

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství
Ústav automatizace a informatiky

Ing. Tomáš Prokeš

OPTIMALIZACE ŘÍDICÍCH PARAMETRŮ EDM STROJE
Optimization of EDM machine control parameters

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Doc. Ing. Radomil Matoušek Ph.D.
Oponenti:
Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

optimalizace, řídicí parametry, plánovaný experiment, elektroerozivní obrábění, EDM, topografie povrchu, rychlost řezání, čistý molybden

KEY WORDS

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

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

© Tomáš Prokeš, 2021
ISBN 80-214-XXXX
ISSN 1213-4198

OBSAH

OBSAH	3
1 ÚVOD	4
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	4
3 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ	4
3.1 Povrch po elektroerozivním drátovém řezání	6
4 OPTIMALIZACE ŘÍDÍCÍCH PARAMETRŮ STROJE	8
4.1 Plánovaný experiment	8
4.2 Evoluční a optimalizační výpočetní techniky	9
4.1 Optimalizace, monitorování a řízení procesu	11
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	12
5.1 Optimalizace obrábění čistého molybdenu	12
5.1.1 Model pro rychlost řezání	15
5.1.2 Model pro parametr topografie povrchu Ra	17
5.1.3 Optimalizace	19
5.2 Optimalizace obrábění niklové slitiny B1914	20
5.2.1 Model pro rychlost řezání	24
5.2.2 Model pro parametry topografie povrchu Ra a Rz	25
5.2.1 Optimalizace	26
6 ZÁVĚRY	28
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
CURRICULUM VITAE	31
ABSTRAKT	32

1 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, střížných 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 řídicích 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 řídicích 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.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem dizertační práce je optimalizace řídicích 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 řídicích 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 řídicích parametrů stroje,
- návrh 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 řídicích parametrů stroje.

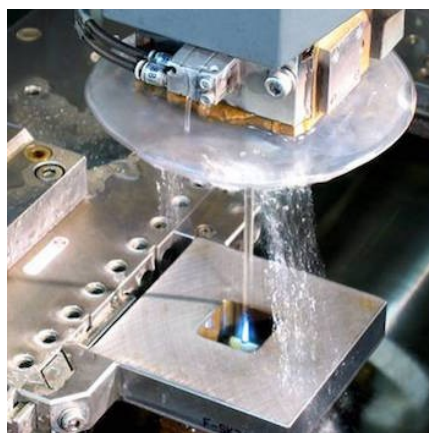
Jednotlivé kroky budou realizovány na dostupných zařízeních na Ústavu automatizace a informatiky při Vysokém učení technickém v Brně nebo na CEITEC VUT v Brně.

3 ELEKTROEROZIVNÍ 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].

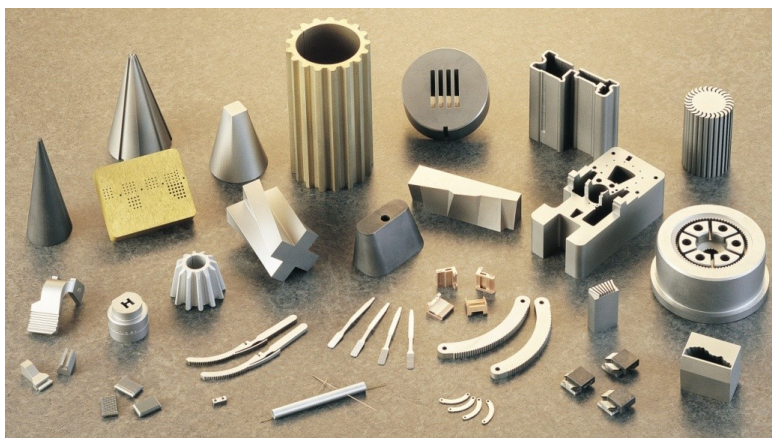
Mechanismus odstraňování materiálu v průběhu elektroerozivního drátového řezání je velmi podobný konvenčnímu procesu EDM zahrnujícímu erozní účinek vyvolaný elektrickými výboji. V průběhu drátového řezání (obrázek 1) je materiál obrobku erodován sérií elektrických impulzů, které se vyskytují mezi obráběným 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 [3]. 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 [4].



Obr. 1 Technologie elektroerozivního drátového řezání [5].

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.

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.



Obr. 2 Součásti obrobené pomocí WEDM [6].

3.1 POVRCH PO ELEKTROEROZIVNÍM DRÁTOVÉM ŘEZÁNÍ

Elektroeroze je termoelektrický děj, který procesem odebrání 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. Vyrobovaný materiál je odplavován proudem dielektrické kapaliny, nicméně také dochází k jeho odpařování vlivem velmi vysokých teplot procesu. Morfologie povrchu a případné defekty jsou klíčové parametry určující výslednou jakost obrobeného povrchu, umožňující i jistou predikci životnosti a správné funkčnosti součástí. Na obrázku 3 je znázorněn jediný kráter, jenž je definován rozměry $\varnothing d_i$ a hloubkou h .

Množství odebraného materiálu lze určit dle vztahu:

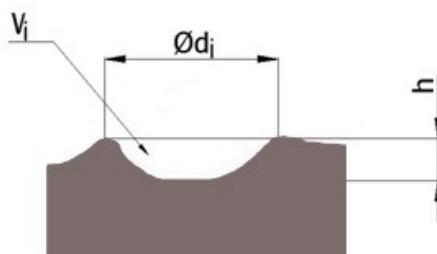
$$V_i = K \cdot W_i, \quad (1)$$

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

Energii výboje je možné určit ze vztahu:

$$W_i = \int_0^t U(t) \cdot I(t) \cdot dt, \quad (2)$$

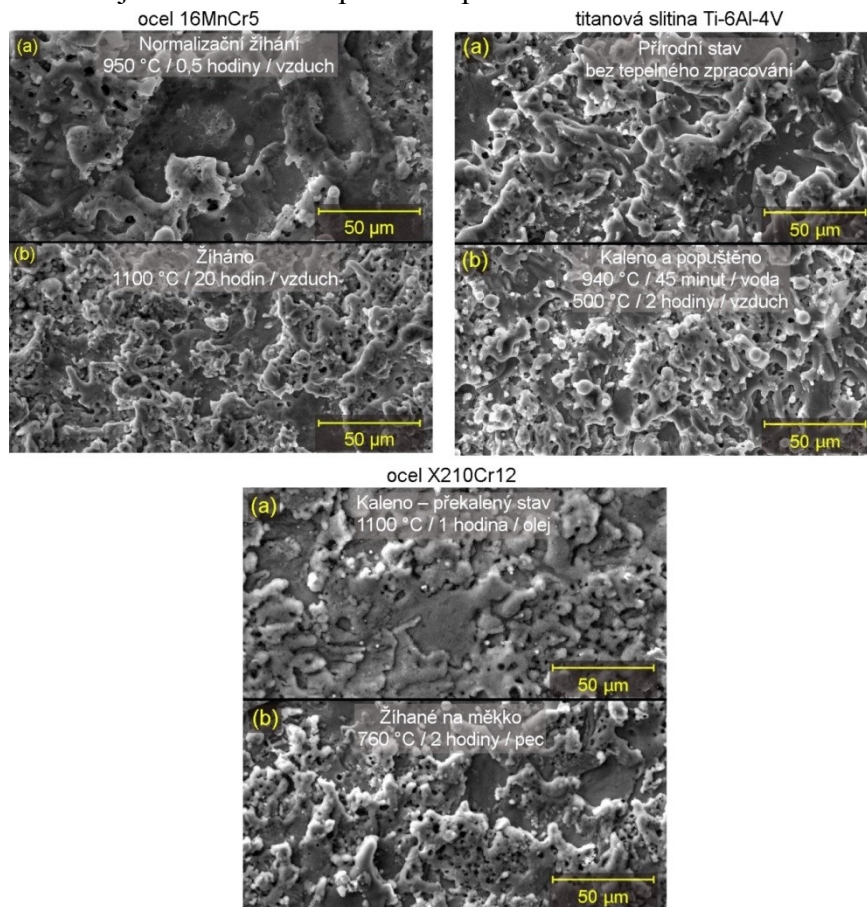
kde: U je napětí [V], I je proud [A] a t je délka trvání výboje [μs].



