. Svazek primárních elektronů skenuje povrch masivního vzorku, kdy nedochází k jejich průchodu, ale k jejich odrazu. [9] [10]

Rastrovací elektronovou mikroskopií lze při pozorování vzorku dosáhnout vysokého zvětšení, velké hloubky ostrosti a vysoké rozlišovací schopnosti. Pokud je pozorovaný vzorek elektricky nevodivý, je nutné jeho povrch zvodivět. Toho lze dosáhnout tenkou vrstvou buď kovu (nejčastěji Au), nebo uhlíku (C), kterou je možné na vzorek nanést například napařením nebo naprášením. [9] [11]

Rastrovací elektronový mikroskop funguje tak, že fokusovaný svazek primárních elektronů dopadá na povrch vzorku a rastruje (řádkuje) a registruje informace z povrchu vzorku bod po bodu. [9] [10]

Primární svazek elektronů dopadající na povrch vzorku a vstupující do objemu vzorku vyvolává signály, které jsou dále využívány k analýzám. Signály jsou poté zachycovány vhodným detektorem. Na obrázku č. 7 je uvedeno schematické znázornění oblasti generace elektronů. [11]



Obrázek č. 7: Schematické znázornění oblasti generace elektronů [10]

### Vytvoření obrazu struktury v rastrovací elektronové mikroskopii

Jak je znázorněno na obrázku č. 7, svazek primárních elektronů vyvolává ve vzorku vznik více druhů signálů a to: Augerovy elektrony; sekundární elektrony, zpětně rozptýlené (odražené) elektrony; charakteristické rentgenové záření a spojité rentgenové záření. [10]

K vytvoření obrazu struktury v rastrovací elektronové mikroskopii je využíváno sekundárních elektronů (SE) a zpětně rozptýlených (odražených) elektronů (BSE). [9]

Do jaké hloubky primární elektrony proniknou závisí zejména na energii, kterou má svazek primárních elektronů a na průměrném protonovém čísle materiálu vzorku. [10]

### Sekundární elektrony (SE)

Sekundární elektrony (SE = secondary electrons) pocházejí z hloubky v řádech 1 nm – 10 nm. Jsou tedy vyzařovány z relativně tenké povrchové vrstvy. Jedná se o elektrony s energií asi 50 eV a menší. Energie těchto elektronů pouze lehce převyšuje hodnotu energie, kdy dochází k jejich odpoutání z povrchu pozorovaného vzorku. [9] [10]

Výtěžek sekundárních elektronů je proces závislý na energii svazku primárních elektronů. S rostoucí energií primárních elektronů klesá výtěžek sekundárních elektronů. Je také známo, že zmíněný výtěžek sekundárních elektronů je vyšší na hranách reliéfu pozorovaného vzorku – mluvíme o takzvaném hranovém efektu. Hrany se tedy na obraze jeví jako světlejší. [9]

Sekundární elektrony jsou po jejich opuštění z pozorovaného vzorku zachytávány detektorem sekundárních elektronů. [9] [10]



## **Zpětně rozptýlené elektrony (BSE)**

Zpětně rozptýlené elektrony (BSE = back scattered electrons) pocházejí z hloubky v řádech 10 nm až 100 nm. Jsou tedy emitovány ze značně většího objemu vzorku než elektrony sekundární. Energie zpětně rozptýlených elektronů začíná na 50 eV a může dosahovat až energie elektronů primárního svazku. [9] [10]

Výtěžek zpětně rozptýlených elektronů (pro většinu prvků) ze začátku roste s energií, kterou mají elektrony primárního svazku. Od určité hodnoty energie elektronů primárního svazku již výtěžek na této energii nezávisí. Výtěžek je taktéž závislý na směru detekce, a proto se při snímání zpětně rozptýlených elektronů využívá vícesměrová detekce. [9] [10]

Zpětně rozptýlené elektrony ztrácejí svou energii. Energetické ztráty jsou způsobeny interakcí elektronů s elektronovými obaly atomů vzorků nebo interakcí s volnými elektrony. [10]

### **3.3.5 Difrakce zpětně rozptýlených elektronů (EBSD)**

Technika difrakce zpětně rozptýlených elektronů, známá pod zkratkou EBSD (odvozeno z anglického Electron BackScatter Diffraction), je využívána v oboru rastrovací elektronové mikroskopie. Tato technika nám poskytuje další informace o struktuře materiálu zejména z objemu vzorku. Díky difrakci zpětně rozptýlených elektronů je totiž možné získat i krystalografické informace mezi které patří orientace povrchových zrn a případné určení fází, které jsou ve vzorku obsaženy. [10] [11]

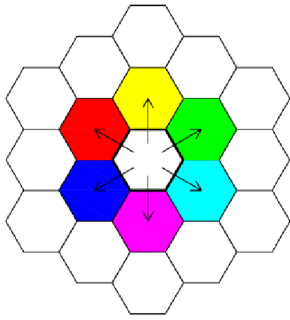
#### **Využití EBSD**

Difrakce zpětně rozptýlených elektronů patří mezi experimentální metody, které jsou využívány pro získání analytických informací v pozorovaném vzorku. Jedná se zejména o charakter krystalové mřížky v konkrétním místě pozorování a eventuální odlišnosti krystalové mřížky – například změněná krystalová orientace nebo jejich parametrů. [10]

Technologický pokrok v EBSD s sebou přinesl i možnost získávání těchto informací, aniž by musely být kladeny vysoké nároky na přípravu vzorku jaké bývají například při transmisní elektronové mikroskopii. I snímaná oblast má větší rozměry než při TEM. Konkrétně pomocí EBSD detektoru v rastrovací elektronové mikroskopii můžeme pozorovat oblast o rozměrech  $\mu\text{m}^2$  až  $\text{mm}^2$ . [10]

#### **Parametr KAM**

Dalším využitím dat získaných pomocí metody EBSD je určení parametru KAM – zkratka z anglického Kernel Average Misorientation. Parametr KAM poskytuje informaci o průměrné dezorientaci zrna. Na obrázku č. 8 je uvedeno schéma určení parametru dezorientace, kdy parametr KAM udává míru místní dezorientace zrna, tj. průměrnou dezorientaci kolem středového bodu zrna. Tato dezorientace se určuje vzhledem k množině nejbližších sousedů (pixelů) v okolí jádra (středového pixelu).



Obrázek č. 8: Schéma určení dezorientace mezi nejbližšími sousedy [10]

Analýza KAM pomáhá stanovit lokální deformace mřížky vyvolané vysokou hustotou dislokací. Může také poukazovat na deformační energii, která je uložena v zrnech. Obecně lze tedy říci, že v deformovaných zrnech je parametr KAM vysoký kvůli zvýšené hustotě dislokací.

### **Aplikace REM na diplomovou práci**

V rámci pozorování a analýz vzorků prostřednictvím rastrovací elektronové mikroskopie při zpracování diplomové práce byl využit rastrovací elektronový mikroskop Tescan LYRA 3 XMU FEG/SEMxFIB (obrázek č. 9). Tento mikroskop je schopen pracovat i za nízkého vakua – nízkovakuový mód (LV REM). [12]



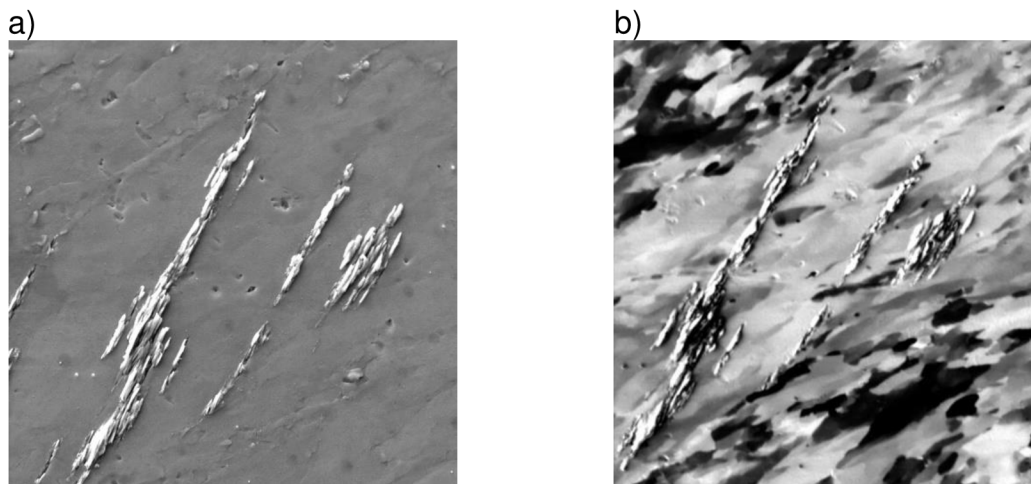
Obrázek č. 9: Tescan LYRA 3 XMU FEG/SEMxFIB [12]

Mikroskop s FEG zdrojem elektronů je vybaven EDS detektorem pro rentgenovou mikroanalýzu chemického složení a EBSD detektorem s řídicím systémem Aztec. [12]

Mezi doplňkovou výbavu tohoto mikroskopu patří i sloupec pro fokusovaný iontový svazek (FIB). FIB sám o sobě umožňuje provádět především velmi přesné a lokalizované vyrážení atomů ze vzorku, a tím postupné vymílání neboli odprašování materiálu dopadem urychlených iontů. Jako zdroj iontů je v naprosté většině těchto zařízení použito gallium (Ga), výjimečně to může být vzácný plyn xenon (Xe) [13].

FIB je usměrněný tok ionizovaných atomů s fokusací na vzorek. Ionty, které jsou urychleny, způsobují v místě dopadu a jeho blízkém okolí vedle dalších procesů i vyrážení atomů z materiálu vzorku. [13]

Na obrázku č. 10 je snímek persistentního skluzového pásu na povrchu cyklicky deformovaného vzorku. Z obrázku je možné porovnat, jak vypadá stejný pozorovaný povrch snímáný pomocí SE (a) a pomocí FIB svazku (b). FIB se ovšem obvykle pro prosté pozorování nepoužívá, spíše se využívá jeho schopnosti odprašovat materiál, tzn. využívá se k cílenému lokalizovanému odstranění materiálu, tzv. mikro-oblábní.

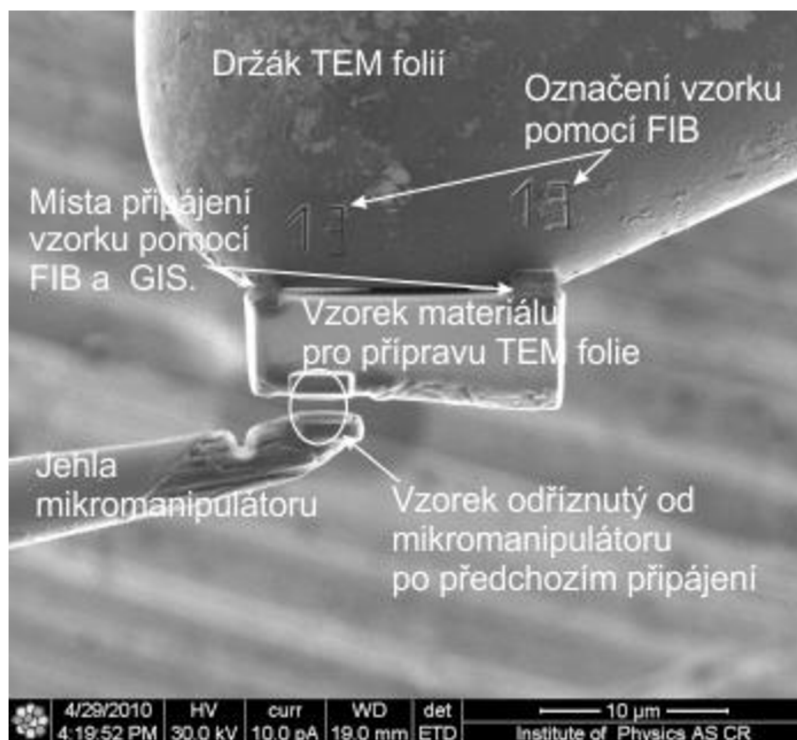


Obrázek č. 10: Snímek persistentního skluzového pásu na povrchu cyklicky deformovaného vzorku snímáný pomocí SE (a) a pomocí FIB svazku (b)

V součinnosti s plynovým injektorem (gas injection system – GIS) umožňuje FIB kromě úběru materiálu také depozici materiálů (zejména platiny) na vzorek (tzv. lokální CVD – chemical vapour deposition). GIS se s úspěchem využívá pro nanesení ochranné vrstvy tam, kde by při použití FIB techniky mohlo dojít k poškození pozorovaného povrchu. [13]

Jak již bylo řečeno, FIB zařízení se používá především, k mikro-oblábní. To se s výhodou využívá zejména k přípravě lamel / fólií pro použití v transmisní elektronové mikroskopii (TEM). Manipulaci s touto fólií pak zajišťuje mikromanipulátor (jehla), pomocí kterého lze manipulovat s preparátem extrahovaným z konkrétního místa struktury. Příklad využití FIB techniky k výrobě TEM folie je na obrázku č. 11. [13]

Výhodou oproti běžné metodě přípravy TEM fólií (pomocí zařízení TENUPO – elektrolytické ztenčování kovových vzorků na TEM fólie) je tedy přesná lokalizace místa zájmu včetně možnosti vyrobit lamelu i z povrchu materiálu, který může být ovlivněn tepelným nebo mechanickým zpracováním (obdobně jako v našem případě, kdy se jedná o studium účinku vodního paprsku na zhutnění povrchu a zjemnění mikrostruktury v povrchových a mírně podpovrchových vrstvách materiálu.



Obrázek č. 11: Využití metody FIB pro přípravu vzorku na TEM lamelu [13]

### 3.3.6 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)

Transmisní (prozařovací) elektronová mikroskopie (TEM) byla vynalezena v Berlíně mezi lety 1931 až 1934. První komerční zařízení byla produkována již od roku 1936. TEM je hojně využívána v materiálových vědách, ale také i v biologii. [14]

Pomocí TEM, dochází k vytvoření obrazu mikrostruktury pozorovaného vzorku v měřítku od jednotek mikrometrů až po rozlišení atomové. Prostřednictvím elektronové difrakce je tato metoda schopná stanovit i symetrii krystalové mřížky. [14].

Metoda umožňuje pozorování struktury materiálu při velmi vysokých zvětšeních a tím analyzovat vnitřní poruchy krystalové mřížky, přičemž z hlediska plastické deformace materiálu nás zajímají především čarové poruchy (dislokace).

Obdobně jak u SM lze využít pozorování, jak v tmavém, tak i světlém poli.

Pokud jsou součástí zařízení i příslušné spektrometry, můžeme pomocí TEM provádět i lokální kvantitativní chemickou analýzu prvků (EDS) (kromě vodíku a helia). [14]

#### Aplikace TEM na diplomovou práci

Za účelem pozorování změn ve vnitřní struktuře vzorků způsobených aplikací vodního paprsku byl využit transmisní elektronový mikroskop JEOL JEM-2100F, který je zobrazen na obrázku č. 12.

Jedná se o vysokorozlišovací mikroskop s FEG zdrojem elektronů, jehož bodové rozlišení je 0,23 nm a do vybavení patří i detektor pro rentgenovou mikroanalýzu. [15]

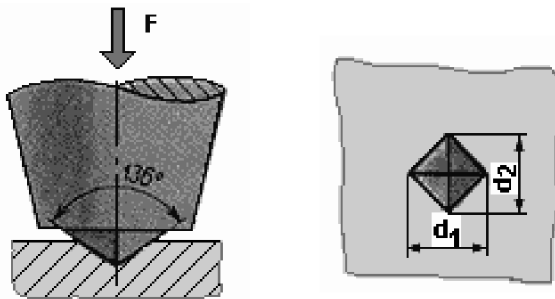


Obrázek č. 12: Transmisní elektronový mikroskop JEOL JEM-2100F [15]

### 3.4 Měření tvrdosti dle Vickerse

Tvrdost materiálu je definována jako schopnost materiálu odolávat vniknutí cizího tělesa. Při měření tvrdosti mluvíme konkrétně o odporu materiálu vůči vniku zkušebního tělesa (indentoru).

Různé metody měření tvrdosti využívají různé tvary indentorů. Měření tvrdosti dle Vickerse využívá jako indentor rovnostranný jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Indentor a charakteristika vtisku jsou uvedeny na obrázku č. 13.



Obrázek č. 13: Tvar indentoru pro měření tvrdosti dle Vickerse a charakteristika vtisku [16]

Indentor je do materiálu vtlačován konstantní silou po danou dobu. Po provedení indentace jsou měřeny úhlopříčky vtisku. Hodnota tvrdosti je dále dopočítána pomocí následujícího vztahu [16]:

$$HV = 0,1891 \times \frac{F}{d^2},$$

kde:

HV... tvrdost podle Vickerse

F... zatěžovací síla [N]

d... průměrná hodnota úhlopříček vtisku [mm].

#### Aplikace měření tvrdosti podle Vickerse na diplomovou práci

Při zpracování praktické části předkládané diplomové práce byla měřena tvrdost studovaného materiálu – oceli EA4T. Byla měřena tvrdost materiálu v základním (netrykaném) stavu a bylo provedeno i měření tvrdosti pod erozní drážkou, jež byla vytvořena působením pulzujícího vodního paprsku (konkrétně pro parametr SOD = 25 mm a 35 mm).

#### Měření tvrdosti materiálu v základním (netrykaném) stavu

K měření tvrdosti materiálu v základním stavu byl využit mikro-tvrdoměr Duramin (obrázek č. 14), který umožňuje přesné měření tvrdosti kovových i nekovových materiálů. [17]

Zařízení dovoluje měření v rozsahu zatížení od 10 g do 2 kg. V rámci diplomové práce bylo použito zatížení 2 kg. Hodnoty tvrdosti podle Vickerse jsou v praktické části uvedeny s označením HV2. [17]



Obrázek č. 14: Mikro-tvrdoměr Duramin [17]

### **Měření tvrdosti pod erozní stopou (drážkou)**

K měření tvrdosti materiálu pod erozní drážkou byl využit univerzální nanomechanický testovací stroj Zwick ZHN (obrázek č. 15). Pomocí něj je možné provádět vrypové, opotřebovací, tlakové a indentační zkoušky materiálů i povrchových vrstev. [18]



Obrázek č. 15: Nanomechanický testovací stroj Zwick ZHN [18]

## 3.5 Technologie vodního paprsku

Technologie vodního paprsku se zrodila v první polovině devatenáctého století. V té době byla využívána především při těžbě nerostných surovin, například při těžbě zlata nebo uhlí, kdy prostřednictvím vody docházelo k očišťování těžných surovin od nánosů nečistot. [19]

K zavedení technologie vodního paprsku ve formě, jakou jí známe dnes došlo až v polovině 20. století. Možností aplikace vody jakožto řezného nástroje se zabíral lesnický inženýr Dr. Norman Franz. Jednalo se o aplikaci v oblasti zpracování dřeva. Princip spočíval v umístování závaží na sloupec vody a svedení kapaliny do úzké trubice – trysky. Pomocí zmíněného postupu bylo dosaženo vysokotlakých pulzů vody, které dokázaly štípat dřevo. [20]

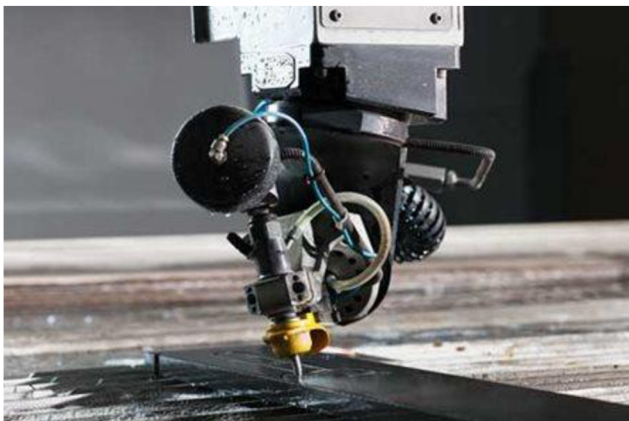
Na sklonku sedmdesátých let 20. století byl panem Dr. Mohamedem Hashishem proces řezání vodním paprskem modifikován o přidání abraziva. Jednalo se o minerální abrazivo – konkrétně granát. Pomocí takto modifikované technologie již bylo možné řezat i další materiály jako byly například oceli a skla. [21]

### 3.5.1 Kontinuální vodní paprsek (CWJ)

Technologie kontinuálního vodního paprsku známá pod zkratkou CWJ (z anglického continuous water jet) využívá vysokého tlaku vody k narušení materiálu. Touto metodou lze řezat velké množství rozdílných druhů materiálů.

Pro použití vodního paprsku v průmyslové praxi je nezbytné dosáhnout dostatečného tlaku vody. Vysokotlaké čerpadlo generuje proud kapaliny (vody) o provozním tlaku přibližně až do 6500 bar. [22]

Prostřednictvím malé trysky, která bývá obvykle vyrobena z materiálů odolných proti abrazivnímu opotřebení (obvykle z drahého kamene), je tlak vody převeden na rychlost vodního paprsku. Tryska, která je součástí řezací hlavy a je znázorněna na obrázku č. 16. Pracovní otvor trysky a tím i průměr paprsku je obvykle velmi malý. Hovoříme o rozměru, který je srovnatelný s průměrem lidského vlasu. [22]



Obrázek č. 16: Řezací hlava [22]

Při vyšším tlaku dosahuje rychlost vody, která opouští trysku, nadzvukové rychlosti. Tím obecně dosahujeme lepší efektivity a produktivity technologie vodního paprsku,



tj. roste řezná rychlost (rychlost obrábění). Mimo jiné lze díky tomu řezat i materiály, které by při nižších tlacích nebylo vůbec možné řezat. [22]

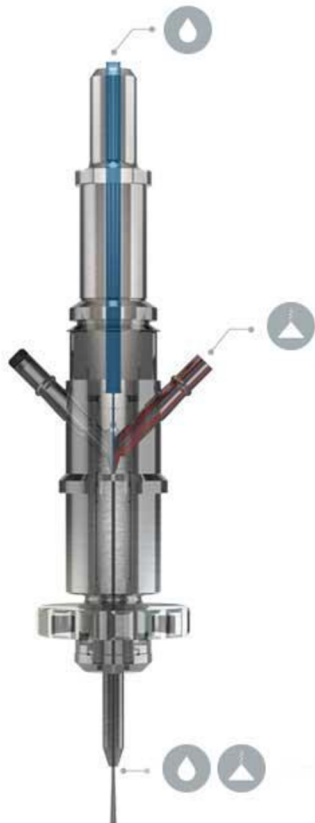
Na obrázku č. 17. je uveden systém pro technologii vodního paprsku, který se skládá ze tří částí. První je zdroj vysokého tlaku (označen na obrázku číslem 1), ve kterém je především čerpadlo, do kterého se přivádí běžná kohoutková voda, která se dále upravuje (např. filtruje). Druhou částí je pracovní stůl s řezací hlavou (obvykle používá pohyb v osách X, Y a Z) a sběrnou nádrží na vodu (na obrázku označen číslem 2). Poslední součástí systému vodního paprsku je řídicí systém (na obrázku označen číslem 3), ve kterém je software a rozhraní pro obsluhu celého zařízení. [22]



Obrázek č. 17: Systému pro technologii vodního paprsku: zdroj vysokého tlaku (1); pracovní stůl s řezací hlavou (2); řídicí systém (3) [22]

### 3.5.2 Abrazivní vodní paprsek (AWJ)

Technologie abrazivního vodního paprsku, známá také pod zkratkou AWJ (z anglického Abrasive Water Jet), která obdobně jako tomu je u CWJ využívá vysokého tlaku vody k narušení materiálu. Rozdílem mezi těmito dvěma technologiemi je to, že v technologii AWJ dochází k přidání abrazivních částic. Ty jsou přidávány do čistého vodního paprsku – na obrázku č. 18 v červeně označené oblasti. [22] [23]



Obrázek č. 18: Schéma přívádění abrazivních částic do vodního paprsku [22]

Kinetická energie vysokotlaké vody přestupuje na abrazivní částice a ty posléze společně s vodou dopadají na tryskaný cíl. Tok částic způsobuje vysokofrekvenční erozi, která má za důsledek zvýšenou účinnost vodního paprsku. [23] Technologie AWJ byla poprvé využita v šedesátých letech 20. století v USA. Jednalo se o vrtání ropných vrtů, kdy byla podstatně zvýšena rychlost vrtání. [19]

Provozní tlak AWJ zařízení se obvykle pohybuje mezi 300 a 4500 bary. Rychlost vodního paprsku dosahuje rychlosti až 900 m/s. [23]

Jako abrazivní částice je možné využít například oxid hlinitý, karbid křemíku nebo minerál granát. [23]

I když se přidáním abrazivních částic zvýší schopnost vodního paprsku narušovat požadovaný materiál, nemůže být technologie AWJ využita vždy. Určitá omezení technologie jsou zapříčiněna právě přidávanými abrazivními částicemi.

