

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:

B2301

Strojní inženýrství

Studijní obor:

2301R016

Strojírenská technologie -
technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti zvyšování trvanlivosti stříhacích nožů ve firmě Shape corp.

Autor:

Jan GOLDFINGER

Vedoucí práce:

Ing. Adam ČERMÁK

Akademický rok 2014/2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan GOLDFINGER**
Osobní číslo: **S14B0011P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Možnosti zvyšování trvanlivosti stříhacích nožů ve firmě Shape corp.**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu-technologie
3. Návrh technologie
4. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

- Astakhof, Viktor P., Tribology and interface engineering series, Elsevier, 2006 ISBN 0-444-52881-4
- Shaw, Milton Clayton, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3
- Juneja, B.L., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, 2003, ISBN 978-81-224-1467-7

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Adam Čermák**
Katedra technologie obrábění
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. června 2015**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. října 2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle zákona o právu autorském. Č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Adamu Čermákovi za poskytnutí odborných rad, také za jeho čas, ochotu a přístup během zpracování této práce.

Mé poděkování patří též pracovníkům společnosti SHAPE corp., především Ing. Karlu Kepkovi, za ochotné jednání, spolupráci a poskytnutí potřebných informací a materiálů k této práci.

Dále Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za spolupráci a práci konzultanta.

Katedře KTO ZČU v Plzni za přípravu během studia a jejich pomoc při řešení daného problému.

Poděkování patří rovněž mé rodině za podporu během studia, trpělivost a tvorbu potřebného zázemí.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Goldfinger	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák.	Jméno Adam	
PRACOVISTĚ	SHAPE corp. Czech Republic s.r.o.		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti zvyšování trvanlivosti stříhacích nožů ve firmě Shape corp.		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	63	TEXTOVÁ ČÁST	59	GRAFICKÁ ČÁST	4
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi zvýšení trvanlivosti stříhacích nožů využívaných ve firmě SHAPE pro stříhání vyprofilovaných nárazníků ze svitku plechu. Východím materiálem byla rychlořezná ocel ČSN 19 830 s TiAlN povlakem. Teoretická část se zabývá popisem možných technologií pro výrobu těchto nožů. V experimentální části byly vyhotoveny nože pomocí 3 různých technologií. Následně bylo zkoumáno chování daných nožů ve výrobním procesu a vyhodnocení jejich trvanlivosti.
ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	
KLÍČOVÁ SLOVA	Elektrojiskrové obrábění, laserové obrábění, ČSN 19 830, trvanlivost
ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Goldfinger	Name Jan		
FIELD OF STUDY	2301R016 Engineering Technology - Machining Technology			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák.	Name Adam		
INSTITUTION	SHAPE corp. Czech Republic s.r.o.			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Possibilities of increasing the durability of cutter blades in company Shape corp.			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining technology	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	63	TEXT PART	59	GRAPHICAL PART	4
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis deals with the possibilities of increasing the durability of the shearing blades used in the company SHAPE for cutting profiled bumpers from the coil plate. The starting material was a high speed steel CSN 19 830 TiAlN coating. The theoretical part describes the possible technologies for the production of these knives. In the experimental part of my bachelor thesis the knives were drawn up using 3 different technologies. Subsequently, the behaviour of the blades in the manufacturing process and the evaluation of durability was examined.
KEY WORDS	Electric discharge machining , laser machining , ČSN 19830, durability

Obsah

Seznam obrázku	10
Seznam tabulek	12
Seznam zkratek	13
1 Úvod	14
1.1 Cíle bakalářské práce	14
2 Rozbor současného stavu – technologie.....	15
2.1 Úvod	15
2.2 Současné využití NMO a jejich rozdělení	15
2.3 Elektrické metody obrábění	16
2.3.1 Elektroerozivní obrábění	17
2.4 Laserové metody obrábění (LBM – Laser Beam Machining).....	24
2.4.1 Metody laserového řezání	25
2.4.2 Schéma laserového řezání	27
2.4.3 Materiálové vlastnosti pro laserové řezání	28
2.4.4 Vliv laserových parametrů na drsnost řezné plochy	29
2.4.5 Vhodnost použití technologie LBM	31
2.4.6 Dosahované parametry	32
2.4.7 Výhody a nevýhody technologie LBM	33
2.5 Obrábění hydroabrazivním paprskem (AWJ – Abrasive Waterjet Machining)	33
2.5.1 Popis komponent pro řezání AWJ.....	34
2.5.2 Materiály vhodné pro obrábění technologií AWJ	36
2.5.3 Materiály nevhodné pro řezání technologií AWJ.....	37
2.5.4 Abrasiva využívaná v technologii AWJ.....	37
2.5.5 Dosahované parametry	38
2.5.6 Výhody a nevýhody technologie AWJ.....	39
3 Návrh technologie – experimentální část	40
3.1 Popis experimentu	40
3.1.1 Výroba nože pomocí elektrojiskrového obrábění	41
3.1.2 Výroba nože pomocí laserového obrábění	43
3.1.3 Výroba nože pomocí laserového obrábění s dokončením funkčního povrchu frézováním.....	44
3.2 Drsnosti povrchu.....	45

3.3	Trvanlivost stříhacích nožů	46
3.4	Metalografická analýza stříhacích nožů pro určení drsnosti povrchu	48
3.5	Časová náročnost, ekonomická kalkulace a určení nejvýhodnější technologie pro výrobu stříhacích nožů.	51
4	Závěr.....	55
	Seznam použité literatury	57
	Seznam příloh.....	59

Seznam obrázků

Obr. 1 - Rozdělení NMO [1]	15
Obr. 2 - Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [2]	17
Obr. 3 - Závislý generátor [1].....	18
Obr. 4 - Nezávislý rotační generátor [1]	19
Obr. 5 - Nezávislý polovodičový generátor [1].....	20
Obr. 6 - Schéma vnějšího vyplachování [1]	21
Obr. 7 - Schéma tlakového vyplachování [1].....	21
Obr. 8 - Schéma vyplachování odsáváním [1]	21
Obr. 9 - Schéma pulsního vyplachování [1].....	21
Obr. 10 - Princip elektroerozivního řezání drátem [2]	22
Obr. 11 - - Schéma elektroerozivního řezání [2].....	23
Obr. 12 - Stroj pro elektroerozivní řezání drátovou elektrodou [4]	24
Obr. 13 - - Příklad výrobku po řezání drátovou elektrodou [4]	24
Obr. 14 - Princip laserového řezání [10]	25
Obr. 15 – Schéma laserového řezání [29]	27
Obr. 16 - Příklad konstrukce laserové řezací hlavy [29].....	28
Obr. 17 - Graf absorpitivity řezaného materiálu v závislosti na vlnové délce laseru [31]	29
Obr. 18 - Závislost drsnosti Rz na tloušťce materiálu [29]	31
Obr. 19 - Laserové řezání [23]	32
Obr. 20 – Ukázka pálení výpalku laserem [21].....	33
Obr. 21 - Ukázka složitosti výpalku laserem [22].....	33
Obr. 22 - Schéma zařízení pro řezání technologií AWJ [13]	34
Obr. 23 - Vysokotlaké čerpadlo PTV 19/60 [16]	35
Obr. 24 - Akumulátor tlaku [28]	35
Obr. 25 - Řezací hlava s diamantovou tryskou [28].....	36
Obr. 26 - Řezací hlavice pro technologii AWJ [18].....	36
Obr. 27 - Řez duralu tloušťky 160mm	36
Obr. 28 - Abrazivní materiál GMA MESH 80 [28]	38
Obr. 29 - Závislost hloubky řezu na intenzitě toku abraziva [28].....	38
Obr. 30 - Ukázka výroby součásti technologií AWJ [27]	39
Obr. 31 - Ukázka výrobku technologií AWJ [20].....	39
Obr. 32 - Model stříhací hlavy	40

Obr. 33 - Stříhací hlava - fáze 1	41
Obr. 34 - Stříhací hlava - fáze 2	41
Obr. 35 - Stříhací hlava - fáze 3	41
Obr. 36 - Stříhací hlava - fáze 4	41
Obr. 37 - Stříhací hlava - fáze 5	41
Obr. 38 - Stříhací hlava - fáze 6	41
Obr. 39 - Stříhací hlava - fáze 7	41
Obr. 40 - Stříhací hlava - fáze 8	41
Obr. 41 - Stříhací hlava - fáze 9	41
Obr. 42 – Stříhací nůž vyrobený drátovým řezáním – pohled 1	42
Obr. 43 - Stříhací nůž vyrobený drátovým řezáním – pohled 2.....	42
Obr. 44 - Stříhací nůž vyrobený drátovým řezáním – pohled 3.....	42
Obr. 45 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním – pohled 1.....	43
Obr. 46- Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním – pohled 2.....	43
Obr. 47 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním – pohled 3.....	43
Obr. 48 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním a upravený ofrézováním – pohled 1.....	44
Obr. 49 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním a upravený ofrézováním – pohled 2.....	44
Obr. 50 - Funkční plocha, na které byla měřena drsnost Rz	45
Obr. 51 - Místa měření drsnosti povrchu	45
Obr. 52 - Povrchově zakalená oblast.....	46
Obr. 53 - Graf trvanlivosti nožů, vyrobených jednotlivými technologiemi.....	48
Obr. 54 - Nůž po řezání laserem [32].....	49
Obr. 55 - Nůž po elektroerozivním řezání [32].....	49
Obr. 56 - Vzorek A (50x) [32]	49
Obr. 57 - Vzorek B (50x) [32].....	50
Obr. 58 - Vzorek C (50x) [32].....	50
Obr. 59 - Vzorek A (500x) [32]	51
Obr. 60 - Vzorek A (500x) [32]	51
Obr. 61 - Vzorek B (500x) [32].....	51
Obr. 62 - Vzorek C (500x) [32].....	51

Seznam tabulek

Tab. 1 - Porovnání MNO s klasickým třískovým obráběním [1].....	16
Tab. 2 - Parametry laseru při zjišťování experimentálních vzorců pro měření drsností [30] ..	30
Tab. 3 - Dosahované parametry laserem [5]	32
Tab. 4 - Výhody a nevýhody laseru [12].....	33
Tab. 5 - Chemické složení abrazivního materiálu australský granát - GMA MESH 80 [19] ..	37
Tab. 6 - Dosahované parametry technologií AWJ [5]	38
Tab. 7 - Výhody a nevýhody technologie AWJ [5]	39
Tab. 8 - Tabulka měření drsností	45
Tab. 9 - Výsledky nožů vyrobených laserovým řezáním s následným frézováním.....	46
Tab. 10 – Výsledky nožů vyrobených laserovým řezáním povrchově zakaleno s následným frézováním.....	47
Tab. 11 - Výsledky nožů vyrobených pomocí elektrojiskrového obrábění	47
Tab. 12 - Náklady výroby nožů pomocí daných technologií	52
Tab. 13 - Určení vah pro jednotlivá kritéria párového srovnání	52
Tab. 14 - Párová srovnání technologií výroby nože.....	53
Tab. 15 - Vyhodnocení párového srovnání technologií výroby nožů	54

Seznam zkratk

NMO	Nekonvenční metody obrábění
EMO	Elektrické metody obrábění.
EDM	(Elektro – discharge machining) – mezinárodní zkratka pro elektroerozivní obrábění.
LBM	(Laser Beam Machining) – mezinárodní zkratka pro obrábění laserem.
AWJ	(Abrasive Waterjet Machining) – mezinárodní zkratka pro obrábění hydroabrazivním paprskem.
KNB	Kubický nitrid bóru
SK	Slinutý karbid
Ra	Střední aritmetická hodnota profilové drsnosti [μm].
Mo	Molybden.
C	Uhlík.
Al	Hliník.
Cu	Měď.
He	Helium
Ne	Neon
O₂	Kyslík
Mg	Hořčík
Fe	Železo
Si	Křemík
Au	Zlato
Ag	Stříbro
Ti	Titan
N	Dusík
Ma	Machovo číslo – podobnostní číslo, které udává poměr rychlosti tělesa pohybujícího se v daném prostředí a rychlosti zvuku v témže prostředí

1 Úvod

Tématem této bakalářské práce jsou možnosti zvyšování trvanlivosti stříhacích nožů ve firmě SHAPE corp. Czech Republic s.r.o. Společnost SHAPE se specializuje na výrobu nárazníků pro automobilový průmysl. Nárazníky se nejprve válcují ze svitku plechu na profilovací trati do požadovaného průřezu, poté se profil bodově svaří a ohne na požadovaný rádius a nakonec se pomocí stříhacího nože v určité délce ustříhne. Polotovarem stříhacích nožů je deska z vysokouhlíkové nástrojové oceli ČSN 19 830 s TiAlN povlakem.

Následující práce se skládá z teoretické rešerše použitelných technologií pro znovunaoštění (opětovný ořez) tupých nožů a jejich následné použití.

První část práce se zabývá popisem možných technologií výroby, které připadají pro daný nástroj v úvahu. Těmito technologiemi jsou elektroerozivní obrábění – řezání, laserové řezání a řezání pomocí vodního paprsku. U těchto technologií se práce bude zabývat jejich vývojem, principem, výhodami a nevýhodami.

Druhá část se zaměří na technologie výroby nožů, podložené vzorky, jejich ozkoušení ve výrobě a vyhodnocení vzniklých výsledků.

1.1 Cíle bakalářské práce

Výsledek této bakalářské práce by měl pomoci ke zrychlení, zkvalitnění a hlavně ke zlevnění výroby stříhacích nožů oproti elektroerozivnímu obrábění. Zároveň by tak měl upřesnit parametry výroby nože při vypalování pomocí laseru.

2 Rozbor současného stavu – technologie

2.1 Úvod

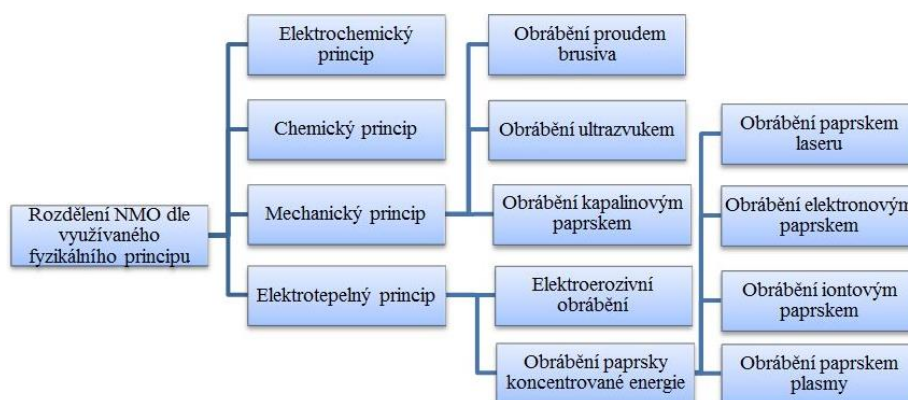
V současné době je poměrně mnoho nekonvenčních technologií pro obrábění vysokouhlikové rychlořezné oceli. Vše je ovšem otázkou hlavně ceny, která je v současném průmyslu bezesporu jedním z nejdůležitějších požadavků. Pod souhrnný název NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ (NMO) zahrnujeme způsoby obrábění, které na rozdíl od klasického třískového obrábění v převážné míře nepoužívají mechanické práce pro úběr materiálu. K úběru materiálu využívají tepelných, elektrických, chemických, ultrazvukových, abrazivních a jiných fyzikálních jevů nebo jejich vzájemných kombinací převážně při bezsilovém působení na obráběný materiál a bez vzniku třísky. [1]

U většiny NMO není obrobiteľnosť materiálu limitovaná mechanickými vlastnosťmi (tvrdosť a pevnosť), ale je viazaná predovšetkým na fyzikálne vlastnosti, ako je tepelná vodivosť, teplota tavenia, elektrická vodivosť, elektroerozivní odolnosť, chemické zloženie apod. [1]

K rozvoji nekonvenčních metod přispěly zejména požadavky zbrojního a kosmického průmyslu na obrábění obtížně obrobiteľných materiálů nebo složitých tvarů. V těchto oblastech průmyslu byly soustředěny potřebné finanční prostředky a vědeckovýzkumné kapacity pro úspěšné dokončení vývoje a zavedení nových zařízení do výrobní praxe. Jednotlivé NMO se pak rychle rozšířily do všech odvětví strojírenské výroby a jejich další vývoj neustále pokračuje. [1]

2.2 Současné využití NMO a jejich rozdělení

V celosvětovém průměru se udává, že asi 30% technologických operací při výrobě nástrojů se uskutečňuje pomocí NMO, přičemž dominantní postavení zaujímá elektroerozivní metoda využívaná jak pro hloubení tvarových dutin nebo profilových otvorů a součástí, tak i pro drátové řezání plochých tvarově složitých střížníků a střížnic, přesné stříhání, při výrobě hlubokých děr o průměru od 0,1 do 3 mm, při výrobě součástí s tepelně neovlivněnou oblastí v místě řezu apod. Nekonvenční metody se rozdělují do mnoha technologií (Obr. 1) a v porovnání s ostatními technologiemi obrábění mají své přednosti (Tab. 1). [1, 6]



Obr. 1 - Rozdělení NMO [1]

Tab. 1 - Porovnání MNO s klasickým třískovým obráběním [1]

Způsob obrábění	Úběr ($\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Měrná práce ($\text{J} \cdot \text{mm}^3$)	Příkon stroje (kWh)
Soustružení, frézování	Až 15000	1 - 10	5 - 50
Broušení	80 - 1500	5 - 200	5 - 150
Elektroerozivní obrábění	5 - 120	100 - 1000	10 - 15
Elektrochemické obrábění	30 - 1000	1000 - 2000	80 - 2000
Ultrazvukové obrábění	3 - 30	150 - 300	1 - 5
Plasmové obrábění	1500	500 - 1000	50 - 150
Obrábění laserem	30 - 500	80 - 150	5 - 40
Obrábění vodním paprskem	80 - 600	15 - 100	5 - 20
Obrábění elektronovým paprskem	3	1500	5

Následující podkapitoly se budou zabývat technologiemi, které se využívají ve firmě SHAPE v současné době a jejich eventuální alternativě.

