

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program: strojírenská technologie

Zaměření: obrábění a montáž

**ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ NÁSTROJOVÉ OCELI A MOLDMAX[®] V VE
FIRMĚ DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.**

**ELECTRIC DISCHARGE MACHINING OF TOOL STEEL AND MOLDMAX[®] V
MATERIAL AT DENSO MANUFACTURING CZECH Ltd.**

KOM - 1155

Jiří Valenta

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Jersák, CSc

Konzultant: Ing. Oussama El Bedoui, DENSO MANUFACTURING
CZECH s.r.o.

Počet stran: 75

Počet příloh: 3

Počet tabulek: 27

Počet obrázků: 63

Datum: 27. 5. 2011

Označení DP: 1155

Řešitel: Jiří Valenta

**ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ NÁSTROJOVÉ OCELI A MATERIÁLU
MOLDMAX® V VE FIRMĚ DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.**

ANOTACE:

Tato diplomová práce se zabývá popisem procesu elektroerozivního obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX® V. V teoretické části jsou shrnuty poznatky o elektroerozivním obrábění. Cílem experimentální části je stanovit optimální materiál elektrody pro obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX® V z ekonomického hlediska.

**ELECTRIC DISCHARGE MACHINING OF TOOL STEEL AND MOLDMAX® V
MATERIAL AT DENSO MANUFACTURING CZECH Ltd.**

ANNOTATION:

This thesis describes the process of electric discharge machining (EDM) of tool steel and MoldMAX® V material. In theoretic part are recapitulated knowledge about electric discharge machining. The objective of the experimental part is to determine optimal electrode material for tool steel and MoldMAX® V machining from the economic perspective.

Klíčová slova: Obrábění kovů, nekonveční metody, elektroerozivní obrábění

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2011

Archivní označ. zprávy:

Počet stran:	75
Počet příloh:	3
Počet obrázků:	63
Počet tabulek:	27
Počet grafů:	22

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultanta.

V Liberci, 27. 5. 2011

Mé poděkování patří hlavně mému synovi, který byl neskutečně velkou motivací pro dokončení této práce a celého studia.

Na tomto místě bych chtěl také poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc za odbornou pomoc a vedení, za cenné rady a připomínky.

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam symbolů	8
1. Úvod	10
1.1 Představení firmy DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.	10
1.2 Aktuální situace elektroerozivního obrábění ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.	11
1.3 Cíle diplomové práce	11
2. Teoretická část	12
2.1 Teorie obrábění	12
2.2 Obrábění	12
2.3 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění	13
2.4 Princip elektroerozivního obrábění	14
2.4.1 Detailní popis jednoho obráběcího cyklu	16
2.4.2 Souvislost mezi průtokem proudu a teplem	18
2.4.3 Polarita	19
2.5 Časové využití výboje	20
2.6 Generátory	21
2.6.1 Závislé generátory	21
2.6.2. Nezávislé generátory	21
2.7 Dielektrikum	23
2.7.1 Historie dielektrika	23
2.7.2 Úkol dielektrika	23
2.7.3 Požadavky na dielektrikum	23
2.8 Způsob výplachů	24
2.9 Stroje pro elektroerozivního obrábění	26
2.10 Nástrojové elektrody	27
3. Metodika	31
3.1 Metodika experimentu	31
3.2 Elektrody pro experiment	31
3.2.1 Materiály pro nástrojové elektrody	32
3.3 Obráběný materiál pro experiment	33

3.4 Strojní vybavení experimentu	34
3.5 Opakovatelnost experimentu	35
3.6 Porovnání drsnosti povrchu	39
4. Experimentální část	40
4.1 Příprava experimentu	40
4.1.1 Výroba elektrod	40
4.1.2 Obráběný materiál	41
4.2 Experiment	41
4.2.1 Nastavení obráběcích podmínek	42
4.2.2 Ustavení obrobku a nástrojové elektrody	43
4.2.3 Průběh experimentů	45
5. Výsledky	47
5.1 Výsledky opakovatelnosti experimentů	47
5.2 Doba přípravy elektrod	48
5.3 Porovnání obráběcích časů	49
5.3.1 Porovnání obráběcích časů hrubovací elektrodou	49
5.3.2 Porovnání obráběcích časů dokončovací elektrodou	53
5.3.3 Celkové časy obrábění	55
5.4. Naměřené drsnosti povrchů	56
5.5 Opotřebení nástrojových elektrod	57
5.5.1 Opotřebení hrubovací elektrody	58
5.5.2 Opotřebení dokončovací elektrody	59
5.6 Ekonomické hodnocení	62
5.6.1 Náklady na výrobu jednotlivých elektrod	62
5.6.2 Náklady na hrubování	63
5.6.2 Náklady na dokončování	66
5.6.3 Celkové náklady	69
5.6.4 Zhodnocení celkových nákladů při poruše vstřikovací formy	70
6. Shrnutí a hodnocení výsledků	73
Seznam použité literatury	75
Přílohy	75

Seznam zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
Amcloy 940		Materiál pro výrobu vstříkovacích forem
BMW		Bayerische Motoren Werke
CNC		Computer Numeric Control
CU		Měď
ČSN		Československá norma
EDM		Electrical discharge machining
GAP	[mm]	Jiskrová mezera
HPM7		Nástrojová ocel pro výrobu vstříkovacích forem dle JIS
ISO		International Organization for Standardization
JIS		Japanese Industrial Standard
Kč		Koruna česká
Ltd.Co.		Limited company
MoldMAX® V		Matriál pro výrobu vstříkovacích forem
RC		Analogový oscilační elektrický obvod složený z cívky a kondenzátoru
RCL		Analogový oscilační elektrický obvod složený z rezistoru, cívky a kondenzátoru
s.r.o.		Společnost s ručením omezeným
VDI		Verein Deutscher Ingenieure
VW		Volkswagen
x,y,z		Kartézský souřadný systém

