

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 599

ISSN 1213-418X

Kateřina Mouralová

**ANALÝZA VLIVU VSTUPNÍCH FAKTORŮ
NA JAKOST POVRCHU A EFEKTIVITU
TECHNOLOGIE ELEKTROEROZIVNÍHO
DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ
PRO RŮZNÉ KOVOVÉ MATERIÁLY
A JEJICH TEPelnÁ ZPRACOVÁNÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Ing. Kateřina Mouralová, Ph.D.

**ANALÝZA VLIVU VSTUPNÍCH FAKTORŮ
NA JAKOST POVRCHU A EFEKTIVITU
TECHNOLOGIE ELEKTROEROZIVNÍHO
DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ PRO RŮZNÉ KOVOVÉ
MATERIÁLY A JEJICH TEPELNÁ ZPRACOVÁNÍ**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INPUT FACTORS
ON SURFACE QUALITY AND EFFICIENCY OF WIRE ELECTRICAL
DISCHARGE MACHINING FOR DIFFERENT METAL MATERIALS
AND THEIR HEAT TREATMENT**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE**



BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektroerozivní drátové řezání, WEDM, parametry nastavení stroje, řezná rychlost, topografie, morfologie, trhliny, kavity, mezera řezu, vliv orientace řezu polotovarem.

KEYWORDS

Wire electrical discharge machining, WEDM, Machining Parameters, Cutting Speed, Topography, Morphology, Cracks, Cavities, Width of kerf, Cut Direction through the Semi-Finished Product.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2, Brno.

Obsah

1	Představení autorky	4
2	Seznam nejvýznamnějších impaktovaných publikací autorky.....	5
3	Úvod	6
4	Problematika elektroerozivního drátového řezání	6
5	Ovlivnění rezné rychlosti druhem tepelného zpracování obráběného materiálu	8
6	Vliv nastavení parametrů stroje a tepelného zpracování na topografii povrchu	12
7	Morfologie WEDM povrchů	21
8	Přesnost obrábění a defekty podpovrchové vrstvy.....	26
8.1	Šířka mezery řezu ovlivňující přesnost obrábění	26
8.2	Defekty v povrchové a podpovrchové oblasti.....	28
9	Závěr.....	33
	Seznam použitých zdrojů	34

1 PŘEDSTAVENÍ AUTORKY



Kateřina Mouralová se narodila v roce 1985 ve Viničných Šumicích. V průběhu studia byla zaměstnána u firmy ZEBR s.r.o. jako pomocný konstruktér střížných nástrojů a dále v letech 2001 – 2008 u firmy Nástrojárna Ryšavý s.r.o. na pozici konstruktér střížných nástrojů. Od roku 2014 - dosud se podílí na řešení problémů spojených s elektroerozivním drátovým řezáním v rodinné firmě vlastníci mimo jiné elektroerozivní stroj značky MAKINO. Od roku 2015 je zaměstnaná na ÚST FSI VUT v Brně jako odborný asistent.

Vysokoškolské vzdělání získala v oboru Strojírenská technologie na Fakultě strojního inženýrství v Brně v roce 2010 složením státní závěrečné zkoušky a obhajobou diplomové práce „Trendy použití nekonvenční technologie elektroerozivního drátového řezání“.

V letech 2010 – 2014 absolvovala pod vedením školitele prof. Ing. Miroslava Píšky, CSc. prezenční doktorské studium, které ukončila v roce 2015 obhajobou dizertační práce s názvem „Moderní technologie drátového elektroerozivního řezání kovových slitin“.

Od roku 2012 se autorka aktivně zapojuje do mezinárodního vědeckého prostoru a jako hlavní autorka publikovala již několik desítek prací v oblasti elektroerozivního drátového řezání. Je hlavní autorkou 5 impaktovaných článků s $IF > 0,5$, 16 původních vědeckých prací ve vědeckých časopisech bez IF a 10 příspěvků ve sbornících světových vědeckých konferencí. Autorka je také členem programového výboru několika světových konferencí.

V pedagogické oblasti se věnuje především výuce předmětů Výrobní technologie II a Technologie obrábění a dále je školitelem specialistou dvou studentů doktorského studia v prezenční formě. Vedla 7 bakalářských a jednu diplomovou práci, které byly úspěšně obhájeny.

2 SEZNAM NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH IMPAKTOVANÝCH PUBLIKACÍ AUTORKY

[A] **MOURALOVÁ, K.**; MATOUŠEK, R.; KOVÁŘ, J.; MACH, J.; KLAKURKOVÁ, L.; BEDNÁŘ, J. Analyzing the surface layer after WEDM depending on the parameters of a machine for the 16MnCr5 steel. MEASUREMENT, Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO), 2016. **IF 2,35** (Q1, Q2).

[B] **MOURALOVÁ, K.**; KOVÁŘ, J.; KLAKURKOVÁ, L.; PROKEŠ, T.; HORYNOVÁ, M. Comparison of morphology and topography of surfaces of WEDM machined structural materials. MEASUREMENT, Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO), 2017. **IF 2,35** (Q1, Q2).

[C] **MOURALOVÁ, K.**; KOVÁŘ, J.; KLAKURKOVÁ, L.; BEDNÁŘ, J.; BENEŠ, L.; ZAHRADNÍČEK, R. Analysis of the surface morphology and topography of pure aluminium machined using WEDM. MEASUREMENT, Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO), 2017. **IF 2,35** (Q1, Q2).

[D] **MOURALOVÁ, K.**; KOVÁŘ, J.; KLAKURKOVÁ, L.; PROKEŠ, T. Width of kerf influencing the accuracy of machining, and the affected subsurface layer after WEDM. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018. **IF 1,33** (Q2).

[E] **MOURALOVÁ, K.**; KOVÁŘ, J.; KLAKURKOVÁ, L.; BLAŽÍK, P.; KALIVODA, M.; KOUSAL, P. Analysis of surface and subsurface layers after WEDM for Ti-6Al-4V with heat treatment. MEASUREMENT, Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO), 2018. **IF 2,35** (Q1, Q2).

3 ÚVOD

Předkládaná habilitační práce zabývající se problematikou elektroerozivního drátového řezání (WEDM) vychází jak z výzkumné činnosti autora, tak z praktických zkušeností aplikovaných do vědecké sféry. Tato nekonvenční technologie obrábění využívá k dělení materiálu elektrotepelných principů, přičemž nástroj není v kontaktu s obrobkem a není vystaven působení mechanických sil. WEDM je zásadní technologická operace v mnoha výrobních odvětvích, zejména v leteckém, automobilovém, armadním průmyslu a při výrobě lékařských nástrojů. V důsledku širokého využití této nekonvenční technologie obrábění a její relativně vysoké energetické náročnosti, nároky na výkonnostní charakteristiky tohoto procesu neustále rostou. Jde především o jakost obrobeného povrchu, rychlost řezání a rozměrovou přesnost.

Práce se majoritně věnuje posouzení vlivu vstupních faktorů, jako jsou parametry nastavení stroje, druh materiálu a jeho dodatečné tepelné zpracování a vliv orientace řezu polotovarem na rychlost řezání, topografii povrchu, vznik defektů (trhlin, mikrotrhlin, vypálených kavit), šířku mezery řezu a morfologii. Detailní porozumění všech vstupních faktorů procesu obrábění jednotlivých materiálů a jejich tepelných zpracování je velmi rozsáhlý úkol. Nicméně nalezení optimálního nastavení parametrů stroje pro jednotlivé materiály a jejich dodatečná tepelná zpracování je nezbytké k efektivnímu obrábění. Z tohoto důvodu byl proveden rozsáhlý výzkum, s cílem možné predikce výsledné jakosti obrobeného povrchu, výskytu defektů či šířky mezery řezu různých konstrukčních materiálů bez a s dodatečným tepelným zpracováním.

4 PROBLEMATIKA ELEKTROEROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ

WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) je termoelektrický proces, který k dělení materiálu využívá elektrických výbojů (s časem trvání 10^{-4} až 10^{-6} s [1]) mezi obrobkem a drátovou elektrodou (nástrojem). Obrobek a drátová elektroda jsou ponořeny v dielektrickém médiu, které působí jako chlazení a současně odplavuje mikroskopické částice vyerodovaného materiálu z místa řezu[2]. Při elektroerozivním obrábění se nevyskytují klasické řezné síly, což umožňuje obrábět všechny alespoň minimálně elektricky vodivé materiály bez ohledu na jejich tvrdost nebo houževnatost. Lze tak obrábět velice složité tvary, tenkostěnné profily, či velmi přesné tvarové otvory obvykle bez nutnosti následné dokončovací operace. Součásti

je možné obrábět na finální rozměry a to i po dodatečném tepelném zpracování, čímž lze předcházet nežádoucím rozměrovým a objemovým změnám daného dílu[3]. Jako nástrojová elektroda je nejčastěji používán mosazný drát obvykle o průměru 0,3 až 0,2 mm. Pro specifitější díly náročnější na přesnost tvaru, s požadavkem na co nejvyšší jakost povrchu, z důvodu nežádoucí kontaminace obrobeného povrchu zinkem, či pro mikroobrábění jsou používány obvykle drátové elektrody tvořené mědí, ocelí, molybdenem nebo i jejich kompozitní varianty. Pro obrábění menších součástí či s menšími vnitřními rádiusy jsou užívány dráty o průměrech 0,2 až 0,05 mm. V případě mikroobrábění již hovoříme o průměru drátu 0,02 mm[4].

Relativně nízká rychlost řezání cca $3-10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (v závislosti na tloušťce obráběného materiálu, jeho druhu či způsobu jeho tepelného zpracování) vůči konvenčnímu obrábění přináší WEDM uplatnění především pro výrobu přesných dílů nebo tvarově náročných součástí. V těchto případech je o to vyšší důraz kladen na výslednou jakost obrobeného povrchu, z důvodu zachování efektivnosti obrábění. Hodnoceny nejsou jen profilové a plošné parametry drsnosti povrchu, ale také výskyt defektů (trhlin, mikrotrhlin, vypálených kavit) na povrchu i v podpovrchové oblasti elektroerozivně obrobeného povrchu [8,9,23,24]. Vlivem vnitřního pnutí v obrobku se takto vzniklé trhliny mohou dále šířit a inicializovat vznik rozsáhlých trhlin ovlivňujících funkčnost a životnost dané součásti. Vznik trhlin a kavit je podmíněn druhem obráběného materiálu a jeho tepelným zpracování či nastavením parametrů stroje.

Při procesu erodování také dochází k odpařování erodovaného materiálu a tím vzniká tzv. mezera řezu. Velikost této mezery je přímo závislá na souboru fyzikálních a mechanických vlastností obráběného materiálu a také především na nastavení parametrů stroje [5]. Šířka mezery řezu je velmi důležitý parametr, který je třeba pečlivě monitorovat, neboť ovlivňuje konečný rozměr obráběné součásti a má limitující vliv na výrobu co nejmenšího poloměru vnitřního rádiusu [6,7].

5 OVLIVNĚNÍ ŘEZNÉ RYCHLOSTI DRUHEM TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU

U technologie elektroerozivního drátového obrábění není rychlost řezání v_c nastavitelná při programování stroje, ale vychází z nastavení jednotlivých parametrů obrábění, jako je např. napětí U (Gap voltage), čas zapnutí pulzu T_{on} (Pulse on time), čas vypnutí pulzu T_{off} (Pulse off time), rychlost odvíjení drátu v (Wire speed), erodovací proud I (Discharge current), atd. Souhrn předdefinovaného nastavení všech parametrů je obsažen v jednotlivých „technologiích“ dodaných výrobcem erodovacího stroje. Pro jednotlivé druhy materiálů a jejich tloušťky jsou tak vytvořeny specifická nastavení obráběcích parametrů, k dosažení co nejvyšší rychlosti řezání bez přerušování drátové elektrody s přihlédnutím na co nejlepší jakost obrobeného povrchu. Bohužel, v těchto výrobcem předdefinovaných technologiích nejsou obsažena dodatečná tepelná zpracování (TZ) či speciální kovové materiály.

Tab. 1 Tepelného zpracování materiálu Ti-6Al-4V.

Tepelné zpracování (TZ)
Kaleno a popuštěno
940 °C / 45' / voda
570 °C / 2 hodiny / vzduch

Tab. 2 Tři druhy tepelného zpracování materiálu Inconel 625.