2.3 Elektrické metody obrábění

Elektrické metody obrábění (EMO) využívají k úběru materiálu přímého působení elektrického proudu bez přeměny na energii mechanickou. Další charakteristické znaky EMO [1, 4]:

- Možnost obrábět všechny elektricky vodivé materiály.
- Velikost úběru prakticky nezávisí na mechanických vlastnostech materiálu.
- Při odebrání materiálu nepůsobí na obrobek žádné mechanické síly kromě tlaku elektrolytu nebo dielektrika.

Dle principu působení elektrické energie se EMO rozdělují [1, 6]:

- Elektroerozivní obrábění
- Elektrochemické (elektrolytické) obrábění

2.3.1 Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění patří rovněž mezi NMO využívající elektro – tepelných principů úběru materiálu a je nejrozšířenější nekonvenční metodou obrábění. Pro jeho označení se používá v mezinárodní literatuře zkratka EDM (Elektro – Discharge Machining). [1, 4]

2.3.1.1 Princip elektrické eroze

Úběr materiálu elektrickým výbojem je velmi složitý fyzikální jev. Elektroeroze probíhá mezi dvěma elektrodami ponořenými do kapalného media. Tímto mediem je kapalina s vysokým elektrickým odporem – dielektrikum (Obr. 2). Elektrický výboj mezi elektrodami (nástrojem a obrobkem) je podmíněn napětím, jehož výše závisí na [1]:

- Vzdálenosti mezi elektrodami.
- Vodivosti dielektrické kapaliny.
- Znečištění dielektrika.

Vlivem působení elektrického napětíového pole mezi elektrodami se uvádějí do pohybu volné záporné a kladné ionty, zrychlují se, nabývají vysoké rychlosti a tím se vytvoří ionizovaný (vodivý) kanál. V tomto stavu začíná mezi elektrodami protékat elektrický proud a vzniká výboj, který vyvolá řadu dalších srážek částic. Vzniklé plasmové pásmo s teplotami 3000 – 12000°C způsobuje tavení a odpařování materiálu na elektrodách. Pracovní vzdálenost elektrod je v rozmezí 0,005 – 0,5 mm. Odpařováním dielektrika vzniká plynová bublina s vysokým tlakem. V okamžiku přerušení proudu vyvolá pokles teploty implozi bubliny, do uzavřeného prostoru proniká dielektrikum a velké dynamické síly vymrštují roztavený materiál z kráteru. Chladícím účinkem dielektrika materiál tuhne a je jím odváděn ve formě spalin a mikročástic. Na povrchu elektrod vznikají drobné krátery. Objem erodovaného kovu závisí na časové a energetické charakteristice výboje a na termofyzikálních vlastnostech kovu (tavící teplotě, tepelné vodivosti a specifickém teple). [1, 6]



Obr. 2 - Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [2]

Vyjádření principu elektroeroze:

Za vhodných podmínek při opakovaných výbojích mezi dvěma elektrodami ponořenými v kapalném dielektriku je eroze (odebírání materiálu) na jedné z elektrod mnohonásobně větší než na druhé. Elektrické výboje vznikají jen v těch místech, kde jsou elektrody vzdálené méně, než je průtažná vzdálenost dielektrika, a tím dochází postupně k vytváření negativního tvaru nástrojové elektrody do protilehlé elektrody (obráběného materiálu) při malé erozi materiálu nástrojové elektrody. Vhodný mechanismus (zpětná vazba) udržuje elektrody v optimální vzdálenosti. [6]

Rozhodující podmínkou úspěšnosti elektroerozivního obrábění je dosažení maximálního úbytku materiálu obrobku při minimálním úbytku nástrojové elektrody. Poměr úbytku materiálu nástroje a obrobku vyjadřuje tzv. relativní objemový úbytek δ v procentech. [1]

Úbytek nástrojové elektrody je možno ovlivnit volbou následujících podmínek[1]:

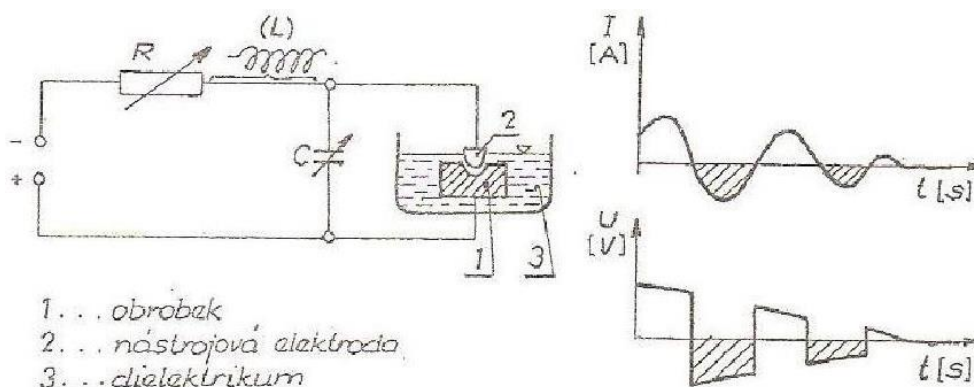
- Konstrukcí generátoru, tj. jeho elektrickými parametry charakterizujícími výboje a jejich četnost, polaritou zapojení obou elektrod apod.
- Volbou materiálu nástroje v závislosti na materiálu obrobku.
- Pracovním prostředím – dielektrikem.

Při výboji mezi elektrodami na počátku převládá elektronová vodivost a později vzrůstá vodivost iontová. Nejprve se uvolňuje větší část energie v oblasti anody (+) a později v oblasti katody (-) při úměrném zmenšení uvolněné energie v oblasti anody. Proto je vhodné při kratších výbojových impulsích zapojit obrobek jako anodu (+) a při dlouhých výbojových impulsích jako katodu (-).[1, 6]

2.3.1.2 Zdroje elektrické energie (generátory)

Závislé generátory (RC a RLC)

Tyto tzv. elektrojiskrové (relaxační) generátory patří k nejstarším zdrojům výboje. Činnost generátoru spočívá v opakujícím se nabíjení kondenzátoru přes odpor ze zdroje stejnosměrného proudu a jeho vybíjení v pracovní mezeře, když velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Velikost průrazného napětí je závislá i na znečištění dielektrika a mezielektrodové vzdálenosti. Frekvence a energie jednotlivých výbojů je závislá na změně poměrů v jiskřivosti, a proto tyto generátory nazýváme závislé. [1, 7]



Obr. 3 - Závislý generátor [1]

Závislé generátory dávají velmi krátké výboje, ve kterých převládá elektronová vodivost. Je proto vhodné zapojovat obrobek jako anodu a nástroj jako katodu (menší úbytek). Generátory jsou jednoduché a spolehlivé. K nevýhodám patří vysoký relativní objemový úbytek nástroje (30% a více) způsobený vznikem střídavého proudu se zápornou půlvlnou (Obr. 3), omezená možnost regulace tvaru, frekvence výbojů a nízká produktivita obrábění. Úběrovost nepřesahuje $500 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ pro obrábění ocelí a $100 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ při obrábění slinutých křemíků (SK). [1, 7]

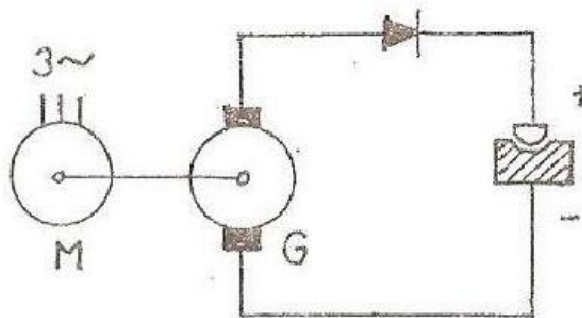
Při zapojení indukčnosti (L) do nabíjecího obvodu (zapojení RLC – na obr. 3) se prodlužuje délka trvání výboje a omezuje se intenzita vybíjecího proudu. Úběrovost při obrábění oceli dosahuje až $2000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. [1, 7]

Nezávislé (pulsní) generátory

Nezávislé generátory umožňují nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na poměry v pracovní mezeře. V podstatě existují dva typy nezávislých generátorů [1, 7]:

a) Rotační

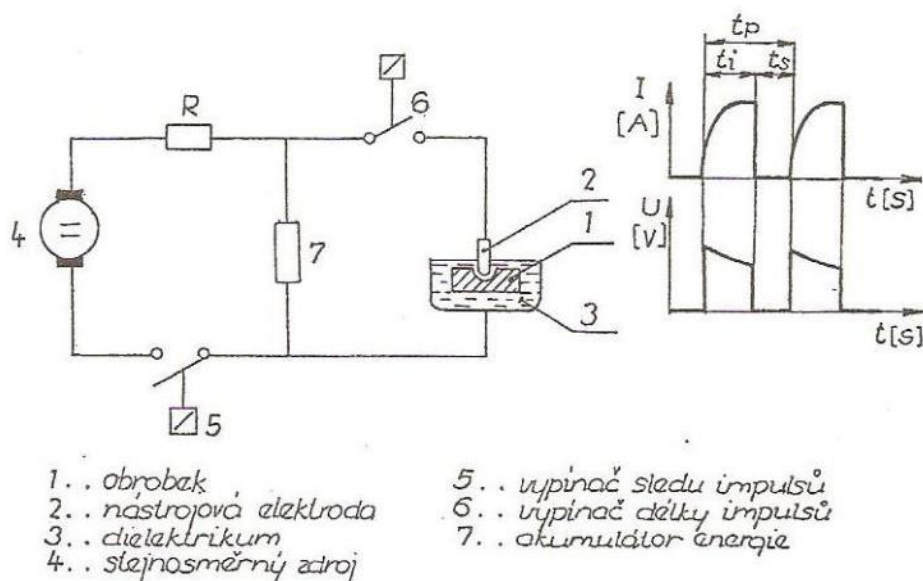
Impulsy vznikají roztáčením dynama asynchronním motorem (Obr. 4). Mají stálou frekvenci, např. 400Hz a umožňují úběrovost až $5000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. K nevýhodám patří vysoká hluchost a obtížná regulace frekvence pulsů. [1, 7]



Obr. 4 - Nezávislý rotační generátor [1]

b) Polovodičové

Polovodičové nezávislé generátory umožňují širokou nastavitelnost elektrických parametrů. Frekvenci je možno měnit např. v rozsahu 0,5 – 50 kHz. Běžně je dosahován úběr $7000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, u velkých zařízení až $25000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Při výbojích nevzniká negativní půlvlna a je dosahován malý relativní úbytek nástroje cca. 1%. Charakteristická je delší doba trvání impulsů (Obr. 5) s převahou iontové vodivosti, a proto se obrobek zapojuje většinou jako katoda. [1, 7]



Obr. 5 - Nezávislý polovodičový generátor [1]

2.3.1.3 Nástrojové elektrody

Relativní objemový úbytek závisí především na volbě materiálu nástroje ve vztahu k materiálu obrobku, na polaritě, na velikosti proudu a době trvání impulsu. Velikost opotřebení elektrod dosahuje hodnot od desetin procenta až do desítek procent. Při dokončovacím obrábění bývá opotřebení zpravidla vyšší. [1, 2]

Pro výrobu elektrod se jako materiál používá elektrolytická měď, grafit, wolframová měď (slitina 50 – 80% Cu), mosaz, slitiny Al, wolfram a ocel. Grafit je oblíbený především kvůli své dobré obrobitelnosti. [1, 2, 4]

2.3.1.4 Kapalně pracovní prostředí (dielektrikum)

Dielektrikum plní řadu funkcí nutných pro stabilní průběh elektroerozivního procesu. Působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo z pracovní mezery, ohraničuje výbojový kanál, odvádí drobné produkty eroze z míst výbojů a zabraňuje vylučování uhlíku (C) a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody a tím zamezuje vzniku zkratů. [1]

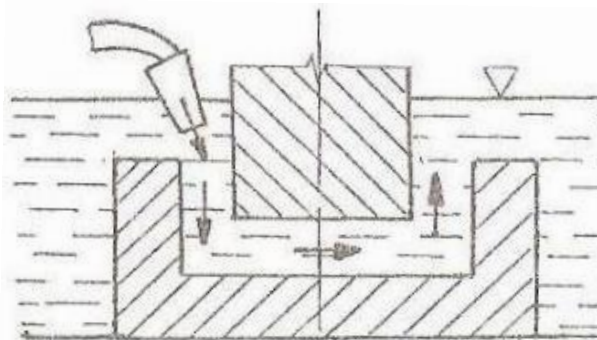
Požadavky na dielektrické kapaliny[1, 3, 4]:

- Dielektrické vlastnosti (odporové) umožňují vznik výboje průrazem dielektrika.
- Bod vzplanutí dielektrika musí být vyšší než 60°C, protože při výbojích vznikají vysoké teploty, které způsobují oteplení elektrod a dielektrika.
- Hygienická a ekologická nezávadnost (nesmí docházet k rozpadu a vzniku zdraví nebezpečných plynů).
- Nízká pořizovací cena.

Jako dielektrikum se používají kapaliny na bázi petroleje, petrolej, voda a pro EDM drátové řezání deionizovaná voda. Elektroerozivní stroje jsou vybaveny zařízením pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. EDM drátové řezací stroje jsou vybaveny deionizačními kolonami pro zlepšení dielektrických vlastností vody a pro EDM drátové řezání deionizovaná voda. Elektroerozivní stroje jsou vybaveny zařízením pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. EDM drátové řezací stroje jsou vybaveny deionizačními kolonami pro zlepšení dielektrických vlastností vody. [1, 4]

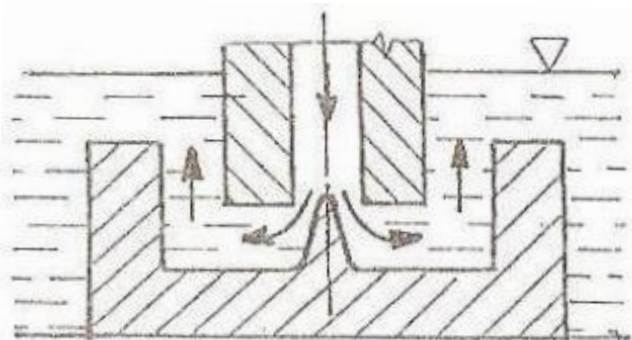
Pro vyplachování mezielektrodového prostoru je používáno několik způsobů [1]:

Vnější vyplachování



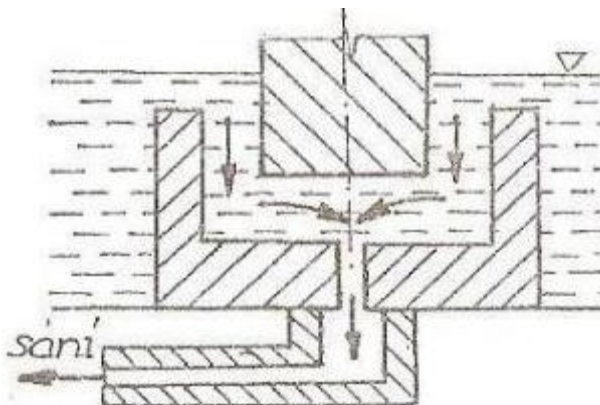
Obr. 6 - Schéma vnějšího vyplachování [1]

Tlakové vyplachování (vnitřní)



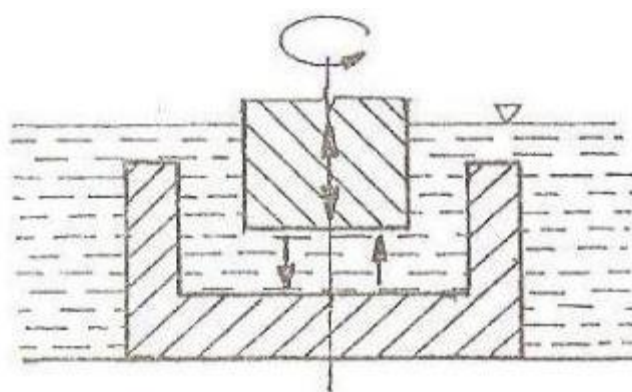
Obr. 7 - Schéma tlakového vyplachování [1]

Vyplachování odsáváním



Obr. 8 - Schéma vyplachování odsáváním [1]

Pulsní vyplachování



Obr. 9 - Schéma pulsního vyplachování [1]

Poznámka: pulsní vyplachování

Nástrojová elektroda se v nastavitelných časových intervalech oddaluje od materiálu, případně ještě může i elektroda rotovat. Zvedání elektrody bývá kombinováno s přívodem dielektrika a odpojením pracovního proudu. K vyplachování mezielektrodového prostoru a k plynulosti procesu elektroeroze výrazně napomáhá vibrace nástrojové elektrody, která se vytváří speciálním regulovatelným elektromagnetickým zařízením instalovaným na stroji. [1]

2.3.1.5 Technologické využití elektroeroze

V průmyslu existuje řada variant využití principu elektroeroze. K nejvíce používaným způsobům patří [1, 4]:

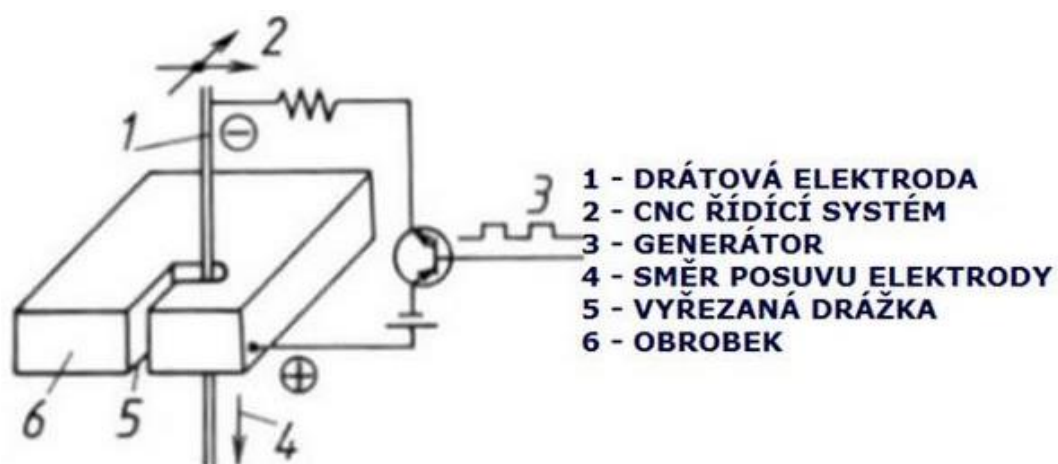
- Hloubení dutin a vyjiskřování ulomených nástrojů.
- Elektroerozivní drátové řezání.
- Mikroděrování.
- Elektrokontaktní obrábění.
- Nanášení povlaků.
- Anodomechanické řezání.