Seznam symbolů

a	[mm]	Velikosti pracovní mezery
C _{el}	[Kč]	Cena elektrody
C _{mat}	[Kč]	Cena polotovaru
CN _{fin}	[Kč]	Celkové náklady na dokončení
CN _{hrub}	[Kč]	Celkové náklady na hrubování
d	[mm]	Průměr nástrojové elektrody
D	[mm]	Požadovaný rozměr dutiny
d _{fin}	[mm]	Průměr dokončovací elektrody
h _{lskut}	[mm]	Skutečná hloubka otvoru po hrubování
h _{vykres}	[mm]	Výkresová hloubka otvoru
I	[A]	Proud
JC _{pol}	[Kč/dm ³]	Jednotková cena polotovaru elektrody
JCS _{EDN}	[Kč/hod]	Jednotková cena stroje EDM
M _m	[mm]	Zmenšení finišování nástrojové elektrody
n	[-]	počet měření
N _{fin}	[Kč]	Náklady na dokončování

N_{hrub}	[Kč]	Náklady na hrubování
N_{vy_el}	[Kč]	Náklady na výrobu elektrody
OP_{fin_el}	[mm]	Opotřebení dokončovací elektrody
OP_{oproc}	[%]	Procentuální opotřebení nástrojové elektrody
q	[-]	Časové využití periody výboje
R_a	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
R_{max}	[μm]	Největší výška nerovností
R_z	[μm]	Výška nerovností profilu z deseti bodů
T	[s]	Doba periody
T_0	[s]	Doba trvání periody
t_0	[s]	doba trvání pauzy
t_{99}	[-]	Konstanta pro úroveň spolehlivosti 99%
t_{fin}	[hod]	Čas dokončování
t_{hrub}	[hod]	Čas hrubování
t_i	[s]	Doba trvání pulzu
t_{skut_cas}	[-]	Skutečný interval spolehlivosti pro čas
t_{skut_cas}	[-]	Skutečný interval spolehlivosti pro opotřebení
U	[V]	Napětí
V_{pol}	[mm ³]	Objem polotovaru elektrody
x_{cas}	[min]	Průměrný čas obrábění
x_{cas_max}	[min]	Maximální hodnota měření času
x_{cas_min}	[min]	Minimální hodnota měření času
x_{i_cas}	[min]	Jednotlivá měření času obrábění
x_{i_op}	[mm]	Jednotlivé hodnoty opotřebení nástrojové elektrody
x_{max_cas}	[min]	Maximální hodnota statistického intervalu pro čas
x_{max_op}	[mm]	Maximální hodnota statistického intervalu pro opotřebení
x_{min_cas}	[min]	Minimální hodnota statistického intervalu pro čas
x_{min_op}	[mm]	Minimální hodnota statistického intervalu pro opotřebení
x_{op}	[mm]	Aritmetický průměr opotřebení nástrojové elektrody
x_{op}	[-]	Směrodatná odchylka pro dobu obrábění
x_{op_max}	[min]	Maximální hodnota měření pro opotřebení
x_{op_min}	[min]	Minimální hodnota měření pro opotřebení
z	[mm]	Tloušťka narušené vrstvy elektroerozivním obráběním
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná vodivost materiálu
	[W.mm ⁻²]	Koncentrace energie na plochu

1. Úvod

Firma DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. v současné době využívá pro výrobu vstřikovacích forem nástrojovou ocel. Vzhledem ke snaze o zkrácení výrobního cyklu během procesu vstřikování je nutné použít intenzivnější chlazení forem. Jednou z možností je zvětšit přestup tepla mezi vstřikovaným plastem a chladicí vodou, z tohoto důvodu se hledají nové materiály s lepší tepelnou vodivostí.

Používaná nástrojová ocel má tepelnou vodivost pouze $37 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a tvrdost 29-33 HRC. Nově používaný materiál MoldMAX[®] V má při stejné tvrdosti lepší tepelnou vodivost, která je $160 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Tato diplomová práce je věnována elektroerozivnímu obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX[®] V pomocí nástrojových elektrod různých materiálů. Hlavním důvodem výběru těchto materiálů je rozdílný způsob elektroerozivního obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX[®] V.

1.1 Představení firmy DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.

DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. patří do globální skupiny společnosti DENSO. Mateřská firma DENSO byla založena v roce 1949 v Japonsku pod názvem Nippondenso Co. Ltd. osamostatněním od firmy Toyota Motor Ltd. Co.. Firma se orientuje na automobilový průmysl a průmyslové systémy.

Česká pobočka byla založena v Liberci v roce 2001. Je předním evropským výrobcem klimatizačních jednotek a jejich součástí pro vozy značek Toyota, VW, Audi, Škoda, Lamborghini, Mercedes – Benz, BMW, Suzuki a mnoha dalších. [7]



Obr. 1.1 Společnost DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.[7]

1.2 Aktuální situace elektroerozivního obrábění ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.

Firma *DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.* v současné době pro obrábění vstřikovacích forem z nástrojové oceli používá měděné elektrody. Podíl obráběné nástrojové oceli elektroerozivním způsobem je 95 %. Se zvyšujícím se požadavkem na efektivnější chlazení vstřikovacích forem je plánováno pro jejich výrobu využít moderních materiálů. Jako nejvhodnější pro konstrukci forem byl vybrán materiál MoldMAX® V. Podíl elektroerozivního obrábění vstřikovacích forem z oceli je plánován na 30 % - 40 %, podíl obrábění vstřikovacích forem z materiálu MoldMAX® V je plánován na 45 % – 55 %. Zbývajících 15 % tvoří obrábění ostatních materiálů jako např. Amcloy 940. Jelikož se do budoucna uvažuje o výrobě forem převážně z materiálu MoldMAX® V, je nutné najít efektivní řešení pro elektroerozivní obrábění tohoto materiálu.

1.3 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je zjistit, zda je pro firmu DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. výhodnější při obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX® V používat obráběcí elektrody měděné, grafitové (EDM-1, EDM-200) případně grafitové sycené mědí (EDM-C3, EDM-C200).

Hlavním kritériem je porovnat obrábění pomocí jednotlivých elektrod z ekonomického hlediska.

Díličí cíle pro porovnání obrábění jsou:

- čas elektroerozivního obrábění,
- opotřebení nástrojových elektrod po elektroerozivním obrábění,
- vhodnost jednotlivých typů elektrod v závislosti na složitosti hloubeného tvaru,
- rychlost přípravy jednotlivých elektrod,
- kvalita obrobeného povrchu.

