

Nové trendy v oblasti elektroerozivního obrábění

Jiří Bílek

Bakalářská práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Bílek**
Osobní číslo: **T16652**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Nové trendy v oblasti elektroerozivního obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice elektroerozivního obrábění:
2. Nekonenční technologie obrábění, definice, rozdělení.
3. Elektroerozivní obrábění (EDM), definice, posuzované parametry, popis materiálů elektrod, výhody, nevýhody, výrobcí.
4. Uplatnění EDM u nástrojů pro zpracování polymerů, automatizace a robotizace, konkrétní použití.
5. Experimentální část
6. Vytipování elektrod z reálné výroby
7. Měření rozměrů moderními metodami kontrolního měření
8. Srovnání s CAD daty, charakterizace kritických tvarů a ploch
9. Vyhodnocení a doporučení pro praxi

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Fojtl, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2017**

Ve Zlíně dne 31. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Bílek Jiří


Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15. 5. 2017


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá měřením rozměrů nástrojových elektrod pro elektroerozivní hloubení ve výrobě vstřikovacích forem. Práce obsahuje základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění se zaměřením na elektroerozivní obrábění a popis technologie 3D skenování. Cílem práce je zhodnocení kritických míst a tvarů elektrod, která vznikla při výrobě těchto elektrod a při jejich následném užití v technologii elektroerozivního obrábění.

Klíčová slova: elektroerozivní obrábění, elektroda, 3D skenování, CAD, vstřikovací forma

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the measurement of dimensions of tool electrodes for electrical discharge sinking in mold manufacturing. It comprises basic division of unconventional machining methods focusing on electrical discharge machining and description of 3D scanning technology. The aim of the thesis is evaluation of critical electrode areas and shapes, which were created in their production and in their consecutive use in electrical discharge machining technology.

Keywords: electrical discharge machining, electrode, 3D scanning, CAD, injection mold

Tímto chci poděkovat panu Ing. Ladislavu Fojtlovi, Ph.D. za jeho ochotu, čas, rady a odborné vedení při vypracovávání této bakalářské práce. Děkuji také panu Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D. za jeho čas a pomoc v průběhu skenování elektrod a také součásti Cebia Tech za možnost využít jejich 3D skener pro potřeby této bakalářské práce. Velké poděkování patří také firmě MESIT foundry, a.s. a všem jejich zaměstnancům, kteří mi předali cenné zkušenosti a ukázali jednotlivé kroky a technologie používané při výrobě forem. Dále děkuji Ing. Ivo Hlaváčovi za pomoc při grafické úpravě a v neposlední řadě děkuji své rodině a přítelkyni za podporu a poskytnutí potřebného zázemí v průběhu studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	12
1.1 ROZDĚLENÍ NMO	12
1.2 ELEKTRICKÉ METODY OBRÁBĚNÍ.....	13
1.2.1 Elektroerozivní obrábění	13
1.2.2 Elektrochemické obrábění.....	14
1.3 OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM LASERU	15
1.4 OBRÁBĚNÍ ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM	17
1.5 OBRÁBĚNÍ IONTOVÝM PAPRSKEM.....	17
1.6 OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM PLASMY	18
1.7 CHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (LEPTÁNÍ)	19
1.8 OBRÁBĚNÍ ULTRAZVUKEM	19
1.9 OBRÁBĚNÍ KAPALINOVÝM PAPRSKEM	20
1.10 OBRÁBĚNÍ PROUDEM BRUSIVA	22
2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ	24
2.1 PRINCIP ELEKTRICKÉ EROZE	24
2.1.1 Vyjádření principu elektroeroze:.....	25
2.1.2 Parametry metody EDM	26
2.2 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE (GENERÁTORY)	26
2.2.1 Závislé generátory (RC a RLC)	26
2.2.2 Nezávislé (pulsní) generátory	27
2.3 NÁSTROJOVÉ ELEKTRODY	28
2.4 KAPALNÉ PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ (DIELEKTRIKUM)	29
2.5 TECHNOLOGICKÉ VYUŽITÍ ELEKTROEROZE.....	32
2.5.1 Elektroerozivní hloubení dutin a vyjiskřování ulomených nástrojů	32
2.5.2 Elektroerozivní drátové řezání	35
2.6 VÝHODY A NEVÝHODY ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ	36
2.7 VÝROBCI EDM STROJŮ	37
2.7.1 Mitsubishi.....	38
2.7.2 OPS Ingersoll	39
2.7.3 Sodick.....	39
2.7.4 GF Machining Solutions	40
2.7.5 Výrobci v České republice	41
2.8 AUTOMATIZACE EDM	42
2.8.1 Integrované automatizační systémy	42
2.8.2 Externí automatizační systémy	42
2.8.3 Flexibilní automatizační projekty	43

3	3D SKENOVÁNÍ	44
3.1	ZÁKLADNÍ PŘEHLED METOD 3D SKENOVÁNÍ	44
3.1.1	Mechanické řízené 3D skenery	46
3.1.2	Mechanické ruční 3D skenery	47
3.1.3	Laserové 3D skenery	48
3.1.4	Optické 3D skenery „white light“	49
3.1.5	CT 3D skenery	51
3.1.6	Destruktivní 3D skenery	51
3.1.7	Ultrazvukové 3D skenery	52
3.2	OBLASTI VYUŽITÍ 3D SKENOVÁNÍ	52
3.2.1	Kontrola kvality výroby	52
3.2.2	Kopírování výrobku	53
3.2.3	Verifikace FEM analýz	54
II	PRAKTICKÁ ČÁST	55
4	ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI	56
5	POPIS ELEKTROD	57
5.1	ELEKTRODA 1	57
5.2	ELEKTRODA 2.....	58
5.3	ELEKTRODA 3.....	59
5.4	ELEKTRODA 4.....	61
6	MĚŘENÍ ROZMĚRŮ	62
6.1	ATOS TRIPLE SCAN.....	62
6.2	PRŮBĚH MĚŘENÍ	62
6.2.1	Kalibrace	62
6.2.2	Skenování	63
6.2.3	Chyba při měření.....	64
7	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	66
7.1	SROVNÁNÍ S CAD DATY	66
7.1.1	Elektroda 1	66
7.1.2	Elektroda 2	67
7.1.3	Elektroda 3	67
7.1.4	Elektroda 4	68
7.2	SROVNÁNÍ SKENŮ PŘED A PO ELEKTROEROZI	69
7.2.1	Elektroda 1	69
7.2.2	Elektroda 2	70
7.2.3	Elektroda 3	71
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK	80

ÚVOD

Elektroerozivní obrábění je jednou z nekonvenčních metod obrábění. Aby mohla být tato metoda uplatněna, je nutné, aby byl obrobek z vodivého materiálu, protože metoda k úběru materiálu využívá účinky elektrického výboje. Technologie elektroerozivního obrábění nejčastěji nachází uplatnění při výrobě tvarových dutin vstřikovacích forem, při výrobě střížných nástrojů, nebo při hloubení průchozích děr (např. vstřikovací trysky spalovacích motorů). Mezi výhody této metody patří schopnost obrábět vodivé materiály neohledě na jejich mechanické vlastnosti nebo snížení pracnosti při výrobě složitých tvarů.

3D skenování je technologie, která zprostředkovává digitalizaci dat prostorových objektů. Pro tuto technologii existuje řada možností a variant, jak toho dosáhnout. Jedná se například o mechanické, laserové či optické 3D skenery, kdy každý skener shromažďuje data svým specifickým způsobem. Tato technologie má široké uplatnění – od kriminalistiky a medicíny až po průmyslové využití (např. kontrola kvality výroby).

Tato práce má za úkol porovnání rozměrů a tvarů nástrojových elektrod, které jsou určeny pro elektroerozivní hloubení v tvarových dutinách vstřikovacích forem. Rozměry budou měřeny v jednotlivých fázích pracovního procesu, přičemž měření bude probíhat pomocí 3D optického skeneru ATOS Triple Scan II.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Pod souhrnný název NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ (dále jen 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]

Mechanické vlastnosti (tvrdość a pevnost) nelimitují obrobiteľnosť materiálu u většiny NMO. Obrobiteľnosť je především vázána fyzikálními vlastnostmi (např. tepelná a elektrická vodivost, teplota tavení, elektroerozivní odolnosť, chemické složení, apod.). [1]

Požadavky zbrojního a kosmického průmyslu na obrábění obtížně obrobiteľných materiálů, nových materiálů a složitých tvarů jsou hlavními faktory, které přispěly k rozvoji nekonvenčních metod. Tyto oblasti průmyslu soustřeďují potřebné finanční prostředky a vědecko-výzkumné kapacity pro úspěšné dokončení vývoje a zavedení nových zařízení do výrobní praxe. Díky tomu proběhlo rozšíření jednotlivých NMO do všech odvětví strojírenské výroby. Tam také pokračuje další vývoj těchto metod. [1]

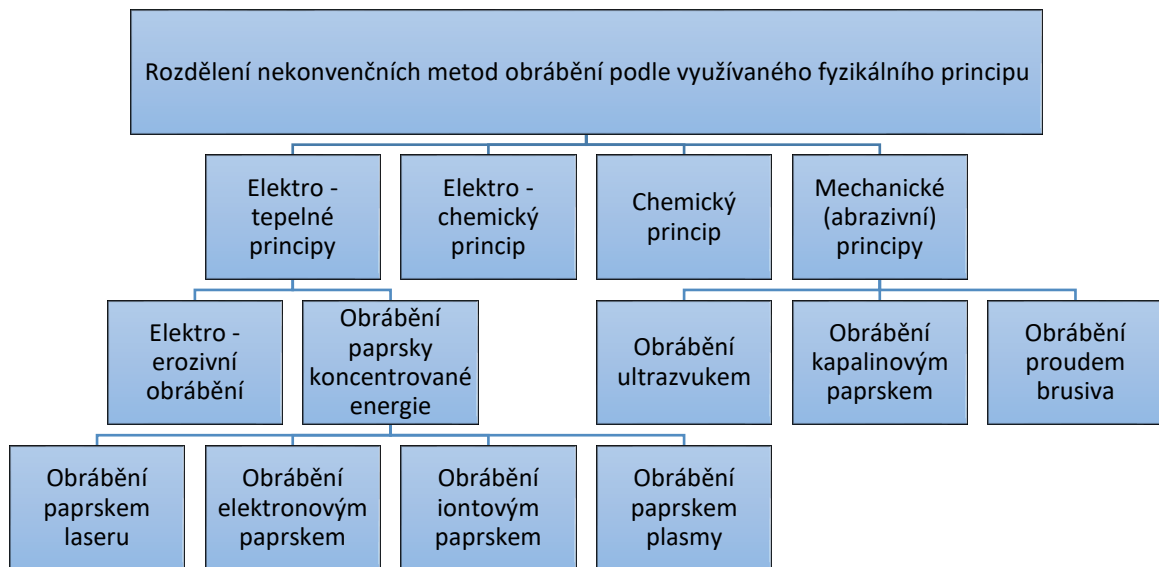
1.1 Rozdělení NMO

Hlavní rozdíly jednotlivých NMO jsou v použitých fyzikálních účincích pro obrábění. Na Obr. 1. je rámcové rozdělení NMO na základě využívaného principu nebo způsobu využití energie. Názvy, které vidíme na obrázku, jsou běžně používány i v praxi. [1]

Podstatou NMO s elektro-tepelným principem je řízené odtavování materiálu, na které využívají převážně teplo. Elektrochemické obrábění kovů je založeno na intenzivní elektrolýze známé z galvanických procesů. S ohledem na přímé působení elektrického proudu na úběr materiálu zahrnujeme elektroerozivní a elektrochemické obrábění pod společný název ELEKTRICKÉ METODY OBRÁBĚNÍ. [1]

NMO s chemickým principem napřímou využívají chemických reakcí pro obrábění (např. chemické obrábění, termické odstraňování otřepů). [1]

Principem mechanických (abrazivních) metod obrábění je stimulace abrazivních nebo erozivních účinků vhodných látek, např. brusiv a kapalin. [1]



Obr. 1. Rozdělení NMO [1]

1.2 Elektrické metody obrábění

Úběr materiálu elektrických metod obrábění (EMO) je způsoben přímým působením elektrického proudu bez přeměny na energii mechanickou. Další charakteristické znaky EMO jsou:

- možnost obrábět všechny elektricky vodivé materiály,
- mechanické vlastnosti materiálu prakticky neovlivňují jeho úběr,
- při odebrání materiálu nepůsobí na obrobek žádné mechanické síly kromě tlaku elektrolytu nebo dielektrika. [1]

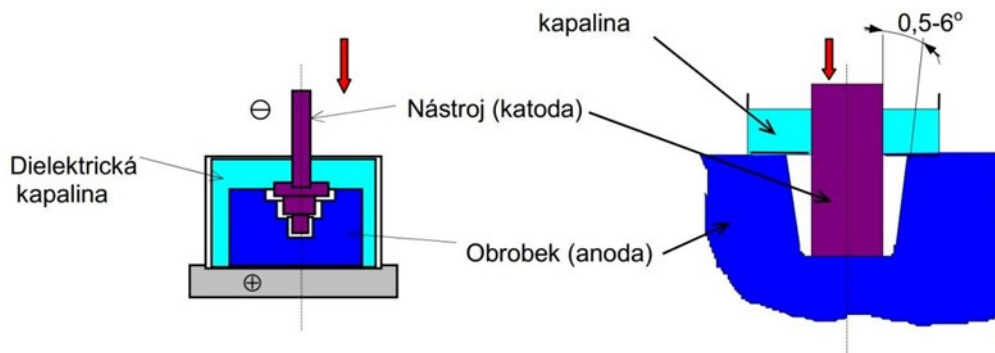
Dle principu působení elektrické energie rozdělujeme EMO na:

- Elektroerozivní obrábění
- Elektrochemické (elektrolytické) obrábění [1]

1.2.1 Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění se řadí mezi NMO využívající elektro-tepelných principů úběru materiálu (podléhají mu všechny vodivé materiály) a je nejrozšířenější nekonvenční metodou obrábění. Pro jeho označení se v mezinárodní literatuře vžila zkratka EDM (z angl. Electro Discharge Machining). [1], [6]

Elektrická eroze je fyzikální jev, který způsobuje odebrání povrchových vrstev materiálů účinkem tepelného a tlakového působení, krátkodobého, ale velmi intenzivního elektrického výboje. Mezi metody využívající elektrickou erozi patří elektrojiskrové hloubení, děrování a řezání. Více je tato technologie popsána v kapitole 2. [2]



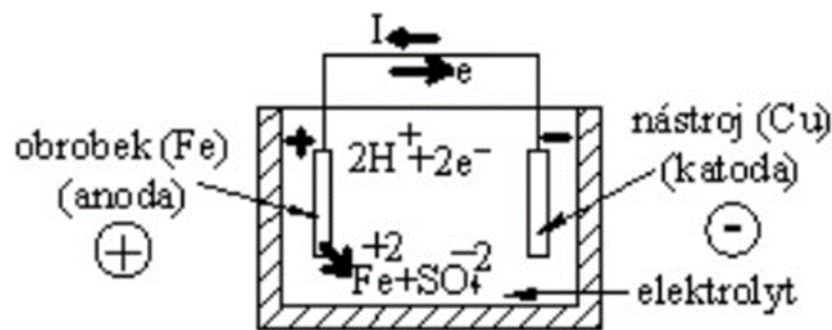
Obr. 2. Princip metody elektroerozivního hloubení [2]

1.2.2 Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění využívá poznatky o působení elektrického proudu na kapalný vodič, kterým je elektrolyt. Tento fyzikální jev je znám pod pojmem elektrolyza a jeho nejznámější uplatnění je v galvanotechnice. Pro označení elektrochemického obrábění se v mezinárodní literatuře vžila zkratka ECM (z angl. Electro Chemical Machining). [1]

Na rozdíl od elektrolyzy, běžně používané při pokovování a výrobě kovů, je při ECM podstatou řízené elektrolytické rozpouštění materiálu obrobku tvořícího anodu, která je společně s měděnou nebo ocelovou katodou ponořena do elektrolytu. Při zapojení obou elektrod na zdroj stejnosměrného proudu směřují záporné anionty elektrolytu k anodě a kladné kationty k nástrojové katodě. Na elektrodách odevzdávají ionty svůj náboj a chemicky reagují s materiálem anody, čímž dochází k jejímu postupnému rozpouštění. [1], [2]

Intenzita rozpouštění závisí na hustotě proudu. Použitím nižší hustoty proudu můžeme provádět např. elektrochemické leštění. Pokud pro obrábění zvolíme vysokou hustotu proudu, na obou elektrodách se začnou usazovat soli a oxidy. Tvoří se tzv. pasivační vrstvička zabraňující anodickému rozpouštění. Její tvorbě lze zamezit buď proudícím elektrolytem, nebo rotující katodou. [2]



Obr. 3. Princip metody elektrochemického obrábění [3]

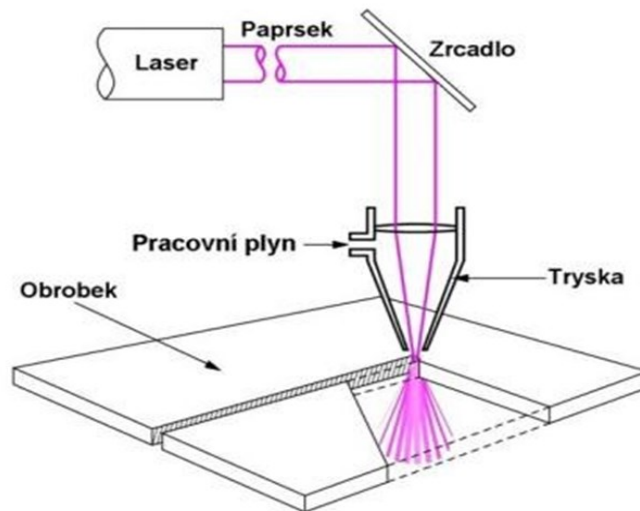
V současnosti se ECM řadí mezi běžné progresivní metody obrábění těžkoobrobitelných materiálů a předmětů složitých tvarů. Jedná se o bezsilové obrábění, při kterém nevznikají napětí pod obráběným povrchem, na kterém se nevytváří ořepy. Používá se především:

- pro hloubení kovacích záпустek při výrobě lisovacích forem a vstřikovacích forem pro plasty,
- v automobilovém průmyslu,
- při výrobě přístrojů, implantátů a protéz pro medicínu,
- v leteckém průmyslu při výrobě lopatek turbín motorů,
- při výrobě tvářecích nástrojů. [15], [21]

1.3 Obrábění paprskem laseru

Úběr materiálu při obrábění je způsoben účinkem silného paprsku monochromatického světla na velmi malou plochu. Laserový paprsek ohřeje dané místo na velmi vysokou teplotu až 10 000°C, která způsobí roztavení materiálu. Laserem se obrábí různé materiály od dřeva přes plasty až po těžkoobrobitelné materiály. Výhodou metody je vysoká přesnost a úzké řezy. [4]

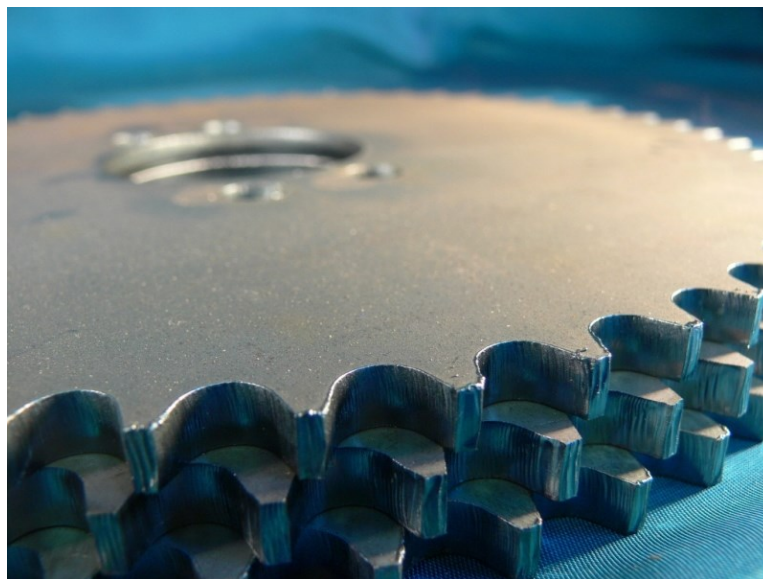
Laserové světlo vzniká v prostředí elektromagnetického záření. Princip je založen na vysoké koncentraci elektromagnetického záření viditelného světla na malou plochu obrobku, čímž se přemění na tepelnou energii přesahující teplotu tavení obráběného materiálu, který se v místě dopadu roztaví a vypaří. [4]



Obr. 4. Princip metody obrábění laserem [4]

Laser se používá pro tyto operace:

- popisování součástí,
- řezání a vyřezávání,
- svařování a pájení
- tepelné zpracování,
- nanášení povlaků,
- vrtání (palivové filtry, karburátorové trysky),
- soustružení,
- frézování a gravírování [5]

