# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE


# Optimalizace řídicích parametrů EDM stroje
Optimization of EDM process control parameters

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS


AUTOR PRÁCE — Ing. Tomáš Prokeš
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
SUPERVISOR



BRNO 2021

# ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na optimalizaci řídících parametrů elektroerozivního stroje, přičemž předmětem optimalizace je rychlost řezání a topografie povrchu. První část práce obsahuje rešeršní studii o technologii elektroerozivního obrábění s tím, že pozornost je věnována především optimalizačním metodám používaných pro řídící parametry tohoto procesu. Druhá část práce je zaměřena na reálnou aplikaci poznatků získaných z prostudovaných zdrojů. Zde jsou navrženy a provedeny plánované experimenty zaměřené na optimalizaci parametrů elektroerozivního stroje pro maximalizaci rychlosti řezání s co nejvyšší jakostí obrobeného povrchu. Výsledkem práce je sestavení adekvátních regresních modelů a nalezení optimálního nastavení řídících parametrů stroje.



# ABSTRACT

The dissertation thesis is focused on the optimization of control parameters of an EDM machine; the subject of optimization is cutting speed and surface topography. The first part of the thesis contains a research study on the technology of electrical discharge machining with the attention paid to the optimization methods use for control parameters of this process. The second part of the thesis is focused on real application of knowledge gained from studied sources. Here, a design of experiment aim at optimizing the parameters of the EDM machine is designed and carried on to maximize the cutting speed with the highest possible surface quallity. The result of the work is to build adequate regression models and find the optimal setting of machine control parameters.



**Klíčová slova**

Optimalizace, řídící parametry, plánovaný experiment, elektroerozivní obrábění, EDM, topografie povrchu, rychlost řezání, čistý molybden.

**Keywords**

Optimization, control parameters, design of experiment, electrical discharge machining, EDM, topography, cutting speed, pure molybdenum.

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROKEŠ, T. *Optimalizace řídicích parametrů EDM stroje.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. 98 s. doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

| | |
|---|---|
| Datum | Ing. Tomáš Prokeš |

## PODĚKOVÁNÍ

Analýzy vzorků byly provedeny za podpory výzkumné infrastruktury CEITEC Nano (ID LM2015041, MŠMT, 2016–2019) , CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

Děkuji tímto svému vedoucímu doc. Ing. Radomilu Matouškovi, Ph.D. a školiteli specialistovi Ing. Kateřině Mouralové, Ph.D. za praktické rady a doporučení v průběhu celého doktorandského studia.

# OBSAH

ABSTRAKT ..... 3
PROHLÁŠENÍ ..... 5
PODĚKOVÁNÍ ..... 6
OBSAH ..... 7
ÚVOD ..... 9
1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE ..... 10
2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ ..... 11
2.1 Technologie elektroerozivního obrábění ..... 11
2.2 Výroba moderních nástrojů ..... 13
2.3 Obrábění kompozitních materiálů ..... 14
2.4 Pokročilé keramické materiály ..... 15
2.5 Povrch po elektroerozivním drátovém řezání ..... 16
2.5.1 Vzhled podpovrchové vrstvy po WEDM a její defekty ..... 19
3 OPTIMALIZACE ŘÍDÍCÍCH PARAMETRŮ STROJE ..... 21
3.1 Plánovaný experiment ..... 21
3.2 Evoluční a optimalizační výpočetní techniky ..... 22
3.2.1 Genetické algoritmy ..... 23
3.2.2 Evoluční strategie ..... 24
3.2.3 Rojení částic ..... 24
3.2.4 Optimalizace mravenčí kolonií ..... 25
3.2.5 Bio-geografická optimalizace ..... 26
3.2.6 Optimalizace pomocí ovčích stád ..... 28
3.2.7 Algoritmus včelích kolonií ..... 29
3.3 Optimalizace, monitorování a řízení procesu ..... 30
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST ..... 41
4.1 Optimalizace obrábění čistého molybdénu ..... 41
4.1.1 Model pro rychlost řezání ..... 49
4.1.2 Model pro parametr topografie povrchu Ra ..... 51
4.1.3 Optimalizace ..... 53
4.1.4 Analýza jakosti povrchové a podpovrchové vrstvy ..... 54
4.2 Optimalizace obrábění niklové superslitiny B1914 ..... 58
4.2.1 Model pro rychlost řezání ..... 63
4.2.2 Modely pro parametry topografie povrchu Ra a Rz ..... 65
4.2.3 Optimalizace ..... 66

4.2.4 Analýza jakosti povrchové a podpovrchové vrstvy ..... 68
5 ZÁVĚRY ..... 71
6 PERSPEKTIVA DALŠÍCH PRACÍ ..... 73
7 PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA ..... 74
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK ..... 78
SEZNAM OBRÁZKŮ ..... 80
SEZNAM TABULEK ..... 83
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ ..... 84

# ÚVOD

Nekonvenční technologie obrábění jsou nepostradatelné v mnoha průmyslových odvětvích, a to díky svým širokým možnostem využití, a především schopností obrábět konvenčními technikami těžko obrobitelné materiály. Právě přesné obrábění dílů z tepelně zpracovaných materiálů se stalo zásadní při výrobě forem na vstřikování plastů, střižných a lisovacích nástrojů, kde je právě nejčastěji využívána technologie elektroerozivního obrábění.
Vzhledem k vysokým nárokům na topografii povrchu funkčních ploch vyrobených součástí je nezbytné vhodně nastavit vstupní parametry procesu – parametry nastavení stroje. Pro optimální volbu těchto parametrů je nezbytné nejprve provést plánovaný experiment a důkladně zmapovat proces s následnou optimalizací. Pomocí vhodně nastavených parametrů stroje získaných procesem optimalizace, lze velice efektivně elektroerozivně obrábět materiály bez ohledu na jejich tvrdost či houževnatost, což je základním předpokladem pro velice přesné obrábění součástí po finálním tepelném zpracování, kdy je zaručena jejich rozměrová stálost.

Přes veškerá pozitiva, která technologie obrábění nabízí, je relativně energeticky náročná. Proto je nezbytné věnovat pozornost optimalizaci řídících parametrů stroje, které určují rychlost obrábění, kterou není možné jednoduše nastavit jako na konvenčních obráběcích strojích. Při snaze maximalizovat rychlost obrábění je však třeba zachovat i požadovanou jakost obrobeného povrchu. Z toho důvodu je nutné optimalizovat nastavení řídících parametrů stroje s přihlédnutím k topografickým parametrům obrobených povrchů.

Obecně lze říci, že technologie elektroerozivního obrábění přináší neustálý rozvoj v obrábění speciálních a nově vznikajících materiálů, které lze jen velice obtížně (nebo vůbec) obrábět pomocí konvenčních technologií. Z tohoto důvodu lze očekávat nekončící vývoj této technologie ať už směrem ke snižování energetické náročnosti procesu, zvyšování přesnosti obrábění či zvyšování jakosti obrobených povrchů.

# 1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem dizertační práce je optimalizace řídících parametrů stroje pro elektroerozivní drátové obrábění s důrazem na zvýšení efektivity obrábění v podobě maximalizace řezné rychlosti a jakosti povrchu. Dílčími cíly řešenými v této disertaci jsou optimalizace řídících parametrů elektroerozivního stroje pro výrobu svařovacích elektrod z čistého molybdenu a optimalizace obrábění niklové superslitiny B1914. Postup při řešení práce bude tvořen následujícími kroky:

- provedení rešeršní studie elektroerozivního obrábění,
- provedení rešeršní studie týkající se optimalizace řídících parametrů stroje,
- návrch vhodných plánovaných experimentů,
- stanovení a změření hlavních odezev pro jednotlivé běhy plánovaných experimentů,
- sestavení regresních modelů pro rychlost řezání a parametry topografie povrchu a jejich následné ověření,
- nalezení optimálního nastavení řídících parametrů stroje.

Jednotlivé kroky budou realizovány na dostupných zařízeních na Ústavu automatizace a informatiky při Vysokém učení technickém v Brně nebo na CEITEC VUT v Brně.

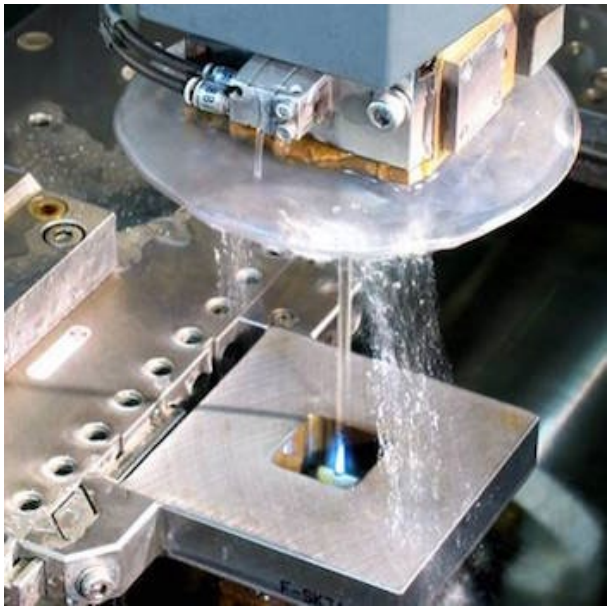
# 2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

## 2.1 Technologie elektroerozivního obrábění

Elektroerozivní obrábění (EDM) je široce využívaná nekonvenční technologie obrábění materiálu, která se používá k výrobě součástí složitých tvarů. Je považována za jedinečnou adaptaci klasického elektroerozivního procesu, která používá elektrodu pro inicializaci procesu erodování. Elektroerozivní drátové řezání (WEDM) však využívá nepřetržitě odvíjející se drátovou elektrodu vyrobenou z mosazi, mědi nebo wolframu o průměru 0,02 až 0,3 mm, která je schopna dosáhnout velmi malých vnitřních rohových poloměrů. Drát je udržován napnutý pomocí mechanického napínacího zařízení, což snižuje tendenci vytváření nepřesných částí. Během procesu WEDM dochází k erozi materiálu před drátovou elektrodou. K přímému kontaktu mezi obrobkem a drátem nikdy nedojde, což eliminuje mechanické namáhání během obrábění. Dále je proces WEDM schopen obrábět speciální materiály a materiály s vysokou pevností či teplotní odolností a eliminovat geometrické změny, ke kterým dochází při obrábění tepelně zpracovaných materiálů [1,2].

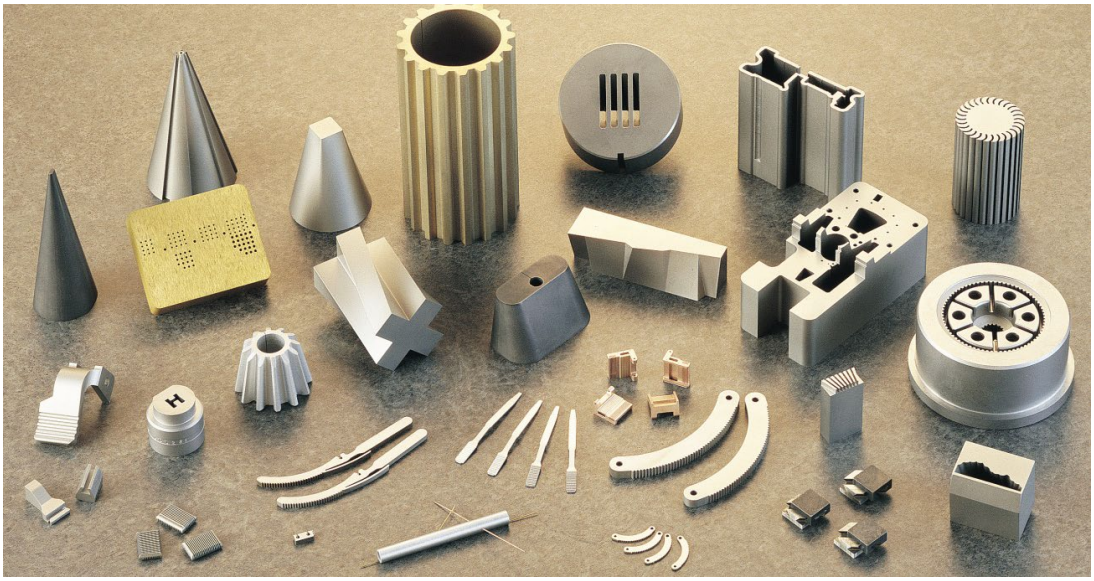
Technologie WEDM byla poprvé představena ve zpracovatelském průmyslu v pozdních šedesátých letech. Vývoj tohoto procesu byl výsledkem hledání techniky nahrazující nutnost vyrábět elektrody nutné v EDM obrábění. V roce 1974 využil D. H. Dulebohn systém sledování optických linek k automatickému řízení tvaru součásti, která měla být obráběna procesem WEDM [3]. V roce 1975 se popularita elektroerozivního drátového řezání rychle zvyšovala, neboť tento proces a jeho schopnosti byly v jednotlivých průmyslových odvětvích lépe pochopeny [4]. Teprve koncem sedmdesátých let byl do systému WEDM zabudován počítačem číslicově řízený systém (CNC), který přinesl zásadní vývoj této technologie, v důsledku čehož byly rozsáhlé možnosti tohoto procesu značně využívány pro jakékoliv obrábění. Mezi běžné aplikace WEDM patří výroba střižných a ohýbacích nástrojů, přípravků a měřidel, zdravotnických součástí a nástrojů. Dále je tato nekonvenční technologie nepostradatelná v automobilním, armádním či leteckém průmyslu.

Mechanismus odstraňování materiálu v průběhu elektroerozivního drátového řezání je velmi podobný konvenčnímu procesu EDM zahrnujícímu erozní účinek vyvolaný elektrickými výboji. V průběhu drátového řezání (obrázek 1) je materiál obrobku erodován sérií elektrických impulzů, které se vyskytují mezi obráběným dílem a drátem a jsou odděleny proudem dielektrické kapaliny, která je nepřetržitě přiváděna do místa řezu. Dnešní proces WEDM se však běžně provádí na obrobcích, které jsou zcela ponořeny do nádrže s dielektrickou kapalinou. Tato metoda podporuje stabilizaci teploty a účinné vyplachování, zejména v případech, kdy obrobek má různou tloušťku. Proces drátového řezání využívá elektrickou energii, která vytváří kanál plazmatu mezi katodou a anodou (obrobek – drátová elektroda) a přemění ji na tepelnou energii při teplotě 10 000 - 20 000 °C [5]. Eroze a tavení materiálu je inicializováno na povrchu každého pólu, jak na obrobku, tak i na drátu, proto není možné jej použít vícekrát. Když je zdroj napětí vypnut, plazmový kanál se rozpadne. To způsobuje náhlé snížení teploty, umožňující cirkulující dielektrické kapalině vyplachovat roztavené částice z pólových povrchů ve formě drobných kuliček [6].



Obr. 1. Technologie elektroerozivního drátového řezání [7].

Zatímco mechanismy odstraňování materiálu EDM a WEDM jsou podobné, jejich funkční charakteristiky nejsou totožné. WEDM používá tenký vodič nepřetržitě se odvíjející, který umožňuje obrábět složité tvary s mimořádně vysokou přesností. Obráběné povrchy mohou mít různé stupně kuželovitosti v rozmezí od 15° pro tloušťku do 100 mm až 30° u obrobku o tloušťce do 400 mm. WEDM eliminuje potřebu komplikovaných tvarovaných elektrod, které jsou běžně vyžadovány v EDM k provádění hrubovacích a dokončovacích operací. V případě drátového řezání musí drát provádět několik obráběcích řezů podél profilu, který má být obroben, aby byla dosažena vysoká rozměrová přesnost a co možná nejvyšší jakost obrobeného povrchu.

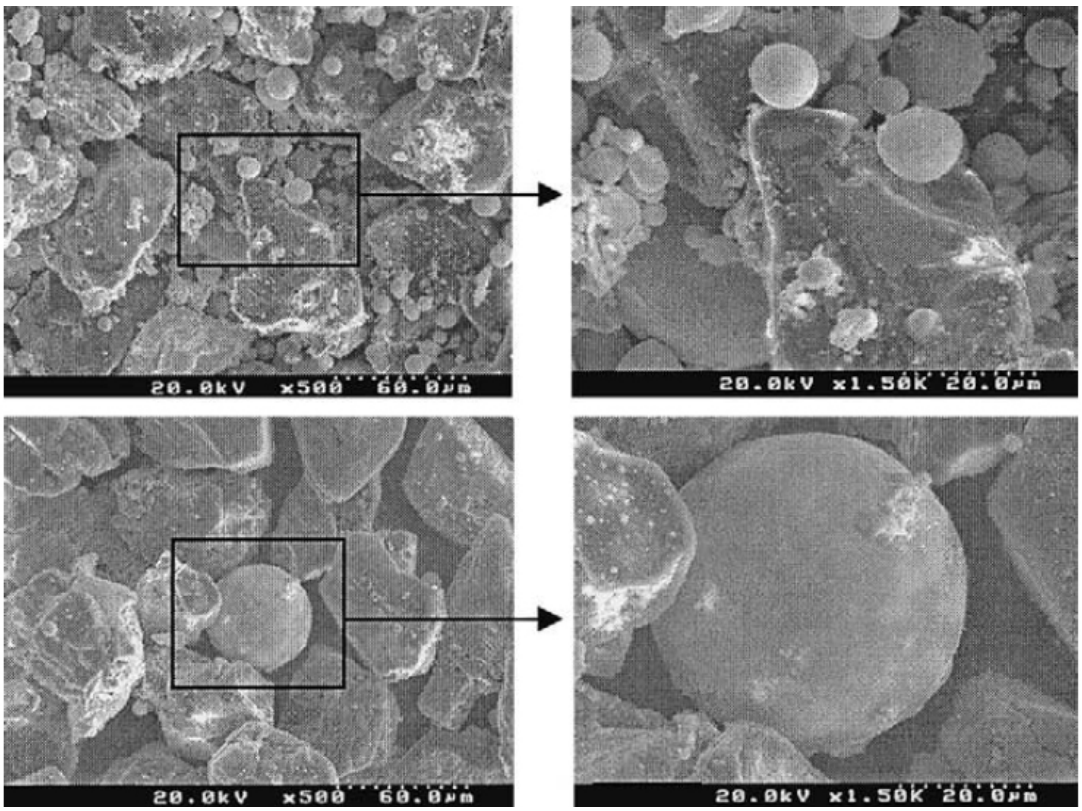


Obr. 2. Součásti obrobené pomocí WEDM [8].

Ačkoliv parametry nastavení stroje jsou významným faktorem tak právě materiálové charakteristiky obrobku definují výslednou kvalitu povrchové a podpovrchové oblasti. Jakost povrchu a výskyt defektů (trhliny, vypálené kavity) ovlivňuje soubor fyzikálních a mechanických charakteristik obráběného materiálu včetně druhu jeho dodatečného tepelného zpracování. Využívání plného potenciálu technologie elektroerozivního drátového řezání je však velmi obtížné vzhledem k velkému množství možných měnících se parametrů.

## 2.2 Výroba moderních nástrojů

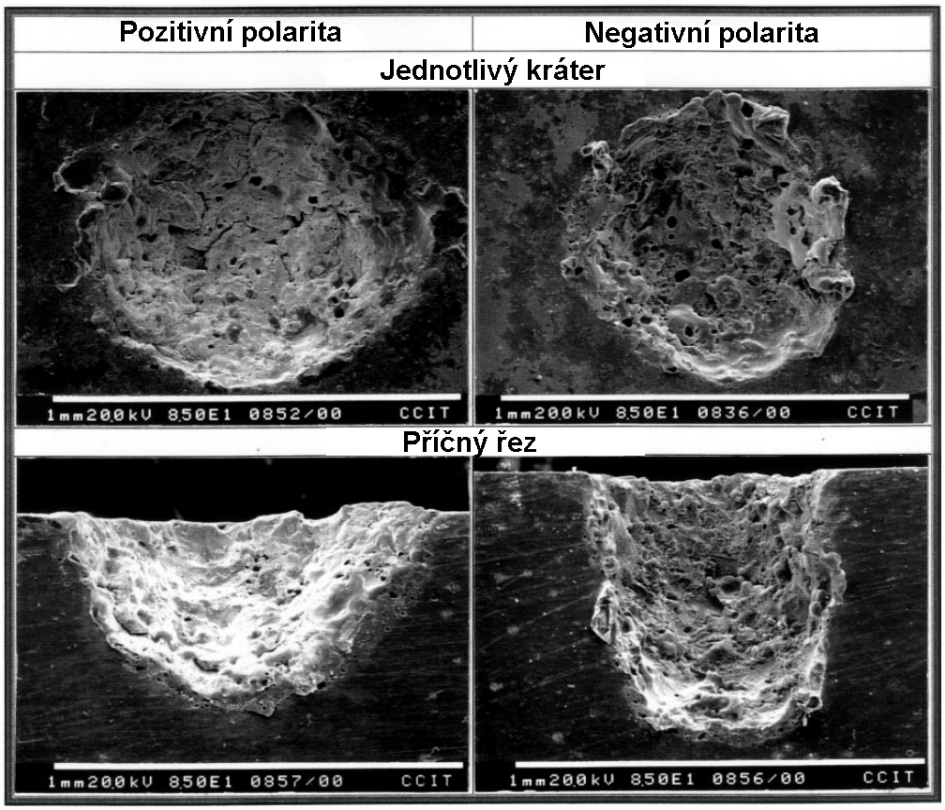
Elektroerozivní drátové řezání získalo široké využití při obrábění různých materiálů používaných pro výrobu moderních nástrojů. Několik autorů [9,10] prozkoumalo výkon obrábění WEDM při obrábění křemíku a lisovacích nástrojů ze slinutého karbidu. Byla rovněž studována proveditelnost použití válcového WEDM pro výrobu brousicího diamantového kotouče používaného pro přesné broušení keramiky [11]. Výsledky ukazují, že proces WEDM je schopen vytvářet přesné a tvarově složité profily s malými rohovými poloměry, ale během prvního broušení je na diamantovém kotouči pozorována vysoká míra opotřebení. Taková počáteční vysoká míra opotřebení kotoučů je způsobena nadměrně vystupujícími diamantovými zrny, která po WEDM obrábění nejsou pevně spojena s kotoučem (obrázek 3) [12]. Drátové řezání permanentních NdFeB a "měkkých" MnZn feritových magnetických materiálů používaných v miniaturních systémech, který vyžadují malé magnetické části, bylo studováno a porovnáno s procesem laserového řezání [13,14]. Bylo zjištěno, že proces WEDM poskytuje lepší rozměrovou přesnost a kvalitu obrobeného povrchu, ale má pomalou rychlost řezání, 5,5 mm/min pro NdFeB a 0,17 mm/min pro MnZn ferit.




Obr. 3. SEM snímek vyerodovaného materiálu po WEDM, který ulpěl na povrchu diamantového brousicího kotouče [12].

## 2.3 Obrábění kompozitních materiálů

Mezi procesy řezání různých materiálů se WEDM považuje za efektivní a šetrný nástroj při obrábění moderních kompozitních materiálů. Bylo provedeno několik srovnávacích studií [14,15,16] mezi WEDM a laserovým řezáním při obrábění kompozitů s kovovou matricí, karbonového vlákna a vyztužených polymerních kompozitů z tekutých krystalů. Tyto studie ukázaly, že elektroerozivní drátové řezání dosahuje vyšší kvality obrobených povrchů a má lepší kontrolu nad parametry procesu s menšími poškozeními povrchových vrstev. Má však pomalejší rychlost úběru materiálu pro všechny testované kompozitní materiály. Gadalla [17] a Jangra [18] porovnali WEDM s konvenčním řezáním diamantovým kotoučem a zjistili, že vytváří jakost povrchu a tvrdost, která je srovnatelná s nízko-rychlostní pilou s diamantovým kotoučem, ale s vyšší rychlostí úběru materiálu.

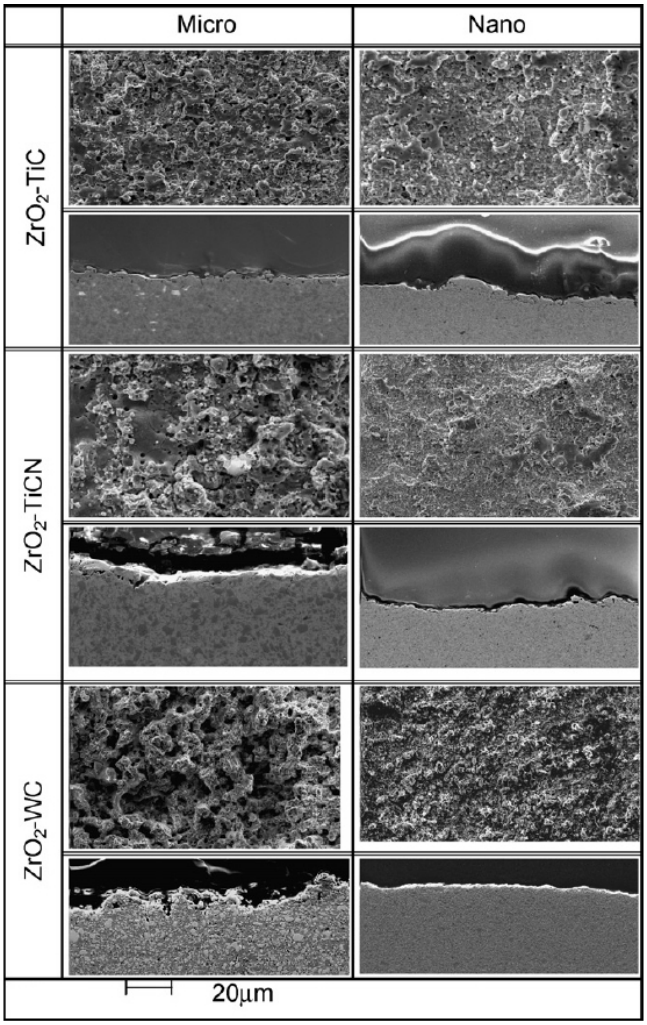



Obr. 4. SEM snímek jednotlivých kráterů, které byly ovlivněny změnou polarity elektrody a obrobku z $Al_2O_3$/6061Al [19].

Yan a kol. [19] sledoval různé obráběcí procesy prováděné na kompozitech s kovovou matricí a experimentoval s obráběním kompozitu $Al_2O_3$/6061Al pomocí rotačního EDM spojeného s elektrodou ve tvaru disku. Dále také u těchto materiálů studoval vliv polarity (elektroda-obrobek) na jednotlivém kráteru, což je znázorněno na obrázku 4. Další studie [20,21] byly provedeny za účelem zkoumání elektroerozivního drátového řezání kompozitů vyztužených částicemi $Al_2O_3$, které zjišťovaly vliv parametrů procesu na výkonnostní opatření WEDM. Bylo zjištěno, že parametry procesu mají malý vliv na jakost povrchu, ale současně mají výrazný negativní dopad na rychlost řezání.

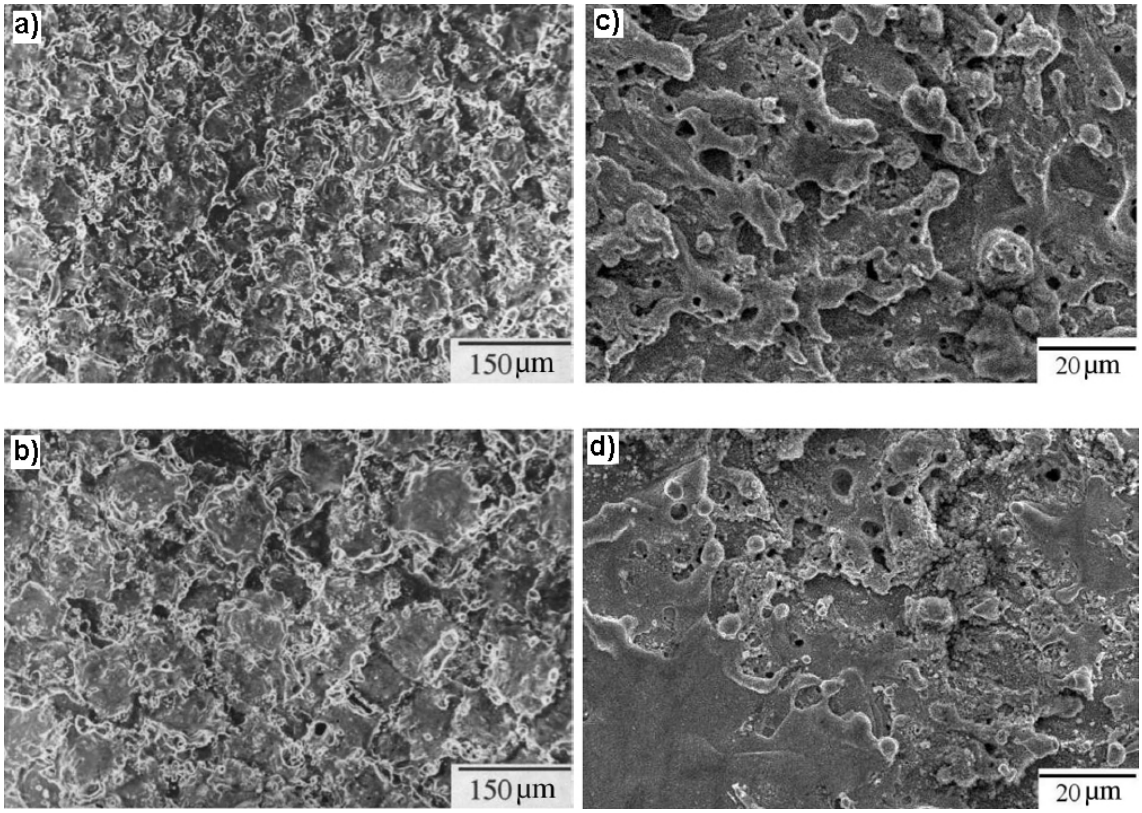
## 2.4 Pokročilé keramické materiály

WEDM obrábění se také vyvinulo jako jedna z nejslibnějších alternativ pro obrábění moderních keramických materiálů. Sanchez a kol. [22] poskytl průzkum literatury o elektroerozivním hloubení pokročilé keramiky, která byla běžně obráběna broušením diamantovým kotoučem a lapováním. Ve stejné publikaci studovali proveditelnost obrábění karbidu boru ($B_4C$) a karbidu křemíku infiltrovaného křemíkem (SiSiC) za použití EDM a WEDM. Cheng a kol. [23] také zhodnotili možnost obrábění materiálů na bázi $ZrB_2$ za použití EDM a WEDM, zatímco Matsuo a Oshima [24] zkoumali efekty obsahu vodivého karbidu, a to karbidu niobu (NbC) a karbidu titanu (TiC), na rychlost řezání a jakost povrchu zirkonové keramiky ($ZrO_2$) během WEDM. Lauwers [25] zkoumal chování WEDM u různých nově vyvinutých elektricky vodivých kompozitů z keramické matrice $ZrO_2$. Byl experimentálně studován vliv typu a velikosti zrna druhé fáze (WC, TiC a TiCN, z mikro−zrnných na nano-velikosti zrna) na rychlost úběru materiálu a získanou jakost povrchu, přičemž morfologie a příčný řez je znázorněn na obrázku 5. Experiment ukázal, že kolísáním zrnitosti materiálu druhé fáze je výrazně ovlivněn výkon WEDM, který může do značné míry souviset s mikrostrukturou a vlastnostmi vyvinutého materiálu.




Obr. 5. SEM snímek morfologie a příčných řezů vzorky vyrobených z jednotlivých materiálů [25].

Lok a Lee [26] úspěšně obrobili pomocí WEDM materiál sialon 501 ($Al_2O_3$-TiC). Dospěli však k závěru, že rychlost úběru materiálu je ve srovnání s řezáním kovů, jako je legovaná ocel SKD-11 velmi nízká a jakost obrobeného povrchu je obecně vyšší než jakost povrchu získaná procesem EDM. Kung [27] ve své studii hodnotil rychlost úběru materiálu (MRR) a jakost povrchu keramického materiálu na bázi oxidu hlinitého ($Al_2O_3$ + TiC) s tím, že byl zjištěn výrazný vliv parametru zapnutí pulzu ($T_{on}$) na MRR a parametru erodovací proud (I) na jakost obrobeného povrchu. Toto zjištění bylo znázorněno v podobě morfologií povrchů jednotlivých vzorků na obrázku 6.

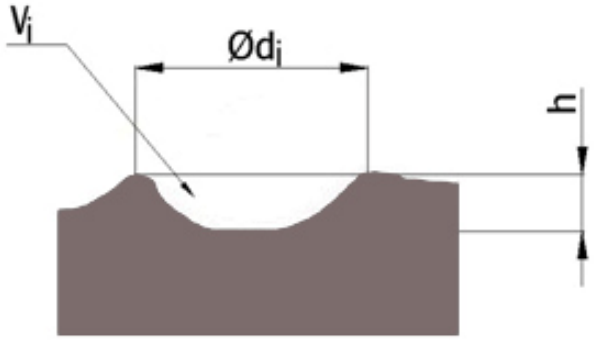



Obr. 6.SEM snímek morfologie a) a b) vliv parametru erodovací proud, c) a d) vliv parametru zapnutí pulzu [27].

## 2.5 Povrch po elektroerozivním drátovém řezání

Elektroeroze je termoelektrický děj, který procesem odebírání materiálu vytváří na obrobeném povrchu specifickou morfologii tvořenou množstvím kráterů. Tyto krátery vznikající po jednotlivých periodicky se opakujících elektrických výbojích jsou různých tvarů, a to v závislosti na nastavení parametrů stroje a souboru mechanických i fyzikálních vlastností obráběného materiálu. Vyerodovaný materiál je odplavován proudem dielektrické kapaliny, nicméně také dochází k jeho odpařování vlivem velmi vysokých teplot procesu (10 000 – 20 000 °C [6]). Morfologie povrchu a případné defekty jsou klíčové parametry určující výslednou jakost obrobeného povrchu, umožňující i jistou predikci životnosti a správné funkčnosti součásti.

Na obrázku 7 je znázorněn jediný kráter, jenž je definován rozměry Ød$_i$ a hloubkou h.




Obr. 7. Profil jediného kráteru.

Množství odebraného materiálu lze určit dle vztahu:

$$V_i = K \cdot W_i, \tag{1}$$

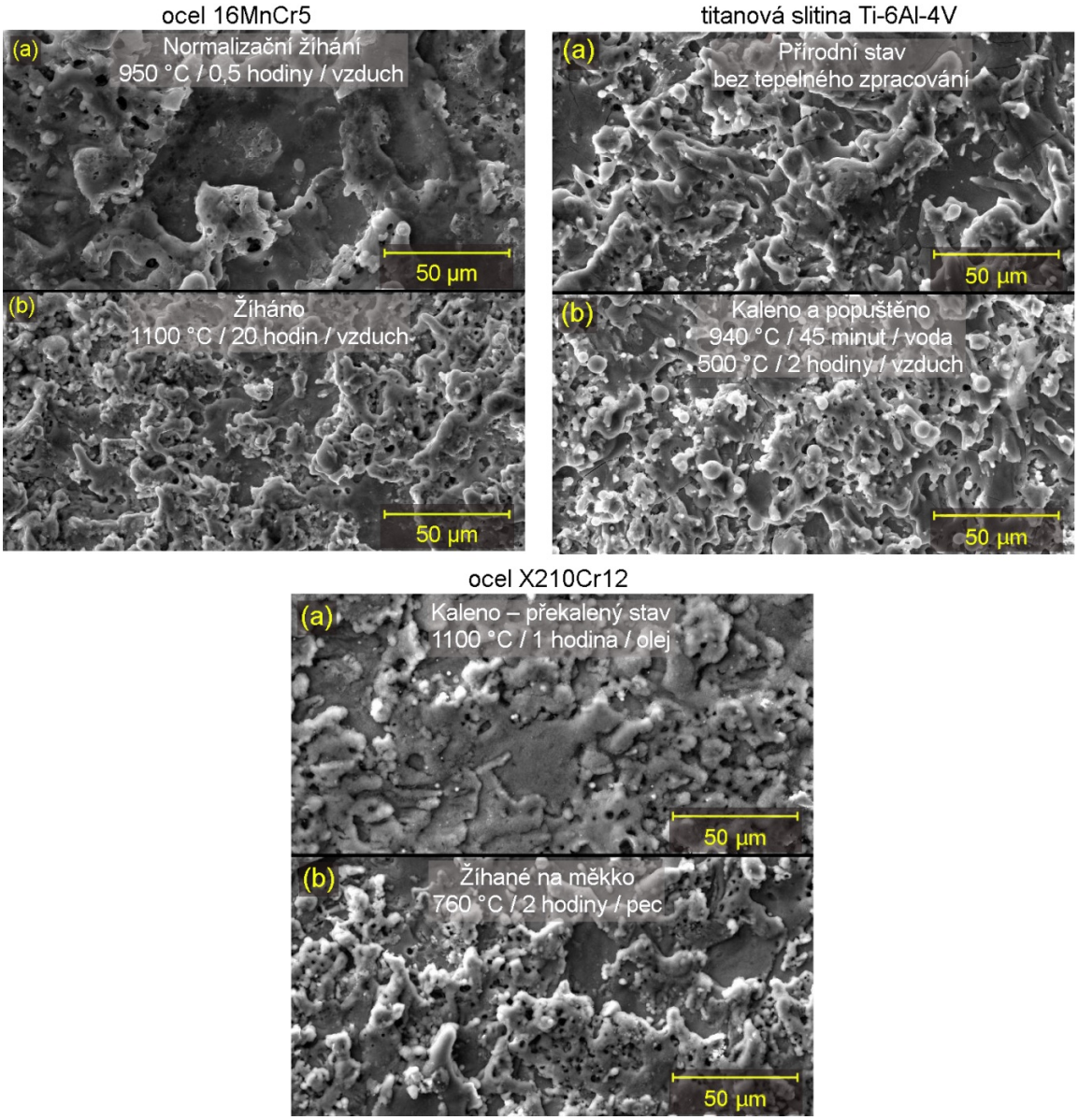
kde:$V_i$ je množství odebraného materiálu [mm$^3$], K je součinitel úměrnosti [mm$^3$·J$^{-1}$] a $W_i$ je energie výboje [J].