2. Teoretická část

2.1 Teorie obrábění

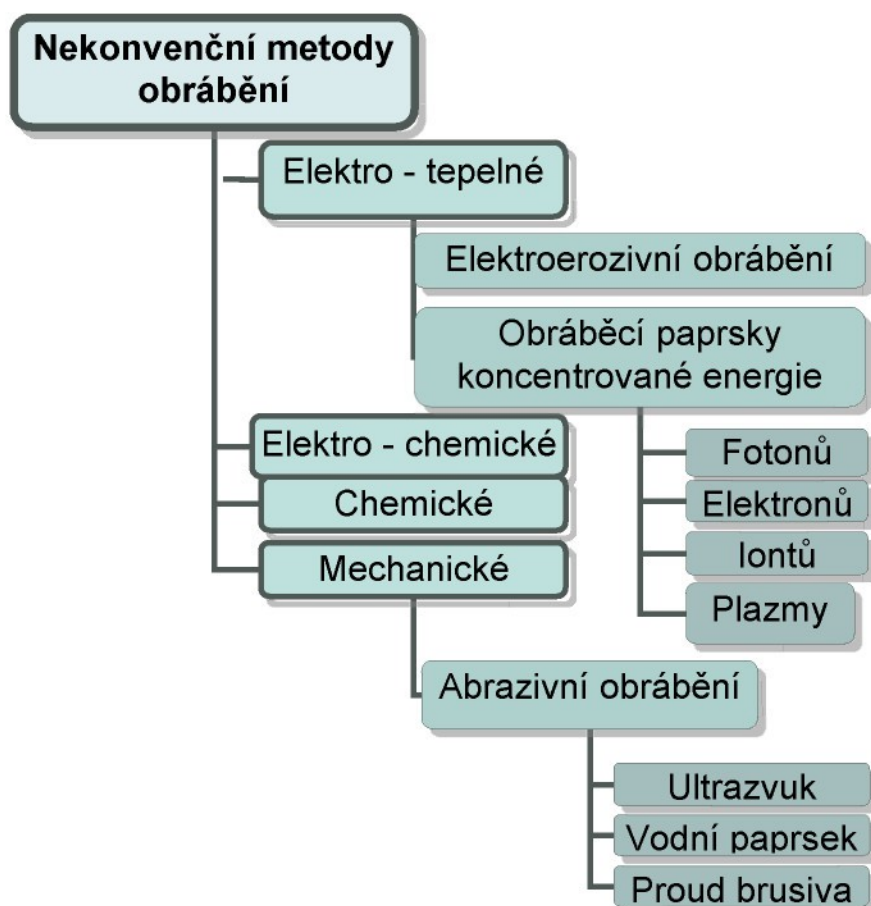
Obrábění je proces, kdy z obráběného polotovaru vzniká požadovaný obrobek, který splňuje všechny požadované rozměry, tvar a jakost povrchu.

2.2 Obrábění

Při konvenčním způsobu obrábění jako je vrtání, frézování či soustružení, vniká do obráběného materiálu obráběcí nástroj, který má definovanou geometrii nástroje. Z obrobku pak dochází k oddělování materiálu mechanicky.

Nekonvenční metody obrábění využívají některého fyzikálního nebo fyzikálně - chemického principu. Většinou dochází k bezsilovému působení na obráběný materiál bez vzniku klasických třísek.

Podle principu úběru materiálu tak do skupiny nekonvenčních metod obrábění řadíme elektroerozivní obrábění. [1]



Tab. 2.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [1]

2.3 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění

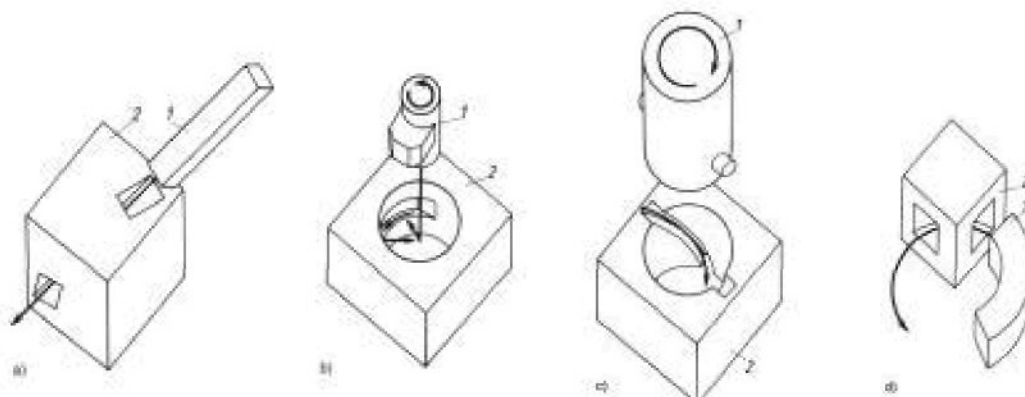
Elektroerozivní obrábění je jedním z moderních postupů obrábění. Tento způsob obrábění nám přináší značné výhody a usnadnění při technologii výroby složitých tvarů, které by konvenčními metodami byly těžko vyrobitelné nebo dokonce nevyrobitelné. Proto je použití elektroerozivního obrábění tak rozšířené. Nejvíce se tato metoda obrábění využívá v nástrojárnách při výrobě lisovacích forem na sklo, plasty a lehké kovy nebo při výrobě složitých střížných přípravků. Elektroerozivní obrábění se také dále využívá tam, kde konstrukce strojních součástí neumožňuje použít jinou metodu nebo tam, kde se používají těžkoobrobitelné materiály, žárovevné, žáruvzdorné, vysokopevnostní či tepelně zpracované materiály.

Výhody elektroerozivního obrábění:

- obrábění těžkoobrobitelných materiálů – nezáleží na obrobitelnosti materiálů, na jejich mechanických vlastnostech (tvrdost, pevnost), ale pouze na elektrické vodivosti obráběného materiálu,
- obrábění složitých tvarů – obrobení ostrých rohů či speciálních tvarů, které nelze vyrobit konvekčním způsobem viz obr. 2.2,
- vzniká specifický povrch – využívá se k zdrsnění povrchu, vzniká speciální povrch, který se využívá u vstřikovacích forem.