Stříhací nástroje pro firmu SHAPE se vyrábí pomocí elektroerozivního drátového řezání na stroji Fancu Robocut, pod deionizovanou vodou (dielektrikum).

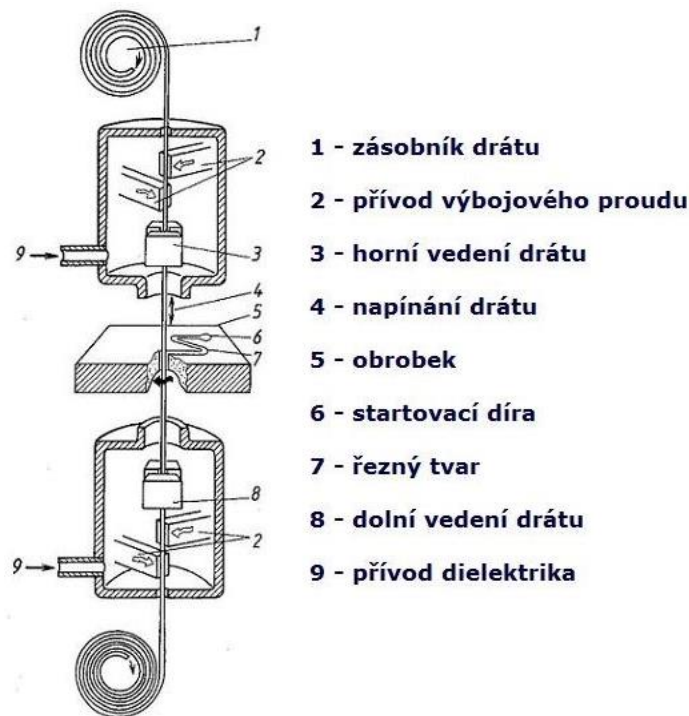
2.3.1.6 Elektroerozivní drátové řezání

Elektroerozivní řezání drátovou elektrodou se používá zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů, šablon a řady dalších plochých součástí z kovových materiálů. [1]

Elektroeroze probíhá mezi nástrojovou elektrodou, kterou vytváří tenký drát převíjený pomocí speciálního zařízení a obráběnou součástí, připojenou ke generátoru jako elektroda opačné polarity. Elektrickými výboji mezi drátovou elektrodou a obrobkem se vytváří při posuvu obrobku v osách X – Y pracovní mezera a řez programovatelného tvaru. [1, 4]



Obr. 10 - Princip elektroerozivního řezání drátem [2]



Obr. 11 - - Schéma elektroerozivního řezání [2]

Na drátovou elektrodu jsou kladeny následující technické parametry [1, 6]:

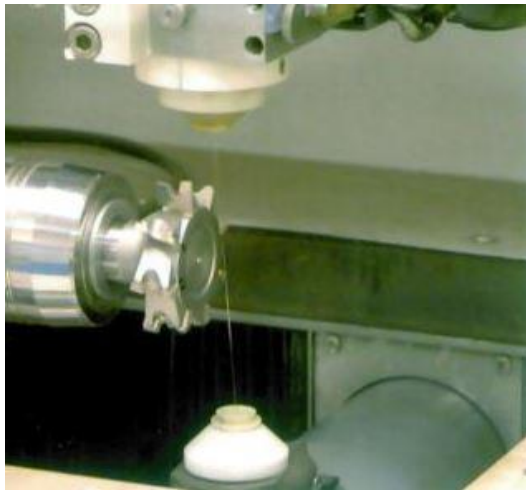
- Vysoká elektrická vodivost, protože malým průřezem drátu se přivádí do pracovní mezery elektrická energie.
- Úzké tolerance průměru a kruhovitosti, na kterých závisí přesnost řezání. Dráty se kalibrují průvlastky z polykrystalického diamantu, žíhají a pokovují.
- Velká mechanická pevnost a odolnost proti přetržení. Přesnost řezání, kvalita řezu a stabilita procesu jsou závislé i na řádně napnutém řezacím drátu. Jako materiál se používá měď, pro větší průřezy mosaz, pro jemné řezy (průměr drátu 0,03 – 0,07 mm) se používá molybden (Mo).

Základní technické parametry procesu řezání [1, 6]:

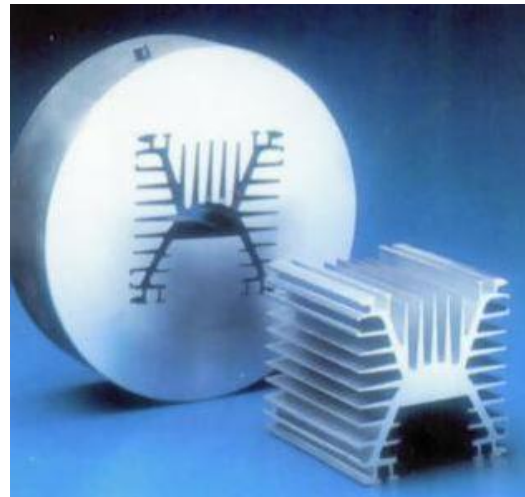
- Průměr drátové elektrody.....0,03 – 0,35 mm
- Dielektrikum.....deionizovaná voda
- Obrobky.....kovové materiály o $t = 0,02 - 400$ mm
- Přesnost řezání.....0,001 μm
- Minimální drsnost obrobeného povrchu..... $R_a = 2 \mu\text{m}$, (po 2. řezu 0,08 – 0,5 μm)
- Plynule nastavitelný sklon drátu až..... $\pm 30^\circ$
- Rychlost řezání..... $8 - 300 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$

Rychlost řezání je závislá na řezaném materiálu, technické úrovni zařízení a typu drátu. [1]

U EDM drátového řezání se používá řada přídatných zařízení pro upínání obrobků, měření a kontrolu obrobků, úpravu dielektrika apod. Součástí bývá také automatické vyjiskřování technologických otvorů, které jsou nutné, nezačíná-li řez na okraji materiálu. Bývá umístěno samostatně na výklopném rameni, které nese vyjiskřovací hlavu s možností regulovatelného posuvu elektrody v ose, umožňuje její rotaci a s tlakovým výplachem dielektrika. [1, 4]



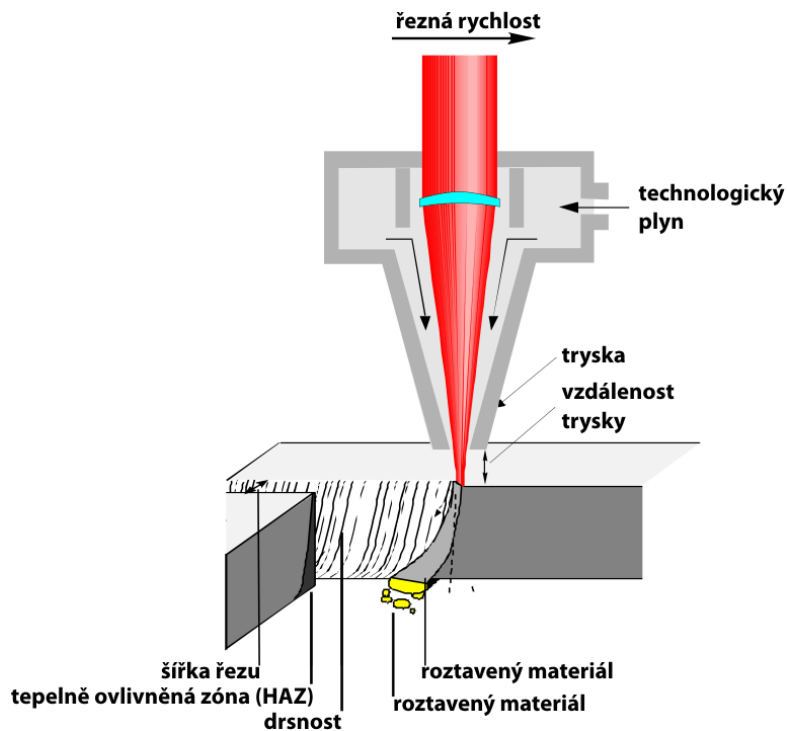
Obr. 12 - Stroj pro elektroerozivní řezání drátovou elektrodou [4]



Obr. 13 - - Příklad výrobku po řezání drátovou elektrodou [4]

2.4 Laserové metody obrábění (LBM – Laser Beam Machining)

Princip technologie LBM je světelné záření, které lze definovat jako vlnění, které se šíří v homogenním prostředí všemi směry stejnou rychlostí a intenzitou. Laserový paprsek vzniká na principu vynucené emise záření. Ta je vyvolána působením elektromagnetického záření na atom prvku. V tu chvíli elektron obíhající kolem jádra přeskóčí do vyšší oběžné dráhy (excituje). Nerovnovážený stav v atomu má v tu chvíli za následek zpětné přeskóčení elektronu z vyšší valenční vrstvy do nižší, přičemž je vyzářena světelná energie rovnající se jednomu fotonu. Zesílením je utvořen úzký svazek fotonů. Vzniklé záření má jednu vlnovou délku – tzn. je monochromatické a koherentní, což znamená, že se fotony ve svazku pohybují jedním směrem a v celém jeho průřezu mají vysokou míru statické uspořádanosti. Dle energetické hladiny pak vznikají světelná záření dělicí se na infračervené, ultrafialové a viditelné. Vzniklý koherentní paprsek světla je nasměrován na obráběný materiál, kde dochází na velmi malé plošce k přeměně světelné energie na energii tepelnou a následek toho je roztavení materiálu při teplotách až 10 000°C. Vzniklá tavenina je vlivem vysoké teploty ze vzniklého kráteru odpařena nebo vyfouknuta. Takto paprsek proniká materiálem až do chvíle, kdy dojde k plnému prořezu celé tloušťky materiálu. Vysoký výkon laseru může být použit pro provádění vrtání, řezání, čištění, značení, nebo orýsování tvaru do určité hloubky. [8, 9, 25]



Obr. 14 - Princip laserového řezání [10]

V průmyslových aplikacích se pro účely laserového řezání používají nejčastěji laserové zdroje na plyné bázi (CO₂ lasery) a na tzv. pevnolátkové bázi (Nd: YAG), které jsou buzeny buď výbojkami, nebo laserovými diodami. [11]

2.4.1 Metody laserového řezání

- Odpařovací řezání

U odpařovacího řezání dochází k zaostření paprsku, tím se zvyšuje povrchová teplota až nad bod varu a generuje se klíčový otvor, který způsobí náhlé zvýšení nasákavosti v důsledku vícenásobných odrazů paprsku, které vedou k rychlejšímu rozšíření otvoru. Vzhledem k tomu, jak se spára prohlubuje, paprsek laseru prochází hlouběji a postupně stabilizuje stěny řezné spáry. Tato metoda je nejužitečnější pro řezání materiálů, jako jsou dřevo, karbon a plasty. Parametry určující toto laserové řezání jsou průměr paprsku, výkon laseru, rychlost pohybu řezné hlavičky, složení ochranného plynu, síla páleného materiálu, odrazivost a vlastnosti obrobku. [25]

- Řezání fúzí (tavení a vyfoukávání)

Řezání fúzí je proces, při kterém dochází k roztavení materiálu laserovým paprskem a vyfouknutí roztaveného materiálu dostatečně silným proudem plynu. K dosažení tohoto řezání

je zapotřebí minimálně $\frac{1}{10}$ energie, která je potřebná pro odpařovací řezání. Jestliže plyn (O_2) reaguje exotermicky se základním materiálem, vzniká další energie, která zvyšuje účinnost procesu. Hlavním problémem této metody je tvorba rýh na příčném povrchu průřezu a okují na spodních hranách řezné linie. Naopak výhodou fúzního řezání je vyšší účinnost, tedy menší spotřeba energie na měrný objem odebraného materiálu v porovnání s dalšími metodami. [25,26]

- Řízené křehnutí

Tento přístup je vhodný pro řezání křehkých materiálů. Metoda spočívá v tom, že se paprsek soustředí na malý objem povrchu a způsobí v páleném materiálu tahové napětí v okolí řezu. Proces vyžaduje malou energetickou náročnost. Teplo na povrchu součásti se šíří podél celé dráhy paprsku. Vzhledem k tomu, že lámací hranice je větší než pohyb laserové skvrny, skutečná dráha se odchyľuje od požadované dráhy a tvoří tak řezání křivku nebo asymetrickou přímku. Pokud se musí odstranit tato odchylka, použije se metoda iteračního řízení, které slouží pro optimalizaci dráhy laserového paprsku. [25]

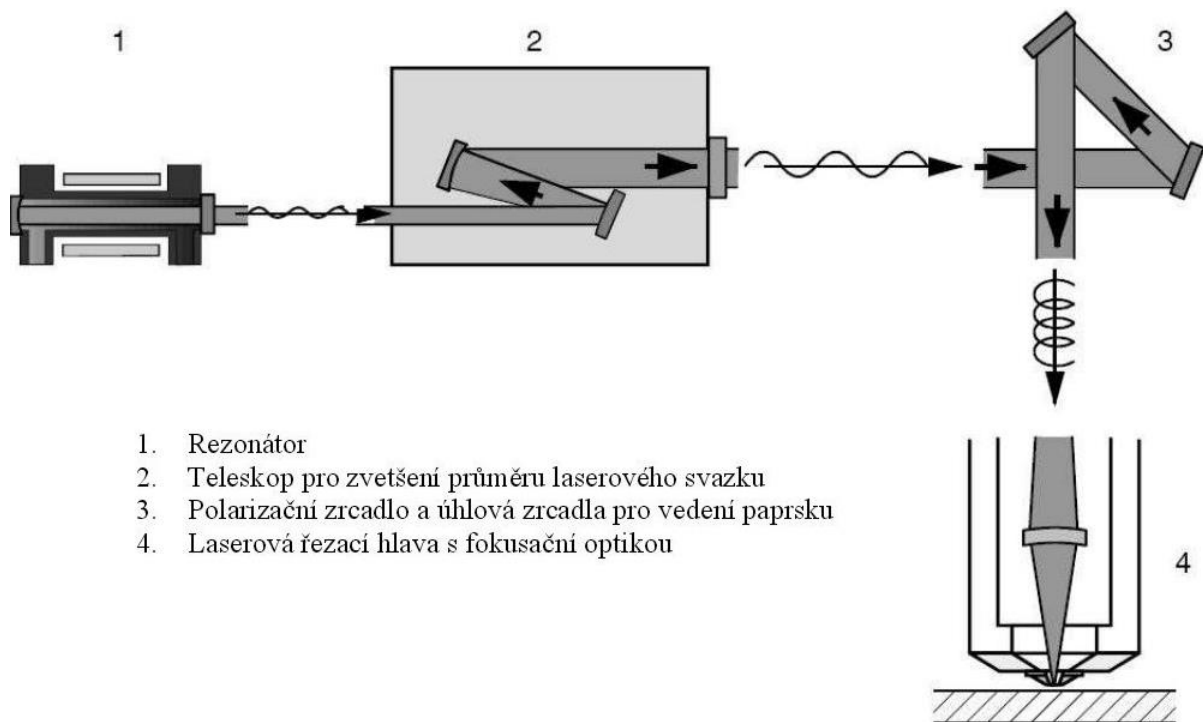
- Orýsování

Během procesu používá laserový paprsek k oslabení struktury materiálu drážky nebo řady otvorů, které následně propojuje. Výhoda této technologie je absence tvorby úlomků a nízké tepelně ovlivněné zóny. [25]