## **Nevýhody AWJ**

Technologii AWJ nelze využít pro čisté aplikace, kdy by hrozilo znečištění abrazivními částicemi. Mezi takové patří například medicínské ortopedické operace typu zavedení endoprotézy. Použití vodního paprsku se při operacích jeví jako vhodná metoda. Je zde absence tepla a nehrozí možné zanesení infekce do rány znečištěným nástrojem oproti konvenčním metodám. Avšak použité biologicky nekompatibilní abrazivo narušuje biologické vlastnosti místa chirurgického zákroku, což není žádoucí. [24]

V případě průmyslových aplikací se bere vážný ohled i na pracovní prostředí. Abrazivní částice jsou velmi malé, a tak hrozí jejich vdechnutí a následné usazování na plicích. Poškození plic, které je spojeno s inhalací anorganických částic oxidu křemičitého se nazývá silikóza. Projevuje se zejména dušností, kašlem a bolestí na hrudi. Pokud člověk onemocní závažnější formou silikózy, je někdy nezbytné provést transplantaci plic, což vypovídá o závažnosti onemocnění a ochrany před ní. Před vdechováním malých anorganických částic musí být pracovníci chráněni prostřednictvím ochranných pracovních pomůcek. [25]

Během použití AWJ pro obrábění dochází k opotřebování abrazivních částic. Děje se tak vlivem kolize částic s otryskávaným objektem. Pokud dojde ke změně tvaru nebo velikosti částic, nemusí již abrazivum splňovat požadované vlastnosti (klesá jejich řezná schopnost), což negativně ovlivňuje správnou funkci paprsku. Pro některé méně náročné aplikace lze abrazivum používat opakovaně, tj. dochází k recyklaci. V případě, že abrazivum již není znovu použitelné a stává se z něj odpad. V každém případě však dochází k zátěži na životní prostředí.

### **3.5.3 Pulzující vodní paprsek (PWJ)**

Technologie dezintegrace a vysokorychlostního řezání různých materiálů prošla za poslední desetiletí značným vývojem. Metody CWJ i AWJ jsou v dnešních dnech aplikovány v nejrůznějších odvětvích průmyslu – řezání, čištění a odstraňování povrchových vrstev atd. Obě tyto technologie však kladou velmi vysoké nároky na použití vysokých tlaků vody. To vyvolává extrémně vysoké přepětí vysokotlakých systémů přístroje, což má za důsledek nepříznivý vliv na jejich životnost. [26]

Výzkumné týmy, které se zabývají oblastí vodního tryskání, se proto v průběhu času zaměřili nejen na zlepšování výkonu technologie, na přizpůsobení zvýšeným požadavkům na čistotu pracovního i životního prostředí, ale samozřejmě i na vylepšení technologie z hlediska ekonomického. [26]

Pokud se podaří modifikací vodního paprsku dosáhnout vyšší efektivity obrábění při použití nižších tlaků, pak dojde ke značným úsporám. Pulzující vodní paprsek (Pulsating Water Jet PWJ) je právě takovou modifikací konvenční technologie kontinuálního vodního paprsku. [27]

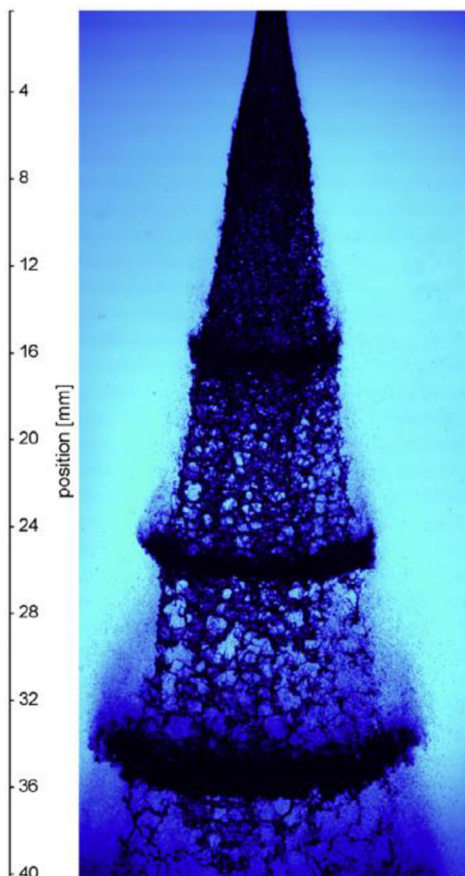
Pulzující vodní paprsek vzniká tak, že jsou generovány dostatečně velké tlakové pulzace kapaliny. Mluvíme o modulaci paprsku, která je na paprsek aplikována před výstupem z trysky. Voda tak vystupuje z trysky proměnou rychlostí (cyklicky modulovanou v čase) a tím se rozdělí na jednotlivé pulzy/klastry. Z trysky vystupuje

kontinuální vodní paprsek a do pulzů je zformován v určité vzdálenosti od trysky, přičemž s rostoucí vzdáleností pak dochází k rozpadu klastrů kapek na kapky jednotlivé. [28]

Klastry kapek dopadající cyklicky na povrch tryskaného objektu vytvářejí impaktní tlak, který je mnohonásobně větší než stagnační (kontinuální) tlak vytvořený metodou CWJ za stejných podmínek. Kvůli dopadání jednotlivých pulzů a tím i cyklickému namáhání tryskané plochy dochází i k smykovému a únavovému namáhání v materiálu. Případně se tak může dít i kvůli působení radiálního toku vody po povrchu o vysoké rychlosti. [29]

Ve většině případů pracuje zařízení pro PWJ s využitím tlaku vody pod 1000 bar, při kterém již nastává dezintegrace či eroze tryskaného materiálu. [27] V konečném důsledku tak dochází nejen ke zvýšení účinnosti metody (efektivity úběru materiálu), ale i ke snížení pořizovacích nákladů na zařízení (zdroj tlakové vody je levnější) a dále ke snížení nákladů provozních (nedochází k tak vysokému opotřebení vysokotlakých částí systému). [26]

Na obrázku č. 19 je uvedena typická morfologie PWJ, která je generována při tlaku 200 bar. [30]

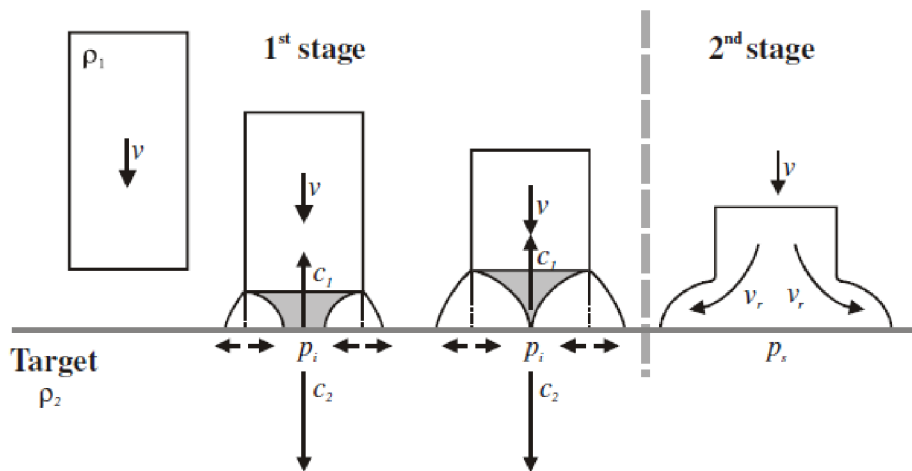


Obrázek č. 19: Typická morfologie PWJ [30]

### **Dopad kapaliny na tryskaný pevný povrch**

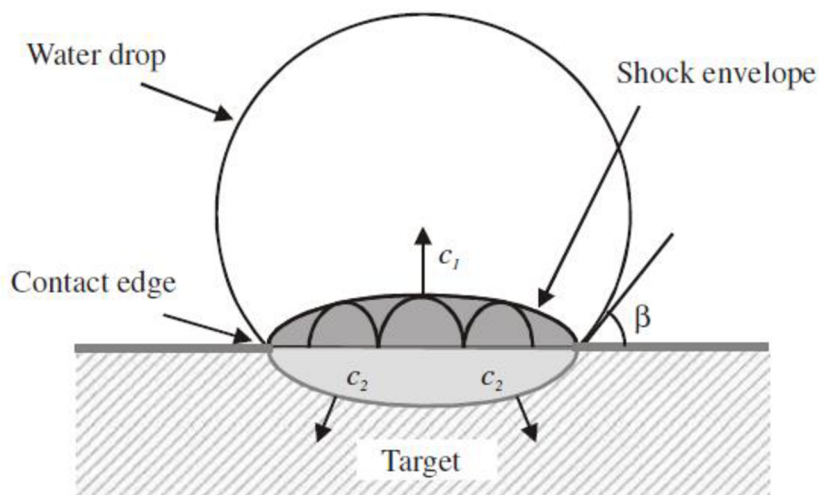
Při srážce kapaliny o vysoké rychlosti s otryskávaným pevným povrchem jsou generovány krátké vysokotlaké přechody, které mohou zapříčinit změny nebo

dokonce poškození tryskaného materiálu, což se týká nejen povrchu, ale i vnitřní struktury v podpovrchové vrstvě. Dopad vody na tryskaný pevný povrch se dá rozdělit na 2 hlavní fáze, které jsou znázorněny na obrázku č. 20. [26]



Obrázek č. 20: Dvě fáze dopadu vody na tryskaný pevný povrch [26]

Při první fázi se voda chová jako stlačitelná kapalina. Prostřednictvím tzv. hydraulických rázů (anglicky water hammer) vzniká impaktní tlak, jenž zodpovídá za většinu degradace vyvolané dopadem vody na pevný povrch. První fáze trvá pouze velmi krátkou dobu – řádově mikrosekundy. Na obrázku č. 21 můžeme pozorovat situaci, která nastává krátce po dopadu kapky vody na povrch. [26]



Obrázek č. 21: Situace krátce po dopadu kapky vody na pevný povrch [26]

Poté co se uvolní impaktní tlak, začíná druhá fáze. Voda má chování nestlačitelné kapaliny. Tlak na středovou osu poklesne na mnohem nižší Bernoulliho stagnační tlak (až 20krát nižší než impaktní tlak) trvající poměrně delší dobu. [26] [28]

Dochází k překročení meze tlakové deformace vody, která zahajuje proudění „do stran“, tj. v radiálním směru kolmo k ose dopadajícího paprsku. Radiální tok (někdy označovaný jako laterální proudění) má mnohonásobně vyšší rychlost, než je rychlost dopadu vody na pevný povrch. Důsledkem zmíněného jevu působí na

povrch materiálu kromě normálové síly od dopadu i síly smykové. V případě, kdy je tryskaný povrch nějak narušený nebo nerovný, radiální tok vody dokáže vyvolat značně velké smykové síly, které jsou schopny lokálně generovat smykové trhliny i na površích jinak vysoce pevných materiálů. [26] [28]

### **Různé způsoby vytvoření PWJ**

K vytvoření pulzujícího vodního paprsku dochází prostřednictvím modifikace kontinuálního paprsku. Mluvíme o tzv. pulzní modifikaci. Vodní paprsek může být pulzně modulován prostřednictvím různých metod, např. mechanicky nebo akusticky. [31]

Mechanické modulátory, které odpovídají za nucenou periodickou modulaci proudu, jsou v první řadě rotující části, které jsou vloženy do cesty kontinuálního vodního svazku. Mechanické rotující části modulátoru však nejsou optimálním řešením, jelikož jsou velmi silně namáhány, a proto mají pouze omezenou životnost. [27] [31] Navíc tvar pulzujícího svazku není optimální, co se týče vyvolání potřebné dezintegrace materiálu.

Druhým způsobem mechanické modulace je použití samo-rezonojící trysky, kdy pulsy v toku vznikají v důsledku vnitřního stupňovitého tvaru trysky. Vystupující voda z rezonojící trubice se odráží a cestuje zpět ke vstupu, kde jsou generovány stacionární vlny. Když oscilace tlaku této zpětné vazby odpovídá přirozené frekvenci komory trysky, kontinuální proud vody se mění na proud pulzní – dochází ke vzniku diskrétních prstencových vírů. Tato metoda však neposkytuje dostatečně vysoké množství pulzů, které by bylo potřebné pro efektivní rozpad vodního proudu na klastry. [27]

K akustickým metodám, které se využívají k pulzní modifikaci patří použití tzv. „sonotrody“ tj. trysky s ultrazvukovým budičem. Tato modifikace byla vyvinuta a patentována na Ústavu geoniky Akademie věd České republiky v Ostravě. Na uvedeném pracovišti byly také tryskáním opracovány vzorky z materiálu EA4T studované v rámci předkládané diplomové práce.

### **Vytvoření PWJ s použitím akustických vln**

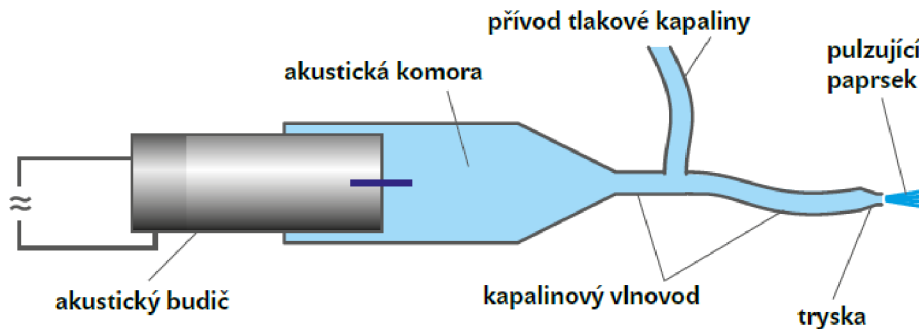
Při vytváření PWJ pomocí akustických vln se využívá kolísání tlaku v akustické komoře. Kolísání tlaku generuje ultrazvuková sonotroda (akustický budič) s frekvencí 20 kHz. Toto kolísání tlaku se pak převádí na kolísání rychlosti vody. V důsledku proměnlivých axiálních rychlostí vodního svazku (určených délkou akustické komory) dochází ke vzniku pulsů vodního svazku. [32] Paprsek vody vychází z trysky jako kontinuální. Do formy shluků kapek neboli klastrů se začíná formovat až v určité vzdálenosti od výstupu z trysky (viz morfologii PWJ na obrázku č. 19). [28]

Můžeme tedy tvrdit, že technologie PWJ je hybridní modifikací kontinuálního vodního paprsku (CWJ) a technologie ultrazvukové, kdy periodické pohyby (vibrace) akustického budiče (neboli sonotrody) vytvářejí pulzy v proudu vody. [33] Za účelem vytvoření vibrací se využívají magnetostrikční a piezoelektrické budiče. [34]

Na obrázku č. 22 je uvedeno schéma vysokotlaké soustavy s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzů. Stlačitelnost kapaliny a naladění



akustického systému stojí za účinným převodem energie pulzací z generátoru směrem do trysky. [28]



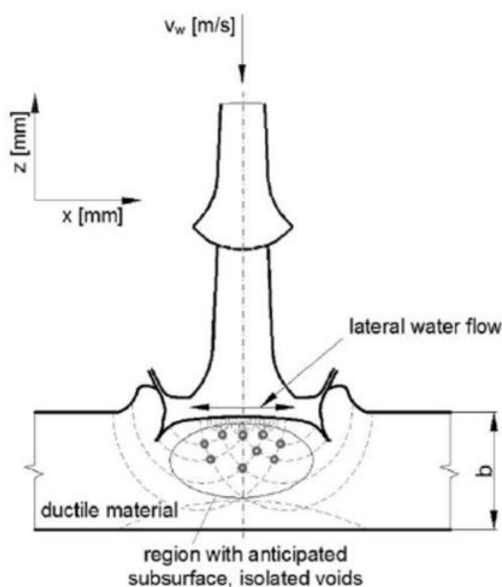
Obrázek č. 22: Schéma vysokotlaké soustavy s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzů [28]

### Hydrodynamická eroze způsobená působením PWJ

Při působení PWJ na povrch (nejen) kovového materiálu dochází k hydrodynamické erozi, tj. ke vzniku poškození. Zmíněný typ eroze je v praxi pozorován například na lopatkách parních turbín nebo na křídlech letadel po průletu deštěm. Za erozi jsou zodpovědné především dva jevy a to:

- Nárazy dopadajících klastrů kapek vody (tzv. water hammer effect), kdy v okamžiku dopadu na povrch nastává generování krátkých tlakových vln.
- A dále pak vzájemné působení laterálního toku a nerovností povrchu, které vyúsťuje v generování smykových sil. [35]

Na obrázku č. 23 je znázorněna deformace materiálu, která nastává jak působením dopadu vodních klastrů (tj. vyhloubení kráteru a vznik podpovrchových dutin vlivem tlakových vln), tak jejich následným laterálním prouděním (tj. vznik valu po stranách erozní drážky). [35]



Obrázek č. 23: Deformace materiálu způsobená účinky dopadu vodních klastrů a laterálního proudění [35]

## Peening (zpevňování / pěchování)

Je známo, že únavové poškození součástí a konstrukcí se v praxi řadí mezi nejčastější problémy. Jelikož je únava materiálu ve vysoké míře závislá na kvalitě povrchu a napjatosti v povrchové vrstvě, provádí se za účelem prodloužení životnosti (a tím i zlepšení ekonomické výhodnosti) povrchové úpravy dílců. [31]

Mezi zásadní metody povrchového zpracování patří peening, což se dá přeložit jako pěchování či zpevnění povrchu a podpovrchových vrstev pomocí vnesení tlakových vnitřních pnutí. K tomu slouží řada metod, mezi které můžeme zařadit například konvenční kuličkování, kdy je povrch součásti tryskán sférickými broky [31], nebo tzv. laser shock peening (LSP), který využívá nanosekundových laserových pulsů s vysokou energií k vytvoření tlaku pomocí rychle expandující lokalizované plazmy. V obou zmiňovaných případech prochází materiálem tlaková vlna, způsobující plastickou deformaci svrchní vrstvy, což má za následek vytvoření tlakových zbytkových napětí. [36]

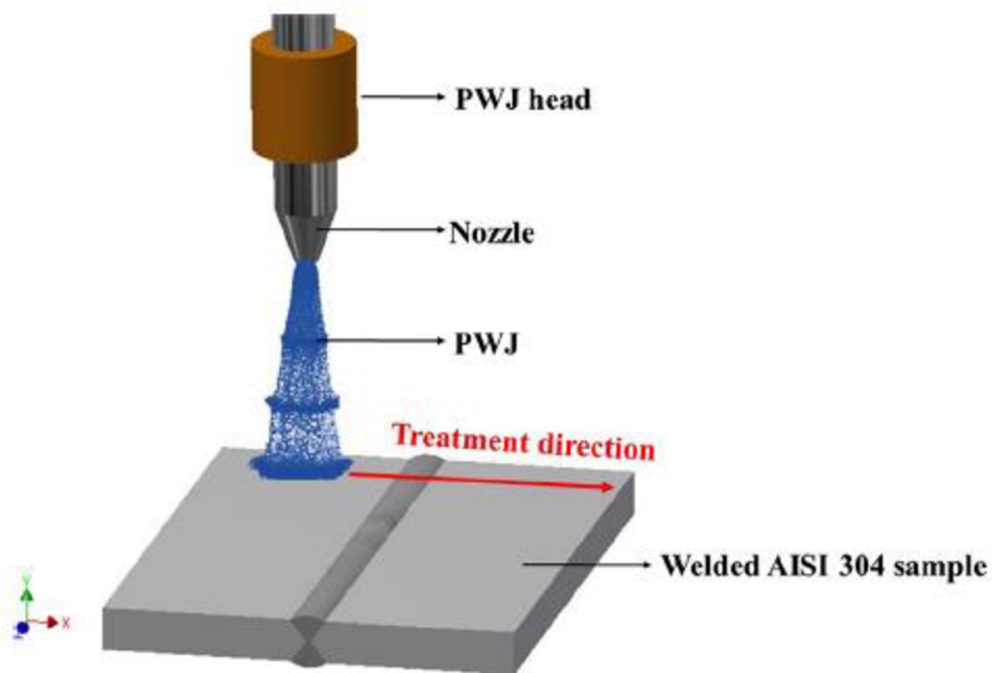
Alternativou k těmto metodám se jeví použití PWJ pro povrchové úpravy. V takovém případě se nevyužije erozivní stádium procesu (které by v takovém případě mělo na únavové chování a životnost negativní vliv), ale inkubační fáze, kdy vlivem opakovaných dopadů vodních klastrů (namísto broků) vysokou rychlostí na pevný povrch dochází ke vzniku povrchového tlaku, kdy lokální maximální napětí je vyšší, než je mez kluzu daného materiálu a dochází tedy k plastické deformaci. Tímto způsobem vnesená zbytková tlaková napětí jsou pro materiálové vlastnosti (a zejména únavu) prospěšná. [31] [36]

V porovnání s jinými metodami poskytuje opracování součástí prostřednictvím PWJ několik výhod: je možné jej použít pro součásti se složitými tvary, zabezpečuje celistvé ošetření povrchu jen s malou změnou povrchové drsnosti, nehrozí kontaminace povrchu částicemi (jako u kuličkování, či použití AWJ), nehrozí natavení povrchu (jako u LSP) atd. [31] [36]

Jelikož je se PWJ dosud používalo převážně k velmi efektivnímu obrábění a řezání materiálu, tato aplikace a technologické podmínky už jsou poměrně známé a vyladěné a v praxi používané.

Využití technologie PWJ pouze ke změně vnitřních napětí v materiálu např. po procesu svařování (viz obrázek č. 24) a zejména pak pro zpevnění povrchu a zvýšení únavové odolnosti materiálu pomocí plastické deformace povrchu patří mezi vývojové metody, a proto je potřeba tuto problematiku studovat.