Nevýhody elektroerozivního obrábění:

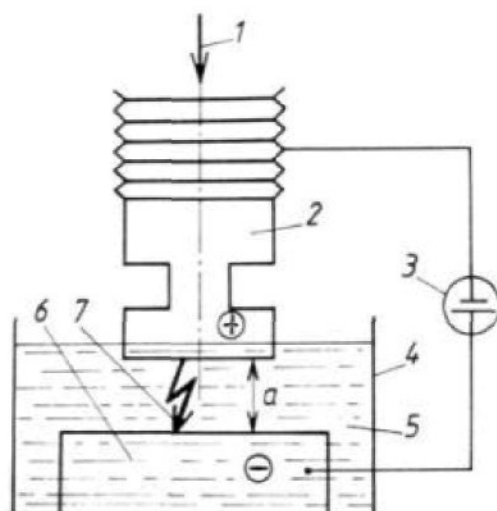
- nutnost vytvořit nástrojovou elektrodu – prodraží se obrábění a v některých případech je nutno vyrobit elektrod i více,
- delší obráběcí čas oproti konvekčním metodám obrábění,
- obrábění pouze vodivých materiálů,
- obrobek a elektroda musí být v dielektriku.



1) elektroda, 2) obrobek a) průchozí nekulhová díra, b) uzavřená drážka, c) drážka ve šroubovici, d) díra tvaru části kruhového oblouku
Obr. 2.2 Výroba tvarů kombinací pohybů nástrojové elektrody [2]

2.4 Princip elektroerozivního obrábění

Podstatou elektroerozivního obrábění jsou elektrické výboje mezi dvěma elektrodami, kde jedna představuje obrobek a druhá je nástroj. Mezi obrobkem a nástrojem je vysoká koncentrace energie $10^5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ až $10^7 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ [2]. Mezi těmito elektrodami je izolující tekutina s vysokým elektrickým odporem tzv. dielektrikum, kterým nejčastěji bývá petrolej, transformátorový olej, destilovaná voda. Dielektrikum má za úkol izolovat od sebe obě elektrody, tak aby nedošlo k nekontrolovanému zkratu. K obrobku a nástroji je přiveden stejnosměrný proud z generátoru. Obrobek je nejčastěji upevněn pomocí magnetického stolu, případně upínek. Nástrojová elektroda je připevněna v držáku stroje pomocí kleštiny.



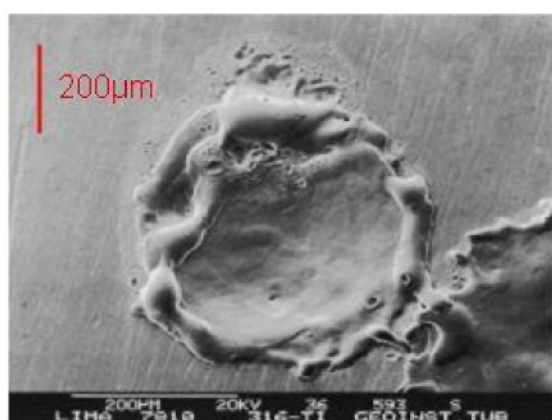
1) směr posuvu nástrojové elektrody
2) nástrojová elektroda, 3) generátor,
4) pracovní vana, 5) tekuté dielektrikum, 6) obrobek, 7) elektrický výboj

Obr. 2.3 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [2]

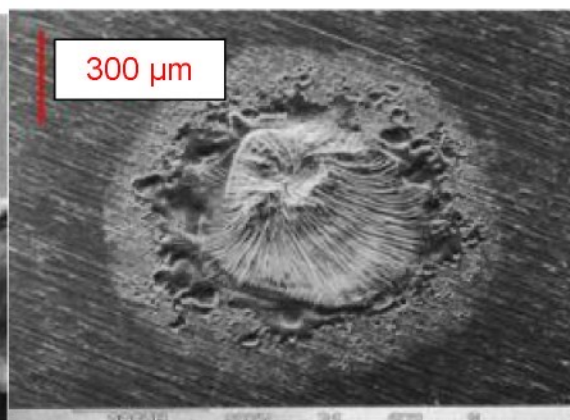
Elektroda se přibližuje k obrobku, přičemž dielektrikum zajišťuje, aby nevznikl žádný elektrický výboj. Když je průrazová hodnota větší než elektrický odpor dielektrika, dojde k proražení izolační vrstvy a vznikne napětové vodivé pole, v kterém nastane elektrický výboj mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem. Hlavními faktory ovlivňujícími proudové proražení jsou vzdálenost obrobku a nástrojové elektrody a velikost proudu. Další vlivy na proražení izolační vrstvy dielektrika jsou vodivost dielektrika a jeho znečištění. Tento vliv se může během obrábění měnit a může způsobit změnu podmínek obrábění v jeho průběhu.

V elektrickém napětovém poli mezi elektrodami se uvádějí do pohybu volné ionty, jak kladné tak i záporné, a nabývají vysoké rychlosti. Tím se vytvoří napětové pole a začnou vznikat elektrické výboje. Výboje se přemění na teplo a místo dopadu výbojů se velmi silně ohřeje, způsobí tavení a následné odpaření obráběného materiálu. Tyto výboje vznikají vždy na nejmenší vzdálenosti mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou.

Teplota lokálního ohřevu je $3000\text{ }^{\circ}\text{C} - 12000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. V důsledku takto vysoké lokální teploty dochází i k lokálnímu odpařování dielektrika a ke vzniku plynových bublin. Elektrický výboj trvá v závislosti na nastavení generátoru v řádu desetin sekund. Po obrábění vznikají krátery, jejichž rozměry závisí na velikosti výboje a na obráběném materiálu. Obrázek 2.4 zachycuje kráter v nástrojové oceli. Na krajích je patrná tepelně ovlivněná oblast. Na obrázku 2.5 je kráter při obrábění titanu. Struktura vznikla z důvodu vypařování titanu a rychlým chladnutím.