Druh TZ	Tepelné zpracování (TZ)
1	Kaleno 650 °C / 1 hodina / voda
2	Kaleno 750 °C / 1 hodina / voda
3	Kaleno 850 °C / 1 hodina / voda

Plánovanými experimenty provedenými na dvou kovových materiálech byl prokázán vliv druhu dodatečného tepelného zpracování na rychlosti řezání a také na počtu přetržení drátové elektrody. Jednalo se o titanovou slitinu Ti-6Al-4V, jež byla zpracována tepelným zpracováním dle tab. 1 a nikl-chrom-molybdenovou slitinu Inconel 625 se třemi druhy tepelného zpracování dle tab. 2. Součástí

výzkumu bylo i porovnání rychlosti řezání materiálů ve stavu bez TZ a také s přihlédnutím k počtu přerušení drátové elektrody. Tloušťka všech obráběných polotovarů byla 18 mm.

Pro tento experiment byla použita 5ti osá drátová řezačka typu EU64 s CNC řízením dodaná výrobcem Makino. Jako elektroda byl použit mosazný drát (60 % Cu a 40 % Zn) CUT E o průměru 0,25 mm dodaný firmou Penta. Vzorky byly při řezání ponořeny v deionizované vodě, která sloužila jako dielektrikum.

Plánovaný experiment byl založen na sledování vlivu pěti nezávislých technologických parametrů řezacího procesu a jejich mezních hodnotách (tab. 3). Mezní hodnoty nastavení jednotlivých parametrů byly určeny na základě rozsáhlých předchozích testů.

Tab. 3 Mezní hodnoty parametrů nastavení stroje.

Parametr	Gap voltage [V]	Pulse on time [μs]	Pulse off time [μs]	Wire speed [m·min ⁻¹]	Discharge current [A]
Úroveň 1	50	6	50	10	25
Úroveň 2	60	8	40	12	30
Úroveň 3	70	10	30	14	35

Pro experiment byl zvolen „Half response surface design“ obsahující 33 kol členěných do dvou bloků (tab. 4). Pro snížení možnosti systematických chyb jsou jednotlivá kola znáhodněna a pro lepší statistický odhad variability odezvy byl experiment doplněn o 7 centrálních bodů. Podrobně je tento plán sběru dat popsán např. v Montgomery [10].

Řezná rychlost a počet přetržení drátové elektrody (počet byl zaznamenáván na každém jednotlivém vzorku, přičemž délka řezu byla vždy 3 mm) tvoří výsledný celkový čas obrábění. K přetržení elektrody přitom dojde v případě, kdy jsou nastaveny nevhodné parametry stroje. Znovu navlečení drátové elektrody trvá 1 min, proto je časté přetrhávání pro obráběcí proces nežádoucí a neefektivní. Užitá elektroerozivní drátová řezačka umožnila přímé měření rychlosti během obráběcího procesu.

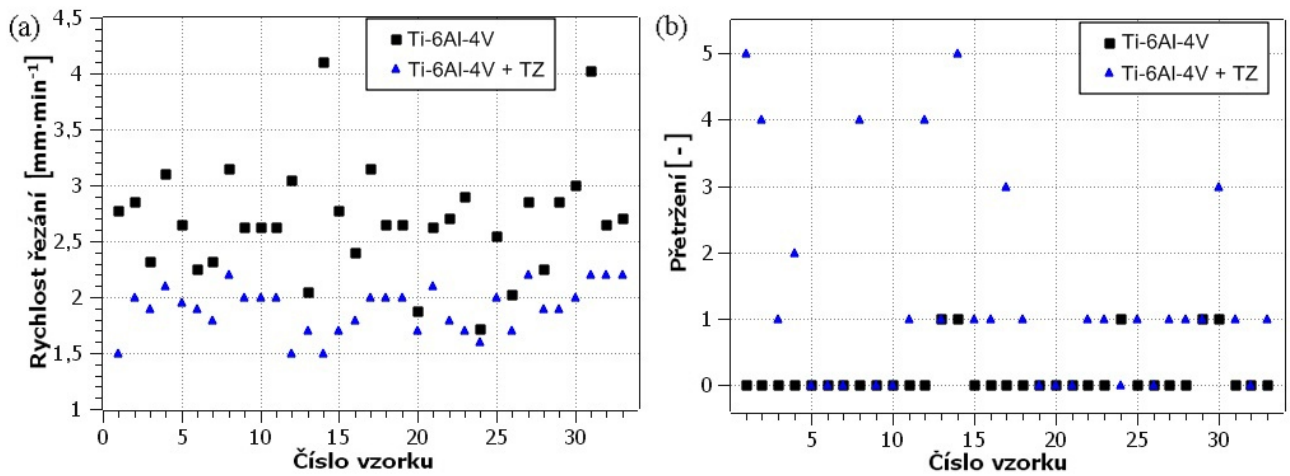
Rychlost řezání vzorků z titanové slitiny bez a s tepelným zpracováním byla vynesena do grafu na obrázku 1 (a). Nejvyšší průměrnou rychlostí byly obráběny vzorky ze slitiny titanu bez tepelného zpracování a to 2,7 mm·min⁻¹. Vzorky z materiálu s TZ byly obráběny průměrnou rychlostí řezání 1,9 mm·min⁻¹. 60 % ze všech vzorků bylo obrobena bez přetržení drátové elektrody, jak je znázorněno

v grafu na obrázku 1 (b). Pouze 5 krát došlo k jednomu přetržení drátu při obrábění sady vzorků z titanové slitiny bez tepelného zpracování. Naopak nejčastěji byla drátová elektroda přetržena při obrábění titanové slitiny s tepelným zpracováním a to nejvíce 5 krát za obrobení jednoho vzorku.

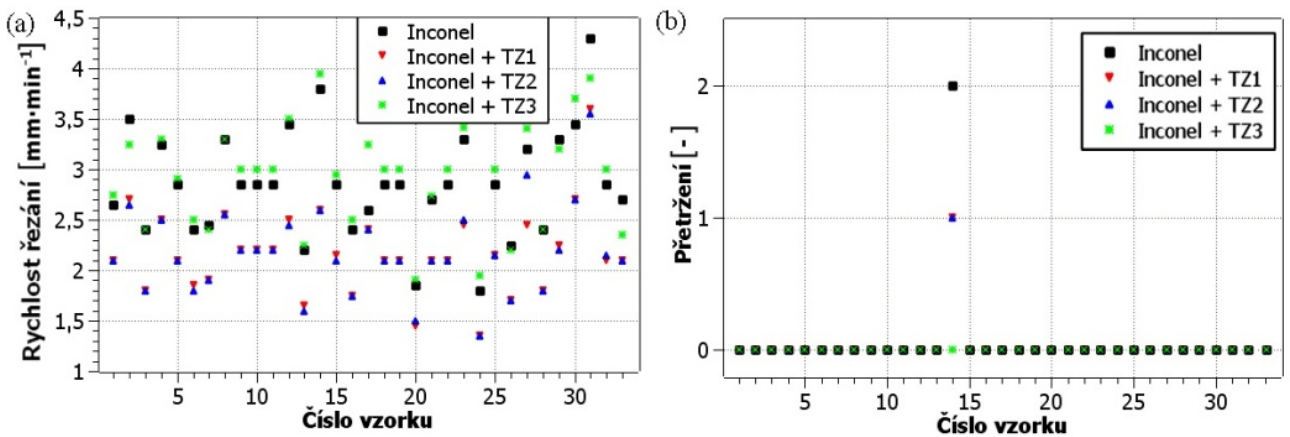
Tab. 4 Parametry obrábění použité pro experimenty.

Číslo vzorku	Gap voltage [V]	Pulse on time [μs]	Pulse off time [μs]	Wire feed [m·min ⁻¹]	Discharge current [A]	Číslo vzorku	Gap voltage [V]	Pulse on time [μs]	Pulse off time [μs]	Wire feed [m·min ⁻¹]	Discharge current [A]
1	70	8	40	12	30	18	60	8	40	12	30
2	60	8	30	12	30	19	60	8	40	12	30
3	60	8	40	12	25	20	70	6	50	14	25
4	60	10	40	12	30	21	50	6	30	14	25
5	50	8	40	12	30	22	60	8	40	12	30
6	60	8	50	12	30	23	70	10	30	14	25
7	60	6	40	12	30	24	50	6	50	10	25
8	60	8	40	12	35	25	60	8	40	12	30
9	60	8	40	10	30	26	50	10	50	14	25
10	60	8	40	14	30	27	50	10	30	10	25
11	60	8	40	12	30	28	50	6	50	14	35
12	50	6	30	10	35	29	50	10	50	10	35
13	70	10	50	10	25	30	70	6	30	14	35
14	70	10	30	10	35	31	50	10	30	14	35
15	60	8	40	12	30	32	60	8	40	12	30
16	70	6	50	10	35	33	70	6	30	10	25
17	70	10	50	14	35						

Rychlost řezání vzorků vyrobených z Inconelu se pohybovala v rozmezí od 1,4 do 4,3 mm·min⁻¹, přičemž nejvyšší rychlosti bylo dosaženo u vzorku č. 31 u materiálu bez TZ (obr. 2 (a)) s nastavením parametrů stroje U=50 V, T_{on}=10 μs, T_{off}=30 μs, v=14 m·min⁻¹, I=35 A. Naopak nejvyšší průměrná rychlost byla u vzorků s TZ3 a to 2,9 mm·min⁻¹. K přetržení drátové elektrody došlo pouze u vzorku číslo 14 a to ve třech sadách vzorků vyrobených z Inconelu, kromě vzorku s TZ3.



Obrázek 1. Vyhodnocení podmínek při obrábění vzorků vyrobených z Ti-6Al-4V bez a s tepelným zpracováním (a) řezná rychlost jednotlivých vzorků, (b) počet přetržení drátu na 3 mm řezu.



Obrázek 2. Vyhodnocení podmínek při obrábění vzorků vyrobených z Inconelu 625 bez a se třemi různými druhy tepelného zpracování (a) řezná rychlost jednotlivých vzorků, (b) počet přetržení drátu na 3 mm řezu.

Optimalizací rychlosti řezání pro jednotlivé materiály, jako jsou např. WC-CO [26], hliníkové slitiny AlSi7Mg/SiC a AlSi7Mg/Al₂O₃ [27], hliníková slitina Al 6061 [28], ocel SKD11 [29], ocel Cr12MoV [30] nebo hliníková slitina 5083 [31], se zabývalo mnoho studií, nicméně v žádné nedošlo k porovnání s materiálem v základním stavu a tepelně zpracovaným. Z tohoto důvodu je nezbytné věnovat pozornost různým druhům tepelného zpracování obráběných materiálů, protože jejich obrábění s maximalizováním řezné rychlosti je pro efektivní výrobu nezbytné.

6 VLIV NASTAVENÍ PARAMETRŮ STROJE A TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA TOPOGRAFII POVRCHU

Jakost obrobeneho povrchu je velmi pečlivě zkoumána a posuzována, protože na ní závisí požadovaná funkčnost vyrobené součásti. Pro komplexní posouzení topografie je nezbytné vyhodnocovat více parametrů nežli pouze ten nejpoužívanější, kterým je průměrná aritmetická úchylka povrchu Ra. Z toho důvodu byly v tomto experimentu vyhodnocovány 3 profilové parametry a 3 jejich plošné ekvivalenty, které zajišťují kvantitativní hodnocení plochy všemi technicky významnými směry.

Parametry vyhodnocované profilovou metodou byly:

- průměrná aritmetická úchylka povrchu Ra,
- nejvyšší výška profilu Rz,
- průměrná kvadratická úchylka povrchu Rq.

Parametry vyhodnocované plošnou metodou:

- aritmetický průměr výšky povrchu Sa,
- maximální výška povrchu Sz,
- základ průměrné výšky povrchu Sq.

Vzorky pro experiment byly vyrobeny z konstrukční nízkolegované oceli 16MnCr5 vhodné k cementování, z titanové slitiny Ti-6Al-4V, z nástrojové legované oceli pro práci za studena X210Cr12 a z hliníkové slitiny AlZn6Mg2Cu. Tepelná zpracování jednotlivých materiálů jsou uvedena v tabulce 5.

Ocel 16MnCr5 je legovaná Mn a Cr a je určena především k cementování, nitridování, nitrocementování a kyanování. Je dobře tvářitelná za tepla, vykazuje dobrou obrobitelnost a svařitelnost. Pevnost v tahu je 640-930 MPa. Tato ocel je používána na všeobecné strojní součásti vhodné k cementování. Využívá se velmi tvrdého povrchu při zachování velmi pevného jádra. Jedná se např. o vodící čepy, razníky pro vytlačovací formy, hřídele, ozubená kola, pastorky, ozubené tyče, měřicí nástroje a vedení.