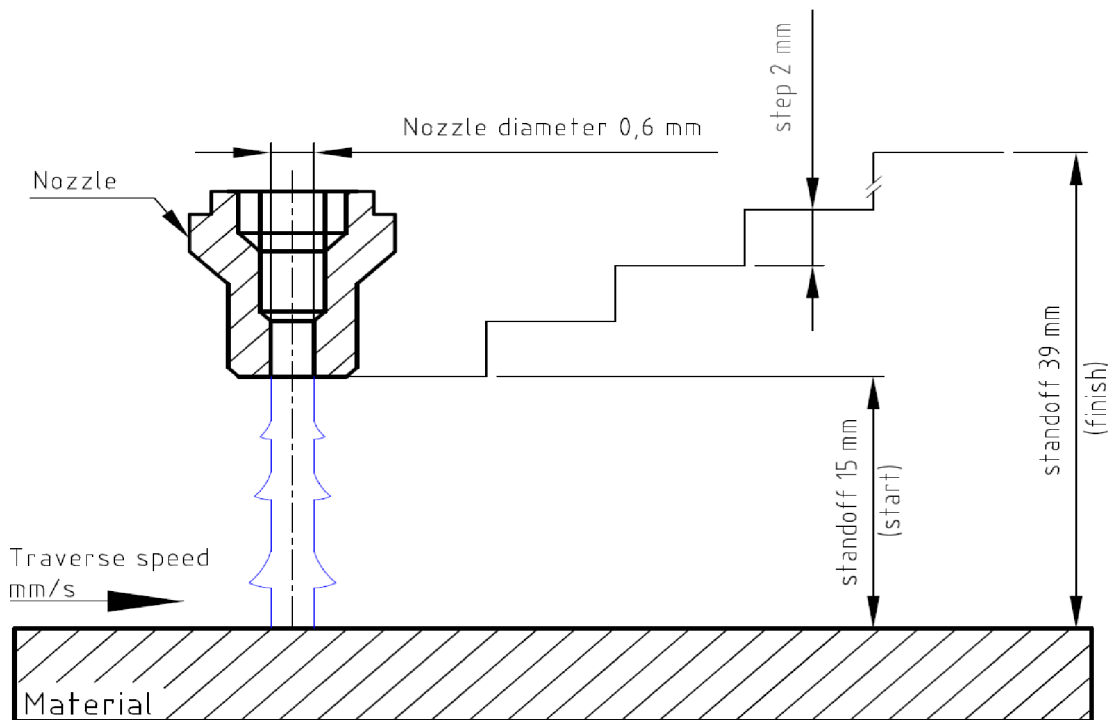


Obrázek č. 24: Model aplikace peeningu pomocí PWJ na svařovaný dílec [36]

### Technologické parametry procesu PWJ

Funkčnost a efektivita procesu PWJ jsou ovlivněny technologickými parametry, které jsou před procesem nebo během něj nastavovány. Pro názornost jsou jednotlivé parametry graficky znázorněny na obrázku č. 25. Mezi základní parametry je možné zařadit následující:

- Tlak kapaliny v hydraulickém systému, který souvisí s tlakem vodního paprsku.
- Objemový průtok vody, tj. množství vody, které proteče tryskou za jednotku času.
- Délka akustické komory, která souvisí s frekvencí, tj. s naladěním akustického budiče (sonotrody) tak, aby došlo k rozkmitání sloupce vody a vzniku PWJ.
- Průměr trysky, který je dáván do souvislosti s šířkou erozní drážky, popřípadě šířkou plasticky deformované oblasti.
- Rychlost posuvu tryskací hlavy, tj. „dopředná“ rychlost posunu paprsku po povrchu materiálu.
- Vzdálenost hlavy od tryskaného vzorku, tzv. **standoff distance (SOD)**.

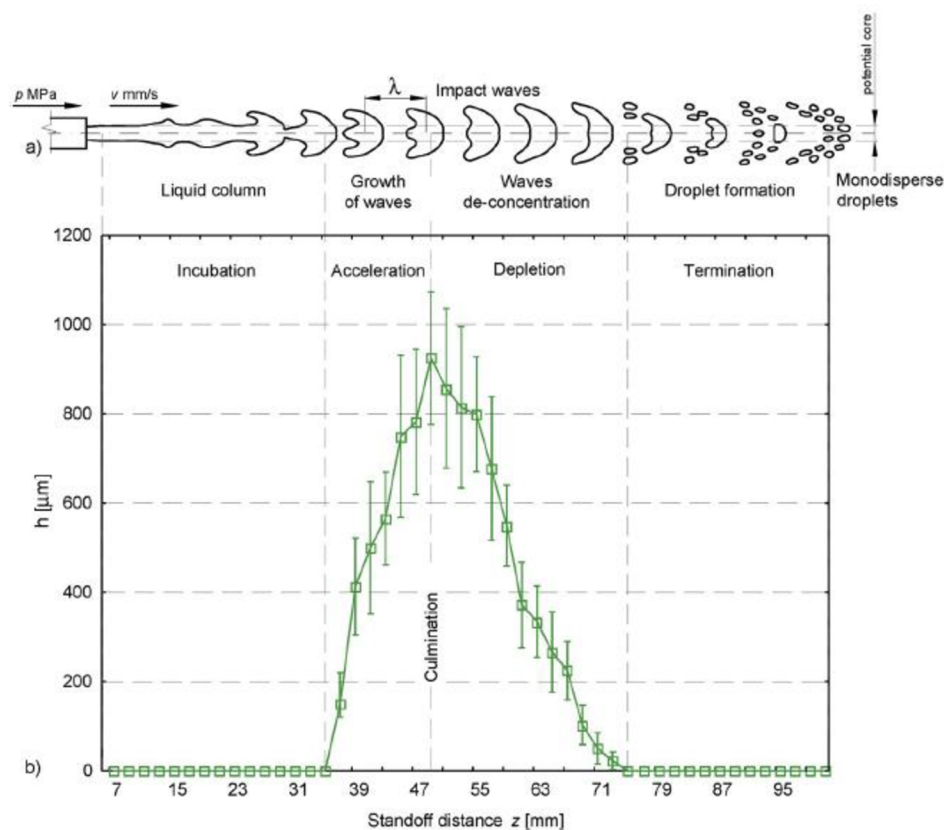


Obrázek č. 25: Vyobrazení jednotlivých parametrů technologie PWJ

S měnícím se parametrem SOD dochází (při zachování ostatních parametrů konstantních) ke změně účinnosti PWJ. Grafická interpretace erozních stádií na obrázku č. 26 byla vytvořena při SOD = 5 mm až 101 mm; tlaku kapaliny  $p = 60$  MPa a rychlosti posunu vodního paprsku po povrchu materiálu  $v = 5$  mm/s. Z obrázku č. 26 je možné vypočítat, že účinnost PWJ, a tedy i hloubka „kráteru“, který je vytvořen působením vodního paprsku, souvisí úzce s morfologií vodních klastrů.

Účinek PWJ a erozi materiálu lze dle [33] rozdělit do několika fází:

- Inkubace (incubation)
- Akcelerace (acceleration)
- Kulminace (culmination)
- Deplece (depletion)
- Ukončení (termination)



Obrázek č. 26: Grafická interpretace erozních stádií [33]

Nyní budou detailněji popsány jednotlivé fáze:

### Inkubace:

Jak již bylo řečeno dříve, vodní paprsek těsně vycházející z trysky nejen vypadá, ale chová se i spíše jako CWJ, tzn. že efektivita působení vodního svazku a erozní účinky jsou spíše malé. S rostoucí vzdáleností od trysky se začínají formovat první náznaky shluků kapek, tj. klastry. Tato fáze se nazývá inkubační. Před koncem této fáze již však dochází ke vzniku plastické deformace. Konec inkubační doby je charakterizován vznikem prvních lokalizovaných kráterů a mikrojamek na povrchu tryskaného materiálu.

### Akcelerace:

Se zvětšující se vzdáleností (s rostoucí hodnotou SOD) se vodní svazek začíná rozšiřovat a tvoří se klastry, které mají vysokou efektivitu a dochází k dezintegraci (erozi) povrchu tryskaného materiálu. Tato fáze se označuje jako akcelerace a je pro ni charakteristický vznik kontinuální erozní drážky o velké hloubce.

### Deplece:

Při dalším zvyšování parametru SOD dochází k dalšímu rozšiřování vodního svazku do šířky a k poklesu účinků jednotlivých klastrů. Toto stádium se nazývá deplece (tj. úbytek/nedostatek). Toto stádium je z hlediska morfologie erozní drážky charakteristické nárůstem šířky a poklesem hloubky. Erozní kráter začíná být nejprve nepravidelný a poté stále více diskontinuální.

**Ukončení:**

V závěrečné fázi, tj. při dalším nárůstu SOD pak dochází k rozpadu klastrů na jednotlivé kapky, které však již ztrácejí svoji kinetickou energii. Tato fáze se nazývá ukončení. Vodní paprsek při těchto parametrech již nemá erozní účinky a dochází maximálně k plastické deformaci povrchu.

**Kulminace:**

Velmi úzká oblast na vrcholu mezi stádiem akcelerace a deplece se nazývá kulminace. Jde o stav, kdy parametr SOD byl vyladěn pro maximální efektivitu vodního svazku (hloubka vzniklého erozního kráteru je maximální).

## 4. Výsledky experimentů a diskuse

Předkládaná diplomová práce vznikla jako součást řešení projektu GAČR číslo 19-00408S, s názvem „Integrita a struktura materiálů v počátečních stádiích interakce s pulzujícím vodním paprskem“ na Ústavu fyziky materiálů (IPM), Akademie věd České republiky, Brno. Pro diplomovou práci byla jako experimentální materiál zvolena ocel EA4T. Povrchové zpracování tohoto materiálu pomocí vodního paprsku proběhlo ve spolupráci s Ústavem geoniky (UGN), Akademie věd České republiky, který sídlí v Ostravě.

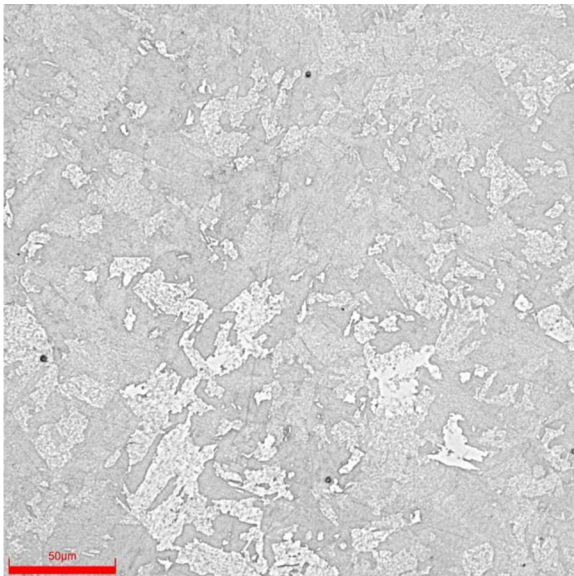
Na konec předkládané DP je umístěna příloha, která obsahuje snímky profilů a erozních stop (drážek) po průchodu PWJ. Jsou zde obsaženy snímky pořízené pomocí REM pro všechny hodnoty měnícího se parametru SOD (15 mm až 43 mm). Příloha je rozdělena na 10 částí podle toho, zda se jedná o profily nebo pohledy na erozní stopy (drážky) shora a podle aplikovaného parametru SOD.

### 4.1 Mikrostruktura oceli EA4T

V rámci řešení DP proběhla nejprve mikrostrukturní analýza experimentálního materiálu. Za účelem pozorování struktury oceli EA4T prostřednictvím světelné a rastrovací elektronové mikroskopie byl proveden metalografický výbrus.

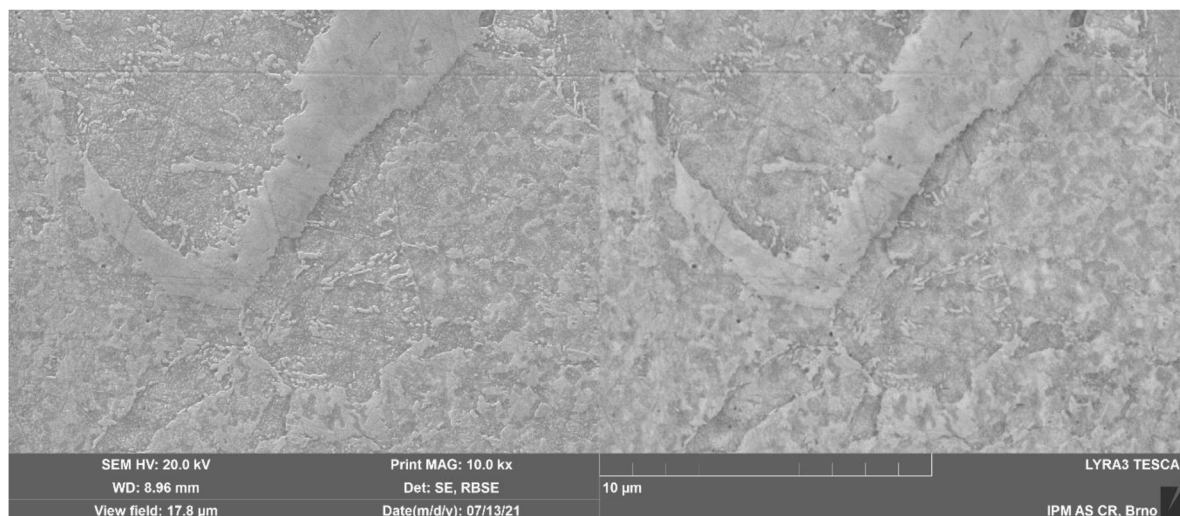
Vzorek oceli v tepelně zpracovaném stavu byl broušen na metalografické brusce Saphir 330. Vzorek byl nejprve broušen brusnými papíry s velkou zrnitostí, později se přešlo na brusivo jemnější. Po dokončení brousící operace bylo přikročeno k leštění vzorku pomocí diamantové pasty. Pro pozorování mikrostruktury byl vzorek naleptán 5% roztokem Nitalu. Nital je roztok kyseliny dusičné ( $\text{HNO}_3$ ) v ethanolu ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

Na obrázku č. 27 je možné pozorovat naleptanou strukturu oceli EA4T prostřednictvím světelného mikroskopu.



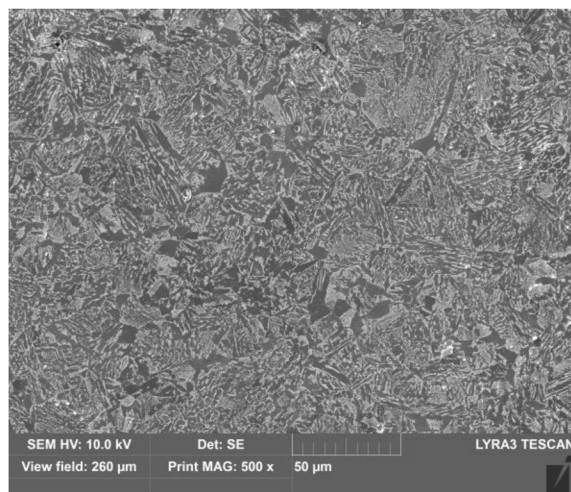
Obrázek č. 27: Mikrostruktura oceli EA4T – světelná mikroskopie, naleptáno Nitalem

Na obrázku č. 28 a 29 jsou fotografie struktury oceli EA4T pozorovány rastrovací elektronovou mikroskopií při různých zvětšení a po různé povrchové úpravě (naleptáno Nital, nebo leštěno pomocí OPS).

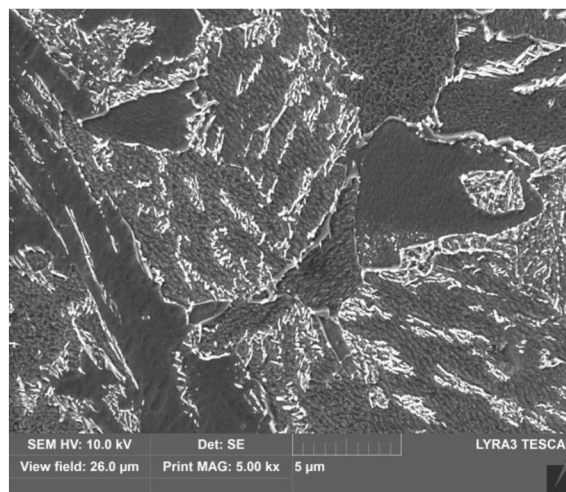


Obrázek č. 28: Mikrostruktura oceli EA4T – REM, naleptáno nitalem (levá polovina snímku je v SE, vpravo stejné místo v BSE)

a)



b)



Obrázek č. 29: Mikrostruktura oceli EA4T – REM, povrch vyleštěn pomocí OPS (a)..., (b)... Oboje v SE

Mikrostruktura oceli EA4T vykazuje vzhled odpovídající zakalenému stavu. Je zde možné pozorovat feritické desky a částice cementitu. Ze vzhledu deskovitých/ jehlicovitých útvarů lze usuzovat, že struktura je tvořena bainitem (to je v souladu s výsledky publikovanými v [1]).

## 4.2 Aplikace PWJ a použité technologické podmínky

Vzorky z materiálu EA4T byly v rámci spolupráce s UGN tryskané prostřednictvím technologie PWJ. Experimentální zařízení, které bylo použito, tvoří vysokotlaké čerpadlo Hammelmann (max. minimální provozní tlak 160 MPa, max. průtok až 65 l/min) vybavené robotickým manipulátorem ABB IRB 6640-180 na kterém je umístěna tryska, vysoce citlivé piezoelektrické tlakové snímače a patentovaný akustický generátor PWJ (Český patent č. 299412). Aplikování pulzujícího vodního paprsku na povrch oceli EA4T probíhalo za podmínek uvedených v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2: Technologické podmínky při použití PWJ na materiál EA4T

Standoff distance	Tlak vody	Frekvence sonotrody	Délka akustické komory	Průměr trysky	Rychlost proudění	Průtok	Rychlost posuvu
[mm]	[MPa]	[kHz]	[mm]	[mm]	[m/s]	[l/min]	[mm/s]
15-43	40	20,1	12	0,6	254,81	4,32	0,25

Parametr **standoff distance (SOD)**, je z hlediska řešení DP nejzásadnější, jelikož všechny ostatní technologické parametry byly udržovány konstantní. V rámci experimentální části práce byla hledána optimální hodnota parametru SOD, který byl měněn v rozmezí 15 mm až 43 mm s krokem 2 mm. Byl studován vliv hodnoty SOD na erozi, a to zejména s ohledem na možné použití metody pro zpevňování povrchu (peening) a prodloužení únavové životnosti.

Před aplikací PWJ na vzorek ve tvaru delšího kvádrů byl povrch tohoto ocelového bloku broušen pomocí metalografické brusky Saphir 330.

Při aplikaci PWJ na povrch dlouhého kvádrů podle schématu na obrázku č. 25 byla nejprve nastavena minimální hodnota SOD 15 mm. Stejně parametry tryskání byly udržovány pro oblast s délkou cca 20 mm a poté následovala oblast skokového přechodu na hodnotu SOD vyšší o 2 mm. Tímto způsobem bylo po délce kvádrů dosaženo vytvoření erozních drážek s odstupňovaným účinkem PWJ, které se lišily v použitém SOD parametru a vzhledu. Celý blok s 15 různými stopami po PWJ byl poté rozdělen podle použitého SOD parametru na jednotlivé menší vzorky. Ty pak byly podrobeny detailními studii.

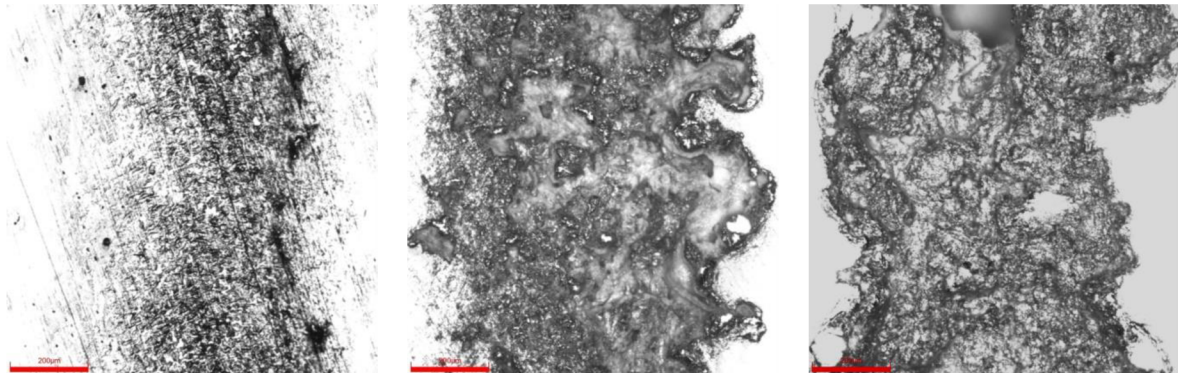


## 4.3 Analýza erozních drážek

Na Ústavu fyziky materiálů Akademie věd České republiky probíhalo pozorování a další analýzy jednotlivých menších vzorků, které obsahovaly úseky s konstantní hodnotou SOD. Jednotlivé stopy (drážky), které byly na tryskaném materiálu vytvořeny prostřednictvím působícího PWJ, byly dále pozorovány a analyzovány různými metodami.

### 4.3.1 Vzhled erozních drážek pomocí SM

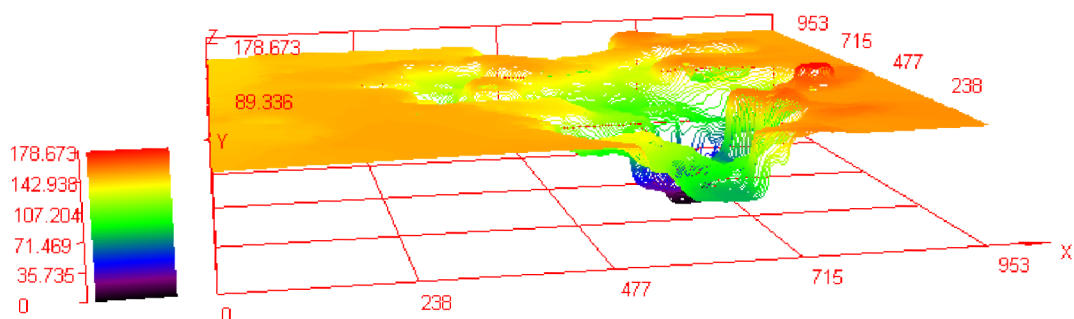
Na obrázku č. 30 jsou uvedeny vybrané snímky povrchu ze světelného mikroskopu po průchodu PWJ pro tři hodnoty parametru – SOD = 21 mm, 23 mm a 41 mm. Z obrázku jsou patrná jednotlivá erozní stádia popsaná v kapitole 3.5.3, podkapitola Technologické parametry procesu PWJ. Při SOD = 21 mm můžeme pozorovat deformaci povrchu a vznik prvních důlků a mikrojamek (konec stádia inkubace). Snímek pro SOD = 23 mm odpovídá stádiu akcelerace, kdy dostáváme poměrně široký, hluboký a pravidelný erozní kráter. Snímek pro SOD = 41 mm pak charakterizuje fázi deplece, kdy hloubka kráteru klesá, roste jeho šířka, nicméně erozní pás je nerovnoměrný a může být diskontinuální.