Energii výboje je možné určit ze vztahu:

$$W_i = \int_0^t U(t) \cdot I(t) \cdot dt, \tag{2}$$

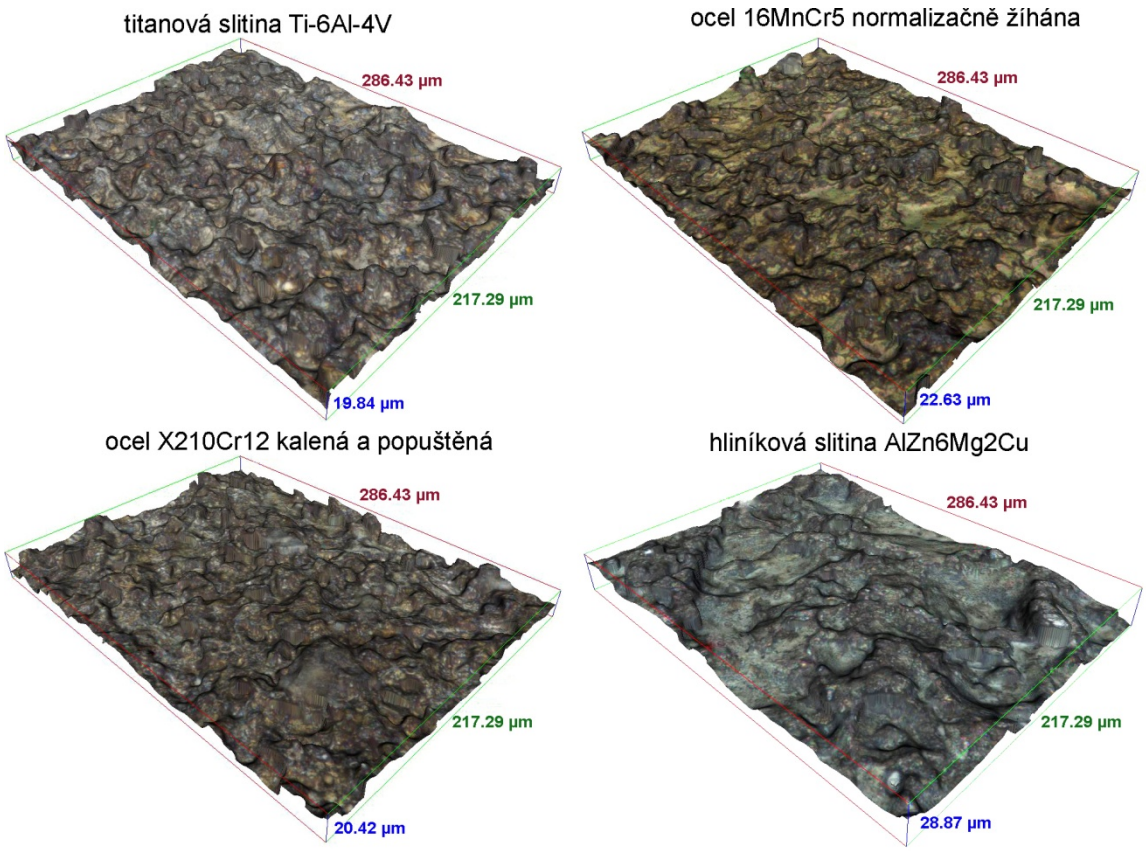
kde: U je mezerové napětí [V], I je erodovací proud [A] a t je délka trvání výboje [µs].

Je známo, že tvar a velikost jednotlivých kráterů závisí nejen na nastavení parametrů stroje a druhu obráběného materiálu ale i na druhu jeho tepelného zpracování, což bylo zkoumáno ve studii Mouralové [31]. Další autoři posuzovali však pouze vliv nastavení parametrů stroje a obráběný materiál, což byly např. Han [32], Li [33] nebo Hassan [35]. Na obrázku 8 jsou znázorněny příklady jednotlivých morfologií (tvarů kráterů) povrchů v závislosti na druhu obráběného materiálu a jeho odlišného tepelného zpracování.




Obr. 8. Rozdílný vzhled kráterů pro jednotlivé materiály a jejich tepelná zpracování, SEM (SE) [31].

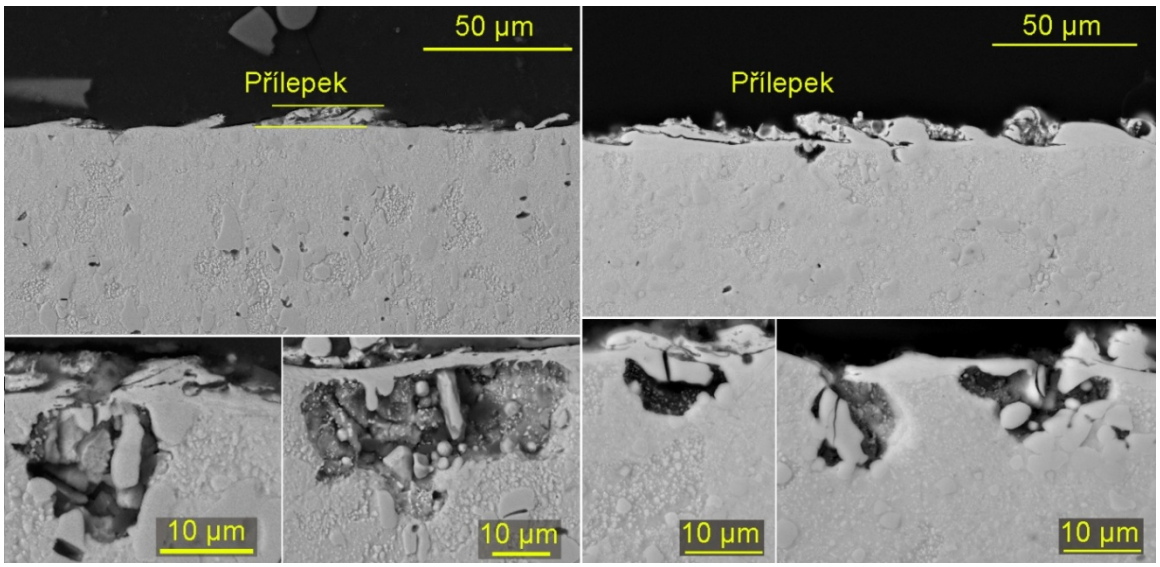
Nejen že vzhled a velikost kráterů je u jednotlivých materiálů a jejich tepelných zpracování odlišná ale také samotná výška výstupků a prohlubní je variabilní. To je dobře patrné na snímcích 3D reliéfů povrchů odlišných materiálů, které jsou znázorněny na obrázku 9. Právě tyto výškové rozdíly představují rozdíly v topografii povrchů, nejčastěji charakterizované parametrem střední aritmetické úchylky Ra a dalšími.




Obr. 9. Rozdílný vzhled 3D reliéfů povrchů jednotlivých materiálů [31].

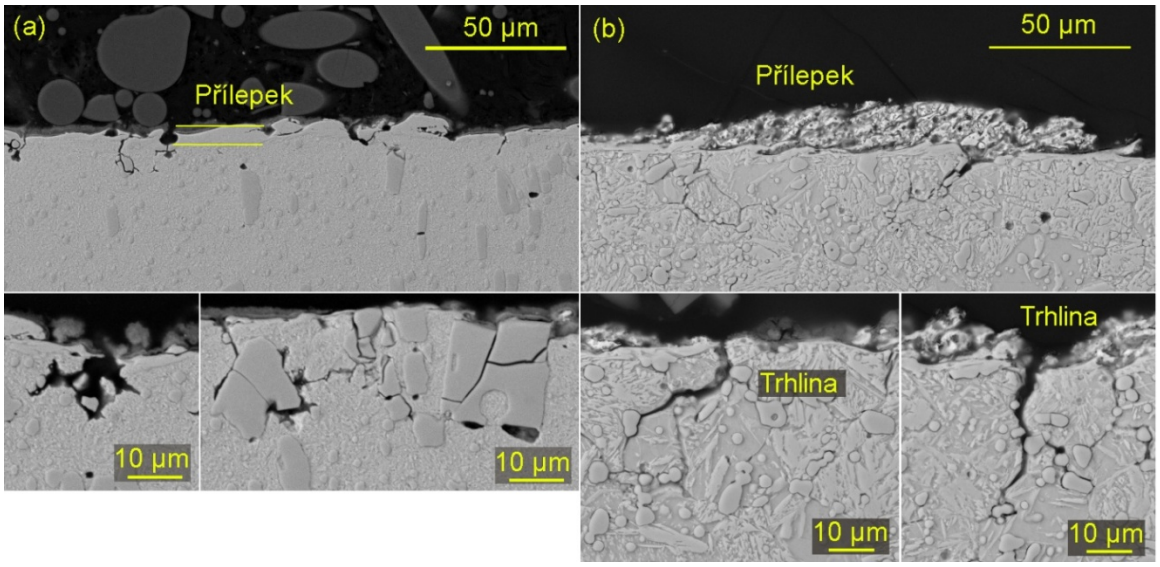
### 2.5.1 Vzhled podpovrchové vrstvy po WEDM a její defekty

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 obráběného materiálu. Tloušťka přílepku je závislá nejen na nastavení parametrů stroje, což je prezentováno ve studiích Newtona [36] a Puriho [37] ale také na druhu tepelného zpracování obráběného materiálu a také na směru řezu vůči orientaci vláken polotovaru, což bylo publikováno ve výzkumu Mouralové [34]. Dalším sledovaným faktorem jsou defekty v oblasti přílepku a v základním materiálu. 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 Hasçalýk [38]. Na těchto površích může dojít v kombinaci s působením zbytkového napětí k inicializaci zpožděných lomů a trhlin, jdoucích paralelně s povrchem řezu. Příklad takto vypálených kavit o rozměrech nad 15x15 µm je patrný z obrázku 10.




Obr. 10. Podpovrchové vypálené kavity na materiálu ocel X210Cr12 s tepelným zpracováním: 780 °C / 20 h / ochlazování v peci, SEM (BSE) [34].

Dalšími defekty, které vznikají v podpovrchové vrstvě po WEDM jsou různé druhy trhlin, jejichž příklady jsou znázorněny na obrázku 11. Např. trhliny procházející celým průřezem ledeburitických karbidů mají tendenci (v rámci karbidických shluků v řádcích) k masivnímu propojování, což je znázorněno na obrázku 11 (a). Kromě trhlin je na tomto obrázku znázorněn i výskyt několika míst s vypálenými kavitami, lokalizované pod zrnem. Dalším možným druhem defektů jsou trhliny vyskytující se na hranicích původních austenitických zrn, zasahující do hloubky až 40 µm, které významným způsobem porušují soudržnost podpovrchové vrstvy obrobku. Tyto trhliny jsou znázorněny na obrázku 11 (b).




Obr. 11. Podpovrchové defekty na materiálu ocel X210Cr12, SEM (BSE), (a) materiál s tepelným zpracováním kaleno a popuštěno, (b) materiál v překaleném stavu [34].

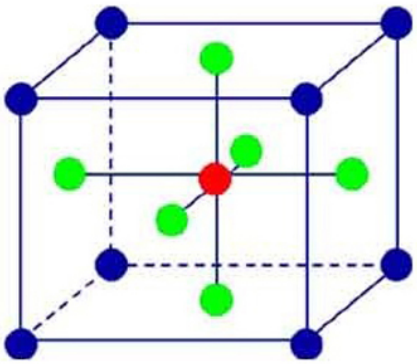
# 3 OPTIMALIZACE ŘÍDÍCÍCH PARAMETRŮ STROJE

Matematická optimalizace je výběr nejlepšího prvku, s ohledem na určité kritérium, z nějaké sady dostupných alternativ. V nejjednodušším případě spočívá problém optimalizace v maximalizaci nebo minimalizaci účelové funkce systematickým výběrem vstupních hodnot v rámci povolené sady a výpočtem hodnoty účelové funkce. Zobecnění teorie a technik optimalizace pro jiné formulace problému představuje rozsáhlou oblast aplikované matematiky. Obecněji optimalizace zahrnuje nalezení „nejlepších dostupných“ hodnot některé objektivní funkce dané definované domény (nebo vstupu), včetně řady různých typů objektivních funkcí a různých typů domén [39,40,41,42].

## 3.1 Plánovaný experiment

Plánovaný experiment (DoE), je návrh jakéhokoli systematického postupu, který si klade za cíl popsat nebo vysvětlit změnu odezvy při změně vstupních podmínek. Termín je obecně spojen s experimenty, ve kterých plán experimentu mění podmínky, které přímo ovlivňují změnu odezvy, ale může se také odkazovat na návrh kvazi-experimentů, ve kterých jsou pro pozorování vybrány přírodní podmínky, které právě tuto změnu ovlivňují [43].

DoE se ve své nejjednodušší formě zaměřuje na předpovídání výsledku experimentu při měnění vstupních předpokladů, která jsou popsány jednou nebo více nezávislými proměnnými, také označovanými jako „vstupní proměnné“ nebo „predikční proměnné“ (viz obrázek 12). Obecně se předpokládá, že změna jedné nebo více nezávislých proměnných má za následek změnu jedné nebo více závislých proměnných, také označovaných jako "výstupní proměnné" nebo "proměnné odezvy". Plánovaný experiment může také identifikovat kontrolní proměnné, které musí být udržovány konstantní, aby se zabránilo ovlivnění výsledků vnějšími faktory. Plánovaný experiment zahrnuje nejen výběr vhodných nezávislých, závislých a kontrolních proměnných, ale také plánování provedení experimentu za statisticky optimálních podmínek vzhledem k omezení a dostupnosti zdrojů. Existuje několik přístupů k určení sady návrhových bodů (jedinečné kombinace nastavení nezávislých proměnných), které mají být použity v plánovaném experimentu [44,45].



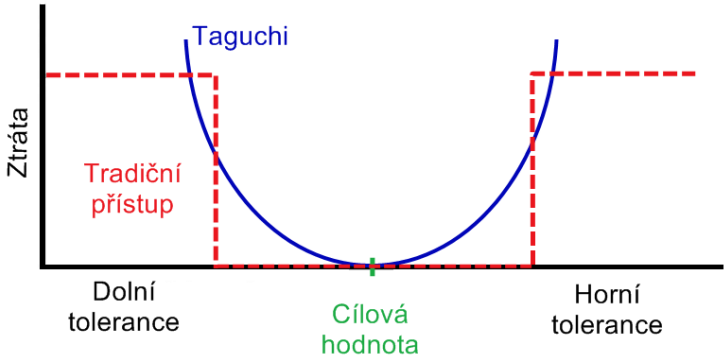
Obr. 12. Schéma systematického sběru dat (centrální kompozitní design) [46].

Hlavní obavy v plánovaném experimentu zahrnují stanovení platnosti, spolehlivosti a replikovatelnosti. Tyto obavy lze například částečně řešit pečlivým výběrem nezávislé

proměnné, snížením rizika chyby měření a zajištěním dostatečně podrobné dokumentace k metodě sběru dat [47].

Metodiku plánovaného experimentu navrhl Ronald Fisher ve svých knihách, jako byla Uspořádání experimentů v terénu (1926) a Návrh experimentů (1935). Velká část jeho průkopnické práce se zabývala zemědělskými aplikacemi statistických metod. Jako příklad popsal, jak otestovat hypotézu o chuti čaje s mlékem. Vycházel z předpokladu, že určitá dáma pozná pouze podle chuti, zda bylo do šálku nalito dříve mléko nebo čaj [48].

Japonský inženýr Genichi Taguchi navrhl několik přístupů k plánovaným experimentům, které se někdy nazývají „Taguchiho metody“, cílové hodnoty odezev jsou vyhodnocovány pomocí Taguchiho ztrátová funkce, která je znázorněna na obrázku 13. Tyto metody využívají dvou–, tří – a smíšené úrovně dílčích faktorových návrhů. Taguchi označuje plánovaný experiment jako „off-line kontrolu kvality“, protože se jedná o metodu zajištění dobrého výsledku ve fázi návrhu výrobků nebo procesů. Některé experimentální návrhy, například když jsou použity v evoluční operaci, však mohou být použity online během procesu. Taguchi představil několik pozoruhodných nových způsobů konceptualizace experimentu, které jsou velmi cenné, zejména v oblasti vývoje produktů a průmyslového inženýrství, jsou to konkrétně Parameter Design a Tolerance Design [49].




Obr. 13. Taguchiho ztrátová funkce a tradiční přístup [50].

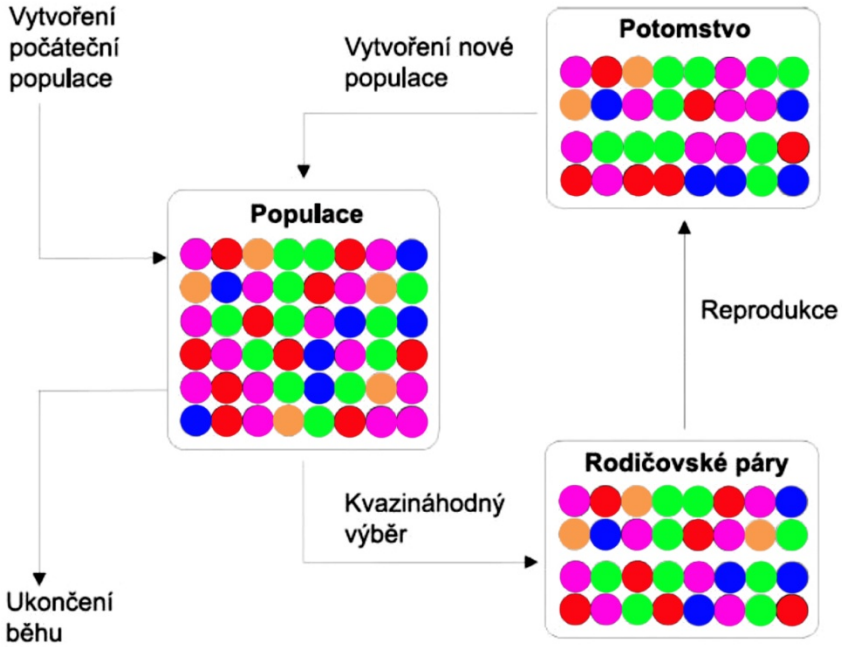
## 3.2 Evoluční a optimalizační výpočetní techniky

Evoluční výpočetní techniky (ECT) jsou algoritmy, které vycházejí ze základních principů Mendelovy a Darwinovy teroie evoluce. Hlavní ideou je zde předávání rodičovského genomu novým potomkům včetně následného uvolnění prostoru pro život těmto potomkům. Technologie evoluční výpočetní techniky je závislá na existenci tzv. evolučních algoritmů. Evoluční algoritmy (EA) představují netradiční přístup při hledání optimálního řešení složitých optimalizačních problémů, které nejsou, či velmi obtížně, řešitelné klasickými technikami. EA v současnosti patří mezi základní nástroje moderní informatiky v případech hledání řešení v extrémně složitých situacích, kdy použití standardních deterministických metod založených na technikách úplného prohledávání není možné nebo velmi časově náročné. Ukazuje se, že evoluční metafora je velmi efektivním přístupem k řešení těchto složitých problémů, a to zejména v případech, kdy nepotřebujeme optimální řešení problému, ale plně postačí i kvalitní suboptimální řešení [51,52].

### 3.2.1 Genetické algoritmy

Genetický algoritmus (GA) je metoda řízeného náhodného vyhledávání, kterou vynalezl Holland [53] v roce 1975, a která může najít globální optimální řešení ve složitých vícerozměrných vyhledávacích prostorech. GA je modelován na základě přirozeného vývoje tak, že operátory, které používá, jsou inspirovány procesem přirozeného vývoje. Tyto operátory, známé jako genetické operátory, manipulují s jednotlivci v populaci po několik generací, aby postupně zlepšovaly jejich kondici. Jednotlivci v populaci jsou přirovnáváni k chromozómům a obvykle jsou představováni jako řetězce binárních čísel [54,55].

Vývoj populace jednotlivců je řízen tzv. „schematickou větou“. Schéma představuje sadu jednotlivců, tj. podmnožinu populace, pokud jde o podobnost bitů na určitých pozicích těchto jednotlivců. Například schéma 1 * 0 * popisuje sadu jednotlivců, jejichž první a třetí bit jsou 1, respektive 0. Zde symbol * znamená, že by byla přijatelná jakákoli hodnota. Jinými slovy, hodnoty bitů na pozicích označených * mohou být v binárním řetězci buď 0 nebo 1. Schéma (viz obrázek 14) se vyznačuje dvěma parametry: definováním délky a pořadí. Definující délka je délka mezi prvním a posledním bitem s pevnými hodnotami. Pořadí schématu je počet se zadanými hodnotami. Podle věty o schématu závisí distribuční schéma v populaci z jedné generace na druhou na pořadí, definování délky a vhodnosti. GA nepotřebují mnoho znalostí o problému, který má být optimalizován, ale zabývají se přímo parametry jeho problému. Pracují s kódy, které představují parametry. Prvním problémem v aplikaci GA tedy je, jak problém kódovat a jak reprezentovat parametry problému. GA pracují s populací možných řešení, nejen s jedním možným řešením. Druhým problémem je proto to, jak vytvořit počáteční populaci možných řešení. Třetím problémem v aplikaci GA je, jak vybrat nebo navrhnout vhodnou sadu genetických operátorů. A konečně, stejně jako u jiných vyhledávacích algoritmů, GA ohodnotí kvalitu již nalezených řešení a mohou je dále vylepšovat. Proto je potřeba rozhraní mezi problémovým prostředím a samotným GA, aby GA tyto znalosti měl [56,57,58].




Obr. 14. Schéma genetického algoritmu [59].

### 3.2.2 Evoluční strategie

Současně s vývojem genetických algoritmů vznikala i tzv. Evoluční strategie (ES). První aplikace tohoto algoritmu byly v Evropě v 60. letech zaměřeny na problémy funkčního designu z oblasti strojního inženýrství. ES byly vyvinuty v několika různých variantách, přičemž první byly tzv dvoučlenné (two-membered ES), následovaly vícečlenné (multi–membered ES), sebeadaptivní (self-adaptive ES), rekombinativní (recombinative ES) atd. Jedotlivé evoluční strategie lze blíže specifikovat:

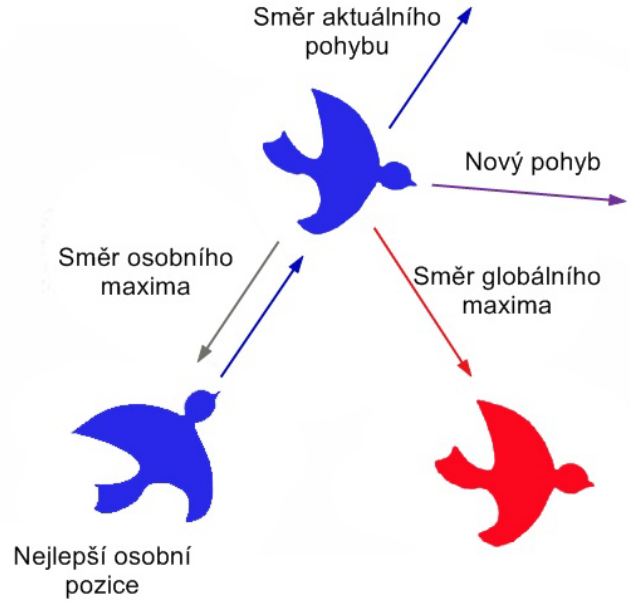
- dvoučlenné – pracuje s jedním jedincem (rodičem) z něhož užitím Gaussova mutačního operátoru vytvoří nového potomka,
- vícečlenné – do nové rodičovské populace jsou vybírani jak rodiče, tak potomci na základě dosažené vhodnosti,
- sebeadaptivní – oblast řešení nemusí být předem známa, přičemž přesnost optimálního řešení může být požadována vysoká,
- rekombinační – rekombinací několika rodičů je vytvořen výsledný potomek.

Evoluční strategie se od genetických algoritmů liší především v tom, že ES používají reprezentaci jedinců v oboru reálných čísel místo používání binárních a také ES vyuužívají pouze operátory selekce a mutace [51,60].

### 3.2.3 Rojení částic

Rojení částic (Particle swarn) pracuje s populacemi a inspiruje se především sociálním chováním živočišných společenstev, jako jsou rybí nebo ptačí hejna. Populace náhodných řešení inicializuje systém obdobně jako u genetických algoritmů a hledá tak optimální řešení pomocí vytváření nových a současně lepších generací. Optimalizační technika rojení částic (PSO) však nevyužívá žádné logické operátory, jak je tomu u GA. Potenciální řešení obsahující částice a jedince následují v řešeném prostoru trajektorie těch částic, které jsou nejvhodnější [51,61,62].

Princip této optimalizační techniky lze nejlépe vysvětlit na chování ptačího hejna, kde předpokládáme následující scénář: Hejno ptáků pátrá po nejvyšším vrcholku v dané oblasti, přičemž neví, kde se vrchol nachází ale po každé interaci ví, že nějaký pták našel dosud nejvyšší místo. Nejlepší strategií by tedy bylo zaměřit se na ptáka, který se nachází v nejvyšší nadmořské výšce. PSO využívá k řešení optimalizačních úkolů právě tohoto scénáře, přičemž každé jednotlivé řešení daného problému je připodobněno ptáku ve vyhledávacím prostoru – oblasti. Jednotlivé částice jsou definovány souřednicemi ve vyhledávacím prostoru, přičemž si pamatují jejich dosud nejlepší pozici. Jejich rychlost je usměrňována kontrolována, přičemž každému jedinci je vygenerován vektor rychlosti, určující, kterým směrem se v následujícím kroku chce vydat (viz obrázek 15). Nejlepší pozice je nakonec vyhodnocena jako ta, která po dosazení do účelové funkce dává výsledek nejvyšší nebo naopak nejnižší požadovanou hodnotu a tím prokáže svoji vhodnost [51,63,64].




Obr. 15. Schematické znázornění aktualizace rychlosti částice [65].

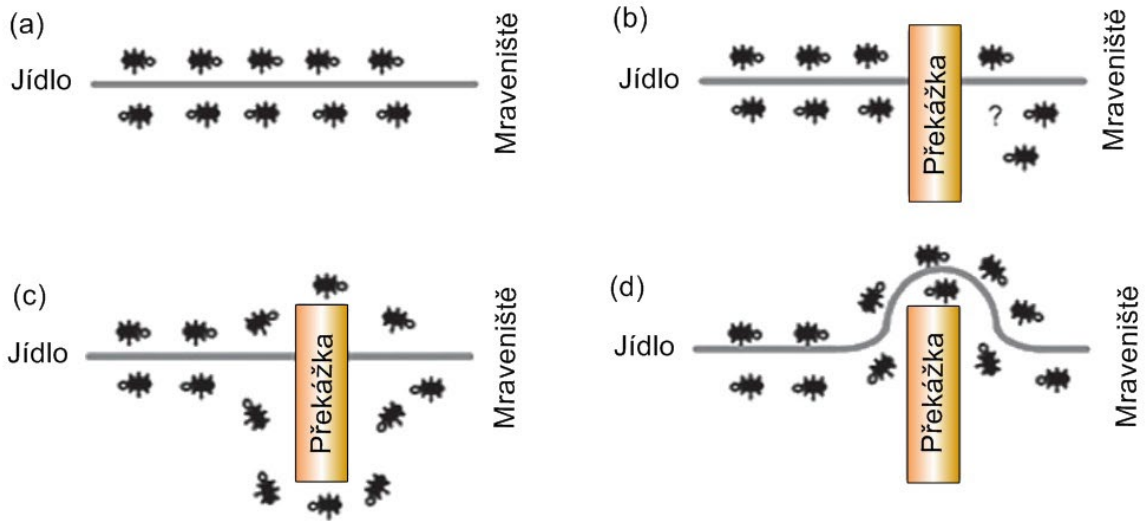
Optimalizace EDM obrábění pomocí Roje částic byla provedena v několika studiích, jako například Aich [66], Prakash [67], Dang [68] nebo Saffaran [69], přičemž v těchto studiích byly optimalizovány hodnoty parametrů obrábění, jako je proud či napětí při obrábění různých materiálů. Výsledkem těchto optimalizací bylo vždy zvýšení jakosti obrobeného povrchu a zvýšení MRR.

I při WEDM bylo dosaženo pomocí Roje částit několika optimalizačních úspěchů, a to především při obrábění materiálu Udimet-L605 [70], oceli AISI D3 [71], hliníkové slitiny AA7075 [72] nebo niklové slitiny Inconel 718 [73].

### 3.2.4 Optimalizace mravenčí kolonií

Kolonie mravenců, obecněji sociální společenstva hmyzu, jsou distribuované systémy, které navzdory jednoduchosti svých jednotlivců představují vysoce strukturovanou sociální organizaci. V důsledku této organizace mohou mravenčí kolonie plnit složité úkoly a v některých případech daleko překračují individuální možnosti jediného mravence. Obor „mravenčích algoritmů“ studuje modely odvozené z pozorování skutečných chování mravenců a používá tyto modely jako zdroj inspirace pro návrh nových algoritmů pro řešení problémů optimalizace a distribučního řízení. Hlavní myšlenkou je, že samoorganizující se principy, které umožňují vysoce koordinované chování skutečných mravenců lze využít ke koordinaci populací umělých agentů, kteří spolupracují na řešení výpočetních problémů. Několik různých aspektů chování mravenčích kolonií inspirovalo různé druhy mravenčích algoritmů. Příklady jsou např. hledání potravy, dělba práce, třídění plodů či kooperativní doprava. Všechny tyto aktivity mravenci koordinují prostřednictvím stigmergie, což je forma nepřímého komunikace zprostředkovaná úpravami prostředí. Například umístěním feromonu na zem, mravenec zvyšuje pravděpodobnost, že ostatní mravenci budou následovat stejnou cestu. Biologové prokázali, že chování kolonií sociálních druhů hmyzu lze vysvětlit pomocí poměrně jednoduchých modelů, ve která je přítomna pouze stigmergická komunikace. Jinými slovy, biologové ukázaly, že často stačí rozluštit nepřímou

stigmergickou komunikaci k dosažení vysvětlení toho, jak může sociální hmyz dosáhnout sebeorganizace. Smysl mravenčích algoritmů je pak možné použít jako formu umělé stigmerie ke koordinaci umělých společenstev agentů. Jeden z nejúspěšnějších příkladů mravenčích algoritmů je známý jako optimalizace mravenčí kolonií (ACO). ACO je inspirováno chováním při shánění potravy mravenčích kolonií (viz obrázek 16) a zaměřuje se na diskrétní optimalizační problémy [74,75].




Obr. 16. (a) cesta mravenců za potravou, která je bez překážek, (b) do cesty byla mravencům umístěna překážka, (c) mravenci obcházejí překážku a chodí za potravou delší i kratší cestou, (d) všichni mravenci obchází překážku kratší cestou [76].

Schopnost vizuálního vnímání je u mnoha druhů mravenců vyvinuta pouze základní a existují druhy mravenců, které jsou úplně slepé. Nejdůležitější objev v chování mravenců spočíval v tom, že většina komunikace mezi jednotlivci, nebo mezi jednotlivci a prostředím, byla založena na použití chemických látek produkovaný mravenci. Tyto chemikálie se nazývají feromony. To se liší například od toho, co se děje u lidí a u jiných větších druhů, jejichž nejdůležitější smysly jsou vizuální nebo akustické. Obzvláště důležitý pro společenský život některých druhů mravenců je stopový feromon. Stopový feromon je specifický typ feromonu, který některé druhy mravenců používají pro značení cest, například cest od zdrojů potravy zpět do mraveniště. Snímáním feromonových stezek může mravenec sledovat cestu k jídlu objevenou jinými mravenci. Toto kolektivní pokládání stezek a jejich stopování jsou inspirujícím zdrojem pro ACO [74,77].

Jediná studie, která aplikuje optimalizaci pomocí mravenčí kolonie do WEDM procesu je od Mukherjee [78]. Ta současně porovnává vhodnost několika optimalizačních technik pro WEDM avšak použití ACO se neukázalo být příliš vhodné pro řešení tohoto typu problému.

### 3.2.5 Bio-geografická optimalizace

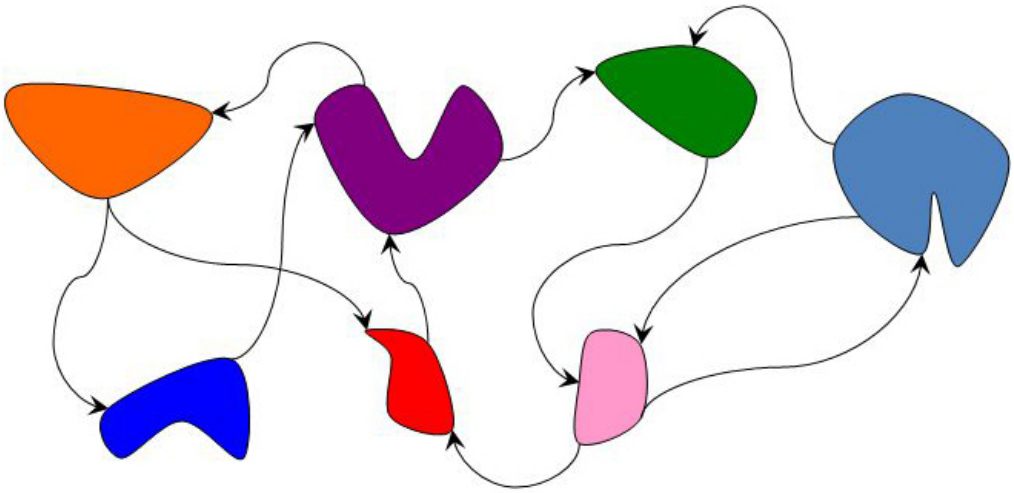
Biogeografie je věda, která studuje distribuci druhů a ekosystémů v geografickém prostoru a v čase. Obvykle se považuje za podmnožinu fyzické geografie, protože často souvisí se studiem fyzického prostředí a s tím, jak ovlivňuje druhy a formuje jejich distribuci v prostoru. Týká se to nejen vzorů míst výskytu, ale také faktorů odpovědných za variace

distribuce. Jejím cílem je analyzovat, kde druhy žijí a v jakém množství. Biogeografie má silné vazby na biologii, ekologii, evoluci, klimatologii a vědu o půdě [79].

Biogeografie se nejvíce soustředí na ostrovy. Ostrovy jsou snadno zvládnutelné oblasti studia, protože jsou zhuštěnější než větší ekosystémy na pevnině. Ostrovy jsou také atraktivním místem pro studium, protože vědcům umožňují podívat se na stanoviště, která nové invazivní druhy kolonizovaly teprve nedávno, a sledovat, jak se na celém ostrově rozptylují a mění jej. Vědci pak mohou aplikovat své znalosti na podobná, ale složitější stanoviště na pevnině. Ostrovy jsou ve svých biomech velmi různorodé, od tropického až po arktické podnebí. Tato rozmanitost umožňuje širokou škálu studií druhů v různých částech světa [79,80].

Matematické modely ostrovní bio-geografie popisují speciaci (evoluční proces vzniku nových biologických druhů), migraci druhů mezi ostrovy a vyhynutí druhů. Pojem ostrov je zde spíše popisný než doslovný. Za ostrov se považuje jakékoli stanoviště, které je geograficky izolované od ostatních stanovišť. V klasickém slova smyslu je ostrov izolován od ostatních stanovišť vodou. Ostrovy však mohou být také stanoviště – izolované úseky pouště, řek, pohoří, predátorů, uměle vytvořených artefaktů nebo jiných překážek. Například ostrov může sestávat z břehu řeky, který podporuje byliny, nebo z rybníka, který podporuje hmyz [81].

Zeměpisné oblasti, které jsou přátelské k životu, mají vysoký index vhodnosti pro výskyt (HSI). Mezi funkce, které korelují s HSI, patří faktory jako srážky, vegetativní rozmanitost, topografická rozmanitost, rozloha pevniny a teplota vzduchu. Tyto vlastnosti, které charakterizují obyvatelnost, se nazývají proměnné indexu vhodnosti (SIV). Pokud jde o obyvatelnost, SIV jsou nezávislé proměnné stanoviště a HSI je závislá proměnná. Ostrovy s vysokou HSI mají tendenci podporovat mnoho druhů a ostrovy s nízkou HSI mohou podporovat pouze několik druhů. K emigraci z ostrova s vysokým HSI nedochází, protože druhy nechtějí opustit svůj domov; domácí ostrov je atraktivní místo pro život. Důvodem emigrace z těchto ostrovů je hromadění náhodných účinků na velký počet druhů s velkou populací. K emigraci dochází, když zvířata plavou nebo létají na sousední ostrovy. Když druh emigruje z ostrova, tento druh z ostrova úplně nezmizí; emigruje jen několik zástupců, takže emigrující druh zůstává na svém domovském ostrově a současně migruje na sostrov ousední. Ostrovy s vysokou úrovní HSI mají nejen vysokou míru emigrace, ale také nízkou míru imigrace, protože již podporují mnoho druhů. Druhy, které dorazí na takové ostrovy, budou mít tendenci nepřežit, i když je HSI vysoká, protože boj o zdroje je zde příliš velký. Ostrovy s nízkým HSI mají vysokou míru imigrace kvůli jejich nízké populaci. Opět to není proto, že by se druhy chtěly na takové ostrovy přistěhovat, tyto ostrovy však jsou nežádoucí místa k životu. Důvodem přistěhovalectví na těchto ostrovech je to, že existuje velký zeměpisný prostor pro další druhy. Zda ano nebo ne, a jak dlouho může přistěhovalecký druh přežít ve svém novém domově, je další otázka. Druhová rozmanitost však souvisí s HSI, takže více druhů, které dorazí na ostrov s nízkou HSI, bude mít za následek větší šanci, že se HSI ostrova zvýší. Na obrázku 17 je znázorněna migrace druhů mezi ostrovy, přičemž tyto jsou různě velké, mají různý tvar či odlišný stupeň izolace od ostatních ostrovů [79].



Obr. 17. Proces migrace mezi ostrovy s různou izolací, tvarem a velikostí [79].

Algoritmus optimalizace založené na bio-geografii (BBO) považuje matematiku biologické distribuce různých druhů za řešení komplexních optimalizačních problémů. Základní myšlenkou algoritmu BBO je, jak druhy migrují z jednoho ostrova na druhý, jak vznikají nové druhy a jak druhy vyhynou. V algoritmu BBO je každá zeměpisná poloha považována za „místo výskytu“ s HSI, což je obdoba fitness funkce jiných optimalizačních algoritmů. Dobré řešení má vysoký HSI a špatné řešení má nízký HSI [82,83].

Bio-geografická optimalizace pro WEDM proces byla použita pouze ve studii Mukherjee [78], přičemž byla zvolena jako nejvhodnější. Pro EDM proces však byla tato optimalizační technika dále použita ve studii Mukherjee [84] či Faisal [85]. Vzhledem k malému počtu studií lze říci, že tato optimalizační technika není příliš používaná k řešení problem, spjatých s optimalizací elektroerozivního obrábění.