- Studené řezání

To je proces řezání organických materiálů ozářeními pomocí excimetrického laseru pracující v ultrafialové oblasti. Tento proces je užitečný při řezání plastů, micro-operací v inženýrství, nádorové chirurgie, atd. Korelace řezných vlastností laserových parametrů a analýzy procesu pro řezání laserem je nezbytná pro dosažení bezdefektové řezací operace. [25]

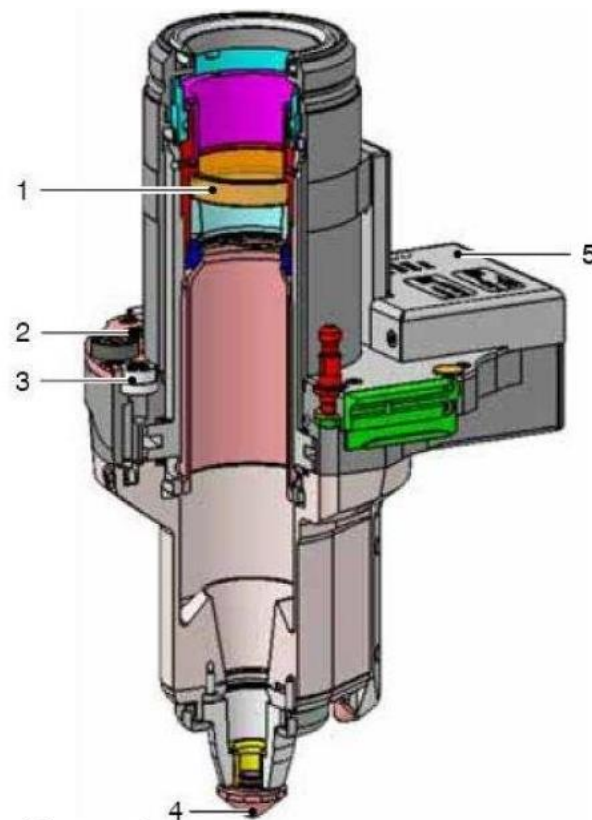
2.4.2 Schéma laserového řezání



Obr. 15 – Schéma laserového řezání [29]

- Laserová řezací hlava

Laserová hlavice obsahuje čočky, které musí být transparentní pro danou vlnovou délku příslušného laserového paprsku. V případě nesplnění této podmínky dojde k absorpci laserového paprsku a zahřívání čočky, v nejhorším případě může dojít ke zničení čočky následkem překročení určité energie laserového paprsku. Při spálení čočky se uvolní látky, které jsou velice toxické vůči lidskému organismu. Nezbytné chlazení řezací hlavy se provádí buď přímo pomocí asistenčního řezného plynu, nebo pomocí vodního okruhu.



1. Zinek-selenidová čočka
2. Přívod vzduchu pro chlazení
3. Přívod asistenčního řezacího plynu (kyslík, dusík, vzduch)
4. Řezací tryska
5. Elektronika laserové řezací hlavy

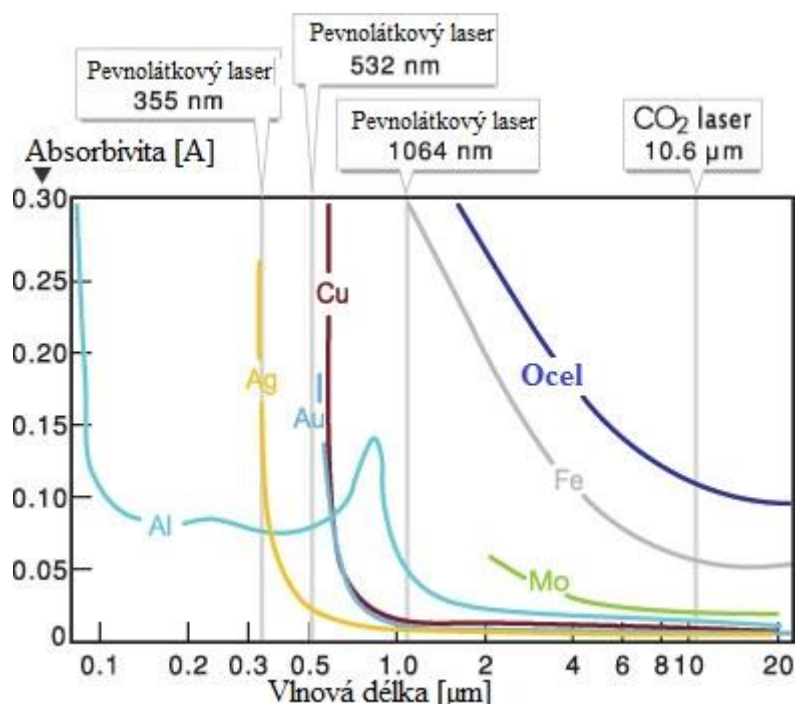
Obr. 16 - Příklad konstrukce laserové řezací hlavy [29]

2.4.3 Materiálové vlastnosti pro laserové řezání

Paprsek proniká velmi dobře jak měkkými materiály jako jsou papír, překližky, plasty apod., tak také materiály velmi těžko obrobitelnými, mezi které řadíme např. titanové slitiny, superslitiny, SK, monokrystaly, keramické materiály, atd. Proto se zde místo obrobitelnosti stanovují jiná kritéria, na základě kterých lze určit vhodnost materiálu pro opracování metodou LBM. [5]

Kritéria laserového řezání [5]:

- Absorbivita – schopnost pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky, tzn. na tepelnou energii.



Obr. 17 - Graf absorpitivity řezaného materiálu v závislosti na vlnové délce laseru [31]

- Tepelná vodivost – jedná se o fyzikální veličinu, která určuje schopnost látek vést teplo. Tato veličina ukazuje rychlost, jakou se teplo šíří a přenáší z jedné zahřáté části materiálu do jiné části materiálu.
- Odrazivost – poměr množství odražené energie k energii dopadající. Problém nastává při obrábění hliníku, který je více reflexivní než C - Mn oceli a nerezové oceli a má potenciál poškodit laser sám. To znamená, že by se mohl laserový paprsek odrazit od rovného plechu (od tavné lázně) zpět do optiky, což by mohlo způsobit značné škody. Tento problém se řeší přidáním legujících prvků do hliníku, což snižuje odrazivost.

Obrobitelnost materiálu pomocí laseru je tím lepší, čím větší je pohltivost a menší jeho tepelná vodivost a odrazivost. [5]

2.4.4 Vliv laserových parametrů na drsnost řezné plochy

Povrch po řezání laserem vykazuje specifickou formu nerovnosti (půlkruhové drážky nebo souvislé rýhování), která je důsledkem rychlosti řezání, zaostřování paprsku do požadovaného místa. Řez laserem vykazuje dvě ovlivněné zóny: první se nachází na vstupní hraně paprsku do řezaného materiálu a druhá na výstupní hraně z řezaného materiálu. První zóna se vyznačuje jemnými drážkami, jejichž vzdálenost je cca 0,1 – 0,2 mm, zatímco druhá zóna má hrubší povrch, který se vyznačuje kapičkami odtékajícího materiálu. To je důvod, proč se měří drsnost povrchu řezu ve vzdálenosti $\frac{1}{3}$ tloušťky řezaného materiálu měřené od horní hrany. Parametr, který se nejvíce využívá pro měření drsnosti povrchu řezu je drsnost R_z . Stan-

dartní drsnost R_z se měří např. kontaktními metodami a měření je prováděno kolmo na strukturu periodicky se opakujícího povrchu v souladu s ISO 4288. [30]

Standartní drsnost a střední aritmetická drsnost řezu se může zjišťovat na základě experimentálních vzorců dle výzkumu drsnosti uvedeného v literatuře [30].

$$R_z = 12,528 \cdot \frac{s^{0,542}}{P_L^{0,528} \cdot v^{0,322}} \quad (1)$$

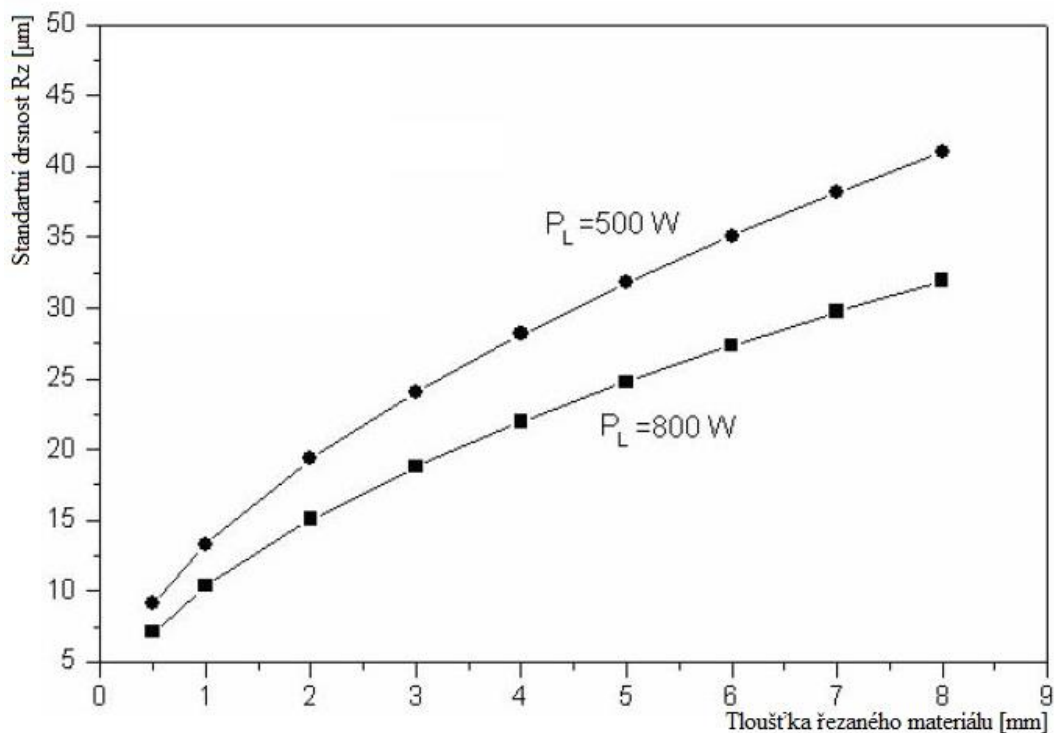
$$R_a = 2,018 \cdot \frac{s^{0,670}}{P_L^{0,451} \cdot v^{0,330}} \quad (2)$$

- P_L je výkon laseru [kW]
- s je tloušťka řezaného materiálu [mm]
- v je řezná rychlost laseru [m/min]. [30]

Experimentální vzorce byly zavedeny na základě experimentu, který byl proveden na materiálu 1.0333.5 (DIN), CO₂ laseru s CNC řízením. Vlastnosti tohoto laseru:

Tab. 2 - Parametry laseru při zjišťování experimentálních vzorců pro měření drsností [30]

Vlnová délka	10,6 μm
Rozsah výkonu	0,2 – 1,3 kW (optimální výkon 800 W)
Zaostřovací čočka	Ø28 mm
Ohnisková vzdálenost	125 mm
Otvor trysky	1,6 mm
Pracovní plyn	O ₂ o tlaku 80 kPa a čistotě 98%



Obr. 18 - Závislost drsnosti Rz na tloušťce materiálu [29]

Z grafu je vidět závislost drsnosti a tloušťky řezaného materiálu na základě použitého výkonu laseru (viz. Obr. 18). Standardní R_z se zvyšuje s tloušťkou plechu a klesá s nárůstem výkonu laseru.

2.4.5 Vhodnost použití technologie LBM

Laserová technologie je nyní používána pro řezání materiálů od kovů, plastů, keramiky, až po kompozity. Vzhledem k vysoké přesnosti obrábění a rychlosti zpracování je řezání laserem velmi ekonomické. Je také vhodné pro obtížně obrobitelné materiály, kde jsou konvenční metody obrábění buď neúčinné, nebo neekonomické. Lasery jsou také flexibilní, protože stejný laser může být použit pro různé aplikace, jako je např. svařování. Nejběžnější lasery pracují v aktivním prostředí CO_2 , které jsou schopny řezat konstrukční oceli do tloušťky 25mm, korozivzdorné oceli do tlouštěk 15mm a plechy Al – slitin pouze do tlouštěk 10mm. Tento limit je dán fyzikálními vlastnostmi Al – slitin. [5, 24]



Obr. 19 - Laserové řezání [23]

2.4.6 Dosahované parametry

Tab. 3 - Dosahované parametry laserem [5]

Dosahovaná rozměrová přesnost	$\pm 0,01$ mm od jmenovitého rozměru
Polohovací přesnost stroje	Závislá na použitém zařízení, běžně 0,01 mm
Dosahovaná drsnost nové hrany	$R_a = 1,6 - 12,5 \mu\text{m}$
Tepelně neovlivněný řez	Teplota v místě řezu do 10 000 °C
Maximální prořez	Dle materiálu, běžně do 25 mm

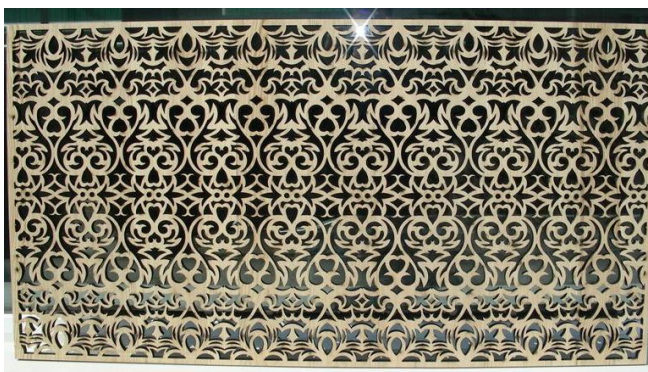
2.4.7 Výhody a nevýhody technologie LBM

Tab. 4 - Výhody a nevýhody laseru [12]

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> - Šířka řezné spáry 0,02 – 0,2 mm (závisí na druhu laseru, řezaného materiálu a jeho tloušťce) - Minimální opotřebení nástroje - Čisté řezy - Možnost řezání složitých tvarů - Hospodárnost i při malých výrobních sériích - Vysoká řezná rychlost (závisí na způsobu řezání, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu, druhu a tloušťce řezaného materiálu) 	<ul style="list-style-type: none"> - Vznik tepelně ovlivněné oblasti (0,05 – 0,2 mm) - Při chybném nastavení může vzniknout problém s odchodem taveniny (tzn. znečištění povrchu kapičkami ztuhlé taveniny) - Nutnost odsávání karcinogenních plynů - Potřeba inertních plynů (např. Ar, He, atd.) - Možnost vzniku mikrotrhlin - Změna struktury vzniklé plochy (degradace, může docházet i k povrchovému zakalení tenké vrstvy v okolí řezu)



Obr. 20 – Ukázka pálení výpalku laserem [21]



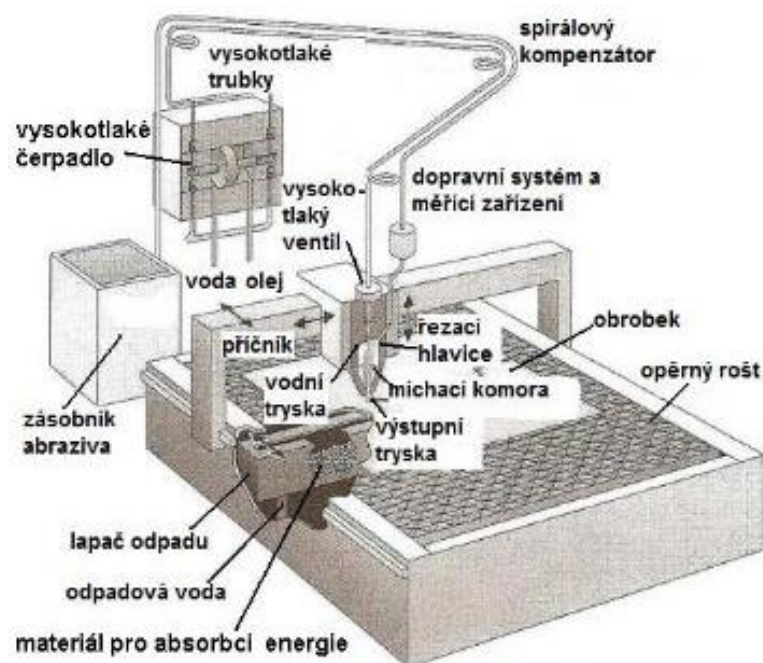
Obr. 21 - Ukázka složitosti výpalku laserem [22]