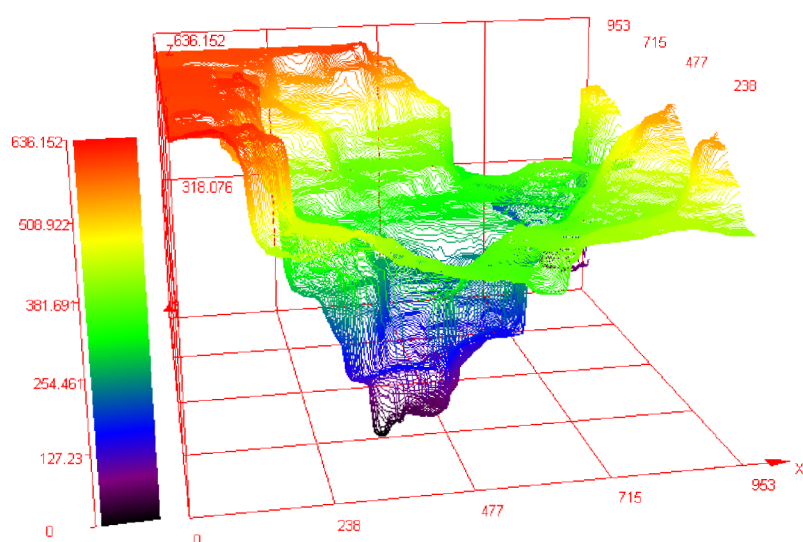
Obrázek č. 30: Povrch po PWJ při SOD = 21 mm, 23 mm, 41 mm

Digitální světelný mikroskop Olympus DSX1000 umožňuje vytvořit 3D obraz snímané oblasti. Zdokonalený algoritmus skládání obrazu poskytuje přehledné obrazy bez viditelných hranic. Na obrázku č. 31 a č. 32 jsou příklady 3D snímků drážek pro SOD 23 mm a 35 mm, tj. oba snímky z oblasti akcelerace, kdy je účinnost PWJ maximální. Hodnota SOD 35 mm se (i vzhledem k dále uvedeným skutečnostem) dá považovat za stádium kulminace (viz kapitola 3.5.3, podkapitola Technologické parametry procesu PWJ).





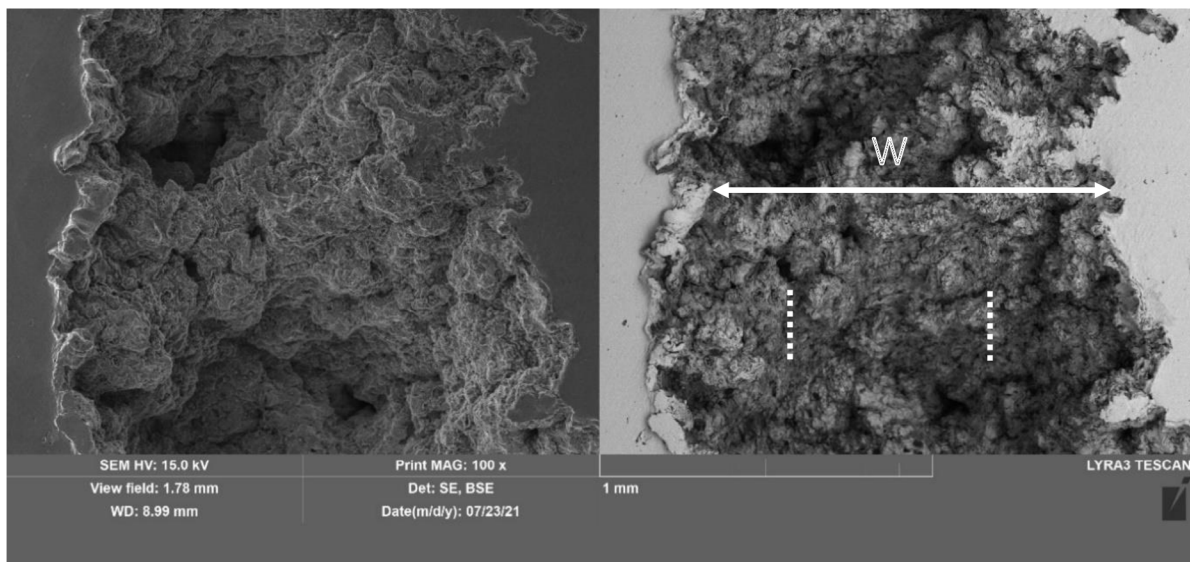
Obrázek č. 31: 3D obraz drážky po PWJ při SOD = 23 mm



Obrázek č. 32: 3D obraz drážky po PWJ při SOD = 35 mm

#### 4.3.2 Vzhled erozních drážek pomocí REM

Na obrázku č. 33 je příklad snímku povrchu z REM po průchodu PWJ pro SOD 35 mm. Na snímku jsou rovněž vyznačeny jak šířka drážky (šipka s označením W), tak čárkovanými úsečkami průměr otvoru trysky použité pro PWJ metodu – tedy 0,6 mm.



Obrázek č. 33: Drážka po PWJ při SOD = 35 mm  
(levá polovina snímku je v SE, vpravo stejné místo v BSE)

### 4.3.3 Hloubka a šířka erozních drážek

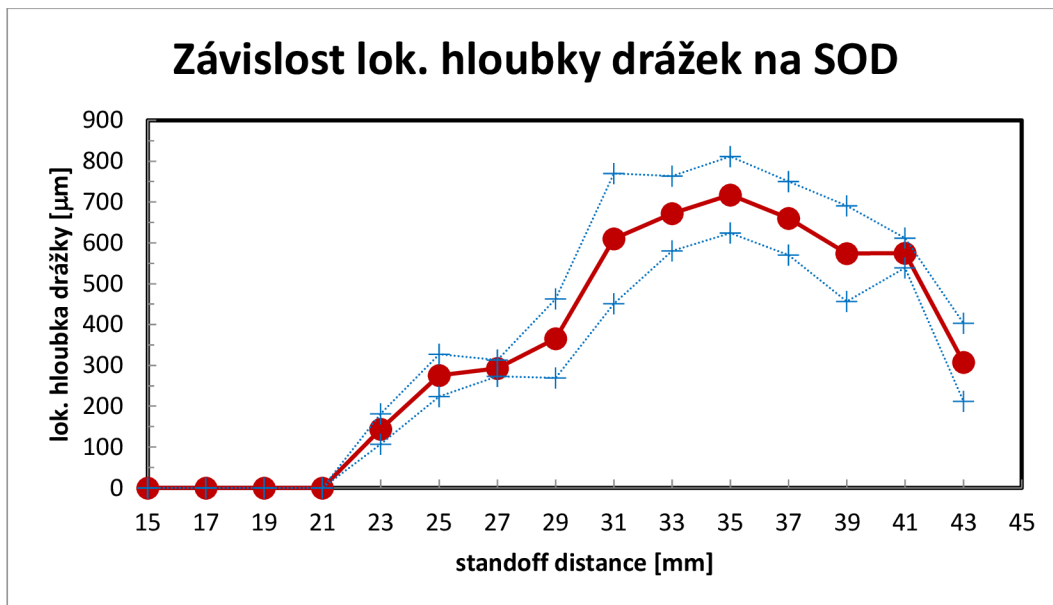
Pokročilé algoritmy digitálního světelného mikroskopu Olympus umožnily vyhodnotit ještě další data z 3D snímků získaných u vzorků se všemi hodnotami parametru SOD. To bylo využito pro vyhodnocení šířky, ale zejména pak lokální hloubky erozních drážek. Během pozorování a zaznamenávání obrazové podoby byla na každé drážce s „viditelnou“ stopou provedena tři měření hloubky kráteru a byl spočten aritmetický průměr a odchyłka.

U všech viditelných stop, tedy tam, kde paprsek způsobil narušení materiálu, které se projevilo vznikem drážky, bylo provedeno měření a naměřená data byla zpracována do grafů. Bylo tak získáno grafické znázornění závislosti účinků PWJ na parametru SOD, což umožňuje názorné posouzení dezintegrační schopnosti PWJ.

**Poznámka:** V případě hloubek mluvíme o hloubkách lokálních. Vlivem tlakových vln, které jsou v materiálu generovány, totiž může docházet ke vzniku podpovrchových dutin, které nejsou propojeny s povrchovou drážkou, a tak nemusí být při pozorování drážek shora prostřednictvím světelného mikroskopu viditelné. Dalším charakteristickým znakem je tvorba podpovrchových mikrotunelů, které vznikají vlivem laterálního proudění (viz kapitola 3.5.3, podkapitola Hydrodynamická eroze způsobená působením PWJ). Pokud vezmeme v potaz hloubku drážky včetně dutin či mikrotunelů, pak mluvíme o skutečné hloubce, která byla dotčena dezintegrací (viz dále, kapitola 4.4, obrázek č. 38).

I pod tryskaným povrchem, kde nebyla pozorována eroze, se však očekává ovlivnění materiálu ve formě plastické deformace, proto byla v experimentální části předkládané DP provedena KAM analýza pod povrchem erozních drážek, tj, na příčném řezu kráterem. Příčný řez vybraných vzorků byl vybroušen a vyleštěn pomocí OPS, aby se dosáhlo kvality potřebné pro EBSD analýzu.

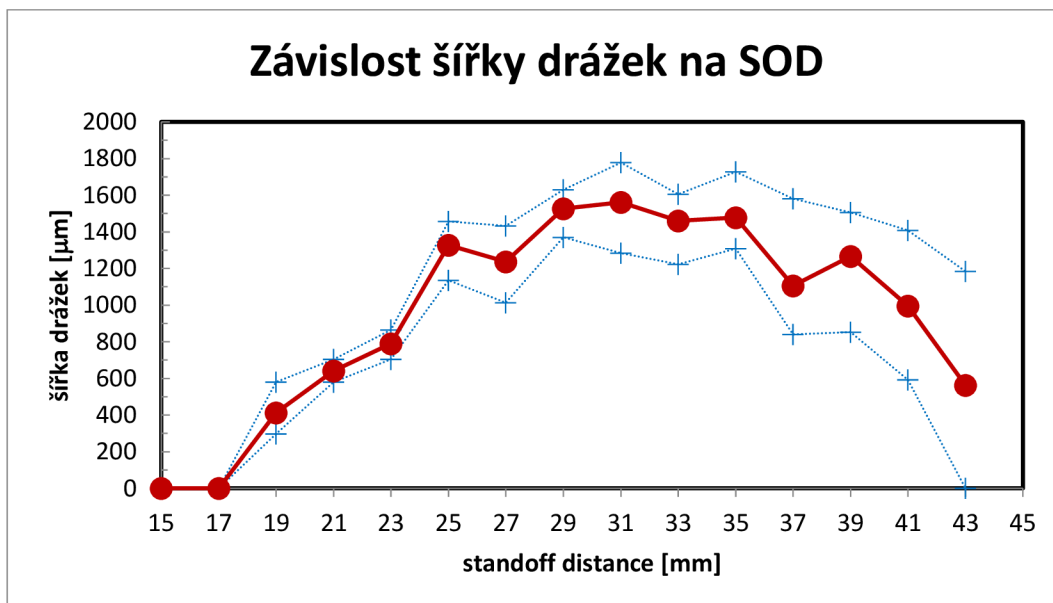
Na obrázku č. 34 je graficky znázorněna závislost lokální hloubky drážek vytvořených působením PWJ na parametru SOD (analýza provedená pomocí SM).



Obrázek č. 34: Závislost lokální hloubky drážek na parametru SOD

Pro SOD mezi 15 mm až 21 mm nedošlo k vyhloubení erozní stopy – hloubka měřitelná pomocí SM je pro tyto hodnoty parametru nulová. Při SOD = 23 mm již došlo k vytvoření erozní drážky. S dále narůstajícím parametrem SOD rostla i hloubka vytvořené erozní drážky. Při SOD = 35 mm dosáhla hloubka erozní drážky svého maxima (cca 720 µm). Pro hodnoty vyšší než 35 mm již bylo možné pozorovat pokles hloubek erozních drážek, a to až do hodnoty cca 300 µm při SOD = 43 mm.

Dále došlo i ke grafickému vyobrazení šířky erozních drážek v závislosti na použitém parametru SOD – obrázek č. 35.



Obrázek č. 35: Závislost šířky drážek na parametru SOD

Při pozorování grafu na obrázku č. 35 je možné si povšimnout, že s rostoucí hodnotou parametru SOD roste společně i rozptyl naměřené šířky.

Pro parametr SOD = 15 mm a 17 mm nezpůsobil PWJ vytvoření plošné stopy – nebylo možné změřit šířku erozní stopy pomocí SM. Pro nastavení parametru SOD = 19 mm a 21 mm sice nedošlo působením PWJ k vyhloubení erozních drážek. Bylo však možné pozorovat plastickou deformaci a zdrsňení tryskaného povrchu – došlo k naměření šířek těchto ovlivnění. Pro hodnoty parametru SOD  $\geq$  19 mm docházelo k nárůstu šířky erozní drážky. Maximální šířka erozní stopy byla pozorována při SOD 29 mm; 31 mm; 33 mm; 35 mm. Při těchto hodnotách SOD parametru se pohybovala naměřená šířka erozních drážek od asi 1450  $\mu$ m do 1550  $\mu$ m. Při vyšších nastavených hodnotách SOD bylo již možné pozorovat pokles šířky erozní drážky.

**Poznámka:** Pro stanovení šířek erozních drážek byla využita zejména REM. Tato metoda analýzy šířky kráterů ze snímků drážek na povrchu materiálu byla přesnější a s ohledem na statistickou významnost efektivnější, protože bylo možné provést snadno více měření na jednom snímku kráteru. Hloubky erozních drážek byly stanoveny pomocí digitální světelného mikroskopu Olympus DSX1000. Kdybychom chtěli vyhodnotit hloubky kráterů pomocí REM (ať už lokální nebo skutečné včetně podpovrchových dutin a tunelů), museli bychom pro změření provést jednotlivé příčné řezy vzorků ve směru kolmém na směr PWJ a provést výbrusy a pak časově velmi náročná pozorování jednotlivých řezů (což by bylo velmi neefektivní). Proto se jevílo jako efektivnější měření lokální hloubky pomocí SM a 3D snímků.

#### **4.3.4 Vyhodnocení tvaru drážek s ohledem na definovaná stádia eroze**

##### **SOD < 23 mm**

Při pozorování vzorků tryskaných za podmínky SOD < 23 mm, bylo zjištěno, že PWJ nezpůsobil vytvoření drážky. Nedošlo tedy k úběru materiálu prostřednictvím hydrodynamické tvárné eroze. Byla pozorována pouze plastická deformace a zdrsňení tryskaného povrchu. S ohledem na erozní stádia definovaná v [33] lze podmínky pro SOD = 15; 17; 19; 21 mm definovat jako inkubační fáze procesu.

##### **SOD = 23 mm**

Při SOD = 23 se již začala projevovat lehká eroze tryskaného povrchu (viz obrázek č. 30 a č. 31).

Došlo k ukončení inkubační fáze a začátku akcelerace eroze materiálu.

##### **SOD = 29 mm; 31 mm; 33 mm; 35 mm – maximální šířka eroze**

Nejširší drážku (erozi) bylo možné pozorovat při podmínce SOD = 29 mm; 31 mm; 33 mm; 35 mm.

Naměřená hodnota šířky erozní stopy dosáhla průměrné hodnoty 1500  $\mu$ m při výše uvedených hodnotách SOD parametru.

### **SOD = 35 mm – maximální hloubka eroze**

Nejhlubší drážku (erozi) bylo možné pozorovat při podmínce SOD = 35 mm. Za takových podmínek měl pulzující vodní paprsek maximální dezintegrační schopnost, co se týče hloubky ubraného materiálu. Naměřená hodnota hloubky dosáhla hodnoty 720  $\mu\text{m}$ . Drážku vytvořenou prostřednictvím PWJ při SOD = 35 mm je možné pozorovat na obrázku č. 33.

Dle pozorování a měření rozměrů erozní drážky je možné erozní fázi při SOD = 35 mm popsat jako fázi kulminace.

### **SOD $\geq$ 37 mm**

Při parametru SOD 37 mm a vyšším již docházelo ke zmenšování hloubky i šířky erozních drážek kvůli snižující se dezintegrační schopnosti paprsku.

### **SOD = 39 mm; 41 mm; 43 mm**

Při daných hodnotách SOD parametru bylo možné pozorovat diskontinuální tvar stopy po PWJ. Ze vzhledu erozních drážek pro výše zmíněné hodnoty SOD parametru je možné erozní fázi popsat přibližně jako fázi deplece.

Fáze ukončení definovaná v [33] nebyla v našich podmínkách dosažena. Bylo by potřeba ještě zvýšit parametr SOD, abychom jí byli schopni pozorovat. K tomu však při řešení daného projektu nedošlo.

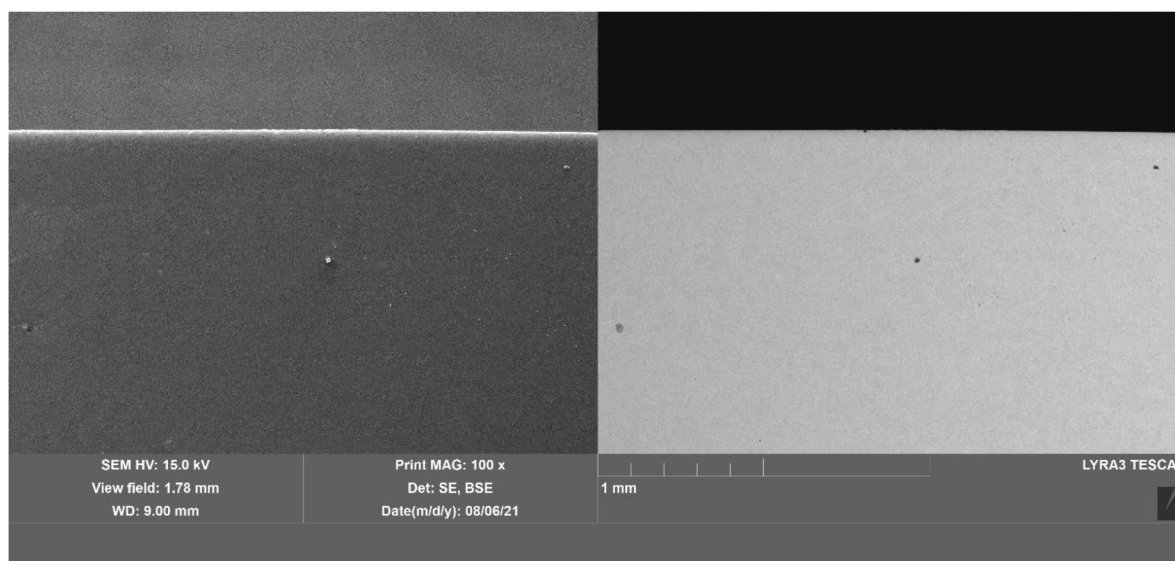
## 4.4 Profily po průchodu PWJ – REM

Kvůli pozorování tvaru profilů vytvořených drážek, byly provedeny řezy kolmo na směr pohybu PWJ. Povrch řezů byl broušen a za pomoci REM byly snímány profily erozních drážek. Snímky pro vybrané hodnoty SOD jsou včetně komentářů uvedeny dále.

**Poznámka:** Všechny snímky jak profilů, tak povrchů drážek pro všechny vzorky pozorované pomocí REM při zpracování diplomové práce jsou uvedeny formou přehledných tabulek v příloze.

### SOD < 23 mm

Při nastavení parametru SOD < 23 mm nedošlo k úběru materiálu a vytvoření erozní drážky. Skutečnost je možné pozorovat na obrázku č. 36.



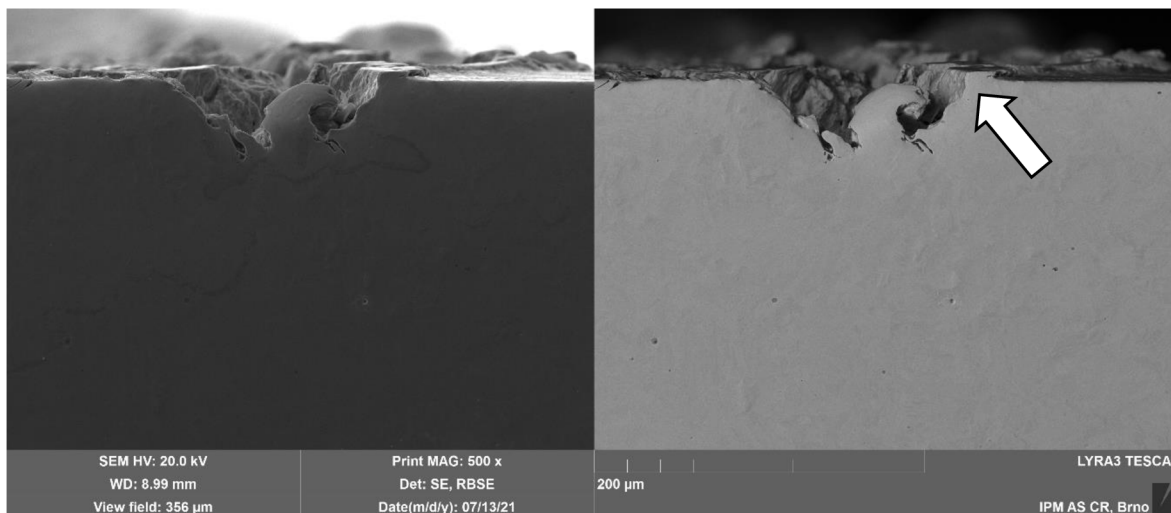
Obrázek č. 36: Profil po PWJ při SOD = 21 mm  
(levá polovina snímku je v SE, vpravo stejné místo v BSE)

### SOD = 23 mm

Jak již bylo zmíněno dříve, k úběru materiálu došlo až při SOD = 23 mm. Při nižší hodnotě tohoto parametru nedosahoval pulzující vodní paprsek takové účinnosti, aby byl schopen způsobit dezintegraci materiálu. Příčinu je možné vyčíst z obrázku č. 26 – grafické interpretace erozních stádií v závislosti na parametru SOD. Vodní paprsek se začíná formovat do vodních klastrů až v určité vzdálenosti od výstupu z trysky. Je tedy potřeba určitá vzdálenost mezi tryskou a povrchem materiálu, aby došlo k vytvoření vodních klastrů, které jsou účinné.

Na obrázku č. 37 je profil erozní drážky při nastavení SOD = 23 mm. Je možné sledovat důsledek radiálního toku vody po její srážce s tryskaným materiálem, který má za následek vytvoření „valu“ po stranách erozní drážky (viz bílá šipka v obrázku č. 37).



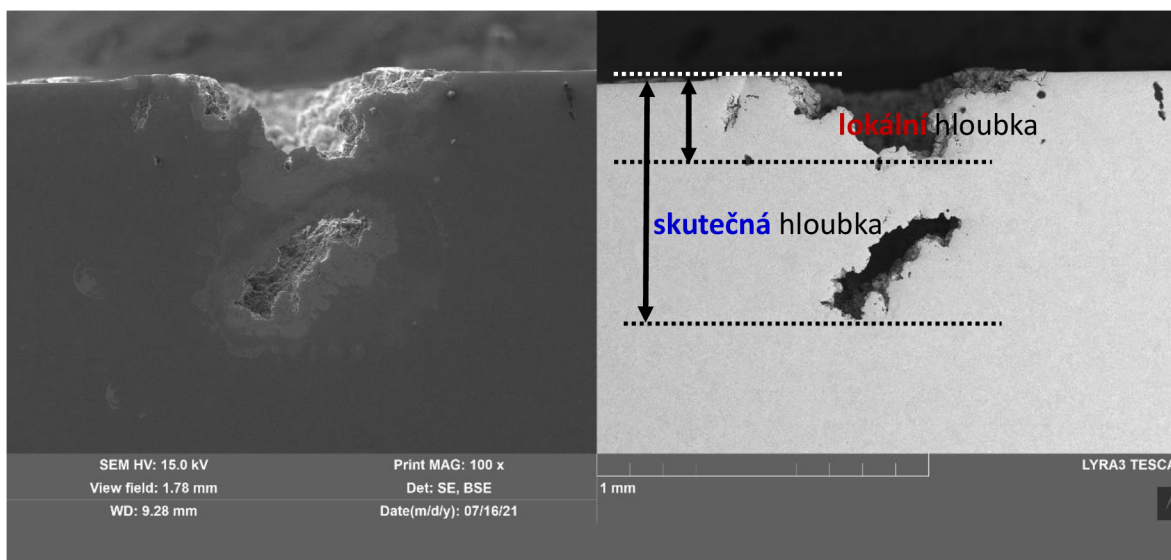


Obrázek č. 37: Profil drážky po PWJ při SOD = 23 mm  
(levá polovina snímku je v SE, vpravo stejné místo v BSE)

### SOD = 35 mm

Na obrázku č. 38 je profil erozní drážky při nastavení SOD = 35 mm. Tento snímek přímo demonstruje rozdíl mezi lokální hloubkou drážky a její hloubkou skutečnou. Obě tyto hloubky jsou ve snímku graficky znázorněny. Důležitou roli zde hraje místo provedení řezu kolmo na směr erozní drážky.