Obr. 3 Profil jediného kráteru.

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 [7]. Další autoři posuzovali však pouze vliv nastavení parametrů stroje a obráběný materiál, což byly např. Han [8], Li [9] nebo Hassan [10]. Na obrázku 4 jsou

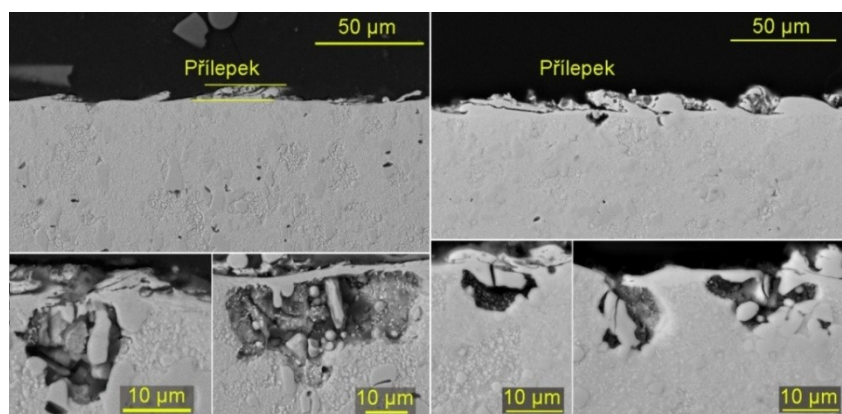
znázorněny příklady jednotlivých morfologií (tvarů kráterů) povrchů v závislosti na druhu obráběného materiálu a jeho odlišného tepelného zpracování.



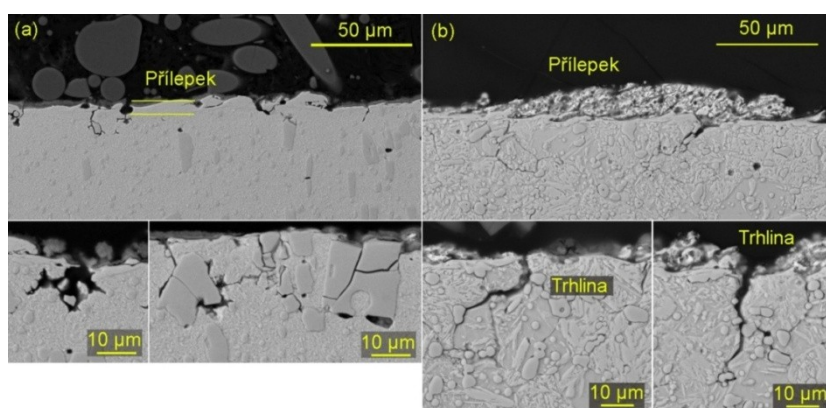
Obr. 4 Rozdílný vzhled kráterů pro jednotlivé materiály a jejich tepelná zpracování, snímky z elektronového mikroskopu [7].

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 [12] a Puriho [13] ale také na druhu tepelného zpracování obráběného materiálu a také na směru řezu vůči orientaci vláken polotovaru, což bylo publikováno ve výzkumu Mouralové [11]. 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 [14]. 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 5.

Dalšími defekty, které vznikají v podpovrchové vrstvě po WEDM jsou různé druhy trhlin, jejichž příklady jsou znázorněny na obrázku 6. Např. trhliny procházející celým průřezem ledeburitických karbidů mají tendenci (v rámci karbidických shluků v řádcích) k masivnímu propojování, což je znázorněno na obrázku 6 (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 6 (b).



Obr. 5 Podpovrchové vypálené kavity na materiálu ocel X210Cr12s tepelným zpracováním: 780 °C / 20 h / ochlazování v peci, snímky z elektronového mikroskopu [11].



Obr. 6 Podpovrchové defekty na materiálu ocel X210Cr12, snímky z elektronového mikroskopu (a) materiál s tepelným zpracováním kaleno a popuštěno, (b) materiál v překaleném stavu [11].

4 OPTIMALIZACE ŘÍDÍCÍCH PARAMETRŮ STROJE

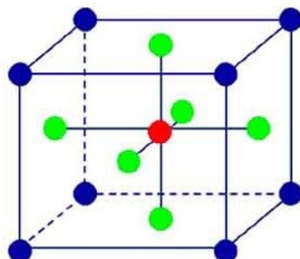
Matematická optimalizace je výběr nejlepšího prvku, s ohledem na určité kritérium, z nějaké sady dostupných alternativ. V nejjednodušším případě spočívá problém optimalizace v maximalizaci nebo minimalizaci účelové funkce systematickým výběrem vstupních hodnot v rámci povolené sady a výpočtem hodnoty 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 [15,16,17].

4.1 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 [18].

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 7). 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 [19,20].

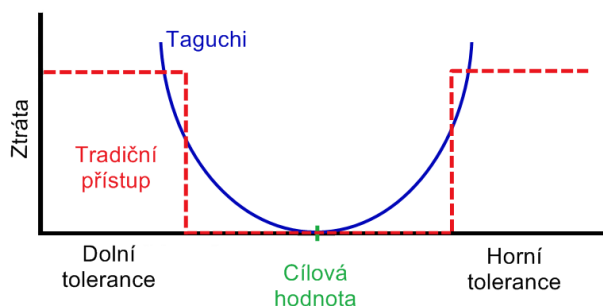


Obr. 7 Schéma systematického sběru dat (centrální kompozitní design)[21].

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 [44].

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 [22].

Japonský inženýr Genichi Taguchi navrhl několik přístupů k plánovaným experimentům, které se někdy nazývají „Taguchiho metody“, cílové hodnoty odezev jsou vyhodnocovány pomocí Taguchiho ztrátové 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 [23].



Obr. 8 Taguchiho ztrátová funkce a tradiční přístup [24].

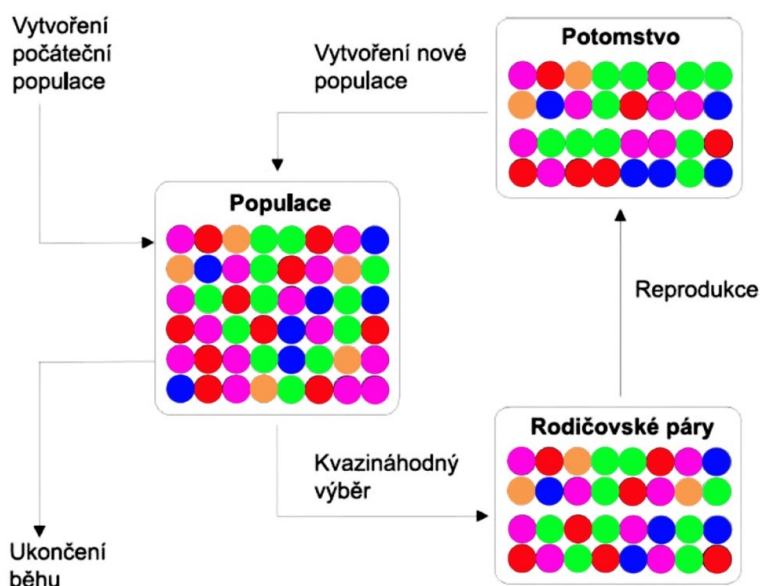
4.2 EVOLUČNÍ A OPTIMALIZAČNÍ VÝPOČETNÍ TECHNIKY

Evoluční výpočetní techniky (ECT) jsou algoritmy, které vycházejí ze základních principů Mendelovy a Darwinovy teorie 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 [25,26].

Genetický algoritmus (GA) je metoda řízeného náhodného vyhledávání, kterou vynalezl Holland [27] 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 [28,29].

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 9) 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 [30,31,32].