2.5 Obrábění hydroabrazivním paprskem (AWJ – Abrasive Waterjet Machining)

Tato technologie je založena na principu přirozené eroze materiálu, v tomto případě uměle vyvolané pomocí vysokoenergetického hydroabrazivního paprsku. Ten je vytvářen vysokotlakým vodním čerpadlem – multiplikátorem – fungujícím na principu převádění nízkého tlaku oleje na vysoký tlak vody. Z tohoto zařízení je voda pod vysokým tlakem odváděna potrubím do řezací hlavice, v níž je tvořen rovnoměrný vodní paprsek, k němuž je následně ve směšovací komoře přimícháno abrazivo. Z řezací hlavice prostřednictvím tzv. abrazivní trysky vystupuje takto vytvořený vysokoenergetický hydroabrazivní paprsek ven, kde je dále distribuován na obráběný materiál. Fyzikální podstata řezání materiálu paprskem kapaliny vychází z úvahy, že paprsek pohybující se dvou - až čtyřnásobnou rychlostí zvuku lze pova-

žovat z hlediska jeho účinků za pevné těleso. Proces probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny prohlubeň, která se mění na otvor, v druhé etapě pak dochází k jeho prohlubování a vytvoření řezné spáry. Při nárazu řezné kapky kapaliny na obrobek (při tzv. prvním nástřelu) dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše, díky čemuž je vytvořen startovací otvor. V řezaném materiálu pak začínají vznikat rázové trhliny a mikrotrhliny, které se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří, a tím dochází k rozrušení obráběného materiálu. [14]

Od chvíle, kdy paprsek projde celou tloušťkou materiálu, se silové zatížení sníží na minimum. V důsledku tohoto procesu není nově vzniklý povrch tepelně ovlivněn a nevykazuje známky zbytkového pnutí po obrábění. Tyto vlastnosti v zásadní míře odlišují a zvýhodňují AWJ oproti ostatním technologiím na dělení materiálu (např. laser, mikroplazma). [5]



Obr. 22 - Schéma zařízení pro řezání technologií AWJ [13]

2.5.1 Popis komponent pro řezání AWJ

- Vysokotlaké vodní čerpadlo

Zařízení slouží pro vytvoření vysokého tlaku vody. Toho je dosahováno za pomoci multiplikátoru nebo triplexového plunžrového čerpadla. Multiplikátor pracuje na principu dvou spojených pístů. Nízký tlak oleje přivedený na větší průměr pístu je pak transformován na vysoký tlak vody na malém pístu. Tento tlak lze plynule regulovat v rozmezí od 0 až do 600 MPa. Spotřeba vody je pak při těchto tlacích v rozmezí 0 až 11 [l/m], což je ovlivněno použitou tryskou (vodní nebo abrazivní). [15]



Obr. 23 - Vysokotlaké čerpadlo PTV 19/60 [16]



Obr. 24 - Akumulátor tlaku [28]

- Akumulátor

Jedná se o tlakovou tlustostěnnou nádobu, která má za úkol tlumit rázy vody vznikající v multiplikátoru. Nádobu je upravována autofretáží, což je proces, při kterém je nádoba přetlakována tak, aby došlo k vytvoření plastických deformací v materiálu, zpravidla na hranici makro vad. V těchto místech dochází ke koncentraci napětí a zpevnění. Tímto nárazovým přetížením tlakové nádoby dojde k zamezení růstu mikro- i makrotrhlin, který by pulzace přiváděné tlakové vody mohla způsobit. [5]

- Řezací hlavice

Řezací hlavice je u technologie AWJ utvářecí prvek samotného pracovního stroje – paprsku. Společně s vysokotlakým vodním čerpadlem a soustavou vodní nebo abrazivní trysky dodávají samotné technologii její efektivitu. Vodní trysky jsou koncipovány do tvaru zužující se dýzy, což znásobuje rychlost paprsku a vytváří kontinuální proud o průměru od 0,075 do 1,5 mm pohybující se rychlostí 1 – 4 Ma. Po průchodu vodní tryskou se paprsek dostává u technologie AWJ do směšovací komory, ve které se pod tlakem nasaje abrazivo, paprsek se tímto abrazivem obalí a dál prochází abrazivní tryskou ven z řezací hlavice, odkud je distribuován do místa samotného řezu. [5]

Vodní tryska: Mezi materiály používané pro výrobu vodních trysek se používá ocel povlakovaná safírem, rubínem nebo syntetickým diamantem. V současnosti se trysky povlakované safírem a rubínem nahrazují tryskami povlakovanými diamantem, který dosahuje až 10x větší životnosti, ale je také přibližně 10x dražší. Výhodou diamantové dýzy je opakovatelné čištění jejího otvoru, při zachování stálých vlastností. Čištění se provádí standardně pomocí ultrazvuku. Celková životnost vodních trysek závisí na technických parametrech a na kvalitě pracovního média.

Abrazivní tryska: Oproti vodní trysce se ve směšovací komoře mění laminární proudění na turbulentní, dochází proto k částečnému víření kapaliny a vzniká podtlak. Pomocí vzniklého podtlaku se do vodního paprsku strhává abrazivo.



Obr. 25 - Řezací hlava s diamantovou tryskou [28]



Obr. 26 - Řezací hlavice pro technologii AWJ [18]

2.5.2 Materiály vhodné pro obrábění technologií AWJ

Technologie využívající vysokoenergetický hydroabrazivní paprsek se zpravidla používá tam, kde je potřeba vytvářet tvarové, ale i rovné řezy do materiálů elektricky nevodivých, odolných vůči chemickému působení či do materiálů, které jsou těžko opracovatelné nebo neopracovatelné za použití jiných metod obrábění a dělení materiálů. V praxi se s touto technologií lze setkat v automobilovém průmyslu, ve firmách, které zpracovávají titanové slitiny, v kamenictví, ale také v potravinářství (řezání hluboce zamražených potravin) či v běžných strojírenských provozech na zpracování ocelových plechů nebo plechů z neželezných kovů.

Řezaný materiál musí snášet přímý kontakt s vodou – nesmí být vodou znehodnocen. Mezi tyto druhy materiálů patří např. všechny druhy oceli, neželezné kovy, porézní materiály, sklo, plasty, keramické materiály, mramor, dřevo, kůže, atd.



Obr. 27 - Řez duralu tloušťky 160mm

2.5.3 Materiály nevhodné pro řezání technologií AWJ

Technologie AWJ se nedoporučuje používat pro materiály náchylné na kontakt s vodou, která by vedla k nevratnému zničení řezané součásti. Voda může také zapříčinit změnu barvy nebo znečištění řezaného materiálu. Mezi tyto materiály patří především kalené sklo a hrnčířská hlína v nezpracovaném stavu.

2.5.4 Abraziva využívaná v technologii AWJ

Jedná se o brusný materiál, který společně s vysokým tlakem paprsku dodává technologii její progresivitu. Abrazivo je rozděleno podle druhu materiálu a podle zrnitosti. Jako materiál se nejčastěji používá přírodní australský granát s obchodním označením GARNET GMA [19] nebo například olivín $(\text{Mg, Fe})_2(\text{SiO}_4)$. Dříve se využívalo i křemičitých písků, od kterých se upustilo z důvodu malého množství řezných hran zrna, rychlému otupení, nevhodnosti k recyklaci a nízkému účinku. [5] Mezi nejvýznamnější kritérium abraziva, které je sledováno, je řezivost. Dalšími sledovanými parametry jsou zrnitost, tvrdost a pevnost.

Řezivost: Je zajištěna krystalickou strukturou abraziva. Kubické krystalické mřížky dodávají vlastnosti zabraňující otupování abraziva. Díky této vlastnosti se při sražení řezné hrany zpravidla vytvoří několik hran nových. Využitím této skutečnosti lze již použité abrazivo recyklovat a znovu zavést do výroby. Parametry recyklovaného abraziva jsou však po procesu recyklace pozměněny. [28]

Zrnitost: Abraziva se dodávají v různých zrnitostech. Zrnitost se udává v jednotkách MESH (počet od síta na čtvereční palec). Jemná zrnitost 150 a 100, střední zrnitost 80 a 60 nebo hrubá zrnitost 36 a 16. Velikost zrna se pohybuje od 0,2 mm do 0,4 mm, tedy čím menší zrno, tím má řez nižší drsnost R_a , ale pak i celý řezný proces probíhá při nižší rychlosti řezání v_p . Závislost hloubky řezu na intenzitě toku abraziva při použití různých zrnitostí (viz. Obr. 29). [28]

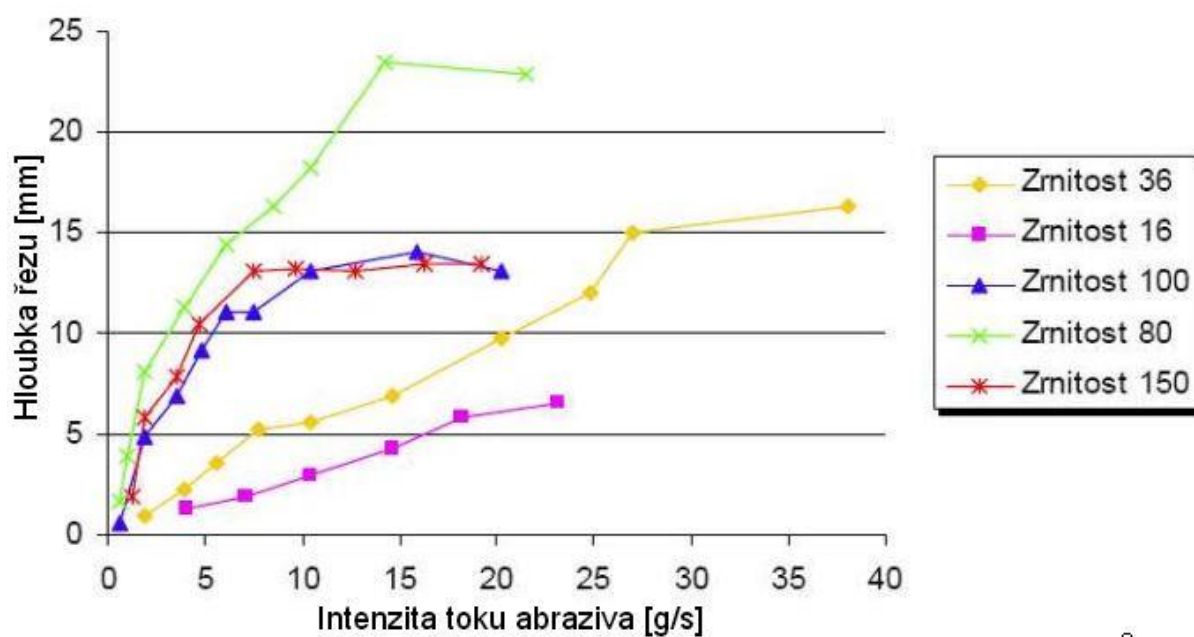
Tvrdost: Použitím vhodného abrazivního materiálu o požadované optimální tvrdosti, se zvyšuje maximální efektivita technologií využívajících abrazivo. Pro použití ve strojírenství se využívají především křemičitá abraziva nebo polodrahokamová abraziva (olivín, granát). Abrazivo se na výrobních nákladech podílí téměř 50%, proto je vhodné volit různě tvrdá abraziva a to především podle vlastností obráběného materiálu. [28]

Tab. 5 - Chemické složení abrazivního materiálu australský granát - GMA MESH 80 [19]

Prvek	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO
Obsah[%]	36%	20%	30%	2%	1%	1%	2%	6%



Obr. 28 - Abrasivní materiál GMA MESH 80 [28]



Obr. 29 - Závislost hloubky řezu na intenzitě toku abraziva [28]

2.5.5 Dosahované parametry

Tab. 6 - Dosahované parametry technologií AWJ [5]

Dosahovaná rozměrová přesnost	$\pm 0,1$ mm od jmenovitého rozměru
Polohovací přesnost stroje	Závislá na použitém zařízení, běžně 0,01 mm
Dosahovaná drsnost nové hrany	$R_a = 3,2 - 12,5 \mu\text{m}$
Tepelně neovlivněný řez	Teplota v místě řezu do 40°C
Maximální prořez	0 - 500 mm

2.5.6 Výhody a nevýhody technologie AWJ

Tab. 7 - Výhody a nevýhody technologie AWJ [5]

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> - Šetrnost k životnímu prostředí - Možnost recyklace abraziva (výtěžnost až 70% ze substrátu) - Energetická účinnost – až 80% - Studený řez umožňuje řezat materiály náchylné na teplo - Nově vzniklé plochy nevykazují tepelné ani silové ovlivnění - Nedochozí ke vzniku zbytkových napětí a mikrotrhlin - Úzká řezná spára - Pro snížení hlučnosti lze možnost řezat pod hladinou - Jednoduchá obsluha - Plynulá regulace tlaku - Z důvodu téměř bezsilového působení není třeba upínat polotovary 	<ul style="list-style-type: none"> - Při řezání ocelí dochází k rychlému korodování nového povrchu - Hlučnost provozu - U sendvičového materiálu je při nastřelování zvýšené riziko delaminace



Obr. 30 - Ukázka výroby součásti technologií AWJ [27]



Obr. 31 - Ukázka výrobku technologií AWJ [20]

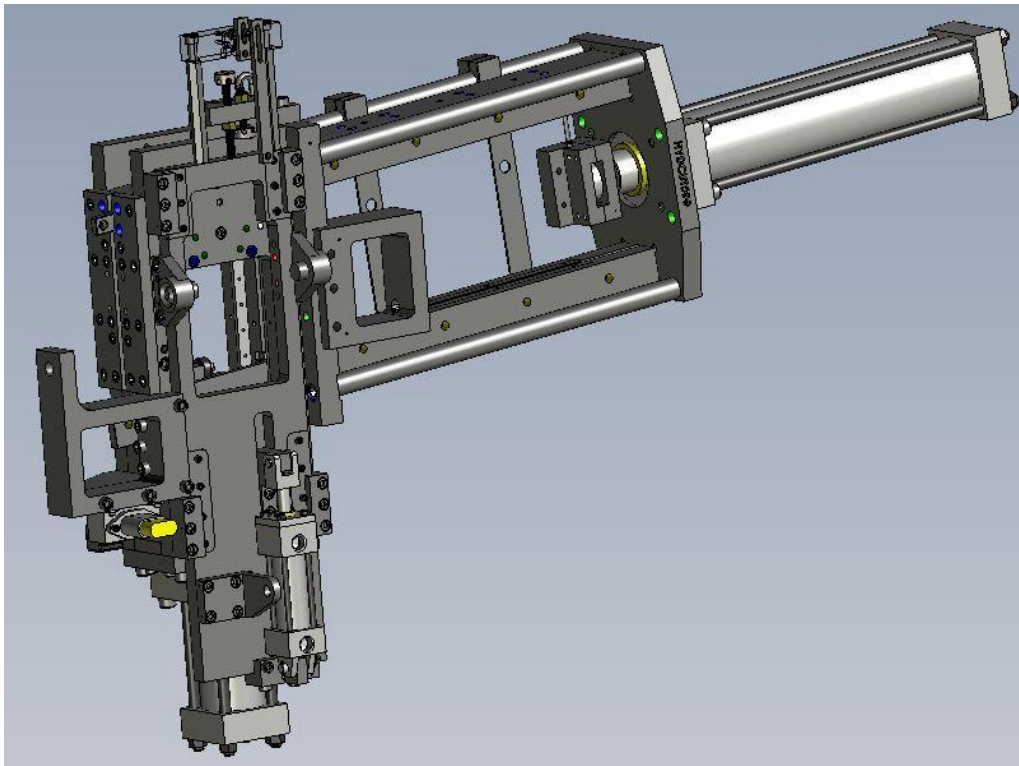
3 Návrh technologie – experimentální část

3.1 Popis experimentu

Pro experimentální část byly zvoleny technologie elektrojiskrového obrábění (výchozí technologie), laserové obrábění a laserové obrábění s dokončením funkčního povrchu pomocí frézování. Jako možnost zlepšení trvanlivosti řezné hrany se firma SHAPE rozhodla hranu nechat zakalit pomocí laserového paprsku a následně ofrézovat funkční povrh. Technologie obrábění materiálu pomocí vodního nebo abrazivního paprsku firma SHAPE vyřadila z důvodu svého předchozího zkoumání, kterým bylo zjištěno, že tato technologie nevyhovuje požadovaným parametrům.

Danými technologiemi se zhotovily nože v tomto počtu: elektrojiskrové obrábění 10ks, laserové obrábění s následným frézováním 4ks, laserové obrábění s povrchovým zaka-lením funkčního povrchu a následným ofrézováním kontury nože 8ks. Následně u nich byla udělána zkouška drsnosti funkčního povrchu, poté byly otestovány ve výrobě a nakonec byl vyhotoven metalografický výbrus z jednotlivých vzorků nožů pro analýzu opotřebení řezné hrany.

Testování stříhacích nožů ve výrobě probíhalo na profilovací trati firmy SHAPE. Nože jsou nasazeny do stříhací hlavy (viz. Obr. 32), kterou prochází vyprofilovaný a bodově svařený nárazník, který je ustříhnut v dané vzdálenosti od předchozího stříhu. Celý průběh jednoho stříhu je vyobrazen na Obr. 33 – 41.