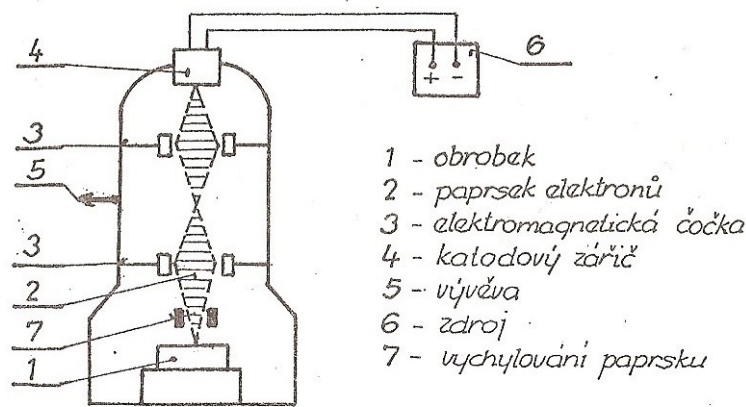


Obr. 5. Ozubená kola vyřezaná laserem [16]

1.4 Obrábění elektronovým paprskem

Obrábění elektronovým paprskem má vysoce specifický charakter. Oblast použití metody je zejména v leteckém a kosmickém průmyslu a v oblasti technologie výroby polovodičů a mikroelektronických prvků. [1]

Zjednodušený princip metody je znázorněn na Obr. 6. Podstatou zařízení je elektronové dělo, které slouží ke generaci, urychlení a zaostření svazku elektronů. Vytvořením vakua v zařízení zajistíme zachování elektronového paprsku při průchodu pracovní komorou. Lokální přehřátí, natavení a případně i odpaření je způsobeno kinetickou energií, kterou předá urychlený svazek elektronů ve formě tepla při dopadu na obráběný materiál. [1]



Obr. 6. Schéma zařízení pro obrábění elektronovým paprskem [1]

1.5 Obrábění iontovým paprskem

Obrábění iontovým paprskem využívá kinetickou energii iontů, které působí ve vakuu na opracovávaný materiál a na hustotě jejich proudu závisí velikost úběru materiálu. Elektrony vyzařující z katody ionizují argon, který je obvykle zdrojem proudu iontů. Ionty s vysokou kinetickou energií působí na povrch obrobku a vytlačují atomy materiálu. Při této metodě se nevytváří teplo a nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy. [1]

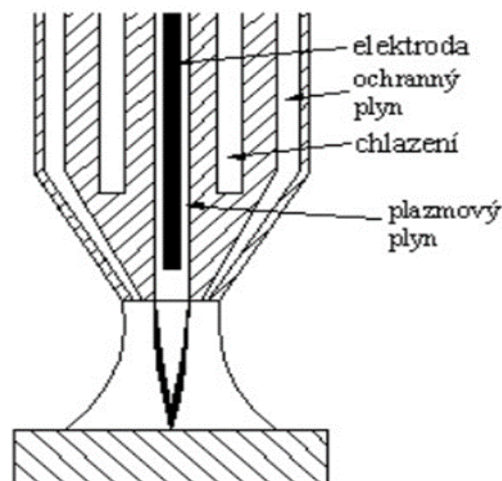
Použití technologie iontového paprsku na úběr materiálu je soustředěné v oblasti optiky, elektroniky a polovodičové techniky. Svoje místo ale nachází i ve strojírenské výrobě. Jednotlivé operace technologie iontového paprsku mají následující oblasti využití:

- Hlazení a vyhlazování povrchů – výroba zrcadel pro lasery, modifikace tloušťky tenkých filmů,

- Strukturování a tvoření textury – úprava povrchu a chemické čištění biologických implantátů pro medicínu za účelem zvýšení jejich životnosti a biokompatibility,
- Iontové čištění – bombardování povrchu ionty argonu pro získání chemicky čistého povrchu,
- Tvarování, ostření a leštění – výroba integrovaných obvodů, holografických masek, akustických filtrů, ostření diamantového nářadí (dotykové hroty snímačů, hroty tvrdoměrů, soustružnické nože pro mikroobrábění),
- Iontové frézování – výroba mělkých drážek. [15]

1.6 Obrábění paprskem plasmy

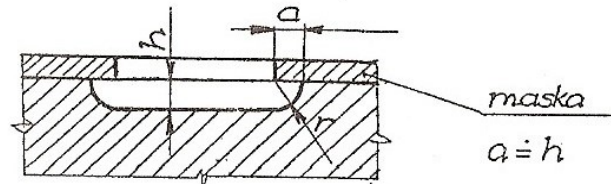
Princip metody obrábění paprskem plasmy je založen na tavení materiálu teplotou vyšší než 10000 °C. Mezi netavící se elektrodou (katoda) a řezaným materiálem (anoda) hoří elektrický oblouk, ve kterém dochází k rozkladu molekul plynu s vysokým vývinem tepla. Úzký paprsek plasmy (plynného stavu hmoty) vycházející z hořáku je zionizován a v důsledku toho je dobře vodivý pro elektrický proud. Materiál se taví a je vytlačován z místa řezu pomocí kinetické energie proudu. Používá se pro výrobu děr, zápustek, drážek a závitů do velmi tvrdých materiálů. [1], [3]



Obr. 7. Princip metody obrábění paprskem plasmy [3]

1.7 Chemické obrábění (leptání)

Tato technologie využívá chemické reakce mezi obrobkem a chemickou látkou pro obrábění. Vrstvy materiálu o tloušťce několika setin milimetru až několika milimetrů se řízeně odleptávají z povrchu obrobku. Plochy, které nechceme obrábět, se chrání speciálním povlakem (nátěrem) či maskou. [1]



Obr. 8. Princip metody chemického obrábění [1]

Oblasti použití:

- výroba měkkých, několik setin milimetru hlubokých, tvarově složitých reliéfů,
- úběr velkých ploch do malých tlouštěk a složitých tvarů (nosníky v leteckých konstrukcích, potahy křídel z hliníku apod.),
- obrábění tenkostěnných součástí,
- obrábění tvarově složitých a málo tuhých součástí, které lze obtížně upínat, aniž by došlo k jejich deformaci reznými nebo upínacími silami,
- výroba děr do tenkostěnných trubek a fólií. [5]

1.8 Obrábění ultrazvukem

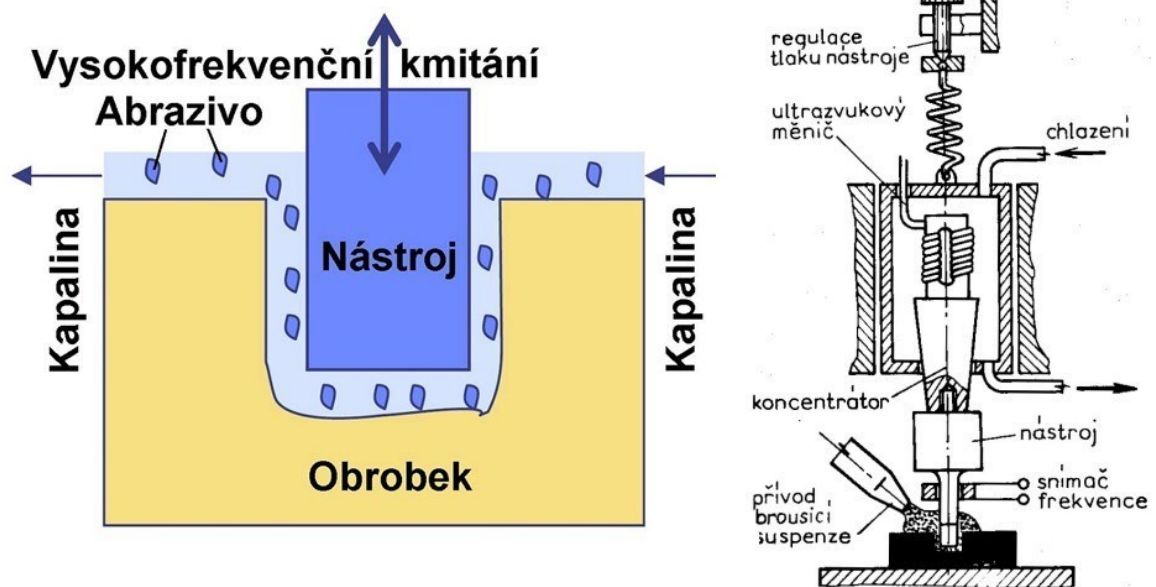
Tato metoda se používá pro obrábění tvrdých, křehkých a elektricky nevodivých materiálů. Brusivo ve formě suspenze se přivede mezi ultrazvukem rozkmitaný nástroj a obráběný materiál. Úběr materiálu je způsoben abrazivním účinkem brusiva. [4]

Zrna brusiva jsou vlivem tlaku kmitajícího nástroje vtlačována do materiálu, kde odebírají jeho drobné částice. Podle druhu obrobku si zvolíme druh brusiva (pro měkčí materiály karbid křemíku, pro tvrdší karbid boru). Nevýhodou metody je, že abrazivní účinek působí kromě obrobku i na nástroj. [4]

Tato technologie se charakterizuje jako širokospektrální, na což poukazují i nejvýznamnější oblasti použití, jako jsou:

- dělení materiálů,

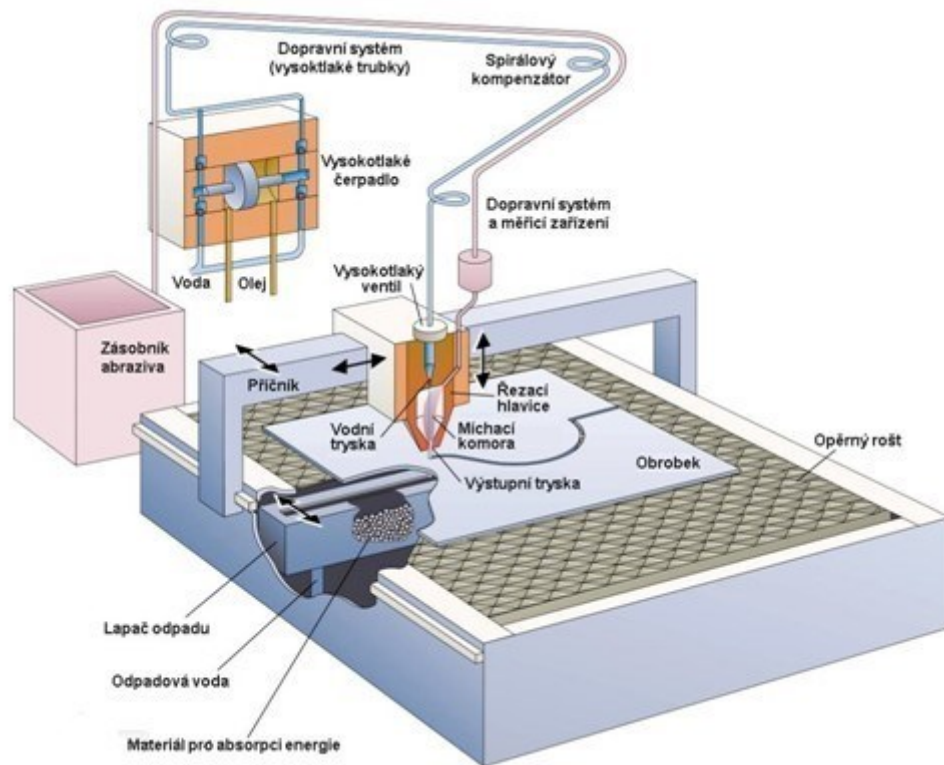
- hloubení drážek a otvorů kruhových ale i nesymetrických tvarů,
- vrtání hlubokých otvorů pro hlavňové systémy, kde se využívá ultrazvukové kmitání nástroje pro intenzifikaci klasického vrtání,
- frézování a řezání závitů,
- broušení, leštění a lapování skla a keramiky,
- opracování tvarově složitých elektrod pro elektroerozivní metody obrábění,
- řezání a vrtání materiálů a kevlarových vláken, řezání termoplastů a řezání gumy, kde se vytvářejí tzv. čistě řezy bez otřepů. [15]



Obr. 9. Obrábění ultrazvukem [4]

1.9 Obrábění kapalinovým paprskem

Principem technologie je přeměna kinetické energie molekul kapaliny (případně směsi kapaliny a zrn brousícího materiálu) na mechanickou práci, za současného působení kavitační koroze. Paprsek pracovní kapaliny vstupuje při vysokých tlacích (200 až 600 MPa) z pracovní trysky rychlostí až čtyřikrát větší než je rychlost zvuku a svým účinkem na okolí se chová jako pevné těleso. V kapalině vznikají za určitých podmínek bubliny vyplněné sytou párou, při jejich zániku vznikají rázy a dochází k vytrhávání částic materiálu z povrchu součásti, tzv. kavitační korozi. [5]



Obr. 10. Princip metody obrábění kapalinovým paprskem [4]

Oblasti použití:

- Chemický průmysl – dělení výbušných látek (dynamit, tuhá paliva do raketových motorů),
- Potravinářský průmysl – dělení ovoce a zeleniny v surovém a zmraženém stavu (maso, dorty, čokoláda, atd.),
- Strojírenský průmysl – výroba lopatek a dílů tryskových a raketových motorů, turbín a kompresorů, řezání materiálů, široké uplatnění v kosmickém, leteckém a loďařském odvětví,
- Gumárenský průmysl – řezání gumy, plastů, kevlarových vláken,
- Jaderný průmysl – dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v zařízeních pro jaderné elektrárny, čištění a odstraňování usazenin. [15]



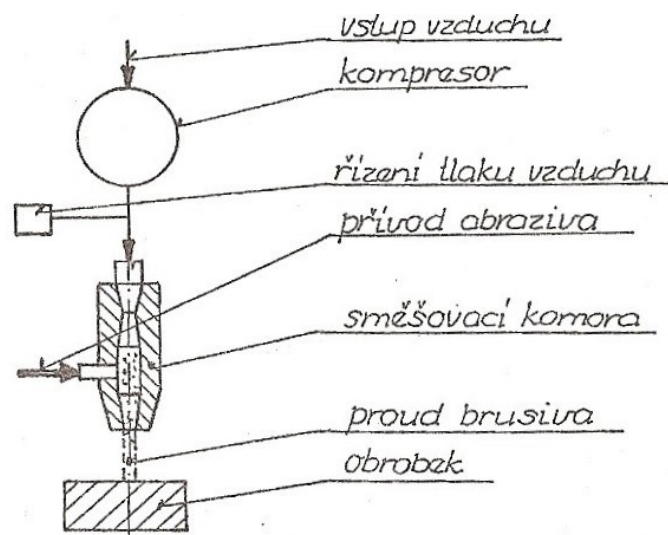
Obr. 11. Ozubená kola vyřezaná vodním paprskem [16]

1.10 Obrábění proudem brusiva

Při této technologii je proudem vzduchu o vysoké rychlosti unášeno brusivo, jehož abrazivní účinky způsobují úběr materiálu. Princip úběru materiálu je podobný jako při obrábění ultrazvukem, tj. brusným účinkem dopadající částice brusiva s vysokou kinetickou energií. Mezi těmito technologiemi je však i přes podobný mechanismus úběru víc odlišností než podobností. Příkladem je rychlost úběru materiálu, kdy obrábění proudem brusiva můžeme označit za proces pomalého úběru materiálu (na rozdíl od obrábění ultrazvukem). Metoda také generuje méně tepla, když se používá stlačený vzduch jako nosné médium pro brusný prášek. V neposlední řadě je tento proces méně ekonomicky náročný. [1], [15]

Materiál je při procesu odstraňován mechanickým působením směsi stlačeného vzduchu nebo jiného průmyslového plynu s velmi jemnými částicemi ve formě brusných prášků. Nejčastěji používané prášky jsou na bázi taveného oxidu hlinitého a karbidu křemíku. [15]

Obrábění proudem brusiva se používá např. při výrobě drážek do polovodičů, rytí registračních čísel do oken automobilů, odstraňování otřepů u chirurgických jehel, hydraulických ventilů, součástí leteckých motorů, otryskávání součástí apod. [5]



Obr. 12. Princip metody obrábění proudem brusiva [1]

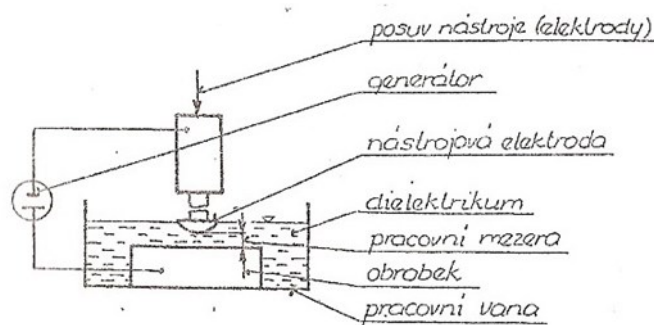
2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Zahrnuje řadu metod, které spojuje jeden charakteristický znak – úběr materiálu je způsoben pomocí periodicky se opakujících výbojů mezi nástrojem a obrobkem. [4]

2.1 Princip elektrické eroze

Úběr materiálu elektrickým výbojem je velmi složitý fyzikální jev. Elektroeroze probíhá mezi dvěma elektrodami ponořenými do kapalného média (Obr. 13). Toto médium je kapalina s vysokým elektrickým odporem – dielektrikum. Elektrický výboj mezi elektrodami (nástrojem a obrobkem) je podmíněn napětím, jehož výše závisí na:

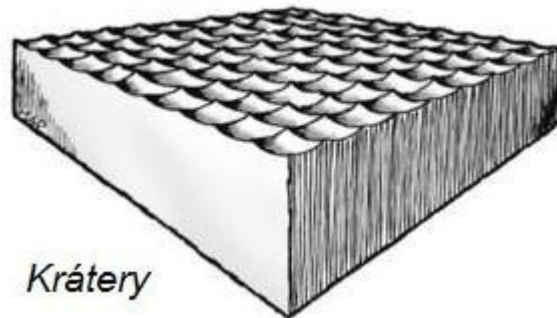
- vzdálenosti mezi elektrodami,
- vodivosti dielektrické kapaliny,
- znečištění dielektrika. [1]



Obr. 13. Princip zařízení pro EDM [1]

Elektrické napěťové pole, které je mezi elektrodami, uvádí do pohybu volné záporné a kladné ionty. Ionty se zrychlují a nabývají vysoké rychlosti, v důsledku čehož se vytvoří ionizovaný (vodivý) kanál. Mezi elektrodami začne protékat elektrický proud, vznikne výboj a ten vyvolá řadu dalších srážek částic. Tavení a odpařování materiálu na elektrodách je způsobeno vzniklým plasmovým pásmem s teplotami 3000 – 12000 °C. Odpařováním dielektrika vzniká plynová bublina s vysokým tlakem. V momentě kdy se přeruší proud, je vyvolána imploze bubliny v důsledku poklesu teploty. Dielektrikum začíná pronikat do uzavřeného prostoru a roztavený materiál je z kráteru vymrštěn v důsledku velkých dynamických sil. Chladícím účinkem dielektrika materiál tuhne a je jím odváděn ve formě drobných částic. Na povrchu elektrod vznikají drobné krátery o velikosti $10^{-3} - 10^{-5} \text{ mm}^3$. Objem erodovaného kovu závisí na časové a energetické charakteristice výboje a na

termofyzikálních vlastnostech kovu (tavicí teplotě, tepelné vodivosti a specifickém teple). [1], [6]



Obr. 14. Krátery vzniklé při elektroerozivním obrábění na povrchu materiálu [7]

2.1.1 Vyjádření principu elektroeroze:

Za vhodných podmínek je při opakovaných výbojích mezi dvěma elektrodami (oddělenými jiskrovou mezerou velikosti 0,01 – 0,5 mm) ponořenými v kapalném dielektriku eroze (odebírání materiálu) na jedné z elektrod mnohonásobně intenzivnější než na druhé. Elektrický výboj může vzniknout pouze tam, kde jsou elektrody vzdálené méně, než je průrazná vzdálenost dielektrika. Do obráběného materiálu (elektrody) se postupně vytváří negativní tvar nástrojové elektrody. Udržení elektrod v optimální vzdálenosti zajistí vhodný mechanismus (zpětná vazba). [1], [2], [6]

Úspěšnost elektroerozivního obrábění je dána dosažením maximálního úbytku materiálu obrobku při minimálním úbytku nástrojové elektrody. Poměr úbytku materiálu nástroje a obrobku se vyjadřuje tzv. relativním objemovým úbytkem v procentech δ . [1]

Úbytek nástrojové elektrody je možno ovlivnit volbou následujících podmínek obrábění:

- 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 [1]

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. Při krátkých výbojových impulsích je tedy vhodné, aby byl obrobek zapojen jako anoda (+) a při dlouhých výbojových impulsích jako katoda (-). [1]

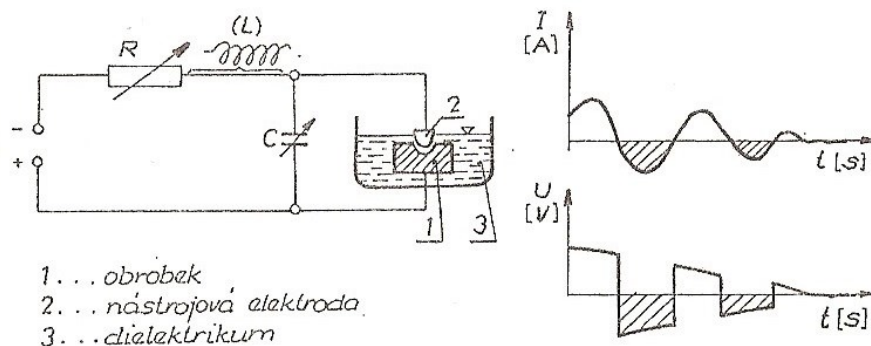
2.1.2 Parametry metody EDM

- Napěťové impulzy 10 až 300 V
- Frekvence 0,2 až 500 kHz
- Koncentrace energie 10^5 až 10^7 W.mm⁻²
- Kráter velikosti 10^{-3} až 10^{-5} mm³
- Měrná spotřeba energie 0,1 až 1,0 kWh.cm⁻³ [6]