Titanová slitina Ti-6Al-4V se vyznačuje zejména vysokou pevností v tahu (až 900 MPa) a vynikající odolností vůči korozi. Uvedená slitina má nejvyšší poměr

mezi pevností a měrnou hmotností ze všech kovových materiálů, vykazuje rovněž vysokou úroveň biokompatibility a schopnost odolávat tepelným zatížením až do teploty 315 °C. Její využití nachází největší uplatnění především pro součásti letadel, lopatek turbín, zbraní, v lékařství pak pro výrobu implantátů a spojovacích prostředků. Samostatnou oblast využití pak tvoří profesionální sportovní vybavení, které dosahuje unikátních vlastností.

Nástrojová legovaná ocel pro práci za studena X210Cr12 se vyznačuje vysokou odolností proti otěru a pevností 800-850 MPa. Má dobrou rozměrovou stálost po zakalení, ale značně nízkou houževnatost zejména v příčném směru. Je používán především pro velmi namáhané nástroje s velkou výkonností a životností pro stříhání a děrování kovových materiálů malých tloušťek (do 4 mm).

Hliníková slitina AlZn6Mg2Cu je materiál určený pro vysoce namáhané konstrukce dlouhodobě pracující do teploty 100-120 °C, např. pro leteckou výrobu (kryty, podélná žebra, výztuže, přepážky). Materiál má vysokou mez pevnosti Rm od 190 do 590 MPa a tvrdost od 60 do 180 HV v závislosti na druhu hutního polotovaru a jeho tepelném zpracování.

Tab. 5 Tepelná zpracování jednotlivých materiálů.

Druh TZ	Tepelné zpracování (TZ)	Druh TZ	Tepelné zpracování (TZ)
	<i>ocel 16MnCr5</i>		<i>ocel X210Cr12</i>
1	Normalizační žíhání 950 °C / 0,5 hodiny / vzduch	1	Kaleno a popuštěno 960 °C / 1 hodina / olej 200 °C / 2 hodiny / vzduch
2	Žíhání 1100 °C / 20 hodin / vzduch	2	Kaleno - překalený stav 1100 °C / 1 hodina / olej
	<i>titanová slitina Ti-6Al-4V</i>	3	Žíhání na měkko 760 °C / 2 hodiny / pec
	Kaleno a popuštěno 940 °C / 45' / voda 500 °C / 2 hodiny / vzduch		

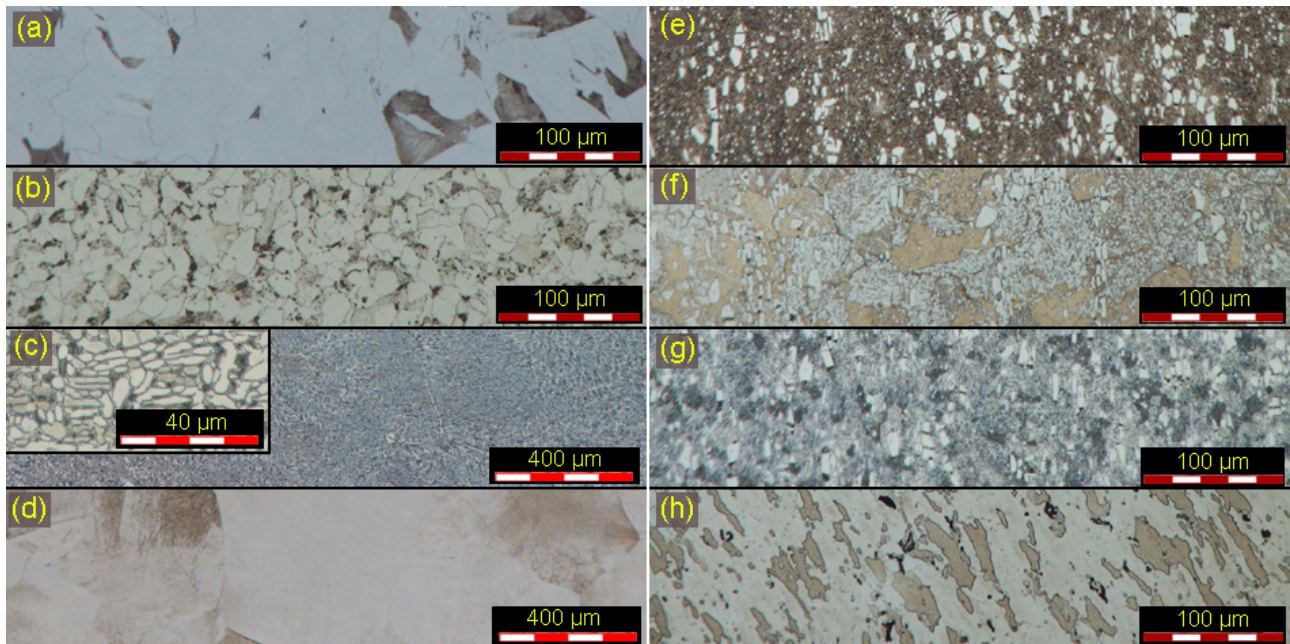
Za účelem studování mikrostruktury materiálů byly ze vzorků vyrobeny metalografické preparáty, které byly připraveny běžnými technikami – broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami pomocí automatického preparačního systému TEGRAMIN 30 firmy Struers. Finální mechanicko-chemické doleštění

bylo provedeno pomocí suspenze OP-Chem firmy Struers. Po chemickém leptání byla struktura materiálů analyzována pomocí světelné mikroskopie a 3D opto-digitálním mikroskopu s vysokým rozlišením OLYMPUS DSX 510. Mikrostruktura všech použitých materiálů včetně jejich tepelných zpracování je zobrazena na obrázku 3. Reliéf povrchu včetně 3D snímků, profilové a plošné parametry jakosti povrchu byly studovány užitím bezkontaktního měřicího přístroje IFM G4 od firmy Alicona. Naměřená data byla analyzována pomocí softwaru IF-Laboratory Measurement, dodaného výrobcem Alicona. Všechny profilové parametry byly vyhodnocovány na křivce o délce 10 mm, plošné byly vyhodnocovány v oblasti o rozměrech 4,2x3 mm, byl použit objektiv se zvětšením 10x. Měření bylo provedeno v souladu s normou pro plošné parametry ISO 21578-2 [11] a profilové ISO 4287 [12]. Pro 3D snímky povrchů byl použit objektiv se zvětšením 50x.

Tab. 6 Parametry nastavení stroje užití pro daný experiment.

Číslo vzorku	Gap voltage [V]	Pulse on time [μs]	Pulse time [μs]	off	Wire speed [m·min ⁻¹]	Discharge current [A]
1	50	11	50		14	28
2	50	8	55		14	25
3	50	9	40		14	22

Pro zjištění vlivů parametrů nastavení stroje na obrobenou plochu, bylo použito jejich odlišné nastavení (tabulka 6), přičemž pro každý z testovaných materiálů byly použity 3 různé sady parametrů nastavení stroje, tzn. 3 různé vzorky. Hodnoty nastavení jednotlivých parametrů byly určeny na základě rozsáhlých předchozích testů. Pro obrábění byla opět použita pěti-osá drátová řezačka Makino EU64 a mosazný drát o průměru 0,25 mm.

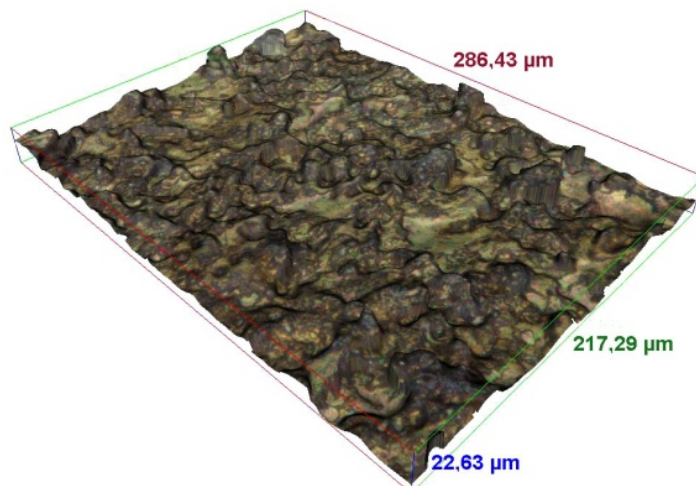


Obrázek 3. Mikrostruktura polotovaru pro výrobu vzorků (a) ocel 16MnCr5 normalizačně žháná, (b) ocel 16MnCr5 žháná, (c) titanová slitina Ti-6Al-4V bez TZ, (d) titanová slitina Ti-6Al-4V kalena a popuštěna, (e) ocel X210Cr12 kalena a popuštěna, (f) ocel X210Cr12 překalený stav, (g) ocel X210Cr12 žháná na měkko, (h) hliníková slitina AlZn6Mg2Cu.

Topografie povrchů elektroerozivně obrobených dílů je tvořena velkým množstvím kráterů vzniklých po jednotlivých elektrických výbojích, které odstranily mikroskopické částice materiálu, jež byly následně odplaveny proudem dielektrické kapaliny. Další materiál byl z místa řezu odstraněn vlivem působení teplot 10 000 – 20 000 °C [13], typických pro tento typ obrábění. Mechanismus tvorby jednotlivých kráterů byl sice popsán v publikacích Tosuna[14], Chalisgaonkara[15], Giridharana[16], Lia [31] a Kumara [32], nicméně jejich tvary a velikosti se liší i se změnou tepelného zpracování materiálu, které zatím nebylo v žádné obdobné studii zkoumáno. S velikostí a tvarem kráterů úzce souvisí i parametry drsnosti povrchu, které jsou limitujícím faktorem pro výrobu veškerých strojních dílů a součástí. Toto jednoznačně vyplývá z definic daných platnými normami, jak pro plošné[11] tak i pro profilové [12] parametry jakosti povrchu.

Na površích všech elektroerozivně obrobených materiálů ve větší či menší míře ulpívá vrstva „přílepku“, která vznikla lokálním působením vysoké teploty při výboji, a způsobila částečné natavení či plné roztavení povrchové vrstvy obrobeného materiálu. Povrchy všech vzorků jsou tedy pokryty velkým množstvím kráterů, což je znázorněno i u první sady vzorků vyrobených z oceli 16MnCr5 s TZ1 (normalizačně žhané), což je znázorněno na obrázku 4 pomocí 3D reliéfu povrchu.

Hodnoty vyhodnocených plošných a profilových parametrů na dvou sadách vzorků vyrobených z oceli 16MnCr5 byly sestaveny do tabulky 7. Nejnižších hodnot bylo dosaženo u vzorků normalizačně žíhaných, nicméně zcela nejnižší hodnoty Ra parametru bylo dosaženo u vzorku č. 1 z této oceli.



Obrázek 4. 3D reliéf povrchu vzorku 1 vyrobeného z oceli 16MnCr5 normalizačně žíhané.

Tab. 7 Vyhodnocení plošných a profilových parametrů vzorků vyrobených z oceli 16MnCr5 s TZ1 a TZ2.

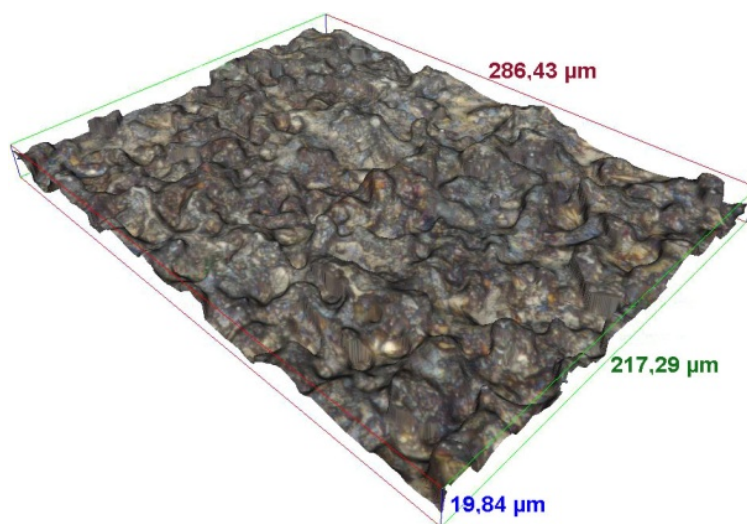
<i>16MnCr5 s TZ1 (normalizační žíhání)</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	1,94	14,90	2,50	1,98	26,86	2,56
2	2,37	18,83	3,07	2,54	25,95	3,21
3	2,53	17,60	3,14	2,64	25,55	3,35
<i>16MnCr5 s TZ2 (žíhání)</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	1,97	13,65	2,46	2,16	27,71	2,75
2	1,87	16,19	2,46	3,29	35,00	4,32
3	1,85	14,29	2,35	2,58	31,31	3,41

Vzorky vyrobené z Ti-6Al-4V s tepelným zpracováním měly ve všech případech hodnoty parametrů Ra a Sa nižší než vzorky vyrobené z materiálu bez tepelného zpracování, což je patrné z tabulky 8. Profilový parametr Rz a jeho plošný ekvivalent Sz byly dle vyhodnocení více ovlivněny možným výskytem drobných

kuliček či jiného výstupku tvořeného „přílepem“ (popsáno v publikaci Kumara [17]) a to především u vzorku 2 materiálu s TZ, kde parametr Sz dosáhl hodnoty 56,31 μm . 3D reliéf povrchu znázorněný na obr. 5 s celkovou výškou profilu 19,84 μm byl relativně členitý s mnoha výstupky a prohlubněmi zcela bez hladkých dn kráterů.