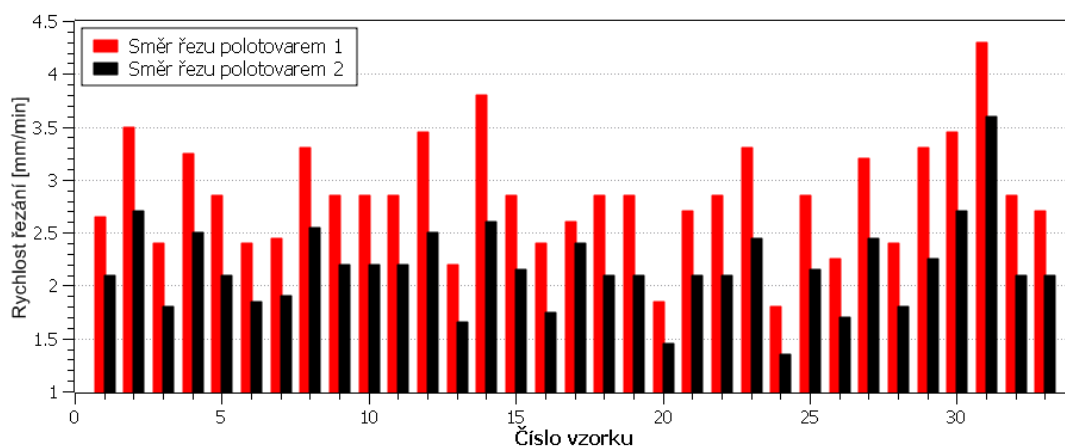
Obr. 9 Schéma genetického algoritmu[33].

4.1 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 [34] nebo 16MnCr5 [35], tak i nekovové jako např. hliníková slitina 7475-T7351 [36], titanová slitina Ti-6Al-4V s různými druhy tepelného zpracování [37] nebo čistý hliník 99.5 [38].

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 výrobcí zařízení WEDM, které vedly k nekonzistentnímu výkonu obrábění. Levy a Maggi [39] prokázali, že nastavení parametrů stanovená výrobcí jsou použitelné pouze pro běžné druhy oceli. Nastavení pro obrábění nových materiálů, jako jsou pokročilá keramika a kompozity s kovovou maticí, 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 [37].

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. [40] 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 Mouralova [37] na titanové slitině Ti-6Al-4V.



Obr. 10 Vliv orientace směru řezu polotovarem na řeznou rychlost [41].

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 Mouralova [41] a graf znázorňující závislost řezné rychlosti na směru orientace řezu polotovarem je zobrazen na obrázku 10.

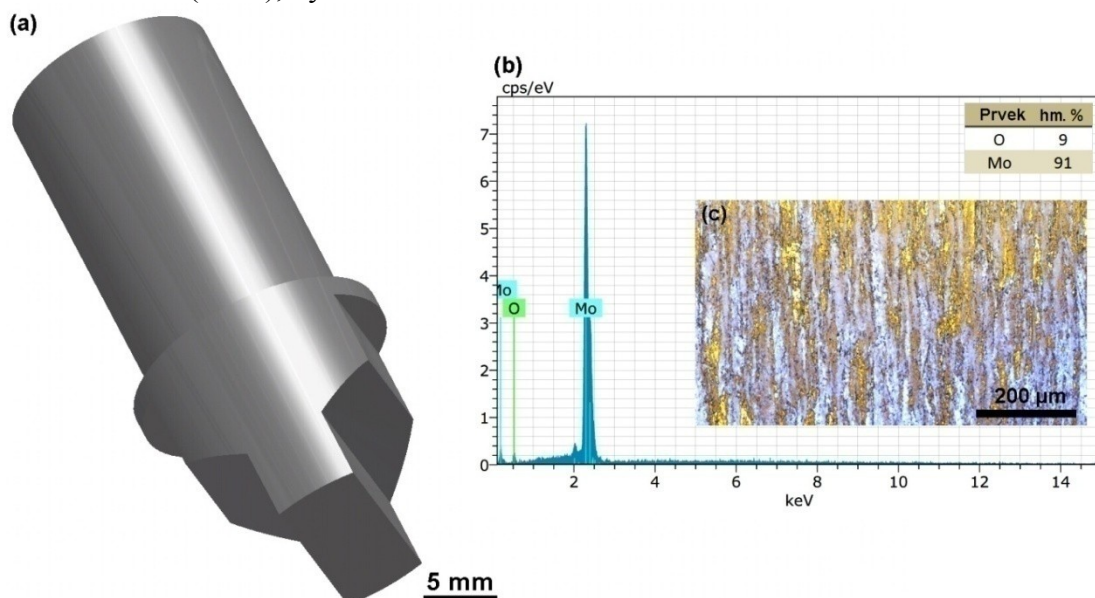
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

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.

5.1 OPTIMALIZACE OBRÁBĚNÍ ČISTÉHO MOLYBDÉNU

Zvoleným materiálem pro experiment byl čistý molybden 99,9 %, ze kterého se v podmínkách firmy Kovosobotka, vyrábějí 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 $2\,623\text{ }^{\circ}\text{C}$, vysoká tepelná vodivost $138\text{ W/m}\cdot\text{K}$, elektrická vodivost $18.7 \cdot 10^6\text{ S/ma}$ nízká teplotní roztažnost $5.3 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. 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 11 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. 11 (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 ponořeny v deionizované 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 experiment $n 2^{5-1}$ s 10 axiálními body a 7 centrálními body, přičemž podrobně je tento návrh popsán v Montgomery [39]. 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} [μ s], Vypnutí pulzu T_{off} [μ s], 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.

Parametr	Napětí [V]	Zapnutí pulzu [μ s]	Vypnutí pulzu [μ s]	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.

Číslo běhu	Napětí [V]	Zapnutí pulzu [μ s]	Vypnutí pulzu [μ s]	Rychlost odvíjení drátu [m/min]	Proud [A]	Číslo běhu	Napětí [V]	Zapnutí pulzu [μ s]	Vypnutí pulzu [μ s]	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

znovunavlečení drátu trvá 1 min, čímž se automaticky prodlužuje výrobní čas. U nejnovějších drátových řezaček byl tento čas zkrácen na několik sekund, 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 topografie 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 Hobson Talysurf 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 $l_r = 0,8$ 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 plánovaného experimentu s numerickými faktory je používána regresní analýza. V našem případě jsme použili plný kvadratický lineární regresní model, který uvažuje působení jednotlivých faktorů, jejich párových interakcí a jejich kvadratických efektů. Zde stojí za zmínku 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 nejvyšší rychlosti bylo dosaženo u vzorků č. 14 a 31 a to 4,3 mm/min, naopak nejnižší rychlostí byly obrobena vzorky č. 20 a 24 to pouze 1,7 mm/min.

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 obrobena s nastavením parametrů stroje: $U=70$ V, $T_{on}=6$ μ s, $T_{off}=50$ μ s, $v=14$ m/min a $I=25$ A. Parametr R_a tohoto vzorku měl pouze hodnotu 1,72 μ m.

5.1.1 Model pro rychlost řezání

V následující tabulce 4 jsou uvedeny p-hodnoty jednotlivých prediktorů modelu, včetně koeficientu determinace R^2 , 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 .