### 3.2.6 Optimalizace pomocí ovčích stád

Algoritmus ovčích stád (SFA) je nová evoluční výpočetní metoda založená na dědičnosti stád ovcí, přičemž tento algoritmus simuluje dědičnost stád ovcí v prérii. Ovce v každém stádu obvykle žijí pod kontrolou pastýře (viz obrázek 18), tedy genetické vlivy působí pouze uvnitř stáda. Jinými slovy, nějaký speciální znak může přijít do ovce z vlastního stáda pouze dědičností, a to z ovce s vysokou kondicí. Občas se dvě ovčí stáda promíchají v okamžiku, kdy se pastýři právě nedívají. Potom pastýři příslušných stád naznají, že vzniklo jedno smíšené stádo a oddělilí ovce tak, jak byly dříve. Pastýři však nemohou rozlišovat své ovce, které původně vlastnili, protože vzhled všech ovcí v stádu je stejný. Proto je několik ovcí jednoho stáda nevyhnutelně smícháno s tím druhým. Vlastnosti ovcí v sousedním stádě mohou být při této příležitosti inherentní ovcím v jiných stádech. Pak se na poli nejvíce rozmnožuje stádo ovcí, které má lepší kondici [87].

SFA lze porovnat s GA, abychom zjistili, jak funguje. V GA se chromozom skládá z několika subchromozomů, které mají stejnou strukturní konfiguraci jako část chromozomu. Zde se používají dva různé druhy operátorů, tj. genetický operátor na úrovni subchromozomu a genetický operátor na úrovni chromozomu (globální). Tato hierarchická vícestupňová genetická operace je podobná konceptu dědičnosti SFA, kde lze dědičnost v rámci jednoho stáda ovcí považovat za genetickou operaci na úrovni subchromozomu

a míchání a oddělování stád může odpovídat genetické operaci na úrovni chromozomu [87,88].

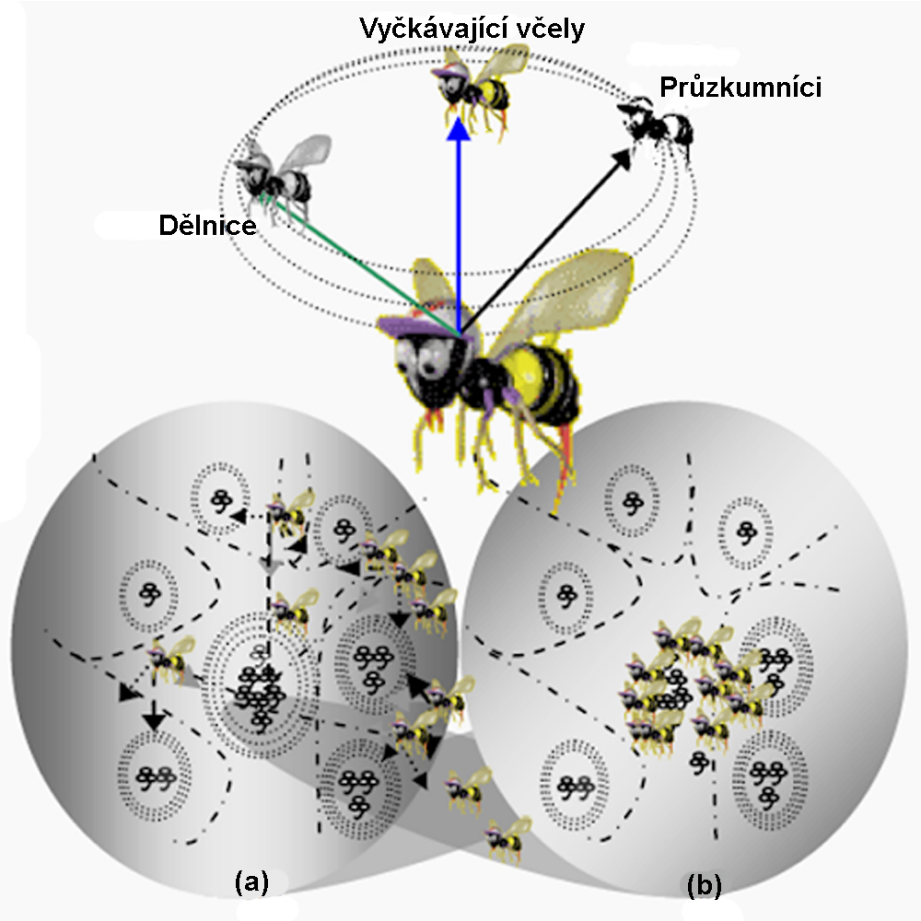
Obr. 18. Znázornění dvou stád s partýři [89].

Pro optimalizaci procesu erodování byl tento algoritmus použit pouze ve studiích Mukherjee [78,84], a to jak pro elektroerozivní hloubení, tak i pro elektroerozivní drátové řezání.

### 3.2.7 Algoritmus včelích kolonií

V algoritmu umělých včelích kolonií (ABC) představuje poloha zdroje potravy možné řešení uvažovaného optimalizačního problému, kde množství potravy (nektaru) odpovídá kvalitě nebo vhodnosti souvisejícího řešení. Kolonie umělých včelích kolonií má tři skupiny, tj. dělnice, vyčkávající včely a průzkumníky. Pro každý zdroj potravy existuje pouze jedna dělnice. Počet dělnic se tedy rovná počtu zdrojů potravy v okolí úlu. Dělnice, jejíž zdroj potravy byl opuštěn, se stává průzkumníkem. V tomto algoritmu představuje poloha zdroje potravy možné řešení uvažovaného optimalizačního problému a množství nektaru – zdroje potravy – je úměrné kvalitě nebo vhodnosti přidruženého řešení [90,91].

Dělnice produkuje modifikaci polohy (řešení) v paměti v závislosti na místní informaci (vizuální informace) a testuje množství nektaru (fitness hodnotu) nového zdroje potravy (nové řešení). Za předpokladu, že množství nektaru nového zdroje je vyšší než u předchozího, včela si zapamatuje novou pozici a zapomene na starou. V opačném případě udržuje pozici předchozího zdroje ve své paměti. Když všechny dělnice dokončí proces hledání, sdílejí nektarové informace o zdrojích potravy a informace o své poloze s včelami, které se v letové oblasti objevují. Vyčkávající včela vyhodnotí informace o nektaru od všech dělnic a vybere zdroj potravy – nektaru – s pravděpodobností související s jeho množstvím. Stejně jako v případě dělnice, vyčkávající včela vytvoří změnu polohy v její paměti a zkontroluje množství nektaru kandidátského zdroje. Pokud je množství nektaru vyšší než v předchozím zdroji, vyčkávající včela si zapamatuje novou pozici a zapomene na starou. Zdroj potravy, který včely opoustili, je průzkumníky nahrazen novým. V algoritmu ABC je toto simulováno vytvořením náhodné pozice na místě opuštěného zdoje potravy. V tomto algoritmu se za předpokladu, že polohu (řešení) nelze dále zlepšit pomocí předem stanoveného počtu cyklů předpokládá, že se od zdroje potravy upustí [92,93]. Typický modl včelí kolonie je znázorněn na obrázku 19.




Obr. 19. Typický model včelí kolonie (a) výchozí situace, (b) konečná situace [94].

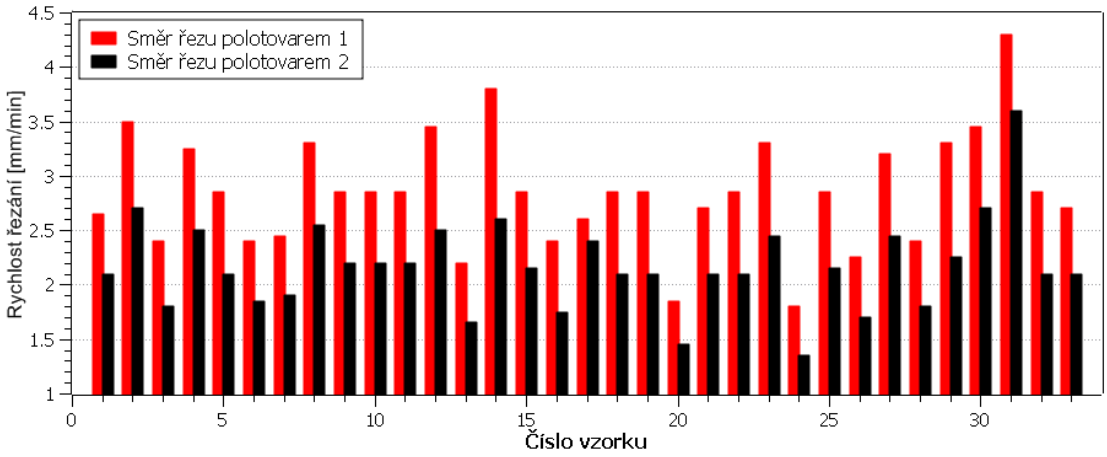
EDM a WEDM parametry byly pomocí této optimalizační metody optimalizovány ve studiích Das [28,95], přičemž ve studii Pawar [96] bylo optimalizováno pouze elektroerozivní drátové řezání.

### 3.3 Optimalizace, monitorování a řízení procesu

Nastavení jednotlivých parametrů požadovaných pro elektroerozivní drátové řezání hraje zásadní roli při tvorbě optimálního výkonu obrábění. WEDM je komplexní obráběcí proces řízený velkým počtem parametrů, jako je Napětí ($U$), Zapnutí pulzu ($T_{on}$), Vypnutí pulzu ($T_{off}$), Rychlost odvíjení drátu ($v$) a Proud ($I$). V neposlední míře je proces ovlivněn souborem mechanických a fyzikálních vlastností obráběného materiálu včetně jeho tepelného zpracování. Jakékoli nepatrné odchylky v parametrech nastavení stroje ovlivňují proces obrábění, tzn. výslednou jakost povrchu a rychlost řezání, což jsou dva nejdůležitější aspekty operace WEDM. Tento aspekt obrábění byl potvrzen v mnoha studiích zaměřených přímo na vyhodnocování provedených plánovaných experimentů, kdy bylo měněno nastavení parametrů stroje, a byla sledována odezva v podobě změny rychlosti řezání a výsledné jakosti obrobené plochy. Takto byly hodnoceny jak kovové materiály např. ocel X210CR12 [97] nebo 16MnCr5 [98], tak i nekovové jako např. hliníková slitina 7475-T7351 [99], titanová slitina Ti-6Al-4V s různými druhy tepelného zpracování [100] nebo čistý hliník 99,5 [101].

Volba vhodných podmínek obrábění je založena na analýze vztahující se k různým parametrům procesu, jako je rychlost řezání jakost obrobeného povrchu. Tradičně to bylo prováněno tak, že se spoléhalo na zkušenosti operátora nebo konzervativní technologické údaje poskytnuté výrobci zařízení WEDM, které vedly k nekonzistentnímu výkonu obrábění. Levy a Maggi [102] prokázali, že nastavení parametrů stanovená výrobci jsou použitelné pouze pro běžné druhy oceli. Nastavení pro obrábění nových materiálů, jako jsou pokročilá keramika a kompozity s kovovou matricí, je třeba dále experimentálně optimalizovat. Toto tvrzení však následně bylo dále rozšířeno o nutnost experimentálního optimalizování i jednotlivých druhů tepelného zpracování materiálu, protože taktéž není výrobcem stanoveno [100].

Bylo použito mnoho různých typů nástrojů kvality pro řešení problému ohledně prozkoumání významných faktorů a jejich vzájemných vztahů s ostatními proměnnými při získávání optimální rychlosti řezání. Konda a kol. [103] klasifikoval různé potenciální faktory, které ovlivňují výkon WEDM do 5 základních kategorií. Jsou jimi různé vlastnosti materiálu obrobku a dielektrické kapaliny, charakteristiky stroje, nastavitelné parametry stroje a geometrie součásti. Kromě toho použili techniku plánovaného experimentu ke studiu a optimalizaci možných efektů proměnných během návrhu a vývoje procesu a ověřili výsledky experimentů pomocí analýzy poměru šumu k signálu (S/N). Bohužel v této publikaci nebyl zkoumán vliv tepelného zpracování na rychlost řezání, který byl jednoznačně prokázán ve studii Mouralová [100] na titanové slitině Ti-6Al-4V. Dále zde nebyl zohledněn směr řezu polotovarem vůči orientaci vláken materiál. Tento aspekt se ukázal být velmi významným, a to jak z hlediska optimalizace rychlosti řezání, tak i z hlediska odlišné jakosti povrchové vrstvy. Vliv parametrů nastavení stroje a orientace řezu polotovarem v závislosti na řezné rychlosti byl zkoumán u niklové superslitiny Inconel 625, přičemž jednotlivé nastavení parametrů stroje pro jednotlivá kola je popsáno v publikaci Mouralová [104] a graf znázorňující závislost řezné rychlosti na směru orientace řezu polotovarem je zobrazen na obrázku 20.



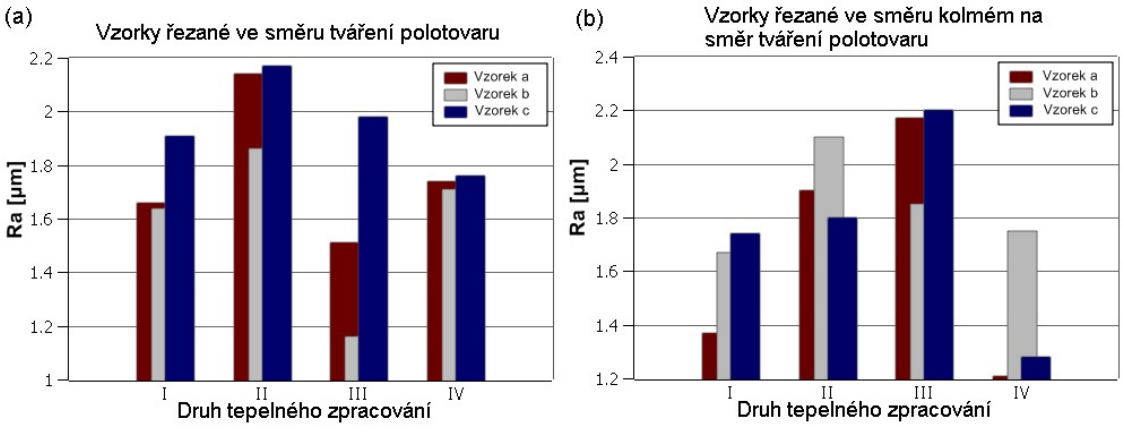

Obr. 20. Vliv orientace směru řezu polotovarem na řeznou rychlost [104].

Tarng a kol. [105] použil neuronovou síť s aplikací simulovaného algoritmu pro řešení problému optimalizace více odezev. Bylo zjištěno, že parametry obrábění, jako jsou zapnutí a vypnutí pulzu, erodovací proud amezerové napětí jsou kritickými parametry pro odhad

rychlosti řezání a výsledné jakosti povrchu. Huang a kol. [106] tvrdili, že několik publikovaných prací [105,107,108] se týká především optimalizace parametrů pro hrubovací operace a navrhli praktickou strategii plánování procesu od hrubovacích až po dokončovací operace.

Vliv parametrů obrábění na objemovou rychlost úběru materiálu je také považován za významný aspekt elektroerozivního obrábění. Manjaiah [109] optimalizoval rychlost úběru materiálu a jakost povrchu při obrábění ocelových plechů z AISI D2 pomocí metody založené na principu Taguchi. Výsledky ukázaly, že zapnutí pulzu je nejvýznamnějším parametrem, který ovlivňuje MRR a jakost povrchu. Ramabalan [110] ve své studii zkoumal účinky nastavení parametrů stroje a množství výztuže materiálu v závislosti na MRR při obrábění kompozitu s kovovou matricí AA7075 / $TiB_2$. Pro optimalizaci použil ortogonální pole L9 od Taguchi a zjistil, že nevyztužený materiál dosahuje vyšších hodnot MRR. Bishnoi [111] ve své studii použil pro optimalizaci MRR plánovaný experiment s centrálním kompozitním designem. Zjistil, že při obrábění oceli HCHCr vyšší hodnoty nastavení parametru zapnutí pulzu zvyšují rychlost úběru materiálu.

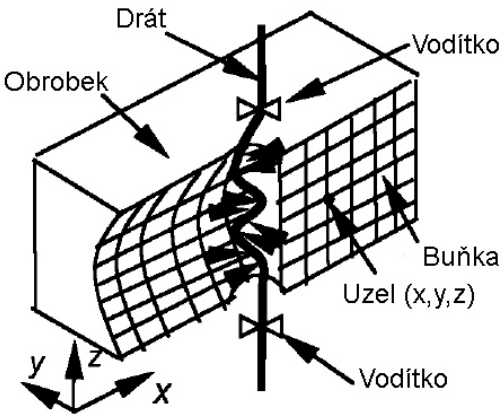
Existuje také řada publikací, které pouze prozkoumají efekty parametrů obrábění na výslednou jakost povrchu. Gökler a Ozanözgü [112] zkoumali výběr nejvhodnější kombinace nastavení parametrů stroje pro dosažení požadované jakosti povrchu pro konstantní rychlost drátu a tlak dielektrické kapaliny. Tosun a kol. [113] zkoumali vliv nastavení parametrů stroje na jakost povrchu obráběného WEDM. Bylo zjištěno, že zvyšující se hodnota parametrů zapnutí pulzu, mezerové napětí a rychlost odvíjení drátu má vliv na zvyšující se jakost obrobeného povrchu. Anand [114] použil metodu frakčního faktoriálního experimentu s ortogonálním uspořádáním pro získání nejoptimálnějšího nastavení parametrů stroje pro zlepšení rozměrové přesnosti a jakosti povrchu po elektroerozivním drátovém řezání. Jakost obrobeného povrchu nezávisí pouze na parametrech nastavení stroje ale také na směru orientace řezu polotovarem. Toto bylo zkoumáno v publikaci Mouralové [34] při obrábění oceli X210Cr12 s různými tepelnými zpracováními, přičemž graf vlivu je zobrazen na obrázku 21.




Obr. 21. Vliv orientace směru řezu polotovarem na jakost povrchu, obráběný matriál-ocel X210Cr12 [34].

Dále bylo aplikováno modelování WEDM pomocí matematických technik, aby bylo efektivně spojeno velké množství procesních proměnných s jednotlivými požadovanými

výstupními kritérii. Spedding a Wang [115] vyvinuli modelovací techniky s využitím metodiky odezvy povrchu a technologie neuronových sítí, aby předpovídaly procesní výkony, jako je rychlost řezání a jakost povrchu v rozumně velkém rozsahu vstupních faktorů. Liu a Esterling [116] navrhli modelovací metodu, která umí přesně reprezentovat geometrický řez při WEDM, zatímco Hsuea kol. [117] vyvinuli model pro odhad rychlosti úběru materiálu při geometrickém řezání tím, že je zvažována deflekce drátu s transformovanou exponenciální trajektorií středu drátu.



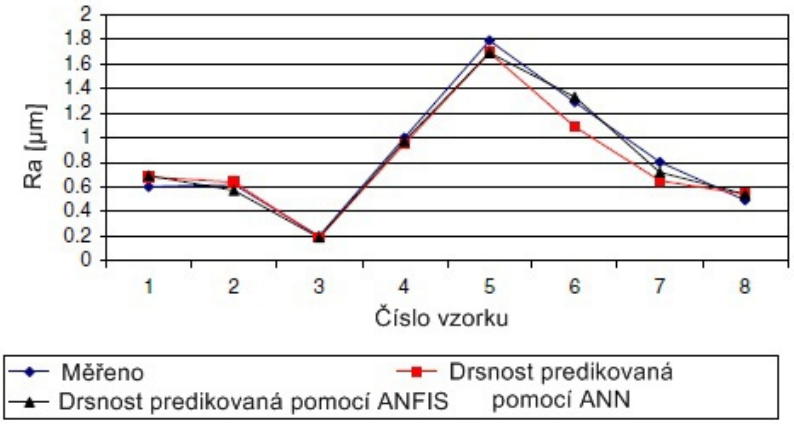

Obr. 22. Simulační model [118].

Spur a Schönbeck [119] navrhli teoretický model, který zkoumá vliv materiálu obrobku a vlastností impulzů na elektroerozivně obrobené díly s anodovou polaritou. Han a kol. [118] vyvinuli simulační systém (simulační model je znázorněn na obrázku 22), který přesně reprodukuje výbojové jevy WEDM generátoru. Systém také používá adaptivní řízení, které automaticky vytváří optimální podmínky obrábění pro vysokou přesnost elektroerozivního obrábění.

Aplikace adaptivních řídicích systémů na WEDM je nezbytná operace pro monitorování a řízení procesu. Proporcionální regulátory se tradičně používají v řídicím systému servo−pohonů pro sledování a vyhodnocování stavu mezery během elektroerozivního drátového řezání. Výkonnost regulátorů však byla omezena podmínkami obrábění, které se podstatně lišily dle nastavení parametrů stroje. Kinoshita a kol. [120] zkoumali efekty rychlosti posuvu drátu, rychlosti odvíjení drátu, napětí drátu a elektrické parametry na stavy mezery řezu v průběhu WEDM. V důsledku toho byly vyvinuty mnohé algoritmy konvenčního řízení založené na explicitních matematických a statistických modelech pro operace EDM a WEDM [121-124]. Několik autorů [125,126] také vyvinulo systém impulsní diskriminace, který poskytuje kvantitativní analýzu a sledování pulzních sledů v různých podmínkách WEDM. Přestože tyto typy řídicích systémů lze aplikovat na širokou škálu podmínek obrábění, nemohou reagovat na stav mezery při neočekávané poruše.

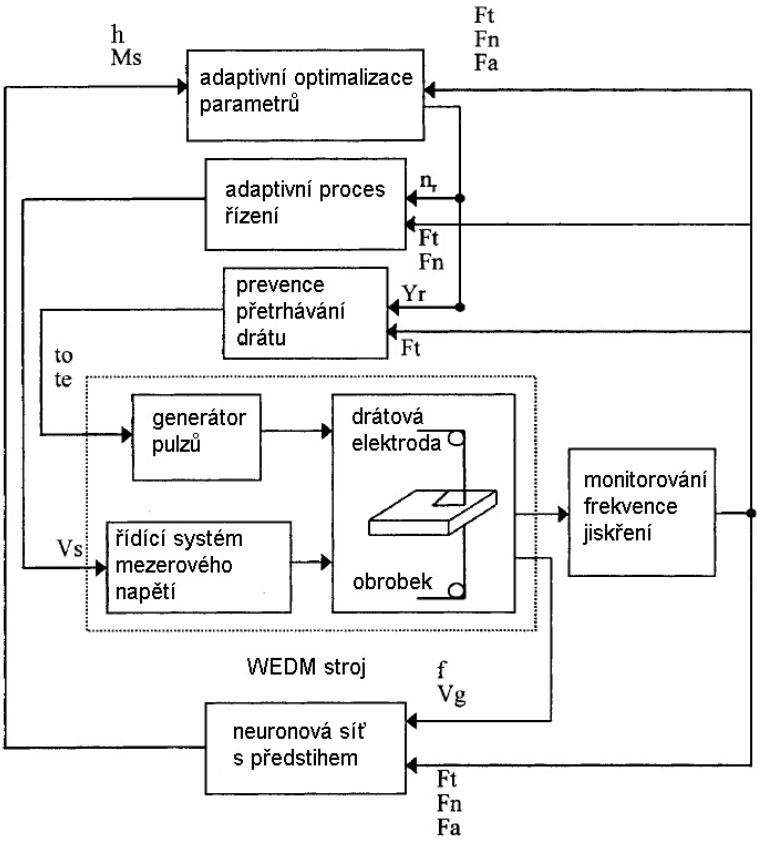
V posledních letech byl systém fuzzy řízení aplikován na proces WEDM pro dosažení optimálního a vysoce efektivního obrábění. Několik autorů tvrdilo, že systém řízení fuzzy logiky implementuje řídící strategii, která zachycuje znalosti odborníka nebo zkušenosti operátora při udržování požadované efektivity obrábění [127]. Kromě toho regulátor fuzzy logiky nevyžaduje žádné komplexní matematické modely přizpůsobující se dynamickému chování operace WEDM [128]. Několik autorů [129,130] navrhlo sledování frekvence

impulzů (mezery řezu) a adaptivní řídicí systémy založené na fuzzy logice a strategiích nastavení, které lze aplikovat na širokou škálu obráběcích podmínek. Suganthi [131] použil adaptivní neuro-fuzzy inferenční systém (ANFIS) a neuronovou síť (ANN), aby byl schopen predikce výsledné kvality obrobeného povrchu pomocí mikro-EDM. Bylo zjištěno, že predikované hodnoty jakosti povrchu jsou v dobré shodě s experimentálními hodnotami, což je patrné z grafu na obrázku 23.



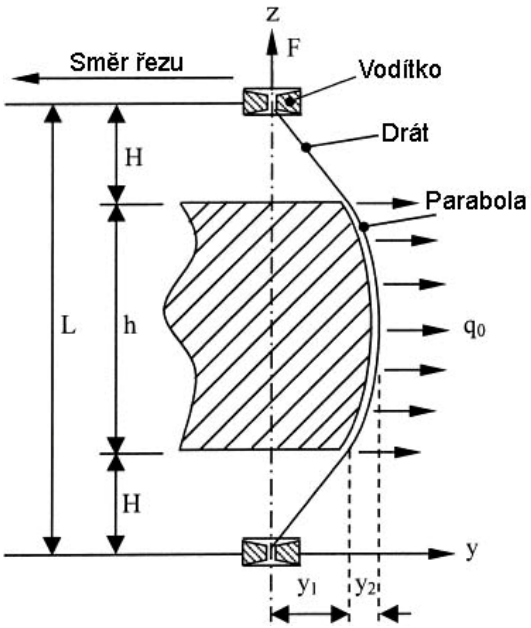

Obr. 23. Jakost povrchu – porovnání hodnot predikovaných a změřených [131].

Výskyt přetržení drátu v průběhu elektroerozivního drátového řezání je jednou z nejvíce nežádoucích obráběcích charakteristik, které výrazně snižuje výkonnost obrábění spolu s kvalitou vyráběné součásti. Bylo provedeno mnoho pokusů o vývoj adaptivního řídicího systému, který by umožňoval online identifikaci abnormálních podmínek obrábění a řídící strategie, která by bránila přetržení drátu v jakékoliv situaci. Široká škála kontrolních strategií, které brání přetržení drátu, je založena na znalostech o charakteristikách tohoto přerušení nástrojové elektrody. Kinoshita a kol. [132] vyvinuli monitorovací a řídicí systém, který přepíná generátor impulsů a servosystém, který brání přetržení drátu se zachováním původní efektivity. Několik autorů [133,134] také naznačilo, že pokud nastane koncentrace elektrických výbojů v určitém bodě na drátu, způsobí to zvýšení lokální teploty, která vede k přerušení drátu. Adaptivní řídicí systém, který se soustřeďuje na detekci místa výbojů a na snížení vzniklé energie, však byl vyvinut bez zohlednění rychlosti úběru materiálu. Hierarchický adaptivní řídicí systém je znázorněn na obrázku 24. Jiní autoři [135] argumentovali, že přetržení drátu koreluje s náhlým nárůstem frekvence výbojů. Bylo také zjištěno, že jejich navrhovaný monitorovací a řídicí systém vychází z online analýzy frekvence výbojů a regulace impulzů v reálném čase a ovlivňuje rychlost úběru materiálu. Liao a kol. [136] vyřešili problém pomocí vztahováni rychlosti úběru materiálu k parametrům obrábění a pomocí nového počítačem podporovaného pulzního diskriminačního systému založeného na analýze impulzních vláken pro zlepšení rychlosti obrábění.



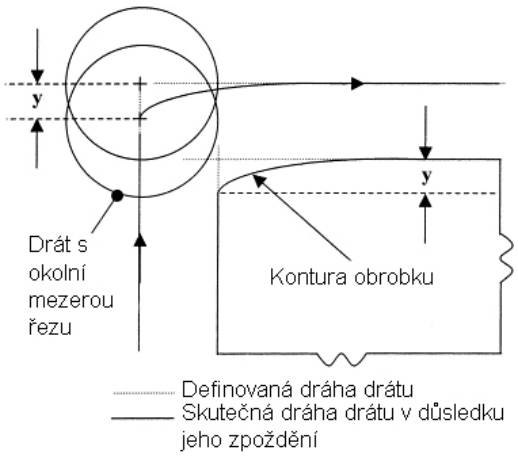

Obr. 24.Hierarchický adaptivní řídicí systém, kde: to –doba trvání impulsu; te - doba erodování; f - posuv; Vs – servo-referenční napětí; Vg - průměrné mezerové napětí; Ft -celková frekvence jiskření; Fn -normální frekvence jiskření; Fa - kmitočet jiskření; Yr - referenční frekvence; $n_r$ - referenční poměr; h - odhadovaná výška obrobku; Ms - stav obrábění [133].

Yan a Liao [137,138] aplikovali strategii samočinného fuzzy řízení nejenom pro řízení pulzní frekvence, ale také pro udržení vysoké rychlosti úběru materiálu tím, že v reálném čase nastavili vypnutí pulzu pod stavem konstantního MRR. Přetržení drátu je také způsobeno nadměrným tepelným zatížením. Většina tepelné energie generované během procesu WEDM je přenášena na drát, zatímco zbytek je pohlcen dielektrickou kapalinou nebo obrobkem [135]. Nicméně v okamžiku, kdy okamžitá účinnost energie překročí určitou hranici v závislosti na tepelných vlastnostech materiálu drátu, drát se přetrhne. Několik autorů [139,140] zkoumalo vliv různých parametrů obrábění na tepelné zatížení drátu a vyvinuli tepelný model simulující proces WEDM. Kromě vlastností erodování nebo rozložení teploty má mechanická pevnost drátu také významný vliv na výskyt přetržení drátové elektrody.



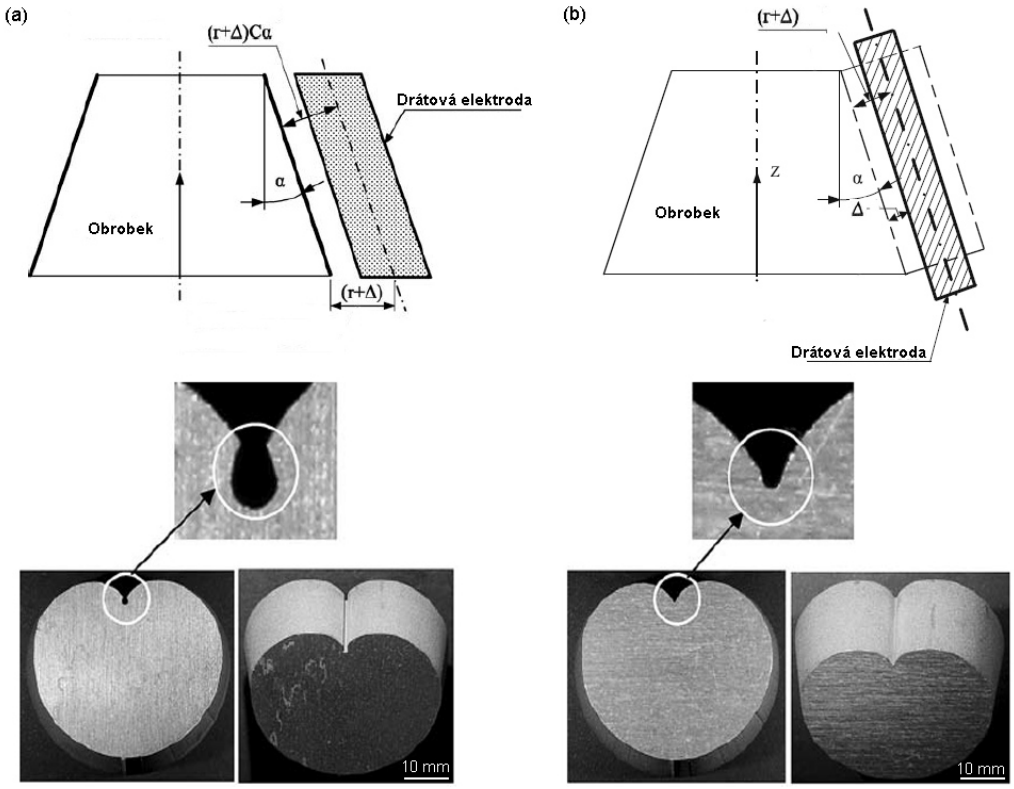

Obr. 25. Schematický diagram řezu, kde: y – zpoždění drátu; L – vzdálenost mezi horním a dolním vodítkem; h – tloušťka obrobku; H – vzdálenost mezi vodítkem a obrobkem; F – axiální tahová síla; $q_0$ – specifické vnější zatížení [141].

Hlavní faktory, které přispívají ke geometrické nepřesnosti dílů vyrobených užitím WEDM, jsou různé procesní síly působící na drát v průběhu obrábění, proto skutečná pozice drátu při řezání není v jeho ose (obrázek 25). Tyto síly zahrnují mechanické síly vyvolané tlakem z plynových bublin tvořených plazmatem erozního mechanismu, axiálními síly působícími na rovnání drátu, hydraulické síly vyvolané zaplavením v dielektrické nádrži, elektrostatické a dynamické sily související s generováním impulzů [142]. V důsledku toho byly studovány statické vychýlení v podobě zpoždění drátu (obrázek 26), aby bylo dosaženo přesné řezné dráhy nástroje. Několik autorů [143,144,141] provedlo parametrickou studii geometrické nepřesnosti dílu způsobené zpožděním drátu a pokusilo se modelovat proces WEDM matematicky.



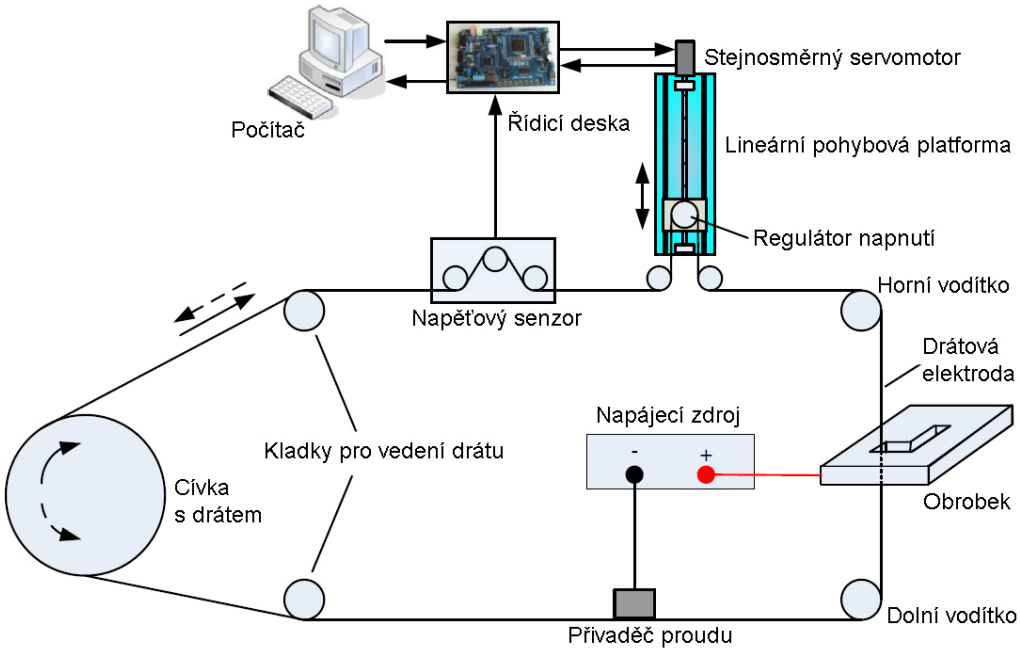

Obr. 26. Efekt zpoždění drátu při obrábění, kde: y – zpoždění drátu [141].

Lin a kol. [148] navrhli metodu generování datových rovnic užitím homogenní transformační matrice 4x4 pro kompenzaci rádiusů nezbytnou provýrobu přesných nesouměrných dílů se šikmými stěnami, kdy horní a dolní základní křivka je odlišná. Výroba těchto součástí je pro běžný 5 osý WEDM stroj značně obtížná a dochází k nepřesnostem tvaru, které jsou znázorněny na obrázku 27 (a). Oproti tomu s kompenzací rádiusu je tvar dílu mnohem přesněji vyroben a nejsou zde patrné výrazné odchylky od požadovaného tvaru, což je patrné z obrázku 27 (b).



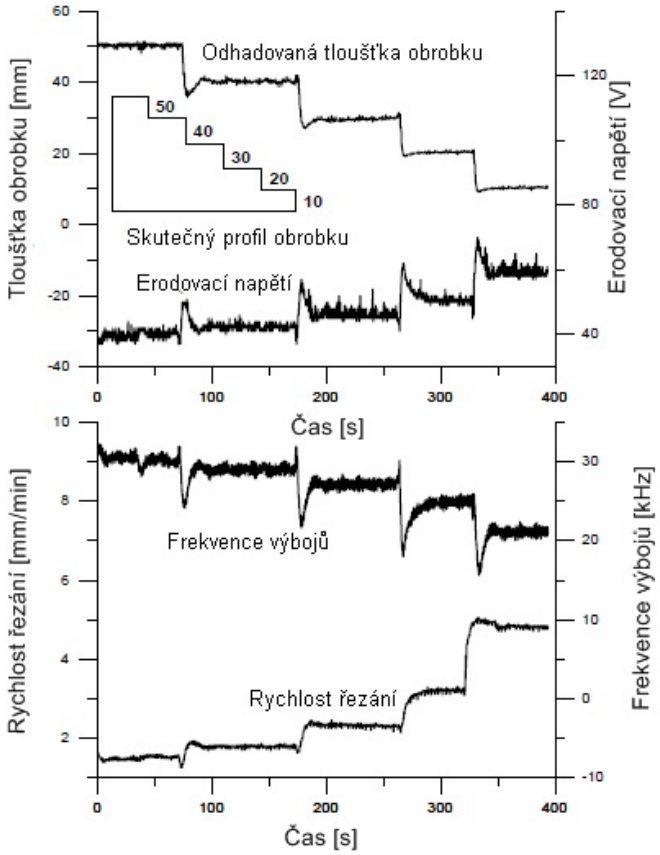

Obr. 27. Kompenzace rádiusových tvarů, kde: r – poloměr drátové elektrody; Δ – mezera řezu; α – úhel sklonu obrobku; C – kompenzace, (a) běžné provedení, (c) kompenzované řezání [148].