Tab. 8 Vyhodnocení plošných a profilových parametrů vzorků vyrobených z titanové slitiny Ti-6Al-4V bez TZ a TZ1.

<i>Ti-6Al-4V bez TZ</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	2,58	15,42	3,23	3,05	30,46	3,85
2	3,08	20,63	4,08	3,11	39,92	4,00
3	2,68	17,84	3,38	3,15	36,29	4,05
<i>Ti-6Al-4V s TZ1 (kaleno a popuštěno)</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	2,10	16,92	2,79	2,78	29,60	3,53
2	2,05	16,06	2,67	2,35	56,31	3,00
3	2,21	16,00	2,78	2,55	30,05	3,26

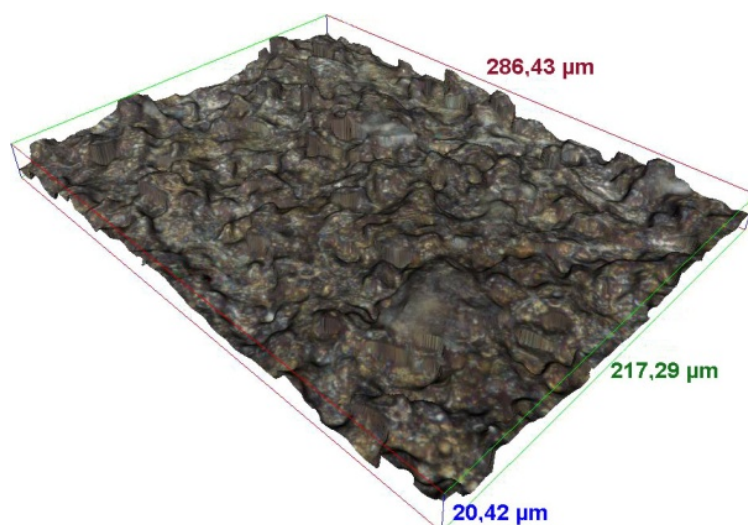


Obrázek 5. 3D reliéf povrchu vzorku 1 vyrobeného z titanové slitiny Ti-6Al-4V bez TZ.

Na vzorku vyrobeném z nástrojové legované oceli X210Cr12 byla dosažena nejnižší hodnota profilového parametru Ra a to pouze 1,16 μm , což je patrné z tabulky 9, kde jsou vyhodnoceny profilové i plošné parametry všech těchto vzorků. Bohužel této nejvyšší jakosti povrchu bylo dosaženo u vzorku v překaleném stavu, což je nevhodné tepelné zpracování pro reálné výrobky. Dále byly velice nízké hodnoty plošných i profilových parametrů vyhodnoceny u vzorků žíhaných na měkko. Naopak nejhorší jakost povrchu byla studována u vzorků s tepelným zpracováním - kaleno a popuštěno, přičemž 3D reliéf takového povrchu je zobrazen na obrázku 6.

Tab. 9 Vyhodnocení plošných a profilových parametrů vzorků vyrobených z oceli X210Cr12 ve třech různých stavech tepelného zpracování.

<i>X210Cr12 s TZ1 (kaleno a popuštěno)</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	2,15	15,40	2,73	2,16	30,72	2,76
2	1,86	12,83	2,34	1,91	29,48	2,41
3	2,15	14,93	2,70	2,11	37,02	2,66
<i>X210Cr12 s TZ3 (žíhané na měkko)</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	1,74	14,48	2,28	1,87	27,69	2,44
2	1,80	13,86	2,31	1,90	21,46	2,44
3	1,76	14,35	2,31	1,89	22,56	2,44
<i>X210Cr12 s TZ2 (překalený stav)</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	1,50	12,03	1,91	1,60	26,05	2,03
2	1,16	9,69	1,48	1,48	20,36	1,87
3	1,98	14,11	2,47	2,11	23,56	2,68

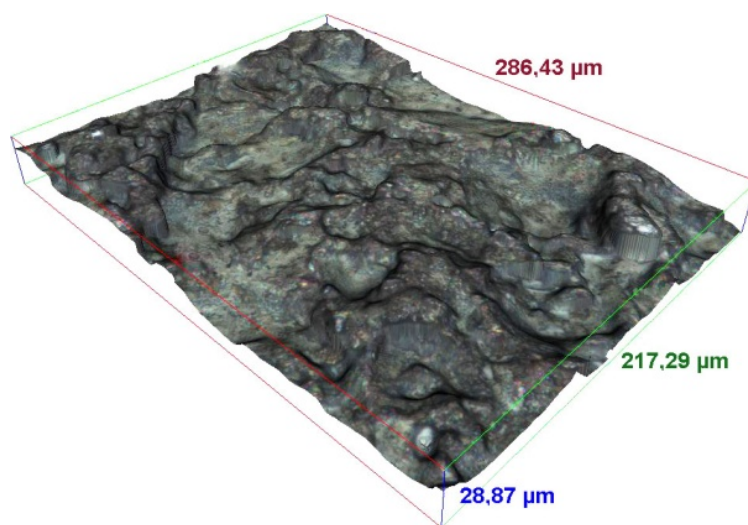


Obrázek 6. 3D reliéf povrchu vzorku 1 vyrobeného z oceli X210Cr12 kalené a popuštěné.

Povrch vzorků vyrobených z hliníkové slitiny AlZn6Mg2Cu je v podobě 3D reliéfu znázorněn na obrázku 7. Morfologie tohoto povrchu je značně odlišná od předchozích materiálů, přičemž nejdominantnější jsou zde hladká dna rozlehlých kráterů o rozměrech cca 50x50 μm . Povrch není příliš členitý, nicméně celková výška profilu je v tomto případě nejvyšší ze všech zkoumaných vzorků, což je nejlépe patrné z vyhodnocených plošných parametrů sestavených do tabulky 10, kdy vzorek č. 1 má hodnotu aritmetického průměru výšky povrchu Sa 64,06 μm .

Tab. 10 Vyhodnocení plošných a profilových parametrů vzorků vyrobených z hliníkové slitiny AlZn6Mg2Cu.

<i>AlZn6Mg2Cu</i>						
Číslo vzorku	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sq [μm]
1	3,09	17,89	3,85	4,98	64,06	6,22
2	2,89	15,96	3,52	4,27	41,48	5,25
3	3,24	16,23	3,91	4,17	40,12	5,20



Obrázek 7. 3D reliéf povrchu vzorku 1 vyrobeného z hliníkové slitiny AlZn6Mg2Cu.

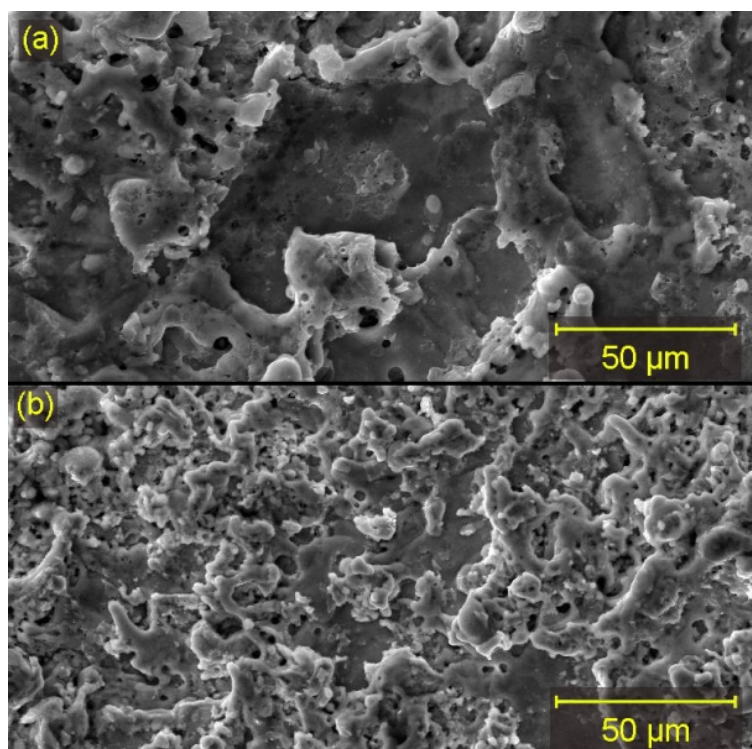
Cílem tohoto experimentu bylo zjištění vlivu nastavení parametrů stroje v závislosti na souboru fyzikálních a mechanických charakteristik obráběného materiálu a jeho tepelného zpracování. Provedená analýza obrobených povrchů stanovila závislost materiálových charakteristik na celkové změně reliéfu i topografii elektroerozivně obrobeného povrchu. Jakost povrchů posuzována na základě vyhodnocených plošných a profilových parametrů jednoznačně prokázala závislost nejen na nastavení parametrů stroje, ale i na druhu obráběného materiálu a jeho tepelném zpracování. Nejnižší hodnota Ra byla zjištěna u vzorku 2 vyrobeného z X210Cr12 s HT2 a to pouze 1,16 μm . Celkově nejvyšší hodnoty parametrů jakosti povrchu byly studovány u všech tří vzorků vyrobených z AlZn6Mg2Cu. Druhou nejhorší jakost povrchu měly vzorky vyrobené z titanové slitiny Ti-6Al-4V, nicméně sada vzorků vyrobená z téhož materiálu s tepelným zpracováním měla tyto parametry výrazně lepší.

Na základě výše uvedených závěrů lze jednoznačně konstatovat, že výsledná jakost obrobeného povrchu je závislá na mnoha aspektech a nalezení optimálních podmínek pro obrábění jednotlivých materiálů a jejich tepelného zpracování je velice rozsáhlá problematika vyžadující rozsáhlý výzkum.

7 MORFOLOGIE WEDM POVRCHŮ

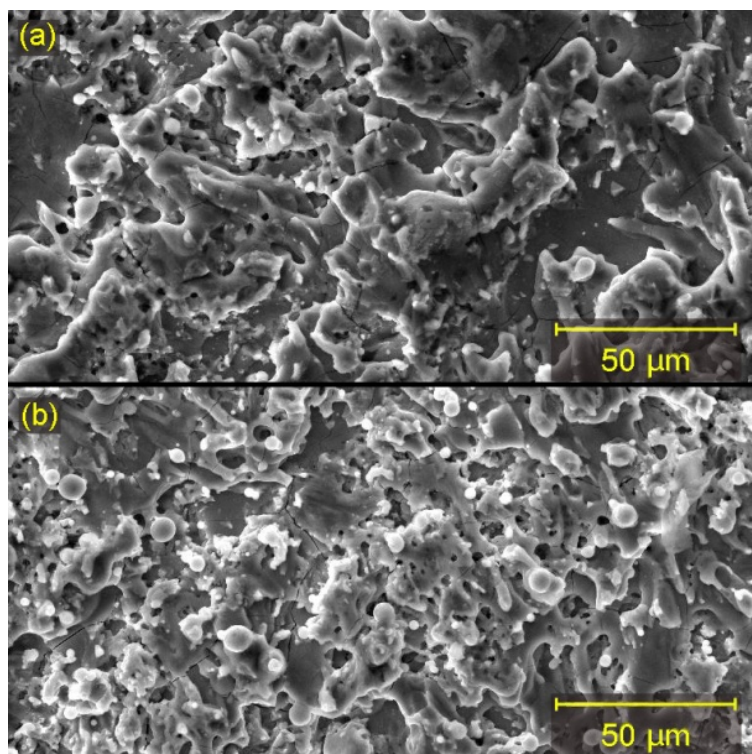
Základní princip tvorby specifické morfologie všech elektroerozivně obrobených povrchů, je vznik kráterů po jednotlivých elektrických výbojích a následném odplavení vyrodovaného materiálu v podobě drobných kuliček z místa řezu dielektrickou kapalinou. Četnost výskytu kráterů, ulpělých drobných kuliček, ale také přítomnost mikro trhlin na elektroerozivně obrobených površích byla předmětem experimentu, který byl zaměřen na zhodnocení vlivu druhu obráběného materiálu a jeho tepelného zpracování na morfologii povrchu a případné defekty.