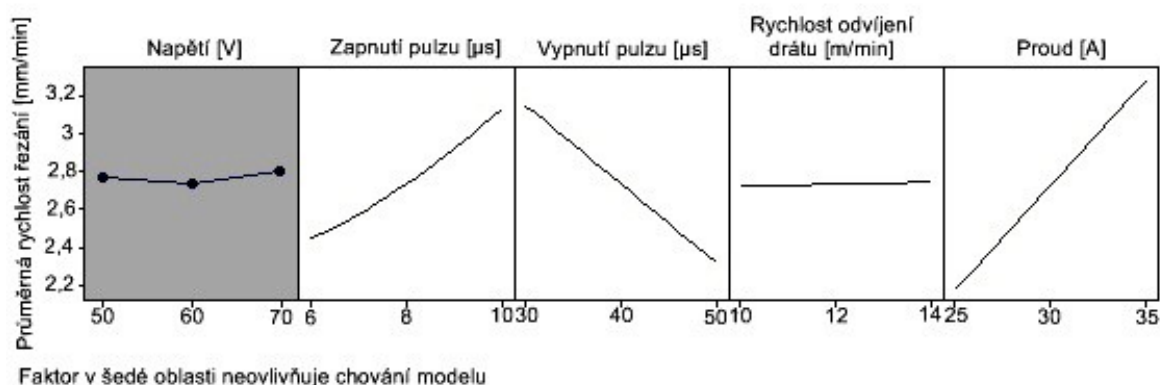
Parametr	P-Value
Konstanta	0,000
Zapnutí pulzu T_{on} [μs]	0,000
Vypnutí pulzu T_{off} [μs]	0,000
Rychlost odvíjení drátu v [m/min]	0,428
Proud I [A]	0,000
Zapnutí pulzu T_{on} [μs] * Zapnutí pulzu T_{on} [μs]	0,012
Zapnutí pulzu T_{on} [μs] * Vypnutí pulzu T_{off} [μs]	0,002
Zapnutí pulzu T_{on} [μs] * 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

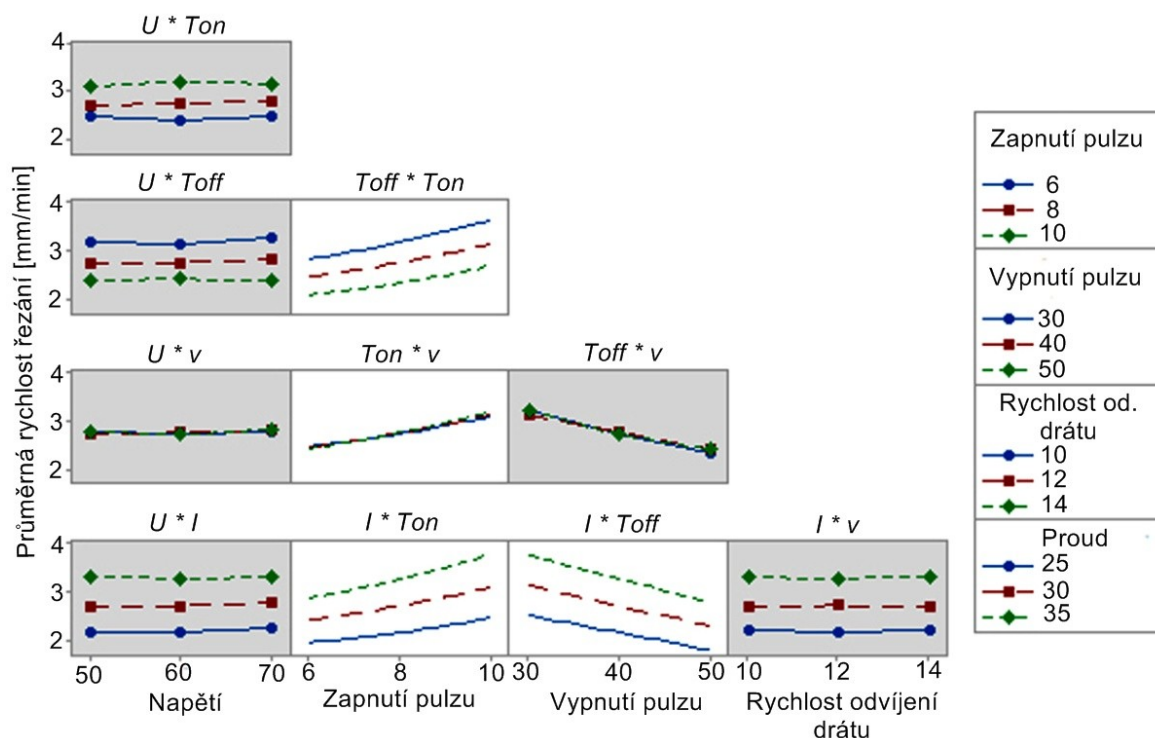
Všechny parametry uvedené v tabulce 4 jsou významné (p-hodnota $< 0,05$), až na rychlost odvíjení drátu, kde je významná její interakce, proto je ponechána v modelu. Napětí v tabulce není, jeho působení na rychlost řezání je tudíž nevýznamné. Koefficient determinace je 99,29 % což je velice dobré a model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

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

Působení jednotlivých faktorů je uvedeno v diagramu hlavních efektů na obrázku 13, kde je zřetelné i významné zakřivení Zapnutí pulzu T_{on} [μs] * Zapnutí pulzu T_{on} [μs].

Pro zajímavost uvádíme diagram interakcí (obrázek 14), 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. 13** Hlavní efekty vstupních faktorů pro rychlosti řezání.



Faktor v šedé oblasti neovlivňuje chování modelu

Obr. 14 Interakce vstupních faktorů pro rychlosti řezání.

5.1.2 Model pro parametr topografie povrchu Ra

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

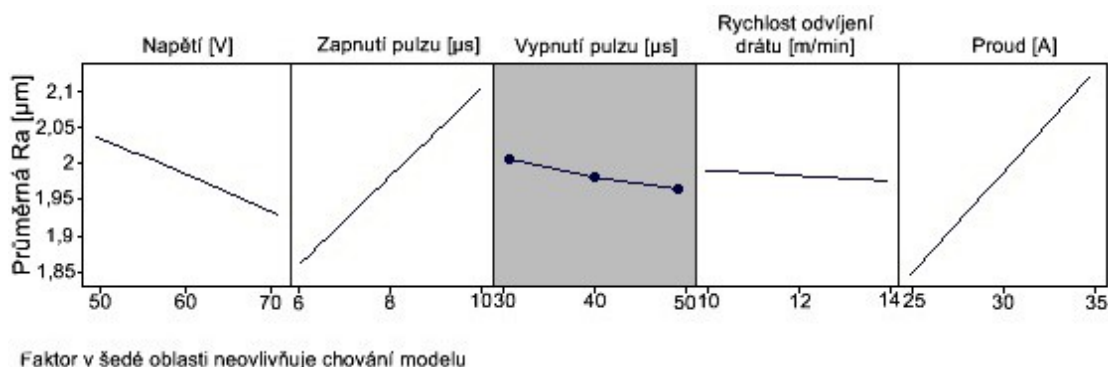
Tab. 5: Parametry regresního modelu pro parametr Ra

Parametr	P-Value
Konstanta	0,000
Napětí [V]	0,000
Zapnutí pulzu T_{on} [μ s]	0,000
Rychlost odvíjení drátu v [m/min]	0,568
Proud I [A]	0,000
Napětí [V] * Zapnutí pulzu T_{on} [μ s]	0,011
Napětí [V] * Rychlost odvíjení drátu v [m/min]	0,040
Zapnutí pulzu T_{on} [μ s] * 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 faktorů 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 dobrý výsledek, modely topografie po WEDM pro daný rozsah vstupních faktorů mají většinou koeficient determinace pod 60 %. Model je adekvátní ($p\text{-hodnota}_{\text{Lack-of-Fit}} > 0,05$), přičemž regresní model pro parametr Ra je dán následující rovnicí:

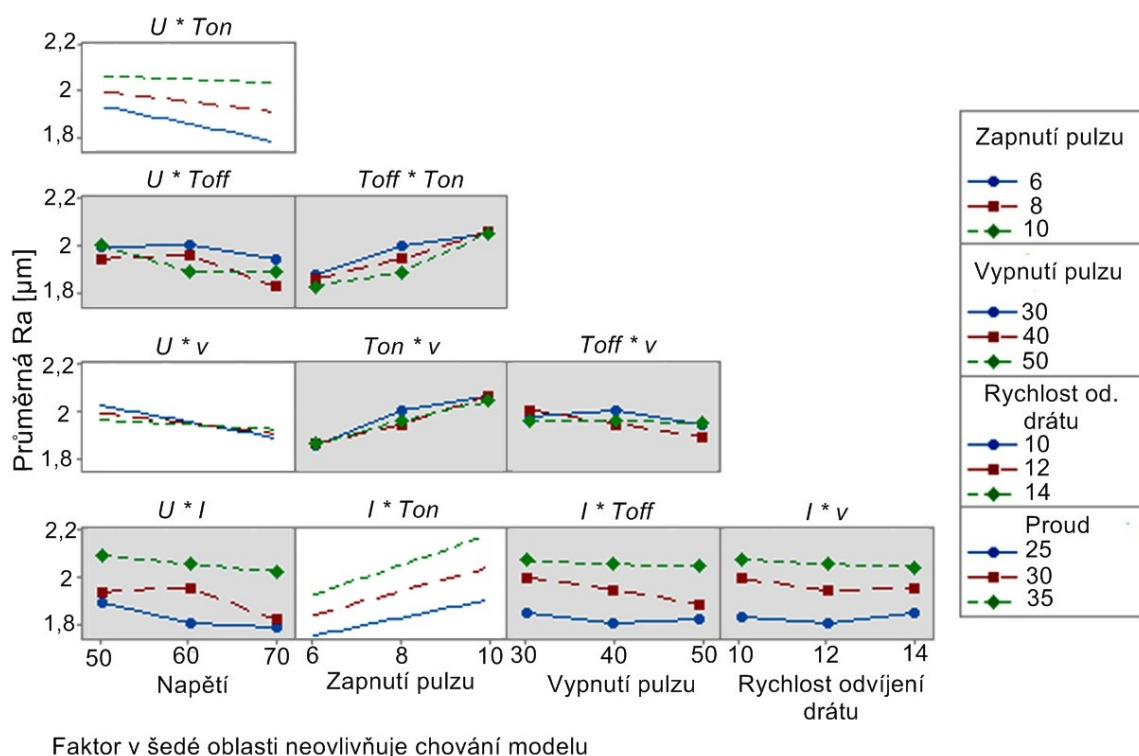
$$Ra = 3,458 - 0,0323U - 0,1189T_{on} - 0,0784v + 0,0033I + 0,0015U \cdot T_{on} + 0,0012U \cdot v + 0,0025T_{on} \cdot I \quad (4)$$

Působení jednotlivých faktorů je uvedeno v diagramu hlavních efektů na obrázku 15.



Obr. 15 Hlavní efekty vstupních faktorů pro parametr topografie Ra.

Pro zajímavost uvádíme diagram interakcí (obrázek 16), kde jednotlivé významné interakce nejsou šedě označeny a vizuálně je poznáme z „nerovnoběžnosti“ křivek, což je vidět především u interakce napětí [V]*zapnutí pulzu $T_{on}[\mu s]$, která je nejvýznamnější.



Obr. 16 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. 27. 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. 27 Korelační matice pro Spearmanův koeficient korelace.

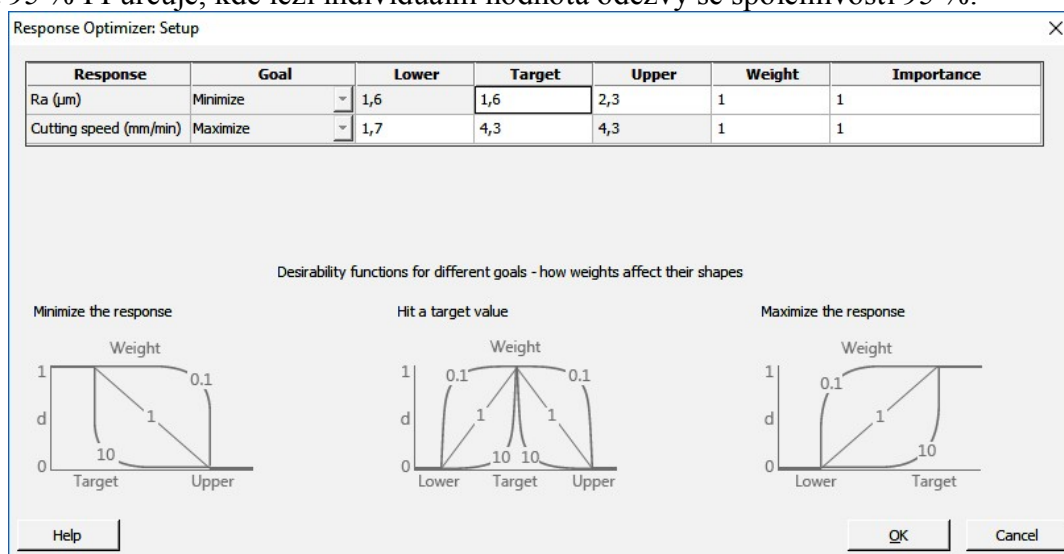
5.1.3 Optimalizace

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 vícekritériální optimalizace v software Minitab.

Nejprve bude nastavena funkce příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými parametry, viz obrázek 18. 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.

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 obrázek 19. 95 % CI značí, kde leží střední hodnota odezvy se spolehlivostí 95 % a 95 % PI určuje, kde leží individuální hodnota odezvy se spolehlivostí 95 %.

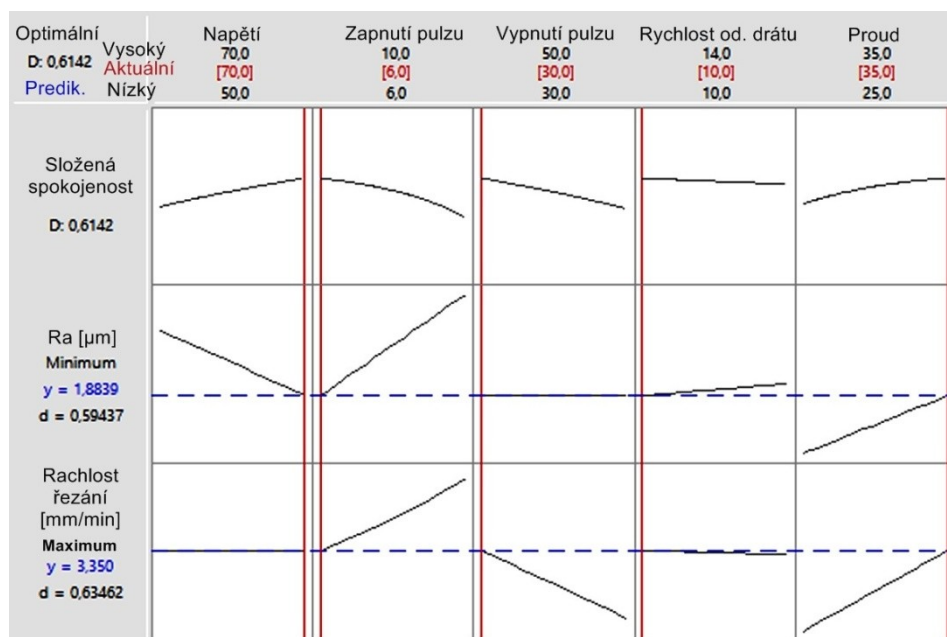


Obr. 18 Nastavení funkcí příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými odezvami.

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. 19 PI a CI pro jednotlivé odezvy.

Posledním výstupem (obrázek 20) 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 myši. První řada grafu zobrazuje spokojenost pro jednotlivé parametry, další řady 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.