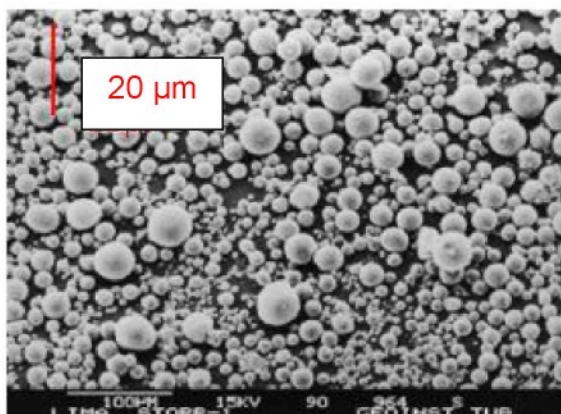


Obr. 2.4 Kráter po výboji v nástrojové oceli [3]

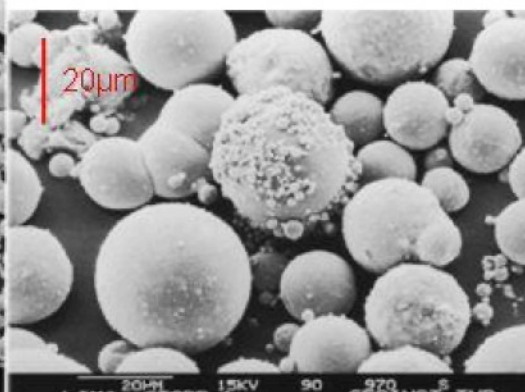


Obr. 2.5 Kráter po výboji v titanu [3]

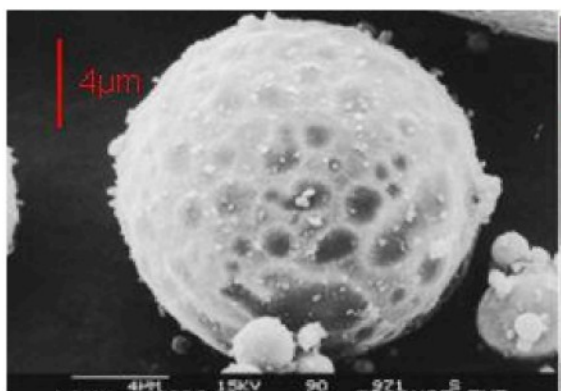
Do prostoru výboje vniká dielektrikum, které vyplavuje roztavený materiál z prostoru výboje ve formě drobných částecek obr. 2.6. Některé částice jsou spečené viz obr. 2.7 a povrch částecek může být zvrásněný obr. 2.8. Kvůli rychlé kontrakci, k níž dochází převážně u nástrojové oceli, vznikají i duté částice s ostrou hranou obr. 2.9.



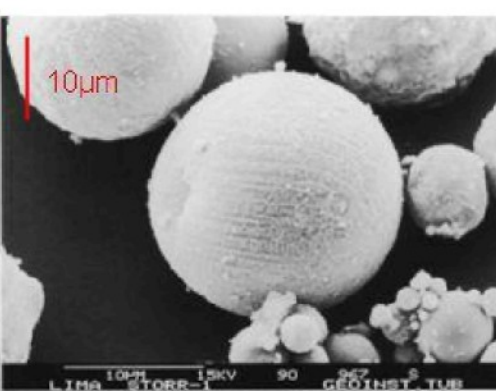
Obr. 2.6 Zbytky erodovaného materiálu umyté v acetonu [3]



Obr. 2.7 Spečené částice [3]



Obr. 2.8 Povrch jednotlivé částice [3]



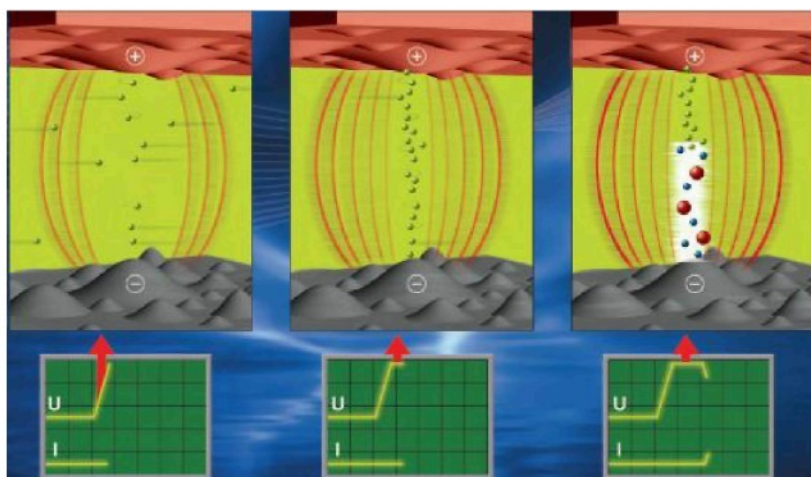
Obr. 2.9 Dutá částice s ostrou hranou [3]

2.4.1 Detailní popis jednoho obráběcího cyklu

Napětí a výbojový proud, který vzniká mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou, má časový průběh znázorněný na obrázcích 2.10 až 2.18. Horní část ukazuje děj mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem, ve spodní části je naznačen průběh proudu a napětí.

Napětí vytváří v celém elektrodovém meziprostoru elektrické pole obr. 2.10. Působením síly tohoto elektrického pole se v dielektriku koncentrují nestabilní vodivé částice, a to na místě největší intenzity pole, které vzniká na nejmenší

vzdálenosti mezi elektrodou a obrobkem. Většinou se jedná o vyvýšeniny na elektrodě a obrobku. Důsledkem je vytvoření napětového pole obr. 2.11. Následně jsou z negativní elektrody (obrobku) vymršťovány negativně nabitě částice, ty se v elektrickém napětovém poli střetávají s neutrálními částicemi a rozpadají se. Takto vznikají negativně a pozitivně nabitě částice. Proces se lavinovitě rozšiřuje obr. 2.12.

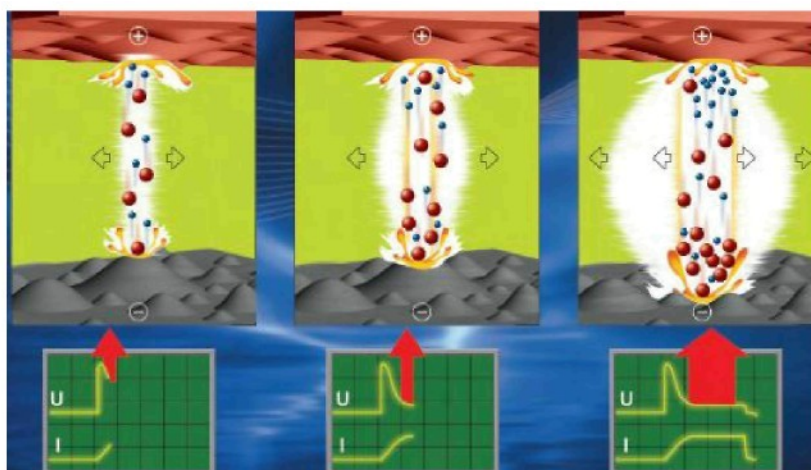


Obr. 2.10

Obr. 2.11

Obr. 2.12

Pozitivně nabitě částice putují k negativní elektrodě a negativní částice k pozitivní obr. 2.13. Tím zesílí protékající elektrický proud až k určitému maximu, které je stanoveno generátorem, přičemž teplota a tlak stále stoupá obr. 2.14 a obr. 2.15.