Vzorky pro experiment byly opět vyrobeny z konstrukční nízkolegované oceli 16MnCr5, z titanové slitiny Ti-6Al-4V, z nástrojové legované oceli X210Cr12 a z hliníkové slitiny AlZn6Mg2Cu. Tepelná zpracování jednotlivých materiálů jsou uvedena v tabulce 5 a mikrostruktura všech použitých materiálů včetně jejich tepelných zpracování je zobrazena na obrázku 4. Vzorky byly obrobeny parametry nastavení stroje: $U=50$ V, $T_{on}=11$ μ s, $T_{off}=50$ μ s, $v=14$ m \cdot min $^{-1}$, $I=28$ A na elektroerozivní drátové řezačce Makino EU64 a použitým mosazným drátem o průměru 0,25 mm. Morfologie obrobených povrchů byla studována pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) LYRA3 od firmy Tescan vybaveným fokusovaným iontovým svazkem (FIB).



Obrázek 8. Morfologie povrchu oceli 16MnCr5, zvětšeno 1 000x, (SEM) SE (a) vzorek normalizačně žhán, (b) vzorek žhán.

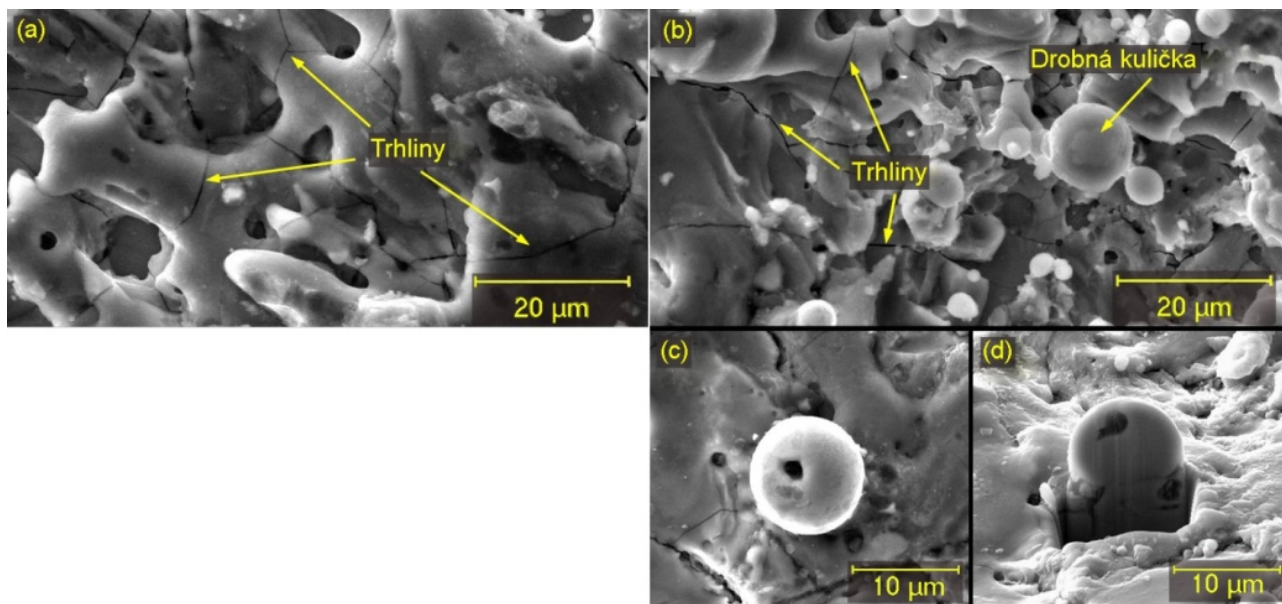
Morfologie povrchu oceli 16MnCr5 normalizačně žíhané je výrazně odlišná a to především v množství „přílepku“, který se na vzorku nachází (obr. 8 (a)). Značná část povrchu je tvořena hladkými dny kráterů, které vznikly odseparováním „přílepku“ v průběhu erodování. Povrch žíhaného vzorku (obr. 8 (b)) je však pokryt téměř souvislou vrstvou „přílepku“ a je jen několik míst, kde se nevyskytuje. Na površích vzorků z obou ocelí se nachází menší množství hlubokých kráterů, výskyt mikrotrhlin či drobných kuliček nebyl potvrzen.



Obrázek 9. Morfologie povrchu titanové slitiny Ti-6Al-4V, zvětšeno 1 000x, (SEM) SE (a) vzorek bez tepelného zpracování, (b) vzorek kalen a popuštěn.

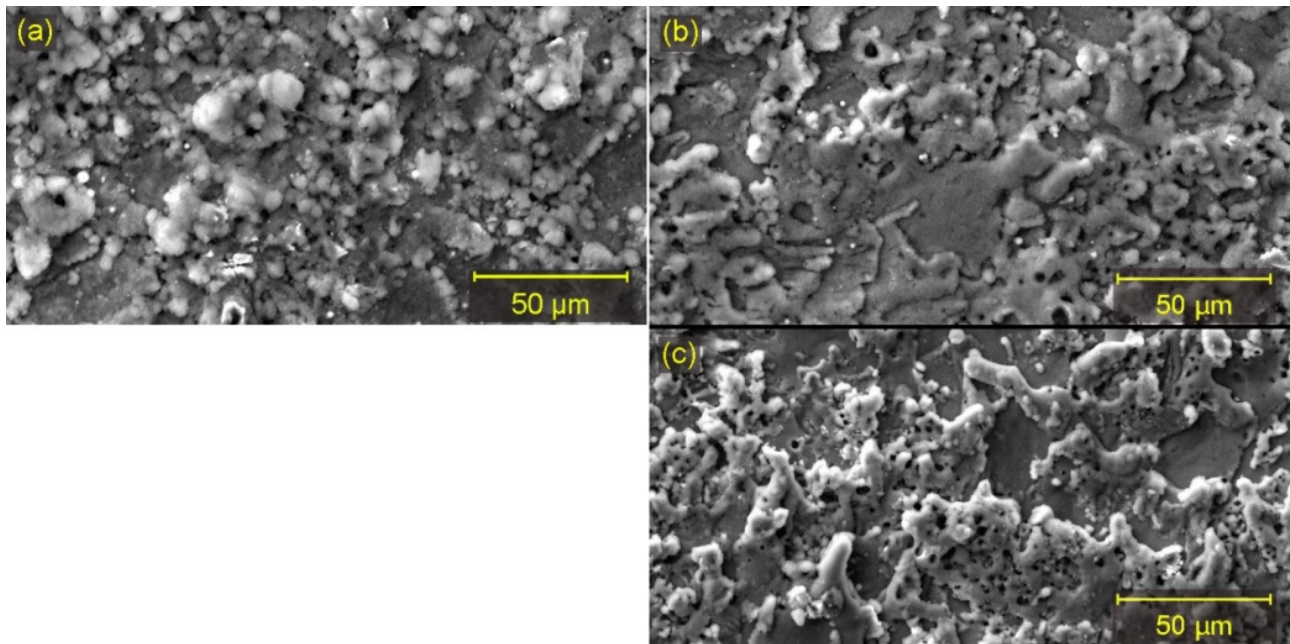
Na některých materiálech či jejich tepelném zpracování dochází k nadměrnému uplývání drobných kuliček vyerodovaného materiálu, které nebyly odplaveny proudem dielektrika. V tomto experimentu byly ulpělé kuličky studovány pouze u titanové slitiny s tepelným zpracováním, jejich výskyt je dokumentován na obr. 9 (b) a 10 (b). Obrobený povrch byl pokryt velkým množstvím rovnoměrně rozmístěných drobných kuliček s průměry od 1 μm do 10 μm . Vzhledem ke skutečnosti, že se problematikou výskytu kuliček materiálu na povrchu vzorku zabývalo několik autorů Sharma [18] a Manjaiah [19], kteří se nezabývali přesnou geometrickou stavbou, byla v rámci překládané studie provedena přesná geometrická specifikace objektu s využitím techniky FIB, která by potvrdila či vyvrátila domněnky o objektu s vnitřní dutinou či bez ní. Pomocí FIB byla

odprášena ½ kuličky (obr. 10 (c) a (d)), což umožnilo detailní studium její vnitřní stavby. Skutečnost, že se jedná o dutý objekt, kterou ve svých pracích popisuje Mankova [20], byla tímto experimentem jednoznačně vyvrácena. Nutno podotknout, že výskytem kuliček se na materiálech ocel HSLA a čistý titan zabývali i Azam [21], Kumar [17], jimi předkládané práce však geometrickou specifikaci nedokladovaly.



Obrázek 10. Morfologie povrchu titanové slitiny Ti-6Al-4V, zvětšeno 2 500x (SEM) SE (a) vzorek bez tepelného zpracování, (b) vzorek kalen a popuštěn, (c) ulpělá kulička na obrobeném povrchu vzorku s tepelným zpracováním, (d) kulička po odprášení iontovým svazkem FIB.

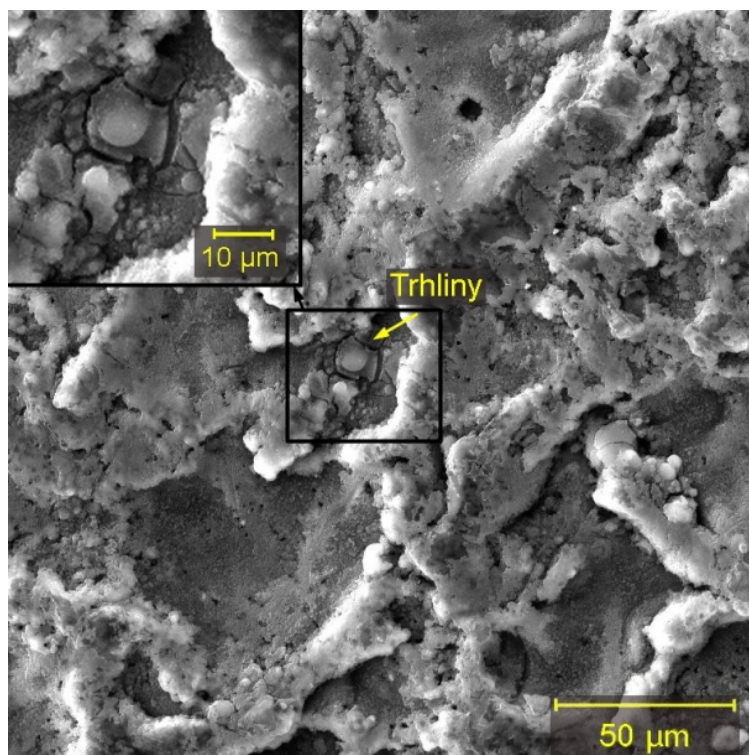
Povrch obou vzorků je tvořen dendritickými oblastmi s hladkým povrchem s velkou četností jemných povrchových mikrotrhlin (Fig 10 (a) a (b)) a trhlin vzniklých v důsledku dilatačních procesů způsobených velkou rychlostí ochlazení (enormně rychlá přeměna taveniny v tuhý roztok). Mikrotrhliny mohou vést k následné inicializaci rozsáhlých trhlin a to nejen v oblasti „přílepku“ ale také v oblastech bez něj. Dále bylo na obou vzorcích nalezeno množství hlubokých kráterů.



Obrázek 11. Morfologie povrchu oceli X210Cr12, zvětšeno 1 000x, (SEM) SE (a) vzorek kalen a popuštěn, (b) vzorek překalený, (c) vzorek žíhán na měkko.