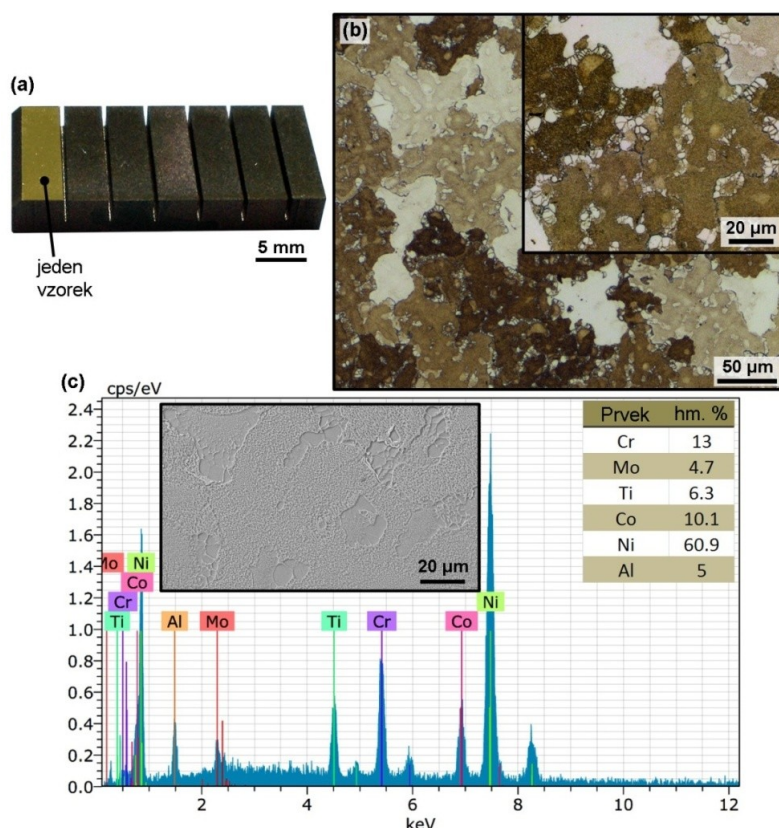


Obr. 20 Grafický výstup z procedury Response Optimizer.

5.2 OPTIMALIZACE OBRÁBĚNÍ NIKLOVÉ SLITINY B1914

Zvoleným materiálem pro experiment byla niklová superslitina B1914, ze které se v podmínkách firmy Kovosobotka, vyrábějí díly pro automobilový průmysl. Příklad vyrobených vzorků pro experiment je znázorněn na obrázku 21 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 polotovár 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 5.1 nicméně zde leptání proběhlo pomocí leptadla kalling's 2 (2 g CuCl_2 + 40 ml HCl + 40 ml ethanolu) po dobu 10 s.

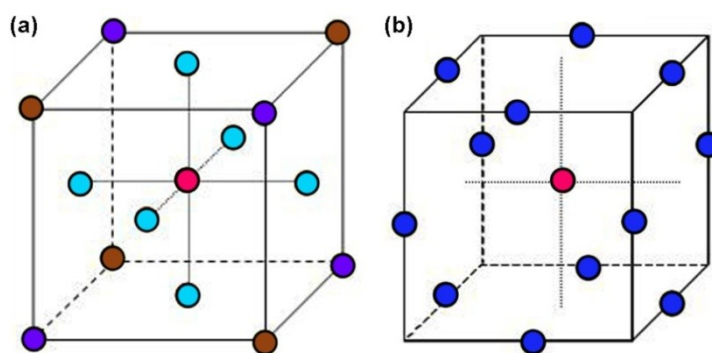
Pro obrábění byl použit stejný WEDM jaký byl popsán v kapitole 5.1 nicméně zde byl použit mosazný drát typu CUT E o průměru 0,25 mm od firmy PENTA TRADING. Složení drátu je 60 % měď a 40 % zinku, přičemž jeho pevnost v tahu je 1000 N/mm².



Obr. 21 (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 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 Composite Response Surface Design je znázorněn na obrázku 46 pro 3 vstupní proměnné. Pro 5 vstupních proměnných, jako je v našem případě, nejde tyto obrázky znázornit, protože nelze intuitivně zobrazit pětirozměrnou krychli, její čtyřrozměrné stěny a trojrozměrné hrany. Podstatou Central Composite Design (obrázek 22 (a)) je skládání, faktorového experimentu, který představují vrcholy n -rozměrné krychle – cornerpoints (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 cornerpoints. V případě 3 dimenzí vybereme hnědé nebo fialové cornerpoints. Podstatou Box and Behnken Design (obrázek 22 (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.

Vstupními faktory experimentu bylo opět pět nezávislých technologických parametrů řezacího procesu Napětí U [V], Zapnutí pulzu T_{on} [μ s], Vypnutí pulzu T_{off} [μ s], Rychlost odvíjení drátů [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 rozsáhlých předchozích testů a doporučení výrobce stroje.



Obr. 22 Central Composite Design a (a) Box and Behnken Design, (b) pro tři vstupní proměnné.

Tab.6: Mezní hodnoty vstupních parametrů pro plánovaný experiment.

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

Tab. 7: Vstupní parametry obrábění použité pro jednotlivé běhy experimentu.

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 5.1. 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 reliéfů) 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, $T_{on}=9\mu s$, $T_{off}=26\mu s$, $v=13$ m/min a $I=36$ A. Vzorkem s nejnižší hodnotou parametru R_a 2,18 μm a současně i R_z 16,86 μm byl vzorek č. 28 obrobený parametry nastavení stroje: $U=60$ V, $T_{on}=6\mu s$, $T_{off}=43\mu s$, $v=13$ m/min a $I=22$ A.

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

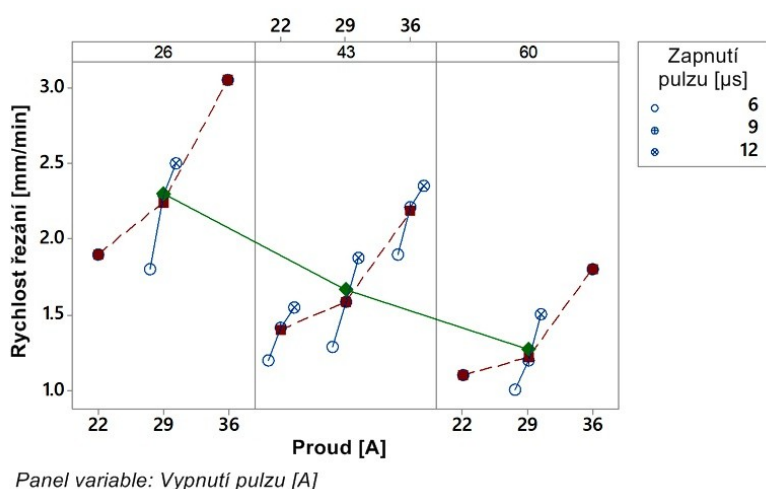
Č. vz.	Rychlost řezání [mm/min]	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]	S_a [μm]	S_q [μm]	S_z [μm]	P_a [μm]	P_q [μm]	P_z [μm]
1	1,8	4,05	4,98	28,41	3,99	4,90	31,08	4,21	5,26	26,29
2	2,2	3,40	4,27	25,28	3,36	4,19	28,57	3,47	4,33	22,69
3	2,3	2,98	3,68	23,20	2,89	3,65	25,27	2,82	3,60	19,84
4	2,5	3,19	4,04	24,62	3,19	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

5.2.1 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 ($p\text{-value} < 0,05$). 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 ($p\text{-value}_{\text{Lack-of-fit}} \geq 0,05$), 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 23. Z tabulky 9 a obrázku 23 je zřejmé, že nejvýznamněji rychlost řezání ovlivňuje vstupní faktor Vypnutí pulzu a to negativně, tedy s rostoucím Vypnutím 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 pozitivního 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:

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



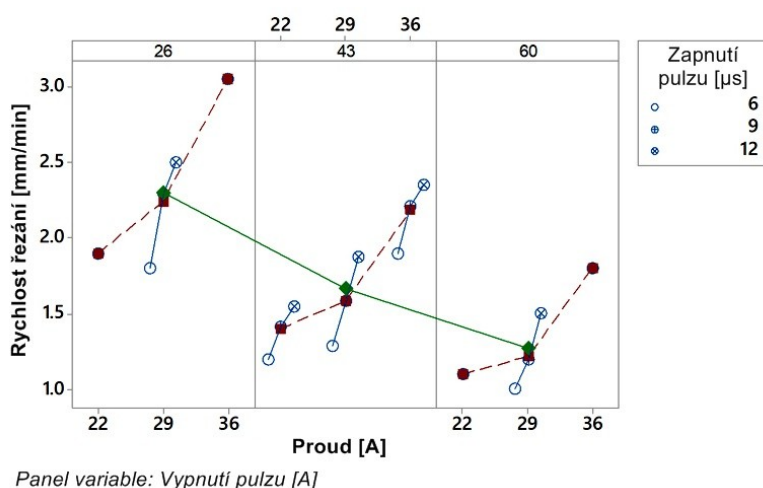
Obr. 23 Multi-Vari Chart pro rychlost řezání pro Zapnutí pulzu, Proud a Vypnutí pulzu.