Beltrami a Dauw [145] monitorovali a řídili polohu drátu on-line pomocí optického senzoru s řídícím algoritmem umožňujícím prakticky jakýkoli obrys, který má být řezán při poměrně vysoké řezné rychlosti. Bylo také vyvinuto množství geometrických metod kompenzace pohybu nástroje, které zvyšují mezeru řezu a zabraňují přetržení drátu při řezání ploch s vysokým zakřivením, jako jsou např. rohy s malými rádiusy [146,147]. Lin a kol. [148] vyvinuli řídicí strategii založenou na fuzzy logice určenou ke zlepšení přesnosti obrábění v rohových oblastech bez vlivu na rychlost řezání. Kromě toho bylo dynamické chování drátu během obrábění také omezeno, aby nedocházelo k přetrháváním drátu. Li [149] zjistil, že konstantní napětí drátu může účinně omezit jeho vysokofrekvenční vibrace, což vedlo ke zlepšení jakosti povrchu obrobku o 0,6 μm. Jím navržený řídicí systém napětí drátu používá strategii řízení uzavřené smyčky. Matematický model řídicího systému byl sestaven na základě stejnosměrného servomotoru, lineární pohybové platformy a snímače napětí, přičemž jeho kompletní reálné schéma je zobrazeno na obrázku 28.




Obr. 28. Schematický diagram řízení napětí drátu [149].

V posledních letech výzkum a vývoj WEDM zkoumal řídicí strategie přizpůsobující se změnám výkonnostní hustoty požadované při obrábění obrobků s různou tloušťkou. Několik autorů [150,133] zjistilo, že změna tloušťky obrobku během obrábění vede ke zvýšení tepelné hustoty drátu a jeho eventuálnímu přetržení. Dou [150] vyvinul systém sledování frekvence výbojů založený na průbězích elektrického napětí drátem, který byl s podporou vektorové regrese použit k vytvoření modelu pro on-line odhad výšky obrobku při WEDM. Experimentální výsledky ukázaly, že vyvinutý model může úspěšně predikovat tloušťku obrobku s chybou odhadu menší než 2 mm. Na základě odhadované výšky obrobku lze frekvenci výbojů efektivně řídit, přičemž při optimální hodnotě nebude nastávat riziko přetržení drátu při řezání obrobku s proměnnou tloušťkou. Liao a kol. [151] ve své publikaci navrhl on-line systém pro odhad tloušťky obrobku, který funguje na základě navržené specifické erodovací energii, přičemž matematický model byl vztažen jak k tloušťce obrobku, rychlosti řezání, tak i k erodovací energii pomocí proporcionální konstanty. Vliv tloušťky obrobku na rychlost řezání a erodovací napětí byl zobrazen v grafu na obrázku 29. Chyba odhadu tloušťky obrobku byla při použití tohoto modelu v rozmezí 1 mm, zatímco doba odezvy byla obecně nižší než 1 s. Yan a kol. [133] používali neuronové sítě k odhadu tloušťky obrobku a řízení fuzzy logiky k potlačení přerušení drátu při obrobení obrobku s proměnnou výškou.




Obr. 29. Online odhadovaná výška obrobku a odpovídající erodovací napětí, rychlost posuvu a frekvence výboje při výšce obrobku postupně se snižující z 50 mm na 10 mm [151].

Dále byly také experimentálně použity aplikace řídicího systému založeného na znalostech pro řízení nepříznivých podmínek WEDM. Snoeys a kol. [152] navrhli systém založený na znalostech, který se skládá ze tří modulů, a to přípravy práce, řízení procesů a asistence operátora nebo diagnostiky poruch, což umožňuje monitorování a řízení procesu WEDM. Modul pro přípravu práce určuje optimální nastavení parametrů obrábění, zatímco databáze obsluhy a diagnostiky poruch informují operátory a diagnostikují chyby obrábění. Funkce těchto modulů tak zvyšují množství autonomie daného zařízení. Huang a Liao [153] také naznačili důležitost systému asistence obsluhy a diagnostiky poruch pro proces WEDM. Navrhovali expertní systém prototypu umělé neuronové sítě pro plán údržby a diagnostiku poruch WEDM.

Evoluční výpočetní techniky byly požity pro optimalizaci parametrů nastavení stroje např. pro obrábění slitiny na bázi hliníku Nimonic-263, kde Rao [154] použil techniku rojení částic pro nalezení optimálního nastavení pro maximalizaci rychlosti úběru materialu a jakosti povrchu. Stejnou techniku použili Muthukumar [71] pro optimalizaci obrábění nástrojové oceli AISI D3, přičemž zahrnul i optimalizaci šířky mezery řezu. Mukherjee [78] ve své studii porovnal evoluční techniky jako je genetický algoritmus, rojení částic, optimalizace mravenčí kolonie, umělá včelí kolonie, algoritmus ovčích stád, optimalizace založená na biogeografii za účelem nalezení optimálního nastavení parametrů stroje pro maximalizaci rychlosti úběru materiálu, jakosti povrchu a minimalizaci šířky mezery řezu. Optimalizaci

užitím umělé kolonie včel použil i Das [28], který obráběl užitím WEDM ocel EN 31. Evoluční techniky dále pro optimalizaci použilo několik dalších autorů, jak např. Teimouri [29], Rao [30], Sen [155] nebo Majumder [156].

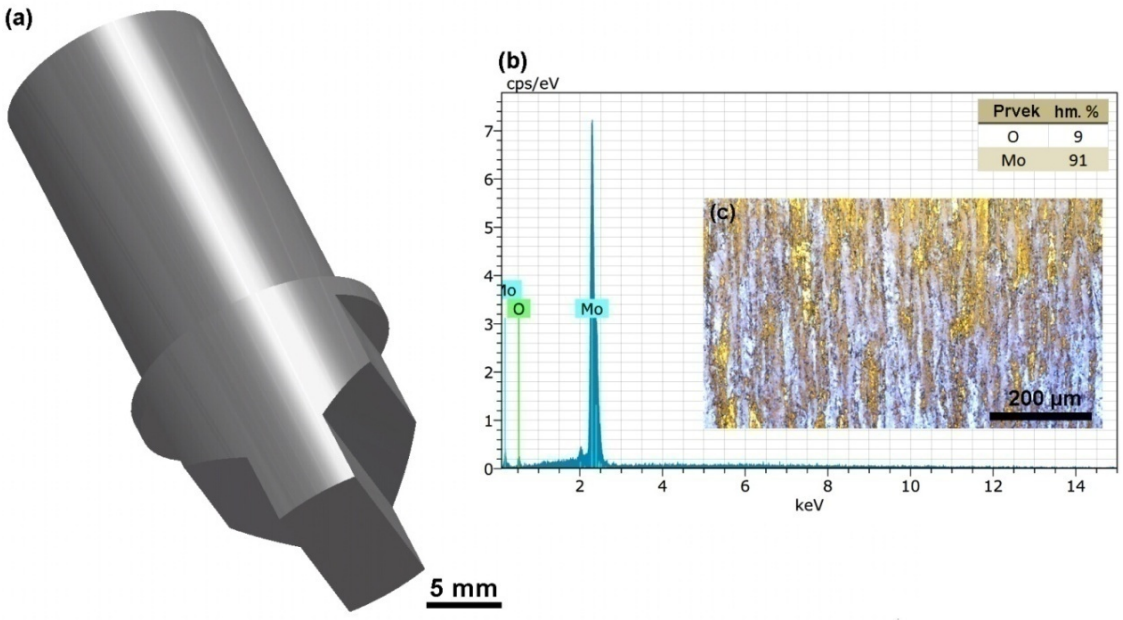
# 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce se zabývala optimalizací rychlosti řezání a výsledné topografie povrchu po elektroerozivním drátovém řezání. Byly provedeny celkem dva plánované experimenty, přičemž jeden se zabýval optimalizací čistého molybdenu a druhý niklové superslitiny B1914.

## 4.1 Optimalizace obrábění čistého molybdénu

Zvoleným materiálem pro experiment byl čistý molybden 99,9 %, ze kterého se v podmínkách firmy Kovosobotka, vyrabějí elektrody k bodovému svařování mosazných plechů. Tyto elektrody jsou vyráběny z čistého molybdenu kvůli jeho speciálním mechanickým a fyzikálním vlastnostem, jako jsou např. vysoká teplota tání 2 623 °C, vysoká tepelná vodivost 138 W/m/K, elektrická vodivost $18{,}7 \cdot 10^{6}$ S/m a nízká teplotní roztažnost $5{,}3 \cdot 10^{-6}$ $K^{-1}$. Obrábění pomocí elektroerozivního řezání je však relativně energeticky náročné, proto je vždy snaha o maximalizaci řezné rychlosti při zachování požadované jakosti povrchu v podobě jeho topografických parametrů.

Příklad vzorové elektrody je znázorněn na obrázku 30 a to včetně její mikrostruktury, která byla získána výrobou metalografického preparátu připraveného 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 naleptání Hassonovým leptadlem, byla struktura materiálu pozorována a dokumentována pomocí světelné mikroskopie na invertovaném světelném mikroskopu (LM) AxioObserver Z1m od firmy ZEISS. Pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) LYRA3 od firmy Tescan, vybaveného energiově-disperzním detektorem rentgenového záření (EDX), bylo umožněno studium chemického složení materiálu.




Obr. 30. (a) model svařovací elektrody, (b) chemické složení získané pomocí EDX, (c) mikrostruktura materiálu.

Pro výrobu vzorků byla použita pěti-osá drátová řezačka AQ750LH značky Sodick, která byla vybavena CNC řízením. Po celou dobu obrábění byly vzorky ponořený v deionizovaně vodě, sloužící jako dielektrická kapalina. Jako elektroda byl použit měděný drát o průměru 0,25 mm dodaný firmou Penta.

Aby bylo možné matematicky modelovat řeznou rychlost a parametry topografie povrchu byl vytvořen plánovaný experiment (DoE). Byl zvolen centrální kompozitní design pro 5 numerických vstupních faktorů, kde základem je poloviční faktorový experimetn $2^{5-1}$ s 10 axiálními body a 7 centrálními body, přičemž podrobně je tento návrh popsán v Montgomery [43]. Celkově se experiment skládá z 33 dílčích experimentů, které jsou v metodologii plánovaného experimentu nazývány běhy. Vstupními faktory experimentu bylo pět nezávislých technologických parametrů řezacího procesu Napětí $U$ [V], Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs], Vypnutí pulzu $T_{off}$ [µs], Rychlost odvíjení drátu $v$ [m/min] a Proud $I$ [A], jejichž mezní hodnoty jsou v tabulce 1. Hodnoty vstupních faktorů pro všechny běhy experimentu jsou uvedeny v tabulce 2, přičemž jednotlivé vzorky byly vyrobeny z polotovaru tvaru hranolu o tloušťce 10 mm. Řez byl pro každý vzorek dlouhý vždy 3 mm.

**Tab. 1** Mezní hodnoty vstupních parametrů pro plánovaný experiment (molybden)

| **Parametr** | **Napětí [V]** | **Zapnutí pulzu [µs]** | **Vypnutí pulzu [µs]** | **Rychlost odvíjení drátu [m/min]** | **Proud [A]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Minimum | 50 | 6 | 50 | 10 | 25 |
| Maximum | 70 | 10 | 30 | 14 | 35 |

**Tab. 2:** Vstupní parametry obrábění použité pro jednotlivé běhy experimentu (molybden)

| **Číslo běhu** | **Napětí [V]** | **Zapnutí pulzu [µs]** | **Vypnutí pulzu [µs]** | **Rychlost odvíjení drátu [m/min]** | **Proud [A]** | **Číslo běhu** | **Napětí [V]** | **Zapnutí pulzu [µs]** | **Vypnutí pulzu [µs]** | **Rychlost odvíjení drátu [m/min]** | **Proud [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 | | | | | | |

Elektroerozivní stroje neumožňují nastavení rychlosti řezání přímo při jeho programování, jako je tomu u klasických konvenčních strojů. Zde vychází řezání z nastavení jednotlivých parametrů stroje. Řezná rychlost a počet přetržení drátové elektrody byly zaznamenávány na každém vzorku (délka řezu vždy 3 mm), přičemž použitá drátová řezačka umožňovala přímé měření rychlosti řezání v průběhu obráběcího procesu. Přetrhávání drátové elektrody je nežádoucí jev, protože znovu navlečení drátu trvá 1 min, čímž se automaticky prodlužuje výrobní čas. U nejnovějších drátových řezaček byl tento čas zkrácen na několik sekud, ale přesto lze přetrhávání považovat za nežádoucí jev, který je způsoben nevhodným nastavením parametrů stroje. V průběhu tohoto experimentu však nedošlo k žádnému takovému přetržení.

Na základě výkresové dokumentace je vždy nezbytné pečlivě monitorovat, zda je dosažena minimální požadovaná jakost obrobeného povrchu. Pokud tomu tak nebude, patrně nastane stav, kdy vyrobená součást nebude schopna plnit požadovanou funkčnost. Z toho důvodu je nezbytné, aby byla topografii povrchu věnována zvláštní pozornost. Pro komplexní posouzení jakosti povrchu je nezbytné vyhodnocovat více parametrů nežli pouze Ra (střední aritmetickou úchylku povrchu). Tento fakt zavedlo do praxe již mnoho velkých společností, a na výkresové dokumentaci předepisují i požadavky na parametry nosného profilu či plošné parametry. Z toho důvodu byly v tomto experimentu 3 parametry základního profilu, 3 profilové parametry a 3 jejich plošné ekvivalenty, které zajišťují kvantitativní hodnocení plochy všemi technicky významnými směry. Vyhodnocované parametry základního profilu byly průměrná aritmetická úchylka základního profilu (Pa), největší výška základního profilu (Pz) a průměrná kvadratická úchylka základního profilu (Pq). Parametry vyhodnocované profilovou metodou byly průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti (Ra), největší výška profilu drsnosti (Rz) a průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti (Rq). Plošnou metodou byly vyhodnoceny parametry aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu (Sa), maximální výška omezené stupnice povrchu (Sz) a základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu (Sq). Topografie povrchu byla studována pomocí bezdotykového 3D profilometru Taylor HobsonTalysurf CCI Lite dle odpovídající normy plošné parametry ISO 25178-2, profilové a parametry základního profilu ISO 4287. Naměřená data byla následně zpracovávána v softwaru TalyMap Gold, který umožňoval vytvoření 2D a 3D modelu analyzovaného povrchu.

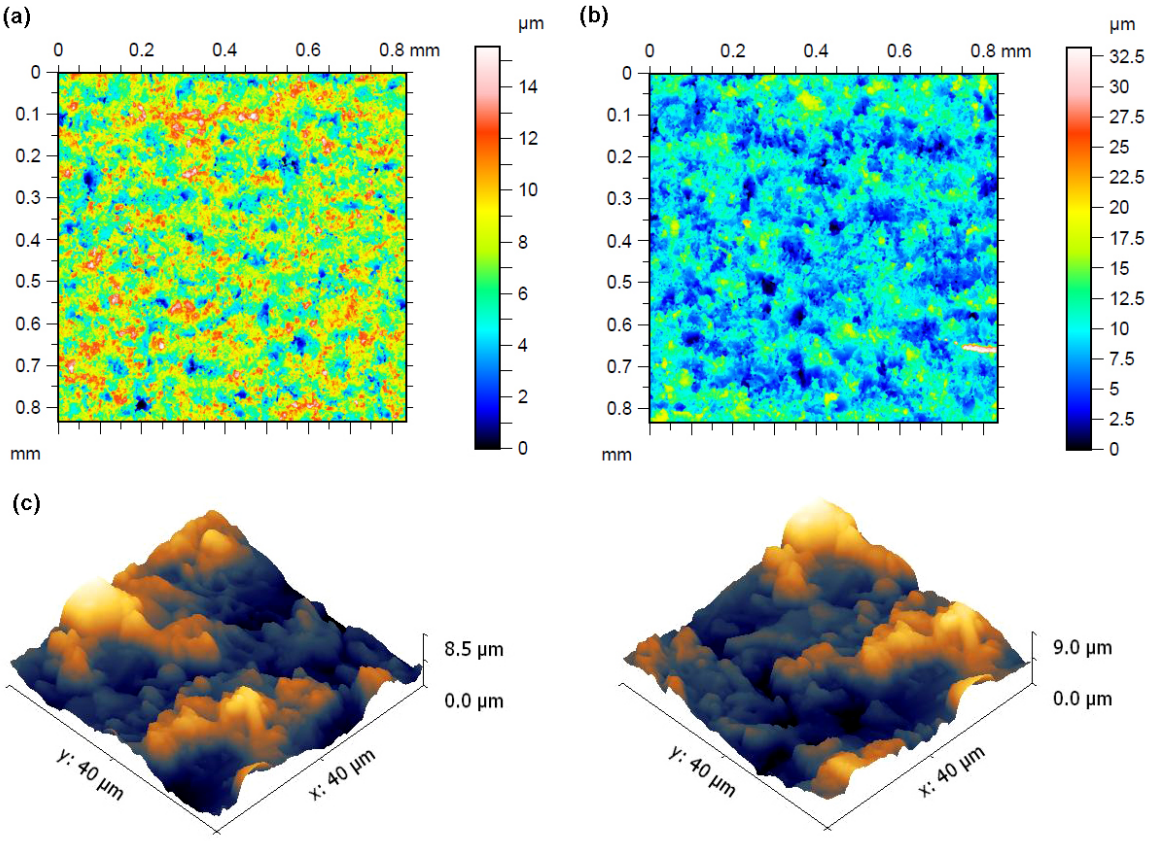
Všechny parametry byly vyhodnoceny na 1024 profilech jediné vyhodnocovací délky lr = 0,8 mm získané z povrchu po aplikaci S-filtru a F-operace (S-F) měření provedených s objektem 20x. Pro měření bylo zvoleno 5 náhodných míst na každém vzorku a následně vytvořen průměr těchto hodnot. Pro vyhodnocení planovaného experimentu s numerickými faktory je používána regresní analýza. V našem případě jsme použili plný kvadratický lineární regresní model, který uvažuje pusobení jednotlivých faktorů, jejich párových interakcí a jejich kvadratických efektů. Zde stoji za zminku název „plný kvadratický lineární regresní model“, to není překlep, pouze to plný kvadratický se vztahuje k vstupním numerickým faktorům a lineární regresní model se vztahuje k odhadovaným koeficientům modelu. Dále budou uváděny pouze výsledné regresní modely, kde pro výběr významných prediktorů na hladině významnosti 0,05 byla zvolena selekční metoda stepwise s požadavkem hierarchie, tedy pokud je faktor významný v interakci nebo kvadrátu, zůstává v modelu, ač je sám nevýznamný. Modely byly vytvořeny ve statistickém software Minitab 17. Hodnoty vyhodnocených výstupních proměnných (odezev) v podobě parametrů topografie povrchu a rychlosti řezání jsou znázorněny tabulce 3.

**Tab. 3:** Hodnoty rychlosti řezání a parametrů topografie povrchů vzorků pro jednotlivé běhy experimentu

| Č. vz. | Rychlost řezání [mm/min] | Ra [µm] | Rq [µm] | Rz [µm] | Sa [µm] | Sq [µm] | Sz [µm] | Pa [µm] | Pq [µm] | Pz [µm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 2,8 | 1,86 | 2,36 | 13,98 | 2,21 | 2,79 | 21,83 | 1,98 | 2,50 | 14,83 |
| **2** | 3,1 | 2,05 | 2,60 | 15,29 | 2,22 | 2,82 | 23,97 | 2,15 | 2,73 | 16,00 |
| **3** | 2,2 | 1,85 | 2,33 | 13,44 | 1,97 | 2,49 | 17,46 | 1,93 | 2,44 | 14,04 |
| **4** | 3,2 | 2,11 | 2,67 | 15,25 | 2,29 | 2,92 | 23,28 | 2,24 | 2,83 | 16,10 |
| **5** | 2,7 | 1,98 | 2,51 | 14,40 | 2,15 | 2,74 | 19,83 | 2,11 | 2,67 | 15,21 |
| **6** | 2,4 | 1,93 | 2,43 | 14,10 | 2,07 | 2,62 | 19,62 | 2,03 | 2,56 | 14,86 |
| **7** | 2,4 | 1,90 | 2,39 | 13,65 | 2,04 | 2,58 | 19,26 | 2,00 | 2,52 | 14,46 |
| **8** | 3,3 | 2,10 | 2,65 | 14,76 | 2,46 | 3,07 | 23,04 | 2,24 | 2,81 | 15,53 |
| **9** | 2,7 | 2,04 | 2,56 | 14,03 | 2,29 | 2,78 | 19,21 | 2,10 | 2,73 | 14,96 |
| **10** | 2,7 | 2,00 | 2,50 | 13,93 | 2,18 | 2,72 | 18,65 | 2,12 | 2,64 | 14,75 |
| **11** | 2,7 | 2,01 | 2,56 | 14,99 | 2,17 | 2,79 | 23,31 | 2,13 | 2,71 | 15,88 |
| **12** | 3,4 | 2,10 | 2,70 | 16,00 | 2,29 | 2,95 | 24,76 | 2,22 | 2,83 | 16,78 |
| **13** | 2 | 1,89 | 2,38 | 13,74 | 2,02 | 2,56 | 17,74 | 1,99 | 2,50 | 14,55 |
| **14** | 4,3 | 2,25 | 2,84 | 15,85 | 2,58 | 3,25 | 23,97 | 2,42 | 3,04 | 16,81 |
| **15** | 2,7 | 2,03 | 2,52 | 13,54 | 2,29 | 2,85 | 18,27 | 2,13 | 2,64 | 14,24 |
| **16** | 2,4 | 1,85 | 2,32 | 12,74 | 2,02 | 2,54 | 16,82 | 1,96 | 2,46 | 13,51 |
| **17** | 3,3 | 2,23 | 2,79 | 14,90 | 2,42 | 3,06 | 24,62 | 2,36 | 2,95 | 15,71 |
| **18** | 2,7 | 1,90 | 2,36 | 12,80 | 2,03 | 2,54 | 15,95 | 1,99 | 2,47 | 13,40 |
| **19** | 2,7 | 1,96 | 2,45 | 13,42 | 2,13 | 2,67 | 17,62 | 2,07 | 2,59 | 14,13 |
| **20** | 1,7 | 1,72 | 2,16 | 11,97 | 1,85 | 2,33 | 15,58 | 1,81 | 2,26 | 12,73 |
| **21** | 2,2 | 1,88 | 2,39 | 13,81 | 2,03 | 2,63 | 26,47 | 1,98 | 2,53 | 14,60 |
| **22** | 2,7 | 2,00 | 2,53 | 14,93 | 2,20 | 2,78 | 20,56 | 2,12 | 2,68 | 15,76 |
| **23** | 3 | 1,97 | 2,46 | 13,75 | 2,19 | 2,75 | 19,29 | 2,09 | 2,60 | 14,60 |
| **24** | 1,7 | 1,88 | 2,40 | 14,64 | 2,01 | 2,57 | 20,66 | 1,98 | 2,52 | 15,38 |
| **25** | 2,8 | 2,06 | 2,61 | 14,96 | 2,26 | 2,84 | 19,30 | 2,20 | 2,76 | 15,71 |
| **26** | 2,1 | 1,97 | 2,49 | 14,56 | 2,15 | 2,72 | 19,10 | 2,09 | 2,63 | 15,40 |
| **27** | 2,8 | 1,99 | 2,51 | 14,58 | 2,23 | 2,82 | 20,44 | 2,11 | 2,65 | 15,36 |
| **28** | 2,5 | 2,01 | 2,54 | 14,93 | 2,13 | 2,71 | 21,84 | 2,10 | 2,65 | 15,78 |
| **29** | 3,2 | 2,30 | 2,87 | 15,52 | 2,60 | 3,31 | 33,26 | 2,48 | 3,11 | 16,52 |
| **30** | 3,3 | 1,96 | 2,48 | 14,49 | 2,09 | 2,65 | 19,68 | 2,06 | 2,60 | 15,30 |
| **31** | 4,3 | 2,17 | 2,70 | 14,58 | 2,41 | 3,00 | 20,01 | 2,30 | 2,84 | 15,33 |
| **32** | 2,8 | 2,04 | 2,56 | 14,51 | 2,17 | 2,72 | 18,70 | 2,12 | 2,67 | 15,09 |
| **33** | 2,4 | 1,73 | 2,19 | 12,73 | 1,84 | 2,35 | 17,10 | 1,81 | 2,30 | 13,38 |

K přetržení drátové elektrody nedošlo při obrábění žádného z experimentálních vzorků. Dle tabulky 3 je zřejmé, že nejvyšši rychlosti bylo dosaženo u vzorků č. 14 a 31 a to 4.3 mm/min, naopak nejjnižší rychlostí byly obrobeny vzorky č. 20 a 24 to pouze 1,7 mm/min. Tato nejvyšší rychlost řezání byla vyšší než při optimalizaci obrábění čistého titanu [157] nebo čistého hliníku [101] ale naopak nižší než při obrábění čistého wolframu [158].

Vyhodnocené parametry topografie jednotlivých vzorků byly sestaveny do tabulky 3, přičemž nejnižších hodnot bylo u téměř všech vyhodnocovaných parametrů dosaženo u vzorku č. 20, který byl obroben s nastavením parametrů stroje: $U$=70 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$=50 µs, $v$=14 m/min a $I$=25 A. Parametr Ra tohoto vzorku měl pouze hodnotu 1,72 µm, což je výrazně nižší hodnota než při obrábění čistého hliníku [101] avšak srovnatelná s obráběním čistého titanu [159,160]. Pro znázornění reliéfu obrobených povrchů byl na přístroji Taylor Hobson Talysurf CCI Lite vytvořen 2D barevně filtrovaný sken povrchu vzorku s nejvyšší jakostí povrchu a s tou nejnižší. Oba tyto 2D reliéfy jsou znázorněny na obrázku 31 (a, b), přičemž je jednoznačně patrný rozdíl v jejich topografii a výškových rozdílech mezi jednotlivými výstupky a prohlubněmi, tedy krátery. Dále z vybrané oblasti na obrobeném povrchu vzorku č. 20 (s nejvyšší jakostí povrchu) byl vytvořen pomocí semikontaktní techniky mikroskopu atomárních sil (AFM) od výrobce Bruker, která je založena na detekci změn interakčních sil mezi hrotem a povrchem obrobku se změnou vzdálenosti hrotu od povrchu. Měření bylo provedeno v módu Scanasyst a použitým hrotem o poloměru 0,65 µm. Vyhodnocovaná plocha měla rozměr 40x40 µm a je znázorněna na obrázku 31 (c). AFM analýza však neumožňuje studium reálné barvy povrchu, proto byl použit ke znázornění výškových rozdílů barevný filtr.




Obr. 31. (a) zobrazení 2D barevně filtrovaného reliéfu povrchu vzorku č. 20, (b) zobrazení 2D barevně filtrovaného reliéfu povrchu č. 29, (c) 3D reliéf povrchu vzorku č. 20 získaný pomocí AFM snímaný ve dvou různých místech.

Autokorelace je matematické znázornění míry podobnosti mezi danou časovou řadou a zpožděnou verzí sebe sama. Pokud uvažujeme o autokorelaci v souvislosti s topografií povrchu představuje podobnost povrchu ve srovnání se sebou sama. Výpočtem autokorelace povrchu tak může rozlišit, zda se jedná o izotropní nebo anizotropních typ povrchu. To umožní rozhodnout, zda je 2D měření (profilometrie) dostatečné nebo zda je třeba provést i 3D měření. Anizotropní povrch vyžaduje 3D měření, protože 2D měření by poskytlo různé výsledky dle směru měření.

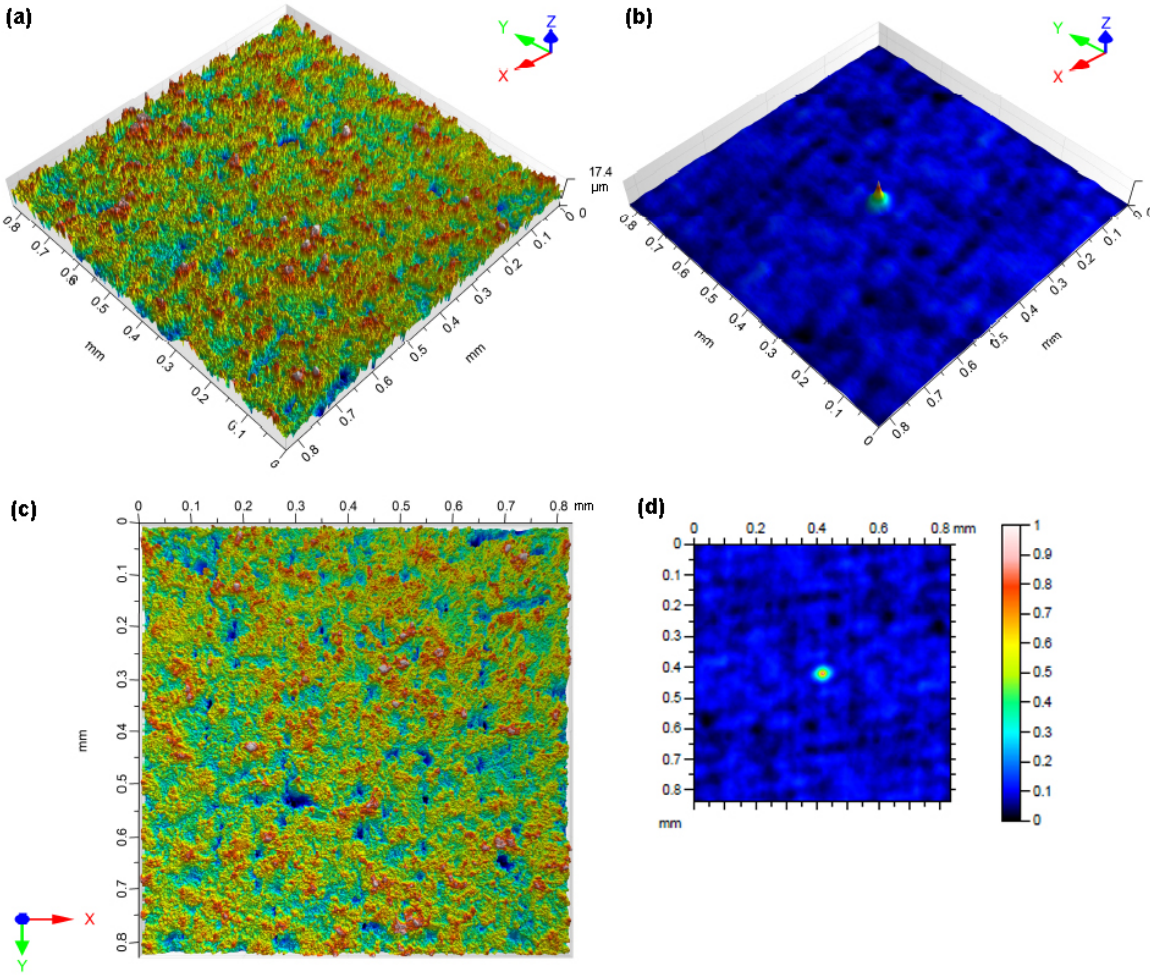
Budeme-li se na charakteristiku povrchu $z$ dívat jako na funkci $z(x, y)$ definovanou na oblasti $\boldsymbol{X} \times \boldsymbol{Y}$, která je v digitalizované formě zaznamenána jako matice $\boldsymbol{Z} = \left(z_{i,j}\right)_{m,n}$, kde $i, j$ jsou indexy prvků a $m,n$ jsou rozměry matice, kde první složka odpovídá rozměru $x$ a druhá rozměru $y$, lze 3D aurokorelacční matici $\boldsymbol{R} = \left(r_{i,j}\right)_{m,n}$ zapsat prostým zobecněním 2D autokorelace, následovně

$$r_{i,j}(z) = \frac{c_{i,j}(z)}{c_{0,0}(z)}, \text{ kde } c_{i,j}(z) = \frac{\sum_{k=1}^{m-i}\sum_{l=1}^{n-j}\left(z_{k,l}-\bar{z}\right)\left(z_{k+i,l+j}-\bar{z}\right)}{(m-i-1)(n-j-1)}$$

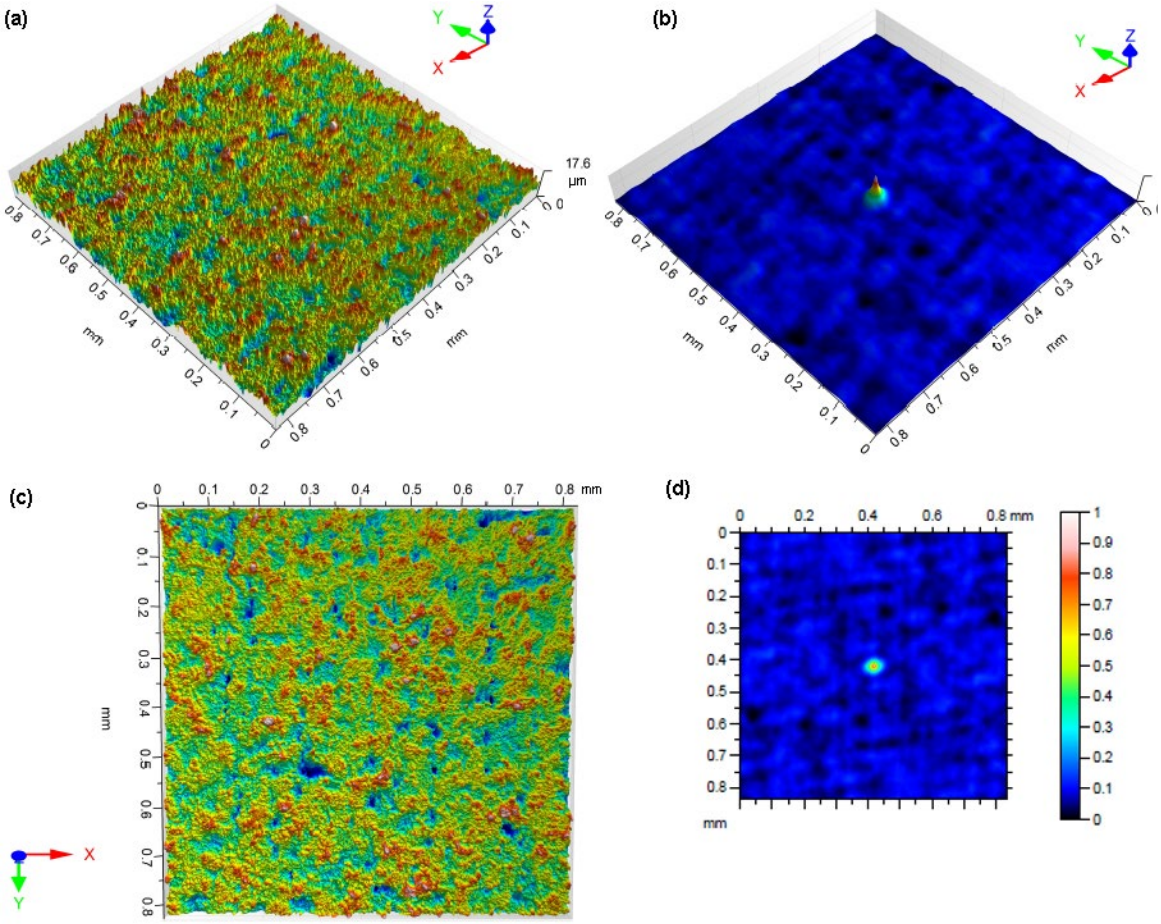
se nazývá autokovariance a indexování $i$ a $j$ volíme tak, aby souřednici (0,0) odpovídal střed oblasti $\boldsymbol{X} \times \boldsymbol{Y}$.

Anizotropní povrchy se vyznačují tím, že autokorelace má centrální „hřeben“ táhnoucí se jedním směrem, přičemž povrch se translací v tomto směru příliš nezmění. Toto je charakteristické pro konvenčně obráběné povrchy, jakými jsou např. soustružené, broušené či frézované, kdy na povrchu vždy zůstává viditelná dráha po nástoji. Naopak u izotropního povrchu je centrální „vrchol“ a geometrie nemá žádný preferovaný směr. Tyto povrchy obvykle vznikají po nekonvenčních technologiích obrábění, jako je například elektroerozivní drátové řezání [161,162].

Vzhledem k tomu, že všechny zkoumané vzorky byly vyrobeny stejnou nekonvenční technologií WEDM nelze očekávat, že by u některého z nich byl nalezen anizotropní typ povrchu. Z toho důvodu byla tato analýza provedena u prvních 10 vzorků, přičemž bylo zjištěno, že zde žádné rozdíly opravdu nejsou a všechny povrchy jsou anizotropní. Na obrázcích 32 a 33 jsou tyto analýzy pro vzorek číslo 1 znázorněny, a to včetně 3D reliéfu povrchu. Autokorelace byla provedena jak pro povrch S-F tak i pro S-L.




Obr. 32. (a,c) S-F povrch – 3D reliéf, (b) 3D autokorelace S-F povrchu, (d) 2D autokorelace S-F povrchu.




Obr. 33. (a, c) S-L povrch – 3D reliéf, (b) 3D autokorelace S-L povrchu, (d) 2D autokorelace S-F povrchu.

### 4.1.1 Model pro rychlost řezání

V následující tabulce 4 jsou uvedeny p-hodnoty jednotlivých prediktorů modelu, včetně koeficientu determinace R-sq, který popisuje, kolik procent variability experimentálně naměřených dat vysvětluje daný model. Dále je zde uveden test adekvátnosti modelu (Lack–of-Fit), který testuje, zda je model adekvátní, tedy že zde nepůsobí další stejně významné parametry jako v modelu.