Povrch vzorků vyrobených z oceli X210Cr12 se při jednotlivých druzích tepelného zpracování příliš neliší. Na žádném z povrchů nebyly nalezeny mikrotrhliny ani ulpělé kuličky. Povrch vzorku vyrobeného z oceli kalené a popuštěné (obr. 11 (a)) je podstatně členitější s nesouvislou vrstvou přílepku. Morfologie vzorku v překaleném stavu, která je znázorněna na obrázku 11 (b) vykazuje známky nejmenších výškových rozdílů mezi prohlubněmi a výstupky ze všech zkoumaných materiálů a jejich tepelných zpracování. Na povrchu jsou sice hluboké krátery, nicméně „přílepek“ je do značné míry souvislý. Na povrchu vzorku vyrobeného z oceli žíhané na měkko (obr. 11 (c)) bylo nalezeno největší množství hlubokých kráterů a také jsou zde výraznější plochá a rovná dna jednotlivých kráterů.

Morfologie povrchu hliníkové slitiny obrobenej WEDM je charakteristická svými relativně ostrými hranami vzniklého „přílepku“, kterými se výrazně odlišuje od ostatních materiálů. Na povrchu bylo nalezeno několik drobných mikrotrhlin, které jsou obvykle dlouhé pouze do 10 µm a jsou situovány do tvaru mnohoúhelníku, což je zřetelné z obrázku 12. Stejný typ mikrotrhlin byl také studován na materiálu EN AW 6063 [22]. Dále bylo na površích nalezeno několik hlubokých kráterů o průměrech do 5 µm a žádné drobné kuličky jako v případě titanové slitiny s tepelným zpracováním.



Obrázek 12. Morfologie povrchu hliníkové slitiny AlZn6Mg2Cu, zvětšeno 1 000x, (SEM) SE.

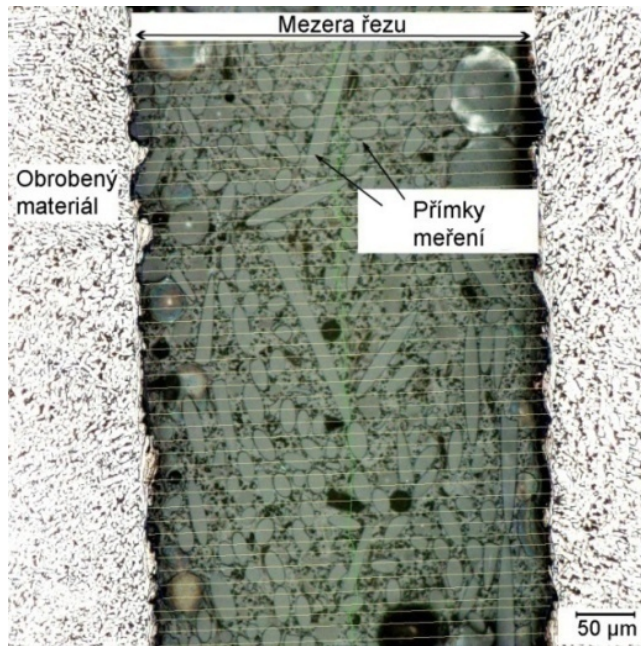
Na základě provedeného experimentu, kdy byly vyrobeny vzorky z oceli 16MnCr5, z titanové slitiny Ti-6Al-4V, z nástrojové legované oceli X210Cr12 a z hliníkové slitiny AlZn6Mg2Cu, kdy některé materiály byly tepelně zpracovány a některé i více způsoby lze jednoznačně konstatovat, že morfologie a defekty povrchu jsou jednoznačně závislé nejen na druhu obráběného materiálu, ale také na jeho tepelném zpracování. Nejvíce defektů bylo detekováno na vzorcích z titanové slitiny, kde byl celý povrch pokryt mikrotrhlinami a u tepelně zpracovaného materiálu se vyskytovaly i drobné kuličky. Výskyt těchto defektů může následně ovlivnit funkčnost a životnost takto vyrobených dílů, kdy dojde k částečné či kompletní separaci nátěru spolu s popraskaným „přílepem“. Další defekty v podobě drobných mikrotrhlin byly studovány u hliníkové slitiny, nicméně se jednalo pouze o lokální výskyt. Na površích vzorků z ocelí s různými tepelnými zpracováními nebyly nalezeny žádné viditelné defekty.

8 PŘESNOST OBRÁBĚNÍ A DEFEKTY PODPOVRCHOVÉ VRSTVY

8.1 Šířka mezery řezu ovlivňující přesnost obrábění

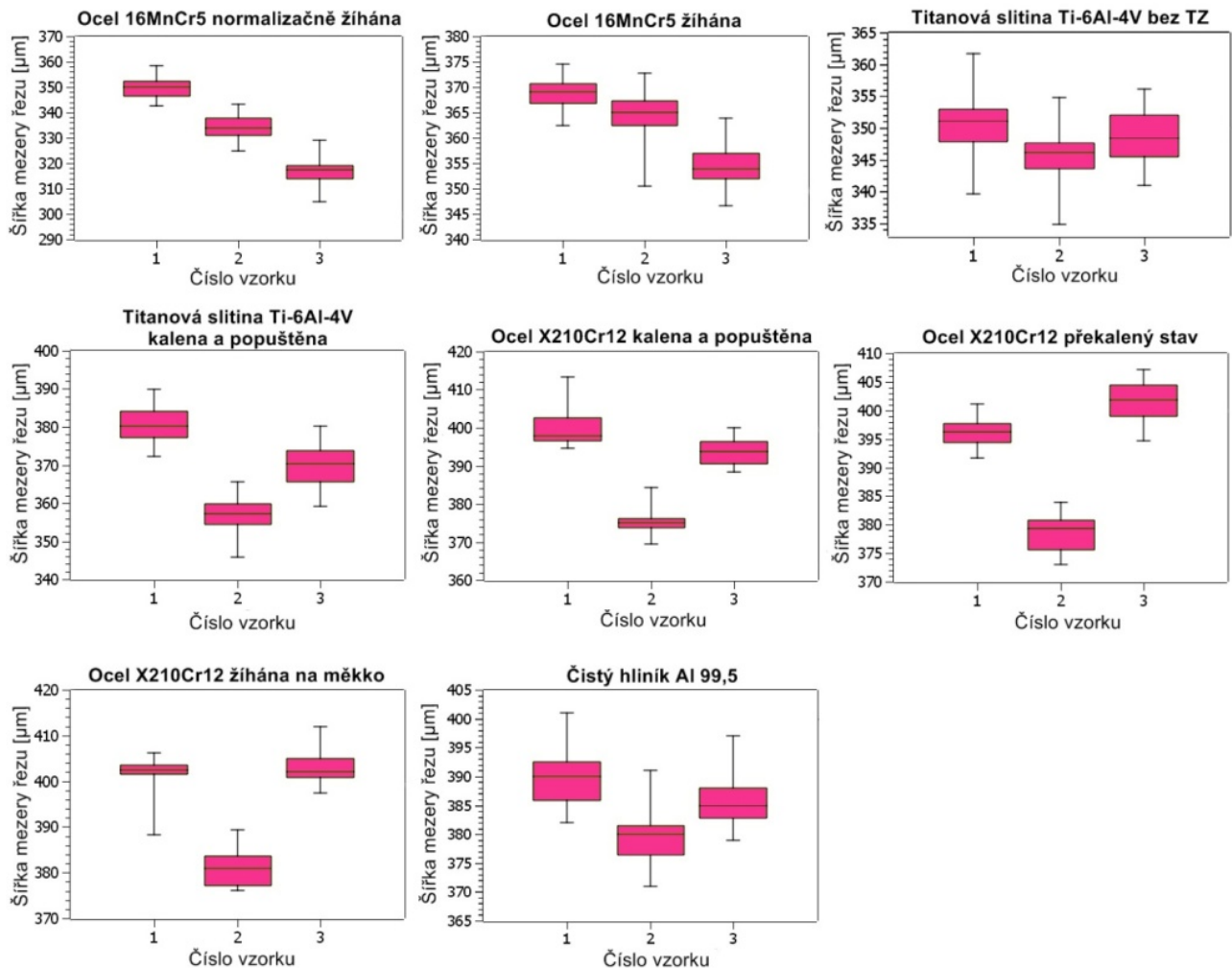
V důsledku erodování je materiál odebírán neustále se opakujícími elektrickými výboji mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou, přičemž mezi drátem a obráběným materiálem vzniká tzv. mezera řezu. Šířka mezery řezu je přímo závislá nejen na průměru použitého drátu ale i na parametrech nastavení stroje a především na souboru mechanických a fyzikálních vlastností obráběného materiálu. Pro přesné obrábění je velmi důležité, aby mezera řezu byla co nejmenší, protože také určuje minimální rádius, který je možné vyrobit. Následující experiment se zabýval vyhodnocením šířky mezery řezu pro 4 různé kovové materiály (některé byly následně tepelně zpracovány několika způsoby) s odlišnými parametry nastavení stroje.

Vzorky pro experiment byly vyrobeny z konstrukční nízkolegované oceli 16MnCr5 vhodné k cementování (2 sady vzorků), z titanové slitiny Ti-6Al-4V (2 sady vzorků), z nástrojové legované oceli pro práci za studena X210Cr12 (3 sady vzorků) a z čistého hliníku Al 99,5 (1 sada vzorků bez TZ), přičemž tepelná zpracování jednotlivých materiálů jsou uvedena v tabulce 7. Pro výrobu vzorků byla použita pěti-osá elektroerozivní drátová řezačka typu EU64 s CNC řízením dodaná firmou Makino. Jako drátová elektroda byl použit mosazný drát s označením CUT E dodaný firmou Penta. Drát byl složen ze 60 % mědi a 40 % zinku s průměrem 0,25 mm. Při obrábění byly vzorky ponořeny v dielektrické kapalině – deionizované vodě. Pro zjištění vlivů parametrů Gap voltage (V), Pulse on (T_{on}) a off time (T_{off}), Wire feed (v) a Discharge current (I) na obrobenou plochu bylo použito jejich odlišné nastavení (tab. 6) pro každý ze tří vzorků vyrobených z jednotlivých materiálů. Pro změření mezery řezu byly připraveny metalografické výbrusy příčných řezů jednotlivými vzorky s postupem dle kapitoly 6. Po chemickém leptání byla struktura materiálu analyzována pomocí 3D opto-digitálního mikroskopu s vysokým rozlišením OLYMPUS DSX. Mezera řezu byla u každého vzorku měřena užitím obrazové analýzy v 50-ti různých místech dle obr. 13 v programu dodaném firmou Olympus.



Obrázek 13. Příklad měření mezery řezu na metalografickém výbrusu v 50ti místech, která jsou naznačena žlutými přímkami.

Že nejsou šířky mezery řezu stejné pro jednotlivá nastavení parametrů stroje (tab. 6) bylo prokázáno Kruskal-Wallisovým statistickým testem rovnosti mediánů. Testy rovnosti mediánu byly zamítnuty na hladině významnosti 0,05 pro všechny vzorky. Tento test byl použit, protože ne všechny soubory 50 měření představující šířku mezery, měli normální rozdělení, což bylo ověřeno Anderson-Darlingovým testem. Při experimentu bylo dosaženo nejúžší mezery řezu u většiny materiálů u vzorku č. 2, což je patrné z obrázku 14 s nastavením parametrů stroje $U=50\text{ V}$, $T_{\text{on}}=8\ \mu\text{s}$, $T_{\text{off}}=55\ \mu\text{s}$, $v=14\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $I=25\ \text{A}$. Nicméně u vzorků vyrobených z oceli 16MnCr5 byla nejúžší mezera u vzorků číslo 3 s nastavením parametrů stroje $U=50\ \text{V}$, $T_{\text{on}}=9\ \mu\text{s}$, $T_{\text{off}}=40\ \mu\text{s}$, $v=14\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $I=22\ \text{A}$.



Obrázek 14. Vyhodnocení mezer řezu na jednotlivých vzorcích.