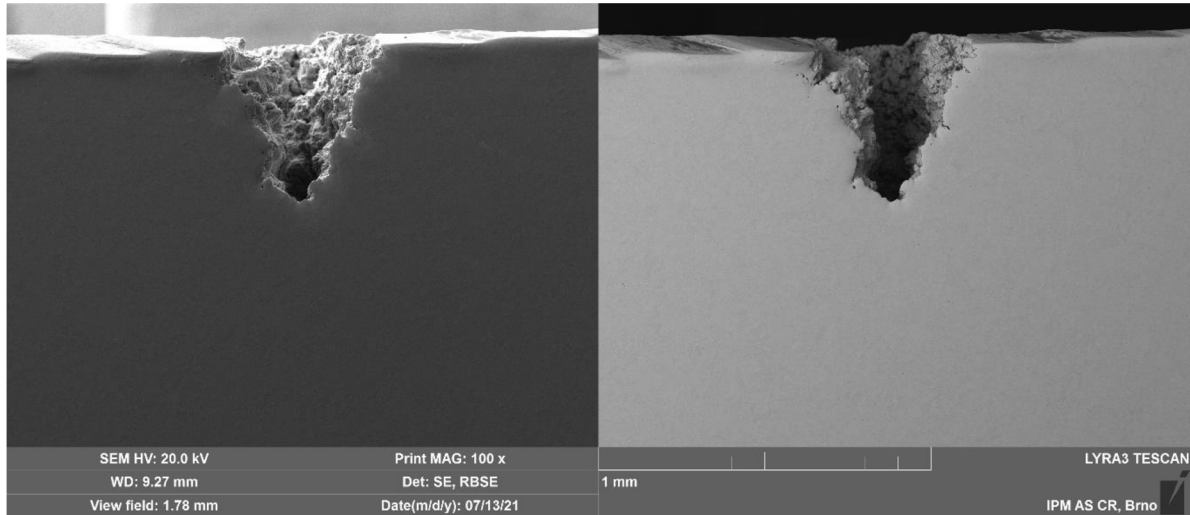
Dutina na snímku není dutinou, která by vznikla působením tlakových polí, jak bylo popsáno dříve, ale je to řez tunelem, který vznikl působením laterálního toku vodního svazku.



Obrázek č. 38: Profil drážky po PWJ při SOD = 35 mm – lokální a skutečná hloubka  
(levá polovina snímku je v SE, vpravo stejné místo v BSE)

## SOD $\geq$ 37 mm

Zmíněný pokles dezintegrační schopnosti PWJ je možné pozorovat na snímku REM. Ten je uveden na obrázku č. 39, kdy ukazuje erozní drážku při nastavení parametru SOD = 41 mm.



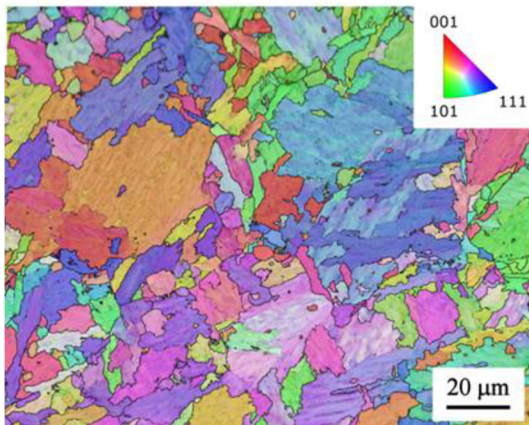
Obrázek č. 39: Profil drážky po PWJ při SOD = 41 mm  
(levá polovina snímku je v SE, vpravo stejné místo v BSE)



## 4.5 EBSD analýza materiálu

### Pro základní materiál

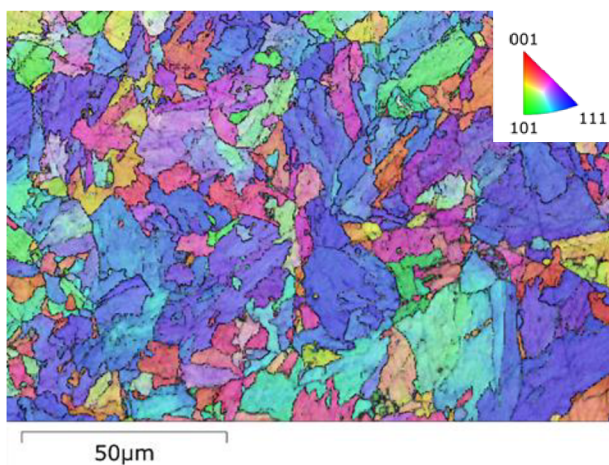
EBSD analýza materiálu EA4T v základním stavu (obrázek č. 40) umožnila rozlišení jednotlivých zrn materiálu a byla určena jejich velikost i orientace. Maximální velikost zrna je cca 40  $\mu\text{m}$ . Je vidět rovnoměrné rozložení orientace zrn – materiál nevykazuje texturu, tj. usměrnění orientace do určitého směru. Na snímku jsou rovnoosá zrna a struktura odpovídá bainitické struktuře (což je v souladu s naměřenými hodnotami tvrdosti – viz kap. 4.8). Pokud by při tepelném zpracování tohoto materiálu došlo ke vzniku martenzitu, byly by patrné typické martenzitické jehlice.



Obrázek č. 40: EBSD snímek mikrostruktury po materiálu v základním stavu

### Pod erozní drážkou (SOD = 29 mm)

Na obrázku č. 41 je uveden snímek z EBSD analýzy materiálu pod erozní drážkou. Je patrné, že použitím PWJ nedošlo ke změně velikosti (maximální velikost zrna je stále okolo 40  $\mu\text{m}$ ). Prostřednictvím EBSD analýzy tedy nebylo možné jednoznačně prokázat zjemnění struktury vlivem působení PWJ. Aplikace PWJ nezpůsobila ani žádnou výraznou změnu orientace zrn, nedošlo ke vzniku textury.



Obrázek č. 41: EBSD snímek mikrostruktury pod erozní drážkou při SOD = 29 mm

EBSD snímky byly zpracované pomocí softwaru AZTEC Crystal, kdy bylo využito zobrazení: BC+GB+IPF-Z

BC je zobrazení v pásovém kontrastu (z anglického Band Contrast) prostřednictvím kterého bylo možné „vystínovat“ jednotlivá zrna – obraz má pak více prostorový vzhled. GB je zobrazení hranic zrn (z anglického Grain Boundaries) kdy obrysy hranic jednotlivých zrn jsou na snímku zvýrazněny linkou černé barvy.

IPF-Z zobrazení vyjadřuje krystalografickou orientaci jednotlivých zrn. Zkratka IPF (z anglického Inverse Pole Figures = inverzní pólové obrazce) Pro diplomovou práci bylo použito zobrazení orientace krystalové mřížky vzhledem k ose z. V pravém horním rohu snímku je barevný trojúhelník, pomocí něhož lze barvu zrna přiřadit krystalografické orientaci (červená barva odpovídá orientaci 001. Analogicky je tomu i pro ostatní barvy v trojúhelníku.). Jelikož jsou ve snímku rovnoměrně zastoupena zrna s barvou červenou modrou i zelenou, lze usuzovat na rovnoměrné rozložení orientace zrn, a tedy materiál nevykazuje texturu.

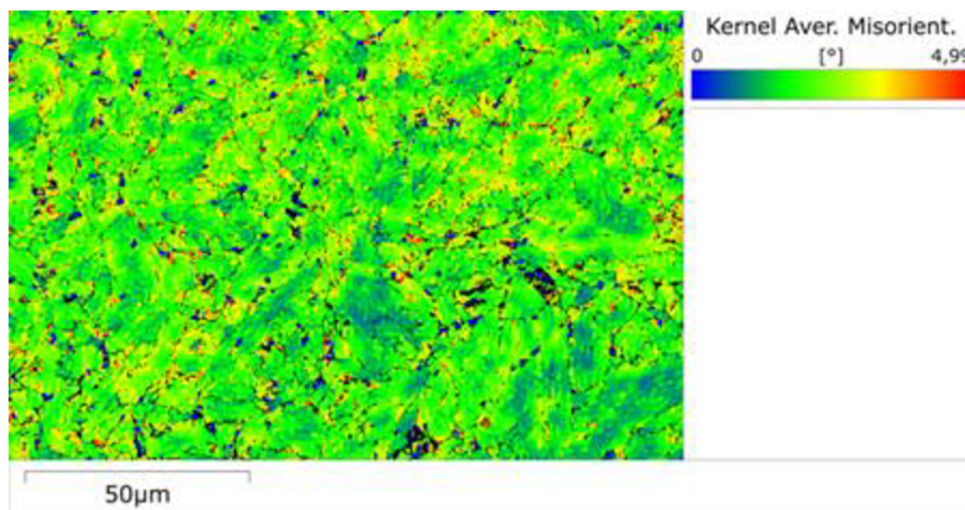
## 4.6 EBSD – kernelova misorientace

Pro vzorek s parametrem SOD = 29 mm byla provedena analýza KAM za účelem zjištění lokální deformace mřížky.

Při KAM analýze dochází k nastavení velikosti matice buněk (Kernel size = velikost jádra) – určuje, kolik sousedů (pixelů) v okolí jádra (středového pixelu) bere software v úvahu.

Dále je nastavován úhel dezorientace – při KAM analýze jsou brány v úvahu pouze sousedé jejichž dezorientace vůči středovému pixelu nepřesahuje nastavenou hodnotu. Při nízké hodnotě úhlu dezorientace se metoda stává velmi citlivou. Naopak při vysoké hodnotě úhlu dezorientace by došlo k detekování cizích hranic zrn. Optimální hodnotou je  $5^\circ$ .

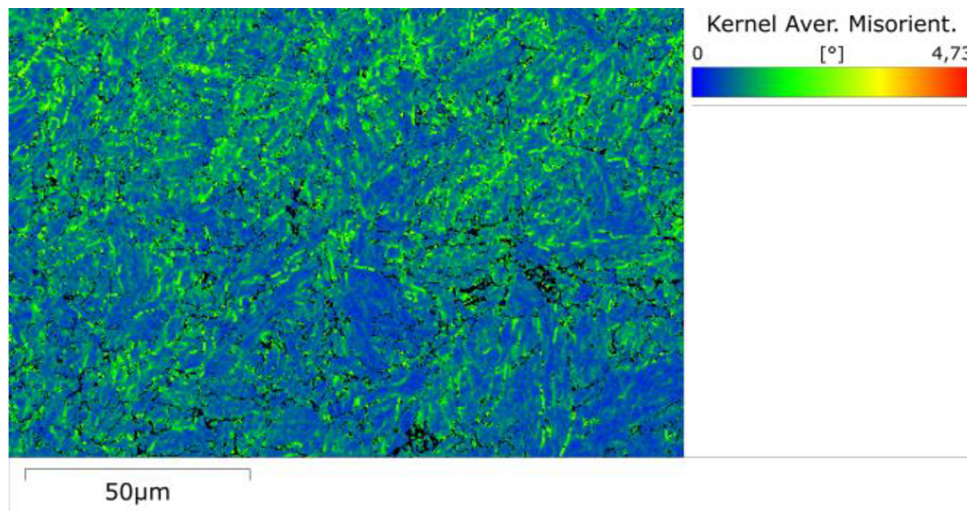
Analýza byla provedena na příčném řezu pro vzorek s SOD = 29 mm při 2 různých nastaveních parametrů KAM. Na obrázku č. 42 je uveden výsledek analýzy KAM pod erozní drážkou se zvolenou maticí buněk  $11 \times 11$  a úhlem dezorientace  $5^\circ$ . (Dno erozní drážky je těsně nad horní hranou snímku.)



Obrázek č. 42: KAM; podmínky: matice buněk =  $11 \times 11$ , úhel dezorientace =  $5^\circ$

Je možné si povšimnout, že celá sledovaná plocha má podobně barevný kontrast. Při zvolené matici buněk  $11 \times 11$  tedy nejsme schopni vyvodit jakýkoliv závěr o lokální deformaci mřížky pod erozní drážkou.

Na obrázku č. 43 je uveden výsledek analýzy KAM pod erozní drážkou při nastavení velikosti matice buněk 3×3 a úhlem dezorientace 5°.



Obrázek č. 43: KAM; podmínky: matice buněk = 3×3, úhel dezorientace = 5°

Při nastavení matice buněk 3×3 je metoda citlivější na malé odchylky, které je schopná detekovat.

Horní polovina snímku (tedy určitá vrstva těsně pod dnem erozního kráteru) vykazuje při KAM analýze dobře pozorovatelnou misorientaci (více zeleného zbarvení, tj. misorientace cca 2° – viz legenda u obrázku). Naproti tomu je spodní část snímku zbarvena převážně do modra – to prokazuje větší podíl nulové misorientace.

Z výsledku KAM analýzy při pozorování za citlivějšího nastavení metody je možné vyvodit, že do hloubky přibližně 50 μm pod dnem erozní drážky došlo k malé deformaci zrn vlivem PWJ.

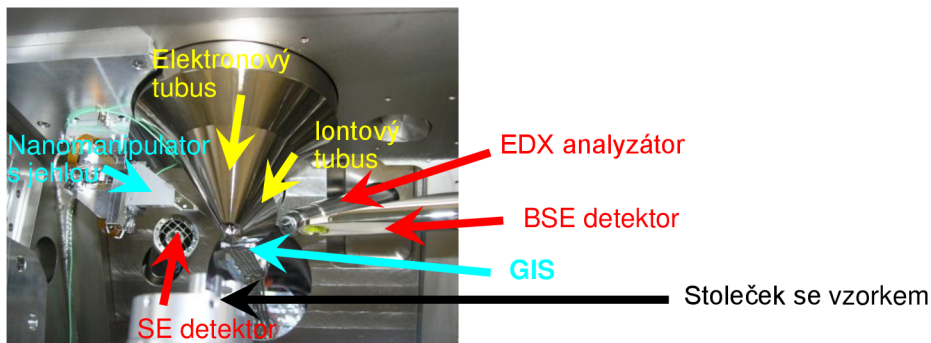


## 4.7 TEM – analýza vnitřní mikrostruktury

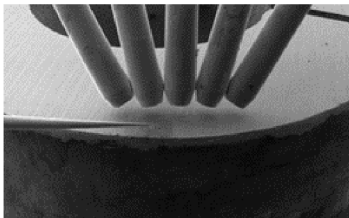
Za účelem pozorování a následném porovnání vnitřní mikrostruktury bylo přikročeno k přípravě lamel pro TEM pomocí fokusovaného iontového svazku (FIB). Několik kroků přípravy TEM lamely je znázorněno na následujících obrázcích.



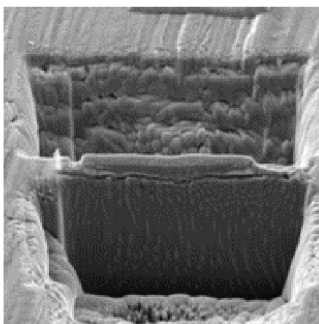
Obrázek č. 44: Pohled do komory REM vybaveného FIB



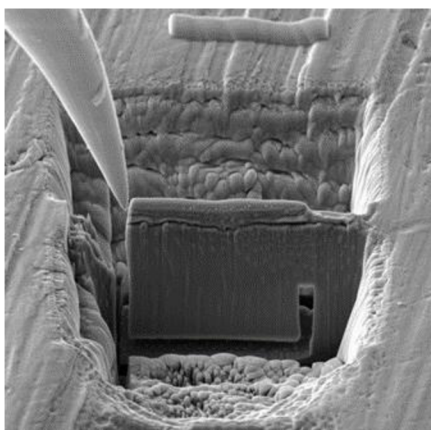
Obrázek č. 45: Detail jednotlivých částí v REM



Obrázek č. 46: Přehledový snímek – vzorek, 5 trysek GIS a jehla vlevo – mikromanipulátor



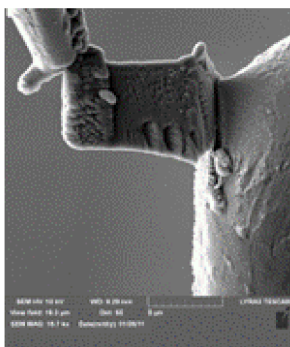
Obrázek č. 47: Nanesení „bochánku“, tj. ochranné vrstvy platiny na místo zájmu a vykopání příkopů tak aby vznikla tlustší lamela



Obrázek č. 48: Podřezání lamely a přiblížení jehly manipulátoru



Obrázek č. 49: Příprava měděné sítky – na jeden z „prstíků“ se tlustší lamela přivaří



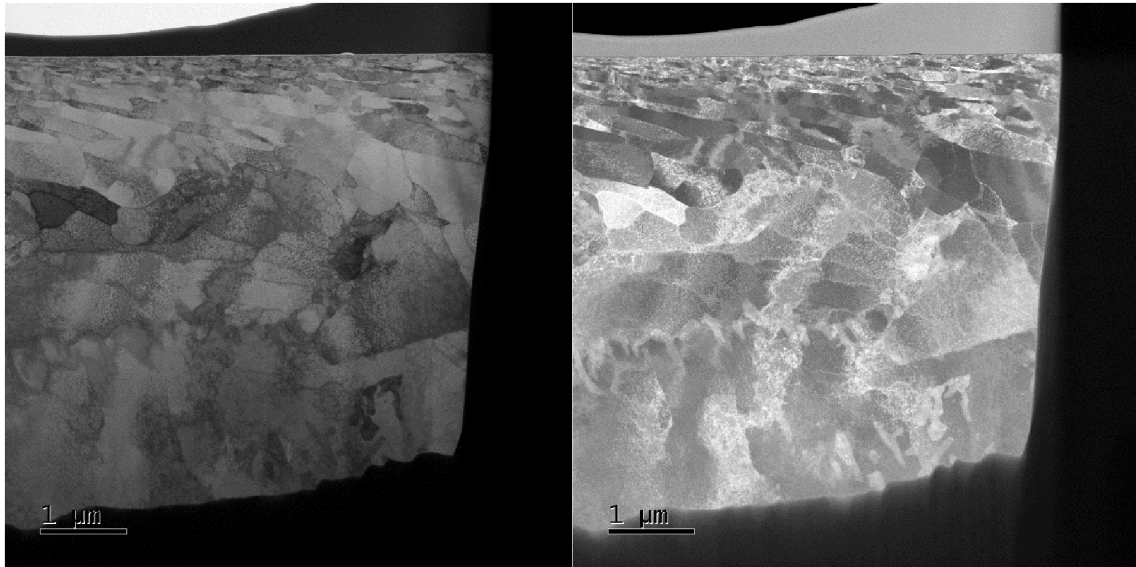
Obrázek č. 50: Detail přivaření vyjmuté lamely připevněné na měděnou síťku TEM držáku

Ve zkratce lze postup popsat takto: Vybere se vhodné místo, nanese se ochranná vrstva platiny, vykopou se příkopy čímž vznikne lamela. Silnější (tlustší) lamela se pak z větší části podřízne, přivaří k jehle mikromanipulátoru, odřízne od zbytku vzorku a přivaří na měděnou síťku. Pak se hrot jehly mikromanipulátoru odřízne a lamela na síťce se ztenčí tak, aby mohla být pozorována v TEM. Poté, co je lamela přemístěna do komory transmisního elektronového mikroskopu může probíhat pozorování.

Z materiálu EA4T byly v rámci diplomové práce připraveny 2 lamely. První lamela byla odebrána z materiálu v základním (netryskaném) stavu. Druhá lamela byla připravena ze vzorku, který byl vystaven působení vodního paprsku při  $SOD = 21 \text{ mm}$ . Konkrétně byla pozorována oblast pod povrchem, na kterém se projevila plastická deformace. Tento vzorek byl vybrán proto, aby se prokázalo, zda PWJ má vliv na zhutnění mikrostruktury za účelem zvýšení únavové životnosti.

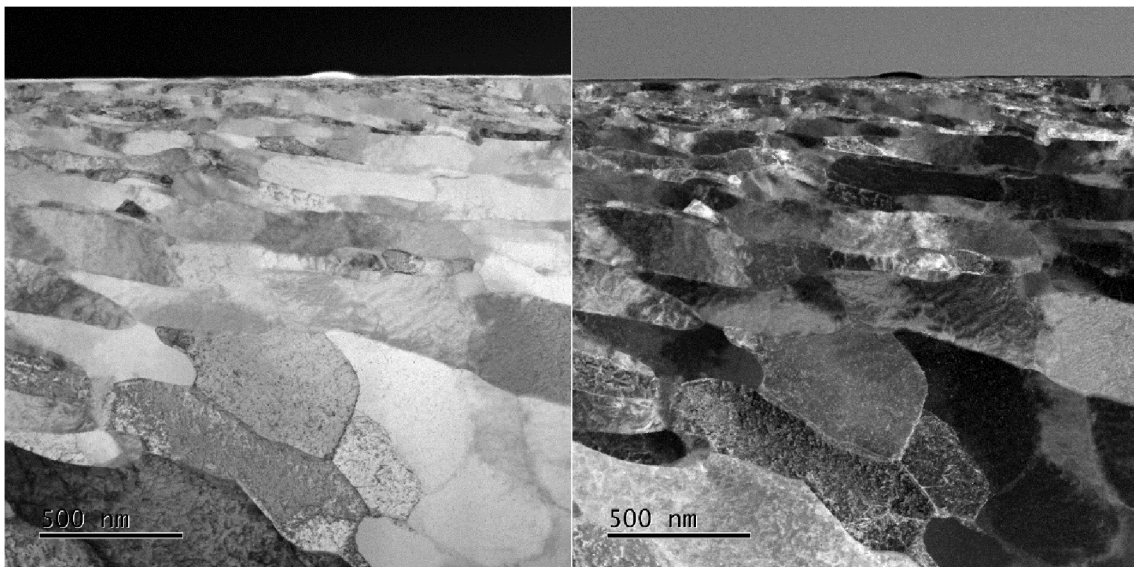
### Vzorek v původním základním (netryskaném) stavu

Na obrázku č. 51 je uveden snímek mikrostruktury oceli v původním netryskaném stavu, který byl vytvořen pomocí TEM při malém zvětšení. Šedá vrstva dobře patrná zejména při zobrazení v tmavém poli (pravá část snímku z TEM) je nanosená vrstva platiny. Lamela má výšku cca 5  $\mu\text{m}$  tzn. že je vidět jednotlivá zrna do této hloubky.