**Tab. 4:** Parametry regresního modelu pro rychlost řezání $v_c$

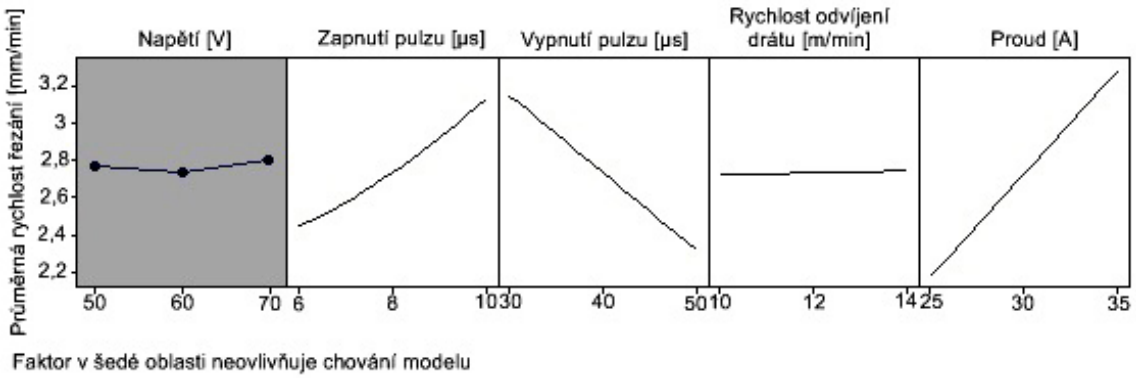
| **Parametr** | **P-Value** |
|---|---|
| Konstanta | 0,000 |
| Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] | 0,000 |
| Vypnutí pulzu $T_{off}$ [µs] | 0,000 |
| Rychlost odvíjení drátu $v$ [m/min] | 0,428 |
| Proud $I$ [A] | 0,000 |
| Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] * Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] | 0,012 |
| Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] * Vypnutí pulzu $T_{off}$ [µs] | 0,002 |
| Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] * Rychlost odvíjení drátu $v$ [m/min] | 0,017 |
| Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] * Proud $I$ [A] | 0,000 |
| Vypnutí pulzu $T_{off}$ [µs] * Proud $I$ [A] | 0,000 |
| R-sq | 99,29 % |
| Lack-of-Fit | 0,396 |

Všechny parametry uvedené v tabulce 4 jsou významné (p-hodnota < 0,05), až na rychlost odvíjení drátu, kde je významná její interakce, proto je ponechána v modelu. Napětí v tabulce není, jeho působení na rychlost řezání je tudíž nevýznamné. Koeficient determinace je 99,29 % což je velice dobré a model je adekvátní (p-hodnota $_{\text{Lack-of-Fit}}$> 0,05). Samotný regresní model pro rychlost řezání $v_c$ je popsán rovnicí:

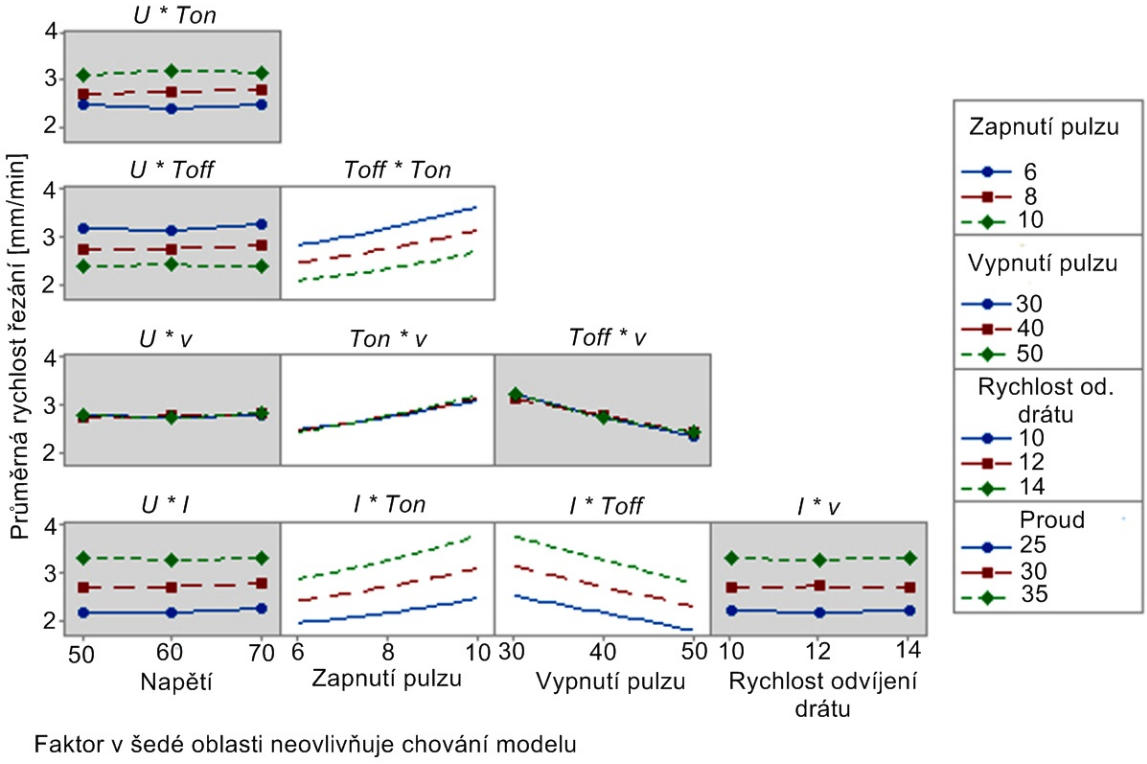
$$v_c = 1{,}544 - 0{,}362T_{on} + 0{,}0158T_{off} - 0{,}0694v + 0{,}08I + 0{,}0138T_{on} \cdot T_{on} - \\ - 0{,}0025T_{on} \cdot T_{off} + 0{,}0093T_{on} \cdot v + 0{,}01T_{on} \cdot I - 0{,}0012T_{off} \cdot I \tag{3}$$

Působení jednotlivých faktorů je uvedeno v diagramu hlavních efektů na obrázku 34, kde je zřetelné i významné zakřivení Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] * Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs].

Pro zajímavost uvádíme diagram interakcí (obrázek 35), kde jednotlivé významné interakce nejsou šedě označeny a vizuálně je možné je rozpoznat z „nerovnoběžnosti“ křivek. Zde je třeba říci, že bez statistických testů nelze významnost zakřivení v tomto případě poznat.




Obr. 34. Hlavní efekty vstupních faktorů pro rychlosti řezání.




Obr. 35. Interakce vstupních faktorů pro rychlosti řezání.

### 4.1.2 Model pro parametr topografie povrchu Ra

V následující tabulce 5 jsou uvedeny p-hodnoty jednotlivých prediktoru modelu, včetně koeficientu determinace R-sq a testu adekvátnosti modelu (Lack-of-Fit).

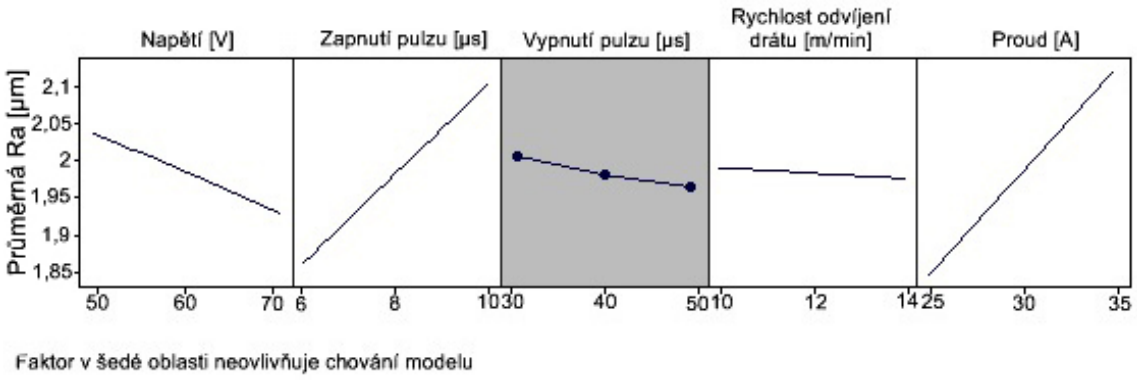
**Tab. 5:** Parametry regresního modelu pro parametr Ra

| **Parametr** | **P-Value** |
|---|---|
| Konstanta | 0,000 |
| Napětí [V] | 0,000 |
| Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] | 0,000 |
| Rychlost odvíjení drátu $v$ [m/min] | 0,568 |
| Proud $I$ [A] | 0,000 |
| Napětí [V]* Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs] | 0,011 |
| Napětí [V] * Rychlost odvíjení drátu $v$ [m/min] | 0,040 |
| Zapnutí pulzu$T_{on}$[µs]* Proud $I$ [A] | 0,040 |
| R-sq | 90,52 % |
| Lack-of-Fit | 0,900 |

Výstupy pro parametr topografie povrchu Ra jsou podobné jako pro rychlost řezání. Pouze v modelu je všech 5 faktoru a není zde zakřivení. V žádném z 33 běhů nedocházelo k přetržení drátu, proto není významná Rychlost odvíjení drátu, ovšem je významná v interakci s Napětím, proto je v modelu kvůli hierarchii ponechána. Koeficient determinace 90,52 % pro parametr Ra je velice dobý výsledek, modely topografie po WEDM pro daný rozsah vstupních faktoru mají většinou koeficient determinace pod 60 %. Model je adekvátní (p-hodnota $_{\text{Lack-of-Fit}} > 0{,}05$), přičemž regresní model pro parametr Ra je dán následující rovnicí:

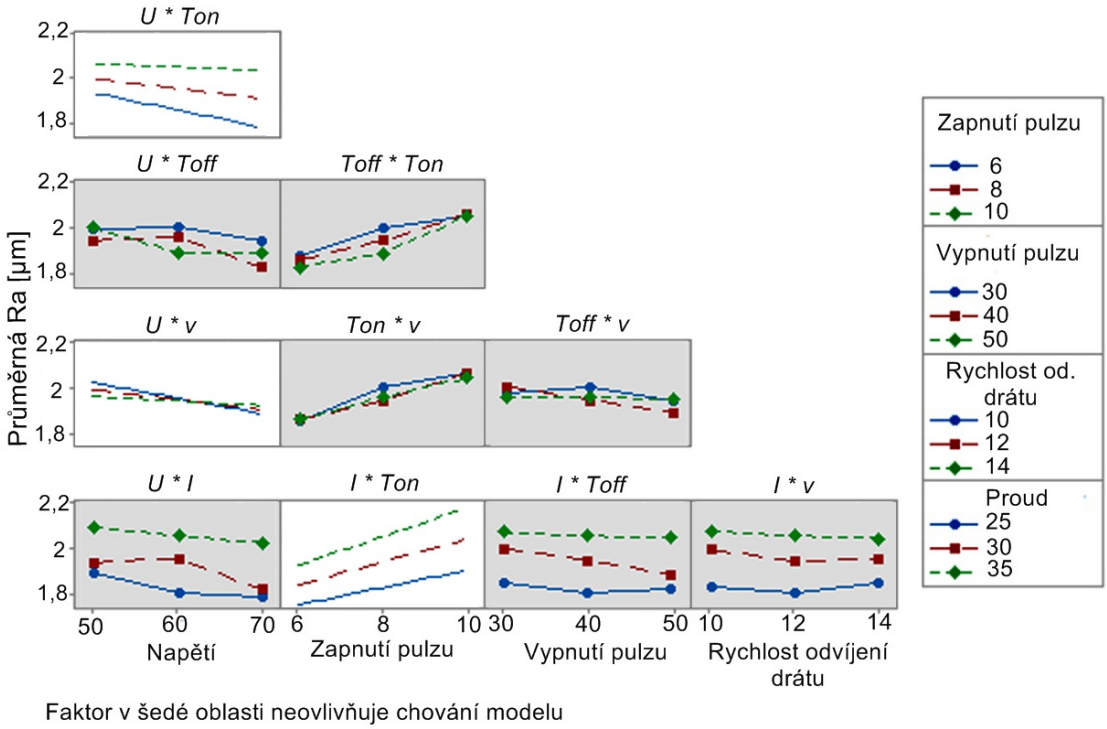
$$Ra = 3{,}458 - 0{,}0323U - 0{,}1189T_{on} - 0{,}0784v + 0{,}0033I + 0{,}0015U \cdot T_{on} + \\ + 0{,}0012U \cdot v + 0{,}0025T_{on} \cdot I \tag{4}$$

Působení jednotlivých faktorů je uvedeno v diagramu hlavních efektů na obrázku 36.




Obr. 36. Hlavní efekty vstupních faktorů pro parametr topografie Ra.

Pro zajímavost uvádíme diagram interakcí (obrázek 37), kde jednotlivé významné interakce nejsou šedě označeny a vizuálně je poznáme z „nerovnoběžnosti“ křivek, což je vidět především u interakce napětí [V] * zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs], která je nejvýznamější.




Obr. 37. Interakce vstupních faktorů pro parametr Ra.

Nyní by bylo možné vytvořit regresní modely pro ostatní parametry topografie, ale dle korelační matice pro Spearmanův koeficient korelace je vidět, že jsou tyto parametry topografie statisticky významně závislé (p-hodnota < 0,005 pro všechny dvojice charakteristik drsností), viz obr. 38. Proto lze předpokládat, že modely vyjdou podobně.

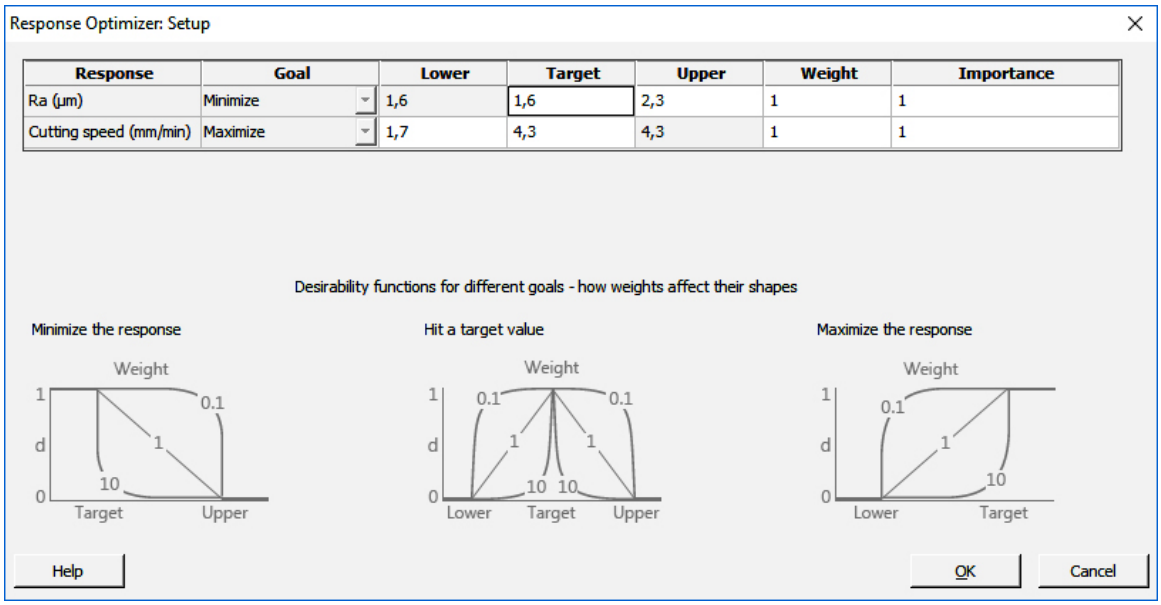
| | Ra [µm] | Rq [µm] | Rz [µm] | Sa [µm] | Sq [µm] | Sz [µm] | Pa [µm] | Pz [µm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rq [µm] | 0,986 | | | | | | | |
| | 0 | | | | | | | |
| Rz [µm] | 0,793 | 0,857 | | | | | | |
| | 0 | 0 | | | | | | |
| Sa [µm] | 0,91 | 0,893 | 0,682 | | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| Sq [µm] | 0,906 | 0,907 | 0,758 | 0,976 | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| Sz [µm] | 0,601 | 0,686 | 0,836 | 0,597 | 0,699 | | | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| Pa [µm] | 0,98 | 0,967 | 0,793 | 0,911 | 0,929 | 0,62 | | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| Pz [µm] | 0,975 | 0,991 | 0,856 | 0,895 | 0,911 | 0,703 | 0,969 | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Pq [µm] | 0,788 | 0,851 | 0,993 | 0,686 | 0,756 | 0,834 | 0,789 | 0,854 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cell Contents: | | Spearman rho | | | | | | |
| | | P-Value | | | | | | |

Obr. 38. Korelační matice pro Spearmanův koeficient korelace.

### 4.1.3 Optimalizace

Nyní je vhodné nalézt optimální nastavení. Regresní rovnice pro rychlost řezání a parametr topografie Ra máme již vytvořeny. Tyto odezvy by mohli být vyhodnoceny jednotlivě, tedy rychlost řezání by byla maximalizována a nezávisle na ní by byl parametr Ra minimalizován, ale pravděpodobně by nebylo nalezeno stejné optimální nastavení. Proto bude využita vícekriteriální optimalizace v software Minitab.

Nejprve bude nastavena funkce příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými parametry, viz obrázek 39. Numerické hodnoty pro minimum, maximum a cíl nastaví pro minimalizaci či maximalizaci Minitab dle napočítaných hodnot odezev automaticky, pokud by bylo cílem optimalizovat na určitou hodnotu, je třeba použít ruční nastavení. Parametr Weight zakřivuje funkci příslušnosti pro spokojenost, bylo nastaveno defaultně 1, tedy je funkce po částech lineární. Parametr Importance nastavuje významnost obou odezev, v našem případě byly ponechány obě odezvy stejně významné.




Obr. 39. Nastavení funkcí příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými odezvami.

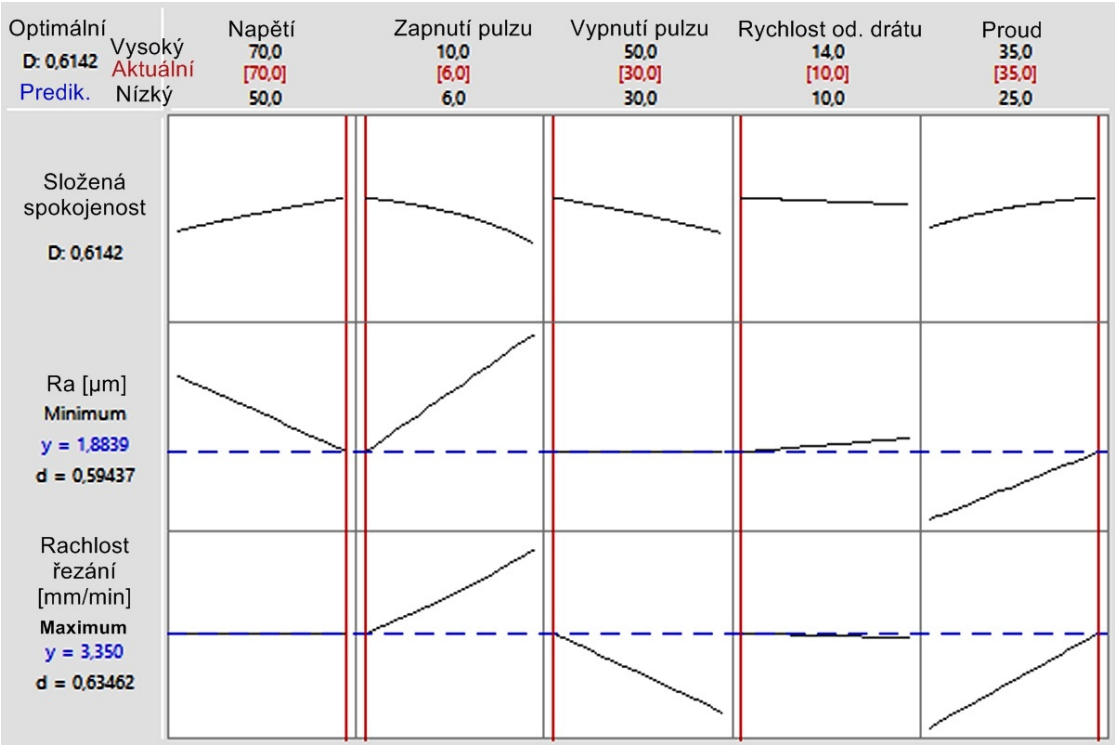
Výstupem z procedury Response Optimizer bylo optimální nastavení vstupů dle námi zvolených požadavků na výstupy, včetně predikce odezev a stupně příslušnosti spokojenosti s výsledkem. V našem případě byla spokojenost 61,42 %.

Dále Minitab odhadl interval spolehlivosti (CI) a predikční interval (PI) se spolehlivostí 95 % pro dané nastavení viz obrazek 40. 95 % CI značí, kde leží střední hodnota odezvy se spolehlivostí 95 % a 95 % PI určuje, kde leží individuální hodnota odezvy se spolehlivostí 95 %.

| Odezva | Fit | 95% CI | 95% PI |
|---|---|---|---|
| Ra [µm] | 1,8839 | (1,8208; 1,9471) | (1,7697; 1,9982) |
| Rychlost řezání [mm/min] | 3,3500 | (3,2623; 3,4377) | (3,2008; 3,4992) |

Obr. 40. PI a CI pro jednotlivé odezvy.

Posledním výstupem (obrázek 41) byl interaktivní obrázek spokojenosti vzhledem k nastavení vstupních parametrů. V našem případě byl nastaven vstup na optimum, ale nastavení je možné měnit přepsáním hodnot nebo posunováním červených čar myší. První řada grafu zobrazuje spokojenost pro jednotlivé parametry, další rady ukazují nastavení odezev včetně parciálních derivací těchto odezev, které zobrazují sklony úseček. Pro minimalizaci Ra na hodnotu 1,88 µm a maximalizaci rychlosti řezání na 3,3 mm/min je třeba nastavit parametry: Napětí = 70 V, Zapnutí pulzu = 6 µs, Vypnutí pulzu = 30 µs, Rychlost odvíjení drátu = 10 m/min a Proud = 35 A.




Obr. 41. Grafický výstup z procedury Response Optimizer.

### 4.1.4 Analýza jakosti povrchové a podpovrchové vrstvy

Při obrábění pomocí elektroerozivního drátového řezání dochází ke vzniku velmi specifické morfologie povrchů. Tato morfologie je tvořena velkým množstvím kráterů, vzniklých vlivem působení jednotlivých elektrických impulzů. Materiál obrobku, který byl vlivem eroze odstraněn, byl následně odplaven dielektrickou kapalinou. Další materiál byl z obrobku odstraněn v důsledku odpařování. Vzhled morfologií jednotlivých materiálů a jejich tepelných zpracování je však odlišný, proto je nezbytné jej vždy podrobit pečlivé analýze. Nejen morfologii ale i defekty viditelné na povrchu obrobků je nezbytné prozkoumat, protože mohou vést k předčasnému ukončení životnosti vyrobené součásti. Studium morfologie povrchu všech obrobených vzorků bylo provedeno pomocí elektronové mikroskopie na mikroskopu LYRA3. Pro zobrazení byl ve všech případech využit detektor zpětně odražených elektronů (BSE), přičemž vzorky byly vždy studovány při zvětšení 1 000x, 2 500x a následně 4 000x.

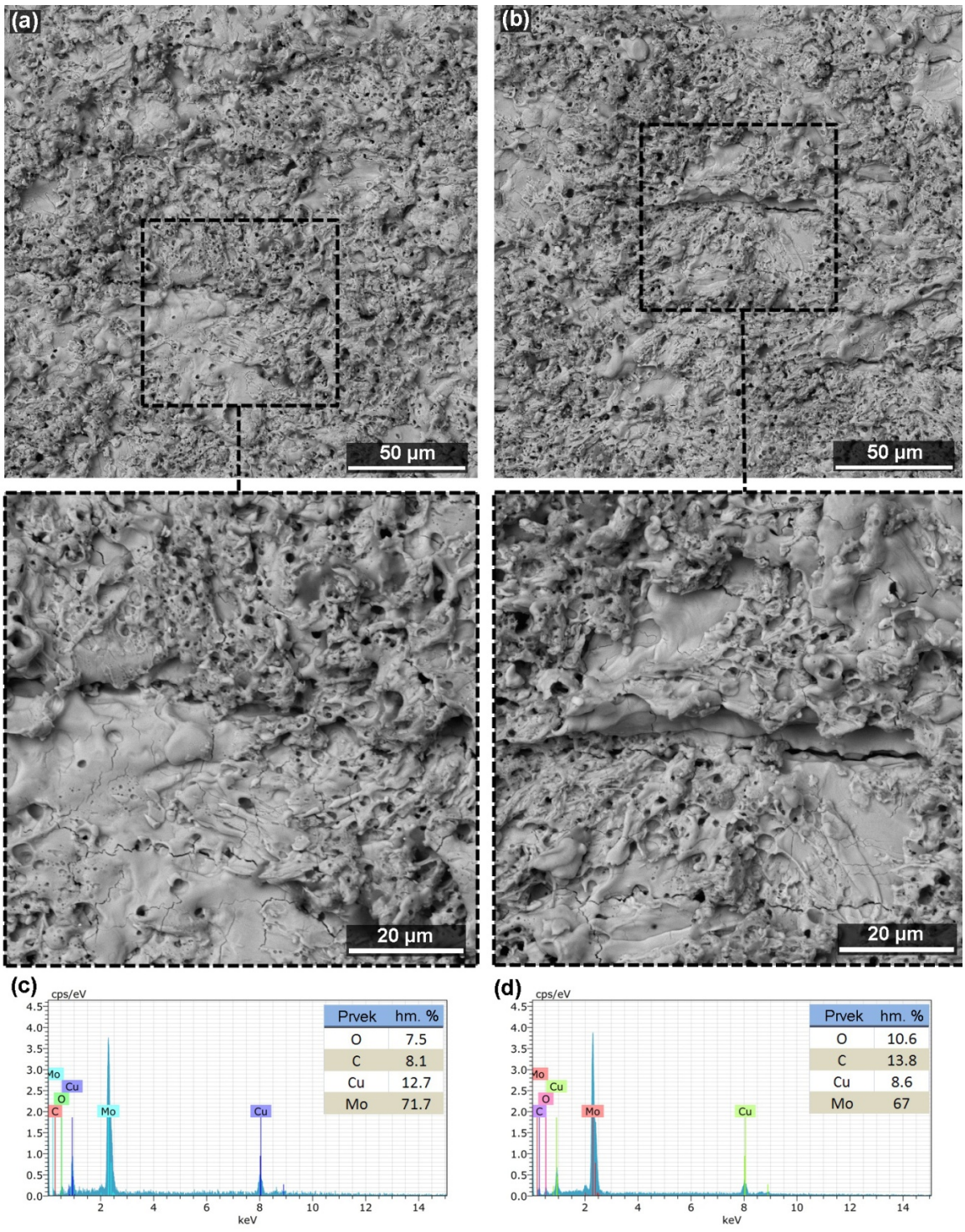
Vzhled morfologie všech vzorků byl téměř identický a nebyly patrné velké rozdíly, což již naznačovala analýza topografie, která v porovnání se vzorky z Hadfieldovy oceli [163] obrobenými stejnými parametry byla v mnohem menším intervalu naměřených hodnot. Pro znázornění byla tedy zvolena morfologie povrchu vzorku č. 14, který byl řezaný nejvyšší rychlostí a morfologie vzorku č. 20, který měl nejvyšší jakostí povrchu z hlediska topografie. Obě tyto morfologie i s detaily jsou znázorněny na obrázku 42(a, b), přičemž jsou zde patrná rozsáhlá hladká místa, která jsou pokryta drobnými trhlinkami a také jsou zde masivní trhliny vedoucí vždy jedním směrem.

Na povrchu obrobených vzorků je vlivem působení velmi vysokých teplot tvořena vrstva přetaveného materiálu tzv. přílepku, která představuje vrstvu zcela roztaveného a znovu zchladlého materiálu.

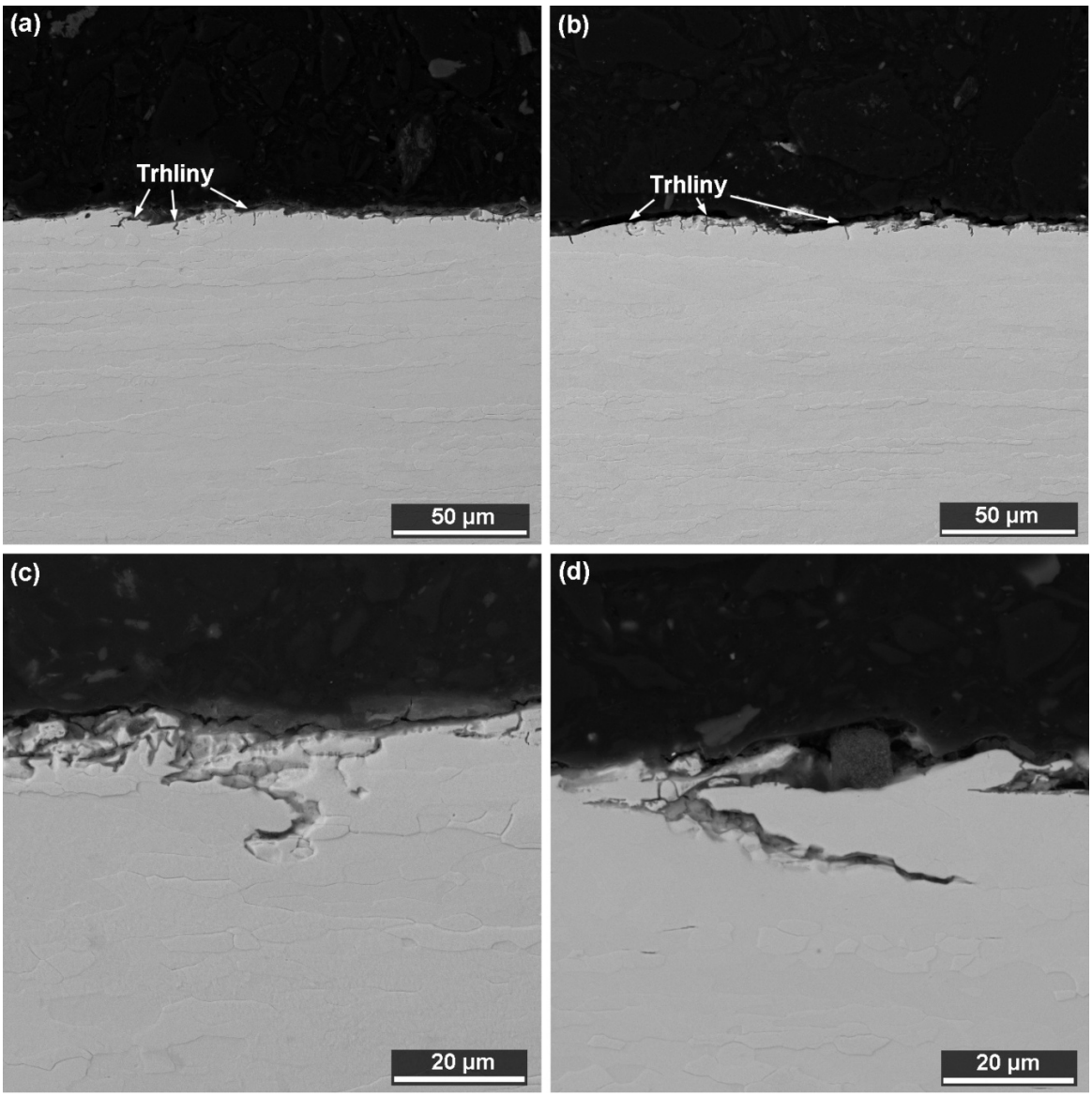
Vlivem těchto vysokých teplot dochází také k masivním difuzním pochodům mezi drátovou elektrodou a obráběným materiálem, což bylo prezentováno v souvislosti s obráběním nejrůznějších materiálů, jako např. Inconel 706 [164], hliníkového kompozitního materiálu (Al/$SiC_p$-MMC) [165] nebo čistého titanu [166]. Naopak odstranění difuzních pochodů bylo sledováno u 5. řezu při obrábění korozivzdorné oceli [167,168]. Na obrázku 42 (c, d) jsou znázorněny jednotlivá spektra provedené analýzy chemického složení na površích vzorků č. 14 (vzorek řezaný nejvyšší rychlostí) a č. 20 (vzorek s nejvyšší jakostí povrchu z hlediska topografie), přičemž z měření je zřejmé, že na obou površích ulpělo nemalé množství mědi (12,7 a 8,6 hm.%) z drátové elektrody. V tomto případě byla použita čistě měděná elektroda, proto se zde nevyskytuje zinek, jako v obdobných studiích.

Analýza podpovrchové vrstvy byla provedena užitím elektronové mikroskopie na předem připravených metalografických preparátech všech vzorků. Tato analýza je klíčová, z důvodu častého výskytu podpovrchových defektů v podobě trhlin [166,169,170] či vypálených kavit [163], které ovlivňují správnou funkčnost a predikovanou životnost vyrobené součásti. V průběhu celé analýzy byl použit detektor BSE a to vždy nejprve se zvětšením 1 000x a následně 2 500x a 4 000x.

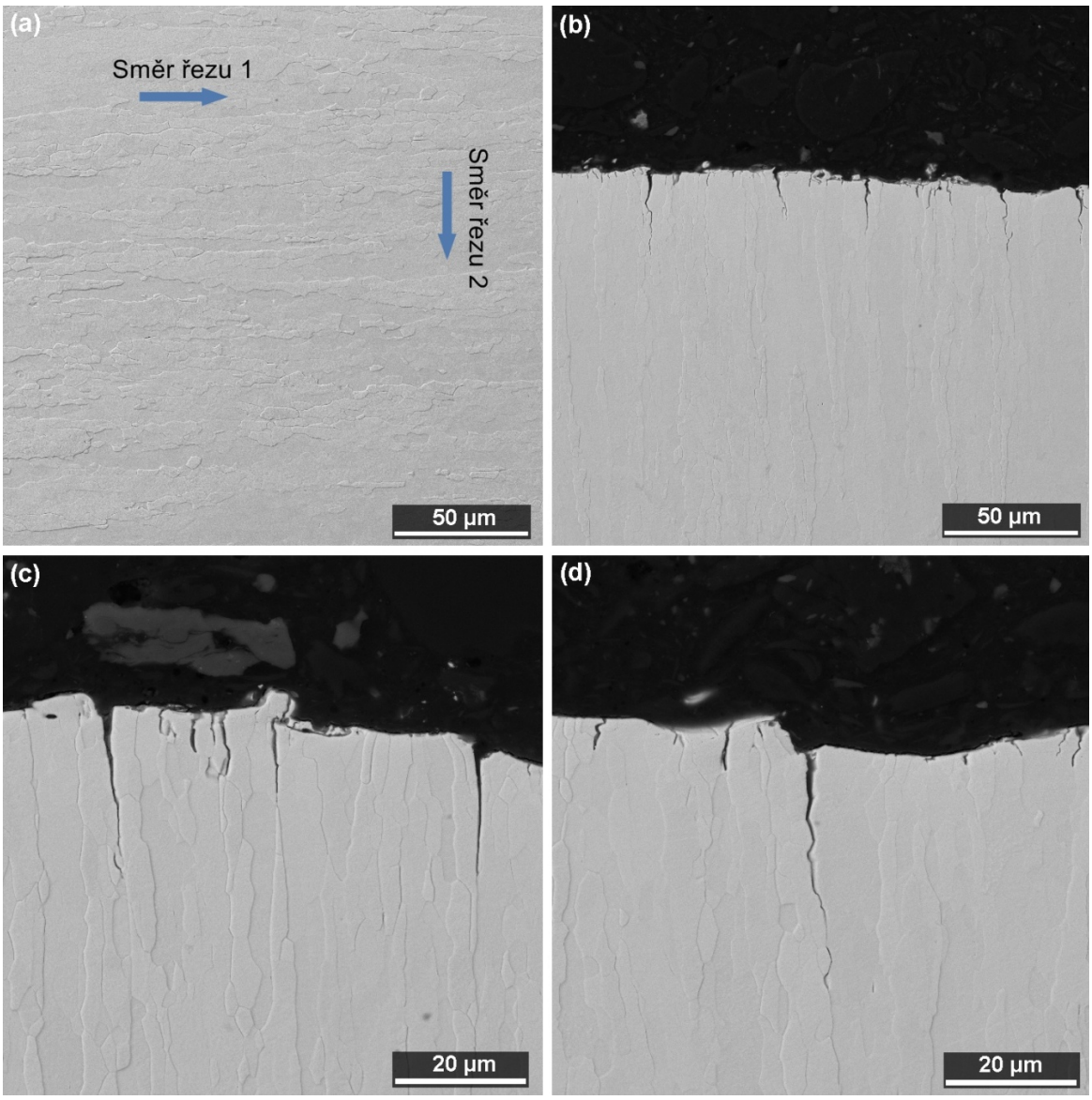
Snímky příčných řezů vzorky jsou znázorněny na obrázku 43, přičemž lze říci, že stejné trhliny byly nalezeny i na všech ostatních vzorcích, a to bez rozdílu četnosti výskytu či jejich délky, která se vždy pohybovala do 15 μm. Z detailu na obrázku 43 (d) je patrné, že trhliny se mohou šířit dále pod povrch, a proto je pro jejich výzkum nezbytná výroba metalografických preparátů. Takovéto trhliny mohou způsobit odseparování materiálu nad nimi a tím snížit kvalitu povrchu celého dílu. Bohužel při žádném nastavení parametrů stroje nebylo možné výskyt těchto trhlin omezit, proto byl proveden další kompletní plánovaný experiment obsahující 33 kol, při kterém byl otočen materiál obrobku vůči směru řezu o 90 °, jak je znázorněno na obrázku 44 (a). Z obrázku 44 (b-d) je zřejmé, že orientace řezu polotovarem je klíčové při vzniku masivních trhlin vedoucích až do hloubky 50 μm a které se šíří po hranicích zrn stále hlouběji do základního materiálu. Takové masivní a hluboké trhliny mají zásadní vliv na funkčnost a životnost vyrobené součásti, a proto je nezbytné, se tomuto směru řezu vyvarovat (je-li to technologicky možné).




Obr. 42. Morfologie povrchu vzorků SEM (BSE) včetně analýzy chemického složení (a) vzorek č. 14 řezaný nejvyšší rychlostí obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=10 µs, $T_{off}$=30 µs, $v$=10 m/min a $I$=35 A, (b) vzorek č. 20 s nejvyšší jakostí povrchu z hlediska topografie obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$=50 µs, $v$=14 m/min a $I$=25 A, (c) analýza chemického složení vzorku č. 14 z oblasti znázorněné čárkovaným čtvercem, (d) analýza chemického složení vzorku č. 20 z oblasti znázorněné čárkovaným čtvercem.




Obr. 43. Příčný řez zobrazující podpovrchové defekty a jejich detaily, SEM (BSE) (a, c) vzorek č. 14 řezaný nejvyšší rychlostí obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=10 µs, $T_{off}$=30 µs, $v$=10 m/min a $I$=35 A, (b, d) vzorek č. 20 s nejvyšší jakostí povrchu z hlediska topografie obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$=50 µs, $v$=14 m/min a $I$=25 A.