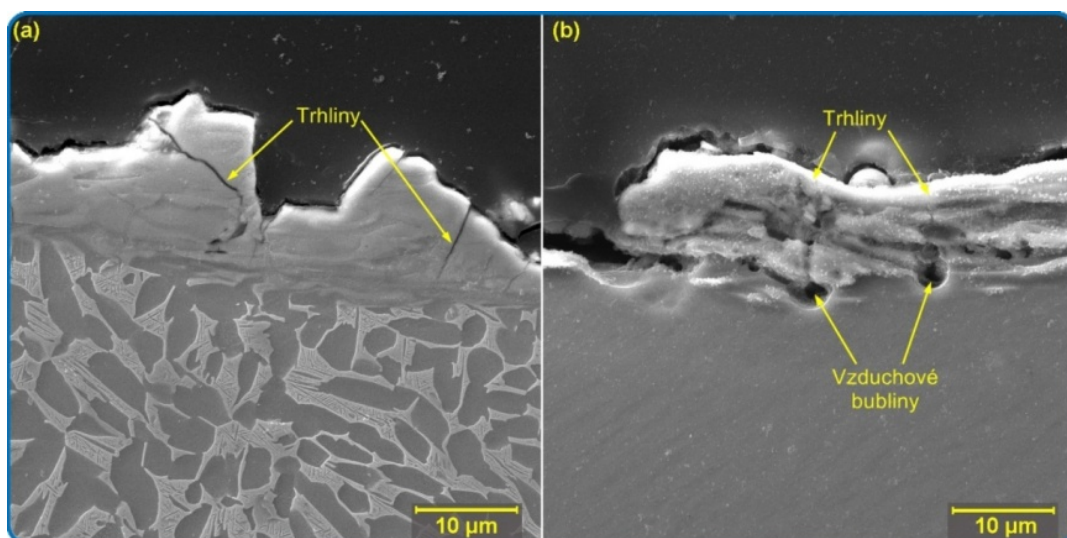
Analýzou mezery řezu se zabývá několik studií, jako například Arikatla [34] či Reddy [35], nicméně pouze jedna obsahovala vliv tepelného zpracování materiálu a byla vyhotovena jen pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V [33]. Z výše uvedených závěrů lze jednoznačně konstatovat, že šířka mezery řezu je závislá nejen na parametrech nastavení stroje, ale také na druhu obráběného materiálu a jeho tepelném zpracování.

8.2 Defekty v povrchové a podpovrchové oblasti

Defektů vznikajících na elektroerozivně obrobených površích je několik druhů. Jejich výskyt je závislý nejen na nastavení parametrů stroje ale také na druhu obráběného materiálu a druhu jeho dodatečného tepelného zpracování. Následující experiment se proto zabýval vyhodnocením výskytu defektů povrchové a podpovrchové vrstvy na 3 různých kovových materiálech (některé byly následně tepelně zpracovány několika způsoby) se třemi různými nastaveními parametrů stroje.

Vzorky pro experiment byly vyrobeny z titanové slitiny Ti-6Al-4V (2 sady vzorků), z nástrojové legované oceli pro práci za studena X210Cr12 (3 sady vzorků) a z čistého hliníku Al 99,5 (1 sada vzorků bez TZ), přičemž tepelná pracování jednotlivých materiálů jsou uvedena v tabulce 7. Pro zjištění vlivů parametrů Gap voltage (V), Pulse on (T_{on}) a off time (T_{off}), Wire feed (v) a Discharge current (I) na obrobenou plochu bylo použito jejich odlišné nastavení (tab. 6) pro každý ze tří vzorků vyrobených z jednotlivých materiálů. Vzorky byly vyrobeny na elektroerozivní drátové rezačce Makino EU64 a použitým mosazným drátem o průměru 0,25 mm. Při obrábění byly vzorky ponořeny v dielektrické kapalině – deionizované vodě.

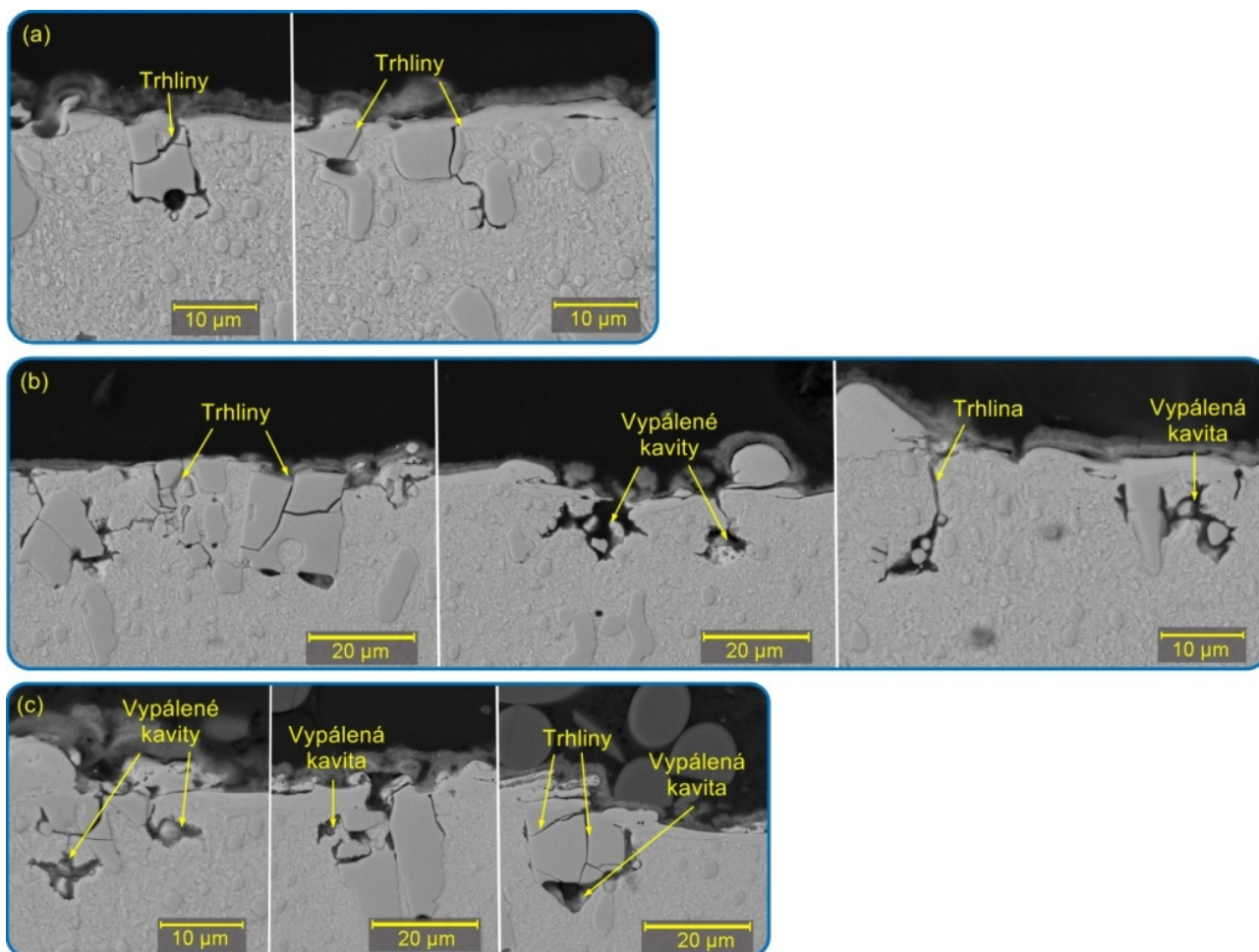
Za účelem studia výskytu defektů byly připraveny metalografické výbrusy příčných řezů jednotlivými vzorky (stejný postup jako v kapitole 6). Po chemickém leptání byla struktura materiálu analyzována pomocí elektronového mikroskopu LYRA3 vždy při zvětšení 1 000x, 2 500x a 4 000x detektorem zpětně odražených elektronů BSE.



Obrázek 15. Příčný řez vzorkemč. 1 z titanové slitiny Ti-6Al-4V, leptáno Keller's Reagent, SEM (BSE) zvětšeno 4 000x (a) materiál bez tepelného zpracování, (b) materiál kalen a popuštěn.

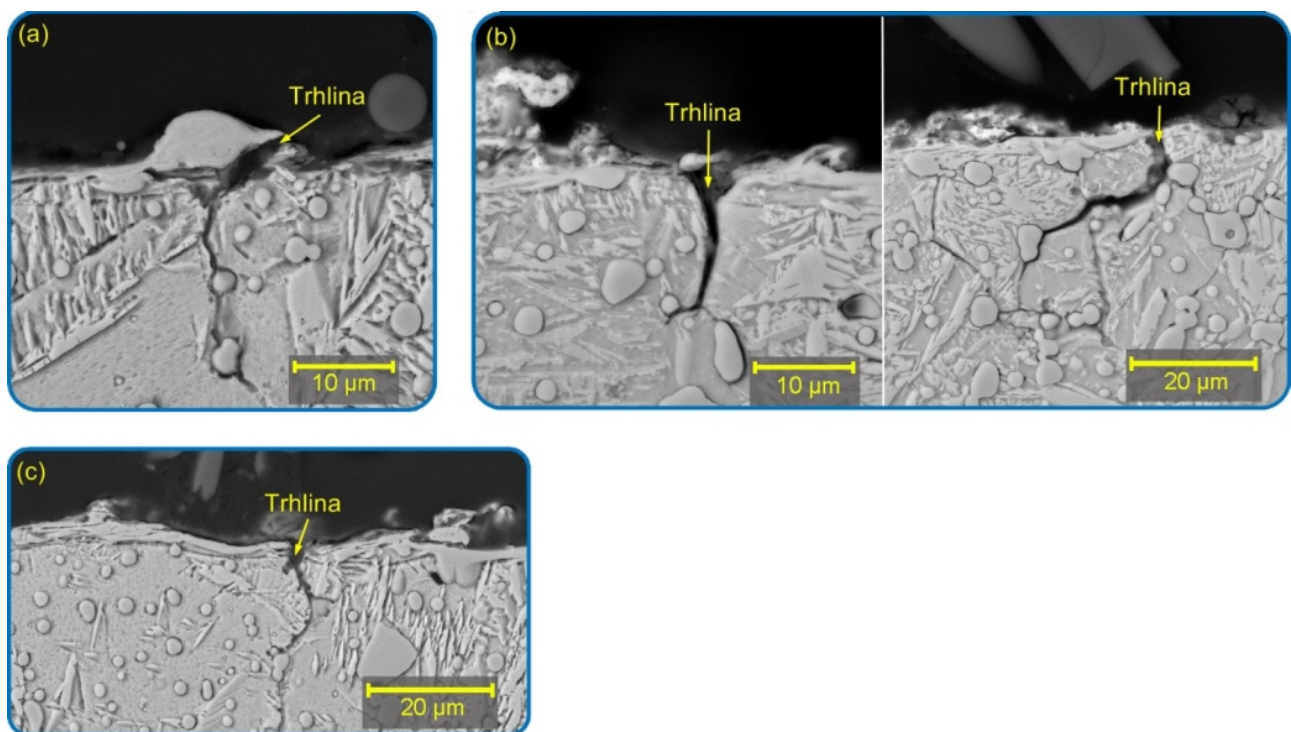
Mikrostruktura slitiny titanu bez TZ je tvořena acykulárními zrnny fáze α + fází β , fáze α tvoří nesouvislé síťoví po hranicích zrn. U slitiny po tepelném zpracování je mikrostruktura tvořena polyedrickými zrnny metastabilního tuhého roztoku β' a jemnou disperzí precipitátů. Z výsledků hodnocení příčných řezů jednotlivých vzorků je zřejmé, že v mnoha místech byly nalezeny jemné mikrotrhliny (obr. 15), které se nachází pouze v oblasti „přílepku“ a do základního materiálu dále

nezasahují. Tyto mikrotrhliny byly studovány na všech třech vzorcích z materiálu bez i s tepelným zpracováním, nicméně vyšší četnost výskytu byla pozorována u vzorků z materiálu bez TZ, kde bylo pokrytí povrchu přílepkem téměř 90% celého povrchu vzorků. Na rozhraní přílepku a základního materiálu se u všech vzorků s TZ objevily drobné vzduchové bubliny, které jsou znázorněny na obr. 15 (b). Tyto bubliny se přitom téměř vždy vyskytují v místech pod jednotlivými trhlinami vedoucími skrz „přílepek“.



Obrázek 16. Příčný řez vzorky z oceli X210Cr12 s tepelným zpracováním kaleno a popuštěno, leptáno Nital, SEM (BSE) (a) vzorek č. 1 s nastavením parametrů stroje $U=50$ V, $T_{on}=11$ μs, $T_{off}=50$ μs, $v=14$ m·min⁻¹ a $I=28$ A, (b) vzorek č. 2 s nastavením parametrů stroje $U=50$ V, $T_{on}=8$ μs, $T_{off}=55$ μs, $v=14$ m·min⁻¹ a $I=25$ A, (c) vzorek č. 3 s nastavením parametrů stroje $U=50$ V, $T_{on}=9$ μs, $T_{off}=40$ μs, $v=14$ m·min⁻¹ a $I=22$ A.