Obrázek č. 51: Lamela vzorku v netryskaném stavu  
zobrazení ve světlém (vlevo) a tmavém poli (vpravo)

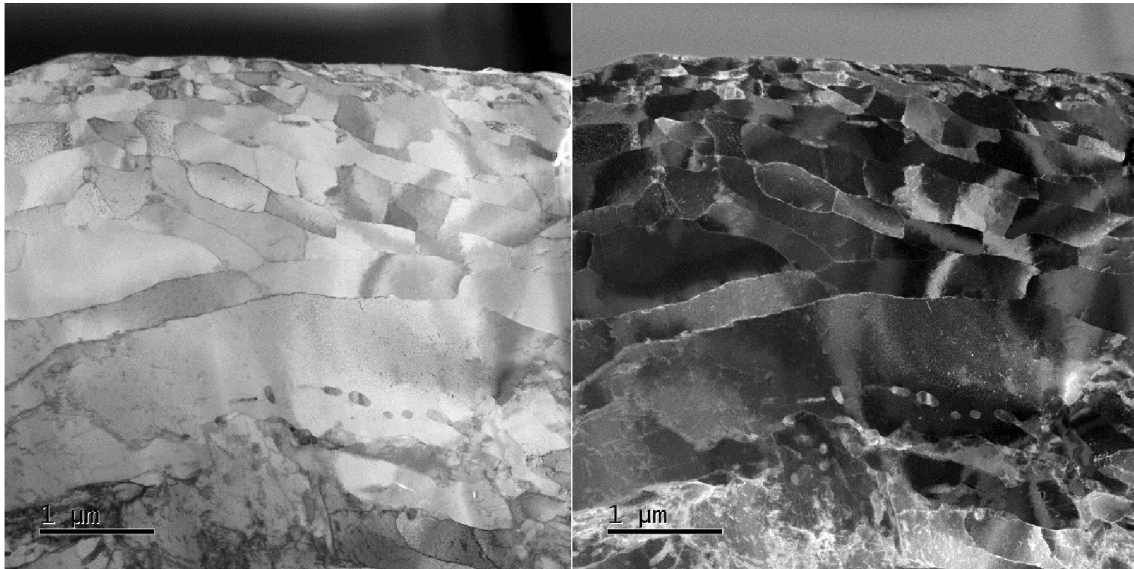
Na obrázku č. 52 je uveden snímek mikrostruktury oceli v původním netryskaném stavu, ale tentokrát při použití vyššího zvětšení. Do hloubky asi 200 nm je struktura tvořena jemnými zrny. Jelikož byl povrch vzorků, resp. kvádrů z materiálu EA4T před plánovaným tryskáním broušen, dá se předpokládat, že tato vrstva s jemnějšími zrny je Beilbyho vrstva.



Obrázek č. 52: Lamela vzorku v netryskaném stavu  
zobrazení ve světlém (vlevo) a tmavém poli (vpravo)

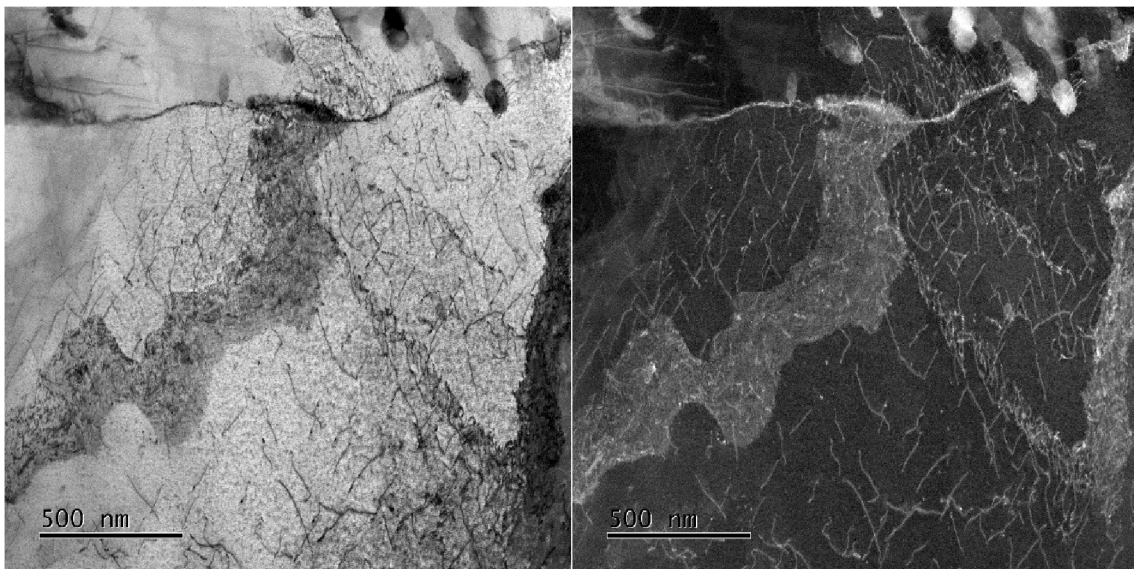
## Vzorek ve stavu po tryskání

Pomocí TEM byla pozorována také lamela z oblasti, která byla po tryskání pomocí PWJ (obrázek č. 53). Lamela byla odebrána z centrální části erozního pásu, tj. z oblasti vzorku, kde se v důsledku působení PWJ předpokládá vznik plastické deformace. Do hloubky asi 3  $\mu\text{m}$  je viditelná jemně zrnitá struktura. Tato vrstva je tedy výrazně větší než Beilbyho vrstva pozorovaná u netryskaného materiálu, tzn. že kromě deformace vnesené do materiálu přípravou povrchu došlo k dalšímu zjemnění struktury vlivem působení PWJ.



Obrázek č. 53: Lamela vzorku ve stavu po tryskání; SOD = 21 mm  
zobrazení ve světlém (vlevo) a tmavém poli (vpravo)

Snímek mikrostruktury oceli ve stavu po tryskání při vyšším zvětšení je uveden na obrázku č. 54.



Obrázek č. 54: Lamela vzorku ve stavu po tryskání; SOD = 21 mm  
zobrazení ve světlém (vlevo) a tmavém poli (vpravo)



Při působení PWJ byla do tryskaného materiálu vnesena tlaková napjatost, která se projevila vznikem plastické deformace, což potvrzují dislokace uvnitř zrn, které jsou viditelné na obrázku č. 54.

Dislokace jsou čárové poruchy krystalové mříže. U většiny pevných látek je plastická deformace uskutečňována prostřednictvím pohybu dislokací. Může jít o pohyb šplhem nebo skluzem. V kovových materiálech je nejčastějším mechanismem skluz dislokací (za pokojové teploty). Pohyb dislokací je zapříčiněn účinkem smykového napětí, jehož hodnota musí být dostatečná k zapříčinění skluzového pohybu dislokace – kritická hodnota smykového napětí.

Z výsledků pozorování provedených v průběhu zpracování experimentální části DP vyplývá, že pulzující vodní paprsek působící na materiál ze vzdálenosti 21 mm (SOD = 21 mm) způsobil relativně malé ovlivnění povrchu tryskaného vzorku. Nebyla vytvořena erozní drážka. Došlo pouze k určité plastické deformaci a zdrsnění povrchu. Rozdíl mezi tryskaným a netryskaným stavem je patrný, nicméně ovlivněný přítomností Beilbyho vrstvy.

Pro přesnější prokázání vlivu hodnoty SOD na vznik jemnější struktury a dosažení výraznější plastické deformace pod tryskaným povrchem by bylo potřebné upravit několik podmínek zkoušení:

- 1) Nejprve by bylo vhodné před aplikací PWJ zajistit, že povrch bude připraven bez vnesení deformace při broušení. Řešením by bylo elektrolytické leštění povrchu materiálu, které kromě hladkého povrchu zajistí i odleptání vrstvy zdeformované při broušení.
- 2) Upravit podmínky tryskání tak, aby se dosáhlo větší účinnosti vodního paprsku. Toho se dá dosáhnout při větším parametru SOD. Z poznatků získaných při řešení DP bylo zjištěno, že maximální účinnosti dosahuje PWJ pro SOD 35 mm. Tyto podmínky však (při zachování ostatních parametrů procesu tryskání) způsobují úběr materiálu, tj. erozi. Řešením by bylo zvýšení dopředné rychlosti pohybu vodního paprsku po povrchu materiálu (v našem případě byla rychlost nastavena na 0,25 mm/s viz Tabulka č. 2 Kap. 4.2). Když se zvýší rychlost posuvu tryskací hlavy, tj. paprsku, pak nedojde k erozi, ale pouze ke zpevnění povrchu. To bylo dokázáno například v [37].

## 4.8 Měření tvrdosti dle Vickerse

### Pro materiál v základním stavu

U materiálu EA4T bylo provedeno vyhodnocení tvrdosti metodou podle Vickerse.

Pro měření tvrdosti dle Vickerse bylo zvoleno zatížení 2 kg. Bylo provedeno 5 měření na vzorku oceli v netryskaném stavu. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Tabulka č. 3: Výsledky měření tvrdosti dle Vickerse

Měření	HV2
1	224
2	227
3	223
4	228
5	222

Průměrná naměřená hodnota tvrdosti byla  $225 \pm 2$  HV2.

Z pozorování námi naměřené hodnoty tvrdosti s hodnotou uvedenou v literatuře [1], která uvádí hodnotu  $216 \pm 23$  HV2 vyplývá, že náš materiál vykazoval o něco vyšší tvrdost.

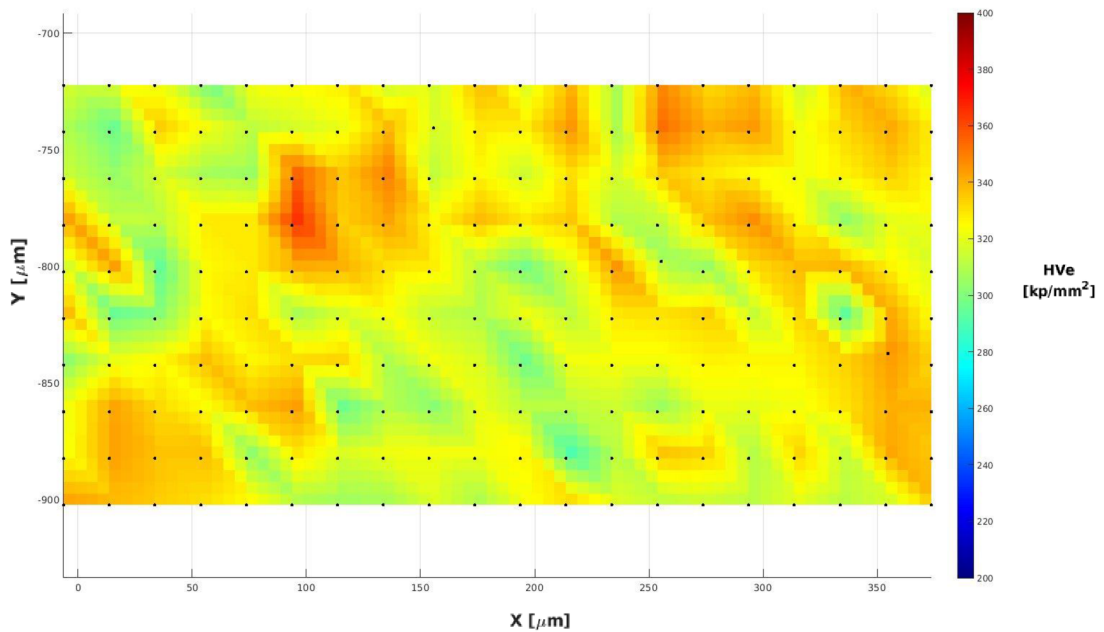
Měření tvrdosti se v tomto případě hodí i k posouzení výsledné mikrostruktury po tepelném zpracování, resp. k rozlišení mezi bainitem a martenzitem. Hodnota HV okolo 220 je pro martenzit příliš nízká [3], z čehož vyplývá, že převládající fází v mikrostruktuře je bainit.

### Pro materiál pod erozní drážkou vytvořenou působením PWJ

Pro test nanoindentace byl použit diamantový hrot Vickers. Maximální síla byla nastavena na 80 mN, což má za následek hloubku vtisku asi 1  $\mu\text{m}$ . Vtisky byly organizovány v pravidelné mřížce se vzájemnou vzdáleností 20  $\mu\text{m}$ . Taková mřížka byla aplikována podél okrajů erozní drážky. Vtisky pokrývají hloubku pod okrajem erozní drážky od 20  $\mu\text{m}$  do 180  $\mu\text{m}$ . Výsledkem byly mapy tvrdosti dle Vickerse.

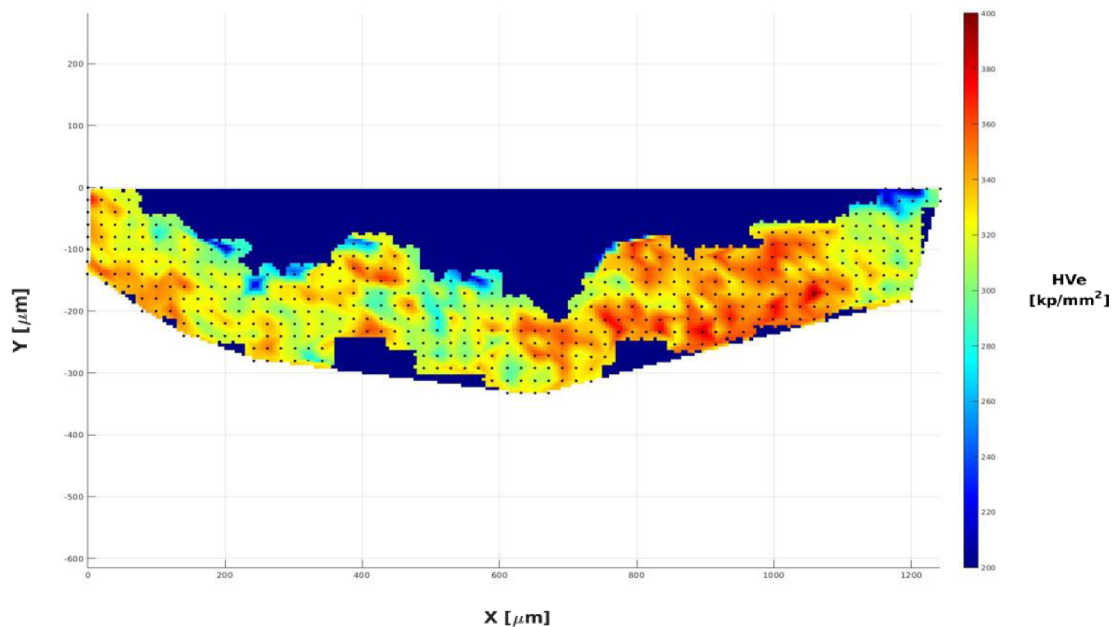
Pro srovnání byla vytvořena i mapa tvrdostí pro materiál v základním stavu stejnou metodou. Dále došlo ke změření tvrdosti dle Vickerse pod erozními drážkami pro vzorky při nastaveném parametru SOD = 25 mm a 35 mm.

Na obrázku č. 55 je uvedena získaná mapa tvrdostí podle Vickerse pro základní materiál.



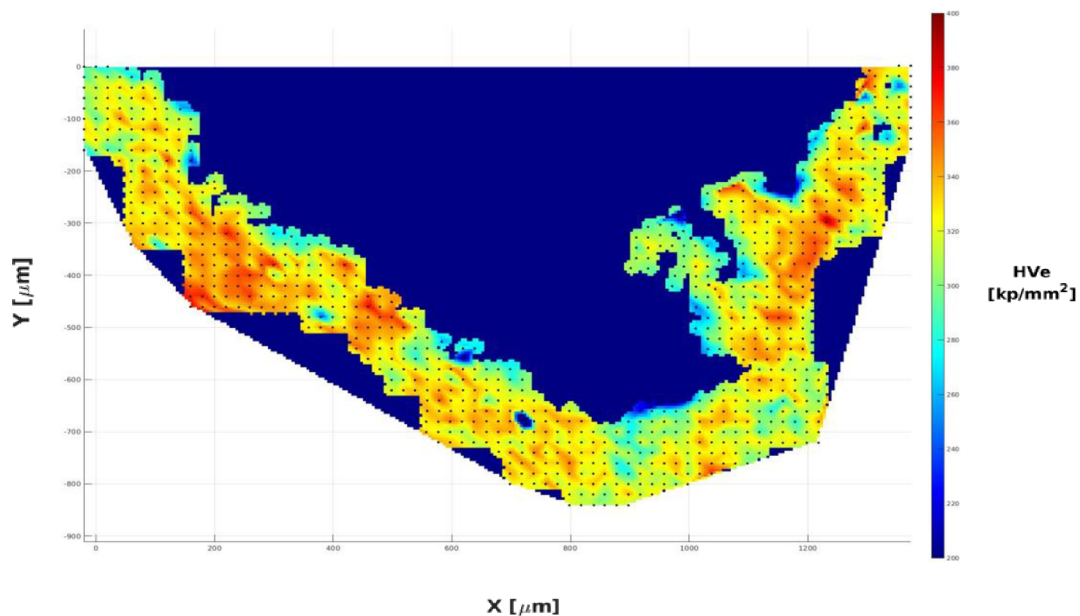
Obrázek č. 55: Mapa měření tvrdosti materiálu v základním stavu

Na obrázku č. 56 je uvedena získaná mapa tvrdostí podle Vickerse pro erozní drážku při nastaveném parametru SOD = 25 mm.



Obrázek č. 56: Mapa měření tvrdosti pod erozní drážkou; SOD = 25 mm

Na obrázku č. 57 je uvedena získaná mapa tvrdostí podle Vickerse pro erozní drážku při nastaveném parametru SOD = 35 mm.



Obrázek č. 57: Mapa měření tvrdosti pod erozní drážkou; SOD = 35 mm

Při porovnání map měření tvrdosti materiálu v základním stavu a pod erozními drážkami bylo zjištěno, že v hloubce 80 μm až 100 μm pod erozními drážkami jsou oblasti zvýšené tvrdosti, které s největší pravděpodobností odpovídají oblasti nejvyššího smykového napětí. Smyková napětí jsou zodpovědná za pohyb dislokací a zpevnění.

Tloušťka zpevněné vrstvy je cca 50 μm až 100 μm, kdy je tvrdost vyšší asi o 50 až 100 jednotek (kp/mm<sup>2</sup>).

## 5. Závěry

Cílem této diplomové práce bylo stanovit vliv technologie pulzujícího vodního paprsku (PWJ) na povrch oceli EA4T. Na základě experimentálních prací a výsledků vyhodnocení lze stanovit následující závěry:

- Vybraný materiál EA4T byl tryskán PWJ, přičemž parametry procesu byly konstantní kromě parametru SOD, který byl měněn s přírůstkem 2 mm od hodnoty SOD = 15 mm do hodnoty SOD = 45 mm.
- V experimentální části DP byla vyhodnocena stádia eroze v závislosti na rostoucí hodnotě SOD.
- Pro povrchové zpevnění je při nastavených podmínkách nutné volit SOD do 21 mm včetně a nad 43 mm aby nedošlo k erozivnímu poškození povrchu, nicméně tyto podmínky nejsou z hlediska nastavení účinnosti vodního svazku optimální.
- Eroze tryskaného povrchu oceli EA4T vznikala pro SOD mezi 23 a 43 mm.
- Maximální eroze, tj. maximální hloubky a šířky erozní drážky byly dosaženy pro SOD = 35 mm, což v reálu představuje optimální vyladění vodního svazku. Pokud bychom chtěli využít tohoto optimálního nastavení SOD pro povrchové zpracování, pak by bylo nezbytné upravit ostatní podmínky tryskání zejména pak rychlost posunu trysky. Při vyšší dopředné rychlosti by bylo dosaženo maximálního zpevnění, aniž by došlo k úběru/erozi materiálu.
- Pomocí metody EBSD a TEM byl stanoven vliv PWJ na vývoj mikrostruktury v podpovrchových vrstvách.
- Z EBSD analýzy velikosti zrn a jejich krystalografické orientace pod erozní drážkou se nepodařilo jednoznačně prokázat ovlivnění materiálu vlivem PWJ (SOD = 29 mm) – neprokázalo se zjemnění zrna. Nebyl prokázán ani vznik textury.
- Při KAM analýze se podařilo prokázat, že do hloubky přibližně 50  $\mu\text{m}$  pod dnem erozní drážky (SOD = 29 mm) došlo k malé deformaci zrn vlivem působení PWJ.
- Při pozorování mikrostruktury oceli EA4T v základním (netryskaném) stavu a ve stavu po působení PWJ (SOD = 21 mm) bylo zjištěno, že vlivem působení PWJ byla do materiálu vnesena tlaková napjatost, která se projevila vznikem plastické deformace, což potvrzují dislokace uvnitř zrn.
- Tvrdost oceli EA4T v základním stavu byla vyhodnocena prostřednictvím metody dle Vickerse.
- Byla vyhodnocena změna tvrdosti podle Vickerse vlivem působení PWJ, kdy v oblasti pod erozními drážkami došlo ke zvýšení tvrdosti.

## 6. Použitá literatura

- [1] FINTOVÁ, S., POKORNÝ, P., FAJKOŠ, R., HUTAŘ, P. EA4T railway axle steel fatigue behavior under very high-frequency fatigue loading, *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 115, p. 104668.
- [2] YUJIANG XIE, B. H., JIA ZHUANG, WENJING CHEN, JIE HU. Microstructure and Corrosion Resistance of Fe314 Alloy Prepared by Laser Cladding on EA4T Steel Surface. *International Journal of ELECTROCHEMICAL science* [Online Access]. DOI: 10.20964/2020.11.26. Published Online: 2020.
- [3] POKORNÝ, P., VOJTEK, T., NÁHLÍK, L., HUTAŘ, P. Crack closure in near-threshold fatigue crack propagation in railway axle steel EA4T, *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 185, p. 2.
- [4] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I.*; 1 ed.; Akademické nakladatelství CERM: Brno, 2003.
- [5] RUDI ROTTENFUSSER, E. E. W., MICHAEL W. DAVIDSON. Education in Microscopy and Digital Imaging. [Online Access]. <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/basics/reflected.html>.
- [6] REICHL, J. Polarizace světla. *Encyklopedie fyziky* [Online Access]. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/462-polarizace-svetla>.
- [7] POKORNÝ, P. Světelná mikroskopie a její aplikace, Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [8] FINTOVÁ, S. Digitální mikroskop Olympus DSX1000. [Online Access]. <https://www.ipm.cz/vybaveni/digitalni-mikroskop-olympus-dsx1000>.
- [9] GOLDSTEIN, J. I. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*; 4 ed.; Springer Nature: New York USA, 2018.
- [10] MAN, O. Aplikace metody difrakce zpětně odražených elektronů v materiálovém inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [11] VODÁREK, V. Metoda EBSD v řádkovací elektronové mikroskopii. *Československá společnost pro růst krystalů* [Online Access]. Published Online: 2010. [https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2010\\_39Vodarek.pdf](https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2010_39Vodarek.pdf).
- [12] PODSTRANSKÁ, I. Rastrovací elektronový mikroskop Tescan LYRA 3 XMU FEG/SEMxFIB. [Online Access]. <https://www.ipm.cz/vybaveni/rastrovaci-elektronovy-mikroskop-tescan-lyra-3-xmu-feg-semxfib>.
- [13] JÄGER, A. Mikroobrábění fokusovaným iontovým svazkem. [Online Access]. Published Online: 2017. <https://www.fzu.cz/aktuality/mikroobrabeni-fokusovany-iontovym-svazkem>.
- [14] KARLÍK, M. *Úvod do transmisní elektronové mikroskopie*; České vysoké učení technické v Praze: Praha, 2011.
- [15] KUBĚNA, I. Transmisní elektronový mikroskop JEOL JEM-2100F. [Online Access]. <https://www.ipm.cz/vybaveni/transmisni-elektronovy-mikroskop-jeol-jem-2100f>.
- [16] BUREŠ, J. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. [Online Access]. <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>.
- [17] FINTOVÁ, S. Mikrotvrdoměr Duramin. [Online Access]. <https://www.ipm.cz/vybaveni/mikrotvrdomer-duramin>.
- [18] ŠÍŠKA, F. Universal nanomechanical testing machine Zwick ZHN. [Online Access]. <https://www.ipm.cz/vybaveni/universal-nanomechanical-testing-machine-zwick-zhn/>.