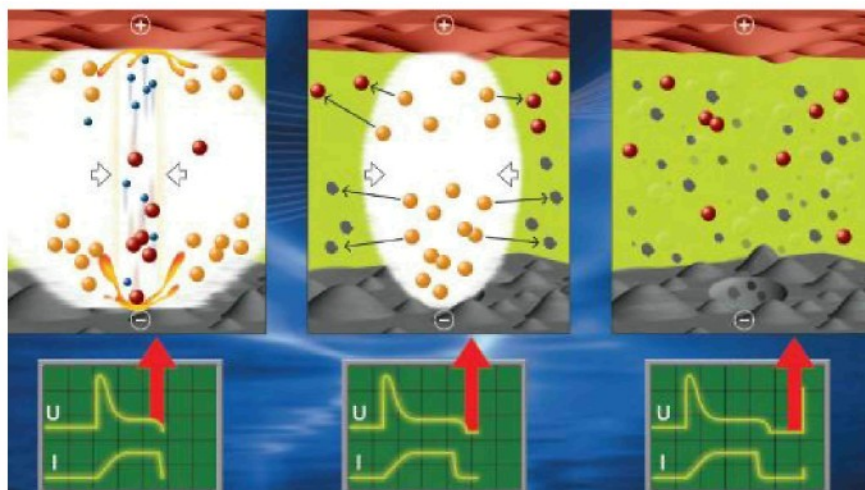


Obr. 2.13

Obr. 2.14

Obr. 2.15

Vytvoří se bublina s plynem, v které se zvyšuje tlak obr. 2.16. Se snížením elektrického proudu, který zajišťuje generátor, se redukuje i přívod tepla. Počet elektricky nabitých částic rapidně klesá a sníží se i tlak. Současně se sníží i výbojový kanál a plynová bublina splaskne obr. 2.17. Přehřátá tavenina se odtrhne a zůstane ztuhlá odtržená tavenina, kterou odplaví z místa výboje proud dielektrika. Tento proces se nazývá výplach obr. 2.18. Celý cyklus se opakuje [3].



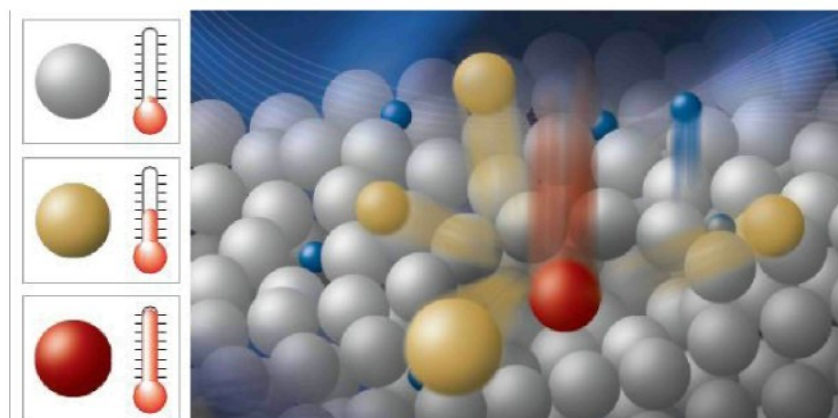
Obr. 2.16

Obr. 2.17

Obr. 2.18

2.4.2 Souvislost mezi průtokem proudu a teplem

Na zvětšenině výřezu obrázku 2.19 je nakreslen povrch negativně nabitého obrobku a nad ní část výbojového kanálu. Na kovový povrch obrobku dopadají pozitivně nabitě částice (červené) a rozkmitávají částičky kovu v silnější vibraci, což odpovídá zvýšení teploty. Při překročení určité rychlosti vibrací se vytrhují částičky kovu (šedo-žluté). Spojení pozitivně a negativně nabitých částic má za následek zvýšení vibrací a tím i tepla, jak je znázorněno na levé straně obrázku 2.19.

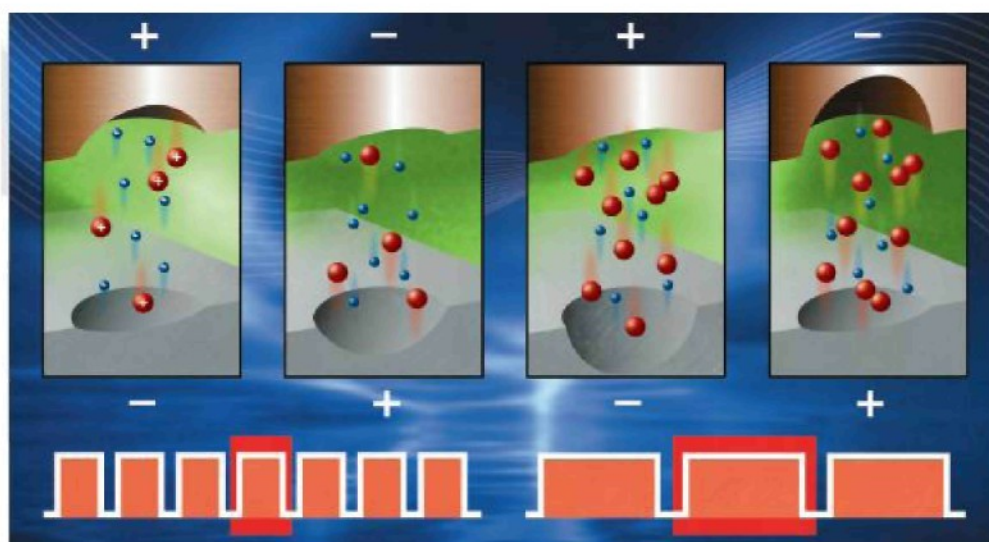


Obr. 2.19 Povrch negativně nabitého obrobku [3]

Elektrická energie takto přeměněná na teplo nechává výbojový kanál rovný, vede k tvorbě kráterů na obou elektrodách a zvyšuje teplotu dielektrika [3].