Obr. 32 - Model stříhací hlavy



Obr. 33 - Stříhací hlava - fáze 1

Obr. 34 - Stříhací hlava - fáze 2

Obr. 35 - Stříhací hlava - fáze 3



Obr. 36 - Stříhací hlava - fáze 4

Obr. 37 - Stříhací hlava - fáze 5

Obr. 38 - Stříhací hlava - fáze 6



Obr. 39 - Stříhací hlava - fáze 7

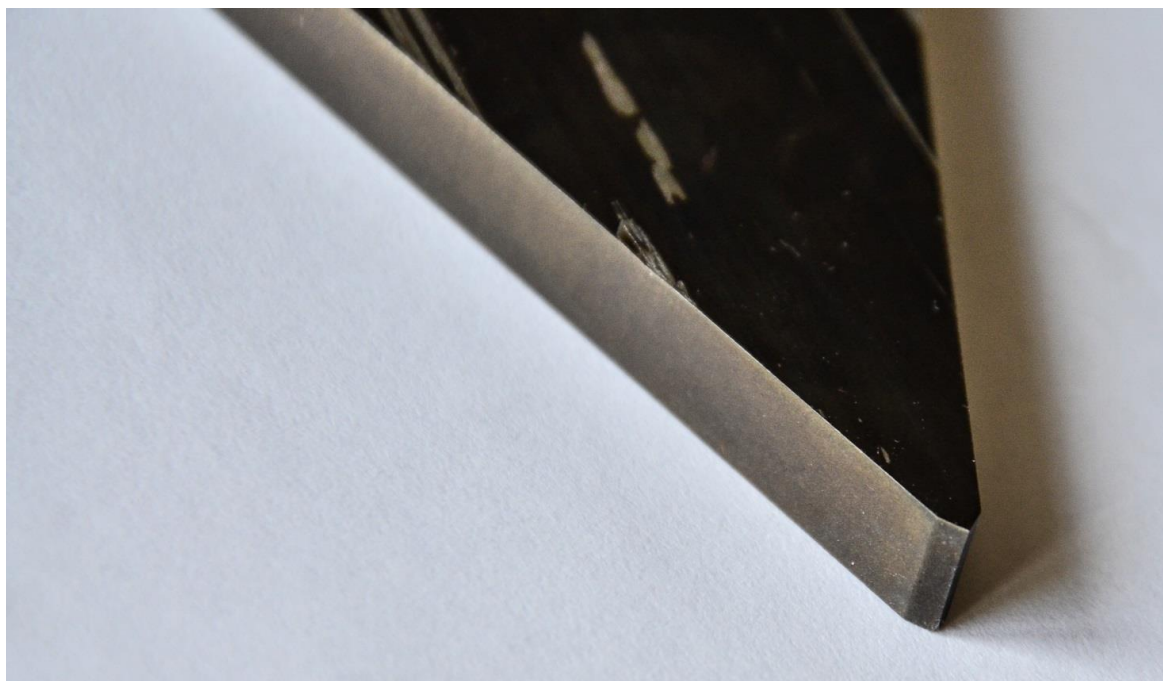
Obr. 40 - Stříhací hlava - fáze 8

Obr. 41 - Stříhací hlava - fáze 9

Na Obr 33 – 41 je vidět rozfázování jednoho stříhacího cyklu. Na Obr. 33 - 36 je vidět vyprofilovaný nárazník procházející stříhací hlavou, který je již ohnutý na požadovaný rádius. Obr. 37 – 38 ukazuje ustřížení nárazníku pomocí stříhacího nože, který je uchycen ve stříhací hlavě. Stříhací hlava si v určité délce materiál upne, pohybuje se s materiálem a následně ustříhne nárazník, který odpadává do připraveného kontejneru. Na Obr. 39 – 41 je viditelný průchod dalšího vyprofilovaného nárazníku.

3.1.1 Výroba nože pomocí elektrojiskrového obrábění

Nože byly zhotoveny firmou OK RING s.r.o. na stroji FANUC ROBOCUT. Jako dielektrikum byla použita deionizovaná voda. Z následujících obrázků je patrné, že povrch je v celé délce rovnoměrný, nejsou zde viditelné žádné nerovnosti po obrábění.



Obr. 42 – Stříhací nůž vyrobený drátovým řezáním – pohled 1



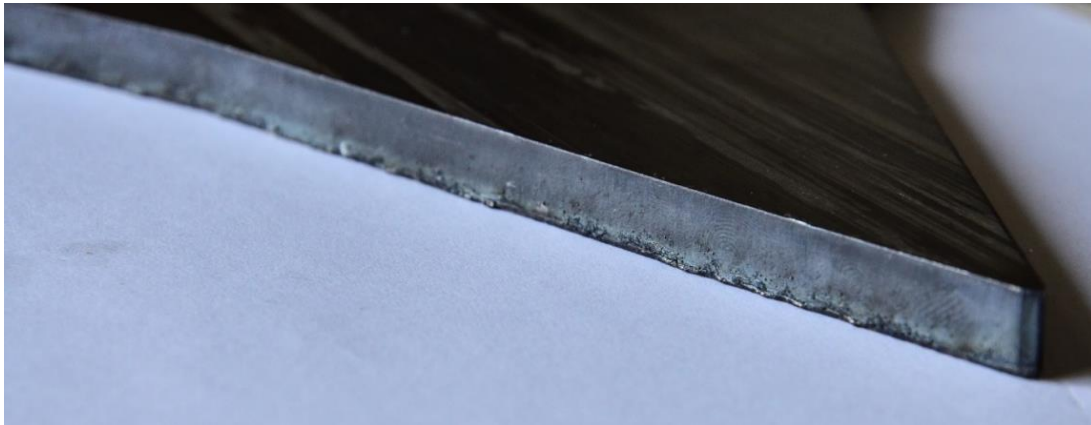
Obr. 43 - Stříhací nůž vyrobený drátovým řezáním – pohled 2



Obr. 44 - Stříhací nůž vyrobený drátovým řezáním – pohled 3

3.1.2 Výroba nože pomocí laserového obrábění

Nože byly zhotoveny firmou LASERTHERM. Z níže uvedených obrázků je patrné, že povrch na začátku řezu je kvalitní, ovšem s narůstající hloubkou řezu klesá kvalita povrchu a na hraně, kde vystupuje laserový paprsek z materiálu, jsou stopy odtékajícího materiálu. Pomocí laseru nedokážeme kvalitně udělat špičku nástroje, která by se následně musela dobrousit nebo dofrézovat.



Obr. 45 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním – pohled 1



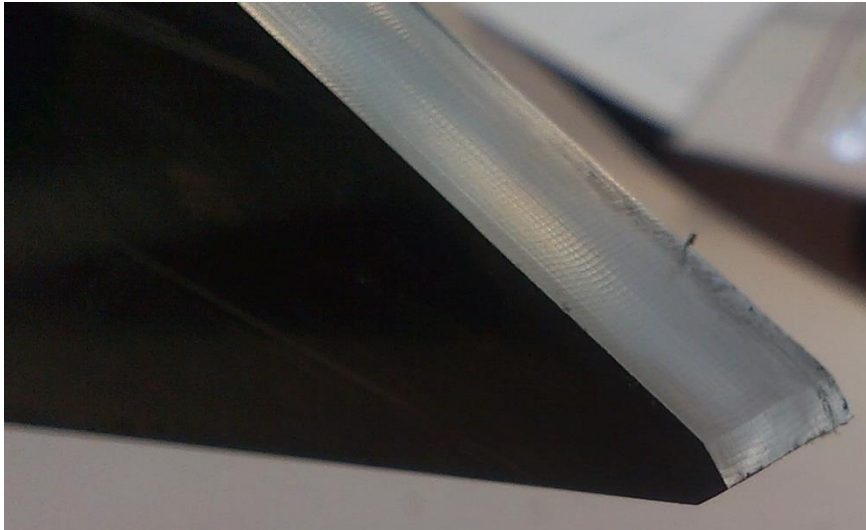
Obr. 46- Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním – pohled 2



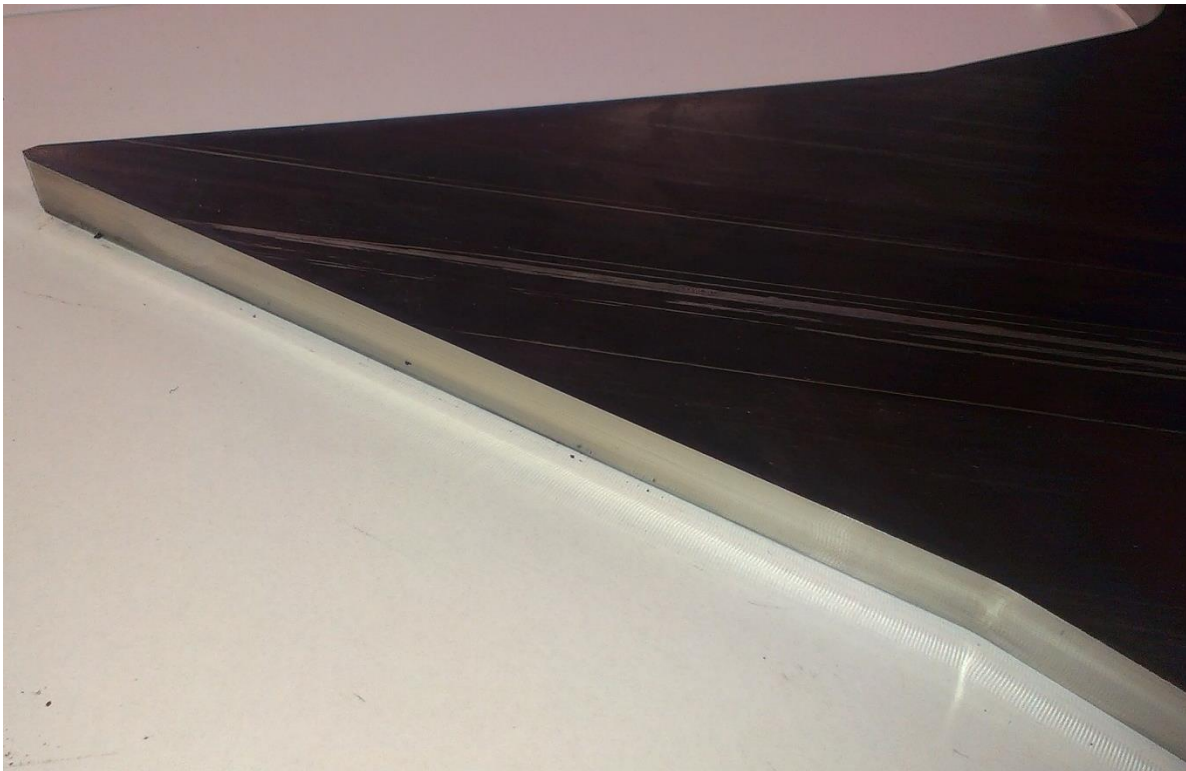
Obr. 47 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním – pohled 3

3.1.3 Výroba nože pomocí laserového obrábění s dokončením funkčního povrchu frézováním

Nože byly zhotoveny firmou LASERTHERM, poté se ofrézoval funkční povrch v halových laboratořích RTI. Z níže uvedených obrázků je patrné, že na povrchu jsou vidět malé nerovnosti způsobené pohybem frézy.



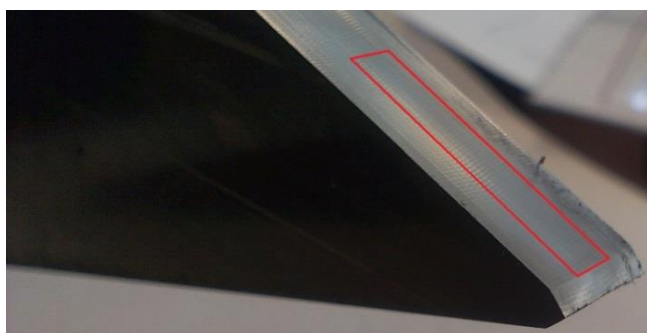
Obr. 48 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním a upravený ofrézováním – pohled 1



Obr. 49 - Stříhací nůž vyrobený laserovým řezáním a upravený ofrézováním – pohled 2

3.2 Drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo prováděno v laboratořích RTI. Specifikace měřicího stroje je uvedena v příloze, viz. Příloha 1. Následující protokoly drsností, které jsou uvedeny v přílohách (viz. Příloha 2 - 4) nám ukazují, že nejlepší drsnost povrchu byla dosažena pomocí laserového řezání s následným ofrézováním obvodu nože. Měření probíhalo 4x na každém noži, 2x z horní strany nože a 2x ze spodní strany nože v délce 4,8mm (Obr. 50). Na noži byla určena 2 místa, kde se měřila drsnost, tato místa jsou vyznačena na Obr. 51. Naopak nejhorší drsnost byla naměřena na noži po laserovém řezání, kde $\frac{2}{3}$ povrchu řezu se výrazně lišily od poslední $\frac{1}{3}$ povrchu řezu. Nože s tímto povrchem by měli daleko menší trvanlivost ve výrobním procesu z důvodu nevyhovující kvality povrchu v poslední $\frac{1}{3}$ řezu a také z důvodu tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 50 - Funkční plocha, na které byla měřena drsnost R_z



Obr. 51 - Místa měření drsnosti povrchu

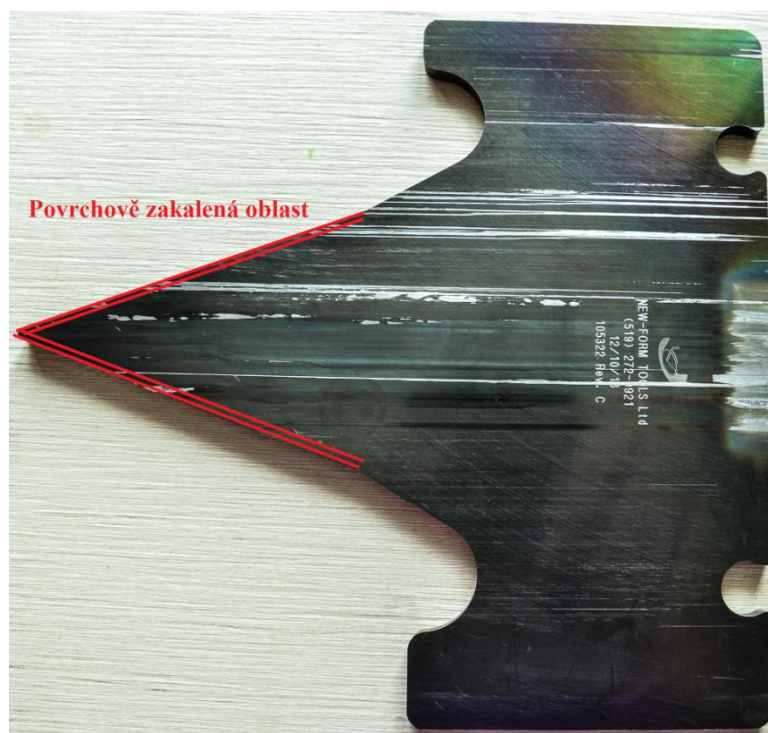
Tab. 8 - Tabulka měření drsností

Typ řezání	Spodní strana [R_z][μm]		Horní strana [R_z][μm]	
	Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3	Oblast 4
EDM	13,3	14,1	11,2	12,1
LBM	21,3	21,3	7,8	6,3
LBM + frézování	5,5	5,1	4,5	4,8

3.3 Trvanlivost stříhacích nožů

Všechny nože byly vyzkoušeny ve výrobním procesu na jednom typu nárazníku P32S Front, aby nedošlo ke zkreslení výsledků počtu vyrobených kusů. Počty kusů se zaznamenávaly do zkušebního listu u profilovací linky, ze kterého se poté vytvořil graf trvanlivosti nožů.

Standardní doba trvanlivosti u technologie EDM je přibližně 1400 kusů. Základním materiálem je rychlořezná ocel ČSN 19 830 s TiAlN povlakem o tvrdosti 58 – 62 HRC. Tvrdost řezné plochy po technologii LBM je 56 HRC. Tvrdost řezné plochy se zvýšila při povrchovém zakalení z 56 HRC na 62 HRC. Z tohoto důvodu se firma SHAPE rozhodla nechat zhotovit 4 ks nožů pomocí laserového obrábění s následným ofrézováním řezné plochy a dalších 8 ks nožů pomocí technologie laserového obrábění s povrchovým kalením a následným ofrézováním kontury nože. Povrchově zakalená oblast je vyznačena na Obr. 52.