- [19] HUANG, Z., LI, G., TIAN, S., SONG, X., SHENG, M., SHAH, S. In *Abrasive Water Jet Perforation and Multi-Stage Fracturing*; HUANG, Z., LI, G., TIAN, S., SONG, X., SHENG, M., SHAH, S., Eds.; Gulf Professional Publishing: 2018, p 1.
- [20] TVARŮŽEK, M. *STUDIE POUŽITÍ VODNÍHO PAPERU*, VUT, 2012.
- [21] KOCMAN, L. *TECHNOLOGIE PAPERKOVÉHO ŘEZÁNÍ*, VUT, 2013.
- [22] FLOW. Jak funguje vodní paprsek. [Online Access].  
<https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Jak-funguje-vodni-paprsek.aspx#basics>.
- [23] JAGADISH, GUPTA, K. In *Abrasive Water Jet Machining of Engineering Materials*; JAGADISH, GUPTA, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2020, p 1.
- [24] HLOCH, S., NAG, A., PUDE, F., FOLDYNA, J., ZELENÁK, M. On-line measurement and monitoring of pulsating saline and water jet disintegration of bone cement with frequency 20 kHz, *Measurement*, 2019, vol. 147, p. 106828.
- [25] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Silikóza [online]. c2021 [citováno 1. 03. 2022]. Dostupný z WWW:  
 <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Silik%C3%B3za&oldid=20365319>>
- [26] FOLDYNA, J. Use of Acoustic Waves for Pulsating Water Jet Generation. *Microdevices to Helioseismology* [Online Access]. Published Online: 2011.  
<https://doi.org/10.5772/18862>.
- [27] NAG, A., HLOCH, S., ČUHA, D., DIXIT, A. R., TOZAN, H., PETRŮ, J., HROMASOVÁ, M., MÜLLER, M. Acoustic chamber length performance analysis in ultrasonic pulsating water jet erosion of ductile material, *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 47, p. 347.
- [28] FOLDYNA, J. Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti? *Vesmír* [Online Early Access]. Published Online: 2013. <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2013/cislo-12/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti.html>.
- [29] SITEK, J. F. Z. Ř. L. In *16. ANSYS FEM Users' Meeting & 14. ANSYS CFD Users' Meeting* Luhačovice, 2008, p 7.
- [30] RAJ, P., CHATTOPADHYAYA, S., MONDAL, A. A review on continuous and pulsed water jet machining, *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, p. 2596.
- [31] SRIVASTAVA, M., HLOCH, S., TRIPATHI, R., KOZAK, D., CHATTOPADHYAYA, S., DIXIT, A. R., FOLDYNA, J., HVIZDOS, P., FIDES, M., ADAMCIK, P. Ultrasonically generated pulsed water jet peening of austenitic stainless-steel surfaces, *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 32, p. 455.
- [32] FOLDYNA, J., SITEK, L., HABÁN, V. Acoustic wave propagation in high-pressure system, *Ultrasonics*, 2006, vol. 44, p. e1457.
- [33] HLOCH, S., SRIVASTAVA, M., NAG, A., MÜLLER, M., HROMASOVÁ, M., SVOBODOVÁ, J., KRUML, T., CHLUPOVÁ, A. Effect of pressure of pulsating water jet moving along stair trajectory on erosion depth, surface morphology and microhardness, *Wear*, 2020, vol. 452-453, p. 203278.
- [34] LEHOČKÁ, D., KLICHOVÁ, D., FOLDYNA, J., HLOCH, S., HVIZDOŠ, P., FIDES, M., BOTKO, F. Comparison of the influence of acoustically enhanced pulsating water jet on selected surface integrity characteristics of CW004A copper and CW614N brass, *Measurement*, 2017, vol. 110, p. 230.

- [35] HLOCH, S., ADAMČÍK, P., NAG, A., SRIVASTAVA, M., ČUHA, D., MÜLLER, M., HROMASOVÁ, M., KLICH, J. Hydrodynamic ductile erosion of aluminium by a pulsed water jet moving in an inclined trajectory, *Wear*, 2019, vol. 428-429, p. 178.
- [36] SRIVASTAVA, M., HLOCH, S., KREJCI, L., CHATTOPADHYAYA, S., DIXIT, A. R., FOLDYNA, J. Residual stress and surface properties of stainless steel welded joints induced by ultrasonic pulsed water jet peening, *Measurement*, 2018, vol. 127, p. 453.
- [37] SRIVASTAVA, M., HLOCH, S., GUBELJAK, N., MILKOVIC, M., CHATTOPADHYAYA, S., KLICH, J. Surface integrity and residual stress analysis of pulsed water jet peened stainless steel surfaces, *Measurement*, 2019, vol. 143, p. 81.



## 7. Seznam zkratk a symbolů

AWJ	... Abrasive Water Jet = abrazivní vodní paprsek
BC	... Band Contrast = zobrazení v pásovém kontrastu
BF	... Bright Field = pozorování ve světlém poli
BSE	... Back Scattered Electrons = zpětně odražené elektrony
CVD	... Chemical Vapour Deposition = chemická depozice z plynné fáze
CWJ	... Continuous Water Jet = kontinuální vodní paprsek
DF	... Dark Field = pozorování v tmavém poli
DIC	... Differential Interference Contrast = diferenciální interferenční kontrast
EBSD	... Electron BackScatter Diffraction = difrakce zpětně odražených el.
EDX	... Energy Dispersive X-Ray Analysis = Energeticky disperzní rentgenová spektroskopie
FEG	... Field Emission Gun = zdroj s emisí stimulovanou elektrickým polem
FIB	... Focused Ion Beam = fokusovaný iontový svazek
GB	... Grain Boundaries = zobrazení hranic zrn
GIS	... Gas Injection System = plynový injektor
HV	... Hardness Vickers = tvrdost podle Vickerse
IPF-Z	... Inverse Pole Figures = inverzní pólové obrazce
KAM	... Kernel Average Misorientation = průměrná dezorientace jádra
LSP	... Laser Shock Peening
LV REM	... Low-Vacuum REM = nízkovakuová REM
PWJ	... Pulsating Water Jet = pulzující vodní paprsek
REM	... rastrovací elektronová mikroskopie
SE	... sekundární elektrony
SM	... světelná mikroskopie
SOD	... Stand-Off-Distance = vzdálenost trysky od povrchu materiálu
TE	... termoemisní zdroj elektronů
TEM	... transmisní elektronová mikroskopie
WJ	... Water Jet = vodní paprsek

## 8. Seznam obrázků

- Obrázek č. 1: Mikrostruktura oceli EA4T – pozorováno pomocí světelné mikroskopie [3]
- Obrázek č. 2: Metalografický mikroskop v normálním uspořádání [5]
- Obrázek č. 3: Pozorování ve světlém (a) a tmavém (b) poli světelného mikroskopu
- Obrázek č. 4: Světelný mikroskop Olympus DSX1000 [8]
- Obrázek č. 5: 3D mapa stopy po PWJ pořízená pomocí světelného mikroskopu Olympus DSX1000.
- Obrázek č. 6: Signály vznikající při pozorování v elektronové mikroskopii [4]
- Obrázek č. 7: Schematické znázornění oblasti generace elektronů [10]
- Obrázek č. 8: Schéma určení dezorientace mezi nejbližšími sousedy [10]
- Obrázek č. 9: Tescan LYRA 3 XMU FEG/SEMxFIB [12]
- Obrázek č. 10: Snímek persistentního skluzového pásu na povrchu cyklicky deformovaného vzorku snímáný pomocí SE (a) a pomocí FIB svazku (b)
- Obrázek č. 11: Využití metody FIB pro přípravu vzorku na TEM lamelu [13]
- Obrázek č. 12: Transmisní elektronový mikroskop JEOL JEM-2100F [15]
- Obrázek č. 13: Tvar indentoru pro měření tvrdosti dle Vickerse a charakteristika vtisku [16]
- Obrázek č. 14: Mikro-tvrdoměr Duramin [17]
- Obrázek č. 15: Nanomechanický testovací stroj Zwick ZHN [18]
- Obrázek č. 16: Řezací hlava [22]
- Obrázek č. 17: Systému pro technologii vodního paprsku: zdroj vysokého tlaku (1); pracovní stůl s řezací hlavou (2); řídicí systém (3) [22]
- Obrázek č. 18: Schéma přivádění abrazivních částic do vodního paprsku [22]
- Obrázek č. 19: Typická morfologie PWJ [30]
- Obrázek č. 20: Dvě fáze dopadu vody na tryskaný pevný povrch [26]
- Obrázek č. 21: Situace krátce po dopadu kapky vody na pevný povrch [26]
- Obrázek č. 22: Schéma vysokotlaké soustavy s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzů [28]
- Obrázek č. 23: Deformace materiálu způsobená účinky dopadu vodních klastrů a laterálního proudění [35]
- Obrázek č. 24: Model aplikace peeningu pomocí PWJ na svařovaný dílec [36]

- Obrázek č. 25: Vyobrazení jednotlivých parametrů technologie PWJ
- Obrázek č. 26: Grafická interpretace erozních stádií [33]
- Obrázek č. 27: Mikrostruktura oceli EA4T – světelná mikroskopie, naleptáno Nitalem
- Obrázek č. 28: Mikrostruktura oceli EA4T – REM, naleptáno nitalem
- Obrázek č. 29: Mikrostruktura oceli EA4T – REM, povrch vyleštěn pomocí OPS
- Obrázek č. 30: Povrch po PWJ při SOD = 21 mm, 23 mm, 41 mm
- Obrázek č. 31: 3D obraz drážky po PWJ při SOD = 23 mm
- Obrázek č. 32: 3D obraz drážky po PWJ při SOD = 35 mm
- Obrázek č. 33: Drážka po PWJ při SOD = 35 mm
- Obrázek č. 34: Závislost lokální hloubky drážek na parametru SOD
- Obrázek č. 35: Závislost šířky drážek na parametru SOD
- Obrázek č. 36: Profil po PWJ při SOD = 21 mm
- Obrázek č. 37: Profil drážky po PWJ při SOD = 23 mm
- Obrázek č. 38: Profil drážky po PWJ při SOD = 35 mm – lokální a skutečná hloubka
- Obrázek č. 39: Profil drážky po PWJ při SOD = 41 mm
- Obrázek č. 40: EBSD snímek mikrostruktury po materiál v základním stavu
- Obrázek č. 41: EBSD snímek mikrostruktury pod erozní drážkou při SOD = 29 mm
- Obrázek č. 42: KAM; podmínky: matice buněk = 11×11, úhel dezorientace = 5°
- Obrázek č. 43: KAM; podmínky: matice buněk = 3×3, úhel dezorientace = 5°
- Obrázek č. 44: Pohled do komory REM vybaveného FIB
- Obrázek č. 45: Detail jednotlivých částí v REM
- Obrázek č. 46: Přehledový snímek – vzorek, 5 trysek GIS a jehla vlevo – mikromanipulátor
- Obrázek č. 47: Nanesení „bochánku“, tj. ochranné vrstvy platiny na místo zájmu a vykopání příkopů tak aby vznikla tlustší lamela
- Obrázek č. 48: Podřezání lamely a přiblížení jehly manipulátoru
- Obrázek č. 49: Příprava měděné sítky – na jeden z „prstíků“ se tlustší lamela přivaří
- Obrázek č. 50: Detail přivaření vyjmuté lamely připevněné na měděnou sítku TEM držáku
- Obrázek č. 51: Lamela vzorku v netryskaném stavu
- Obrázek č. 52: Lamela vzorku v netryskaném stavu
- Obrázek č. 53: Lamela vzorku ve stavu po tryskání; SOD = 21 mm

Obrázek č. 54: Lamela vzorku ve stavu po tryskání; SOD = 21

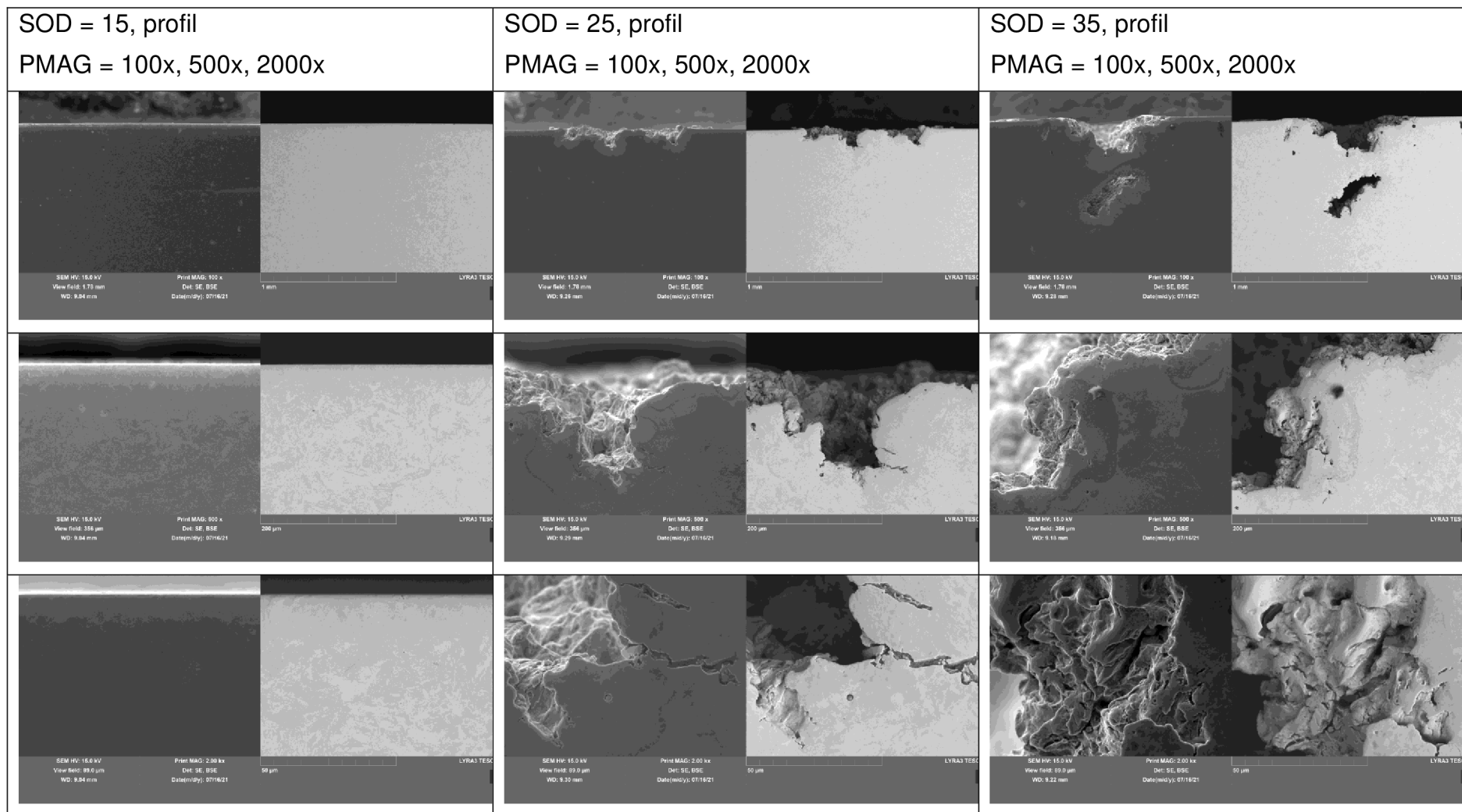
Obrázek č. 55: Mapa měření tvrdosti materiálu v základním stavu

Obrázek č. 56: Mapa měření tvrdosti pod erozní drážkou; SOD = 25 mm

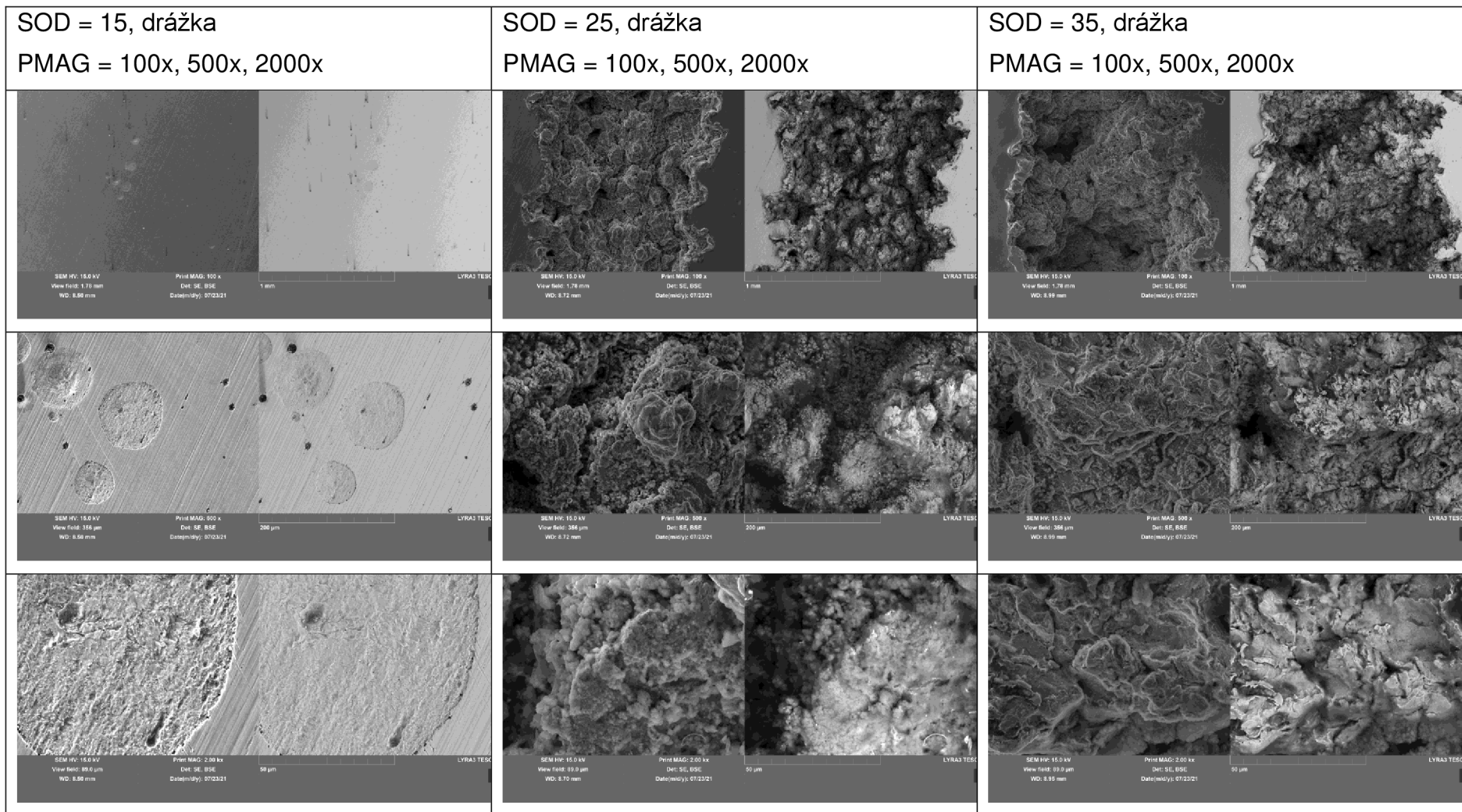
Obrázek č. 57: Mapa měření tvrdosti pod erozní drážkou; SOD = 35 mm

## 9. Přílohy

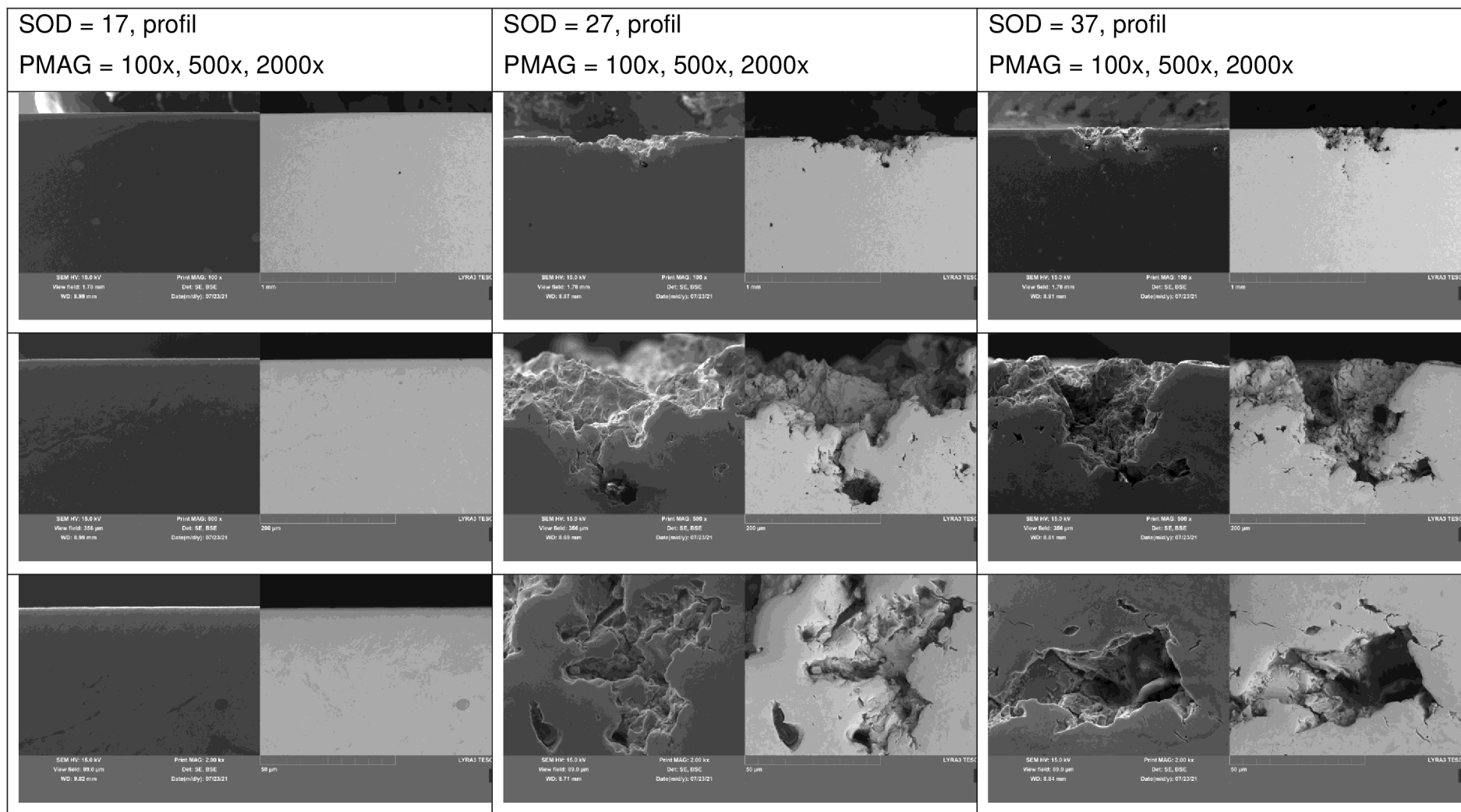
Příloha č. 1: Profily vzorků po působení PWJ; SOD = 15 mm; 25 mm; 35 mm