2.2 Zdroje elektrické energie (generátory)

2.2.1 Závislé generátory (RC a RLC)

Mezi nejstarší zdroje výbojů patří právě tyto tzv. elektrojiskrové (relaxační) generátory (Obr. 15). Činnost generátorů spočívá v opakujícím se nabíjení kondenzátoru přes odpor ze zdroje stejnosměrného proudu a jeho vybíjení v pracovní mezeře, kdy je velikost napětí závislá i na znečištění dielektrika a mezielektrodové vzdálenosti. Tyto generátory nazýváme závislé, protože frekvence a energie jednotlivých výbojů je závislá na změně poměrů v jiskřišti. [1]



Obr. 15. Závislý generátor [1]

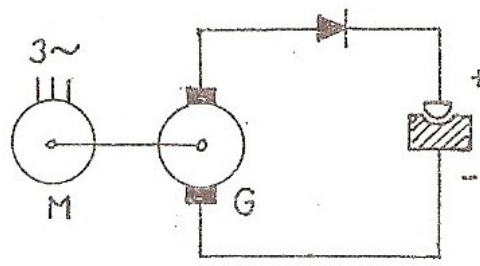
Ve výbojích, které dávají závislé generátory, převládá elektronová vodivost. Z toho důvodu je vhodné zapojovat obrobek jako anodu a nástroj jako katodu (menší úbytek). Výhody generátorů spočívají v jejich jednoduchosti, spolehlivosti a malé ekonomické náročnosti. Mezi nevýhody se řadí vysoký relativní úbytek nástroje (30% i více), omezená možnost regulace tvaru a frekvence výbojů a nízká produktivita obrábění. Úběrovost pro obrábění oceli činí maximálně $1000 \text{ mm}^3/\text{min}$. [1], [2]

Pokud se zapojí indukčnost (L) do nabíjecího obvodu (zapojení RLC) dle Obr. 15, prodlouží se délka trvání výboje a omezí se intenzita vybíjecího proudu. Úběrovost se při obrábění oceli dokáže vyšplhat k hodnotě až $2000 \text{ mm}^3/\text{min}$. [1]

2.2.2 Nezávislé (pulsní) generátory

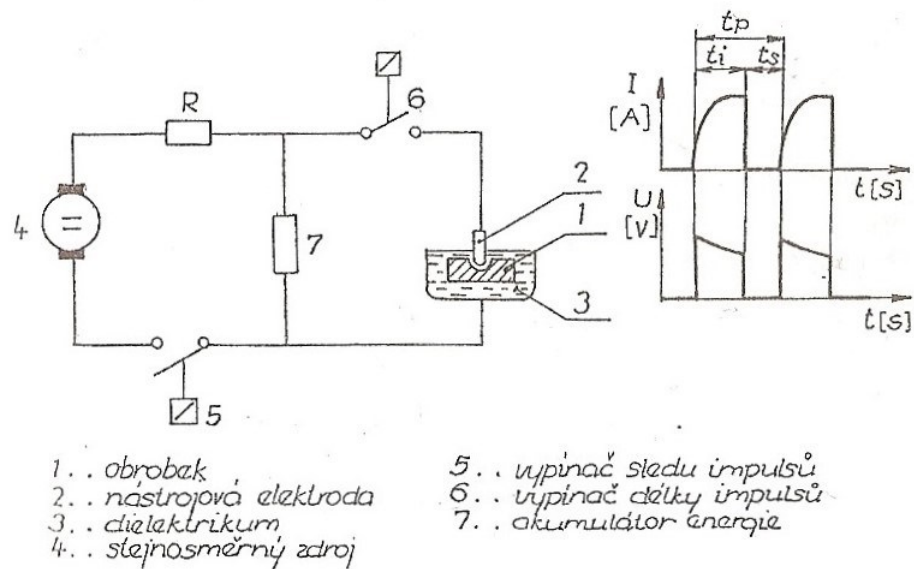
Podstatou nezávislých generátorů je, že dokážou nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na poměry v pracovní mezeře. V zásadě existují dva typy nezávislých generátorů – rotační a polovodičové. [1]

- **Rotační** – dynamo je roztočeno asynchronním motorem a tím vzniknou impulsy. Obvykle mají stálou frekvenci, např. 400 Hz a umožňují vysokou úběrovost až $5000 \text{ mm}^3/\text{min}$. Nevýhodami generátorů jsou vysoká hlučnost a obtížná regulace frekvence pulsů. [1], [2]



Obr. 16. Rotační generátor [1]

- **Polovodičové** – jedná se o nezávislé generátory, které umožňují širokou nastavitelnost elektrických parametrů (např. frekvenci je možno měnit v rozsahu 0,5 – 50 kHz). Hodnota dosahovaného úběru se běžně pohybuje kolem $7000 \text{ mm}^3/\text{min}$, u velkých zařízení až $25\,000 \text{ mm}^3/\text{min}$. Při výbojích nevzniká negativní půlvlna a je dosahován malý relativní objemový úbytek nástroje cca 1%. Obrobek se většinou zapojuje jako katoda, protože je pro tyto generátory charakteristická delší doba trvání impulsů s převahou iontové vodivosti. [1]



Obr. 17. Polovodičový generátor [1]

2.3 Nástrojové elektrody

Hodnoty relativního objemového úbytku lze ovlivnit především volbou materiálu nástroje ve vztahu k materiálu obrobku, polaritou, velikostí pracovního proudu a dobou trvání impulsu. Velikost opotřebení elektrod se v praxi pohybuje v hodnotách od desetin procenta až do desítek procent. Vyšší opotřebení nástroje se zaznamenává zpravidla při dokončovacím obrábění. [1]

Materiál nástrojové elektrody musí mít tyto vlastnosti:

- dobrou elektrickou vodivost,
- dobrou tepelnou vodivost,
- vysoký bod tání,
- odolnost proti elektrické erozi,
- stálost tvaru,
- malou tepelnou roztažnost,
- dobrou obrobiteľnosť. [7]

To splňují následující materiály:

- kovové - měď, wolfram, stříbro, ocel, chrom a jejich slitiny
- nekovové – grafit
- kombinované – kompozice grafitu a mědi [7]

Tab. 1. Materiály nástrojových elektrod [6]

Materiál	Charakteristika
Grafit	Nejčastěji používaný materiál, je dobře obrobitelný a vykazuje nízké opotřebení. Nevýhodou grafitu je znečišťování hloubicího stroje.
Měď	Má dobrou elektrickou vodivost, vykazuje nízké opotřebení. Měděné elektrody nepracují tak dobře jako elektrody z grafitu nebo mosazi. Jsou vhodné pro obrábění karbidu wolframu. Dosahovaná drsnost povrchu obrobene plochy je lepší než $R_a = 0,5 \mu\text{m}$.
Měď- wolfram a stříbro - wolfram	Jde o drahé materiály. Používají se pro výrobu elektrod na hluboké drážky. Elektrody jsou vyráběny slinováním wolframu s mědí nebo stříbrem. Po slinutí již nemůže být elektroda tvarována v důsledku křehkosti materiálu.
Měď- grafit	Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit, je vhodný pro obrábění karbidu wolframu.
Mosaz	Relativně levný a snadno obrobitelný materiál, vykazuje však vysoké hodnoty opotřebení.
Wolfram	Pro výrobu malých děr, $D < 0,2 \text{ mm}$.

2.4 Kapalně pracovní prostředí (dielektrikum)

Pro stabilní průběh elektroerozivního procesu se zavádí kapalně pracovní prostředí (dielektrikum), které při procesu plní řadu funkcí. Působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo z pracovní mezery, ohraničuje výbojový kanál, odvádí drobné produkty eroze z míst výbojů a zabraňuje vylučování uhlíku a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody a tím zabraňuje vzniku zkratů. [1]

Požadavky na dielektrikum:

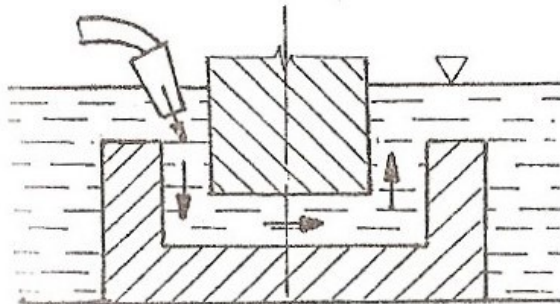
- Zabezpečuje potřebnou vzdálenost mezi elektrodami, aby přechod proudu mezi nimi vyústil do výboje,
- Nízká viskozita a dobrá smáčivost, aby byla rychle obnovována izolace po výboji,
- Chemicky neutrální (kvůli zamezení vzniku koroze),
- Dostatečně vysoká teplota hoření, aby nedocházelo ke vzplanutí,
- Zabezpečení chlazení elektrod a odebírání částic obráběného materiálu,
- Nesmí vznikat jedovaté výpary a nepříjemný zápach,
- Nesmí podléhat chemickým změnám,
- Musí být stálá,
- Lehce vyrobiteľná,
- Levná,
- Spolehlivý odvod (odplavení) erozních zplodin ze zóny úběru obráběného materiálu.

[6]

Kapaliny, které se používají jako dielektrikum, jsou petrolej, voda, kapaliny na bázi petroleje a pro EDM řezání deionizovaná voda. Produktem řady světových výrobců jsou speciální kapaliny, které se vyznačují zejména tím, že neobsahují aromatické složky jako klasické petroleje. Výbava elektroerozivních strojů zahrnuje zařízení pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. Součástí výbavy EDM drátových řezacích strojů jsou deionizační kolony pro zlepšení dielektrických vlastností vody. [1]

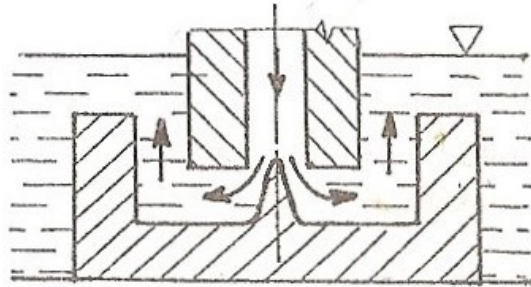
Pro vyplachování mezielektrodového prostoru je používáno několik způsobů:

- **Vnější vyplachování** – nejčastěji se používá při obrábění dutin o větší hloubce, je vhodné použít jej v kombinaci s pulzním vyplachováním. [8]



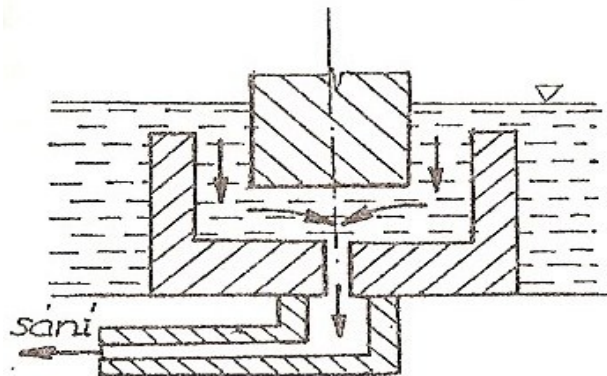
Obr. 18. Schéma vnějšího vyplachování [1]

- **Tlakové vyplachování (vnitřní)** – do pracovního prostoru se dielektrikum přivádí otvorem v nástrojové elektrodě. Nevýhodou je menší tvarová přesnost boků vyráběné dutiny. [8]



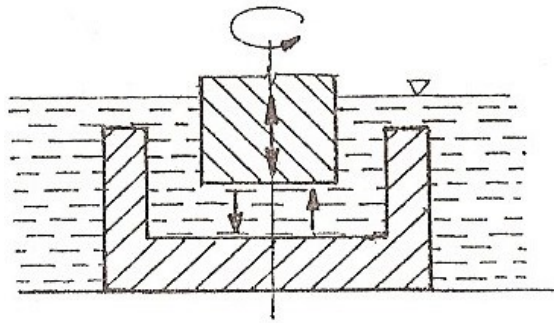
Obr. 19. Schéma tlakového vyplachování [1]

- **Vyplachování odsáváním** – dielektrikum se odsává dutinou v nástrojové elektrodě nebo v obrobku. Tímto způsobem se dosahuje velmi dobré tvarové přesnosti obráběné dutiny. [8]



Obr. 20. Schéma vyplachování odsáváním [1]

- **Pulzní vyplachování** – charakteristickým rysem je přerušování procesu elektroeroze na 0,15 až 10 s, přičemž se od obrobku současně oddálí nástrojové elektrody o 0,02 až 10 mm. Tím dojde ke zvětšení pracovní mezery mezi obrobkem a elektrodou a dosáhne se tak dokonalého vypláchnutí. Výhodným se tento způsob vyplachování stává při výrobě hlubokých dutin, při použití tenkých elektrod nebo při obrábění načisto. Pomocí moderních CNC řídicích systémů lze pulzní způsoby vyplachování naprogramovat. [8]



Obr. 21. Schéma pulzního vyplachování [1]

- **Kombinované vyplachování** – tento způsob kombinuje vnitřní tlakové vyplachování a odsávání, díky čemu se dosahuje přesných tvarů obráběné dutiny. Kombinované vyplachování nachází využití zejména při hloubení tvarově složitých dutin. [8]

2.5 Technologické využití elektroeroze

V průmyslu existuje řada variant využití principu elektroeroze. K nejvíce používaným způsobům patří:

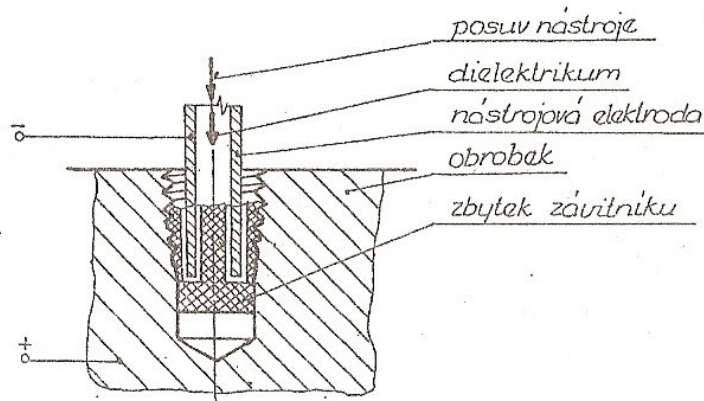
- Hloubení dutin a vyjiskřování ulomených nástrojů,
- Elektroerozivní drátové řezání,
- Elektrokotní obrábění,
- Nanášení povlaků,
- Anodomechanické řezání. [1]

2.5.1 Elektroerozivní hloubení dutin a vyjiskřování ulomených nástrojů

Jednou z nejrozšířenějších oblastí uplatnění EDM je hloubení dutin kovacíh zápusťek a tvářecího nářadí, forem pro tlakové lití, vstřikování polymerů (výroba tvarových dutin vstřikovacích forem) a výroba střížných nástrojů. V porovnání s třískovým obráběním je využití elektroerozivního obrábění ekonomické, a to při výrobě tvarově složitých dutin i při malých počtech obráběných kusů. Významnou aplikací je také obnova (prohlubování) opotřebených dutin, např. kovacíh zápusťek ve zpevněném stavu. [1], [4]

Mezi další aplikace EDM hloubení v průmyslu se řadí odstraňování ulomených nástrojů (vrtáků, závitníků, výstružníků, apod.) z obráběných dílů. Tímto způsobem se zachraňují obrobky často i mnohamilionových hodnot, např. velké zalomené hřídele pro lodní motory,

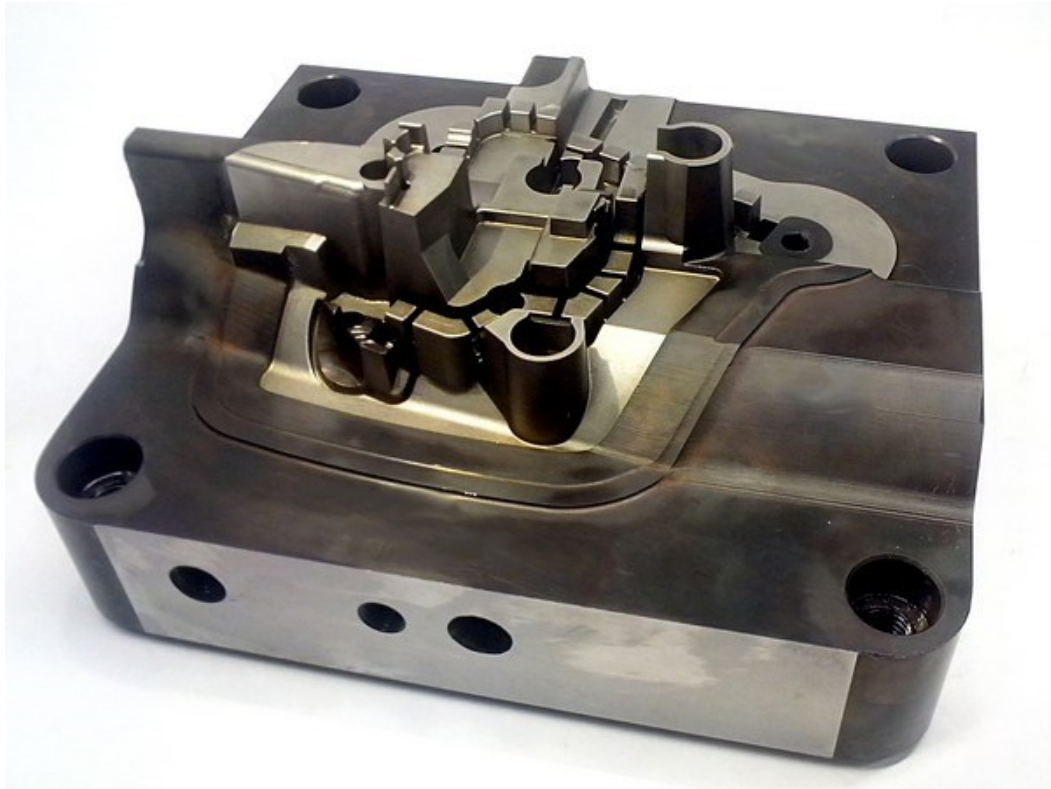
díly pro jaderné reaktory, apod. Pro tyto operace se používají jednoduchá přenosná zařízení, která se umísťují přímo na obrobek nebo vedle obrobku. Jako dielektrikum se používá voda (i průmyslová) přiváděná do nástrojové elektrody (měď, mosaz, grafit). Jádru ulomeného nástroje se bez poškození obrobku odjiskří a zbytky řezné části se snadno vyjmou. [1], [4]



Obr. 22. Schéma elektroerozivního hloubení dutin [1]

Rovněž hloubení průchozích děr tvoří oblast širokého použití elektrojiskrového obrábění. Lze takto obrobit díry velmi malých průměrů (od průměru 0,5 mm výše). Uplatnění je při výrobě vstřikovacích trysek spalovacích motorů, dýz hořáků, v jemné mechanice apod. je možné tímto způsobem vyrábět i otvory různých složitých průřezů, a to i do houževnatých a těžko obrobitelných materiálů. Otvory vyráběné hloubicí metodou jsou mírně kuželovité. Lze toho využít všude, kde je požadován úkos, zejména u střížnic a plastikářských forem (výroba tvárníků, tvárnic, apod.). Kuželovitost lze částečně odstranit zavedením dielektrické kapaliny proti směru hloubení. [21]

Elektrojiskrové obrábění se tedy používá zejména pro výrobu nástrojů pro tváření za studena (střížnice) a plastikářské výrobě, kde nástrojárny už nejsou schopny bez technologie EDM hloubení vyhovět dnešním požadavkům pro jakost a přesnost. Dále se používá při výrobě lisovacích nástrojů, rotorových a statorových plechů elektromotorů, ve vakuové technice, a jak bylo již zmíněno také při výrobě nástrojů pro výrobu monolitních střížnic i ze slinutých karbidů. Střížnice takto vyrobené vykazují v porovnání s ocelovými střížnicemi až dvacetinásobnou životnost. [21]



Obr. 23. Hotový tvárník formy po dokončení hloubení [22]

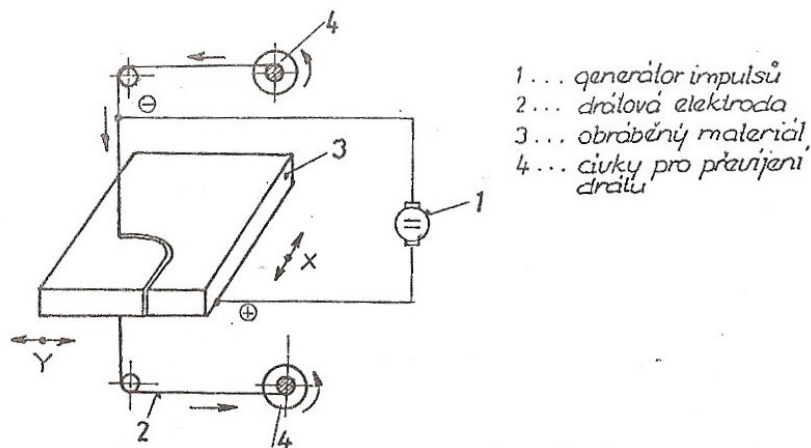
Základní technické parametry elektroerozivního hloubení:

- El. proud: Pracovní napětí.....až 50 V
 Velikost proudu.....0,5 – 320 A a více
 Frekvence.....50 – 5.10⁵ Hz
- Dielektrikum (více informací v kapitole 2.4)
- Parametry vlastního hloubení:
 - Úběrovost (dle velikosti zařízení).....100 – 25 000 mm³.min⁻¹
 - Dosahovaná přesnost.....± 0,12 – 0,05 mm
 - Drsnost obrobeneho povrchu (Ra): Hrubování.....≥ 6,3 μm
 Střed. opracování.....6,3 – 2 μm
 Jemné opracování.....2 – 0,5 μm
- Elektrody (více informací v kapitole 2.3) [1], [6]

2.5.2 Elektroerozivní drátové řezání

Elektroerozivní řezání drátovou elektrodou patří k nejrozšířenějším nekonvenčním metodám obrábění a je využíváno zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů, šablon a řady dalších plochých součástí z kovových materiálů, dále pak pro dělení velmi pevných a tvrdých materiálů (např. elektricky vodivých keramických materiálů – SiC, Si₃N₄, slinutých karbidů, kalených ocelí titanových slitin, superslitin, atd.). Svě místo tato technologie našla i u vstřikovacích forem, kde se používá pro řezání otvorů do kotevních, případně opěrných desek a pro výrobu segmentů do vytlačovacích hlav. [1], [6]

Elektroeroze probíhá mezi tenkým drátem, který je převíjen pomocí speciálního zařízení a plní zde funkci nástrojové elektrody a obráběnou součástí, která je ke generátoru připojena jako elektroda opačné polarity. Řez programovaného tvaru se vytváří při posuvu obrobku v osách X-Y pomocí elektrických výbojů mezi drátovou elektrodou a obrobkem. [1]



Obr. 24. Princip elektroerozivního drátového řezání [1]

Na drátovou elektrodu jsou kladeny následující technické požadavky:

- Vysoká elektrická vodivost z důvodu přiváděné elektrické energie do pracovní mezery malým průřezem drátu,
- Úzké tolerance průměru a kruhovitosti, na kterých závisí přesnost řezání. Dráty se kalibrují průvlaky z polykrystalického diamantu, žíhají a pokovují,
- Velká mechanická pevnost a odolnost proti přetržení. Řádné napnutí řezacího drátu je faktor, který ovlivňuje přesnost řezání, kvalitu řezu a stabilitu procesu. Materiálem řezacích drátů je nejčastěji měď (pro jemné řezy se používá molybden, pro větší průřezy mosaz). [1]

Základní technické parametry procesu:

- Průměr drátové elektrody.....0,03 – 0,35 mm
- Dielektrikum.....deionizovaná voda
- Obrobky: kovové materiály o tloušťce.....0,02 – 400 mm
- Přesnost řezání.....0,01 mm
- Minim. drsnost obrobeného povrchu Ra.....2 μm
- Rychlost řezání.....8 – 300 $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$
- Plynule nastavitelný sklon drátu až..... $\pm 30^\circ$ [1]

2.6 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění**Výhody EDM:**

- Možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost),
- Velký rozsah pracovních parametrů – výroba povrchů různých jakostí,
- Výroba součástí složitých tvarů, snižuje se pracnost při jejich výrobě,
- Provádění operací neuskutečnitelných jinými metodami obrábění (výroba děr se zakřivenou osou),
- Na obrobek nepůsobí žádné mechanické zatížení,
- Vzniká menší odpad než při konvenčním mechanickém obrábění,
- Jednoduchá výroba nástrojových elektrod (pomocí přesného CNC obrábění),
- Na hranách obrobku nezůstávají otřepy,
- Snadná automatizace. [6]

Nevýhody EDM:

- Nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobené plochy,
- Nutnost ponoření obrobku do kapaliny v průběhu obrábění,
- Jakost povrchu závisí na mnoha faktorech, které nelze předem spolehlivě určit,
- Nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů. [6]

2.7 Výrobci EDM strojů

Mezi přední výrobce elektroerozivních strojů se řadí firmy z Japonska, Švýcarska a Německa. Do této skupiny se snaží dostat i výrobci z Číny a Tchaj-wanu, ale nároky stávající poptávky mnohdy převyšují jejich nabízenou kvalitu a spolehlivost. Kromě přesnosti a spolehlivosti je pro potencionální zákazníky významným faktorem také cena nabízených produktů. To je mezi výrobci dobře známo, a proto se snaží zvyšovat kvalitu a spolehlivost za současného snižování celkových nákladů. Snižování nákladů někteří výrobci řeší přesídlením výroby do zemí s levnou pracovní silou, což má ale negativní dopad na kvalitu strojů a také na pověst výrobce. Odběratelé se při výběru elektroerozivních strojů řídí podle různých tříd přesnosti. Nabízené produkty můžeme rozdělit do tří skupin, a to:

- 1. skupina – rozhodujícím faktorem je cena, nikoliv kvalita stroje,
- 2. skupina – tvoří kompromis mezi cenou, produktivitou a přesností (nejprodávanější),
- 3. skupina – patří sem ultra přesné stroje na nejvyšší možné úrovni. [9]

Firma vybírající si elektroerozivní stroj se řídí podle toho, jaké obrobky bude daným strojem obrábět. Proto jsou při výběru nejdůležitějším kritériem technické parametry stroje. Stroje od různých výrobců splňující dané požadavky se však od sebe mnohdy liší v některých dalších nepatrných parametrech. [9]

Tab. 2. Technické parametry vybraných drátových řezaček [9]

	MITSUBISHI	CHMER	FANUC
Typ stroje	MV1200S	G43F FLUSHING TYPE	Alpha C400iA
Rozměry stroje [š, h, v]	2 760x2 025 x 2 150	2.200 x 2.130 x 2.130	-
Hmotnost stroje [kg]	3 600	2 575	1 850
Objem nádoby [l]	550	340	510
Pojezdy os [mm]	400x300x220	400 x 300 x220	370 × 270 x 255
Max. rozměry obrobku [š, h, v]	800 x 700 x 215	725 x 600 x 215	700 × 600 × 255
Max. hmotnost obrobku [kg]	500	500	500
Průměr drátu [mm]	0,10 - 0,30	0,15-0,30	0,10 – 0,30
Dostupnost	EDM TRADE	CHMER	PENTA Trading

Tab. 3. Technické parametry vybraných hloubiček [9]

	OPS INGERSOLL	EXERON	PENTA
Typ stroje	EAGLE 400	EDM 310	PENTA 433GS
Rozměry stroje [š, h, v]	2.093x2.780x2.550	1.550x1.812x2.210	1.800x1.700x2.250
Objem nádoby [l]	320	400	-
Pojezdy os [mm]	420X300X400	350x270x270	400X300X300
Max. rozměry obrobku [š, h, v]	650X500X340	770x520x350	700X350X320
Max. hmotnost obrobku [kg]	500	500	700
Řídicí systém	CNC	EXOWIN MF 20	Beckhoff (Windows CE)
Dostupnost	EDM TRADE	PENTA Trading	PENTA Trading

2.7.1 Mitsubishi

Japonská firma Mitsubishi je jedním z největších a nejzkušenějších světových výrobců elektroerozivních strojů, ačkoliv je její znak spojován spíše s automobilovým průmyslem či spotřební elektronikou. A právě při výrobě zařízení pro automobilový a spotřební průmysl nacházejí tyto stroje největší uplatnění. Hlavními uživateli jsou nástrojárny, kde jsou tyto stroje využívány víceméně ke kusové výrobě, ale také v sériové výrobě nástrojů pro třískové obrábění jako jsou frézy, vrtáky apod. Stroje od firmy Mitsubishi disponují vyspělou technologií, která je v kombinaci s rozumnou cenou strojů a nízkými provozními náklady nejdůležitějším kritériem pro potencionálního zákazníka. [9], [10]



Obr. 25. Drátová řezačka Mitsubishi FA20S [10]

2.7.2 OPS Ingersoll

Německý výrobce OPS Ingersoll je velkým konkurentem v oblasti elektroerozivního hloubení, protože vyrábí vysoce výkonné hloubičky. Mezi nadstandartní parametry, kterými se tyto stroje vyznačují, patří přesnost, výkon a nabízené možnosti. Všechny modely hloubiček zmíněné společnosti se vyrábějí se zajištěnými pracovními nádržemi a s provozně výhodnou portálovou konstrukcí. Do těchto hloubiček je vkládána elektronika od firmy Mitsubishi. [11]



*Obr. 26. Hloubička Gantry 1200 společnosti OPS Ingersoll
[11]*

2.7.3 Sodick

Sodick je japonská firma, která na poli vývoje a výroby elektroerozivních strojů působí již více než 40 let. Jejich nekonvenční koncepce využívající řadu patentovaných řešení splňuje nejvyšší nároky kladené na kvalitu výroby. Výsledkem jsou obráběcí stroje s extrémní dynamikou, rychlými posuvy, dlouhodobě vysokou přesností a nadstandartní kvalitou. [12]

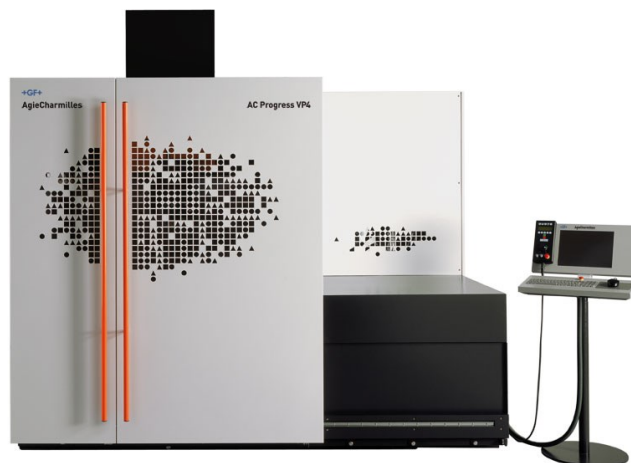
Sodick si veškeré klíčové komponenty včetně lineárních pohonů a keramických prvků vyrábí ve svých závodech, čímž si udržuje a kontroluje kvalitu svých strojů. Kvalitu strojů Sodick dokazuje i desetiletá záruka přesnosti polohování poskytovaná výrobcem na všechny stroje s lineárními pohony. [12]



Obr. 27. EDM děrovačka Sodick K1C [12]

2.7.4 GF Machining Solutions

Mezi přední světové dodavatele elektroerozivních strojů patří i švýcarská společnost GF Machining Solutions. Jejich nabídka zahrnuje elektroerozivní obráběcí stroje, vysokorychlostní a vysokovýkonné obráběcí stroje včetně upínacích a paletizačních systémů, 3D laserové stroje pro povrchové texturování, servis, náhradní díly, moduly pro dodatečné rozšiřování stávajících konfigurací, spotřební materiál a řešení pro automatizaci výroby je zaměřována především na výrobce forem a dodavatele přesných dílů. [17]



Obr. 28. Řezačka AgieCharmilles AC Progress VP3 [17]

2.7.5 Výrobci v České republice

- **Penta Trading** – největší a nejrozšířenější prodejce elektroerozivních strojů působící na českém a slovenském trhu od roku 1991. Firma poskytuje vysokou kvalitu a spolehlivost strojů, profesionální, rychlý a spolehlivý servis, poradenství a technologickou pomoc zákazníkům. V nabídce firmy se objevují i nadstandartní služby, jako jsou roční preventivní prohlídky strojů, generální opravy či modernizace starých strojů. Díky svým detailním technickým zkušenostem s elektroerozivními stroji různých výrobců, které firma servisovala, sama vyvinula vlastní elektroniku pro elektroerozivní hloubičku PENTA. [9], [13]



Obr. 29. Hloubička PENTA 433GS CNC [13]

- **EDM TRADE s.r.o.** – společnost zabývající se elektroerozivním a HSC obráběním (vysokorychlostní řezání) již více než 10 let. Nabídka společnosti pokrývá potřeby strojírenských společností od drátových řezaček, CNC hloubiček, HSC frézek, CNC vrtaček až po CNC broušení. Firma poskytuje elektroerozivní stroje od předních

světových výrobců (Mitsubishi, OPS Ingersoll a další). Společnost nabízí prodej jejich strojů, dále servis a samozřejmě také technickou podporu. [9], [14]

2.8 Automatizace EDM

Automatizace se obráběcích strojů dotkla už před mnoha lety. Možnosti automatizace začínají na jednoduché výměně nástrojů a pokračují až k propojení velkého množství obráběcích strojů do složité výrobní (montážní) linky. V současnosti je nejvíce používáno propojování jednotlivých výrobních procesů (výrobních pracovišť) právě za pomoci automatizace. Úspěšnou se automatizace stává v okamžiku, kdy spojí rozdílné výrobní metody tak, že společně vytvoří požadovaný produkt. [18]

Existují 3 základní koncepty automatizace používané na EDM pracovištích a ty jsou:

- integrované automatizační systémy,
- externí automatizační systémy,
- flexibilní automatizační projekty závislé na požadavcích zákazníka. [18]

2.8.1 Integrované automatizační systémy

Jako nejjednodušší řešení jsou nabízeny automatizační koncepty, které již byly začleněny do rozsahu vývoje strojů a jsou bez problémů integrovány do mechanických, elektrických a regulačních obvodů obráběcího stroje. O takovém zařízení již existuje příslušná dokumentace, ze které si zákazník může zjistit všechny potřebné údaje. Proto je pro zákazníka od samého počátku zřejmé, jak složitá bude realizace zařízení, a také jaké náklady na to budou muset být vynaloženy. [18]

2.8.2 Externí automatizační systémy

Jedná se o kompaktní systémy sloužící k výměně upínacích systémů (např. držáky nástrojů nebo paletkové upínací systémy obrobků). Tyto systémy jsou zpravidla univerzální a jsou využívány na výměnu obrobků i nástrojů při frézování, vrtání a hloubení. Výměna obrobků i nástrojů probíhá pomocí robotického ramena, zásobníky obrobků a nástrojů mají velkou variabilitu a do značné míry jejich konečná podoba závisí na přáních zákazníka, mohou být policové nebo rotační. Obvykle jsou koncipované k obsluze (výměně nástrojů a obrobků) dvou zařízení. Důležitou součástí externích automatizačních systémů je software, který propojuje řídicí systémy strojů a umožňuje řídit a plánovat EDM výrobní proces. [18]

2.8.3 Flexibilní automatizační projekty

Tímto způsobem automatizace je myšleno spojování technologií pro výrobu nástrojů (elektrod) a forem, nebo pro výrobu vysoce kvalitních dílů. Při automatizaci jednotlivých výrobních zařízení se objevují specifické problémy, které jsou způsobovány rozdílnými technologiemi jednotlivých zařízení a technologickým postupem výroby. Eliminovat takto vzniklé problémy je možné pomocí vhodného ovládání jednotlivých výrobních procesů a jejich sekvencí. Speciální zákaznická řešení, která jsou do značné míry utvářena v rámci specifikace projektu mezi zákazníkem a dodavatelem, jsou považována za nejflexibilnější způsoby automatizace. Integrace různých výrobních metod je podmíněna důkladnou znalostí výrobních procesů a závislostí mezi jednotlivými fázemi obrábění. [18]

3 3D SKENOVÁNÍ

Technologie 3D skenování umožňuje převod fyzického tvaru objektu na objekt digitální. Je to relativně mladé odvětví, které však zaznamenává velmi rychlý vývoj. Matematické základy výpočtu 3D bodu ze sady 2D fotek jsou známé už poměrně dlouho, ale vzhledem k výpočtovým nárokům je dlouho nebylo možné uvést do praxe. Náhlý rozmach tohoto oboru přišel po nástupu výkonných počítačů s procesory Pentium. V letech 1987 až 1990 vznikly 3 firmy, které přenesly do té doby laboratorní zařízení do praxe a vznikly tak první komerční 3D skenery. První firmou byl v roce 1987 německý Steinbichler, druhou firmou v pořadí byl v roce 1989 německý Breuckmann (v roce 2012 koupen firmou AICON) a v roce 1990 to byla německá firma GOM. V současnosti se už na trhu vyskytuje mnohem více firem vyrábějících 3D skenery, ale náročné požadavky průmyslových oborů dokáží splnit je ti s nejvyspělejší technologií. Rozlišení kamery není kritériem pro rozpoznání kvality 3D skeneru, protože více pixelů neznámá automaticky přesnější měření. Ovládání současných modelů 3D skenerů je již poměrně snadné a naučit se ovládat 3D skener je dnes otázkou jen několika málo hodin. Software pro práci s naskenovanými daty lze stáhnout zdarma z internetu. [19], [20]

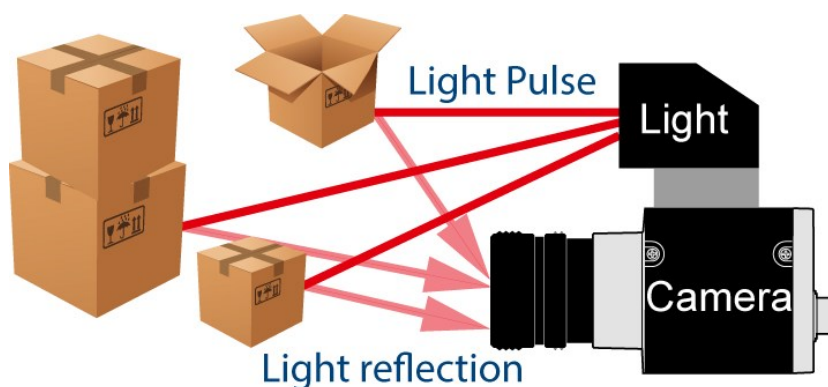
3.1 Základní přehled metod 3D skenování

Metod 3D skenování je celá řada a každá z nich má své výhody i nevýhody. Jednotlivé metody tak nacházejí uplatnění v různých oblastech. Někde je vyžadována co nejvyšší rychlost, jinde jsou kladeny nároky na maximální přesnost a dalším faktorem může být i co nejnižší cena skenování. Obecně lze 3D skenování rozdělit dle několika kritérií. Tím nejobecnějším je rozdělení skenerů na kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní skenery získávají 3D body pomocí fyzického kontaktu se skenovaným objektem. Bezkontaktní skenery pro tento účel používají optický způsob. Tyto varianty lze i provázat, kdy se při kontaktním skenování použije dotyková sonda, jejíž poloha v prostoru je snímána bezkontaktně (opticky). Toto řešení je označeno jako hybridní varianta. [19]

Optické metody se dělí na aktivní a pasivní, přičemž je důležité, jestli na skenovaný objekt něco vysílají nebo nevysílají. Aktivní optické skenery mají zdroj některého druhu záření a odpovídající přijímač. 3D souřadnice bodů se vypočítá pomocí analýzy odraženého záření od skenovaného objektu. Tímto zářením může být buď světlo určité vlnové délky (viditelné, laser, RTG), nebo zvukové vlny (ultrazvuk). U pasivních skenerů se žádný zdroj

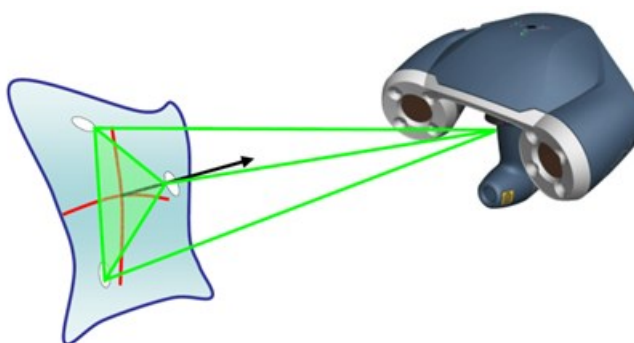
záření nevyskytuje. Tyto skenery pro výpočet 3D souřadnic bodů využívají odraz paprsků přirozeného záření objektu od okolního světla. [19]

Aktivní optické metody se dále dělí podle toho, jaká fyzikální vlastnost daného záření je použita pro výpočet prostorové souřadnice bodu. Nejjednodušší metoda se nazývá „time of flight“. Principem této metody je, že je změřen čas, za který se vyslaný paprsek vrátí zpět na snímač. Tato metoda má výhodu v tom, že skener dokáže snímat body na velkou vzdálenost (desítky metrů až kilometry), nevýhoda metody je ovšem v její nízké přesnosti, se kterou dokáže získat data. [19]



Obr. 30. Princip metody „time of flight“ [23]

Další možností je metoda triangulace. Laserová triangulace je stereoskopická technika, kde je vzdálenost objektu vypočtena pomocí rozkmitávaného laserového paprsku a kamer. Laserový paprsek je promítán na povrch snímaného tělesa, kde jej snímají kamery. Kamery jsou umístěny ve známé poloze vůči skeneru a lze pomocí trigonometrie vypočítat 3D prostorové (XYZ) souřadnice bodů povrchu. Kamery zaznamenávají průměty laseru na povrch a digitalizují všechny body z laserové čáry. Tato metoda má vlastnosti obrácené vůči předchozí metodě a její výhodou je relativně vysoká přesnost (setiny milimetru) a nevýhodou je pak malá měřící vzdálenost (řádově metry). [19], [20]



Obr. 31. Princip triangulace optického skeneru [24]