Obr. 52 - Povrchově zakalená oblast

Tab. 9 - Výsledky nožů vyrobených laserovým řezáním s následným frézováním

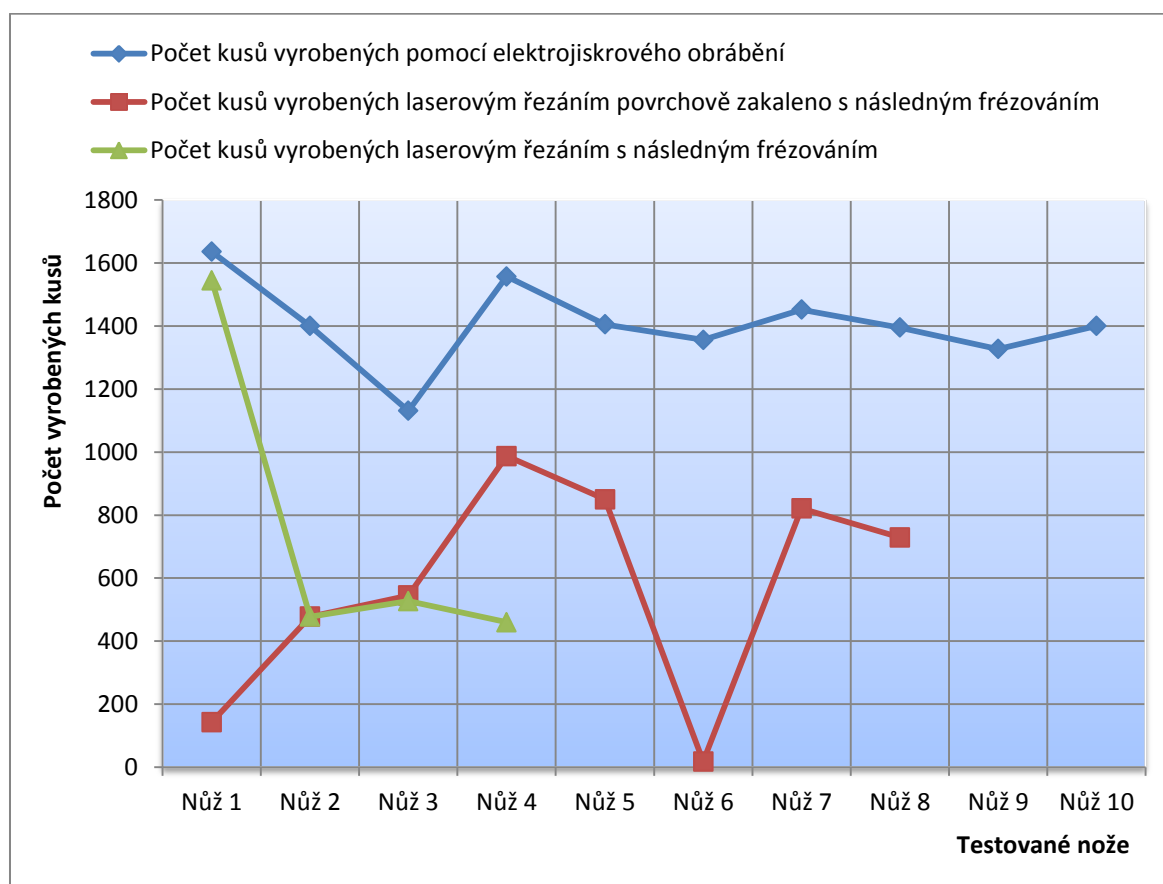
Číslo nože	Počet vyrobených kusů	Důvod výměny nože
1	1545	Zlomený nůž
2	478	Zlomený nůž
3	527	Zlomený nůž
4	460	Otřepy na konci nárazníků

Tab. 10 – Výsledky nožů vyrobených laserovým řezáním povrchově zakaleno s následným frézováním

Číslo nože	Počet vyrobených kusů	Důvod výměny nože
1	143	Zlomený nůž
2	478	Zlomený nůž
3	545	Otřepy na konci nárazníků
4	987	Otřepy na konci nárazníků
5	850	Otřepy na konci nárazníků
6	18	Zlomený nůž
7	821	Otřepy na konci nárazníků
8	729	Otřepy na konci nárazníků

Tab. 11 - Výsledky nožů vyrobených pomocí elektrojiskrového obrábění

Číslo nože	Počet vyrobených kusů	Důvod výměny nože
1	1636	Otřepy na konci nárazníků
2	1400	Otřepy na konci nárazníků
3	1131	Otřepy na konci nárazníků
4	1557	Otřepy na konci nárazníků
5	1405	Otřepy na konci nárazníků
6	1356	Otřepy na konci nárazníků
7	1452	Otřepy na konci nárazníků
8	1395	Otřepy na konci nárazníků
9	1327	Otřepy na konci nárazníků
10	1400	Otřepy na konci nárazníků



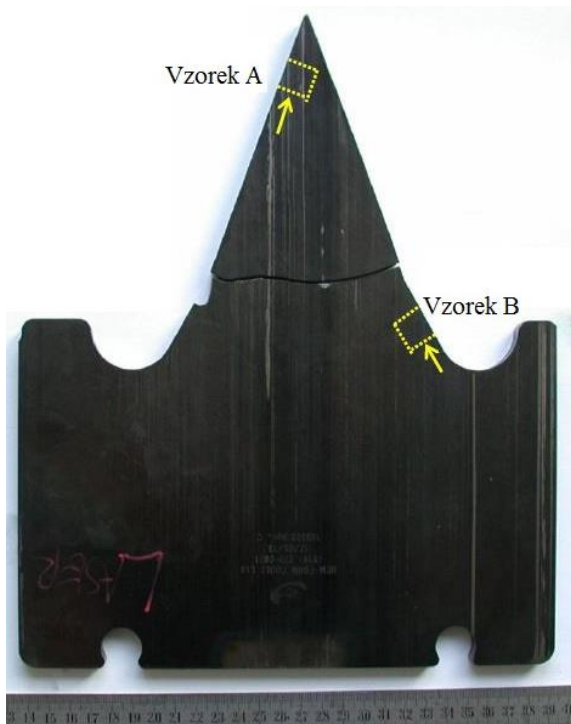
Obr. 53 - Graf trvanlivosti nožů, vyrobených jednotlivými technologiemi

Graf trvanlivosti nožů (Obr. 53) vychází z tabulek (Tab. 9 – 11), které ukazují, že průměrná trvanlivost nože vyrobeného technologií EDM je 1400 ks, nože standardně vydrží předepsanou standardní dobu trvanlivosti.

Dále v grafu je možno vidět nože vyrobené laserovým obráběním s následným ofrézováním a nože vyrobené pomocí laserového řezání s povrchovým kalením funkčního povrchu a následným ofrézováním kontury. Je patrné, že u nožů bez povrchového kalení dochází k rychlému opotřebení a následnému zlomení nože, průměrná doba trvanlivosti těchto nožů se pohybuje kolem 500 ks. U nožů s povrchovým kalením se výsledky trvanlivosti zlepšili. Průměrná doba trvanlivosti u těchto nožů se pohybovala kolem 650 ks. Povrchové kalení mohlo zapříčinit zlomení nože u nože 1 a 6, protože tento lom proběhl na hranici, kde končila povrchově kalená vrstva (Obr. 54).

3.4 Metalografická analýza stříhacích nožů pro určení drsnosti povrchu

Metalografické analýze se podrobil stříhací nůž vyrobený pomocí laserového řezání s následným ofrézováním kontury nože (2ks) a nůž vyrobený pomocí elektroerozivního drátového řezání (2ks). Cílem bylo zjistit rozdíly v mikrostruktuře mezi noži vyráběnými těmito technologiemi.[32]



Obr. 54 - Nůž po řezání laserem [32]



Obr. 55 - Nůž po elektroerozivním řezání [32]

Z nožů byly odebrány 3 vzorky:

- Vzorek A – nůž po laserovém řezání – opotřebovaná oblast.
- Vzorek B – nůž po laserovém řezání – neopotřebovaná oblast.
- Vzorek C – nůž po elektroerozivním řezání – nový nůž.

Vzorky byly připraveny standartním postupem: metalografického broušení s následným leštěním. Po naleptání se mikrostruktura fotografovala pomocí světelného mikroskopu Nikon Eclipse MA200. Mikroskopová stanice je vybavena NIS Elements 3.2, softwarem digitálního zpracování obrazu. [32]



Obr. 56 - Vzorek A (50x) [32]



Obr. 57 - Vzorek B (50x) [32]



Obr. 58 - Vzorek C (50x) [32]

Na Obr. 56 – 58 jsou vidět metalografické výbrusy vzorků A, B a C v leštěném stavu. Z pozorování na světelném mikroskopu byla patrná karbidická řádkovitost typická pro válcování. V rámci pozorování nebyly zjištěny sulfidické a oxidické vměstky, které by vedly ke snížení houževnatosti.

Detaily:



Obr. 59 - Vzorek A (500x) [32]



Obr. 60 - Vzorek A (500x) [32]



Obr. 61 - Vzorek B (500x) [32]



Obr. 62 - Vzorek C (500x) [32]

Povrch vzorku C je zdánlivě hrubší, ale bez trhlin (Obr. 63). Vzorek B má rovný povrch bez prasklin (Obr. 62). Na vzorku A byly pozorovány jak malé (Obr. 60), tak velké trhliny (Obr. 61). [32]

Na Obr. 59 jsou vidět trhliny, které vedou kolmo z povrchu vzorku A. Tyto trhliny vznikají v průběhu života nástroje, což je patrné ze zbylých vzorků. Při dosažení nadkritické velikosti trhliny může dojít k nestabilnímu šíření lomu a ulomení špičky střížného nástroje.

3.5 Časová náročnost, ekonomická kalkulace a určení nejvýhodnější technologie pro výrobu stříhacích nožů.

U drátořezu přibližný čas výroby jednoho nože je cca 40-50 minut dle jednotlivých typů, k tomu je třeba ještě připočítat přípravu výroby a následné konzervování.

U laseru přibližný čas výroby jednoho nože je cca. 10 minut včetně upnutí a odepnutí do/z pracovního prostoru stroje. Ovšem po řezání laserem nevznikne hotový nástroj, musí se dále upravit pomocí frézování, které trvá cca 15 minut i s ustavením a vyjmutím do a z pracovního prostoru frézky.

V následující tabulce je vidět, jak se pohybují ceny výroby nožů jednotlivými technologiemi. Tyto hodnoty poskytla firma SHAPE corp. Doba výměny nože na profilovací trati trvá 10 minut. Náklady na provoz profilovací linky jsou 7800 Kč/hod.

Tab. 12 - Náklady výroby nožů pomocí daných technologií

Technologie výroby	Náklady na 1 nůž	Náklady na 1 stříh nože ($\frac{\text{Cena nože}}{\text{Průměrná trvanlivost nože}}$)
Elektrojiskrové obrábění	1200 Kč	$\frac{1200}{1400} = 0,857 \frac{\text{Kč}}{\text{Stříh}}$
Laserové řezání	120 Kč	
Laserové řezání s následným frézováním	400 Kč	$\frac{400}{500} = 0,8 \frac{\text{Kč}}{\text{Stříh}}$
Laserové řezání s povrchovým kalením s následným frézováním	450 Kč	$\frac{450}{650} = 0,692 \frac{\text{Kč}}{\text{Stříh}}$

V tabulce je patrné, že pokud by se uvažovalo o technologii, při které je stříh nástroje nejlevnější, tak by nejlépe obstál nůž vyrobený pomocí laserového řezání s povrchovým kalením. Pro tento případ však jsou důležitější parametry, než cena na stříh. Tyto parametry jsou porovnány v následujících srovnávacích tabulkách (Tab. 13 – 15). Nože vyhotoveny pouze pomocí laserového obrábění se netestovaly z důvodu kvality povrchu řezu.

Tab. 13 - Určení vah pro jednotlivá kritéria párového srovnání

Kritéria	Prostoj linky	Náklady	Trvanlivost	Možnost přestřeni	Kvalita povrchu	Součet	Váha [%]
Prostoj linky		1	1	1	1	4	0,4
Náklady	0		0	1	0	1	0,1
Trvanlivost	0	1		0	1	2	0,2
Možnost přestřeni	0	0	1		0	1	0,1
Kvalita povrchu	0	1	0	1		2	0,2

V Tab. 13 se porovnávala kritéria mezi sebou na základě důležitosti. Porovnání probíhalo metodou obodování (1 – důležitější, 0 – méně důležité). Pro přehlednost se zvolilo 5 nejdůležitějších kritérií. Následným součtem bodů a podělením 10, dostáváme váhu kritéria.

Volba kritérií:

- Kritérium prostoje linky zohledňuje dobu, kdy linka nevykonává určenou činnost a je na ní prováděna výměna nástroje.
- Náklady jsou kritériem, které určuje cenu, za kterou je výrobce ochoten vyrobit nůž o daných parametrech.
- Třetí položka, trvanlivost, se zaměřuje na dobu setrvání nože ve výrobním procesu linky, která pracuje v určitém taktu.
- Přeastření nástroje umožňuje menší spotřebu daného materiálu (ČSN 19 830 s TiN povlakem).
- Kvalita povrchu je důležité kritérium pro každý nůž, protože je úzce spojena s kvalitou střížné hrany nože, a tím i s trvanlivostí ve výrobním procesu.

Tab. 14 - Párová srovnání technologií výroby nože

Technologie výroby nože	Prostoj linky	Náklady	Trvanlivost	Možnost přeastření	Kvalita povrchu
EDM	3	1	3	3	3
LBM + frézování	1	2	1	1	2
LBM s povrchovým kalením + frézování	2	3	2	2	1
Váha [%]	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2

V Tab. 14 jsou obodovány dané technologie v závislosti na daném kritériu. Stupnice hodnocení (3 body – nejvýhodnější, 1 bod – nejméně výhodná varianta). Každé kritérium má přiřazenou svou váhu, kterou se vynásobí hodnota v tabulce u dané technologie a u daného kritéria. Výsledkem je Tab. 15.

Tab. 15 - Vyhodnocení párového srovnání technologií výroby nožů

Technologie výroby nože	Prostoj linky	Náklady	Trvanlivost	Možnost přestřžení	Kvalita povrchu	Součet	Pořadí
EDM	1,2	0,1	0,6	0,3	0,6	2,8	1.
LBM + frézování	0,4	0,2	0,2	0,1	0,4	1,3	3.
LBM s povrchovým kalením + frézování	0,8	0,3	0,4	0,2	0,2	1,9	2.

V Tab. 15 je možno vidět vyhodnocení výhodnosti použití daných technologií pro výrobu stříhacích nožů. Na základě určených kritérií se zjistilo pomocí metody párového srovnávání, že nejvýhodnější je použití elektrojiskrového obrábění pro daný výrobní proces. Tato technologie vyšla z dané metody srovnávání naprosto nejlépe. Jako 2. skončila technologie laserového obrábění s povrchovým kalením a následným frézování. Naprosto nejhůře dopadla technologie laserového obrábění bez povrchového kalení s následným ofrézováním kontury nože.

4 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout technologii výroby stříhacího nože pro zvýšení trvanlivosti ve výrobním procesu. Nejprve byla teoreticky popsána technologie elektrojiskrového obrábění, poté technologie laserového řezání a nakonec technologie řezání pomocí vodního paprsku.

Firma SHAHE se rozhodla, nezahrnou technologii řezání vodní paprskem do tohoto zkoumání z důvodu, že již byla tato technologie na daný problém aplikována a nevyhovovala požadovaným parametrům.

Na základě teoretické části se rozhodlo, že se nechají vyrobit nože pomocí těchto technologií: elektrojiskrového drátového řezání (10ks), dále laserového řezání s ofrézováním předepsaného tvaru nože kvůli zkvalitnění funkčního povrchu nože (4ks) a laserového řezání s povrchovým zakalením a následným ofrézováním předepsaného tvaru nože (8ks).

Po výrobě se odebral jeden kus od těchto technologií: elektrojiskrové obrábění, laserové řezání a laserové řezání s následným ofrézováním. Tyto nože se podrobily zkoušce drsnosti povrchu, u které se zjišťoval parametr R_z . U elektrojiskrového obrábění se dosáhlo drsnosti v průměru $R_z = 12,6\mu\text{m}$. U laserového řezání se dosáhlo drsnosti v průměru $R_z = 14,2\mu\text{m}$. U laserového řezání s povrchovým zakalením a následným ofrézováním předepsaného tvaru nože se dosáhlo drsnosti v průměru $R_z = 4,9\mu\text{m}$. Drsnost se měřila z horní a ze spodní strany nože na 2 místech. Největší rozdíly byly zaznamenány u laserového řezání, kde drsnost měřená od spodní strany dosahovala hodnot okolo $R_z = 21\mu\text{m}$ z důvodu odtékání taveniny materiálu z oblasti nože.

Následovalo otestování stříhacích nožů přímo ve výrobním procesu, kde se důkladně sledoval počet nastříhaných výrobků (náravníků) od doby nastrojení až po dobu, kdy vznikly na náravníku otřepy po stříhání anebo po dobu, kdy se nůž zlomil. Nůž vyrobený elektrojiskrovým obráběním vydrží přibližně 1400 ks. U nožů vyrobených laserovým řezáním s následným ofrézováním kontury bez povrchového zakalení střížné hrany se pohybovala okolo 500ks a s povrchově zakalenou střížnou hranou kolem 650ks.

Dalším krokem bylo poskytnutí otupených nástrojů pro metalografický výbrus, kde bylo možno vidět kvalitu povrchu a případně jeho vady. Z nože se odebraly tři vzorky, každý z jiného místa, aby byl vidět rozdíl mezi střížnou a nestřížnou částí nože. Pod mikroskopem se ukázalo, jak se opotřebovává střížná hrana a jaké vady nám vznikají na povrchu.