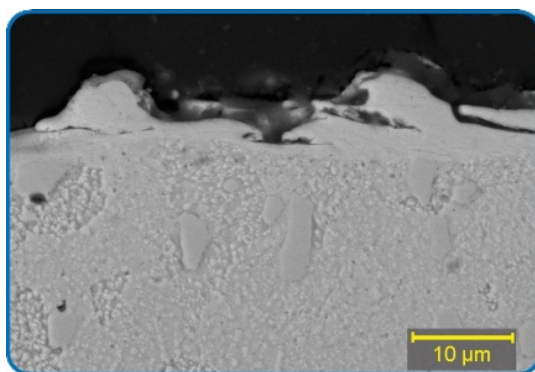
Vzorky z oceli X210Cr12 s tepelným zpracováním (kaleno a popuštěno) měli mikrostrukturu tvořenu popuštěným martenzitem, jemnou disperzí karbidů cementického typu, masivními ledeburitickými karbidy na bázi chromu a zbytkovým austenitem. Defekty studované na obrobených površích byly v podobě sítě mikrotrhlin vedoucích po hranici celého zrna nebo skrz zrna, což je znázorněno na obrázku 16. V důsledku vysoké teploty v místě řezu dochází ve vodní dielektrické lázni stroje k dicosiaci vody a k difuzi atomárního vodíku pod povrch řezné plochy. Tento jev způsobuje především u legovaných ocelí vznik vypálených kavit (díry po odtaveném materiálu), které byly nalezeny i ve studii Hasçalýka [25]. Na těchto površích může dojít v kombinaci s působením zbytkového pnutí k inicializaci zpožděných lomů a trhlin, jdoucích paralelně s povrchem řezu. Vypálené kavity bylo možné pozorovat na obrázcích 16 (b) a (c), přičemž se vyskytovali pouze na vzorcích číslo 2 a 3. Na vzorku č. 1 bylo pozorováno nejmenší množství defektů a na vzorku č. 2 největší množství.



Obrázek 17. Příčný řez vzorky z oceli X210Cr12v překaleném stavu, leptáno Nital, SEM (BSE) (a) vzorek č. 1 s nastavením parametrů stroje $U=50$ V, $T_{on}=11$ μ s, $T_{off}=50$ μ s, $v=14$ $m \cdot min^{-1}$ a $I=28$ A, (b) vzorek č. 2 s nastavením parametrů stroje $U=50$ V, $T_{on}=8$ μ s, $T_{off}=55$ μ s, $v=14$ $m \cdot min^{-1}$ a $I=25$ A, (c) vzorek č. 3 s nastavením parametrů stroje $U=50$ V, $T_{on}=9$ μ s, $T_{off}=40$ μ s, $v=14$ $m \cdot min^{-1}$ a $I=22$ A.

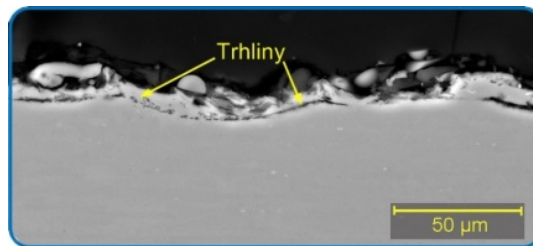
Ocel X210Cr12 v překaleném stavu, s mikrostrukturou tvořenou tetragonálním martenzitem, velkým množstvím zbytkového austenitu, zbytků ledeburitických karbidů. Jednalo se o záměrně provedené chybné tepelné zpracování materiálu vzorku pro detailní stanovení vlivu mikrostrukturních parametrů a vnitřní napjatosti materiálu na kvalitu řezu. U těchto vzorků bylo možno pozorovat masivní trhliny zasahující do základního materiálu až do hloubky 35 μm (obr. 17 (b)). Výskyt trhlín jednoznačně souvisí s vysokou úrovní vnitřního pnutí materiálu po nevhodném tepelném zpracování. Nicméně na vzorcích bylo nalezeno jen několik takovýchto trhlín, přitom nejvíce na vzorku č. 2.

Ocel X210Cr12 žíhaná na měkko, jejíž mikrostruktura byla tvořena feritickou maticí, jemnou disperzí karbidů cementického typu a masivními ledeburitickými karbidy na bázi chromu byla jediná, kde u vzorků nebyl zaznamenán žádný výskyt trhlín, což je patrné z obrázku 18.



Obrázek 18. Příčný řez vzorkem č. 1 vyrobeným z oceli X210Cr12 žíhané na měkko, leptáno Nital, SEM (BSE).

V podpovrchové oblasti vzorku č. 1 vyrobeného z čistého hliníku 99,5 mezi přílepkem a základním materiálem byly studovány horizontální trhliny vedoucí pod částí nebo pod celou plochou přílepku, což je znázorněno na obrázku 19. Na tomto rozhraní byla pozorována pomocí provedené lokální analýzy chemického složení (EDX) téměř souvislá vrstva oxidů. Přítomnost této vrstvy je příčinou špatné soudržnosti mezi základním materiálem a přílepkem a při vhodných podmínkách dojde k jeho delaminaci. V důsledku této separace nastane odstranění případného nátěru (barvy) na dané součásti a také ke zmenšení jejich rozměrů. Na vzorcích č. 2 a 3 nebyly studovány žádné defekty v podobě trhlín.



Obrázek 19. Příčný řez vzorkem č. 1 vyrobeným z čistého hliníku 99,5, Keller's Reagent, SEM (BSE).

Trhliny kolmé na povrch procházející pouze přilepkem byly studovány u všech vzorků vyrobených z titanové slitiny Ti-6Al-4V bez a s tepelným zpracováním přičemž u vzorků s TZ byly pod trhlinami v několika místech i vzduchové bubliny. Trhliny na hranici zrna byly pozorovány u oceli X210Cr12, která byla kalena a popuštěna, dále se zde nacházelo velké množství vypálených kavit a to především u vzorků č. 2 a 3. Nejdelší trhliny s délkou až 35 μm v základním materiálu byly nalezeny na vzorcích v překaleném stavu, nicméně u vzorku č. 2 jich bylo nalezeno nejvíce. Na vzorku z čistého hliníku byly nalezeny vodorovné trhliny na hranici přilepku a základního materiálu pouze u vzorku č. 1. Výskyt trhlín závisí na odolnosti materiálu vůči vnesenému pnutí vlivem přetavení povrchové vrstvy. Z výše uvedených závěrů lze jednoznačně konstatovat, že výskyt defektů v podobě trhlín a vypálených kavit závisí nejen na parametrech nastavení stroje, ale také na souboru mechanických a fyzikálních vlastností obráběného materiálu.

9 ZÁVĚR

Autorka v této práci prezentovala svůj vědecký výzkum po ukončení dokorského studia. Veškerá tato činnost byla motivována získáním detailních znalostí o technologii elektroerozivního drátového řezání aplikovatelných pro řešení problémů v praxi. Autorka vyřešila několik klíčových problémů týkajících se závislosti druhu tepelného zpracování obráběného materiálu na výsledné jakosti povrchové a podpovrchové vrstvy včetně výskytu defektů [B, E]. Dále se zaměřila na přesnost obrábění, která je také velmi ovlivněna druhem tepelného zpracování obráběného materiálu [D]. Topografie v závislosti na nastavení parametrů stroje byla pečlivě zkoumána u kovových i nekovových materiálů [A, C].

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JAIN, Vijay Kumar. *Advanced machining processes*. Allied publishers, 2009.
- [2] KNIGHT, Winston A.; BOOTHROYD, Geoffrey. *Fundamentals of metal machining and machine tools*. CRC Press, 2005.
- [3] JAMESON, Elman C. *Electrical discharge machining*. Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [4] HO, K. H., et al. State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44.12: 1247-1259.
- [5] HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43.13: 1287-1300.
- [6] WERNER, Andrzej. Method for enhanced accuracy in machining curvilinear profiles on wire-cut electrical discharge machines. *Precision Engineering*, 2016, 44: 75-80.
- [7] GUPTA, Pardeep, et al. Effect of process parameters on kerf width in WEDM for HSLA using response surface methodology. *Journal of Engineering and Technology*, 2012.
- [8] ASPINWALL, D. K., et al. Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57.1: 187-190.
- [9] AHAMED, Nizar; PANDYA, Yogesh; PAREY, Anand. Spur gear tooth root crack detection using time synchronous averaging under fluctuating speed. *Measurement*, 2014, 52: 1-11.
- [10] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, 2017.
- [11] ČSN EN ISO 25178-2 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu
- [12] ČSN EN ISO 4287, Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu
- [13] MCGEOUGH, Joseph A. *Advanced methods of machining*. Springer Science & Business Media, 1988.
- [14] TOSUN, N.; PIHTILI, H. The effect of cutting parameters on wire crater sizes in wire EDM. *The International Journal of advanced manufacturing technology*, 2003, 21.10: 857-865.

- [15] CHALISGAONKAR, Rupesh; KUMAR, Jatinder. Investigation of the machining parameters and integrity of the work and wire surfaces after finish cut WEDM of commercially pure titanium. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2016, 38.3: 883-911.
- [16] GIRIDHARAN, Abimannan; SAMUEL, G. L. Modeling and analysis of crater formation during wire electrical discharge turning (WEDT) process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77.5-8: 1229-1247.
- [17] KUMAR, Anish; KUMAR, Vinod; KUMAR, Jatinder. Experimental Investigation on material transfer mechanism in WEDM of pure titanium (Grade-2). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 2013.
- [18] SHARMA, Priyaranjan; CHAKRADHAR, D.; NARENDRANATH, S. Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application. *Materials & Design*, 2015, 88: 558-566.
- [19] MANJIAIAH, M., et al. Investigation on material removal rate, surface and subsurface characteristics in wire electro discharge machining of Ti50Ni50-xCux shape memory alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2015, 1464420715619949.
- [20] MANKOVA, I. *Progresívne technológie*. Viena. 2000. ISBN. 80-7099-430-4.
- [21] AZAM, Muhammad, et al. Parametric analysis of recast layer formation in wire-cut EDM of HSLA steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87.1-4: 713-722.
- [22] SHARMA, Anand; GARG, Mohinder Pal; GOYAL, Kapil Kumar. Prediction of optimal conditions for WEDM of Al 6063/ZrSiO₄ (p) MMC. *Procedia Materials Science*, 2014, 6: 1024-1033.
- [23] NEWTON, Thomas R., et al. Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 513: 208-215.
- [24] PURI, A. B.; BHATTACHARYYA, B. Modeling and analysis of white layer depth in a wire-cut EDM process through response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25.3: 301-307.
- [25] HASÇALYK, Ahmet; ÇAYDAŞ, Ulaş. Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148.3: 362-367.
- [26] SAHA, Probir, et al. Soft computing models based prediction of cutting speed and surface roughness in wire electro-discharge machining of tungsten carbide cobalt composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39.1: 74-84.

- [27] ROZENEK, M., et al. Electrical discharge machining characteristics of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109.3: 367-370.
- [28] SHANDILYA, Pragya; JAIN, P. K.; JAIN, N. K. RSM and ANN modeling approaches for predicting average cutting speed during WEDM of SiCp/6061 Al MMC. *Procedia Engineering*, 2013, 64: 767-774.
- [29] ZHANG, Guojun, et al. The multi-objective optimization of medium-speed WEDM process parameters for machining SKD11 steel by the hybrid method of RSM and NSGA-II. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70.
- [30] WANG, Junqi, et al. Experimental study on high-speed WEDM finishing in steam water mist. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 1-13.
- [31] LI, L., et al. Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy. *Procedia CirP*, 2013, 6: 220-225.
- [32] KUMAR, Vinod; KUMAR, Vikas; JANGRA, Kamal Kumar. An experimental analysis and optimization of machining rate and surface characteristics in WEDM of Monel-400 using RSM and desirability approach. *Journal of Industrial Engineering International*, 2015, 11.3: 297-307.
- [33] ALTUG, Mehmet; ERDEM, Mehmet; OZAY, Cetin. Experimental investigation of kerf of Ti6Al4V exposed to different heat treatment processes in WEDM and optimization of parameters using genetic algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*, 2015, 78.9: 1573-1583.
- [34] ARIKATLA, Siva Prasad; MANNAN, K. Tamil; KRISHNAIAH, Arkanti. Experimental Investigations on Kerf width and Material Removal Rate in Wire Electric Discharge Machining of Titanium Alloy. 2015.
- [35] REDDY, B. Vamsidhar; SRIDHAR, C. N. V.; REDDY, P. Vinay Kumar. Optimization of Wire Cut EDM Process Parameters For Surface Roughness And Kerf Width Using Response Surface Methodology. *Optimization*, 2016, 5.11.