Tab. 9: Příspěvek a významnost 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 [μ s]	13,27%	0,000
Vypnutí pulzu [μ s]	47,16%	0,000
Proud [A]	30,09%	0,000
Square	7,03%	0,000
Vypnutí pulzu [μ s] * Vypnutí pulzu [μ s]	1,71%	0,000
Proud [A] * Proud [A]	5,32%	0,000
2-WayInteraction	0,57%	0,001
Vypnutí pulzu [μ s] * Proud [A]	0,57%	0,001
Error	1,67%	
Lack-of-Fit	1,34%	0,097
PureError	0,32%	
Total	100,00%	

5.2.2 Model 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 korelace Ra a Rz je 0,836, a Spearmanova korelace (pořadová korelace Ra a Rz je 0,848 a p-hodnota pro oba testy nezávislosti, založené na těchto korelačních 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 24.



Obr. 24 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 zúžen metodou Stepwise selection ($p\text{-value} < 0,05$). Vliv jednotlivých prediktorů a jejich skupin včetně jejich významnosti ($p\text{-value}$) 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 nejvýznamnější na R_a působí Proud. R_a roste s rostoucím Proudem, takže jeho optimální nastavení vzhledem k R_a je na dolní úrovni, protože R_a minimalizujeme. Významný kvadrát Proud způsobuje, že nárůst v R_a v dolní polovině rozsahu Proudů je pomalejší než horní polovině, jak je vidět na obrázku 24. Druhý nejvýznamnější faktor je Zapnutí pulzu taktéž způsobuje růst R_a , 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 významnost prediktorů v modelu pro R_a

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

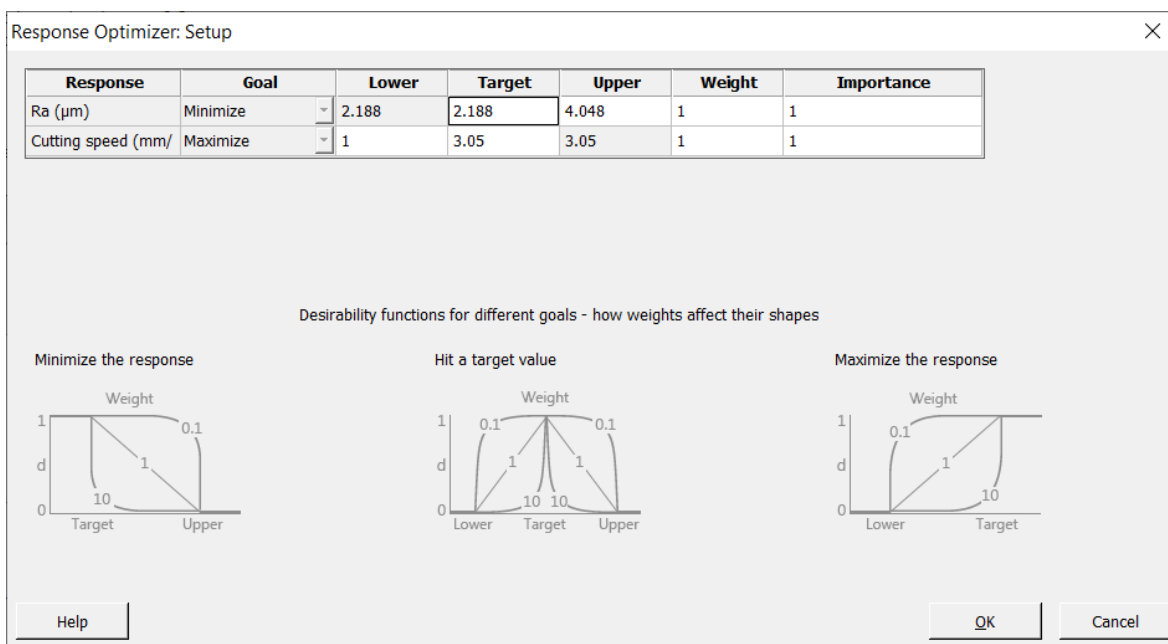
5.2.1 Optimalizace

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

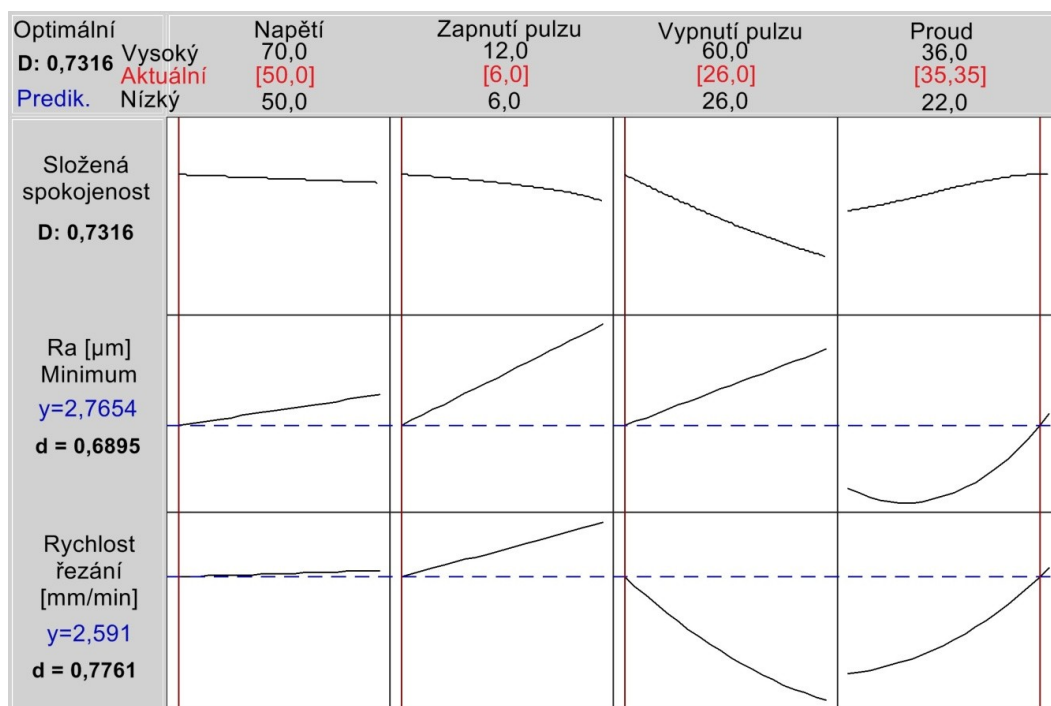
Stejně jako v případě čistého molybdenu bylo použito procedury Response Optimizer v Minitabu 17 s původním nastavením funkcí příslušnosti (po částech lineární funkce příslušnosti, kde meze jsou dány pozorovanými minimy a maximy, a významnost obou parametrů stejná) jak je znázorněno na obrázku 25.

Grafickým výstupem je interaktivní graf (obrázek 26), kde je červeně zobrazeno optimální nastavení vstupních parametrů procesu a 3 řady grafů, první je funkce příslušnost spokojenosti a na druhých dvou jsou řezy odezgovými 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 μ s, Vypnutí pulzu=26 μ s 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. 25 Nastavení funkcí příslušnosti pro spokojenost s jednotlivými odezvami.