Další aktivní optickou metodou je „structured light“. Při ní se na objekt projektuje pravidelný vzor, který se podle povrchu objektu zdeformuje a pomocí této deformace se spočítají prostorové souřadnice bodů. Tato metoda umožňuje snímat daný povrch s obrovskou rychlostí, což je hlavní výhodou této metody. Řádově jde o miliony bodů za několik sekund. [19]

Rozdělení 3D skenerů podle použití v praxi:

- Mechanické řízené,
- Mechanické ruční,
- Laserové,
- Optické „white light“,
- CT (z angl. Computer Tomograph),
- Destruktivní,
- Ultrazvukové. [19]

3.1.1 Mechanické řízené 3D skenery

Mechanický způsob skenování je nejstarší metodou, kterou lze do jisté míry realizovat na každém dotykovém měřicím stroji (CMM – z angl. Coordinate Measuring Machine). Hrot s kuličkou je upnutý v měřicí hlavě, která má citlivé snímače reagující na vychýlení hrotu při dotyku kuličky s objektem. Při každém vychýlení se zaznamená aktuální poloha os stroje, ze které software vypočítá polohu středu kuličky. Při každém doteku je tedy zaznamenán 1 bod. Pojezdy CMM jsou relativně pomalé, tudíž se jedná o zdlouhavý proces. Další nevýhoda je také v tom, že stroj musí být před vlastním měřením nejprve naprogramován podle dané geometrie CAD modelu. V současné době jsou CMM využívány pouze v případech, kdy nelze objekt naskenovat pomocí žádné jiné metody. [19]

Činnost CMM strojů lze vylepšit pomocí rozšiřujícího zařízení, jehož rychlost skenování je mnohem vyšší než rychlost skenování dotykového hrotu s kuličkou. Tímto zařízením je laserová sonda, která se upne místo hrotu. Ze CMM se tak stane hybridní skenovací zařízení kombinující výhody laserového skenování triangulační metodou a výhody vysoké přesností polohování CMM stroje. [19]



Obr. 32. CMM DEA GLOBAL Silver Performance [19]

3.1.2 Mechanické ruční 3D skenery

Hlavní rozdíl ručních mechanických 3D skenerů oproti CMM je především ve způsobu měření absolutní polohy dotykové kuličky. CMM stroje jsou stacionární zařízení a mají přesné vedení a přesné odečítání polohy jednotlivých os. U ručního skeneru je absolutní poloha děje odečítána na základě informací o poloze jednotlivých kloubů, ze kterých se skener skládá. Informaci o své poloze odesílají v reálném čase snímače, které jsou umístěny v každém kloubu. Software tyto informace přijímá a ze známých délek jednotlivých ramen je schopen přepočítat polohu kuličky koncového hrotu. Poloha objektu vůči skeneru se nesmí změnit, a proto musí být skener zafixován k základové desce po celou dobu skenování. Výhodou těchto skenerů je jejich mobilita a nízká cena. Nevýhodou je ovšem nižší přesnost měření daná součtem nepřesností jednotlivých kloubů a malý měřicí dosah. I tyto

mechanické skenery mohou být (stejně jako CMM) osazeny laserovou sondou, která výrazně urychlí proces skenování. Toto skenování probíhá pouze ručně a nelze ho žádným způsobem zautomatizovat. V praxi nacházejí tyto skenery uplatnění při průběžném kontrolování vytipovaných rozměrů dílu v jednotlivých fázích výroby. [19]



Obr. 33. Mechanický 3D skener FaroArm [19]

3.1.3 Laserové 3D skenery

Laserové skenery patří mezi nejpoužívanější typy skenerů. Tyto přístroje fungují na principu, kdy vyhodnocují odraz laserového paprsku od povrchu objektu. Součástí skeneru tedy musí být vysílač laserového paprsku a snímací kamera. K proskenování celého objektu je nutné, aby měl skener nebo objekt možnost otáčet se v prostoru. Pro spočítání absolutní polohy skenovaných bodů je třeba znát polohu skeneru v prostoru v každém okamžiku skenování. Za tímto účelem je možno využít dvou metod – metodu trackování, kdy je skener sledován dalším optickým zařízením nebo metodu referenčních značek. Laserové skenery jsou určeny pro méně náročné technické aplikace a jejich cenová dostupnost je na poměrně dobré úrovni. Hmotnost skeneru se při ručním skenování jeví jako nepříjemný faktor, který se objevuje zejména při delším skenování. [19]

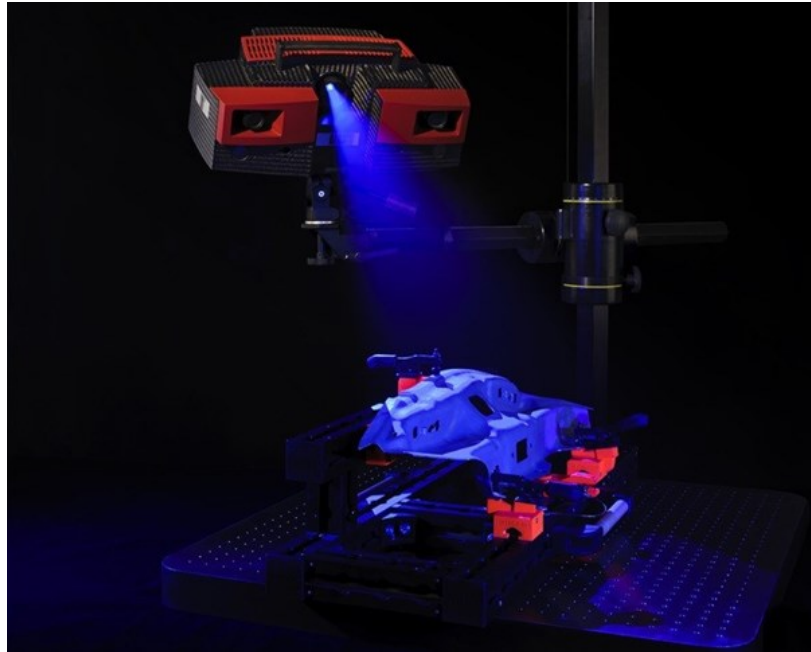


Obr. 34. Laserový skener HandyScan [19]

3.1.4 Optické 3D skenery „white light“

Označení „white light“ znamená, že se při skenování používá světlo určité vlnové délky. Jak už z názvu vyplývá, mělo by se jednat o bílé viditelné světlo. Tato skutečnost je základním rozdílem oproti laserovým skenerům, které používají laserový paprsek. V současnosti může být toto označení už mírně zavádějící, neboť většina skenerů už používá projekci světla modrého. Tato inovace vedla ke zvýšení přesnosti snímání, protože použitím modrého světla byl snížen vliv působení okolního denního světla na projekci při skenování. Další inovací bylo zvýšení životnosti projekční jednotky, kterého se dosáhlo přechodem na LED projektory. [19]

Principem skenování je projekce pravidelného vzoru na povrchu objektu. Vzor se zdeformuje podle křivosti povrchu objektu a pomocí levé a pravé kamery je jeho tvar sejmuto a následně uložen na disk. Pro zvýšení přesnosti měření je třeba provést projekci vzoru a snímání v jedné poloze několikrát, přičemž vždy proběhne mírný posun vzoru. Tímto se vytvoří sada snímků pro jednotlivé polohy skeneru a z nich jsou softwarem vypočteny prostorové souřadnice bodů na povrchu objektu. Spojování v prostoru jednotlivých skenů z různých poloh probíhá pomocí referenčních značek. U nenáročných tvarů lze k tomuto účelu využít metodu „best fit“. Součástí profesionálních skenerů jsou 2 CCD (z angl. Charged Coupled Device) kamery s rozlišením aspoň 5 MPx. Vyrábí se i skenery s 1 CCD kamerou, ale ty nejsou schopny kontrolovat aktuální stav své kalibrace. [19]



Obr. 35. Optický skener ATOS III Triple Scan firmy GOM [19]

Některé optické skenery lze použít i jako trackovací zařízení. Díky tomu lze naskenovat místa, kam nevidí kamery (např. hluboké otvory), k čemuž se použije dotyková sonda. Dalším zajímavým zdokonalením je možnost užití zpětné projekce. Uživatel naprojektuje na skenovaný objekt bod, kružnici či osy, které si předem vytvoří v softwaru. Tato projekce se následně fixou překreslí na objekt. Optické 3D skenery vykazují v současnosti největší pokroky a s touto skutečností lze počítat i do budoucna. [19]



Obr. 36. ATOS I skener jako trackovací zařízení [19]

3.1.5 CT 3D skenery

CT skenery využívají X-paprsky rentgenového záření, což umožňuje snímat body jak na povrchu objektu, tak i pod jeho povrchem (vnitřní geometrie). Objekt je umístěn do uzavřené komory, ve které je za současného otáčení zrentgenován ze všech stran. Prostorové body jsou softwarem spočítány pomocí pořízených snímků. Výhodou tohoto typu skenování je, že se objekt nemusí před skenováním nijak připravovat, a dále je výhodou také rychlost, přesnost a pohodlnost skenování. Mezi nevýhody patří relativně malý měřicí prostor, vysoká pořizovací cena a problémy se skenováním, pokud objekt není z jednoho materiálu (např. plastový výlisek s kovovými piny). [19]



Obr. 37. CT skener Wenzel exaCT M100 [19]

3.1.6 Destruktivní 3D skenery

Tento typ skenerů je poněkud atypický, protože jde v podstatě o frézku s kamerou. Na začátku je potřeba měřený objekt zalít do bloku tak, aby pomocný materiál dokonale zatekl do všech dutin. Důležité je, aby barva tohoto materiálu byla kontrastní oproti barvě skenovaného objektu. Takto připravený objekt je následně upnut na desku frézky, kde se z něj postupně odfrézovávají tenké vrstvičky konstantní tloušťky. Při každém odkrytí nové vrstvy se objekt vyfotí a snímek se uloží pro pozdější zpracování. Každý snímek obsahuje informaci, v jaké výšce byl pořízen. Software na každé fotce na přechodu barev zalitého objektu a pomocného materiálu vyextrahuje okrajovou křivku. Tato křivka je zobrazována

jako body v rovině. Spojením všech křivek získáme 3D mrak bodů. Tento způsob skenování sice zapříčiní zničení skenovaného objektu, ale oproti CT skenerům dokáže získat informace o vnitřní geometrii objektu poměrně levně. [19]

3.1.7 Ultrazvukové 3D skenery

Těmito skenery se digitální data získávají pomocí bezkontaktního snímání povrchu objektu ultrazvukovou sondou. Skenování je prováděno manuálně pistolí s kovovým hrotem, která se přikládá ke skenovanému povrchu. Stisknutím spouště je vyslán ultrazvukový signál, který je dekodován do prostorových souřadnic pomocí speciální konstrukce s ultrazvukovými čidly. Nevýhodou zařízení je jeho relativně malá přesnost, která se pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,5 mm. V současnosti se tento typ ultrazvukového 3D skeneru už prakticky nepoužívá. [19]

3.2 Oblasti využití 3D skenování

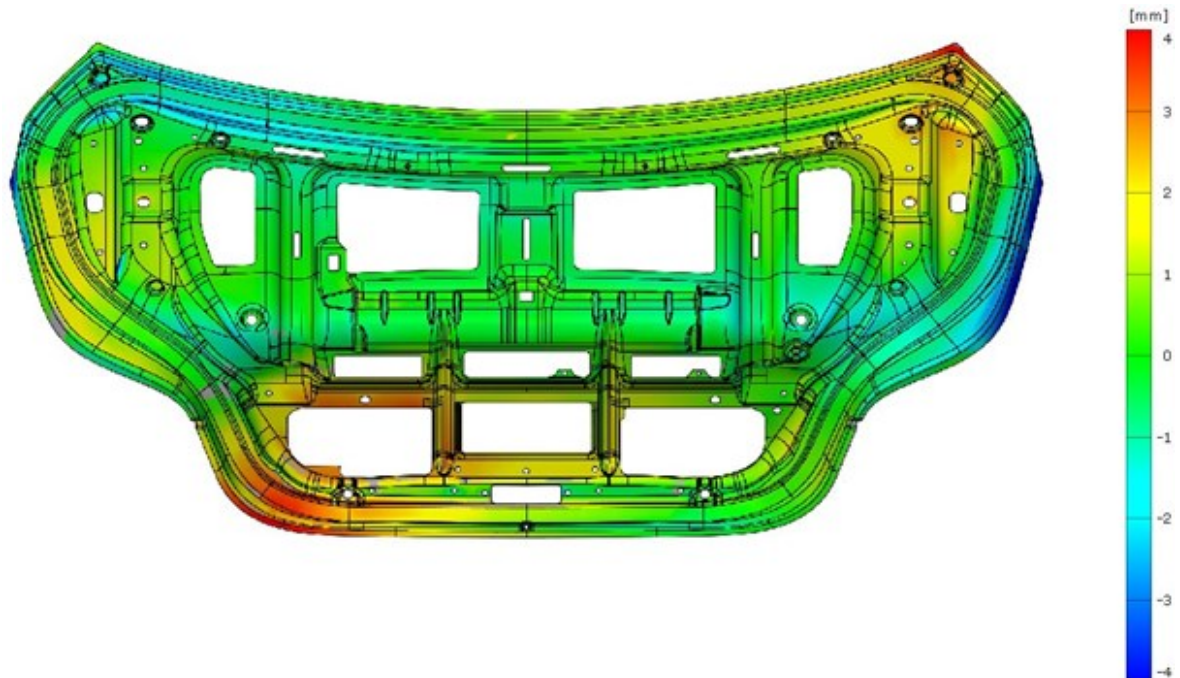
Možností využití technologie 3D skenování je v dnešní době spousta. Z počátku se tato technologie soustředila pouze do oblasti vývoje výrobků. Jednalo se především o výrobky automobilového a leteckého průmyslu. S postupným růstem požadavků na kontrolu výroby dílů rostly i nároky na měření. Zejména pak designové díly karoserie auta se dnes bez 3D skenování prakticky neobejdou. Tato technologie má vskutku velmi široké pole působnosti a přitom se neustále objevují nové obory, kde tato technologie nachází uplatnění. [19]

Zde je uvedena pouze vybraná část uplatnění 3D skenování. Krom níže uvedených nachází technologie využití také např. v kriminalistice, medicíně (estetická chirurgie, plastická chirurgie, dentální aplikace a další), v archivaci designových konceptů, ergonomii, snímání pohybu, při ochraně historických památek, apod. [19]

3.2.1 Kontrola kvality výroby

Jednoznačně největší uplatnění má technologie 3D skenování při kontrole kvality výroby. Při této kontrole je naměřený objekt porovnán s teoretickým CAD modelem, který byl navržen konstruktérem. 3D měření dat je určeno pro tvarově složitější objekty. Nemá smysl skenovat objekty, u kterých lze použít jednodušší způsoby měření, které jsou z ekonomického a časového hlediska méně náročné. Může jít třeba o plastové či plechové výlisky, lisovací nástroje, tvarové vyjiskřovací elektrody, velké lopatkové kolo z parní

turbíny a další. Nejrychlejší způsob porovnání naskenovaného dílu s CAD modelem je pomocí barevné mapy odchylek. Z takové analýzy lze rychle vyčíst, zda je výrobek vyroben v dané toleranci, popř. najít problematické oblasti. [19]



Obr. 38. Barevná mapa odchylek plechového výlisku [19]

3.2.2 Kopírování výrobku

Skenování za účelem získání kopie můžeme využít např. při výrobě opotřebené součástky, která byla vyrobena v době, kdy ještě nebyly CAD softwary pro počítačové navrhování a nedochovaly se ani papírové výkresy. Tímto způsobem se např. v elektrárnách rekonstruují turbíny, které jsou staré i několik desítek let. Naskenováním výrobku jsou získána 3D data, pomocí kterých se může vyrobit duplicitní výrobek. Ze skenování je výstupem mrak bodů nebo polygonální síť ve formátu STL. Tento formát jsou schopny některé CAM softwary přímo zpracovat do NC drah (např. Tebis nebo CATIA). Pokud toho CAM software není schopen nebo je třeba na výrobku udělat nějakou změnu, pak se polygonální síť vytvoří plochy. Zpracování takto vzniklého modelu už pro většinu CAM softwarů nepředstavuje žádný problém. Před samotným 3D skenováním je třeba zvážit, zda tím nebudou porušena autorská práva na daný výrobek. [19]



Obr. 39. Skenování rotoru turbíny [19]

3.2.3 Verifikace FEM analýz

3D skenování se využívá i při ověřování FEM analýz, které dokáží předvídat chování součástky po zatížení různými typy vlivů. Toho se využívá např. při simulaci vstřikování plastů, kdy software vyhodnocuje konečný stav výrobku po vytažení ze vstřikovací formy. Výsledný stav závisí na větším množství faktorů, které je třeba zahrnout do tohoto výpočtu. Jedná se například o materiálové charakteristiky daného vstřikovaného plastu. FEM analýzy pracují v teoretickém, ideálním prostředí, které nelze v praxi zrealizovat, a proto nemusí výsledný tvar součástky odpovídat nasimulovanému tvaru. Po naskenování a porovnání reálného výrobku s nasimulovaným tvarem je možné tyto poznatky využít pro specifikaci vstupních parametrů při příští simulaci. [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část bakalářské práce se bude zabývat porovnáváním rozměrů nástrojových elektrod. Pro tento účel budou ve firmě MESIT foundry, a.s. vybrány čtyři elektrody, u kterých bude zhodnocena přesnost jejich výroby a následně bude zjištěn úbytek materiálu elektrod po jejich uplatnění v technologii elektroerozivního obrábění. Firma elektrody využívá k hloubení tvárnic a tvárnků forem pro vstřikování plastů, které sestavuje podle požadavků svých zákazníků.

Měření rozměrů elektrod proběhne pomocí 3D optického skeneru ATOS Triple Scan II, který využívá technologii modrého světla. Jedná se o skener s velmi vysokým rozlišením a vyznačuje se také vysokou přesností měření. Popsáno bude jak skenovací zařízení, tak samotný průběh měření.

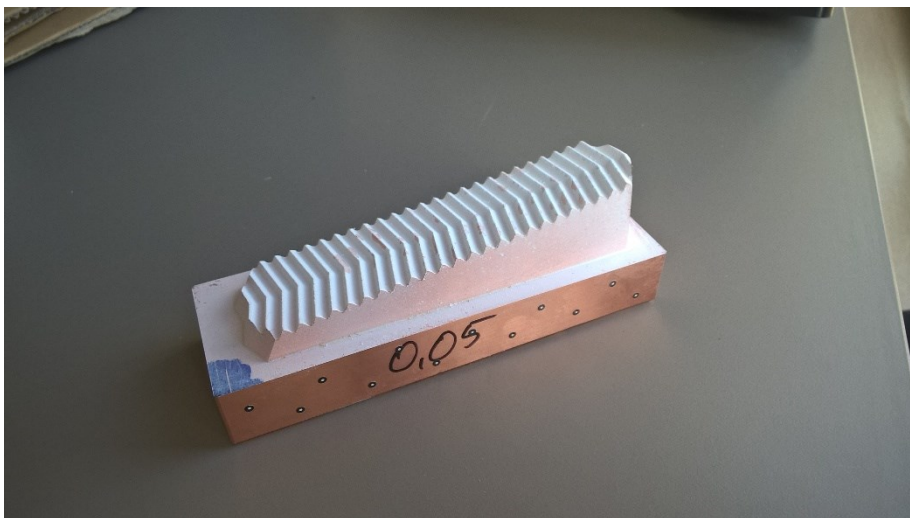
Výsledky měření budou názorně demonstrovány pomocí barevných map odchylek, které se získají proložením dat elektrody z jednotlivých fází pracovního procesu. Budou popsána jednak místa, kde při výrobě došlo k největším nepřesnostem, tak i místa s největšími úbytky materiálu.

5 POPIS ELEKTROD

Všechny elektrody byly z polotovarů vyrobeny firmou MESIT foundry, a.s., která se mj. zaměřuje i na výrobu forem pro plastikářský průmysl. Tyto formy obsahují tvárníky a tvárnice, ve kterých jsou jejich dutiny vyhloubeny právě pomocí elektrod z vlastní výroby. Vyrábí se zde elektrody měděné nebo elektrody z grafitu. Pro obrábění grafitových elektrod firma používá obráběcí centrum HSC 300 od firmy Exeron a pro obrábění měděných elektrod univerzální CNC frézku DMU 60 T od firmy Deckel Maho.

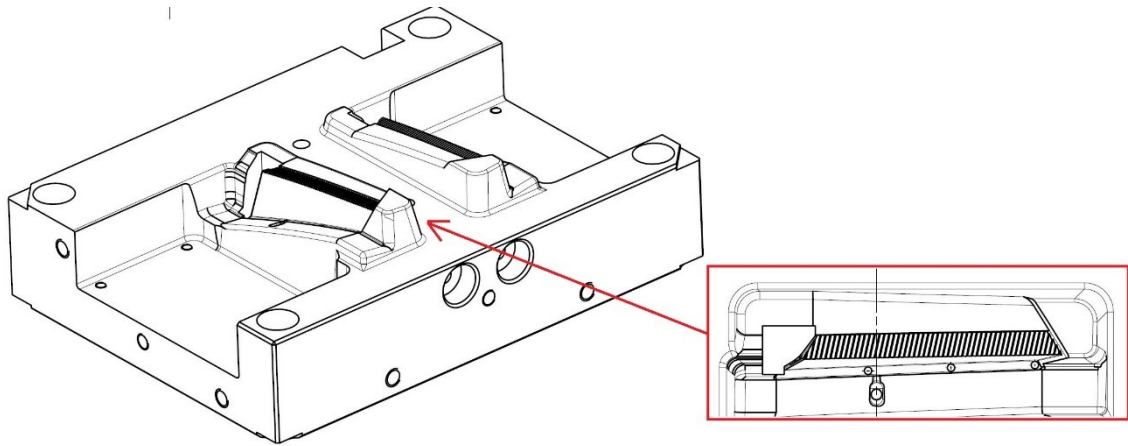
5.1 Elektroda 1

Elektroda je určena k hloubení dutiny tvárnice vstříkovací formy (Obr. 41). Výsledným produktem vycházejícím z této formy je stínítko světla automobilu z materiálu PC (Polykarbonát). Elektroda je vyrobena z mědi. Jednou z optických vlastností mědi je její lesk. Z tohoto důvodu musela být elektroda před skenováním pokryta vrstvou křídového prášku, který kladně ovlivňuje přesnost skenování reflektivních materiálů (Obr. 40).