Příloha č. 2: Erozní drážky na vzorcích po působení PWJ; SOD = 15 mm; 25 mm; 35 mm

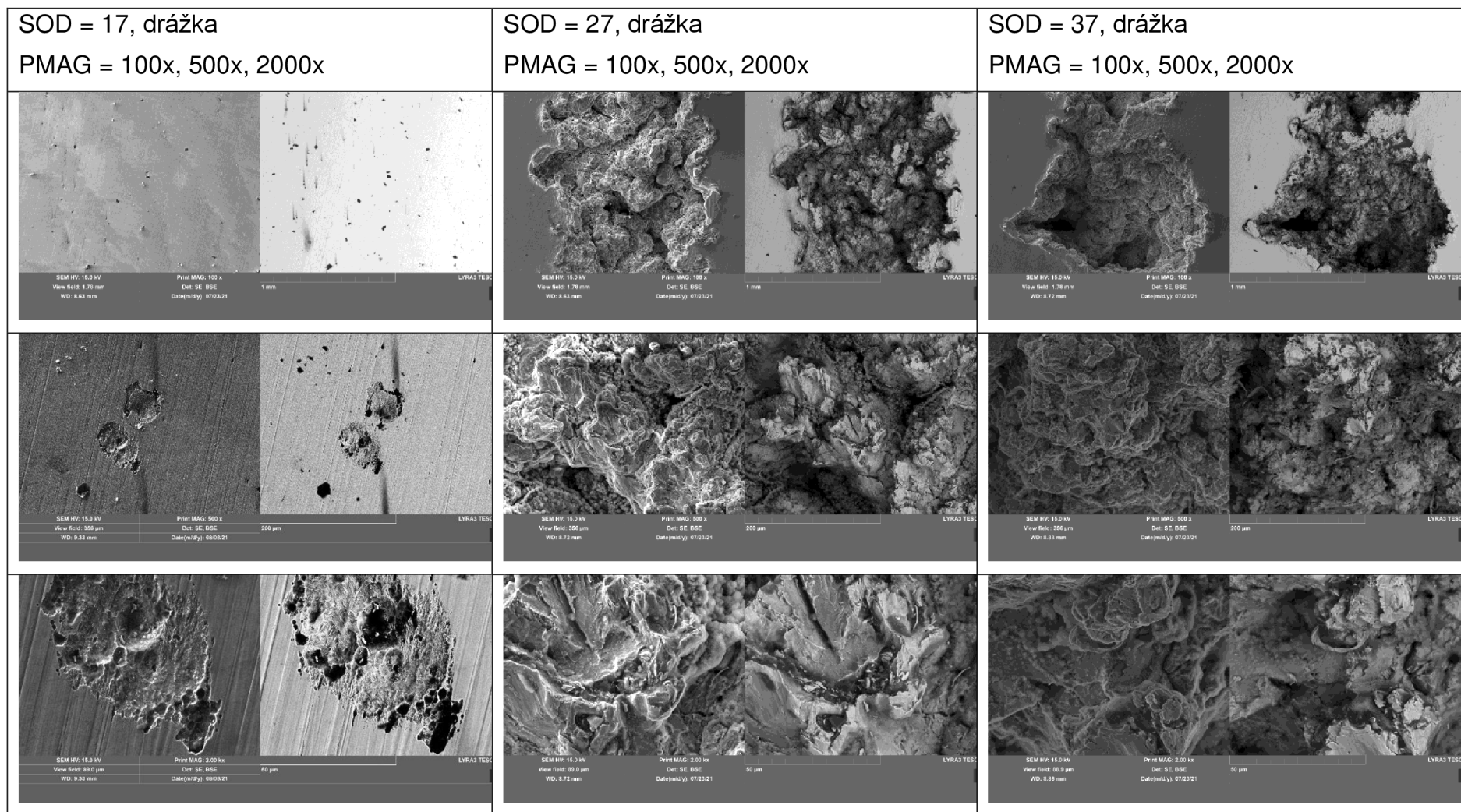


Příloha č. 3: Profily vzorků po působení PWJ; SOD = 17 mm; 27 mm; 37 mm

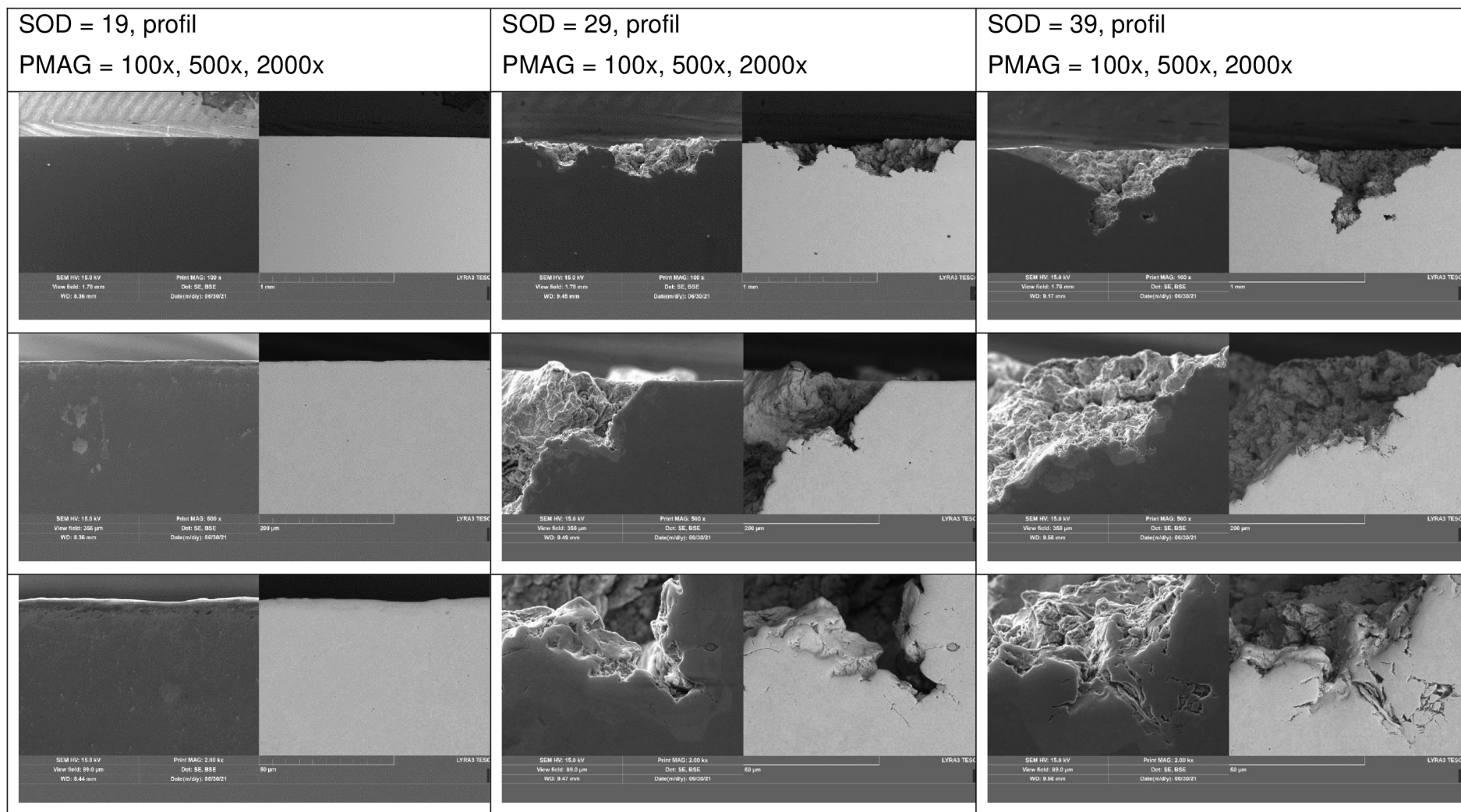




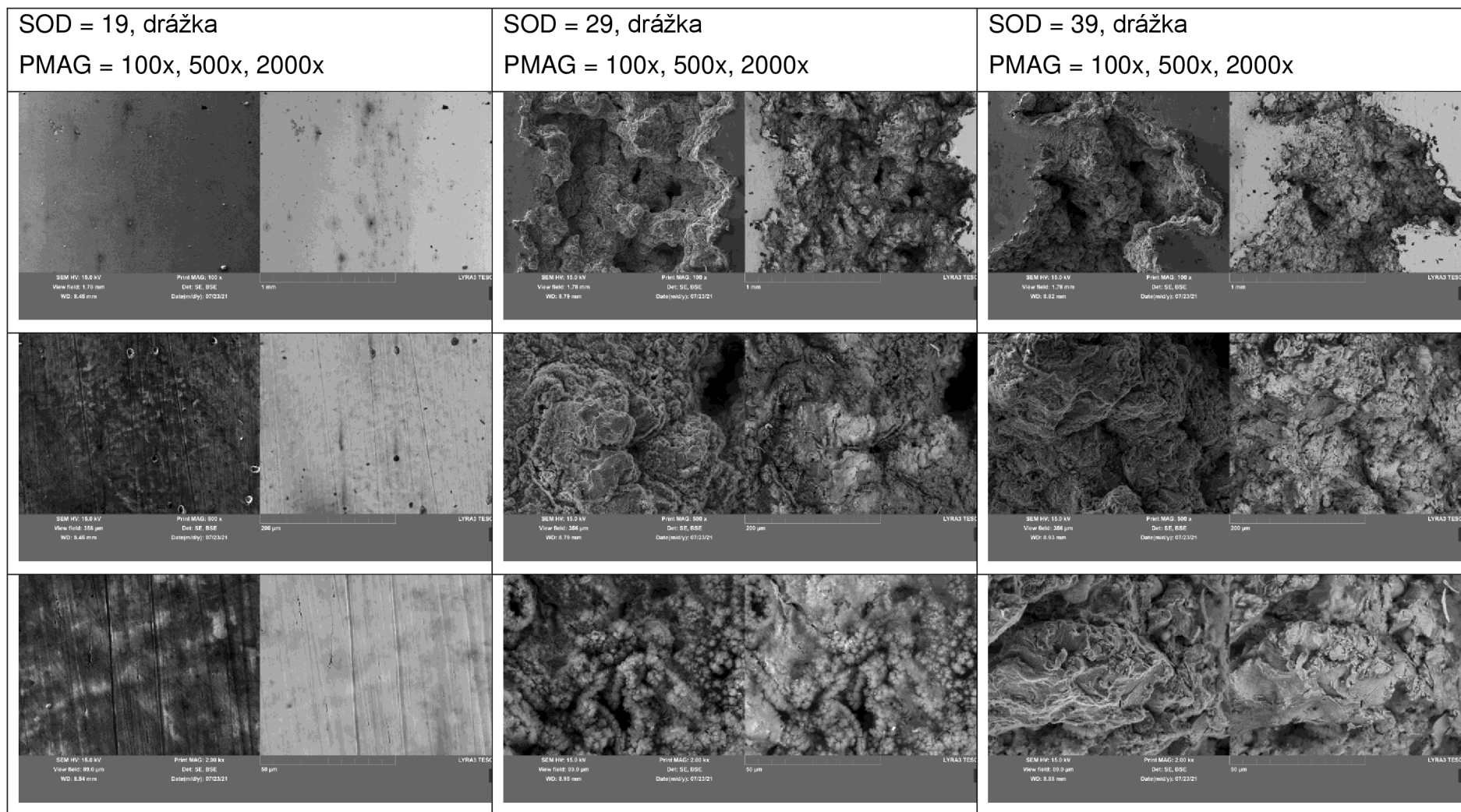
Příloha č. 4: Erozní drážky na vzorcích po působení PWJ; SOD = 17 mm; 27 mm; 37 mm



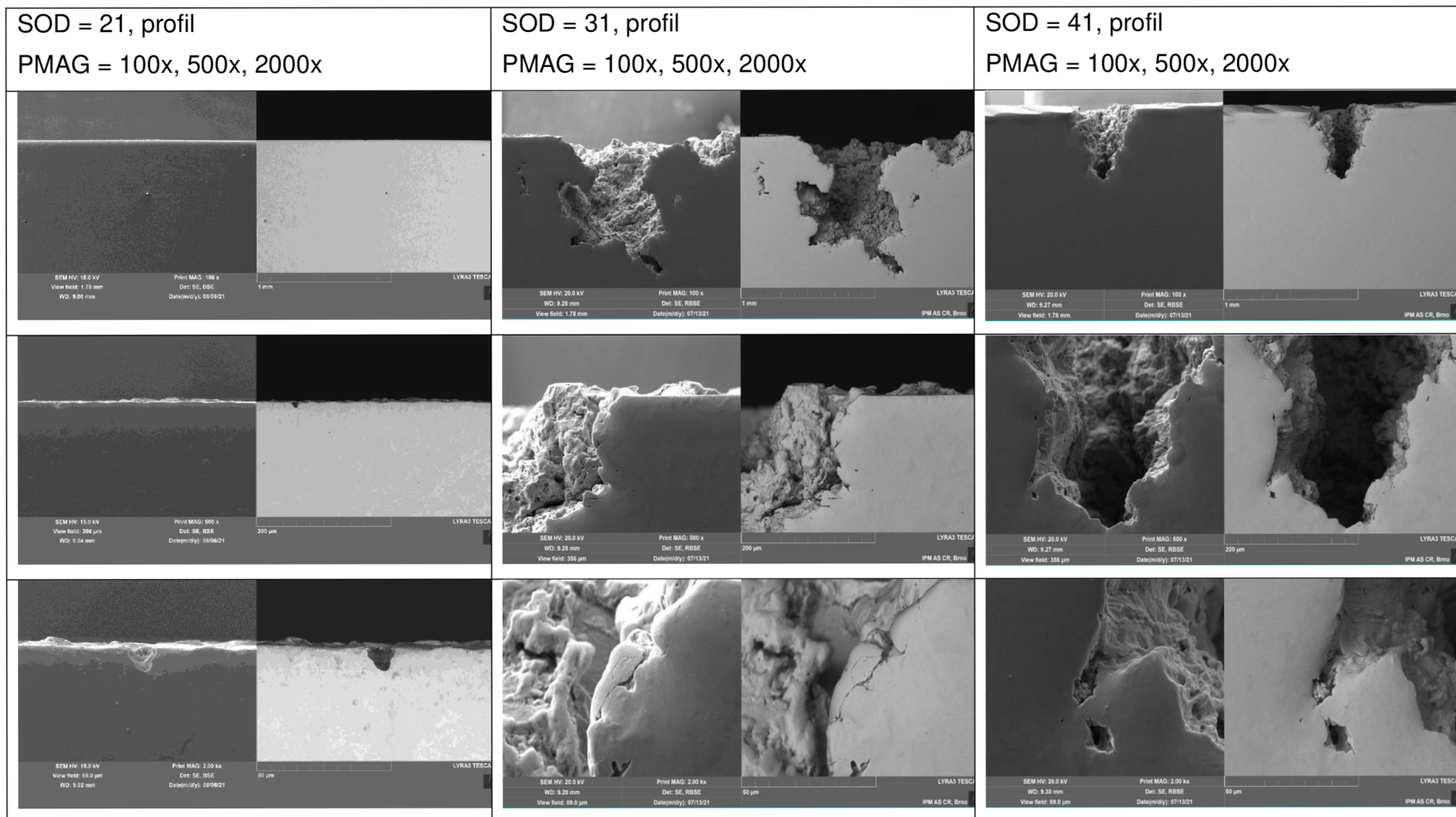
Příloha č. 5: Profily vzorků po působení PWJ; SOD = 19 mm; 29 mm; 39 mm



Příloha č. 6: Erozní drážky na vzorcích po působení PWJ; SOD = 19 mm; 29 mm; 39 mm

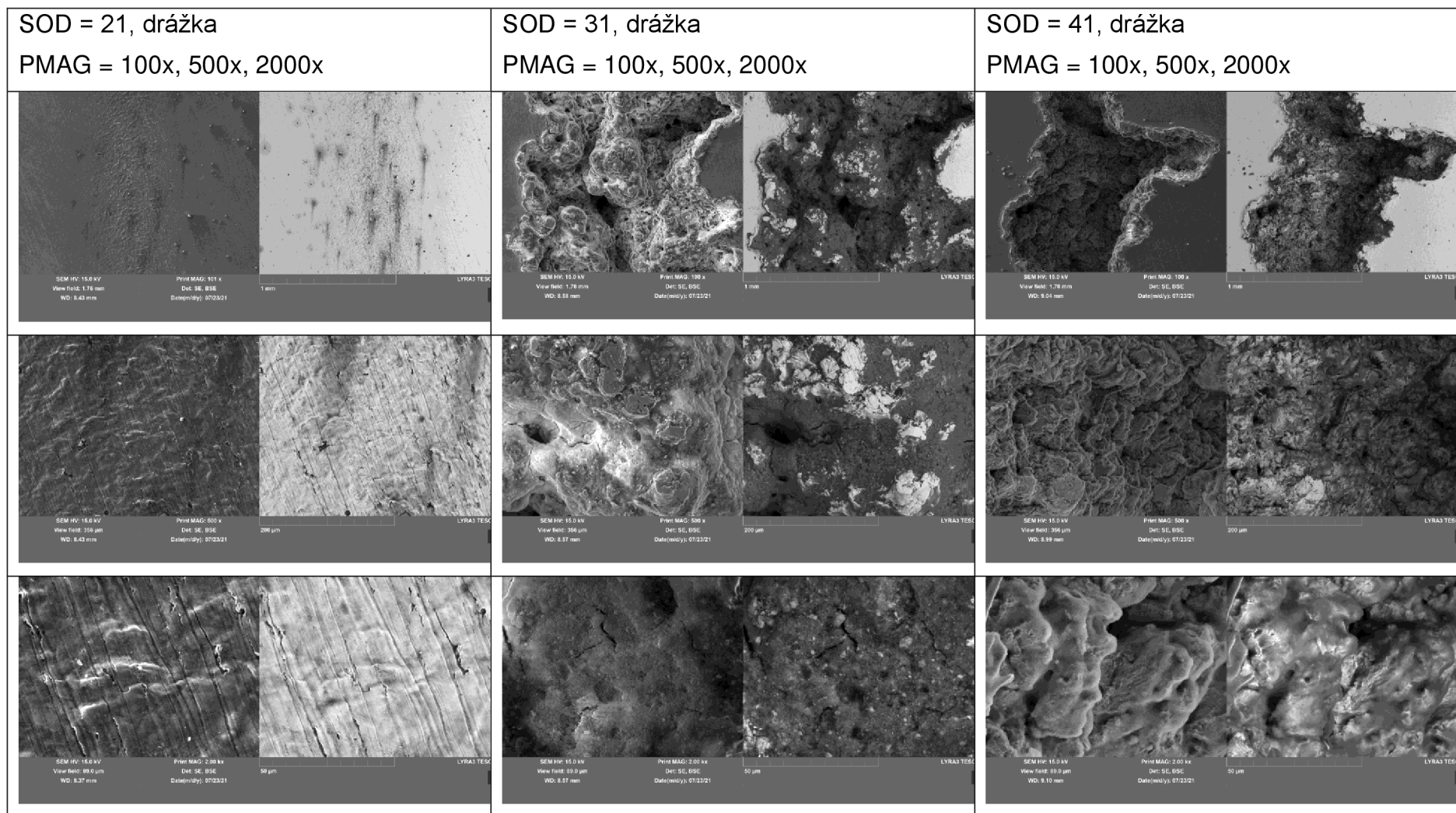


Příloha č. 7: Profily vzorků po působení PWJ; SOD = 21 mm; 31 mm; 41 mm

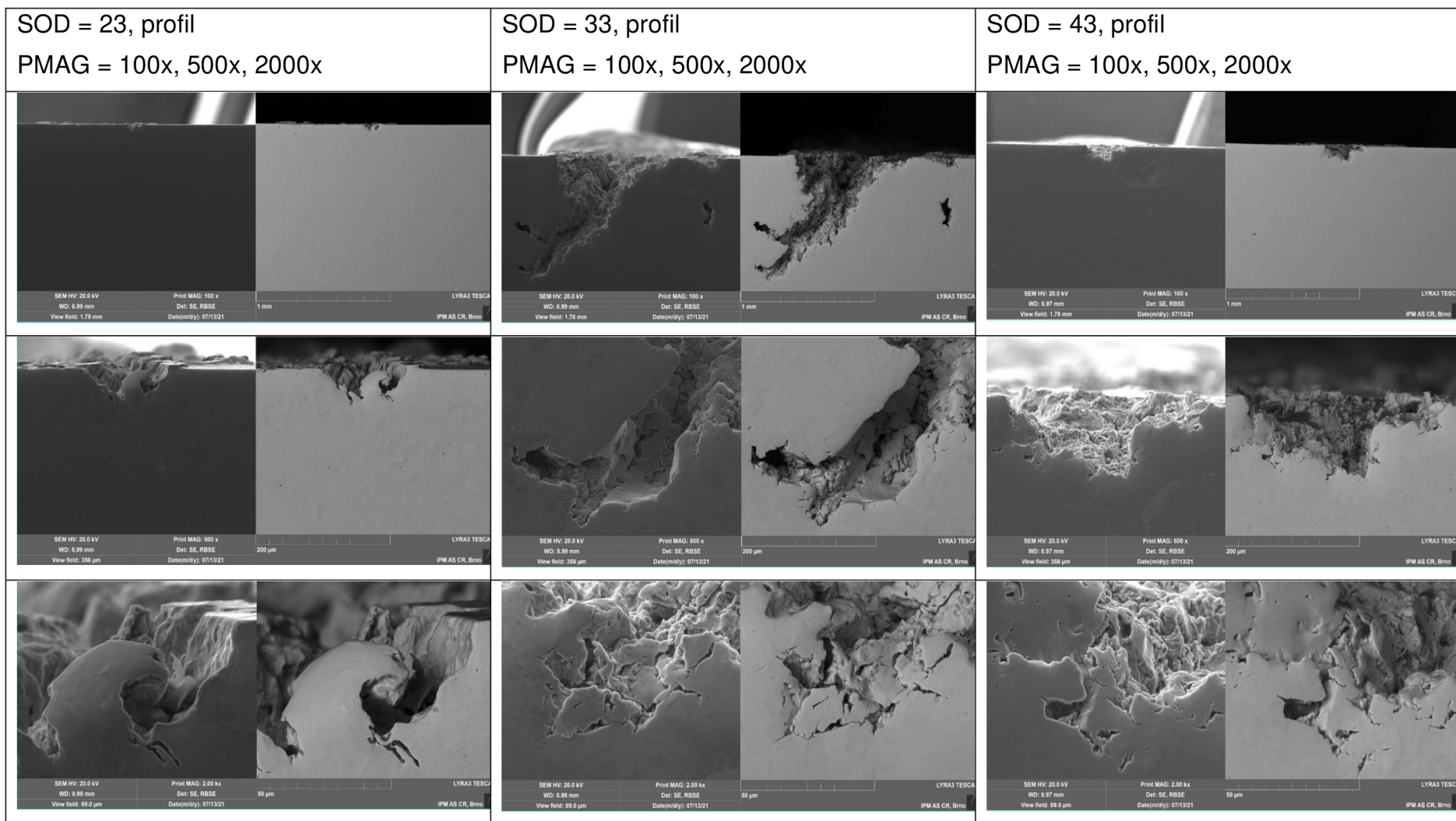




Příloha č. 8: Erozní drážky na vzorcích po působení PWJ; SOD = 21 mm; 31 mm; 41 mm



Příloha č. 9: Profily vzorků po působení PWJ; SOD = 23 mm; 33 mm; 43 mm



Příloha č. 10: Erozní drážky na vzorcích po působení PWJ; SOD = 23 mm; 33 mm; 43 mm