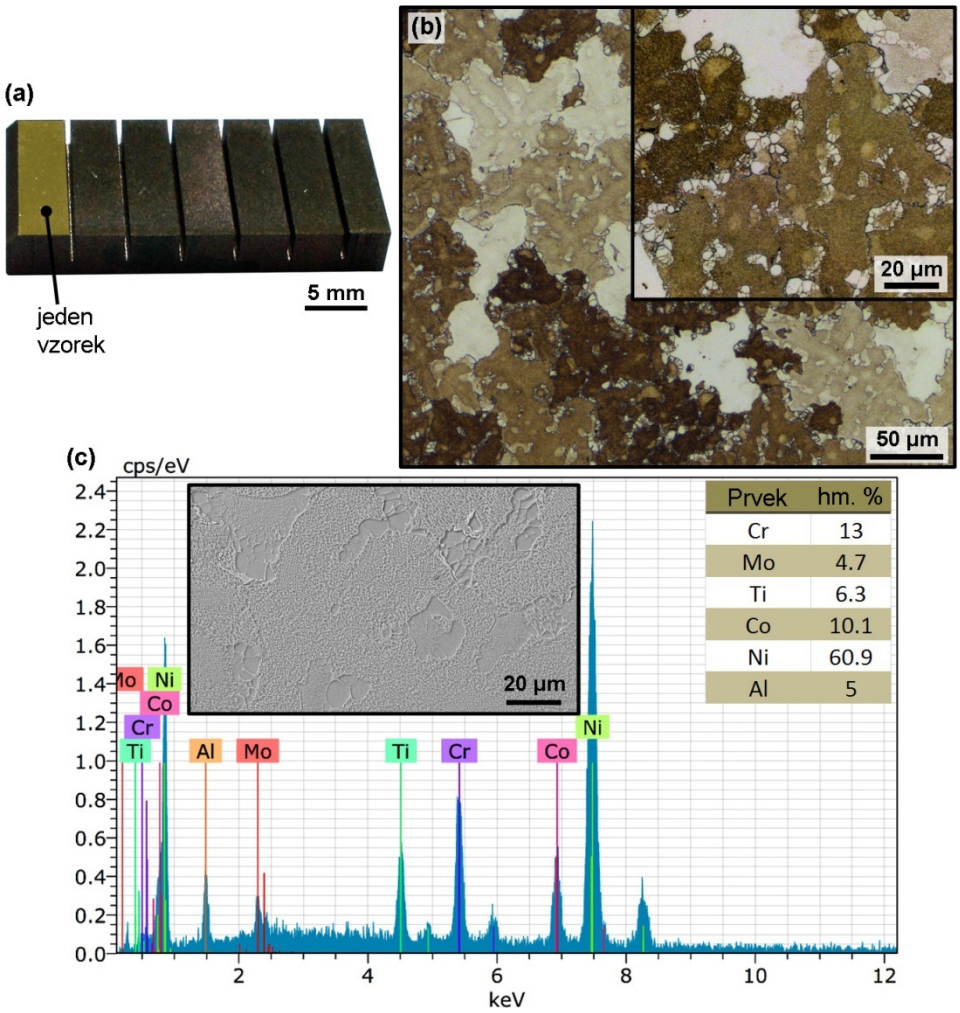



Obr. 44. Vliv orientace řezu materiálem na výskyt podpovrchových defektů (a) směr řezu v závislosti na orientaci zrn materiálu, (b-d) příčný řez se zobrazením hlubokých trhlin u vzorků č. 14 a 20 – Směr řezu 2.

## 4.2 Optimalizace obrábění niklové superslitiny B1914

Zvoleným materiálem pro experiment byla niklová superslitina B1914, ze které se v podmínkách firmy Kovosobotka, vyrabějí díly pro automobilový průmysl. Příklad vyrobených vzorků pro experiment je znázorněn na obrázku 45 spolu s mikrostrukturou materiálu B1914, jehož chemické složení dané normou v hm. % je 0,009 % C, 0,08 % B, 9,99 % Cr, 9,63 % Co, 5,51 % Al, 5,28 % Ti, 2,90 % Mo, 0,002 % Zr, Ni – zbytek. Superslitina B1914 patří do skupiny pokročilých materiálů s odolností proti oxidaci a dobrou pevností při vysokých teplotách. Je používána např. pro výrobu lopatek turbín nebo kol turmodmychadel, které jsou zatíženy vysokofrekvenčními vibracemi či jsou vystaveny únavovému zatížení s vysokým počtem cyklů. Pro experiment byl použit výchozí polotovar

hranol o tloušťce 10 mm, přičemž délka řezu každého vzorku byla vždy 3 mm. Metalografické preparáty byly připraveny stejným způsobem, který byl již popsán v kapitole 4.1 nicméně zde leptání proběhlo pomocí leptadla kalling‘s 2 (2 g $CuCl_2$ + 40 ml HCl + 40 ml ethanolu) po dobu 10 s.

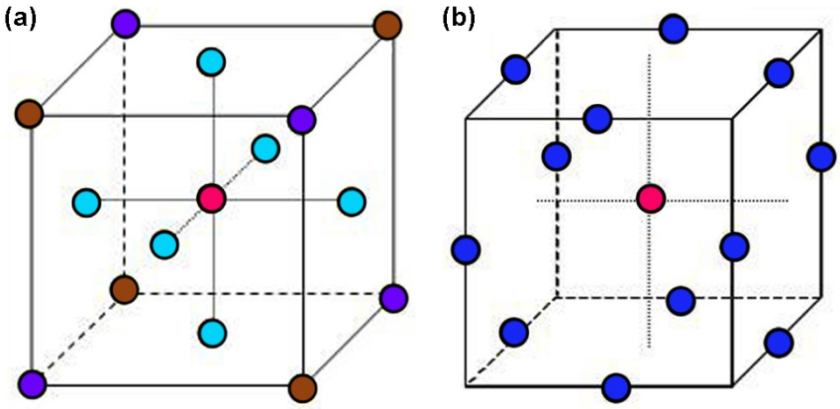



Obr. 45. (a) příklad vyrobených vzorků v rámci experimentu, (b) mikrostruktura obráběného materiálu B1914 (LM), (c) spektrum analýzy chemického složení obráběného materiálu včetně místa provedení analýzy.

Pro obrábění byl použit stejný WEDM jaký byl popsán v kapitole 4.1 nicméně zde byl použit mosazný drát typu CUT E o průměru 0,25 mm od firmy PENTA TRADING. Složení drátu je 60 % měd a 40 % zinku, přičemž jeho pevnost v tahu je 1000 $N/mm^2$.

Pro tento experiment byl zvolen Box and Behnken Response Surface Design, který byl speciálně navržen pro modelování plně kvadratického regresního modelu závislosti odezvy na vstupních proměnných. Rozdíl mezi tímto návrhem a Central Compossite Response Surface Design je znázorněn na obrázku 46 pro 3 vstupní proměnné. Pro 5 vstupních proměnných, jako je v našem případě nejdou tyto obrázky znázornit, protože nelze intuitivně zobrazit pětirozměrnou krychli, její čtyřrozměrné stěny a trojrozměrné hrany. Podstatou

Central Compossite Design (obrázek 46 (a)) je skládání, faktorového experimentu, který představují vrcholy n-rozměrné krychle – corner points (hnědé a fialové body) s axiálními body (světle modré body), které představují středy stěn této krychle. Pokud je těchto bodů ve vyšších dimenzích mnoho (number of runs = $2^n$) lze systematicky vybrat pouze polovinu, čtvrtinu,1/8 atd, těchto corner points. V případě 3 dimenzí vybereme hnědé nebo fialové corner points. Podstatou Box and Behnken Design (obrázek 46 (b)) je navrhnout body, aby optimálně popsaly plně kvadratický model, tedy působení jednotlivých faktorů, jejich kvadrátů a interakcí druhého řádu na odezvu. Až po dimenzi 5 se jedná o středy hran n–rozměrné krychle, ve vyšších dimenzích jsou zase body systematicky vynechávány. Nezávisle na designu je třeba přidat vhodný počet centrálních bodů (červené body) pro zachycení zakřivení plochy a ověření opakovatelnosti experimentů. Podrobně jsou tyto plány sběru dat popsány např. v Montgomery [43] nebo Vining [171].




Obr. 46. Central Compossite Design a (a) Box and Behnken Design, (b) pro tři vstupní proměnné.

Vstupními faktory experimentu bylo opět pět nezávislých technologických parametrů řezacího procesu Napětí $U$ [V], Zapnutí pulzu $T_{on}$ [µs], Vypnutí pulzu $T_{off}$ [µs], Rychlost odvíjení drátu $v$ [m/min] a Proud $I$ [A], jejichž mezní hodnoty jsou v tabulce 1. Mezní hodnoty jednotlivých těchto parametrů jsou zapsaných v tabulce 6. Hodnoty vstupních faktorů pro všechny běhy experimentu jsou uvedeny v tabulce 7, přičemž tyto byly určeny na základě rozsáhých předchozích testů a doporučení výrobce stroje.

**Tab. 6:** Mezní hodnoty vstupních parametrů pro plánovaný experiment (B1914)

| **Parametr** | **Napětí** | **Zapnutí pulzu** | **Vypnutí pulzu** | **Rychlost odvíjení drátu** | **Proud** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **[V]** | **[µs]** | **[µs]** | **[m/min]** | **[A]** |
| Minimum | 50 | 6 | 26 | 10 | 22 |
| Maximum | 70 | 12 | 60 | 16 | 36 |

**Tab. 7:** Vstupní parametry obrábění použité pro jednotlivé běhy experimentu (B1914)

| Číslo běhu | Napětí [V] | Zapnutí pulzu [µs] | Vypnutí pulzu [µs] | Rychlost odvíjení drátu [m/min] | Proud [A] | Číslo běhu | Napětí [V] | Zapnutí pulzu [µs] | Vypnutí pulzu [µs] | Rychlost odvíjení drátu [m/min] | Proud [A] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 60 | 9 | 60 | 13 | 36 | **24** | 60 | 6 | 60 | 13 | 29 |
| **2** | 50 | 9 | 43 | 13 | 36 | **25** | 60 | 12 | 43 | 13 | 22 |
| **3** | 70 | 9 | 26 | 13 | 29 | **26** | 70 | 9 | 43 | 16 | 29 |
| **4** | 60 | 12 | 26 | 13 | 29 | **27** | 60 | 12 | 43 | 10 | 29 |
| **5** | 60 | 9 | 43 | 10 | 36 | **28** | 60 | 6 | 43 | 13 | 22 |
| **6** | 70 | 9 | 43 | 10 | 29 | **29** | 60 | 9 | 60 | 16 | 29 |
| **7** | 70 | 12 | 43 | 13 | 29 | **30** | 60 | 9 | 26 | 13 | 36 |
| **8** | 60 | 6 | 43 | 10 | 29 | **31** | 50 | 9 | 26 | 13 | 29 |
| **9** | 60 | 6 | 26 | 13 | 29 | **32** | 70 | 6 | 43 | 13 | 29 |
| **10** | 60 | 9 | 43 | 13 | 29 | **33** | 60 | 9 | 43 | 10 | 22 |
| **11** | 60 | 12 | 43 | 16 | 29 | **34** | 60 | 12 | 60 | 13 | 29 |
| **12** | 60 | 6 | 43 | 16 | 29 | **35** | 60 | 9 | 60 | 10 | 29 |
| **13** | 60 | 12 | 43 | 13 | 36 | **36** | 60 | 6 | 43 | 13 | 36 |
| **14** | 50 | 9 | 43 | 13 | 22 | **37** | 50 | 12 | 43 | 13 | 29 |
| **15** | 50 | 6 | 43 | 13 | 29 | **38** | 60 | 9 | 43 | 13 | 29 |
| **16** | 60 | 9 | 43 | 13 | 29 | **39** | 60 | 9 | 26 | 16 | 29 |
| **17** | 60 | 9 | 43 | 13 | 29 | **40** | 60 | 9 | 26 | 13 | 22 |
| **18** | 70 | 9 | 60 | 13 | 29 | **41** | 60 | 9 | 43 | 16 | 22 |
| **19** | 60 | 9 | 43 | 13 | 29 | **42** | 60 | 9 | 26 | 10 | 29 |
| **20** | 70 | 9 | 43 | 13 | 36 | **43** | 60 | 9 | 60 | 13 | 22 |
| **21** | 70 | 9 | 43 | 13 | 22 | **44** | 60 | 9 | 43 | 13 | 29 |
| **22** | 60 | 9 | 43 | 16 | 36 | **45** | 50 | 9 | 60 | 13 | 29 |
| **23** | 50 | 9 | 43 | 10 | 29 | **46** | 50 | 9 | 43 | 16 | 29 |

Pro modelování odezev byla použita stejná pravidla, která již byla uvedena v kapitole 4.1. Modely byly opět vytvořeny ve statistickém software Minitab 17. Hodnoty vyhodnocených výstupních proměnných (odezev) v podobě parametrů topografie povrchu a rychlosti řezání jsou znázorněny tabulce 8. Topografie obrobených povrchů (včetně snímků 3D refiéfů) byla analyzována pomocí kontaktního 3D profilometru Dektak XT dodaného výrobcem BRUKER. Naměřená data byla dále zpracovávána v softwaru Vision 64 a Gwyddion.

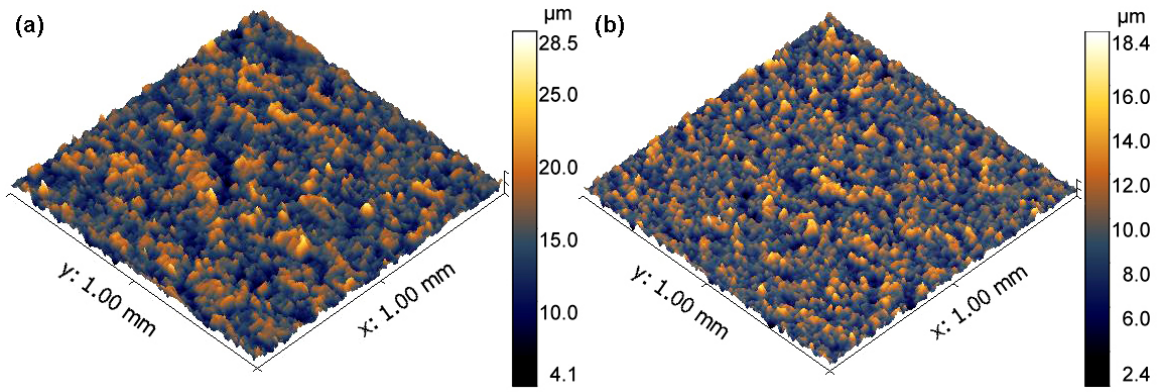
Z tabulky 8 je patrné, že se rychlost řezání pohybovala v rozmezí od 1 do 3,05 mm/min, přičemž této nejvyšší rychlosti řezání bylo dosaženo u vzorku č. 30 obrobeného nastavením parametrů stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=9 µs, $T_{off}$ =26 µs, $v$=13 m/min a $I$=36 A. Tato rychlost je vyšší než při obrábění oceli AISI 4140 o stejné výšce 10 mm ve studií Tosuna [113] či studii Datta [172].

**Tab. 8:** Hodnoty rychlosti řezání a parametrů topografie povrchů vzorků pro jednotlivé běhy experimentu

| Č. vz. | Rychlost řezání [mm/min] | Ra [µm] | Rq [µm] | Rz [µm] | Sa [µm] | Sq [µm] | Sz [µm] | Pa [µm] | Pq [µm] | Pz [µm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,8 | 4,05 | 4,98 | 28,41 | 3,99 | 4,90 | 31,08 | 4,21 | 5,26 | 26,29 |
| **2** | 2,2 | 3,40 | 4,27 | 25,28 | 3,36 | 4,19 | 28,57 | 3,47 | 4,33 | 22,69 |
| **3** | 2,3 | 2,98 | 3,68 | 23,20 | 2,89 | 3,65 | 25,27 | 2,82 | 3,60 | 19,84 |
| **4** | 2,5 | 3,19 | 4,04 | 24,62 | 3,19 | 4,03 | 26,89 | 3,47 | 4,28 | 23,10 |
| **5** | 2,2 | 3,51 | 4,47 | 29,58 | 3,48 | 4,44 | 33,69 | 3,10 | 3,79 | 17,39 |
| **6** | 1,7 | 3,00 | 3,81 | 26,23 | 2,82 | 3,55 | 26,97 | 5,04 | 6,06 | 27,32 |
| **7** | 1,95 | 3,23 | 4,06 | 25,21 | 3,16 | 3,98 | 26,95 | 3,14 | 3,79 | 15,98 |
| **8** | 1,3 | 2,24 | 2,80 | 17,17 | 2,23 | 2,78 | 16,69 | 2,02 | 2,53 | 13,62 |
| **9** | 1,8 | 2,43 | 3,10 | 20,11 | 2,40 | 3,06 | 22,42 | 3,23 | 4,13 | 20,24 |
| **10** | 1,55 | 2,64 | 3,32 | 20,03 | 2,60 | 3,28 | 21,87 | 2,44 | 3,01 | 17,16 |
| **11** | 1,85 | 3,05 | 3,82 | 23,38 | 3,02 | 3,79 | 26,19 | 3,05 | 3,79 | 19,07 |
| **12** | 1,3 | 2,40 | 3,01 | 19,33 | 2,39 | 3,00 | 21,01 | 2,37 | 3,02 | 15,99 |
| **13** | 2,35 | 3,54 | 4,45 | 27,42 | 3,42 | 4,28 | 29,54 | 2,85 | 3,52 | 16,94 |
| **14** | 1,4 | 2,32 | 2,91 | 18,62 | 2,29 | 2,88 | 19,49 | 2,41 | 2,92 | 16,40 |
| **15** | 1,25 | 2,34 | 3,02 | 21,95 | 2,32 | 2,98 | 26,46 | 2,62 | 3,40 | 19,00 |
| **16** | 1,6 | 2,73 | 3,47 | 22,56 | 2,70 | 3,37 | 24,92 | 2,36 | 3,07 | 20,82 |
| **17** | 1,6 | 2,66 | 3,42 | 23,74 | 2,62 | 3,37 | 24,52 | 2,40 | 2,95 | 13,77 |
| **18** | 1,2 | 2,79 | 3,56 | 22,92 | 2,69 | 3,45 | 23,45 | 3,42 | 4,24 | 22,46 |
| **19** | 1,6 | 2,72 | 3,46 | 24,99 | 2,67 | 3,37 | 25,63 | 2,81 | 3,40 | 17,08 |
| **20** | 2,2 | 3,59 | 4,51 | 27,74 | 3,48 | 4,37 | 27,98 | 3,49 | 4,44 | 22,20 |
| **21** | 1,4 | 2,61 | 3,31 | 21,14 | 2,52 | 3,18 | 21,26 | 2,49 | 3,02 | 14,82 |
| **22** | 2,25 | 3,68 | 4,16 | 26,93 | 3,51 | 4,41 | 27,10 | 3,07 | 3,90 | 19,89 |
| **23** | 1,5 | 2,79 | 3,45 | 21,54 | 2,75 | 3,41 | 23,32 | 3,08 | 3,60 | 16,34 |
| **24** | 1 | 2,61 | 3,25 | 18,66 | 2,45 | 3,06 | 18,72 | 2,72 | 3,31 | 15,61 |
| **25** | 1,55 | 2,89 | 3,63 | 26,25 | 2,89 | 3,63 | 29,31 | 3,04 | 3,72 | 17,21 |
| **26** | 1,6 | 2,74 | 3,46 | 23,28 | 2,73 | 3,44 | 23,15 | 2,82 | 3,65 | 19,73 |
| **27** | 1,9 | 3,20 | 4,04 | 24,37 | 3,16 | 3,99 | 25,34 | 3,07 | 3,89 | 18,13 |
| **28** | 1,2 | 2,19 | 2,76 | 16,86 | 2,14 | 2,70 | 18,33 | 1,87 | 2,39 | 13,73 |
| **29** | 1,2 | 2,61 | 3,31 | 22,06 | 2,58 | 3,28 | 26,04 | 2,55 | 3,29 | 17,20 |
| **30** | 3,05 | 3,25 | 4,16 | 29,58 | 3,18 | 4,08 | 34,61 | 4,14 | 5,07 | 22,65 |
| **31** | 2,25 | 2,81 | 3,54 | 24,01 | 2,80 | 3,52 | 26,78 | 3,26 | 3,91 | 18,37 |
| **32** | 1,3 | 2,47 | 3,08 | 19,38 | 2,41 | 3,01 | 22,74 | 2,15 | 2,68 | 13,64 |
| **33** | 1,4 | 2,50 | 3,17 | 22,38 | 2,47 | 3,12 | 24,29 | 2,42 | 3,10 | 17,09 |
| **34** | 1,5 | 3,06 | 3,87 | 22,95 | 3,01 | 3,81 | 25,69 | 3,32 | 4,03 | 18,15 |
| **35** | 1,2 | 2,70 | 3,38 | 20,65 | 2,62 | 3,28 | 21,62 | 2,63 | 3,23 | 15,00 |
| **36** | 1,9 | 3,12 | 3,92 | 24,14 | 3,07 | 3,87 | 26,32 | 3,96 | 5,03 | 26,29 |
| **37** | 1,8 | 2,73 | 3,41 | 20,37 | 2,72 | 3,40 | 22,98 | 2,67 | 3,46 | 18,94 |
| **38** | 1,6 | 2,48 | 3,09 | 20,31 | 2,47 | 3,08 | 23,29 | 2,59 | 3,10 | 12,59 |
| **39** | 2,2 | 2,71 | 3,43 | 21,76 | 2,64 | 3,33 | 24,65 | 3,13 | 3,83 | 19,10 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **40** | 1,9 | 2,68 | 3,38 | 20,62 | 2,65 | 3,34 | 21,24 | 3,17 | 3,98 | 20,02 |
| **41** | 1,45 | 2,54 | 3,21 | 23,56 | 2,49 | 3,15 | 24,81 | 2,38 | 3,01 | 14,09 |
| **42** | 2,4 | 2,89 | 3,66 | 28,04 | 2,79 | 3,55 | 29,18 | 3,36 | 4,36 | 21,10 |
| **43** | 1,1 | 2,43 | 3,03 | 18,59 | 2,43 | 3,03 | 20,06 | 3,26 | 4,03 | 21,63 |
| **44** | 1,6 | 2,70 | 3,38 | 21,31 | 2,68 | 3,36 | 22,54 | 2,90 | 3,48 | 15,79 |
| **45** | 1,2 | 2,72 | 3,37 | 20,61 | 2,68 | 3,32 | 22,05 | 2,42 | 2,93 | 14,47 |
| **46** | 1,5 | 2,75 | 3,43 | 20,37 | 2,66 | 3,32 | 23,22 | 3,09 | 3,89 | 21,52 |

Vzorkem s nejnižší hodnotou parametru Ra 2,18 µm a současně i Rz 16,86 µm byl vzorek č. 28 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =43 µs, $v$=13 m/min a $I$=22 A. Jeho 3D reliéf je znázorněn na obrázku 47 (a), přičemž z celkové výšky barevné škály je jasné, že se od vzorku č. 1, jehož 3D reliéf je znázorněn na 47 (b) výrazně odlišuje. Je také patrný rozdíl v četnosti výskytu vrcholků kráterů, které mají podobný charakter, jako další niklová slitina Nimonic 263 [173]. Hodnota Ra 2,18 µm je pro výšku obrobku 10 mm relativně běžnou a byla také vyhodnocena při obrábění titanové slitiny Ti-6Al-4V či Inconel 718 [174], nebo ocel SAE 4140 [113].



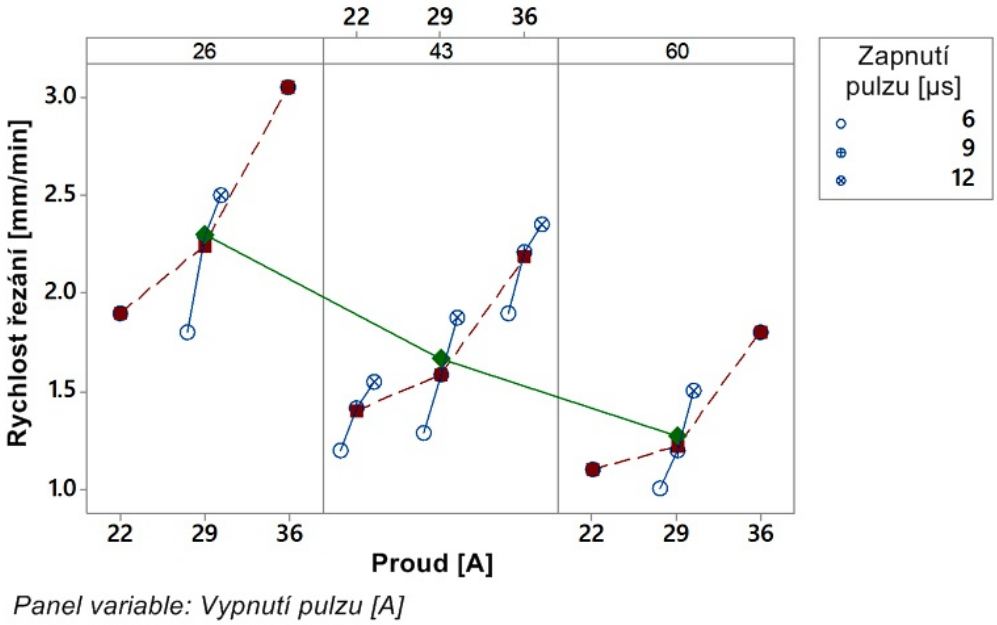

Obr. 47. (a) 3D reliéf vzorku č. 1, (b) 3D reliéf vzorku č. 28.

### 4.2.1 Model pro rychlost řezání

Na základě získaných hodnot (tabulka 8) byl vytvořen plně kvadratický lineární regresní model, ze kterého byly metodou Stepwise odstraněny nevýznamné prediktory (p-value <0.05). Vliv jednotlivých prediktorů a jejich skupin na rychlost řezání je uveden v tabulce 9 včetně p-hodnot. Model popisuje 98,33 % variability naměřené rychlosti řezání a je adekvátní ($p\text{-value}_{Lack\text{-}of\text{-}Fit} \geq 0{,}05$), tedy nepůsobí zde významné faktory, které nebyly zařazeny do experimentu. Působení nejvýznamnějších faktorů na řeznou rychlost je zobrazeno v Multi-vary chart zobrazeného na obrázku 48. Z tabulky 9 a obrázku 48 je zřejmé, že nejvýznamněji rychlost řezání ovlivňuje vstupní faktor Vyplutí pulzu a to negativně, tedy s rostoucím Vypnutí pulzu klesá rychlost řezání. Druhým nejvýznamnějším prediktorem je Proud, který působí pozitivně. Kvadráty a interakce těchto dvou faktorů jsou statisticky významné, ale jejich vliv je nižší, stejně jako je nižší vliv statisticky významného pozitivní působení Napětí. Zapnutí pulzu působí na odezvu

pozitivně a je významný. Rychlost odvíjení drátu ani jeho kvadrát a interakce nejsou statisticky významné. Samotná regresní rovnice popisující vztah mezi významnými prediktory a rychlost řezání je:

$$v_c = 3{,}662 + 0{,}00344\,U + 0{,}09063T_{on} - 0{,}04832T_{off} - 0{,}1562I + 0{,}000530T_{off}^2 + 0{,}004402I^2 - 0{,}000945T_{off}I \quad (5)$$



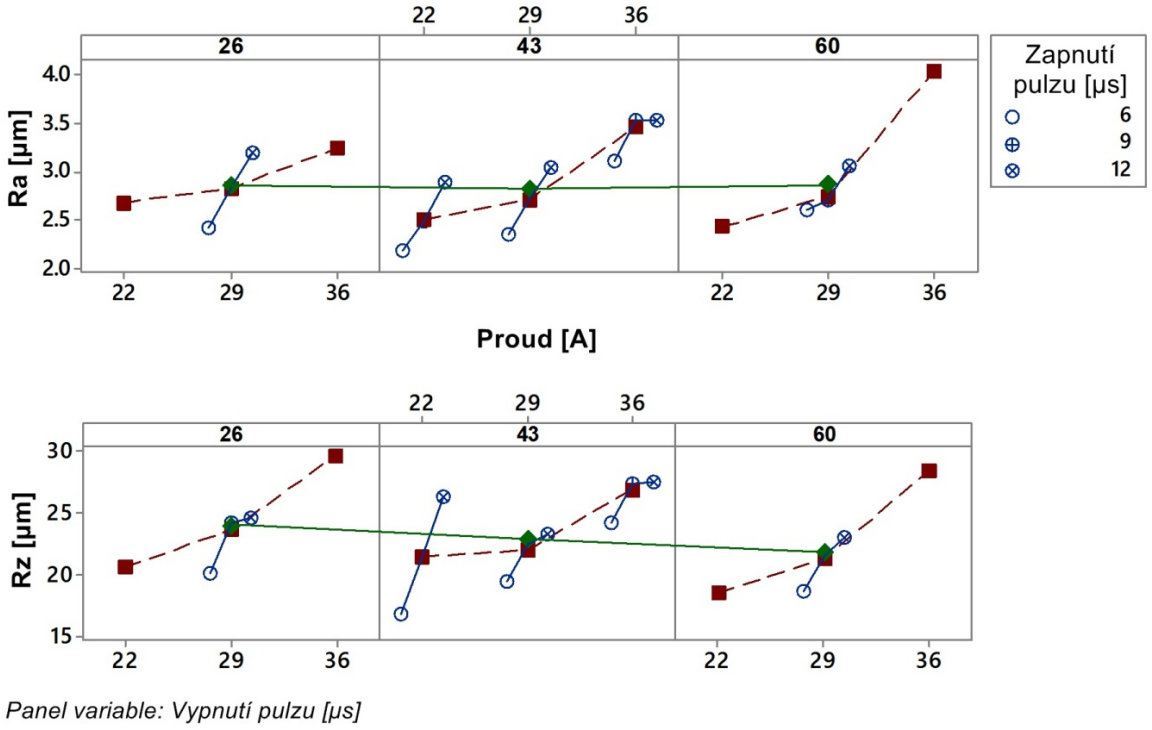

Obr. 48. Multi-Vari Chart pro rychlost řezání pro Zapnutí pulzu, Proud a Vypnutí pulzu.

**Tab. 9:** Příspěvek a vyznamnost prediktorů v modelu pro řeznou rychlost

| **Source** | **Contribution** | **P-Value** |
|---|---|---|
| Model ($R^2$) | 98,33 % | 0,000 |
| Linear | 90,73 % | 0,000 |
| Napětí [V] | 0,21 % | 0,034 |
| Zapnutí pulzu [µs] | 13,27 % | 0,000 |
| Vypnutí pulzu [µs] | 47,16 % | 0,000 |
| Proud [A] | 30,09 % | 0,000 |
| **Square** | 7,03 % | 0,000 |
| Vypnutí pulzu [µs] * Vypnutí pulzu [µs] | 1,71 % | 0,000 |
| Proud [A] * Proud [A] | 5,32 % | 0,000 |
| **2-Way Interaction** | 0,57 % | 0,001 |
| Vypnutí pulzu [µs] * Proud [A] | 0,57 % | 0,001 |
| Error | 1,67 % | |
| Lack-of-Fit | 1,34 % | 0,097 |
| Pure Error | 0,32 % | |
| Total | 100,00 % | |

### 4.2.2 Modely pro parametry topografie povrchu Ra a Rz

Oba parametry topografie Ra a Rz jsou statisticky závislé, což je vidět jak z tabulky 8 tak z testů nezávislosti. Pearsonova korelece Ra a RZ je 0,836, a Spearmanova korelace (pořadová korelece Ra a RZ je 0,848) a p-hodnota pro oba testy nezávislosti, založené na těchto korelacnich koeficientech je 0,000. Vzhledem k této úzké závislosti popíšeme pouze regresní model pro Ra. Model pro Rz by vyšel velice podobně, což je zřejmé i z velice podobných Multi-vari charts pro obě charakteristiky znázorněných na obrázku 49.




Obr. 49. Multi-Vari Chart pro Ra a Rz pro Zapnutí pulzu, Proud a Vypnutí pulzu.

Stejně jako v případě rychlosti řezání byl sestaven plně kvadraticky lineární regresní model, který byl zůžen metodou Stepwise selection (p-value < 0,05). Vliv jednotlivých prediktorů a jejich skupin včetně jejich významnosti (p-value) je uveden v tabulce 10. Model jako celek popisuje 92,08 % variability měřeného parametru topografie Ra a je adekvátní ($p\text{–value}_{\text{Lack–of–Fit}} \geq 0.05$). Regresní rovnice popisující závislost Ra na jednotlivých prediktorech je:

$$R_a = 6{,}59 + 0{,}00971U + 0{,}1064T_{on} - 0{,}0639T_{off} - 0{,}348I + 0.00559I^2 + 0.002208T_{off}I \quad (6)$$

Z výše uvedeného Multi-vari chartu a tabulky 10 je zřejmé, že nejvýznamněji na Ra působí Proud. Ra roste s rostoucím Proudem, takže jeho optimální nastavení vzhledem k Ra je na dolní úrovni, protože Ra minimalizujeme. Významný kvadrát Proud způsobuje, že nárůst v Ra v dolní polovině rozsahu Proudu je pomalejší než horní polovině, jak je vidět na

obrázku 49. Druhý nejvýznamnější faktor je Zapnutí pulzu taktéž způsobuje růst Ra, které se snažíme minimalizovat. Tedy optimální nastavení Zapnutí pulzu je též minimální úroveň. Působení dalších faktorů a interakcí uvedených v tabulce 10 je významné, ale jejich vliv je nižší. V modelu byl ponechán i nevýznamný faktor Vypnutí pulzu, kvůli zachování hierarchie, protože je významná jeho interakce.

**Tab. 10:** Příspěvek a vyznamnost prediktorů v modelu pro Ra

| **Source** | **Contribution** | **P-Value** |
|---|---|---|
| Model ($R^2$) | 91,05 % | 0,000 |
| Linear | 76,89 % | 0,000 |
| Napětí [V] | 2,02 % | 0,005 |
| Zapnutí pulzu [µs] | 21,78 % | 0,000 |
| Vypnutí pulzu [µs] | 0,00 % | 0,941 |
| Proud [A] | 53,09 % | 0,000 |
| **Square** | 10,46 % | 0,000 |
| Proud [A] * Proud [A] | 10,46 % | 0,000 |
| **2-Way Interaction** | 3,69 % | 0,000 |
| Zapnutí pulzu [µs] * Proud [A] | 3,69 % | 0,000 |
| Error | 8,95 % | |
| Lack-of-Fit | 8,38 % | 0,199 |
| Pure Error | 0,57 % | |
| Total | 100,00 % | |

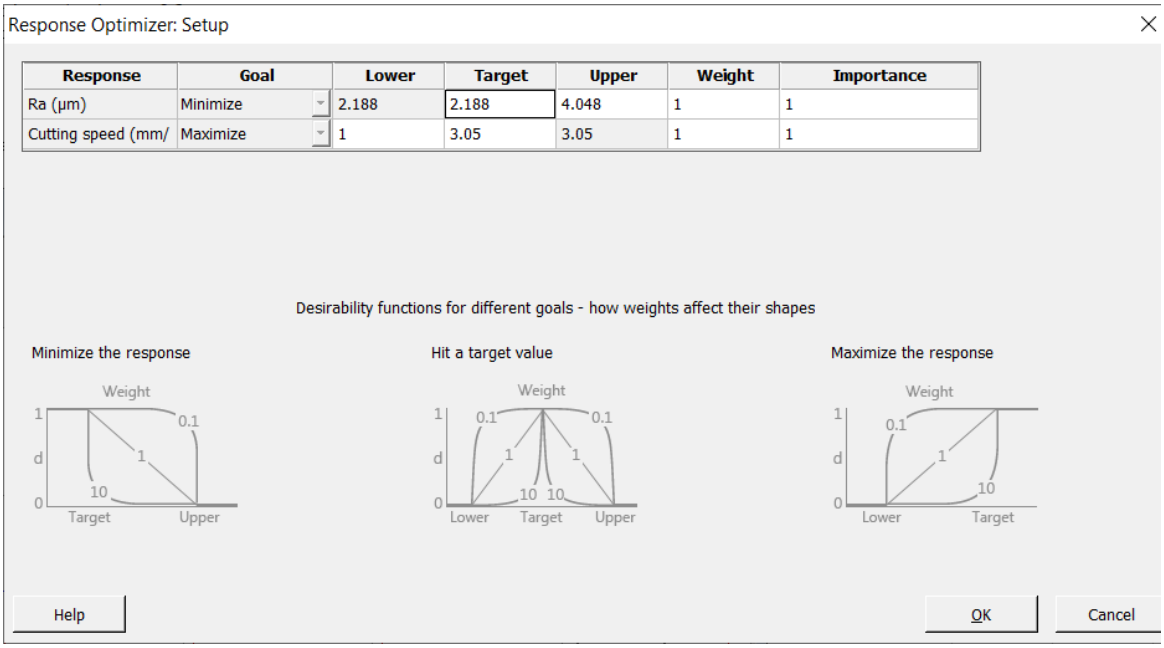
### 4.2.3 Optimalizace

Při srovnání regresních modelů pro rychlost řezání a Ra vidíme technický rozpor, který je pro WEDM typický. Požadavek na maximální rychlost řezání jde proti požadavku na minimální Ra (především v parametrech Proud a Zapnutí pulzu) a optimum je třeba hledat vícekriteriální optimalizací.

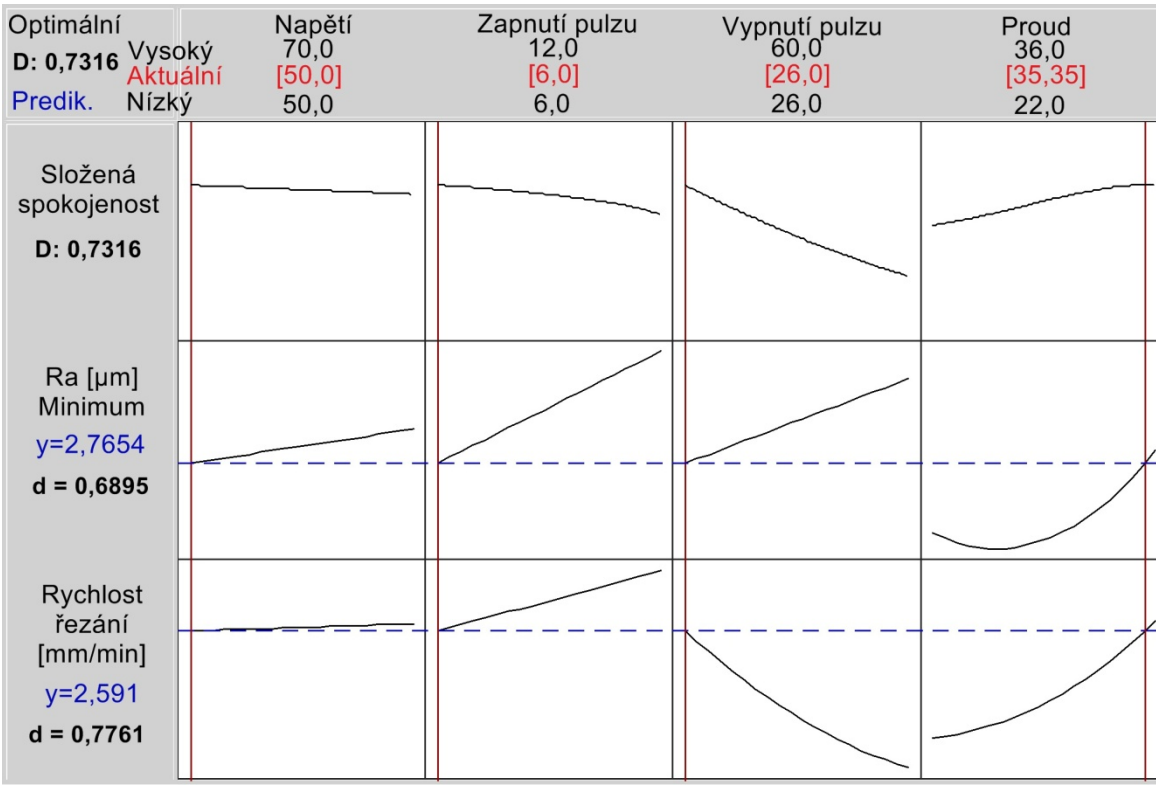
Stejně jako v případě čistého molybdenu bylo použito procedury Response Optimizer v Minitabu 17 s původním nastavením funkcí příslušnosti (po částech lineární funkce příslušnosti, kde meze jsou dány pozorovanými minimy a maximy, a významnost obou parametrů stejná) jak je znázorněno na obrázku 50.