2.4.3 Polarita

Obrábění lze provádět i při obrácené polaritě. V praxi to znamená výměnu plus a mínus na obrobku a na elektrodě, přičemž se samozřejmě vymění částice. Výměnou negativních a pozitivních částic viz obr. 2.20 vzniká ve výbojovém kanálu stejný tok proudu, ale obráceným směrem. Tyto částice také vytvářejí teplo, které vede k tavení kovu, ale na obrácené straně. Při velmi krátké době trvání impulsu je v pohybu více negativně nabitých částic než pozitivně nabitých částic. Na nárazové elektrodě vzniká tím více tepla, čím více částic jednoho druhu se k ní pohybuje. Je důležité, že pozitivně nabité částice z důvodu většího počtu vytvářejí při stejné nárazové rychlosti větší teplo. Aby mohlo opotřebení na elektrodě zůstat malé, je polarita vybírána tak, že se na obrobku až do konce výboje uvolňuje co možná nejvíce tepelné energie. Při krátkých pulsech se proto nástrojová elektroda nastavuje na mínus. Hovoří se o negativní polaritě. Při dlouhých pulsech se nástrojová elektroda nastavuje na plus, což odpovídá pozitivní polaritě. Trvání impulsu, při kterém se polarita mění, je závislé na několika faktorech, které jsou určovány především fyzikálními vlastnostmi obrobku a nástrojové elektrody [3].



Modré částice – negativní, červené částice - pozitivní

Obr.2.20 Nastavení polarity při obrábění oceli pomocí mědi [3].

2.5 Časové využití výboje

Časové využití periody výboje q popisuje, jak dlouhý je impulz obrábění vůči celkové době trvání jedné periody:

$$q = \frac{t_i}{T} \quad (1)$$

kde:

q časové využití periody výboje [-],

T doba periody [s],

t_i doba trvání impulzu [s].

Tento parametr je významný při stanovování parametrů elektroerozivního obrábění. Další důležité parametry jsou doba impulzu t_i , což je časový úsek mezi spuštěním a vypnutím generátoru. Ve skutečnosti je však doba výboje odlišná. Jde o skutečnou délku výboje. Časový interval mezi vypojením a opětovným zapojením generátoru je doba pauzy t_0 . Celková doba periody T je součtem doby impulzu a dobou pauzy [4]:

$$T = t_i + t_0 \quad (2)$$

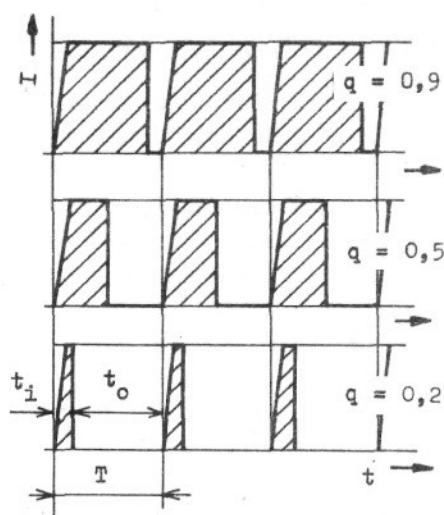
kde:

t_0 doba trvání pauzy [s].

Po dosazení dostaneme:

$$q = \frac{t_i}{t_i + t_0} \quad (3)$$

Schématicky lze časovou periodu výboje znázornit na obrázku 2.21.



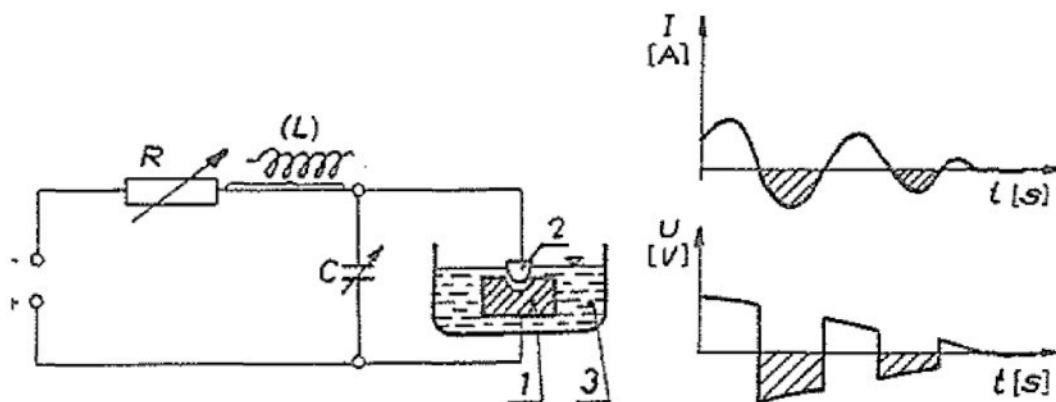
Obr. 2.21 Graficky znázorněný časový průběh elektrického výboje [4]

2.6 Generátory

Generátory jsou zdrojem elektrické energie pro elektroerozivní obrábění. Existují dva druhy generátorů: závislé a nezávislé. [1]

2.6.1 Závislé generátory

Závislé generátory (RC a RLC) jsou označovány jako relaxační. Tyto generátory patří k nejstarším zdrojům výbojů. Činnost generátoru spočívá v opakujícím se nabíjení kondenzátoru přes odpor pomocí stejnosměrného proudu a jeho vybití v pracovní mezeře, když velikost napětí dosáhne průrazové hodnoty. Závislé generátory dávají velmi krátké výboje. Generátory jsou jednoduché a spolehlivé. Nevýhodou je vyšší objemový úbytek nástrojové elektrody (30 % i více) způsobený vznikem střídavého proudu se zápornou půlvlnou. Dále mají omezenou možnost regulovat frekvenci a tvar výbojů. Zapojení indukčnosti (L) do nabíjecího obvodu RLC prodlužuje délku výboje a omezuje intenzitu vybíjecího proudu obr. 2.22 [1].