Obr. 40. Elektroda 1 pokrytá křídovým práškem

Představená elektroda je zkonstruována jako sloučená, kdy jedna její polovina slouží k hloubení tvaru levé varianty výrobku a druhá k hloubení pravé.



Obr. 41. Dutina tvárnice vstříkovací formy

5.2 Elektroda 2

Elektrodou se stejně jako u předchozího případu hloubí dutina tvárnice vstříkovací formy. Tato forma je určena pro výrobu části světlometu pro automobil Audi (Obr. 43). Materiálem elektrody je grafit R 8650, který firma MESIT foundry, a.s. používá pro 95% všech svých operací. Zbylé procenta zahrnují dokončovací práce a na ty firma používá grafit R 8710, který má lepší tepelnou vodivost, ale také vyšší cenu. Grafit svou matností poskytuje mnohem přívětivější podmínky pro skenování a na povrch elektrody tak nemusel být použit sprej s křídovým práškem.



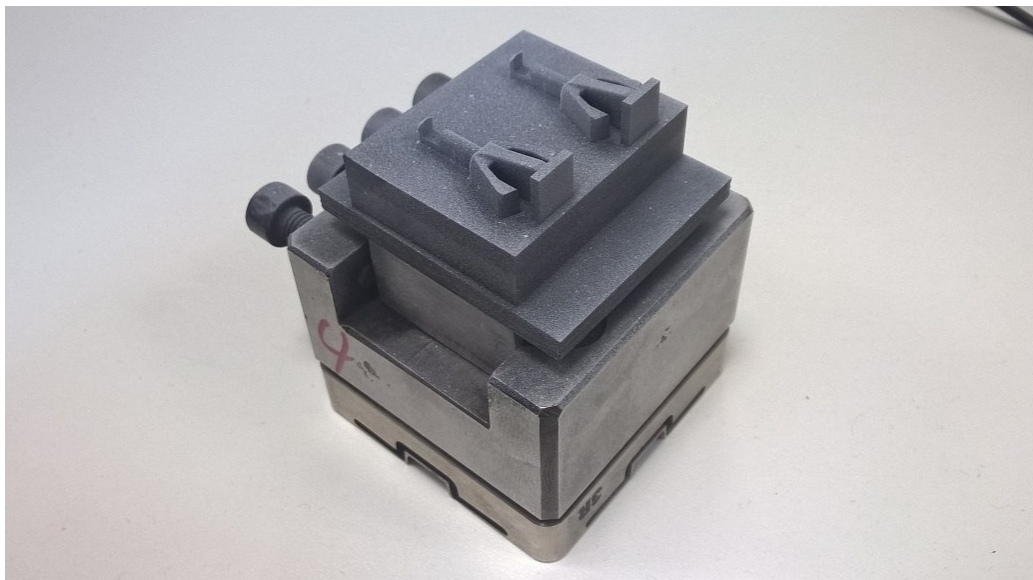
Obr. 42. Elektroda 2



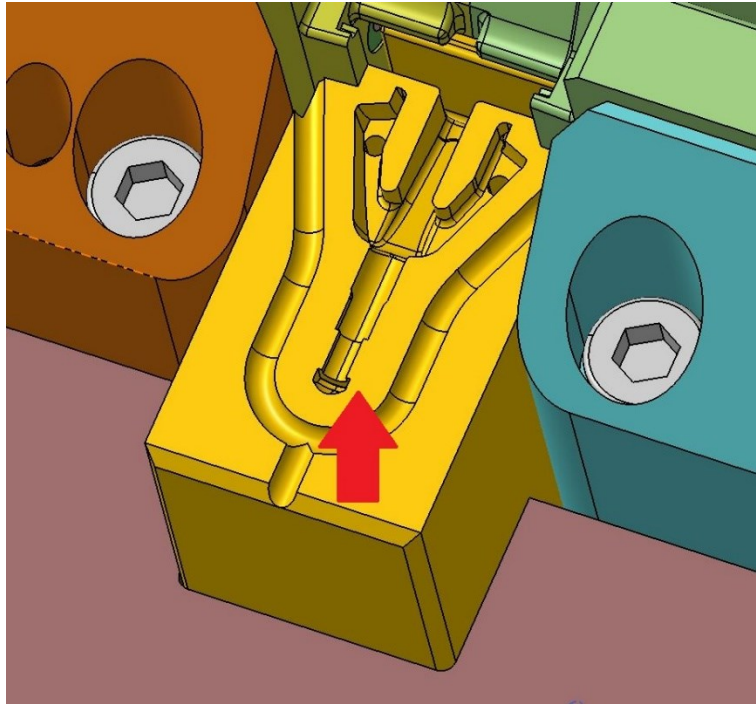
Obr. 43. Hotový výrobek z hloubené dutiny ve tvárnici

5.3 Elektroda 3

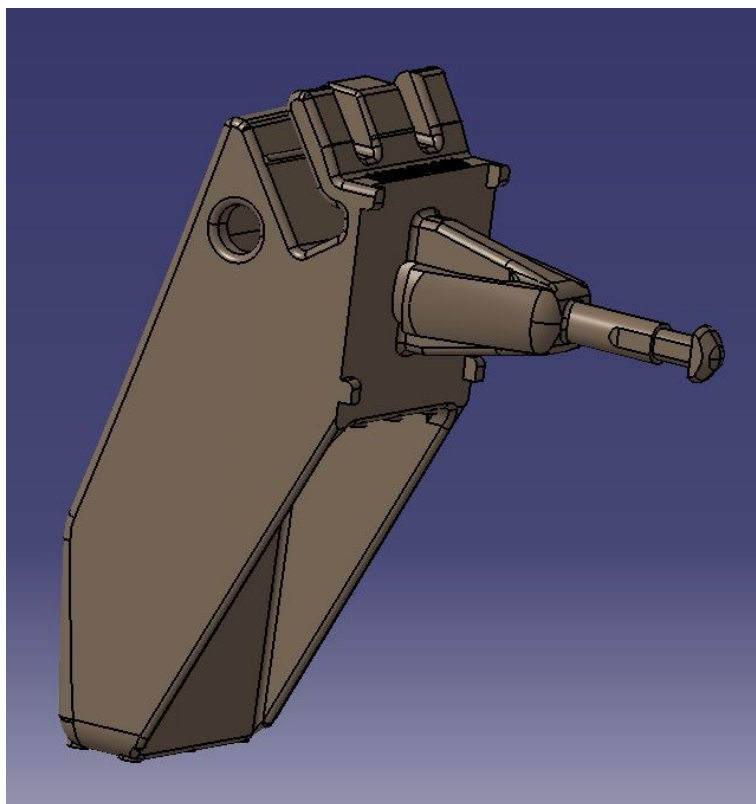
Elektroda nachází využití při hloubení dutiny ve tvárníku i tvárnici vstříkovací formy (Obr. 45), která slouží k výrobě pružných částí – zácvaků (Obr. 46). Elektroda je vyrobena z grafitu R 8650, avšak zde se již objevily problémy s odlesky a proto bylo nutné ji opatřit slabým nástřikem bílým sprejem.



Obr. 44. Elektroda 3



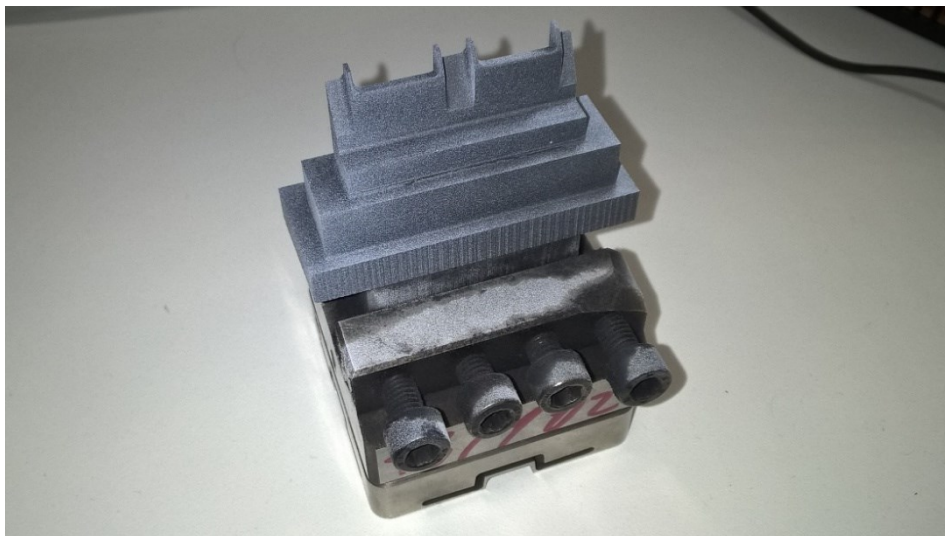
Obr. 45 Dutina tvárnice vstříkovací formy hloubená elektrodou 3



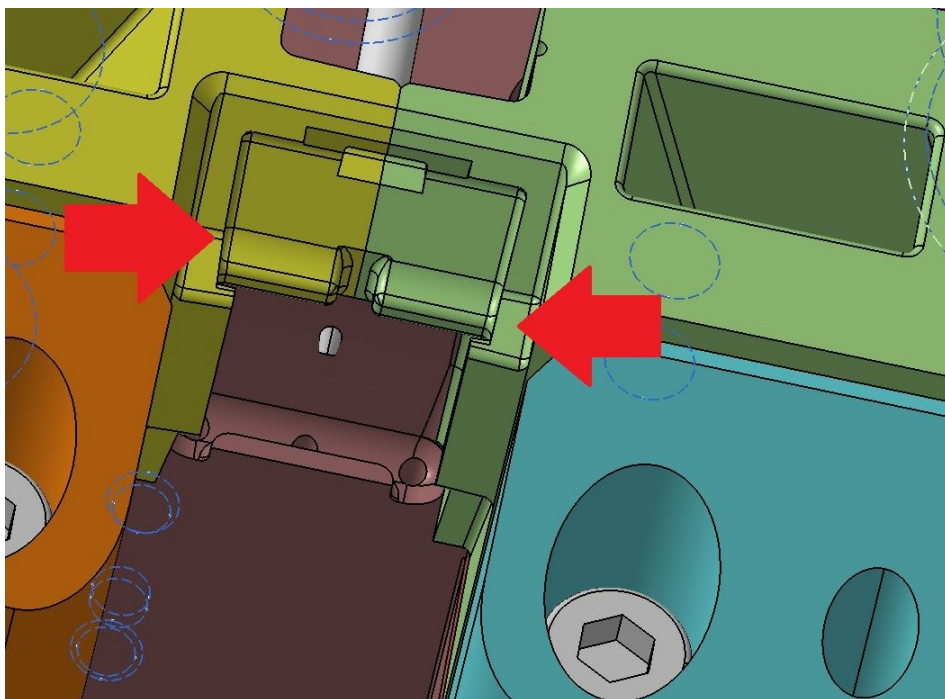
Obr. 46. Hotový výrobek se zácvakem s hloubenými tvary elektrodami 3 a 4

5.4 Elektroda 4

Elektroda je opět vyrobena z grafitu R 8650. Tato elektroda byla vyrobena s velkou nepřesností, což vedlo k tomu, že musela být vyřazena z pracovního procesu. Nepřesnost mohla být způsobena např. chybou v obráběcím programu nebo velkým opotřebením frézovacích nástrojů. Elektroda měla sloužit k hloubení dutiny tvárnice vstříkovací formy (Obr. 48), která má produkovat tvary do posuvných kostek, tvořících boční tvary výlisku (Obr. 46).



Obr. 47. Elektroda 4



Obr. 48. Dutina tvárnice vstříkovací formy

6 MĚŘENÍ ROZMĚRŮ

Aby bylo možné změřit rozměry tvarově složitých elektrod, bylo zapotřebí použít nejmodernějších technologií měření. To bylo umožněno v laboratoři Vědeckotechnického parku Informační a komunikační technologie, kde se nachází 3D optický skener ATOS Triple Scan II.

V této kapitole bude popsáno použité skenovací zařízení a také průběh skenování konkrétních elektrod.

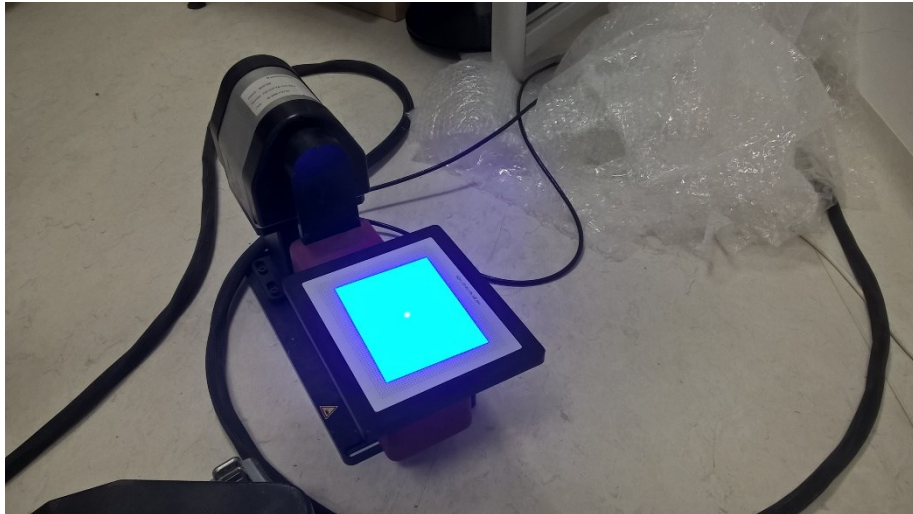
6.1 ATOS Triple Scan

3D skener ATOS Triple Scan využívá speciálně vyvinutou měřicí a projekční technologii společnosti GOM, která se vyznačuje vysokou přesností měření. Hlavní výhodou tohoto skeneru je, že zvyšuje produktivitu přímým skenováním objektů s lesklým či tmavým povrchem, skenováním hlubokých otvorů nebo jemných hran se zachováním přesností i velmi vysokého rozlišení. Díky tomuto způsobu výrazně snižuje počet jednotlivých skenů. Součástí jeho vybavení je speciálně vyvinutá optika pro přesné měření a kamera s vysokým rozlišením. Podle požadavků konkrétní aplikace lze nastavovat jeho přesnost, rozlišení i měřená oblast. Nastavitelnost těchto parametrů tak umožňuje využití nejvyššího rozlišení pro měření malých součástí s rozměry od 38 mm nebo naopak extrémně rychlou 3D digitalizaci rozměrných dílů s objemem do 2 m. ATOS Triple Scan disponuje technologií modrého světla, což umožňuje přesné měření nezávislé na světelných podmínkách v okolí. [25]

6.2 Průběh měření

6.2.1 Kalibrace

Aby skener pracoval správně, bylo nejdříve potřeba provést jeho kalibraci. Ta proběhla pomocí kalibrační destičky GOM/CP 40/MV 100 mm, která byla upnuta na dvouosém rotačním stole. Skener byl upnut na polohovací stojan (Obr. 50) a bylo potřeba seřadit laserové paprsky, které se musí překrývat ve středu kalibrační destičky (Obr. 49). Bod určený těmito paprsky je potom bod, který leží v rovině zaostření skeneru. Na závěr se spustil kalibrační proces. Proces je spuštěn pomocí předem naprogramovaného skriptu. Tato fáze kalibrace již probíhá plně automaticky.



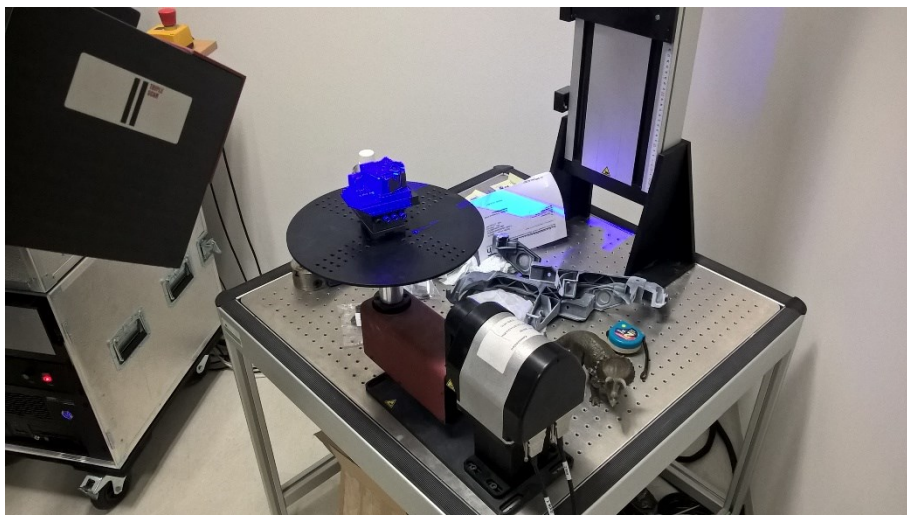
Obr. 49. Kalibrace skeneru pomocí destičky GOM/CP 40/MV 100 mm



Obr. 50. Polohovací stojan se skenerem

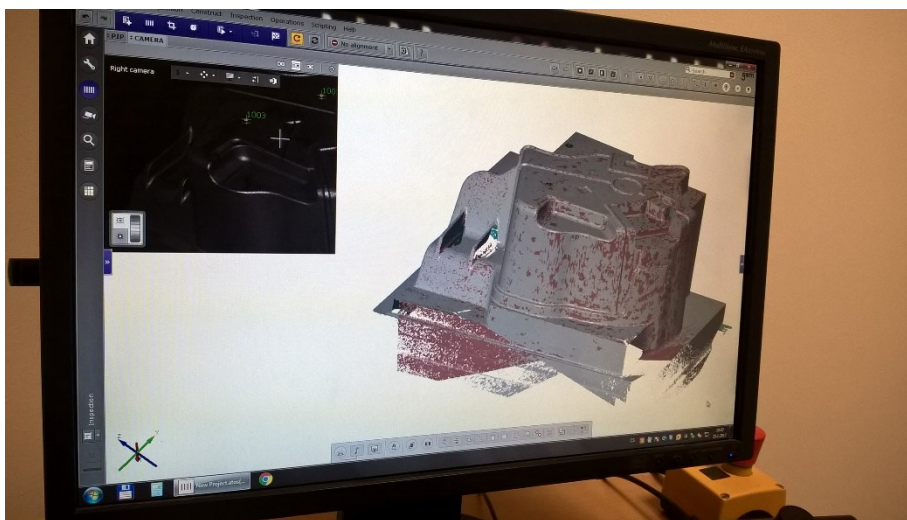
6.2.2 Skenování

Elektroda byla důkladně očištěna a byly na ni nalepeny referenční značky, které zajišťují potřebnou přesnost a návaznost naskenovaných dat. Elektroda byla následně umístěna na dvouosý rotační stůl a bylo spuštěno snímání. Ovládání skeneru bylo prováděno softwarem ATOS Professional V8.



Obr. 51. Průběh skenování elektrody 2

Na Obr. 51. můžeme vidět modré světlo dopadající na povrch elektrody. Tato technologie umožňuje získat mrak bodů (Obr. 52), ze kterého je následně vytvořen 3D model snímaného objektu.