Grafickým výstupem je interaktivní graf (obrázek 51), kde je červeně zobrazeno optimální natavení vstupních parametrů procesu a 3 řady grafů, první je funkce příslušnost spokojenosti a na druhých dvou jsou řezy odezvovými funkcemi v jednotlivých dimenzích.

Parametr Proud nelze nastavit s přesností 0,1 A, proto proud bude nastaven na 35 A a celková spokojenost bude 0,7311, což je nepodstatná změna. Technicky realizovatelné optimální nastavení je Napětí=50 V, Zapnutí pulzu=6 µs, Vypnutí pulzu=26 µs a Proud=35 A. Pro toto nastavení jsou bodové odhady (Fit), intervaly spolehlivosti (CI) a predikční intervaly (PI) se spolehlivostí 95 % uvedeny v tabulce 11.




Obr. 50. Nastavení funkcí příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými odezvami.

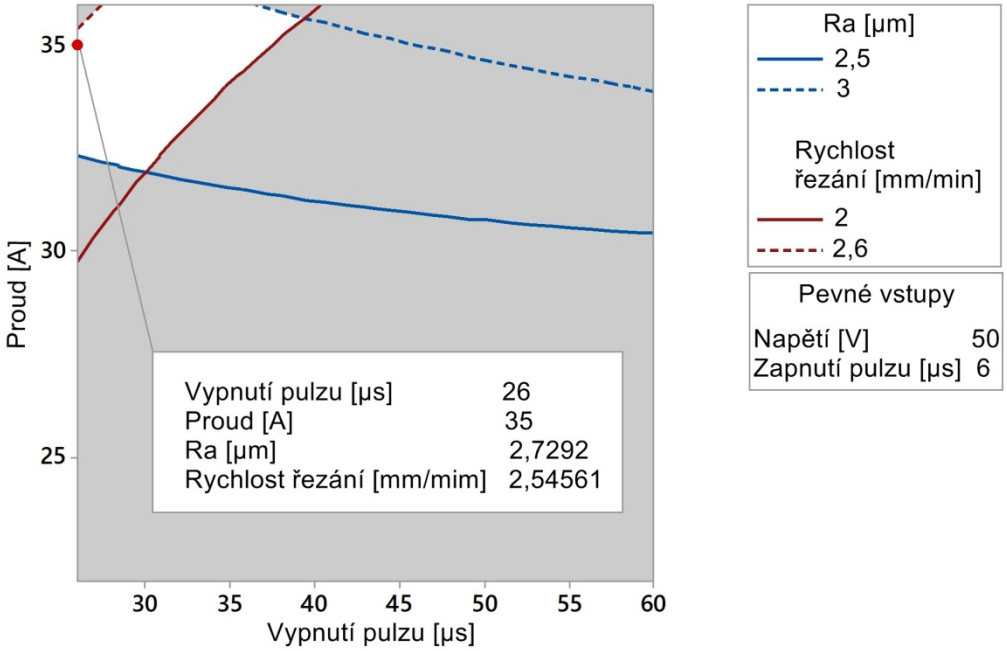



Obr. 51. Grafický výstup z procedury Response Optimizer.

**Tab. 11:** Odhady odezev v technicky realizovatelném optimu

| Odezva | Fit | 95% CI | 95% PI |
|---|---|---|---|
| Ra[µm] | 2,7292 | (2,55078; 2,90762) | (2,40970; 3,04871) |
| Rychlost řezání [mm/min] | 2,54561 | (2,45587; 2,63535) | (2,39045; 2,70077) |

Další možností částečné optimalizace je využití procedury Overlaid Contour Plot, která vykresluje průnik požadavku na odezvy ve dvou vstupních proměnných. Průnik je vykreslován jako bíla plocha v interaktivním 2D grafu, kde lze kurzorem přejíždet a odečítat souřadnice vstupních parametrů a odpovídající hodnoty odezev. Užití této procedury je ilustrováno na obrázku 52, kde jsou zafixovány parametry Napětí = 50 V, Zapnutí pulzu = 6 µs a byly zvoleny požadavky na odezvy 2,5 < Ra [µm]< 3 a 2<Rychlost řezání [mm/min]<2,6. Toto sice není nejlepší nástroj pro hledání globálního optima vícedimenzionálních plánovaných experimentů, ale může například pomoci s hledáním nastavení dvou nejvýznamnějších prediktoru vzhledem k dvěma a více odezvám.



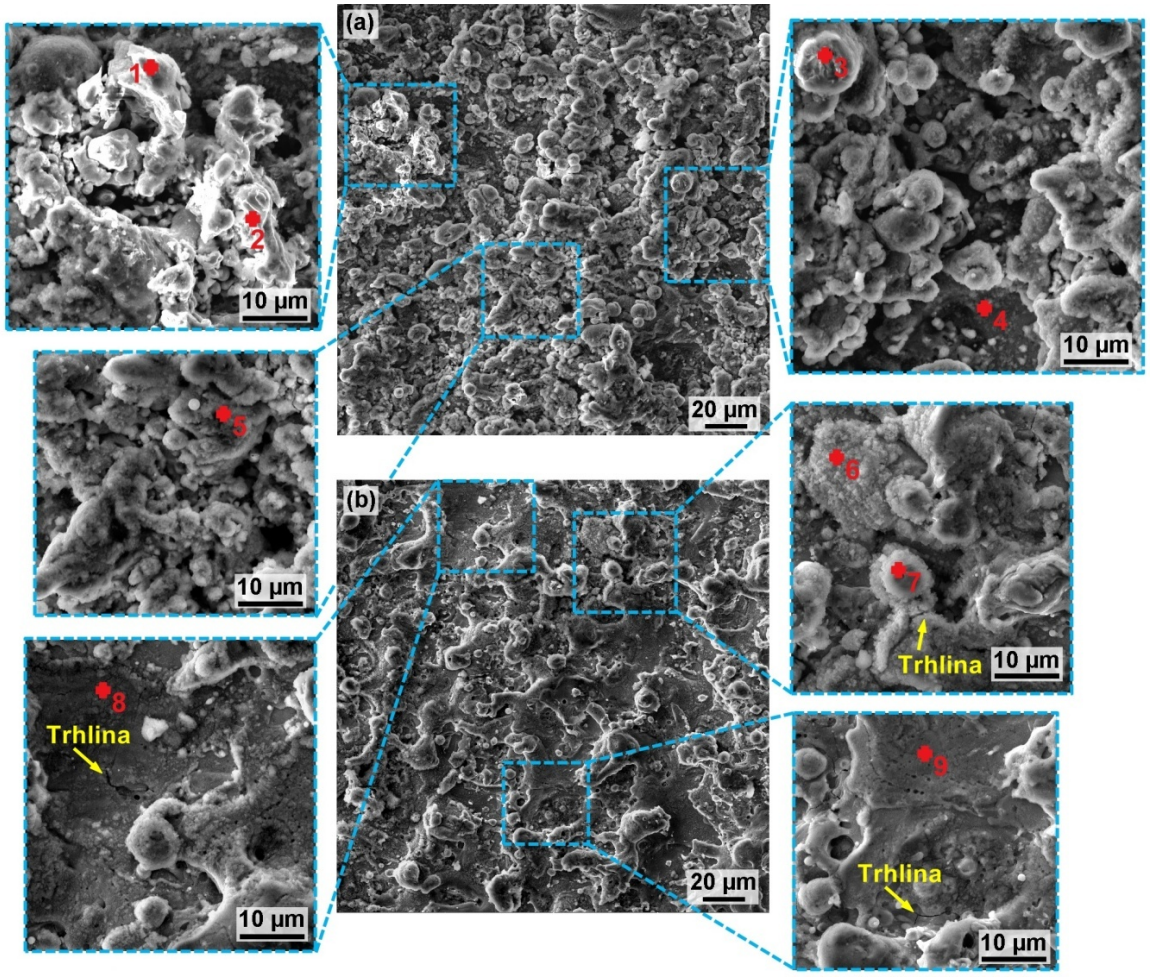

Obr. 52. Vrstevnicový graf pro více odezev.

### 4.2.4 Analýza jakosti povrchové a podpovrchové vrstvy

Studium morfologie povrchu všech obrobených vzorků bylo provedeno pomocí elektronového mikroskopu LYRA3. Pro zobrazení byl ve všech případech využit detektor sekundárních elektronů (SE), přičemž vzorky byly vždy studovány při zvětšení 1 000x, 2 500x a následně 4 000x.

Morfologie obrobených vzorků dle nastavení parametrů stroje pro č. 1 (obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=9 µs, $T_{off}$ =60 µs, $v$=13 m/min a $I$=36 A) a 28 (obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =43 µs, $v$=13 m/min a $I$=22 A) je znázorněna na obrázku 40, včetně vyznačení míst ve kterých byla provedena analýza chemického složení, která byla shrnuta do tabulky 12. Dále je na tomto obrázku množství zvětšených míst, které umožňují detailní náhled na obrobenou plochu. Vzhled morfologie na obrázku 53 (a) je velmi členitý a je zde patrné velké množství přílepku. Nejsou zde patrná téměř žádná dna kráterů a celý povrch je pokryt četnými útvary přílepku skládajích se převážně z mědi a zinku. Mědí a zinkem téměř bezvýhradně jsou tvořeny útvary s místy EDX měření č. 1 a 2, přičemž tyto útvary mají výrazně světlejší barvu než okolní morfologie. Obdobná segregace prvků, tentokrát však v podobě prvku pocházejícího z materiálu

obrobku byla pozorována při obrábění měděné slitiny Ampcoloy [175]. Hladká dna kráterů dobře viditelná na obrázku 53 (b) byla studována i na některých dalších materiálech jako např. martenzitické korozivzdorné oceli [167] nebo čistém titanu [176], přičemž tyto lokace jsou pokryty jen minimálním množstvím difundovaných prvků. Na površích vzorků byly studovány pouze velmi drobné trhlinky v délce do 10 µm a to velmi ojediněle. Vzorky č. 1 a 28 byly zvoleny pro znázornění morfologie proto, že povrch vzorku č. 1 obsahuje celkové největší množství difundovaných prvků (měď a zinek) z drátové elektrody a č. 28 naopak množství nejmenší.

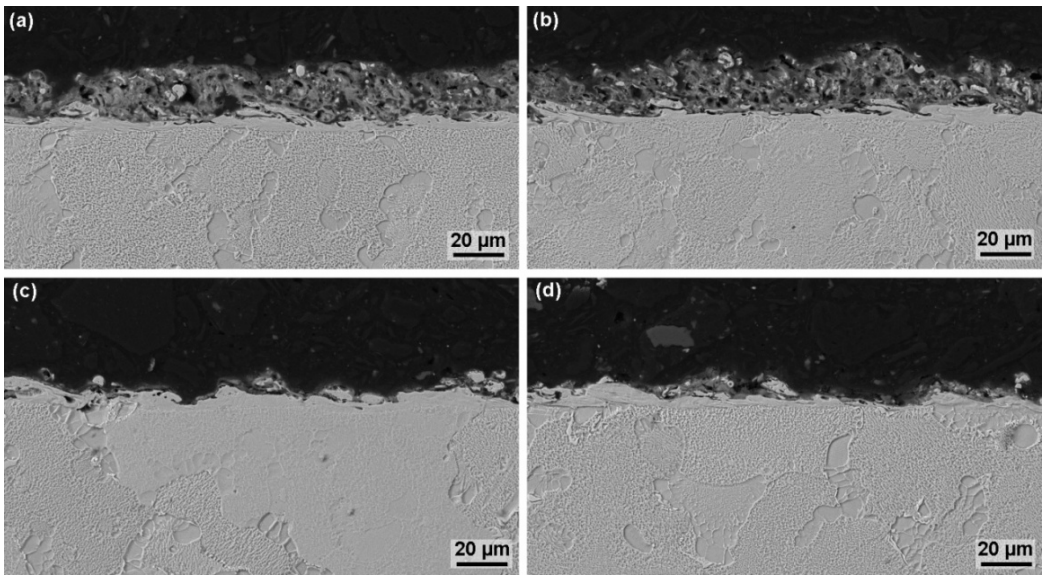



Obr. 53. Morfologie povrchu vzorků (SEM/SE) včetně detailů a také vyznačení míst ve kterých byla provedena analýza EDX jejíž výsledky jsou v tabulce 11 (a) vzorek č. 1 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=9 µs, $T_{off}$=60 µs, $v$=13 m/min a $I$=36 A, (b) vzorek č. 28 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$=43 µs, $v$=13 m/min a $I$=22 A.

**Tab.12** Analýza chemického složení v jednotlivých místech dle obrázku 40. v hm. %

| Prvek | Místo měření | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** |
| **C** | 3,7 | | 11 | 3 | 8,3 | 1,7 | 1,3 | 5,3 | 5,9 |
| **O** | 8,7 | 0,7 | 16,7 | 5,6 | 15,2 | 5,4 | 2 | 10,1 | 11,4 |
| **Cr** | 2,3 | 2,6 | 2,6 | 10,1 | 5,2 | 8 | 11,9 | 8,3 | 8,1 |
| **Co** | | | 3 | 6,4 | 3,7 | 6,5 | 9,7 | 6,9 | 7,2 |
| **Al** | 7,1 | | 1,7 | 9,4 | 7,4 | 16,1 | 2,6 | 6 | 5,6 |
| **Ti** | 2,3 | | 1,6 | 7,8 | 6 | 8,5 | 6,7 | 5 | 4,8 |
| **Mo** | 1,7 | | 1,5 | 5 | 2,2 | 2,9 | | 3,5 | 3,9 |
| **Zr** | | | | | 0,1 | | | 0,1 | |
| **Ni** | 5,7 | 4,4 | 16,8 | 45,2 | 17,1 | 44 | 55,1 | 46,1 | 50 |
| **Cu** | 46,7 | 62,8 | 36,4 | 6,7 | 29,4 | 6,9 | 7,8 | 6,1 | 3,1 |
| **Zn** | 21,8 | 29,5 | 8,7 | 0,8 | 5,4 | | 2,9 | 2,6 | |

Analýza podpovrchové vrstvy byla umožněna díky přípravě metalografických preparátů ze všech vzorků vyrobených v rámci experimentu. Tyto byly následně zkoumány pomocí elektronové mikroskopie na LYRA3, použit byl ve všech případech detektor zpětně odražených elektronů (BSE), přičemž nejprve byly vzorky zkoumány při zvětšení 1 000x a následně 2 500x a 4 000x. Na obrázku 54 jsou znázorněny příčné řezy vzorky s největším a nejmenším množstvím difundovaných prvků z drátové elektrody, přičemž rozdíl v tloušťce přílepku a také četnost jejího výskytu je výrazný. Zatímco u vzorku č. 1 s největším množstvím difundovaného materiálu je vrstva přílepku naprosto souvislá o tloušťce od 20 do 40 μm je tloušťka přílepku u vzorku č. 28 s nejnižším množstvím difundovaného materiálu pouze do 15 μm s nepravidelnou četností výskytu. Na žádném ze zkoumaných vzorků nebyly nalezeny podpovrchové defekty v podobě vypálených kavit či trhlin. Tento stav je ale pro niklové slitiny obvyklý, což popisuje i studie Antara [177], Liho [178] či Reolona [179].




Obr. 54. Příčné řezy vzorky SEM/BSE (a, b) vzorek č. 1 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=9 μs, $T_{off}$ =60 μs, $v$=13 m/min a $I$=36 A, (c, d) vzorek č. 28 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=6 μs, $T_{off}$ =43 μs, $v$=13 m/min a $I$=22 A.

# 5 ZÁVĚRY

V rámci této práce byla provedena rešeršní studie zaměřená na technologii elektroerozivního obrábění, konkrétně na elektroerozivní drátové řezání. Pozornost byla věnována především současným trendům, a to jak v obrábění nových materiálů (kompozitní a pokročilé keramické materiály) tak i na výrobu moderních nástrojů pomocí EDM a WEDM.

Dále byla pozornost věnována optimalizačním technikám pro nastavení řídících parametrů elektroerozivního stroje, kde bylo diskutováno použití plánovaného experimentu a evolučních výpočetních technik.

V rámci experimentální části práce byly provedeny dva rozsáhlé plánované experimenty, přičemž jeden optimalizoval WEDM čistého molybdenu a druhý niklové superslitiny B1914.

Za účelem optimalizace obrábění čistého molybdenu a komplexní analýzy obrobených povrchů byl proveden plánovaný experiment typu „Half response surface design“ čítající 33 kol, pomocí něhož bylo dosaženo následujících závěrů:

- nejvyšši rychlosti řezání bez přetržení drátové elektrody bylo dosaženo u vzorků č. 14 (nastavení parametrů stroje: $U$=70 V, $T_{on}$=10 µs, $T_{off}$ =30 µs, $v$=10 m/min a $I$=35 A) a 31 (nastavení parametrů stroje: $U$=50 V, $T_{on}$=10 µs, $T_{off}$ =30 µs, $v$=14 m/min a $I$=35 A) a to 4,3 mm/min,
- nejnižších hodnot parametrů topografie bylo dosaženo u vzorku č. 20, který byl obroben s nastavením parametrů stroje: $U$=70 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =50 µs, $v$=14 m/min a $I$=25 A, přičemž parametr Ra tohoto vzorku měl pouze hodnotu 1,72 µm,
- byly sestaveny regresní modely pro rychlost řezání i parametr topografie Ra, přičemž na základě Spearmanova koeficientu korelace je vidět, že jsou všechny vyhodnocované parametry topografie statisticky významně závislé,
- užitím multikriteriální optimalizace bylo nalezeno optimální nastavení řídících parametrů pro minimalizaci Ra na hodnotu 1,88 µm a maximalizaci rychlosti řezání na 3,3 mm/min je třeba nastavit parametry: Napětí = 70 V, Zapnutí pulzu = 6 µs, Vypnutí pulzu = 30 µs, Rychlost odvíjení drátu = 10 m/min a Proud = 35 A,
- z analýzy morfologie povrchů je zřejmé, že se na všech obrobených vzorcích nacházejí trhliny do hloubky 15 µm, a tedy nebylo nalezeno nastavení parametrů stroje pro jejich minimalizaci,
- z důvodu výskytu trhlin byl proveden experiment v podobě zjištění vlivu orientace řezu polotovarem, přičemž byl jednoznačně tento vliv prokázán a hloubka vyskytujících se trhlin vzrostla na 50 µm.

Vzhledem k výše zmíněným závěrům je jasné, že jakost i rychlost řezání při elektroerozivním drátovém řezání čistého molybdenu lze zvýšit vhodným nastavením parametrů stroje: $U$=70 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =30 µs, $v$=10 m/min a $I$=35 A. Vhodnou orientací řezu polotovarem lze výrazně omezit délku trhlin, nicméně dosud nebylo nalezeno nastavení parametrů stroje či jiný vstupní faktor, který by jejich výskytu dokázal zcela zabránit.

Dalším provedeným plánovaným experimentem byl Box and Behnken Response Surface Design čítající 46 kol, který byl realizován za účelem optimalizace obrábění niklové superslitiny B1914 pomocí WEDM, přičemž bylo dosaženo následujících závěrů:

- nejvyšší rychlosti řezání 3,05 mm/min bylo dosaženo u vzorku č. 30 obrobeného nastavením parametrů stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=9 µs, $T_{off}$ =26 µs, $v$=13 m/min a $I$=36 A,
- za účelem optimalizace rychlosti řezání byl vytvořen plně kvadratický lineární regresní model, z něhož vyplynulo, že nejvýznamnějšími faktory ovlivňující rychlost řezání jsou Vypnutí pulzu, Proud a Zapnutí pulzu,
- nejnižší parametry topografie povrchu Ra 2,18 µm a současně i Rz 16,86 µm byly dosaženy u vzorku č. 28, který byl obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =43 µs, $v$=13 m/min a $I$=22 A,
- oba parametry topografie Ra a Rz jsou statisticky závislé, proto byl vytvořen pouze regresní model pro Ra, přičemž nejvýznamnějšími faktory ovlivňujícím tuto odezvu byly Proud a Zapnutí pulzu,
- především změna parametrů Proud a Zapnutí pulzu způsobuje technický rozpor, že s rostoucí rychlostí řezání se zhoršuje topografie povrchu a naopak, proto je třeba při jejich nastavení přihlédnout ke konkrétním požadavkům na topografii povrchu a posléze maximalizovat řeznou rychlost,
- na površích vzorků byly studovány pouze velmi drobné trhlinky v délce do 10 µm a to velmi ojediněle, které byly pouze povrchového charakteru a v příčných řezech vzorky nebyly patrné,
- při srovnání regresních modelů pro rychlost řezání a Ra nastal rozpor, kde požadavek na maximální rychlost řezání jde proti požadavku na minimální Ra (především v parametrech Proud a Zapnutí pulzu), optimum však bylo nalezeno pomocí vícekriteriální optimalizace.

Na základě výše zmíněných závěrů je možné konstatovat, že došlo k výraznému prohloubení znalostí v oblasti optimalizace procesu elektroerozivního drátového řezání niklové superslitiny B1914 a nyní je možné tyto závěry aplikovat do praxe pro dosažení maximální efektivity obrábění tohoto materiálu.

# 6 PERSPEKTIVA DALŠÍCH PRACÍ

Současným trendem ve všech oblastech průmyslu je zvyšování efektivity a konkurenceschopnosti. V tomto duchu jde i vývoj nových materiálů, které si kladou za cíl totéž. Vznik nových materiálů však znamená i nalezení efektivních způsobů jejich obrábění do požadovaných tvarů s danou přesností a jakostí povrchu. V tomto ohledu je elektroerozivní obrábění velkým konkurentem konvenčních technologií, protože umožňuje obrábět všechny alespoň minimálně elektricky vodivé materiály, a to bez přihlédnutí k jakýmkoliv jejim fyzikálním či mechanickým vlastnostem. Z toho důvodu je elektroeroze nezbytným nástrojem k dosažení pokroku, který umožňuje nově vyvinuté materiály efektivně obrábět se splněním všech parametrů jakosti.

Vzhledem k výše zmíněným faktům je rozvoj elektroerozivního obrábění nezbytný k naplnění všech možných průmyslových cílů.

Optimalizace obrábění jednotlivých materiálů je nikdy nekončící úkol.

# 7 PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

**Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu s IF větší než 0,500**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; **PROKEŠ, T**.; BEDNÁŘ, J.; ZAHRADNÍČEK, R.; JANKOVÝCH, R.; FRIES, J.; VONTOR, J. Analysis of the machinability of copper alloy Ampcoloy by WEDM. *Materials,* 2020, roč. 13, č. 4, s. 1-14. ISSN: 1996-1944. **IF 3.**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; BEDNÁŘ, J.; ZAHRADNÍČEK, R.; **PROKEŠ, T**.; FRIES, J. Analysis of Machinability and Crack Occurrence of Steels 1.2363 and 1.2343ESR Machined by Die-Sinking EDM. *Coatings, MDPI,* 2020, roč. 10, č. 4, s. 1-18. ISSN: 2079-6412. **IF 2.4**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; BEDNÁŘ, J.; ZAHRADNÍČEK, R.; **PROKEŠ, T**.; FIALA, Z.; FRIES, J. Precision Machining of Nimonic C 263 Super AlloyUsing WEDM. *Coatings, MDPI,* 2020, roč. 10, č. 6, s. 1-20. ISSN: 2079-6412. **IF 2.4**

MOURALOVÁ, K.; ZAHRADNÍČEK, R.; BENEŠ, L.; **PROKEŠ, T**.; HRDÝ, R.; FRIES, J. Study of micro structural material changes after WEDM based on TEM lamella analysis. *Metals,* 2020, roč. 10, č. 7, s. 1-21. ISSN: 2075-4701. **IF 2.1**

MOURALOVÁ, K.; HRABEC, P.; BENEŠ, L.; OTOUPALÍK, J.; BEDNÁŘ, J.; **PROKEŠ, T.;** MATOUŠEK, R. Verification of Fuzzy Inference System for Cutting Speed while WEDM for the Abrasion-Resistant Steel Creusabro by Conventional Statistical Methods. *Metals,* 2020, roč. 10, č. 1, s. 1-11. ISSN: 2075-4701. **IF 2.1**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; **PROKEŠ, T.**; BEDNÁŘ, J.; ZAHRADNÍČEK, R.; FRIES, J. Machining of pure molybdenum using WEDM. *MEASUREMENT, Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO),* 2020, roč. 2020, č. 163, s. 1-13. ISSN: 0263-2241. **IF 3.3**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; **PROKEŠ, T**.; ZAHRADNÍČEK, R.; BEDNÁŘ, J.; OTOUPALÍK, J.; FIŠEROVÁ, Z.; FIALA, Z. Micro-milling machinability of pure molybdenum. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 2019, roč. 102, č. 9, s. 4153-4165. ISSN: 1433-3015. **IF 2.5.**

MOURALOVÁ, K.; **PROKEŠ, T**.; BENEŠ, L. Surface and subsurface layers defects analysis after WEDM affecting the subsequent lifetime of produced components. *Arabian Journal for Science and Engineering,* 2019, roč. 44, č. 9, s. 7723-7735. ISSN: 2191-4281. **IF 1.5.**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; BEDNÁŘ, J.; ZAHRADNÍČEK, R.; **PROKEŠ, T**.; MATOUŠEK, R.; HRABEC, P.; FIŠEROVÁ, Z.; OTOUPALÍK, J. Using a Design of Experiment for a Comprehensive Analysis of the Surface Quality and Cutting Speed in WED-Machined Hadfield Steel. *Journal of Mechanical Science and Technology,* 2019, roč. 33, č. 5, s. 2371-2386. ISSN: 1976-3824. **IF 1.2.**

MOURALOVÁ, K.; **PROKEŠ, T**.; BENEŠ, L.; BEDNÁŘ, J. The Influence of WEDM Parameters Setup on the Occurrence of Defects when Machining Hardox 400 Steel. *Materials,* 2019, roč. 12, č. 22, s. 1-15. ISSN: 1996-1944. **IF 3.**

MOURALOVÁ, K.; **PROKEŠ, T**.; BENEŠ, L. Analysis of the oxide occurrence on WEDM surfaces in relation to subsequent surface treatments. *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART C-JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING SCIENCE,* 2019, roč. 234, č. 3, s. 721-733. ISSN: 0954-4062. **IF 1.4**

MOURALOVÁ, K.; **PROKEŠ, T.;** BENEŠ, L.; SLIWKOVÁ, P. Analysis of subsurface defects occurrence in abrasion resistant Creusabro steel after WEDM including the study of morphology and surface topography. *MACHINING SCIENCE AND TECHNOLOGY,* 2019, roč. 23, č. 6, s. 1-18. ISSN: 1091-0344. **IF 1.7.**

MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; KLAKURKOVÁ, L.; **PROKEŠ, T**. Effect of width of kerf on machining accuracy and subsurface layer after WEDM. *Journal of Materials Engineering and Performance,* 2018, roč. 27, č. 4, s. 1908-1916. ISSN: 1059-9495. **IF 1.3.**

MOURALOVÁ, K.; KLAKURKOVÁ, L.; MATOUŠEK, R.; **PROKEŠ, T**.; HRDÝ, R.; KAŇA, V. Influence of the Cut Direction through the Semi-Finished Product on the Occurrence of Cracks for X210Cr12 Steel Using WEDM. *ARCH CIV MECH ENG,* 2018, roč. 18, č. 4, s. 1318-1331. ISSN: 1644-9665. **IF 2.2.**

HRABEC, P.; BEDNÁŘ, J.; ZAHRADNÍČEK, R.; **PROKEŠ, T**.; MACHOVÁ, A. Statistical Analysis of the Width of Kerf Affecting the Manufacture of Minimal Inner Radius. In *Recent Advances in Soft Computing.* 2018. s. 1-12. ISBN: 978-3-319-58088-3. **IF 0.6.**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; ZAHRADNÍČEK, R.; BEDNÁŘ, J.; HRABEC, P.; **PROKEŠ, T.**; MATOUŠEK, R.; FIALA, Z. Quality of Surface and Subsurface Layers after WEDM Aluminum Alloy 7475-T7351 Including Analysis of TEM Lamella. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 2018, roč. 99, č. 9, s. 2309-2326. ISSN: 1433-3015. **IF 2.5.**

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, roč. 2017, č. 104, s. 12-20. ISSN: 0263-2241. **IF 3.4.**

**Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu bez IF nebo příspěvek ve sborníku vědecké konference**

ZAHRADNÍČEK, R.; MOURALOVÁ, K.; **PROKEŠ, T.**; HRABEC, P.; BEDNÁŘ, J. Modelling of Magnetron TiN Deposition Using the Design of Experiment. In *Recent Advances in Soft Computing and Cybernetics. Studies in Fuzziness and Soft Computing.* Švýcarsko: Springer, 2021. s. 63-70. ISBN: 978-3-030-61659-5. ISSN: 1434-9922. **WoS, Scopus**.

**PROKEŠ, T.;** MOURALOVÁ, K.; ZAHRADNÍČEK, R.; BEDNÁŘ, J.; KALIVODA, M. Optimization of Deposition Parameters of a DLC Layer Using (RF) PECVD Technology. In *Recent Advances in Soft Computing and Cybernetics. Studies in Fuzziness and Soft Computing.* Švýcarsko: Springer International Publishing, 2021. s. 53-62. ISBN: 978-3-030-61659-5. ISSN: 1434-9922. **WoS, Scopus**.

**PROKEŠ, T.;** MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; ZAHRADNÍČEK, R.; ANDRŠ, O. Cutting Insert Wear Analysis Using Industry 4.0. In *Mechatronics 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Brno: Springer, Cham, 2018. s. 133-140. ISBN: 978-3-319-65960-2. ISSN: 2194-5357. **WoS, Scopus.**

ZAHRADNÍČEK, R.; HRABEC, P.; BEDNÁŘ, J.; **PROKEŠ, T**. Solvent Optimization of Transferred Graphene with Rosin Layer Based on DOE. In *Recent Advances in Soft Computing.* 2018. s. 1-14. ISBN: 978-3-319-58088-3 **Scopus.**

MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; ZAHRADNÍČEK, R.; BEDNÁŘ, J.; HRABEC, P.; **PROKEŠ, T**.; HRDÝ, R. Analysis of cut orientation through half-finished product using WEDM. *Materials and Manufacturing Processes,* 2018, roč. 33, č. 16, s. 1-11. ISSN: 1532-2475. **WoS, Scopus.**

ZAHRADNÍČEK, R.; **PROKEŠ, T.;** BENEŠ, L. The graphene oxide spincoating optimalization by planned experiment. *Manufacturing TECHNOLOGY,* 2017, roč. 2017, č. 4, s. 635-639. ISSN: 1213-2489. **Scopus.**

MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; **PROKEŠ, T**.; BEDNÁŘ, J.; HRABEC, P. Optimalization of WEDM settings parameters when machining pure aluminium using DoE. *MM Science Journal,* 2017, roč. 2017, č. 4, s. 2105-2108. ISSN: 1803-1269. **Scopus.**

**PROKEŠ, T**.; MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J. Experimental evaluation on the quality of machined surface after turning of material Inconel 625. *MM Science Journal,* 2016, roč. 2016, č. 6, s. 1617-1620. ISSN: 1803-1269. **Scopus.**

MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; **PROKEŠ, T**. Optimization of the Cutting Speed for Ti-6Al-4V Using WEDM Depending on Quality of the Machined Surface. In *Mechatronika 2016.* 1. Praha: Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, 2016. s. 450-454. ISBN: 978-80-01-05882-4. **WoS, Scopus.**

MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; **PROKEŠ, T**.; BEDNÁŘ, J.; MATOUŠEK, R.; KLAKURKOVÁ, L. Statistical evaluation width of kerf after WEDM by Analysis of Variance. *Mendel Journal series,* 2016, roč. 2016, č. 22, s. 301-304. ISSN: 1803-3814. **Scopus.**

MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; **PROKEŠ, T**. Experimental statistical evaluation of surface waviness machined using WEDM. *Mendel Journal series,* 2016, roč. 2016, č. 22, s. 275-280. ISSN: 1803-3814. **Scopus.**

MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; **PROKEŠ, T**. Application of the genetic algorithm for analysis of input parameters of WEDM technology for TI-6AL- 4V. *Mendel Journal series,* 2016, roč. 2016, č. 22, s. 271-274. ISSN: 1803-3814. **Scopus.**

MOURALOVÁ, K.; KOVÁŘ, J.; **PROKEŠ, T**. Experimental statistical evaluation of S-parameters on surface machined using WEDM. *Mendel Journal series,* 2016, roč. 2016, č. 22, s. 261-264. ISSN: 1803-3814. **Scopus.**

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| Zkratka/Symbol | Jednotka | Popis |
|---|---|---|
| ANFIS | [-] | adaptivní neuro-fuzzy inferenční systém |
| ANN | [-] | neuronová síť |
| BSE | [-] | detektor zpětně odražených elektronů |
| C | [°] | kompenzace |
| CI | [-] | interval spolehlivosti |
| CNC | [-] | počítačem číslicově řízený |
| DoE | [-] | plánovaný experiment |
| EA | [-] | evoluční algoritmy |
| EBID | [-] | indukovaná depozice elektronovým svazkem |
| ECT | [-] | evoluční výpočetní techniky |
| EDM | [-] | elektroerozivní obrábění |
| EDX | [-] | energiově-disperzní rentgenové spektrum |
| f | [mm] | posuv |
| F | [N] | axiální tahová síla |
| Fa | [Hz] | kmitočet jiskření |
| FEBID | [-] | fokusovaná indukovaná depozice elektronovým svazkem |
| Fn | [Hz] | normální frekvence jiskření |
| Ft | [Hz] | celková frekvence jiskření |
| H | [mm] | vzdálenost mezi vodítkem a obrobkem |
| h | [mm] | tloušťka obrobku |
| I | [A] | proud |
| K | $[mm^3 \cdot J^{-1}]$ | součinitel úměrnosti |
| L | [mm] | vzdálenost mezi horním a dolním vodítkem |
| LM | [-] | světelný mikrospok |
| MRR | [-] | rychlost úběru materiálu |
| Ms | [-] | stav obrábění |
| $n_r$ | [-] | referenční poměr |
| Pa | [µm] | průměrná aritmetická úchylka základního profilu |
| Pq | [µm] | průměrná kvadratická úchylka základního profilu |
| PI | [-] | predikční interval |
| Pz | [µm] | největší výška základního profilu |
| $q_0$ | [N] | specifické vnější zatížení |
| r | [mm] | poloměr drátové elektrody |
| Ra | [µm] | střední aritmetická úchylka povrchu |
| Rq | [µm] | průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti |
| Rz | [µm] | největší výška profilu drsnosti |
| Sa | [µm] | aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu |
| S/N | [-] | poměr šumu k signálu |
| SE | [-] | detektor sekundárních elektronů |
| SEM | [-] | rastrovací elektronový mikroskop |
| Sq | [µm] | základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu |

| | | |
|---|---|---|
| Sz | [µm] | maximální výška omezené stupnice povrchu |
| t | [µs] | délka trvání výboje |
| te | [µs] | doba erodování |
| TEM | [-] | tramsmisní elektronový mikroskop |
| to | [µs] | doba trvání impulsu |
| $T_{off}$ | [µs] | vypnutí pulzu |
| $T_{on}$ | [µs] | zapnutí pulzu |
| U | [V] | mezerové napětí |
| v | [$mm \cdot min^{-1}$] | rychlost odvíjení drátu |
| Vg | [V] | průměrné mezerové napětí |
| $V_i$ | [$mm^3$] | množství odebraného materiálu |
| Vs | [V] | servo-referenční napětí |
| WEDM | [-] | elektroerozivní drátové řezání |
| $W_i$ | [J] | energie výboje |
| y | [mm] | zpoždění drátu |
| Yr | [Hz] | referenční frekvence |
| α | [°] | úhel sklonu obrobku |
| Δ | [mm] | mezera řezu |

# SEZNAM OBRÁZKŮ


Obrázek 1 Technologie elektroerozivního drátového řezání [5].

Obrázek 2 Součásti obrobené pomocí WEDM [8].

Obrázek 3 SEM snímek vyerodovaného materiálu po WEDM, který ulpěl na povrchu diamantového brousicího kotouče [12].

Obrázek 4 SEM snímek jednotlivých kráterů, které byly ovlivněny změnou polarity elektrody a obrobku z $Al_2O_3$/6061Al [19].

Obrázek 5 SEM snímek morfologie a příčných řezů vzorky vyrobených z jednotlivých materiálů [25].

Obrázek 6 SEM snímek morfologie a) a b) vliv parametru erodovací proud, c) a d) vliv parametru zapnutí pulzu [27].

Obrázek 7 Profil jediného kráteru.

Obrázek 8 Rozdílný vzhled kráterů pro jednotlivé materiály a jejich tepelná zpracování, SEM (SE) [105].

Obrázek 9 Rozdílný vzhled 3D reliéfů povrchů jednotlivých materiálů [105].

Obrázek 10 Podpovrchové vypálené kavity na materiálu ocel X210Cr12s tepelným zpracováním: 780 °C / 20 h / ochlazování v peci, SEM (BSE) [46].