Obr. 26 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)

6 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 řídicích 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:

- nejvyšší rychlosti řezání bez přetržení drátové elektrody bylo dosaženo u vzorků č. 14 (nastavení parametrů stroje: $U=70$ V, $T_{on}=10\mu s$, $T_{off}=30\mu s$, $v=10$ m/min a $I=35$ A) a 31 (nastavení parametrů stroje: $U=50$ V, $T_{on}=10\mu s$, $T_{off}=30\mu s$, $v=14$ 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, $T_{on}=6\mu s$, $T_{off}=50\mu s$, $v=14$ m/min a $I=25$ A, přičemž parametr R_a tohoto vzorku měl pouze hodnotu $1,72\mu m$,
- byly sestaveny regresní modely pro rychlost řezání i parametr topografie R_a , přičemž na základě Spearmanova koeficientu korelace je vidět, že jsou všechny vyhodnocované parametry topografie statisticky významně závislé,
- užitím multikriteriální optimalizace bylo nalezeno optimální nastavení řídicích parametrů pro minimalizaci R_a na hodnotu $1,88\mu m$ 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,

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, $T_{on}=6\mu s$, $T_{off}=30\mu s$, $v=10$ 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 super slitiny 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, $T_{on}=9\mu s$, $T_{off}=26\mu s$, $v=13$ 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 R_a 2,18 μm a současně i R_z 16,86 μm byly dosaženy u vzorku č. 28, který byl obrobený parametry nastavení stroje: $U=60$ V, $T_{on}=6\mu s$, $T_{off}=43\mu s$, $v=13$ m/min a $I=22$ A,
- oba parametry topografie R_a a R_z jsou statisticky závislé, proto byl vytvořen pouze regresní model pro R_a , 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 přihlídnout ke konkrétním požadavkům na topografii povrchu a posléze maximalizovat řeznou rychlost,

- 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 vícekritériální 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.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [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] MCGEOUGH, J. A. *Advanced methods of machining*. New York: Chapman and Hall, 1988. ISBN 04-123-1970-5.
- [4] TONDAY, H. R.; TIGGA, A. M. WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING: Empirical Study and Optimization, 2017. ISBN: 978-3-330-32464-0.
- [5] Mold making ressource [online]. [cit. 2018-09-30]. Dostupné z: <https://www.moldmakingresource.com/wire-edm-die-mold-making/>.
- [6] XACT, Wire EDM Corporation [online]. [cit. 2018-09-30]. Dostupné z: <https://www.xactedm.com/edm-gallery/>.
- [7] MOURALOVA, K., et al. Comparison of morphology and topography of surfaces of WEDM machined structural materials. *Measurement*, 2017, 104: 12-20.
- [8] 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.
- [9] LI, L., et al. Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy. *Procedia CirP*, 2013, 6: 220-225.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] HASÇALÝK, Ahmet; ÇAYDAŞ, Ulaş. Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 toolsteel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148.3: 362-367.
- [15] BENDSØE, Martin P. *Topology optimization*. Springer US, 2009. ISBN: 3-540-42992-1.
- [16] RAO, Singiresu S. *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley&Sons, 2009. ISBN: 81-224-1149-5.
- [17] MATOUSEK, Radomil; POPELA, Pavel; KUDELA, Jakub. *Heuristic approaches to stochastic quadrati assignment problem: Var and cvarcases*. Mendel. 2017. p. 73-78.
- [18] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. John wiley&sons, 2017. ISBN: 1119386101.
- [19] DEAN, Angela, et al. (ed.). *Handbook of design and analysis of experiments*. CRC Press, 2015. ISBN: 978-1-4665-0434-9

- [20] ANTONY, Jiju. *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier, 2014. ISBN: 978-0-08-099417-8
- [21] Tertiary courses [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.tertiarycourses.com.sg/design-of-experiment-doe-course.html>.
- [22] FISHER, Ronald A. Mathematics of a lady casting tea. *The Word of mathematics*, 1956, 3.part 8: 1514-1521.
- [23] ROY, Ranjit K. *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010. ISBN: 978-0-87-263864-8.
- [24] ZAHRAEE, S. M., et al. Productivity Improvement of Manufacturing System Using Design of Experiment and Computer Simulation. *Editorial Board*, 2013, 117.
- [25] ZELINKA, Ivan, et al. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. BEN, 2008. ISBN: 978-80-7300-218-3.
- [26] BARROS, Manuel FM; GUILHERME, Jorge MC; HORTA, Nuno CG. *Analog circuits and systems optimizati on based on evolutionary computation techniques*. Berlin: Springer, 2010.
- [27] HOLLAND, John. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with application to biology. *Control and artificial intelligence*, 1975.
- [28] MATOUSEK, Radomil; DOBROVSKY, Ladislav; KUDELA, Jakub. *The quadratic assignment problem: metaheuristic optimizationu sing HC12 algorithm*. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. ACM, 2019. p. 153-154.
- [29] CUEVAS, Erik, et al. *Evolutionary computation techniques: a komparative perspective*. Berlin: Springer, 2017. ISBN: 978-3-319-51109-2.
- [30] PHAM, Duc; KARABOGA, Dervis. *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [31] SIVANANDAM, S. N. a S. N. DEEPA. *Introduction to genetic algorithms*. Berlin: Springer, c2008. ISBN 978-3-540-73189-4.
- [32] MITCHEL, Melanie. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MIT Press, 2002. ISBN 0-262-63185-7.
- [33] HYNEK, Josef. *Genetické algoritmy a genetické programování*. Praha: Grada, 2008. Průvodce (Grada). ISBN 978-80-247-2695-3.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] MOURALOVA, K., et al. Quality of surface and subsurface layers after WEDM aluminum alloy 7475-T7351including analysis of TEM lamella. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 1-1.
- [37] MOURALOVA, K., et al. Analysis of surface and subsurface layers after WEDM for Ti-6Al-4Vwith heat treatment. *Measurement*, 2018, 116: 556-564.
- [38] MOURALOVA, K., et al. Analysis of surface morphology and topografy of pure aluminium machined using WEDM. *Measurement*, 2018, 114: 169-176.
- [39] LEVY, G. N.; MAGGI, F. WED machinability comparison of different steel grades. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39.1: 183-185.
- [40] KONDA, R., et al. Design of experiments to study and optimizme process performance. *International Journal of Quality& Reliability Management*, 1999, 16.1: 56-71.
- [41] 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.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Ing. Tomáš Prokeš
E-mail: Tomas.Prokes@vutbr.cz

Jazykové znalosti: Angličtina, Němčina

Vzdělání probíhající

2017 – současnost, Doktorské studium, Vysoké učené technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor - Konstrukční a procesní inženýrství

Vzdělání dosažené

- 2011 – 2016 Strojírenská technologie a průmyslový management, Vysoké učené technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ukončení – magisterský titul
- 2007 – 2011 Střední průmyslová škola, Jihlava Strojírenská technologie, Ukončení – maturitní zkouška

Zaměstnání a pracovní zkušenosti v oboru

- Srpen 2019 – současnost - Mann Hummel v.o.s. Vedoucí nástrojárny Vedení týmu nástrojařů Rozhodování o opravách forem Plánování vývoje nástrojárny a dlouhodobých oprav
- Říjen 2018 – Srpen 2019 - Mann Hummel v.o.s. Vedoucí elektro a mechanické údržby strojů
- Duben 2017 – Říjen 2018 - Mann Hummel v.o.s. TPM koordinátor
- Květen 2016 – Květen 2017 - Automotive Lighting, s. r. o. WCM pilířový zástupce pro závod Pávov WCM pilířový vedoucí pro závod LED
- Srpen 2010 – květen 2016 - Kovoobrábění Sobotka (Technologie, Konstrukce, Management)
- Březen 2014 – srpen 2014 - Bosch Diesel, s. r. o. Trainee Process Engineer
- Leden 2013 – březen 2014 - Valeo Compressor Europe Humpolec, s. r. o. Trainee Process Engineer

ABSTRAKT

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

Abstract

The dissertation thesis is focused on the optimization of control parameters of an EDM machine; the subject of optimization was 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 used for control parameters of this process. The second part of the thesis was focused on real application of knowledge gained from studied sources. Here, a design of experiment aimed at optimizing the parameters of the EDM machine was designed and carried on to maximize the cutting speed with the highest possible surface quality. The result of the work was to build adequate regression models and find the optimal setting of machine control parameters.