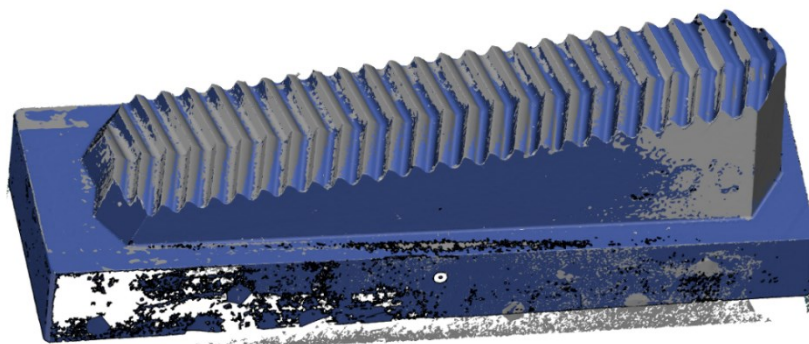


Obr. 52. Mrak bodů snímané elektrody v prostředí softwaru ATOS Professional

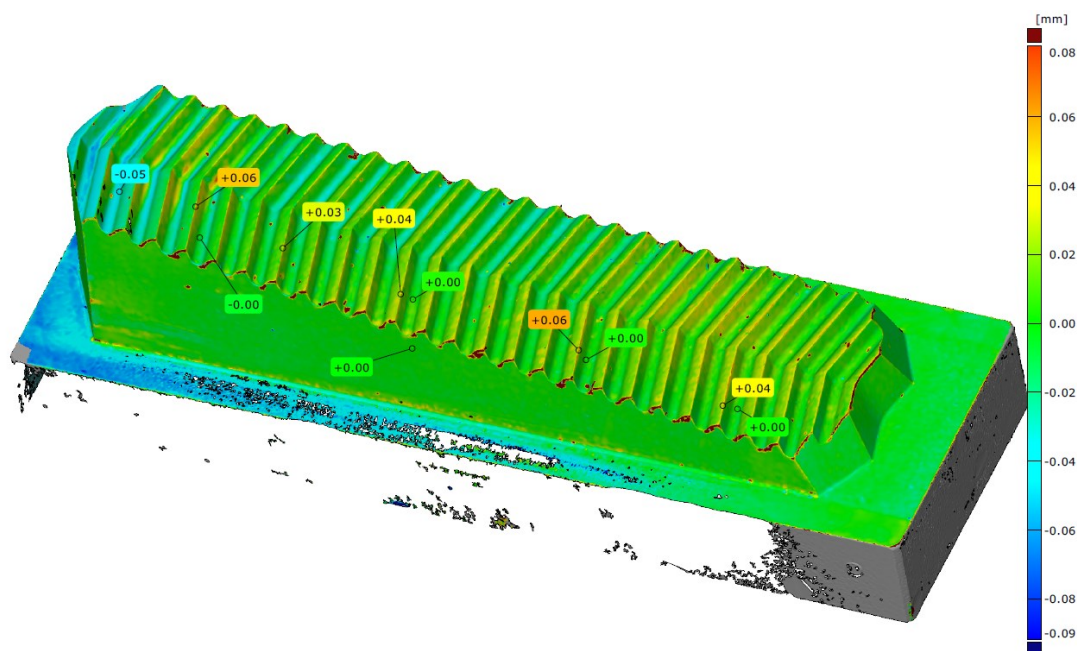
6.2.3 Chyba při měření

Pro správné vyhodnocení dat je třeba v softwaru ATOS Professional použít správnou funkci pro srovnání 3D modelu a naskenovaného mraku bodů. Při použití funkce „best fit“ u měření elektrody 1 (Obr. 53) došlo k nepřesnému proložení a díky tomu software vyhodnotil některé rozměry v plusových hodnotách (Obr. 54), což je při technologii elektroeroze nemožné. Proto muselo být použito lokální srovnání (Obr. 55), v našem případě

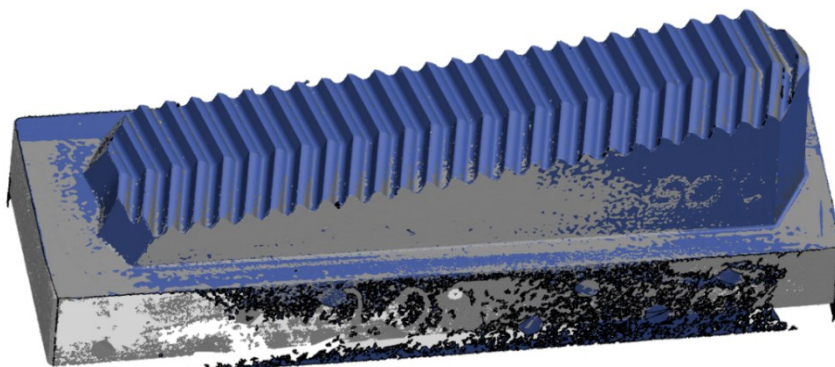
srovnání dle podstavy a tím došlo ke zpřesnění shody (proložení) 3D modelu a mraku bodů získaného skenováním. Korektní hodnoty jsou pak popsány již v kapitole 7.



Obr. 53. Použití funkce „best fit“ u měření elektrody 1



Obr. 54. Barevná mapa odchylek při nepřesném proložení



Obr. 55. Použití funkce lokálního srovnání

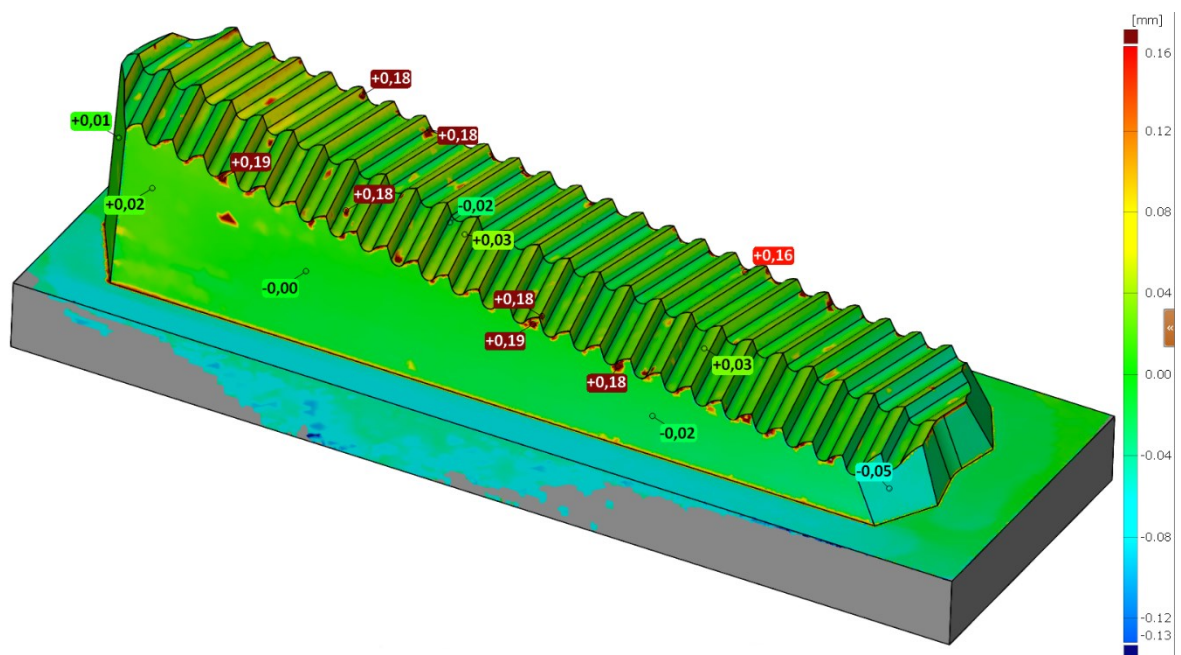
7 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

7.1 Srovnání s CAD daty

Srovnáním s CAD daty se rozumí vzájemné posouzení rozměrů reálného výrobku (elektrody) s jeho předlohou ve formě CAD modelu. CAD model má ideální tvar, který ovšem není možné reálně vyrobit. Tím je myšleno, že např. rozměry, tvar a vzájemná poloha skutečných ploch se liší od modelových ploch výrobku. Výrobní stroje pracují s určitou přesností a tím pádem není možné zajistit přesnost absolutní.

7.1.1 Elektroda 1

Na Obr. 56 vidíme naskenovanou, reálně vyrobenou elektrodu ve srovnání s jejím teoretickým CAD modelem. Elektroda byla vyrobena s poměrně velkou přesností. Na čelní straně elektrody jsou rozdíly pouze v řádu setin milimetru. Tmavá místa na hranách elektrody vyskytující se na obrázku, jsou otřepy vznikající v důsledku mechanického obrábění – nástroj otřep z hran při jeho odjezdu do další obráběcí pozice neodstraní. Velikost otřepů dosahuje do výšky až 0,19 mm vůči teoretické hodnotě jednotlivých bodů elektrody. Elektroda však do procesu EDM s otřepy nevstupuje, neboť nástrojář je povinen před obráběním elektrodu očistit a zbavit právě zmiňovaných otřepů.

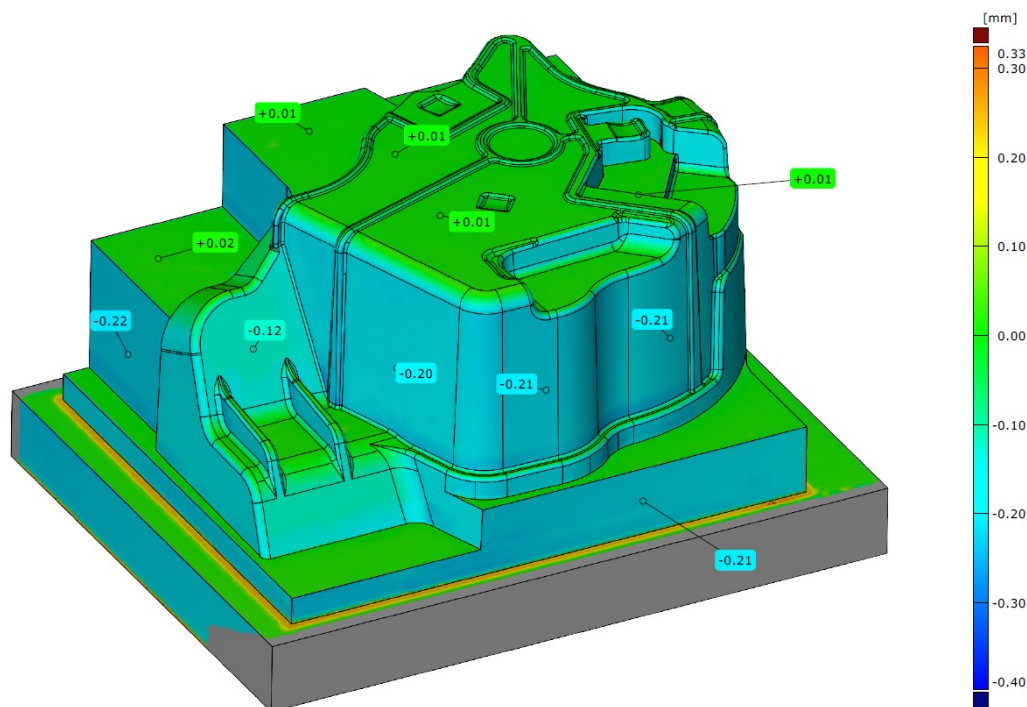


Obr. 56. Barevná mapa odchylek elektrody 1 při srovnání s CAD modelem

Reálně můžeme o rozměrech dle obrázku hovořit, že elektroda je vyrobena přesně a srovnané rozměry se liší v rozmezí od -0,05 do +0,03 mm.

7.1.2 Elektroda 2

Elektroda 2 nemá oproti předešlé elektrodě tolik ostrých hran. Zaoblením hran došlo k eliminaci otřepů a navíc také uhlík má třísku drobtivou a netvárnou. Velikost rozdílů na čelní straně elektrody je pouze 0,01 mm a můžeme tedy říct, že tato plocha byla vyrobena s velkou přesností. Na bočních stěnách elektrody však vidíme záporná čísla dosahující hodnot až -0,21 mm. To mohlo být způsobeno např. menší přesností či chybným nastavením stroje při obrábění. Při erozi bude muset obsluha stroje počítat s danou nepřesností a upravit případně NC program.

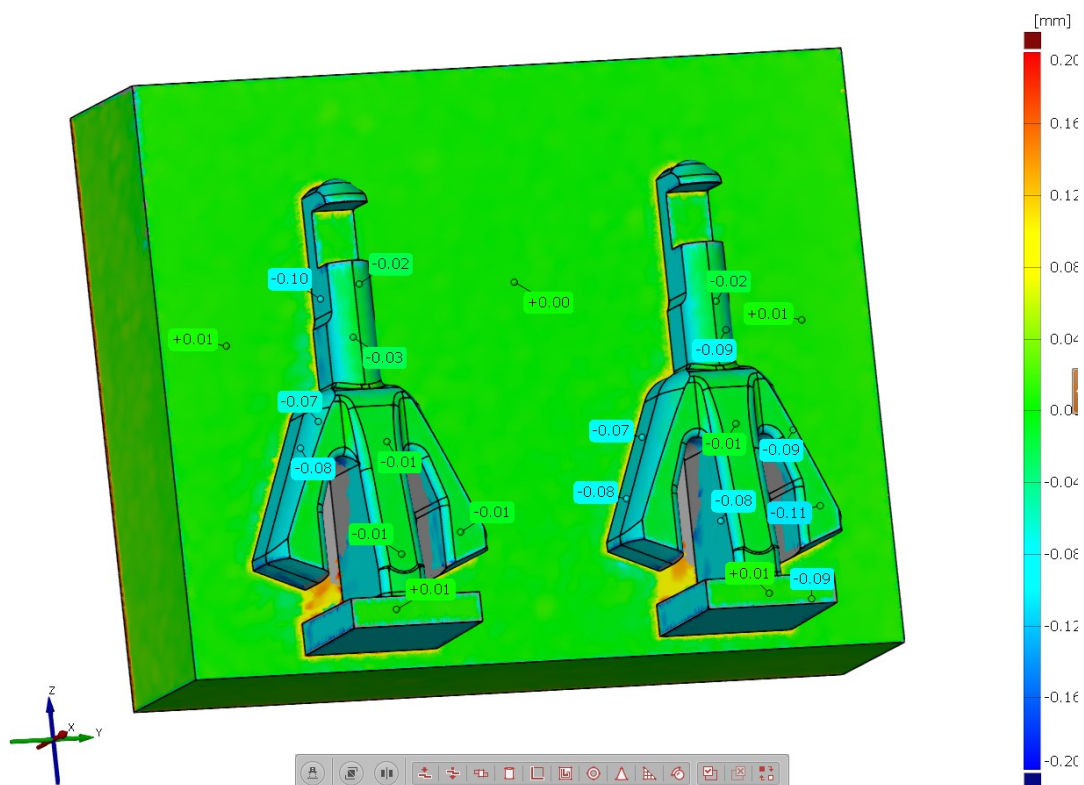


Obr. 57. Barevná mapa odchylek elektrody 2 při srovnání s CAD modelem

7.1.3 Elektroda 3

Čelní, rovné plochy elektrody jsou vyrobeny velmi přesně, neboť rozdíl hodnot činí pouze $\pm 0,01$ mm. Hrany a zaoblení však mají vyšší nepřesnost, která dosahuje hodnot -0,02 až -0,11 mm. U hran na rozhraní elektrody a podstavy jsou rozdíly proložení v kladných hodnotách. Všechny tyto nepřesnosti musí vzít obsluha stroje před erozí v potaz.

Na obrázku (Obr. 58) se vyskytují i místa s ještě vyšší nepřesností. Protože se však jedná o obtížně dostupná místa ke skenování, je velmi pravděpodobné, že jde pouze o chybu skeneru. Šedá místa na vnitřních plochách v části elektrody blíž k podstavě jsou modelová data. Aby mohl skener vyhodnotit určité místo, je třeba, aby ho v jednom okamžiku zabíraly obě kamery skeneru. To je však v tomto případě kvůli tvaru elektrody nemožné a proto nebylo možné udělat v těchto místech srovnání dat. Naměřit tyto body by bylo možné např. pomocí mechanického (dotykového) 3D skeneru.

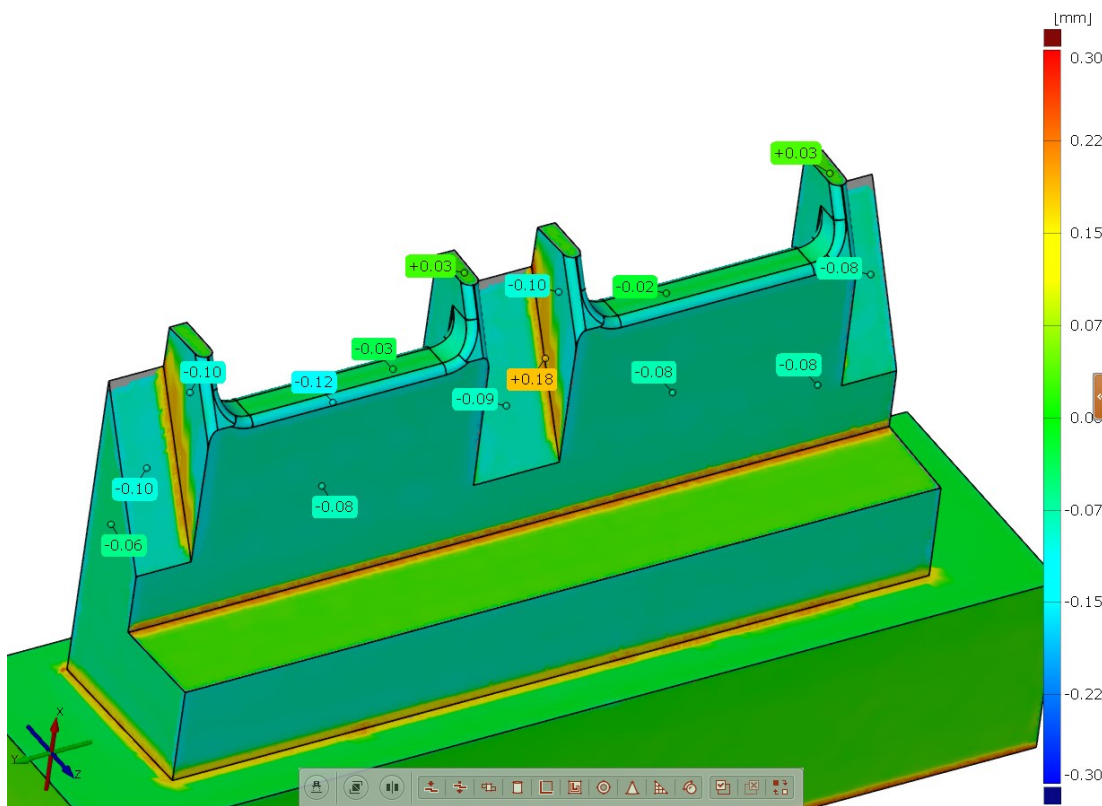


Obr. 58. Barevná mapa odchylek elektrody 3 při srovnání s CAD modelem

7.1.4 Elektroda 4

Obr. 59 zobrazuje elektrodu, která byla vyřazena, protože na ni obsluha hloubičky objevila vady, čímž se stala nevyhovující pro pracovní proces. Toto tvrzení pak potvrdilo následné skenování, kde byly objeveny vady na vnitřních plochách elektrody. Na velmi malém místě je vidět rozdíl v rozmezí od -0,10 až +0,18 mm. Plocha je velmi nerovná a nemohla by správně plnit svou funkci pro její následné použití. Tato elektroda tak neprošla erozí, a proto není zmíněna v následující kapitole, kde jsou srovnávány úbytky materiálu elektrody po jiskření. Maximální hodnoty +0,18 mm zřejmě odpovídají umístění rádiusů,

kteřé vždy vzniknou při obrábění ostrých rohů, které je frézováním nemožné na daném tvaru vyrobit.



Obr. 59. Barevná mapa odchylek elektrody 4 při srovnání s CAD modelem

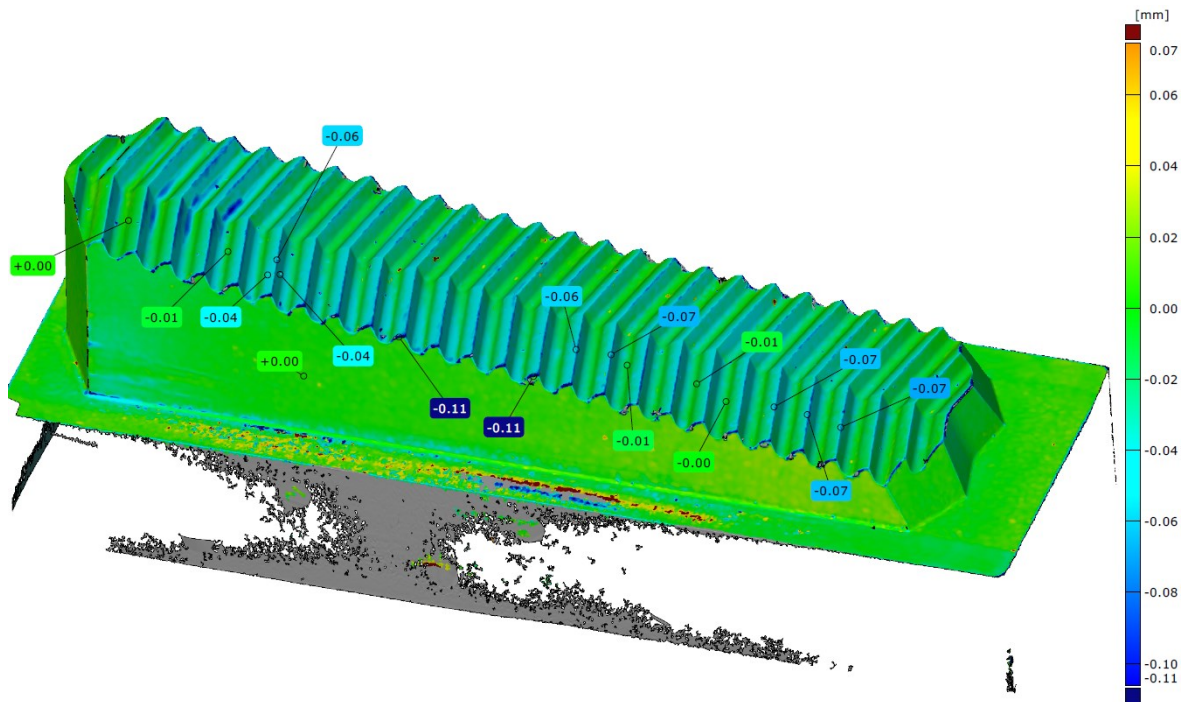
7.2 Srovnání skenů před a po elektroerozi

V této kapitole je popisováno srovnání naměřených rozměrů reálného výrobku (elektrody) před jeho použitím v praxi s naměřenými rozměry téhož výrobku, který již prošel jistým pracovním cyklem. V tomto případě jde o porovnávání jedné a té samé elektrody před jejím uplatněním v technologii elektroerozivního obrábění a po skončení elektroeroze. Díky tomuto srovnání dokážeme posoudit, jaké opotřebení mají jednotlivé plochy a místa elektrody.