Obrázek 11 Podpovrchové defekty na materiálu ocel X210Cr12, SEM (BSE), (a) materiál s tepelným zpracováním kaleno a popuštěno, (b) materiál v překaleném stavu [46].

Obrázek 12 Schéma systematického sběru dat (centrální kompozitní design) [143].

Obrázek 13 Taguchiho ztrátová funkce a tradiční přístup [144].

Obrázek 14 Schéma genetického algoritmu [175].

Obrázek 15 Schematické znázornění aktualizace rychlosti částice [142].

Obrázek 16 (a) cesta mravenců za potravou, která je bez překážek, (b) do cesty byla mravencům umístěna překážka, (c) mravenci obcházejí překážku a chodí za potravou delší i kratší cestou, (d) všichni mravenci obchází překážku kratší cestou [152].

Obrázek 17 Proces migrace mezi ostrovy s různou izolací, tvarem a velikostí [157].

Obrázek 18 Znázornění dvou stád s pastýři [166].

Obrázek 19 Typický model včelí kolonie (a) výchozí situace, (b) konečná situace [167].

Obrázek 20 Vliv orientace směru řezu polotovarem na řeznou rychlost [35].

Obrázek 21 Vliv orientace směru řezu polotovarem na jakost povrchu, obráběný matriál-ocel X210Cr12 [46].

Obrázek 22 Simulační model [51].

Obrázek 23 Jakost povrchu – porovnání hodnot predikovaných a změřených [63].

Obrázek 24 Hierarchický adaptivní řídicí systém, kde: to –doba trvání impulsu; te - doba erodování; f - posuv; Vs – servo-referenční napětí; Vg - průměrné mezerové napětí; Ft -celková frekvence jiskření; Fn -normální frekvence jiskření; Fa - kmitočet jiskření; Yr - referenční frekvence; $n_r$ - referenční poměr; h - odhadovaná výška obrobku; Ms - stav obrábění [65].

Obrázek 25 Schematický diagram řezu, kde: y – zpoždění drátu; L – vzdálenost mezi horním a dolním vodítkem; h – tloušťka obrobku; H – vzdálenost mezi vodítkem a obrobkem; F – axiální tahová síla; $q_0$ – specifické vnější zatížení [77].

Obrázek 26 Efekt zpoždění drátu při obrábění, kde: y – zpoždění drátu [77].

Obrázek 27 Kompenzace rádiusových tvarů, kde: r – poloměr drátové elektrody; Δ – mezera řezu; α – úhel sklonu obrobku; C – kompenzace, (a) běžné provedení, (c) kompenzované řezání [91].

Obrázek 28 Schematický diagram řízení napětí drátu [82].

Obrázek 29 Online odhadovaná výška obrobku a odpovídající erodovací napětí, rychlost posuvu a frekvence výboje při výšce obrobku postupně se snižující z 50 mm na 10 mm [84].

Obrázek 30 (a) model svařovací elektrody, (b) chemické složení získané pomocí EDX, (c) mikrostruktura materiálu.

Obrázek 31 (a) zobrazení 2D barevně filtrovaného reliéfu povrchu vzorku č. 20, (b) zobrazení 2D barevně filtrovaného reliéfu povrchu č. 29, (c) 3D reliéf povrchu vzorku č. 20 získaný pomocí AFM snímaný ve dvou různých místech.

Obrázek 32 (a, c) S-F povrch – 3D reliéf, (b) 3D autokorelace S-F povrchu, (d) 2D autokorelace S-F povrchu.

Obrázek 33 (a, c) S-L povrch – 3D reliéf, (b) 3D autokorelace S-L povrchu, (d) 2D autokorelace S-F povrchu.

Obrázek 34 Hlavní efekty vstupních faktorů pro parametr topografie Ra.

Obrázek 35 Interakce vstupních faktorů pro parametr Ra.

Obrázek 36 Hlavní efekty vstupních faktorů pro parametr topografie Ra.

Obrázek 37 Interakce vstupních faktorů pro parametr Ra.

Obrázek 38 Korelační matice pro Spearmanův koeficient korelace.

Obrázek 39 Nastavení funkcí příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými odezvami.

Obrázek 40 PI a CI pro jednotlivé odezvy.

Obrázek 41 Grafický výstup z procedury Response Optimizer.

Obrázek 42 Morfologie povrchu vzorků SEM (BSE) včetně analýzy chemického složení (a) vzorek č. 14 řezaný nejvyšší rychlostí obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=10 µs, $T_{off}$ =30 µs, $v$=10 m/min a $I$=35 A, (b) vzorek č. 20 s nejvyšší jakostí povrchu z hlediska topografie obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =50 µs, $v$=14 m/min a $I$=25 A, (c) analýza chemického složení vzorku č. 14 z oblasti znázorněné čárkovaným čtvercem, (d) analýza chemického složení vzorku č. 20 z oblasti znázorněné čárkovaným čtvercem.

Obrázek 43 Příčný řez zobrazující podpovrchové defekty a jejich detaily, SEM (BSE) (a,c) vzorek č. 14 řezaný nejvyšší rychlostí obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=10 µs, $T_{off}$ =30 µs, $v$=10 m/min a $I$=35 A, (b,d) vzorek č. 20 s nejvyšší jakostí povrchu z hlediska topografie obrobený parametry: $U$=70 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =50 µs, $v$=14 m/min a $I$=25 A.

Obrázek 44 Vliv orientace řezu materiálem na výskyt podpovrchových defektů (a) směr řezu v závislosti na orientaci zrn materiálu, (b-d) příčný řez se zobrazením hlubokých trhlin u vzorků č. 14 a 20 – Směr řezu 2.

Obrázek 45 (a) příklad vyrobených vzorků v rámci experimentu, (b) mikrostruktura obráběného materiálu B1914 (LM), (c) spektrum analýzy chemického složení obráběného materiálu včetně místa provedení analýzy.

Obrázek 46 Central Compossite Design a (a) Box and Behnken Design, (b) pro tři vstupní proměnné.

Obrázek 47 (a) 3D reliéf vzorku č. 1, (b) 3D reliéf vzorku č. 28.

Obrázek 48 Multi-Vari Chart pro rychlost řezání pro Zapnutí pulzu, Proud a Vypnutí pulzu.

Obrázek 49 Multi-Vari Chart pro Ra a Rz pro Zapnutí pulzu, Proud a Vypnutí pulzu.

Obrázek 50 Nastavení funkcí příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými odezvami.

Obrázek 51 Grafický výstup z procedury Response Optimizer.

Obrázek 52 Vrstevnicový graf pro více odezev.

Obrázek 53 Morfologie povrchu vzorků (SEM/SE) včetně detailů a také vyznačení míst ve kterých byla provedena analýza EDX jejíž výsledky jsou v tabulce 11 (a) vzorek č. 1 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=9 µs, $T_{off}$ =60 µs, $v$=13 m/min a $I$=36 A, (b) vzorek č. 28 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =43 µs, $v$=13 m/min a $I$=22 A.

Obrázek 54 Příčné řezy vzorky SEM/BSE (a, b) vzorek č. 1 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=9 µs, $T_{off}$ =60 µs, $v$=13 m/min a $I$=36 A, (c, d) vzorek č. 28 obrobený parametry nastavení stroje: $U$=60 V, $T_{on}$=6 µs, $T_{off}$ =43 µs, $v$=13 m/min a $I$=22 A.

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mezní hodnoty vstupních parametrů pro plánovaný experiment (molybden).

Tabulka 2 Vstupní parametry obrábění použité pro jednotlivé běhy experimentu (molybden).

Tabulka 3 Hodnoty rychlosti řezání a parametrů topografie povrchů vzorků pro jednotlivé běhy experimentu.

Tabulka 4 Parametry regresního modelu pro rychlost řezání $v_c$.

Tabulka 5 Parametry regresního modelu pro parametr Ra.

Tabulka 6 Mezní hodnoty vstupních parametrů pro plánovaný experiment (B1914).

Tabulka 7 Vstupní parametry obrábění použité pro jednotlivé běhy experimentu (B1914).

Tabulka 8 Hodnoty rychlosti řezání a parametrů topografie povrchů vzorků pro jednotlivé běhy experimentu.

Tabulka 9 Příspěvek a vyznamnost prediktorů v modelu pro řeznou rychlost.

Tabulka 10 Příspěvek a vyznamnost prediktorů v modelu pro Ra.

Tabulka 11 Odhady odezev v technicky realizovatelném optimu.

Tabulka 12 Analýza chemického složení v jednotlivých místech dle obrázku 40. v hm. %.

# SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ


1. VATES, U. K. Wire-EDM process parameters and optimization, 2018. ISBN: 978-620-2-30578-5.

2. RANJAN, R. Optimization of Wire Electrical Discharge Machining, 2016. ISBN: 978-3-659-88968-4.

3. JAMESON, Elman C. *Electrical discharge machining*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association, c2001, xii, 329 s. ISBN 08-726-3521-X.

4. BENEDICT, G.F.Electrical discharge machining (EDM), Non-Traditional Manufacturing Processes, Marcel Dekker, Inc, New York &Basel, 1987.

5. MCGEOUGH, J. A. *Advanced methods of machining*. New York: Chapman and Hall, 1988. ISBN 04-123-1970-5.

6. TONDAY, H. R.;TIGGA, A. M. WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING: Empirical Study and Optimization, 2017. ISBN: 978-3-330-32464-0.

7. Mold making resource [online]. [cit. 2018-09-30]. Dostupné z: https://www.moldmakingresource.com/wire-edm-die-mold-making/.

8. XACT, Wire EDM Corporation [online]. [cit. 2018-09-30]. Dostupné z: https://www.xactedm.com/edm-gallery/.

9. LUO, Y. F.; CHEN, C. G.; TONG, Z. F. Investigation of silicon wafering by wire EDM. *Journal ofmaterials science*, 1992, 27.21: 5805-5810.

10. LEVY, G. N.; WERTHEIM, R. EDM-machining of sintered carbide compactingdies. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1988, 37.1: 175-178.

11. RHONEY, Brian K., et al. Wire electrical discharge machining of metal bond diamond wheels for ceramic grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42.12: 1355-1362.

12. RHONEY, Brian K., et al. Wear mechanism of metal bond diamond wheels trued by wire electrical discharge machining. *Wear*, 2002, 252.7-8: 644-653.

13. KRUUSING, Arvi, et al. Micromachining of magnetic materials. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, 74.1-3: 45-51.

14. LAU, W. S.; LEE, W. B. A comparison between edivi wire-cut and laser cutting of carbon fibre composite materials. *Material and Manufacturing Process*, 1991, 6.2: 331-342.

15. LAU, W. S., et al. Un-conventional machining of composite materials. *Journal of materials processing technology*, 1995, 48.1-4: 199-205.

16. SATISHKUMAR, D., et al. Investigation of wire electrical discharge machining characteristics of Al6063/SiC p composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56.9-12: 975-986.

17. GADALLA, A. M.; TSAI, W. Machining of WC-Co composites. *Material and Manufacturing Process*, 1989, 4.3: 411-423.

18. JANGRA, Kamal; GROVER, Sandeep; AGGARWAL, Aman. Simultaneous optimization of material removal rate and surface roughness for WEDM of WC-Co composite using grey relational analysis along with Taguchi method. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011, 2.3: 479-490.

19. YAN, B. H., et al. Machining characteristics of Al2O3/6061Al composite using rotary EDM with a disk like electrode. *The International Journal ofAdvancedManufacturing Technology*, 2000, 16.5: 322-333.

20. YUE, T. M.; DAI, Y.; LAU, W. S. An examination of wire electrical discharge machining (WEDM) of Al2O3 particulater einforced aluminum based composites. *Material and Manufacturing Process*, 1996, 11.3: 341-350.

21. GUO, Z. N., et al. Experimental investigation into shaping particle-reinforced material by WEDM-HS. *Journal of materials processing technology*, 2002, 129.1-3: 56-59.

22. SANCHEZ, J. A., et al. Development of optimum electro discharge machining technology for advanced ceramics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 18.12: 897-905.

23. CHENG, Y. M.; EUBANK, P. T.; GADALLA, A. M. Electrical discharge machining of ZrB2-based ceramics. *MATERIAL AND MANUFACTURING PROCESS*, 1996, 11.4: 565-574.

24. MATSUO, T.; OSHIMA, E. Investigation on the optimum carbide content and machining condition for wire EDM of zirkonia ceramics. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1992, 41.1: 231-234.

25. LAUWERS, Bert, et al. Influence of the type and grain size of the electro-conductive phase on theWire-EDM performance of ZrO2 ceramic composites. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57.1: 191-194.

26. LOK, Y. K.; LEE, T. C. Processing of advanced ceramics using the wire-cut EDM process. *Journal of materials processing technology*, 1997, 63.1-3: 839-843.

27. KUNG, Kuang-Yuan; CHIANG, Ko-Ta. Modeling and analysis of machinability evaluation in the wire electrical discharge machining (WEDM) process of aluminum oxide-based ceramic. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, 23.3: 241-250.

28. DAS, Milan Kumar, et al. Optimization of surface roughness in WEDM process using artificial bee colony algorithm. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 2014, 9: 8748-8751.

29. TEIMOURI, Reza; BASERI, Hamid. Improvement of dry EDM process characteristics using artificial soft computing methodologies. *Production Engineering*, 2012, 6.4-5: 493-504.

30. RAO, R. Venkata; KALYANKAR, V. D. Parameter optimization of modern machining processes using teaching–learning-based optimization algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26.1: 524-531.

31. MOURALOVA, K., et al. Comparison of morphology and topography of surfaces of WEDM machined structural materials. *Measurement*, 2017, 104: 12-20.

32. HAN, Fuzhu; JIANG, Jun; YU, Dingwen. Influence of discharge current on machined surfaces by thermo-analysis in finish cut of WEDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47.7-8: 1187-1196.

33. LI, L., et al. Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy. *Procedia CirP*, 2013, 6: 220-225.

34. MOURALOVA, Katerina, et al. Influence of the cut direction through the semi-finished product on the occurrence of cracks for X210Cr12 steel using WEDM. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18.4: 1318-1331.

35. HASSAN, M. A., et al. Study of the surface integrity of AISI 4140 steel in wire electrical discharge machining. In: *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*. 2009.

36. 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.

37. 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, 25.3-4: 301-307.

38. HASÇALÝK, 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.

39. BENDSØE, Martin P. *Topology optimization*. Springer US, 2009. ISBN: 3-540-42992-1.

40. SARAVANAN, Rajendran. *Manufacturing Optimization through Intelligent Techniques, 2006*. CRC Press, 2017. ISBN: 978-0-8247-2679-9.

41. RAO, Singiresu S. *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 81-224-1149-5.

42. MATOUSEK, Radomil; POPELA, Pavel; KUDELA, *Jakub. Heuristic approaches to stochastic quadratic assignment problem: Var and cvarcases. Mendel*. 2017. p. 73-78.

43. MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. John wiley&sons, 2017. ISBN: 1119386101.

44. DEAN, Angela, et al. (ed.). *Handbook of design and analysis of experiments*. CRC Press, 2015. ISBN: 978-1-4665-0434-9.

45. ANTONY, Jiju. *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier, 2014. ISBN: 978-0-08-099417-8.

46. Tertiary courses [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: https://www.tertiarycourses.com.sg/design-of-experiment-doe-course.html.

47. LAWSON, John. *Design and Analysis of Experiments with R*. Chapman and Hall/CRC, 2014. ISBN: 978-1-4987-2848-5.

48. FISHER, Ronald A. Mathematics of a lady tasting tea. *The world of mathematics*, 1956, 3.part 8: 1514-1521.

49. ROY, Ranjit K. *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010. ISBN: 978-0-87-263864-8.

50. ZAHRAEE, S. M., et al. Productivity Improvement of Manufacturing System Using Design of Experiment and Computer Simulation. *Editorial Board*, 2013, 117.

51. ZELINKA, Ivan, et al. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. BEN, 2008. ISBN: 978-80-7300-218-3.

52. BARROS, Manuel FM; GUILHERME, Jorge MC; HORTA, Nuno CG. *Analog circuits and systems optimization based on evolutionary computation techniques*. Berlin: Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-12345-0.

53. HOLLAND, John. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with application to biology. *Control and artificial intelligence*, 1975.

54. MATOUSEK, Radomil; DOBROVSKY, Ladislav; KUDELA, Jakub. *The quadratic assignment problem: metaheuristic optimization using HC12 algorithm*. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. ACM, 2019. p. 153-154.

55. CUEVAS, Erik, et al. *Evolutionary computation techniques: a komparative perspective*. Berlin: Springer, 2017. ISBN: 978-3-319-51109-2.

56. PHAM, Duc; KARABOGA, Dervis. *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks*. Springer Science & Business Media, 2012.

57. SIVANANDAM, S. N. a S. N. DEEPA. *Introduction to genetic algorithms*. Berlin: Springer, c2008. ISBN 978-3-540-73189-4.

58. MITCHEL, Melanie. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MIT Press, 2002. ISBN 0-262-63185-7.

59. HYNEK, Josef. *Genetické algoritmy a genetické programování*. Praha: Grada, 2008. Průvodce (Grada). ISBN 978-80-247-2695-3.

60. GUJARATHI, Ashish M.; BABU, B. V. (ed.). *Evolutionary Computation: Techniques and Applications*. CRC Press, 2016. ISBN: 978-1-315-36638-8.

61. SUN, Jun; LAI, Choi-Hong; WU, Xiao-Jun. *Particle swarm optimisation: classical and quantum perspectives*. Crc Press, 2016. ISBN: 978-1-4398-3577-7.

62. KIRANYAZ, Serkan; INCE, Turker; GABBOUJ, Moncef. *Multidimensional particle swarm optimization for machine learning and pattern recognition*. Berlin: Springer, 2014. ISBN: 978-3-642-37845-8.

63. ERDOGMUS, Pakize (ed.). *Particle Swarm Optimization with Applications*. BoD–Books on Demand, 2018. ISBN: 978-1-78923-148-9.

64. ESMIN, Ahmed AA; COELHO, Rodrigo A.; MATWIN, Stan. A review on particle swarm optimization algorithm and its variants to clustering high-dimensional data. *Artificial Intelligence Review*, 2015, 44.1: 23-45.

65. AHMADI, Abbas; KARRAY, Fakhri; KAMEL, Mohamed S. Flocking based approach for data clustering. *Natural computing*, 2010, 9.3: 767-791.

66. AICH, Ushasta; BANERJEE, Simul. Modeling of EDM responses by support vector machine regression with parameters selected by particle swarm optimization. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38.11-12: 2800-2818.

67. PRAKASH, Chander, et al. Multi-objective particle swarm optimization of EDM parameters to deposit HA-coating on biodegradable Mg-alloy. *Vacuum*, 2018, 158: 180-190.

68. DANG, Xuan-Phuong. Constrained multi-objective optimization of EDM process parameters using kriging model and particle swarm algorithm. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, 33.4: 397-404.

69. SAFFARAN, Ali; MOGHADDAM, Masoud Azadi; KOLAHAN, Farhad. Optimization of back propagation neural network-based models in EDM process using particle swarm optimization and simulated annealing algorithms. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42.1: 1-14.

70. NAIN, Somvir Singh; GARG, Dixit; KUMAR, Sanjeev. Investigation for obtaining the optimal solution for improving the performance of WEDM of super alloy Udimet-L605 using particle swarm optimization. *Engineering science and technology, an international journal*, 2018, 21.2: 261-273.

71. MUTHUKUMAR, V., et al. An accelerated particle swarm optimization algorithm on parametric optimization of WEDM of die-steel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2015, 96.1: 49-56.

72. GOPALAKRISHNAN, Ramanan; JOHN, Edwin Raja Dhas. Experimental investigation and multi response optimization of WEDM process of AA7075 metal matrix composites using particle swarm optimization. *Journal of Int. Engineering and Systems*, 2017, 10: 166-266.

73. RANJAN, A., et al. Multi-objective Optimization of a Hybrid Machining Process Abrasive Powder Mixed WEDM of Inconel 718 using Particle Swarm Optimization Technique. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 3606-3616.

74. DORIGO, Marco a Thomas G. STÜTZLE. *Ant colony optimization*. Cambridge: MIT Press, 2004. ISBN 0-262-04219-3.

75. SOLNON, Christine. *Ant colony optimization and constraint programming*. London: Iste, 2010. ISBN: 978-1-84821-130-8.

76. Optimize a flow shop problem with ant colony optimization [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: https://medium.com/@aengel/howto-optimize-flow-shop-problem-with-ant-colony-optimization-fdea9443149c.

77. ABBASS, Hussein A.; NEWTON, Charles S.; SARKER, Ruhul (ed.). *Heuristic and optimization for knowledge discovery*. IGI Global, 2001. ISBN: 9781591400172.

78. MUKHERJEE, Rajarshi; CHAKRABORTY, Shankar; SAMANTA, Suman. Selection of wire electrical discharge machining process parameters using non-traditional optimization algorithms. *Applied Soft Computing*, 2012, 12.8: 2506-2516.

79. MA, Haiping; SIMON, Dan. *Evolutionary computation with biogeography-based optimization*. ISTE, Limited, 2017. ISBN: 978-1-84821-807-9.

80. ZHENG, Yujun, et al. *Biogeography-based optimization: algorithms and applications*. SPRINGER, 2019. ISBN: 978-981-13-2585-4.

81. HANSKI, Iikka A.; GILPIN, Michael E.; MCCAULEY, David E. *Metapopulation biology*. San Diego, CA: Academic press, 1997. ISBN: 978-0-12-323445-2.

82. SIMON, Dan. Biogeography-based optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2008, 12.6: 702-713.

83. SIMON, Dan, et al. Analytical and numerical comparisons of biogeography-based optimization and genetic algorithms. *Information Sciences*, 2011, 181.7: 1224-1248.

84. MUKHERJEE, Rajarshi; CHAKRABORTY, Shankar. Selection of EDM process parameters using biogeography-based optimization algorithm. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27.9: 954-962.

85. FAISAL, Nadeem; KUMAR, Kaushik. Optimization of machine process parameters in EDM for EN 31 using evolutionary optimization techniques. *Technologies*, 2018, 6.2: 54.

86. NARA, Koichi; TAKEYAMA, Tomomi; KIM, Hyungchul. A new evolutionary algorithm based on sheep flocks heredity model and its application to scheduling problem. In: *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028)*. IEEE, 1999. p. 503-508.

87. KIM, Hyunchul; AHN, Byungchul. A new evolutionary algorithm based on sheep flocks heredity model. In: *2001 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (IEEE Cat. No. 01CH37233)*. IEEE, 2001. p. 514-517.

88. SATAPATHY, Suresh Chandra, et al. (ed.). *International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE): Emerging Trends in Smart Modelling Systems and Design*. Springer, 2019. ISBN: 978-3-030-24314-2.

89. CHANDRASEKARAN, M., et al. Sheep flocks heredity model algorithm for solving job shop scheduling problems. *International journal of Applied Management Technology*, 2006, 4.1: 79-100.

90. KARABOGA, Dervis; BASTURK, Bahriye. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied soft computing*, 2008, 8.1: 687-697.

91. HOSSAIN, Md S.; EL-SHAFIE, Ahmed. Performance analysis of artificial bee colony (ABC) algorithm in optimizing release policy of Aswan High Dam. *Neural Computing and Applications*, 2014, 24.5: 1199-1206.

92. KARABOGA, Dervis; AKAY, Bahriye. A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 2009, 214.1: 108-132.

93. SAMANTA, Suman; CHAKRABORTY, Shankar. Parametric optimization of some non-traditional machining processes using artificial bee colony algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, 24.6: 946-957.

94. MOGAKA, L.; MURAGE, D. K.; SAULO, M. J. Power optimization and prioritization in an island supplied by a rotating machine based distributed generator using artificial bee colony algorithm. *Int. J. Energy Power Eng.*, 2016, 5.1: 15-21.

95. DAS, Milan Kumar, et al. Application of artificial bee colony algorithm for optimization of MRR and surface roughness in EDM of EN31 tool steel. *Procedia materials science*, 2014, 6: 741-751.

96. PAWAR, P. J.; KHALKAR, M. Y. Multi-objective Optimization of Wire-Electric Discharge Machining Process Using Multi-objective Artificial Bee Colony Algorithm. In: *Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques*. Springer, Singapore, 2020. p. 39-46.

97. MOURALOVA, KATERINA; ZAHRADNICEK, RADIM; HOUSKA, PAVEL. Evaluation of surface quality of X210CR12 steel for forming tools machined by WEDM. *MM Sci. J.*, 2016, 2016: 1366-1369.

98. MOURALOVA, K., et al. Analyzing the surface layer after WEDM depending on the parameters of a machine for the 16MnCr5 steel. *Measurement*, 2016, 94: 771-779.

99. MOURALOVA, K., et al. Quality of surface and subsurface layers after WEDM aluminum alloy 7475-T7351 including analysis of TEM lamella. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 1-18.

100. MOURALOVA, K., et al. Analysis of surface and subsurface layers after WEDM for Ti-6Al-4V with heat treatment. *Measurement*, 2018, 116: 556-564.

101. MOURALOVA, K., et al. Analysis of surface morphology and topography of pure aluminium machined using WEDM. *Measurement*, 2018, 114: 169-176.

102 LEVY, G. N.; MAGGI, F. WED machinability comparison of different steel grades. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39.1: 183-185.

103. KONDA, R., et al. Design of experiments to study and optimize process performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 1999, 16.1: 56-71.

104. MOURALOVÁ, K.; BENEŠ, L.; ZAHRADNÍČEK, R.; BEDNÁŘ, J.; HRABEC, P.; PROKEŠ, T.; HRDÝ, R. Analysis of cut orientation through half-finished product using WEDM. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018. ISSN: 1532-2475.

105. TARNG, Y. S.; MA, S. C.; CHUNG, L. K. Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35.12: 1693-1701.

106. HUANG, J. T.; LIAO, Y. S.; HSUE, W. J. Determination of finish-cutting operation number and machining-parameters setting in wire electrical discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87.1-3: 69-81.

107. SCOTT, Dan; BOYINA, Sreedhar; RAJURKAR, K. P. Analysis and optimization of parameter combinations in wire electrical discharge machining. *The International Journal of Production Research*, 1991, 29.11: 2189-2207.

108. LIAO, Y. S.; HUANG, J. T.; SU, H. C. A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining. *Journal of material sprocessing technology*, 1997, 71.3: 487-493.

109. MANJAIAH, Mallaiah, et al. Parametric optimization of MRR and surface roughness in wire electro discharge machining (WEDM) of D2 steel using Taguchi-based utility approach. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2016, 11.1: 7.

110. RAMABALAN, S., et al. Experimental investigation of MRR on in situformed AA7075/TiB2 cast composites machining by wire EDM. *International Journal of Machining and Machinability of materials*, 2015, 17.3-4: 295-318.

111. BISHNOI, Pawan; KAUSHAL, Kartik. Effect of Process Parameters on MRR for HCHCr in WEDM using RSM. *International Journal of Advanced Engineering Research and Applications*, 2015, 2454-2377.

112. GÖKLER, Mustafa İlhan; OZANÖZGÜ, Alp Mithat. Experimental investigation of effects of cutting parameters on surface roughness in the WEDM process. *International journal of Machine tools and manufacture*, 2000, 40.13: 1831-1848.

113. TOSUN, N.; COGUN, C.; INAN, A. The effect of cutting parameters on work piece surface roughness in wire EDM. *Machining Science and Technology*, 2003, 7.2: 209-219.

114. ANAND, K. N. Development of process technology in wire-cut operation for improving machining quality. *TotalQuality Management*, 1996, 7.1: 11-28.

115. SPEDDING, Trevor A.; WANG, Z. Q. Study on modeling of wire EDM process. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 69.1-3: 18-28.

116. LIU, Chonglin; ESTERLING, Donald. Solid modeling of 4-axis wire EDM cut geometry. *Computer-Aided Design*, 1997, 29.12: 803-810.

117. HSUE, W. J.; LIAO, Y. S.; LU, S. S. Fundamental geometry analysis of wire electrical discharge machining in corner cutting. *International journal of machine tools and manufacture*, 1999, 39.4: 651-667.

118. HAN, Fuzhu, et al. High precision simulation of WEDM using parametric programming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51.1: 165-168.

119. SPUR, G.; SCHÖNBECK, J. Anode erosion in wire-EDM–a theoretical model. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1993, 42.1: 253-256.

120. KINOSHITA, N., et al. Study of EDM With Wire Electrode--Gap Phenomena. In: *CIRP Annales*. 1976. p. 141-145.

121. NAKAGAWA, Takayuki, et al. Improvement in machining speed with working gap control in EDM milling. *Precision Engineering*, 2017, 47: 303-310.

122. WANG, Jun, et al. In-situprocess monitoring and adaptive control for precision micro-EDM cavity milling. *Precision Engineering*, 2017, 47: 261-275.

123. LI, Qiang, et al. Study of wire tension control system based on closed loop PID control in HS-WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82.5-8: 1089-1097.

124. CHEN, Zhi; ZHANG, Guojun; YAN, Hongzhi. A high-precision constant wire tension control system for improving work piece surface quality and geometric accuracy in WEDM. *Precision Engineering*, 2018.

125. MOGHADAM, Seyed Mahyar Mehdizadeh; ALIBEIKI, Esmail; KHOSRAVI, Alireza. Adaptive Control of Machining Process Using Electrical Discharging Method (EDM) Based on Self-Tuning Regulator (STR). 2018.

126. YAN, Mu-Tian; HSIEH, Pai-Hung. Monitoring and adaptive process control of wire electrical discharge turning. *International Journal of Automation Technology*, 2014, 8.3: 468-477.

127. ADNAN, MRH Mohd, et al. Fuzzy logic for modeling machining process: a review. *Artificial Intelligence Review*, 2015, 43.3: 345-379.

128. YAN, M. T.; LI, H. P.; LIANG, J. F. The application of fuzzy control strategy in servo feed control of wire electrical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, 15.11: 780-784.

129. SHABGARD, M. R., et al. Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32.1: 32-39.

130. MYSIŃSKI, Wojciech; CUDAK, Adam. Application of fuzzy logic for a gap-width controller used in electro-discharge machining. In: *Signals and Electronic Systems (ICSES), 2016 International Conference on*. IEEE, 2016. p. 183-188.

131. SUGANTHI, X. Hyacinth, et al. Prediction of quality responses in micro-EDM process using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68.1-4: 339-347.

132. KINOSHITA, N.; FUKUI, M.; GAMO, G. Control of wire-EDM preventing electrode from breaking. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1982, 31.1: 111-114.

133. YAN, M. T.; LIAO, Y_S; CHANG, C. C. On-line estimation of work piece height by using neural networks and hierarchical adaptive control of WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 18.12: 884-891.

134. KUNIEDA, M.; KOJIMA, H.; KINOSHITA, N. On-line detection of EDM spark locations by multiple connection of branched electric wires. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39.1: 171-174.

135. RAJURKAR, K. P.; WANG, W. M.; LINDSAY, R. P. On-line monitor and control for wire breakage in WEDM. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1991, 40.1: 219-222.

136. LIAO, Y. S.; CHU, Y. Y.; YAN, M. T. Study of wire breaking process and monitoring of WEDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1997, 37.4: 555-567.

137. YAN, M. T.; LIAO, Y. S. Monitoring and self-learning fuzzy control for wire rupture prevention in wire electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36.3: 339-353.

138. YAN, M. T.; LIAO, Y. S. A self-learning fuzzy controller for wire rupture prevention in WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1996, 11.4: 267-275.

139. DEKEYSER, W.; SNOEYS, R.; JENNES, M. A thermal model to investigate the wire rupture phenomenon for improving performance in EDM wire cutting. *Journal of Manufacturing Systems*, 1985, 4.2: 179-190.

140. JENNES, M.; SNOEYS, R.; DEKEYSER, W. Comparison of various approaches to model the thermal load on the EDM-wire electrode. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1984, 33.1: 93-98.

141. PURI, A. B.; BHATTACHARYYA, B. An analysis and optimisation of the geometrical in accuracy due to wire lag phenomenon in WEDM. *International journal of Machine tools and manufacture*, 2003, 43.2: 151-159.

142. WERNER, Andrzej. Method for enhanced accuracy in machining curvilinear profiles on wire-cut electrical discharge machines. *Precision Engineering*, 2016, 44: 75-80.

143. CONDE, A., et al. On the influence ofwire-lag on the WEDM oflow-radius free-form geometries. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 274-279.

144. CHEN, Zhi, et al. An analysis and optimization of the geometrical in accuracy in WEDM rough corner cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74.5-8: 917-929.

145. BELTRAMI, Ivano; BERTHOLDS, Axel; DAUW, Dirk. A simplified post process for wire cut EDM. *Journal of materials processing technology*, 1996, 58.4: 385-389.

146. WANG, J.; RAVANI, Bahram. Computer aided contouring operation for traveling wire electric discharge machining (EDM). *Computer-Aided Design*, 2003, 35.10: 925-934.

147. SARKAR, S., et al. A novel method of determination of wire lag for enhanced profile accuracy in WEDM. *Precision Engineering*, 2011, 35.2: 339-347.

148. LIN, Chin-Teng; CHUNG, I.-Fang; HUANG, Shih-Yu. Improvement of machininga ccuracy by fuzzy logic at corner parts for wire-EDM. *Fuzzy sets and systems*, 2001, 122.3: 499-511.

149. LI, Qiang, et al. Study of wire tension control system based on closed loop PID control in HS-WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82.5-8: 1089-1097.

150. DOU, Shang-Cheng; XI, Xue-Cheng; ZHAO, Wan-Sheng. Work piece height estimation in wire electrical discharge machining by using support vector regression. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227.4: 565-577.

151. LIAO, Y.-S.; CHUANG, T.-J.; YU, Y.-P. On-line work piece height estimation and its application in servo feed control of WEDM process. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 226-231.

152. SNOEYS, R.; DEKEYSER, W. Knowledge-based system for wire-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1988, 3.3: 83-96.

153. HUANG, J. T.; LIAO, Y. S. A wire-EDM maintenance and fault-diagnosis expert system integrated with an artificial neural network. *International Journal of Production Research*, 2000, 38.5: 1071-1082.

154. RAO, M. Sreenivasa; VENKAIAH, N. Parametric optimization in machining of Nimonic-263 alloy using RSM and particle swarm optimization. *Procedia Materials Science*, 2015, 10: 70-79.

155. SEN, Ruma, et al. Optimization of wire EDM parameters using teaching learning based algorithm during machining of maraging steel 300. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5.2: 7541-7551.

156. MAJUMDER, Arindam; DAS, Argha; DAS, Pankaj Kr. A standard deviation based firefly algorithm for multi-objective optimization of WEDM process during machining of Indian RAFM steel. *Neural Computing and Applications*, 2018, 29.3: 665-677.

157. CHALISGAONKAR, Rupesh; KUMAR, Jatinder. Optimization of WEDM process of pure titanium with multiple performance characteristics using Taguchi's DOE approach and utility concept. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, 8.2: 201-214.

158. CHEN, Hsien-Ching, et al. Optimization of wire electrical discharge machining for pure tungsten using a neural network integrated simulated annealing approach. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37.10: 7147-7153.

159. 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.

160. KUMAR, Anish; KUMAR, Vinod; KUMAR, Jatinder. Multi-response optimization of process parameters based on response surface methodology for pure titanium using WEDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68.9-12: 2645-2668.

161. OHLÍDAL, Ivan, et al. Combination of spectroscopic ellipsometry and spectroscopic reflectometry with including light scattering in the optical characterization of randomly rough silicon surfaces covered by native oxide layers. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, 7.4: 045004.

162. OHLÍDAL, Ivan, et al. Different theoretical approaches at optical characterization of randomly rough silicon surfaces covered with native oxide layers. *Surface and Interface Analysis*, 2018, 50.11: 1230-1233.

163. MOURALOVA, K., et al. Using a DoE for a comprehensive analysis of the surface quality and cutting speed in WED-machined hadfield steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33.5: 2371-2386.

164. SHARMA, Priyaranjan; CHAKRADHAR, D.; NARENDRANATH, S. Analysis and optimization of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for aerospace application. *Silicon*, 2018, 10.3: 921-930.

165. KUMAR, Harmesh; MANNA, Alakesh; KUMAR, Rajesh. Modeling and desirability approach-based multi-response optimization of WEDM parameters in machining of aluminum metal matrix composite. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40.9: 458.

166. KUMAR, Anish; KUMAR, Vinod; KUMAR, Jatinder. Surface crack density and recast layer thickness analysis in WEDM process through response surface methodology. *Machining Science and Technology*, 2016, 20.2: 201-230.

167. HUANG, C. A.; HSU, F. Y.; YAO, S. J. Microstructure analysis of the martensitic stainless steel surface fine-cut by the wire electrode discharge machining (WEDM). *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 371.1-2: 119-126.

168. DEBNATH, Tapas; PATOWARI, Promod Kumar. Fabrication of an array of micro-fins using Wire-EDM and its parametric analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, 34.5: 580-589.

169. KUMAR, Anish; KUMAR, Vinod; KUMAR, Jatinder. Investigation of Micro-Cracks Susceptibility on Machined Pure Titanium Surface in WEDM Process. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 2016, 16.2: 123-139.

170. KUMAR, Vinod, et al. Surface modification of WC-Co alloy using Al and Si powder through WEDM: A thermal erosion process. *Particulate Science and Technology*, 2018, 36.7: 878-886.

171. VINING, G. Geoffrey; KOWALSKI, Scott. *Statistical methods for engineers*. Nelson Education, 2010. ISBN:13-978-0-538-73518-6.

172. DATTA, Saurav; MAHAPATRA, S. Modeling, simulation and parametric optimization of wire EDM process using response surface methodology coupled with grey-Taguchi technique. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2010, 2.5: 162-183.

173. BISARIA, Himanshu; SHANDILYA, Pragya. Experimental investigation on wire electric discharge machining (WEDM) of Nimonic C-263 superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, 34.1: 83-92.

174. 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*, 2008, 57.1: 187-190.

175. MOURALOVA, Katerina, et al. Analysis of the machinability of copper alloy Ampcoloy by WEDM. *Materials*, 2020, 13.4: 893.

176. KUMAR, Anish; KUMAR, Vinod; KUMAR, Jatinder. Investigation of microstructure and element migration for rough cut surface of pure titanium after WEDM. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2013, 8.4-5: 343-356.

177. ANTAR, M. T., et al. Productivity and workpiece surface integrity when WEDM aerospace alloys using coated wires. *Procedia Engineering*, 2011, 19: 3-8.

178. LI, L., et al. Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy. *Procedia CirP*, 2013, 6: 220-225.

179. REOLON, Luca Watanabe, et al. WEDM performance and surface integrity of Inconel alloy IN718 with coated and uncoated wires. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100.5: 1981-1991.