Předposledním krokem bylo zhodnocení nožů z pohledu časové a ekonomické náročnosti. Náklady na hodinu provozu profilovací trati jsou pevně dány. Z cen jednotlivých nožů a průměrného počtu kusů, které se pomocí nich vyrobí, se zjistily náklady na 1 stříh nože. Z tohoto hlediska nejvýhodnější variantou je laserové řezání s povrchovým kalením následným ofrézováním, kde 1 stříh nože vychází na $0,692 \text{ Kč}/\text{Stříh}$. Nejdražší variantou je stříhání pomocí nožů vyrobených technologií elektrojiskrového obrábění, kde 1 stříh stojí $0,857 \text{ Kč}/\text{Stříh}$. Ovšem v tomto zhodnocení nebereme v úvahu prostoj linky při výměně nože, která se musí dělat častěji u nožů vyrobených laserem.

Následně se zjistilo pomocí metody párového srovnávání technologií, že výroba nože pomocí laserového řezání s povrchovým kalením a následným ofrézováním i technologie laserového řezání s frézováním nevedla ke zvýšení trvanlivosti nože. Jako kritéria byla zvolena tato kritéria: prostoj linky, náklady, trvanlivost, možnost přestřžení, kvalita povrchu. Nejprve

se určily váhy pro daná kritéria. Poté se pomocí párového srovnávání ohodnotily dané technologie. Ve vyhodnocovací tabulce se ukázalo, že pro výrobu stříhacího nože z daného materiálu je nejvhodnější aplikovat metodu elektrojiskrového drátového řezání, poté laserové řezání s povrchovým zakalením s následným ofrézováním povrchu a jako nejméně výhodná vyšla varianta laserového obrábění s následným ofrézováním.

Seznam použité literatury

- [1] MORÁVEK, Rudolf, *Nekonvenční metody obrábění*, ZČU FST KTO Plzeň, 1999. ISBN 80 – 7082 – 518 - 9
- [2] JANIČKOVÁ, Petra, *Učíme se v prostoru* [online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupný z WWW: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2573
- [3] *Webové stránky firmy Pfingstner s.r.o., dodavatel materiálu pro elektroerozivní obrábění* [online], Dostupný z WWW <http://www.pfingstner.cz/>
- [4] *Elektroerozivní obrábění, Nekonvenční metody obrábění*, [online]. 17. 7. 2007, č. 7 [cit. 2015-02-26]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [5] PÍŠKA, Miroslav a kolektiv, *Speciální technologie obrábění*, VUT v Brně, 2009. ISBN 978 – 80 – 214 – 4025 - 8
- [6] POSLUŠNÝ, Petr. *Elektroerozivní obrábění EDM* [online]. 2007 [cit. 2015-02-26]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni.html>
- [7] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění*, ČVUT v Praze, 1986.
- [8] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění 4. Díl: Laser LBM* [online]. 2008 [cit. 2015-02-26]. Dostupný na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [9] HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění 3. část*. [online]. [cit. 2015-02-26]. 57s. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní inženýrství. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [10] KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery – laserové řezání (Laser cutting)*. [online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [11] KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery – hlavní typy laserů používaných v průmyslu*. [online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [12] DVOŘÁK, J.: *Integrita rozhraní materiálů obráběných progresivními technologiemi*. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Počet stran 108, počet příloh 3. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [13] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2009. 152 s. ISBN 978 – 80 – 248 – 2107 - 8
- [14] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi – WJM*. Bratislava: Epos, 1998. 384s. ISBN 80 – 8057 – 091 – 4.
- [15] *Flow systems: Firemní stránky* [online]. 2006 - 2009 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.flowwaterjet.com/>
- [16] SALOKYOVÁ, Štefánia. *Experimentálne overenie vplyvu zrnitosti abrazíva a priebehu frekvenčných spektier neopotrebovanej usmerňovacej trubice na vznik vibrácií technologickej hlavice vo výrobnom systéme s technológiou AWJ*. 30.1.2012. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.posterus.sk/?p=12599>

- [17] WARD Jet [online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/02-waterjet-relationship-parameters.html>
- [18] PKIT Praha s.r.o. [online]. [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.pkit.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
- [19] Abrazivo pro metodu AWJ: Firemní stránky [online]. 2006 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/abrazivo/>
- [20] Výrobky metodou AWJ: Firemní stránky [online]. 2006 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/sila-vodniho-paprsku-galerie/>
- [21] Laserové výpalky: Firemní stránky [online]. 2013 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.silesia-tech.cz/vypalky>
- [22] Laserové řezání překližky [online]. 2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z WWW: <http://moskva.all.biz/cs/laserove-rezani-preklizky-s355088#.VST9K5M3Rzk>
- [23] ChristyAl Plagues & Engraving: Firemní stránky [online]. 2013 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://caplaques.com/>
- [24] DAHOTRE, Narendra B, HARIKAR, Sandip P. Laser Fabrication and Machining of Materials. Springer. 2008. ISBN 978-0-387-72343-3.
- [25] MAJUMDAR, Dutta Jyotsna, MANNA, Indranil. Laser - Assisted Fabrication of Materials. Springer. 2013. ISBN 978-3-642-28358-1.
- [26] Laserové řezání: Univerzitní stránky [online]. 2015 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-rezani>
- [27] Výrobky metodou AWJ: Firemní stránky [online]. 2006 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/materialy>
- [28] BRYM. R. Trendy vývoje obrábění vodním paprskem: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 68s.
- [29] KRAMOLIŠ. L. Laserové řezání s podporou vzduchu. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 129s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa.
- [30] RADOVANOVIC. M¹⁾. DAŠIČ. P²⁾. RESEARCH ON SURFACE ROUGHNESS BY LASER CUT. ¹⁾University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering, Nis, Serbia, ²⁾ High Technical Mechanical School, Trstenik, Serbia, 2006. Dostupný z WWW: <http://www.om.ugal.ro/AnnalsFasc8Tribology/pdf/2006/13-Annals2006-Radovanovic.pdf>
- [31] LITHERLAND. B. Tips for successful laser marking in job shops [online]. 2012 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2012/09/tips-for-successful-laser-marking-in-job-shops/>
- [32] NACHÁZEL, Jan, KOUKOLÍKOVÁ, Martina. Metallographic analysis. 17. 12. 2014, [cit. 2015-03-25].

Seznam příloh

Příloha 1

Měřicí stroj: Drsnoměr HOMMEL – ETAMIC T8000, software TURBO WAVE V 7.45

Příloha 2

Měřicí protokol drsnosti pro nůž vyrobený pomocí elektrojiskrového obrábění.

Příloha 3

Měřicí protokol drsnosti pro nůž vyrobený pomocí laserového obrábění.

Příloha 4

Měřicí protokol drsnosti pro nůž vyrobený pomocí laserového obrábění s následným ofrézováním kontury nože.

Příloha 1

Měřicí stroj: Drsnoměr HOMMEL – ETAMIC T8000, software TURBO WAVE V 7.45

HOMMEL-ETAMIC T8000 DRSNOMĚŘ

Měřicí pracoviště pro měření drsnosti a vlnitosti povrchu



Možnost kombinace měření drsnosti a profilu povrchu

Detail umístění snímače drsnosti TKU 300/600



HOMMEL-ETAMIC T8000, křížový stolek MT1, stůl GTR

Systém HOMMEL-ETAMIC T8000 je flexibilním řešením pro měření drsnosti a vlnitosti povrchu jednotlivých součástek. Systém T8000 má stavebnicový design, který umožňuje vzájemné propojení různých posuvových jednotek, typů snímačů, sloupů a granitových desek.

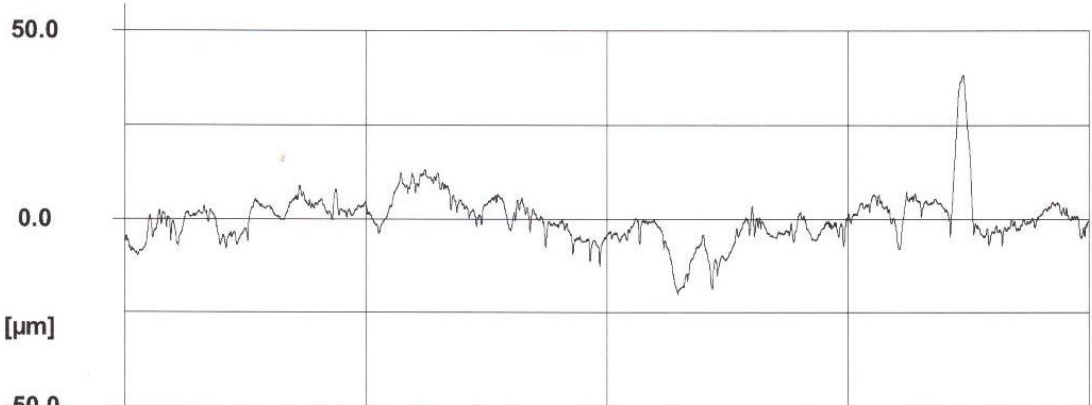
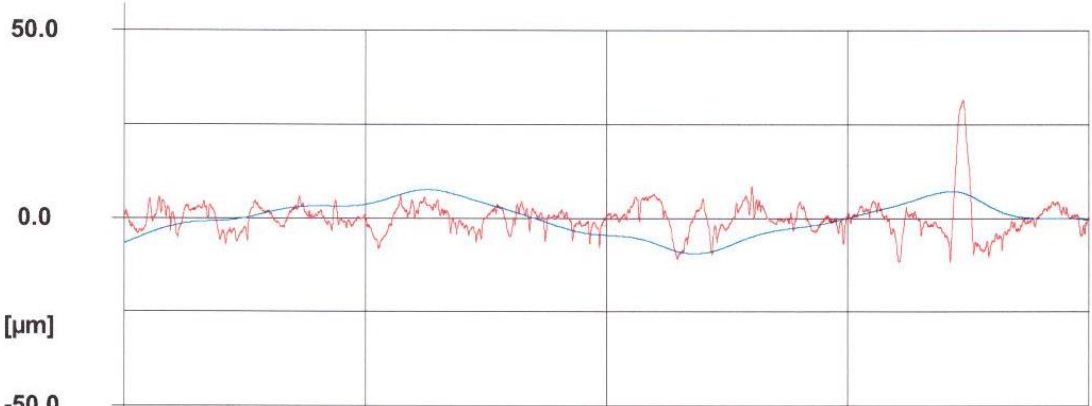
Popis

- » Různé softwarové moduly jsou k dispozici pro měření drsnosti, vlnitosti, profilů a topografie
- » Možnosti volby CNC umožňují automatizované měření a vyhodnocení
- » Jednoduchý a intuitivní software
- » Vzhled obrazovky pro měření a tisk lze přizpůsobit požadavkům jednotlivých uživatelů
- » Standardní rozhraní pro statistické zpracování dat (QS-STAT)

Typ přístroje	T8000					
Posuvový přístroj	Maximální dráha / mm	Posuvová rychlost mm/s	Přesnost vedení	Měřicí systém	Rozišení	Přesnost osy X
Waveline 120	120	0,1 - 3,00	≤0,4 μm/120 mm	Lineární pravítka	0,01/0,1 μm	±1,0 μm
Waveline 200	200	0,1 - 3,00	≤0,8 μm/200 mm	Lineární pravítka	0,01/0,1 μm	±1,0 μm
Měřicí sloup	Výškový posuv mm	Posuvová rychlost mm/s				
Wavelift 400 Manual	400	Manual				
Wavelift 400	400	0,1 - 12,0				
Wavelift 800	800	0,1 - 12,0				
Naklápací jednotka	Rozsahpřestavení	Jemné stavění	Opakovatelnost			
S jemným stavěním	±45,0	±5,0	-			
S hrubým stavěním	±45,0	-	-			
S motorickým stavěním	±45,0	-	0,005°			
Granitové desky	Rozměry D x Š x V (mm)	Hmotnost (kg)				
630	630 x 500 x 100	93				
780	780 x 500 x 100	117				
1000	1000 x 500 x 140	150				
Parametry						
Drsnost ISO 4287	Ra, Rz, Rmax, Rt, Rq, Rsk, lmo, lo, Rdq, da, ln, La, Lq, Rz-ISO, R3z, Rpm, Rp3z, R3zm, Rp, D, Rfc, RSm, Rpm/R3z, lr, Rku, tpiif, tpia, tpiip, tpic, Rt/Ra, Rz1, Rz2, Rz, Rz4, Rz5, Rmr, Rmr%, Api					
Rk ISO 13565-1 až 13565-3	Rpk*, Rpk, Rk, Rvk*, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo (70 %) 0,01°, Rv / Rk, Rvq, Rmq					
Primární profil ISO 4287	Pc', Pp, Pz, Pa, Pq, Psk, PSm, Pdq, lp, Pku, tpaif, tpaef, tpab, tpac, Pmr0, Apa, Apa%, Pmr, Pmr%					
Vlnitost ISO 4287	Wt', Wp, Wz, Ws, Wq, Wsk, WSm, Wdq, Wdc, Ww, Wku, WD1c', WD1p, WD1z, WD1a, WD1q, WD1sk, WD1Sm, WD1dq, WD1lw, WD1fc, WD2c', WD2p, WD2z, WD2a, WD2q, WD2sk, WD2Sm, WD2dq, WD2w, WD2ku, WD2pc					
Vlnitost podle VDA 2007	WDC, WDC, WDSm					
Motif DIN EN ISO 12085	R, Rx, AR, Nr, W, Wx, AW, Nw, Wte, Tpaif (CR, CL, CF)					
JIS B - 0601	Rz-JIS; Rmax-JIS					

Příloha 2

Měřicí protokol drsnosti pro nůž vyrobený pomocí elektrojiskrového obrábění.

Měřicí protokol					
HOMMEL-ETAMIC TURBO WAVE V7.45 Měricí podmínky SniMAC: TKU300 Mer.rozsah: 400 μm Lineární pos. přístroj: waveline 120 Měricí draha (Lt): 4.80 mm Posuvová rychlost (Vt): 0.50 mm/s Mer.hodnoty: 9411			Zakazník: Goldfinger Nůž 2, řez 1		
P- Profil vyrovnan Lc/Ls = VYP					
					
SniMAC TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s					
Pt	58.43 μm	Rt	43.39 μm	Wt	17.15 μm
Pz	58.43 μm	Rz	21.32 μm	Wz	9.54 μm
Pa	5.02 μm	Ra	3.01 μm	Wa	3.70 μm
PSm	0.5863 mm	RSm	0.1849 mm	WSm	2.9990 mm
R- W- Profil vyrovnan Filtr ISO 16610-22 Lc = 0.800 mm					
					
SniMAC TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s					
Měřil: Kutlwašer				09.04.15 13:24	

Příloha 3

Měřicí protokol drsnosti pro nůž vyrobený pomocí laserového obrábění.

Měřicí protokol					
HOMMEL-ETAMIC TURBO WAVE V7.45 Měricí podmínky Snimac: TKU300 Mer.rozsah: 400 µm Lineární pos. přístroj: waveline 120 Měricí dráha (Lt) : 4.80 mm Posuvová rychlost (Vt): 0.50 mm/s Mer.hodnoty: 9600			Zakazník: Goldfinger Nůž 1, řez 1		
<p style="text-align: center;">P- Profil vyrovnan Lc/Ls = VYP</p> <p style="text-align: center;">Snimac TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s 4.80</p>					
Pt	25.66 µm	Rt	24.01 µm	Wt	5.67 µm
Pz	25.66 µm	Rz	19.62 µm	Wz	2.90 µm
Pa	3.55 µm	Ra	3.18 µm	Wa	1.04 µm
PSm	0.1782 mm	RSm	0.1180 mm	WSm	2.5570 mm
<p style="text-align: center;">R- W- Profil vyrovnan Filtr ISO 16610-22 Lc = 0.800 mm</p> <p style="text-align: center;">Snimac TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s 4.80</p>					
Měřil: Kutlwašer					09.04.15 13:26

Příloha 4

Měřicí protokol drsnosti pro nůž vyrobený pomocí laserového obrábění s následným ofrézováním kontury nože.

Měřicí protokol			
HOMMEL-ETAMIC TURBO WAVE V7.45 Měřicí podmínky SniMAC: TKU300 Mer.rozsah: 400 µm Lineární pos. přístroj: waveline 120 Měřicí draha (Lt) : 4.80 mm Posuvová rychlost (Vt): 0.50 mm/s Mer.hodnoty: 9411		Zakazník: Goldfinger Nůž 3, řez 1	
<p style="text-align: center;">P- Profil vyrovnan Lc/Ls = VYP</p> <p style="text-align: center;">SniMAC TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s 4.80</p>			
Pt 7.71 µm Pz 7.66 µm Pa 0.83 µm PSm 0.2236 mm	Rt 7.30 µm Rz 5.45 µm Ra 0.81 µm RSm 0.1984 mm	Wt 2.65 µm Wz 1.12 µm Wa 0.25 µm WSm 0.6928 mm	
<p style="text-align: center;">R- W- Profil vyrovnan Filtr ISO 16610-22 Lc = 0.800 mm</p> <p style="text-align: center;">SniMAC TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s 4.80</p>			
Měřil: Kutlwašer			09.04.15 13:22