7.2.1 Elektroda 1

Obr. 60 ukazuje pouze část elektrody. Její spodní (upínací) část nebyla skenována, protože je z hlediska srovnávání pracovních ploch nepodstatná. Značné úbytky materiálu (až 0,11 mm) pozorujeme v místech, kde se nacházely otřepty (ale ty však odstranil nástrojář). Vlivem elektrického proudu a tepla nastaly úbytky i na jednotlivých hranách na čelní straně elektrody. Protože jsou tato místa objemnější než otřepty, hodnoty úbytku materiálu se

pohybují v rozmezí 0,04 mm – 0,07 mm. Z těchto poznatků lze usoudit, že tenké stěny, tvary a hrany mají větší opotřebení v porovnání s prohlubněmi na nástroji. Z obrázku je také patrné, že i ve vnitřních místech, které jsou v průběhu eroze v kontaktu s obrobkem značnou dobu, dochází k většímu úběru (opalu) materiálu elektrody.

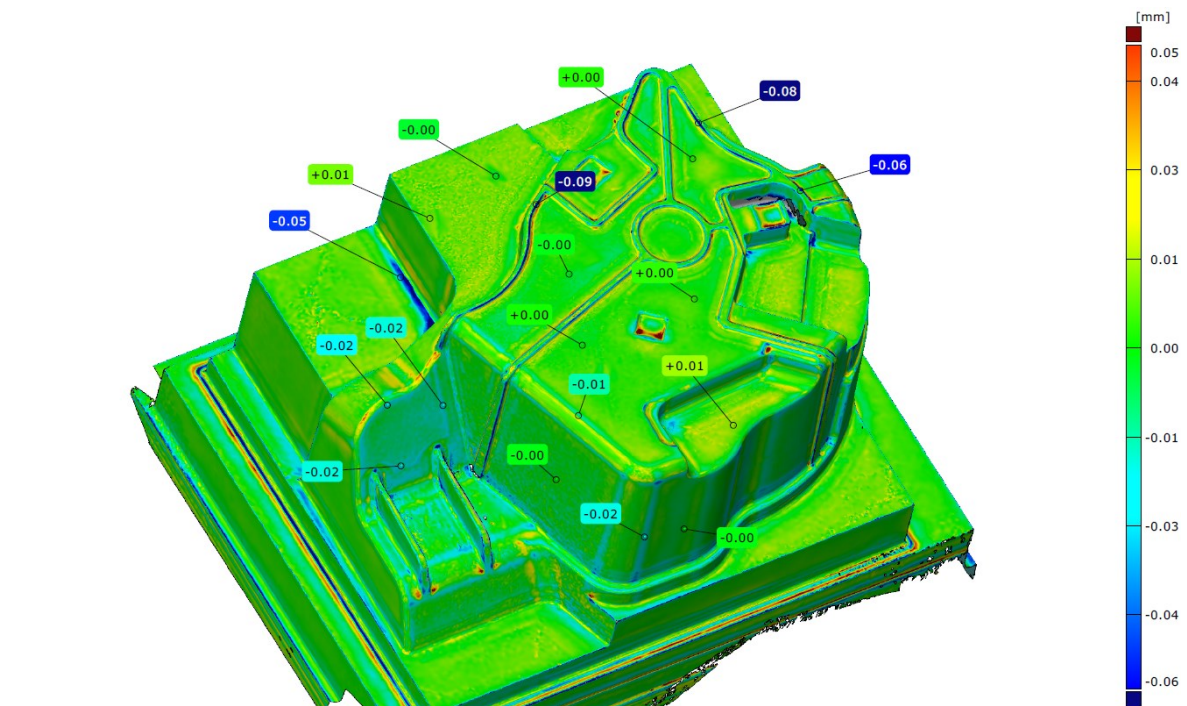


Obr. 60. Barevná mapa odchylek elektrody 1 při srovnání před a po elektroerozi

7.2.2 Elektroda 2

Na srovnání u elektrody 2 (Obr. 61) vidíme největší úbytky, stejně jako v předchozím případě, u tenkých stěn a tvarů. Nyní se jejich hodnoty pohybují v rozmezí 0,06 mm – 0,09 mm. Dále je patrné, že většina ploch je po procesu obrábění bez významné změny, tedy nedošlo k výraznému „opalu“. Úbytek o cca -0,02 mm je pozorován v rádiusech a vnitřních hrankách na tvaru a na šikmé ploše u dvou žebírek.

Co zde také pozorujeme, jsou kladné hodnoty proložení. Nejedná se však o nárůstky materiálu, ale o chybu skeneru či nepřesné proložení bodů.



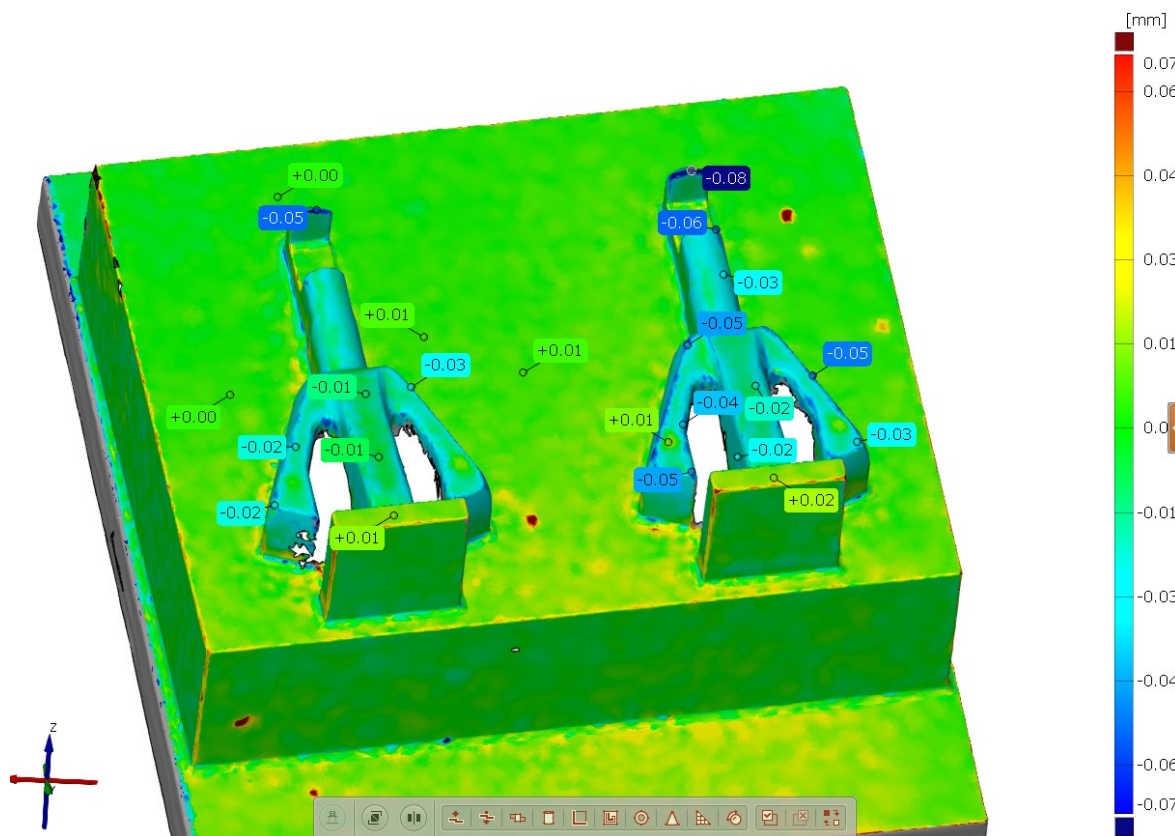
Obr. 61. Barevná mapa odchylek elektrody 2 při srovnání před a po elektroerozi

7.2.3 Elektroda 3

Elektroda 3 je z uvedených elektrod nejobtížnější na vyhodnocení, protože má složitý tvar, který nelze důkladně změřit, a proto se hodnoty jejího úbytku na některých místech dají pouze odhadovat. Konkrétně se jedná o vnitřní plochy elektrody. Jak už bylo popsáno výše, pro změření těchto ploch by bylo třeba užití jiné technologie skenování dat.

Elektroda vykazuje největší úbytek materiálu $-0,08$ mm ve své horní části v oblasti tenké stěny, kde se elektrický výboj nemůže rozprostřít na větší množství materiálu a je jím zasažena pouze malá plocha. Hrany a rádiusy mají úbytky v rozmezí $-0,03$ až $-0,06$ mm. Na čelních plochách se úbytek pohybuje kolem hodnoty $-0,02$ mm. Kladné hodnoty proložení, které vidíme na spodní části elektrody, jsou zapříčiněny chybou skeneru.

Podle srovnání u předchozích dvou elektrod je zřejmé, že plochy, jejichž normála je rovnoběžná s rovinou podstavy, nevykazují téměř žádný úbytek. Plochy elektrody 3, které nemohly být změřeny, tento předpoklad splňují také (viz. Obr. 58) a proto se hodnota jejich úbytku bude pohybovat v rozmezí $0,00$ až $0,01$ mm.



Obr. 62. Barevná mapa odchylek elektrody 3 při srovnání před a po elektroerozi

ZÁVĚR

V teoretické části této bakalářské práce byly popsány jednotlivé nekonvenční metody obrábění, jejich principy a využití v praxi. Následně byla důkladněji rozebrána metoda elektroerozivního obrábění, kde byl popsán její princip, výhody, nevýhody, aplikace, automatizace a taktéž byli vypsáni přední výrobci a dodavatelé elektroerozivních strojů ve světě a u nás. Závěr teoretické části se věnuje popisu technologie 3D skenování. Byl tedy proveden základní přehled metod 3D skenování, který čítá sedm variant a jsou v něm uvedeny i jednotlivé principy. Kapitola byla uzavřena oblastmi využití této technologie.

Praktická část je zaměřena na posuzování rozměrů nástrojových elektrod pomocí moderních metod měření. Byly vytipovány čtyři elektrody z praxe, které si sama vyrobila a následně použila k hloubení dutin tvárnic vstříkovacích forem firma MESIT foundry, a.s. První elektroda je měděná a zbylé tři jsou z grafitu nesoucí označení R 8650. Tyto elektrody byly naskenovány v laboratoři Vědeckotechnického parku Informační a komunikační technologie, kde byl k tomuto účelu použit 3D optický skener ATOS Triple Scan II. Naskenované hodnoty elektrod byly v softwaru ATOS Professional V8 proloženy jejich CAD modelem a díky tomu byly zjištěny nepřesnosti při výrobě. Skener umožňuje posuzovat hodnoty v řádu setiny milimetru. Na základě naměřených hodnot byla obsluhou hloubičky z pracovního procesu vyřazena elektroda 4, protože na ní byly objeveny vady. Elektrody 1, 2 a 3 požadovaným parametrům vyhovovaly a tak byly použity v procesu elektroerozivního hloubení. Následně byly opět naskenovány a jejich rozměry byly porovnány se skeny před erozí. Tím byly zjištěny hodnoty úbytku materiálu jednotlivých elektrod.

U elektrody 1 došlo k největším úbytkům ve vnitřních místech a na hranách, kde byly při prvním skenování otřepy, které ale musely být před erozí odstraněny. Elektrody 2 a 3 měly největší úbytky v místech tenkých stěn a tvarů. U těchto elektrod se objevily kladné hodnoty proložení, což je však přisuzováno chybě skeneru, protože při technologii eroze není možné, aby materiál nástrojové elektrody přibýval. Celkově lze zhodnotit, že největší úbytky nastávají na hranách a tenkých stěnách, kdežto nejmenší úbytky se vyskytují na velkých plochách, které nejsou narušeny různými tvary.

Pro praxi tedy vyplývá, že konstruktéři elektrod pro hloubení tvarů ve vstříkovacích formách musí brát v potaz značný úběr materiálu elektrod v místech šikmých ploch, výstupků a tenkých žeber, které jsou v průběhu elektroeroze velmi rychle odebírány a může

tak docházet k výrobě nepřesných tvarů mimo požadované rozměry. Metoda 3D skenování je při výrobě elektrod s výhodou použitelná, avšak při posuzování výrobků je třeba brát v potaz samotnou přesnost, se kterou skener pracuje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
- [2] *Fyzikální (nekonvenční) technologie obrábění* [online]. [cit. 2016-12-21]. Ke stažení dostupné z: <http://www.strojnylyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>
- [3] *Nekonvenční metody obrábění* [online]. [cit. 2016-12-21]. Ke stažení dostupné z: <http://www.techstroj.g6.cz/T/T20.pdf>
- [4] *Nekonvenční metody obrábění* [online]. [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33789&instance=2>
- [5] ŘASA, Jaroslav, Vladimír GABRIEL a Přemysl POKORNÝ. *Strojírenská technologie 3*. 2. díl, Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-227-8.
- [6] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [7] JANÍČKOVÁ, Petra. Učíme v prostoru [online]. [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2573
- [8] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 19. 7. 2007, č. 7 [cit. 2017-1-3]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [9] ŠUSTROVÁ, Michaela. *Stroje pro elektroerozivní obrábění* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-1-3]. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta podnikatelská. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66231
- [10] POSLUŠNÝ, Petr. Elektroerozivní obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni.html>
- [11] POSLUŠNÝ, Petr. Zavádění nekonvenčních technologií. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zavadeni-nekonvencnich-technologii.html>
- [12] Sodick. *Zenit* [online]. ©2016 [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: <http://stroje.zenit.cz/sodick-0/>

- [13] Kdo jsme. *PENTA TRADING* [online]. ©2016 [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: <http://www.penta-edm.cz/text-kdo-jsme/>
- [14] *EDM TRADE s.r.o.* [online]. ©2016 [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: <http://www.edmtrade.cz/>
- [15] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Vienaľa, 2000. Edícia vedeckej a odbornej literábury. ISBN 80-7099-430-4.
- [16] *CHPS s.r.o.* [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/>
- [17] Profil. *GF Machining Solutions* [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: http://www.gfms.com/country_CZ/cs/about-gf-machining-solutions/profile.html
- [18] GAŠPAR, Daniel. *Automatizace pracoviště elektroerozivního obrábění* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-01-26]. Diplomová práce. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/27519>
- [19] *Technologie skenování ve 3D* [online]. [cit. 2017-01-26]. Ke stažení dostupné z: <http://www.spsks.cz/wp-content/uploads/2016/03/Technologie-skenov%C3%A1n%C3%AD-ve-3D-0.pdf>
- [20] 3D skenování. *CAD* [online]. [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2851-3d-skenovani.html>
- [21] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [22] NTZ_EDM-hloubeni_1. In: *Ntzvsetin* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: http://www.ntzvsetin.cz/wp-content/uploads/NTZ_EDM-hloubeni_1.jpg
- [23] GŘEŠ, Tomáš. Princip funkce 3D kamery Time-of-Flight. In: *Kamery.atesystem* [online]. 2016 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://kamery.atesystem.cz/site/assets/files/1637/305c49b42562256b.jpg>
- [24] KUBÍN, Tomáš, Oldřich UČEŇ a Jan BLATA. Princip triangulace optického skeneru. In: *3D SCAN* [online]. 2011 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/images/aktuality/4.png>
- [25] ATOS Triple Scan. *MCAE* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/produkty/atos-triple-scan/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	3 Dimensional.
NMO	Nekonvenční metody obrábění.
EMO	Elektrické metody obrábění.
EDM	Electro Discharge Machining.
ECM	Electro Chemical Machining.
δ	Relativní objemový úbytek [%].
CNC	Computer Numerical Control.
Ra	Drsnost obrobeného povrchu.
HSC	High Speed Cutting.
2D	2 Dimensional.
RTG	Rentgen.
CT	Computer Tomograph.
CMM	Coordinate Measuring Machine.
CAD	Computer Aided Design.
LED	Light Emitting Diode.
CDD	Charged Coupled Device.
CAM	Computer Aided Manufacturing.
STL	Stereo Lithography.
NC	Numerical Control.
FEM	Finite Element Method.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Rozdělení NMO [1].....	13
Obr. 2. Princip metody elektroerozivního hloubení [2].....	14
Obr. 3. Princip metody elektrochemického obrábění [3].....	15
Obr. 4. Princip metody obrábění laserem [4].....	16
Obr. 5. Ozubená kola vyřezaná laserem [16].....	16
Obr. 6. Schéma zařízení pro obrábění elektronovým paprskem [1].....	17
Obr. 7. Princip metody obrábění paprskem plasmu [3].....	18
Obr. 8. Princip metody chemického obrábění [1].....	19
Obr. 9. Obrábění ultrazvukem [4].....	20
Obr. 10. Princip metody obrábění kapalinovým paprskem [4].....	21
Obr. 11. Ozubená kola vyřezaná vodním paprskem [16].....	22
Obr. 12. Princip metody obrábění proudem brusiva [1].....	23
Obr. 13. Princip zařízení pro EDM [1].....	24
Obr. 14. Krátery vzniklé při elektroerozivním obrábění na povrchu materiálu [7]....	25
Obr. 15. Závislý generátor [1].....	26
Obr. 16. Rotační generátor [1].....	27
Obr. 17. Polovodičový generátor [1].....	28
Obr. 18. Schéma vnějšího vyplachování [1].....	30
Obr. 19. Schéma tlakového vyplachování [1].....	31
Obr. 20. Schéma vyplachování odsáváním [1].....	31
Obr. 21. Schéma pulzního vyplachování [1].....	32
Obr. 22. Schéma elektroerozivního hloubení dutin [1].....	33
Obr. 23. Hotový tvárník formy po dokončení hloubení [22].....	34
Obr. 24. Princip elektroerozivního drátového řezání [1].....	35
Obr. 25. Drátová řezačka Mitsubishi FA20S [10].....	38
Obr. 26. Hloubička Gantry 1200 společnosti OPS Ingersoll [11].....	39
Obr. 27. EDM děrovačka Sodick K1C [12].....	40
Obr. 28. Řezačka AgieCharmilles AC Progress VP3 [17].....	40
Obr. 29. Hloubička PENTA 433GS CNC [13].....	41
Obr. 30. Princip metody „time of flight“ [23].....	45
Obr. 31. Princip triangulace optického skeneru [24].....	45
Obr. 32. CMM DEA GLOBAL Silver Performance [19].....	47

Obr. 33. Mechanický 3D skener FaroArm [19].....	48
Obr. 34. Laserový skener HandyScan [19].....	49
Obr. 35. Optický skener ATOS III Triple Scan firmy GOM [19].....	50
Obr. 36. ATOS I skener jako trackovací zařízení [19].....	50
Obr. 37. CT skener Wenzel exaCT M100 [19].....	51
Obr. 38. Barevná mapa odchylek plechového výlisku [19].....	53
Obr. 39. Skenování rotoru turbíny [19].....	54
Obr. 40. Elektroda 1 pokrytá křídovým práškem.....	57
Obr. 41. Dutina tvárnice vstříkovací formy.....	58
Obr. 42. Elektroda 2.....	58
Obr. 43. Hotový výrobek z hloubené dutiny ve tvárnici.....	59
Obr. 44. Elektroda 3.....	59
Obr. 45 Dutina tvárnice vstříkovací formy hloubená elektrodou 3.....	60
Obr. 46. Hotový výrobek se zácvakem s hloubenými tvary elektrodami 3 a 4.....	60
Obr. 47. Elektroda 4.....	61
Obr. 48. Dutina tvárnice vstříkovací formy.....	61
Obr. 49. Kalibrace skeneru pomocí destičky GOM/CP 40/MV 100 mm.....	63
Obr. 50. Polohovací stojan se skenerem.....	63
Obr. 51. Průběh skenování elektrody 2.....	64
Obr. 52. Mrak bodů snímané elektrody v prostředí softwaru ATOS Professional.....	64
Obr. 53. Použití funkce „best fit“ u měření elektrody 1.....	65
Obr. 54. Barevná mapa odchylek při nepřesném proložení.....	65
Obr. 55. Použití funkce lokálního srovnání.....	65
Obr. 56. Barevná mapa odchylek elektrody 1 při srovnání s CAD modelem.....	66
Obr. 57. Barevná mapa odchylek elektrody 2 při srovnání s CAD modelem.....	67
Obr. 58. Barevná mapa odchylek elektrody 3 při srovnání s CAD modelem.....	68
Obr. 59. Barevná mapa odchylek elektrody 4 při srovnání s CAD modelem.....	69
Obr. 60. Barevná mapa odchylek elektrody 1 při srovnání před a po elektroerozi.....	70
Obr. 61. Barevná mapa odchylek elektrody 2 při srovnání před a po elektroerozi.....	71
Obr. 62. Barevná mapa odchylek elektrody 3 při srovnání před a po elektroerozi.....	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Materiály nástrojových elektrod [6]	29
Tab. 2. Technické parametry vybraných drátových řezaček [9].....	37
Tab. 3. Technické parametry vybraných hloubiček [9]	38