1-obrobek, 2-nástrojová elektroda,
3-dielektrikum, 4-stejnosměrný zdroj

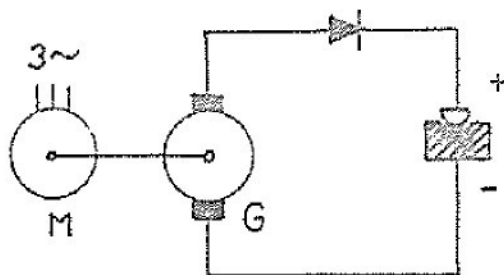
Obr. 2.22 Schéma zapojení RLC generátoru[1]

Obr. 2.23 Průběh proudu a napětí
na závislém generátoru[1]

2.6.2. Nezávislé generátory

Nezávislé generátory jsou označovány jako pulsní generátory. Umožňují nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na poměry v pracovní mezeře. Existují dva typy nezávislých generátorů:

1) Rotační – impulsy vznikají rotací dynama u asynchronního motoru. Obvykle mají stálou frekvenci 400 Hz a umožňují velký úběr. Nevýhodou je jejich vysoká hluchnost a obtížná regulace frekvence pulsů.

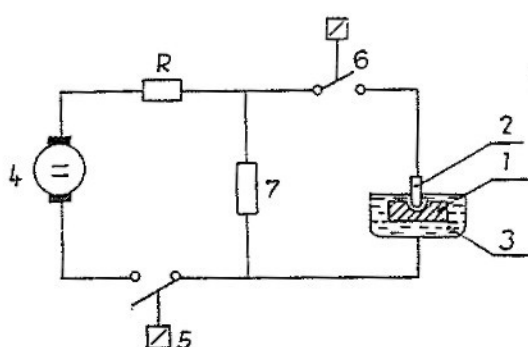


M-asynchronní motor, G-dynamo generátoru

Obr. 2.24 Rotační generátor[1]

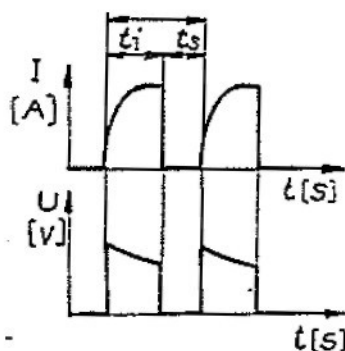
2) Polovodičové – umožňují širokou nastavitelnost elektrických parametrů. Frekvenci lze měnit v rozsahu 0,5 kHz - 50 kHz. Při výbojích nevzniká negativní půlvlna a je dosahováno relativně malých objemových úbytků nástroje (cca 1%). Charakteristická je delší doba trvání pulsů a převaha iontové vodivosti, proto se obrobek zapojuje jako katoda.

Moderní CNC stroje jsou vybaveny polovodičovými impulsními generátory, které jsou plně automaticky řízeny podle požadovaných technologických parametrů. [1]



1-obrobek, 2-nástrojová elektroda, 3-dielektrikum, 4-stejnosměrný zdroj, 5-vypínač sledu impulsů, 6-vypínač délky impulsů, 7-akumulátor energie

Obr. 2.25 Polovodičový generátor[1]



Obr. 2.26 Průběh proudu a napětí na polovodičovém generátoru [1]

2.7 Dielektrikum

Je pracovní prostředí, nejčastěji kapalina, v němž probíhá elektroerozivní proces.

2.7.1 Historie dielektrika

Původní dielektrikum používané při elektroerozivním obrábění byl vzduch. Toto dielektrikum však bylo pro přesný úběr zcela nevhodné a bylo možné jej využít pouze při odstraňování zlomených nástrojů během vrtání a řezání závitů, které je nutno odstranit z neprůchozích děr a nevyžaduje žádné přesnosti.

Následně se začaly používat dielektrika na bázi petroleje, neionizovaná vody, strojního oleje, transformátorového oleje a speciální dielektrika dodávaná výrobcí strojů. Tato speciální dielektrika se vyznačují tím, že neobsahují aromatické složky [3].

2.7.2 Úkol dielektrika

Hlavním úkolem dielektrika je izolovat obráběcí elektrodu a obrobek tak, aby výboj vznikl při co nejmenší jiskrové mezeře a tím došlo k přesnějšímu obrábění.

Dále musí být dobrá ionizace, neboli co nejrychlejší vytvoření podmínek pro vznik elektrického pole, a musí umožňovat vznik výboje. Na konci impulsu musí být výbojový kanál rychle odionizován, aby mohlo dojít k dalšímu výboji.

Jelikož při elektroerozivním obrábění vzniká vysoká teplota je zapotřebí jak obrobek, tak nástrojovou elektrodu ochlazovat. Musí být zabráněno přehřátí elektrody, tak aby nedocházelo k nadměrně vysokému opotřebení, a aby se nezměnila tepelným vlivem geometrie, tvar a rozměry obráběné elektrody.

Vznikající částice po obrábění je nutno odstranit, což zajišťuje proudící dielektrikum, které odnáší částice z místa elektrické eroze[3].

2.7.3 Požadavky na dielektrikum

Obecně je nutné říci, že není těžké vyvinout produkt, který dosahuje v některém z níže jmenovaných kritérií skvělých výsledků. Důležité je, aby používaný produkt dosahoval optimální úrovně ve všech oblastech.

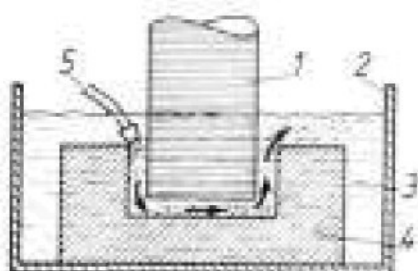
- 1) Elektrický odpor dielektrika – musí být konstantní, aby udržel elektrický výboj a k průrazu výboje docházelo vždy za stejných podmínek.

- 2) Bod vzplanutí musí být minimálně 60°C – jelikož při výbojích vznikají vysoké teploty, které ohřívají nástrojovou elektrodu, obrobek a také dielektrikum
- 3) Hygieničnost - dielektrikum nesmí být jedovaté (toxické), nesmí být dráždivé při styku s pokožkou a při působení tepla nesmí vznikat zápach.
- 4) Ekologická nezávadnost - dielektrikum se nesmí rozkládat a způsobovat vznik nebezpečných plynů.
- 5) Nízké pořizovací náklady.
- 6) Filtrovatelnost - dielektrikum musí být snadno a jednoduše filtrovatelné, čímž se prodlužuje životnost [3].

2.8 Způsob výplachů

Důležitou vlastností dielektrika je vyplavování roztaveného materiálu z prostoru výboje ve formě drobných částic. Existuje několik možných způsobů výplachu.

1) Vnější vyplachování obr. 2.27 – je jedním z nejčastějších způsobů vyplachování. Nevyžaduje žádné speciální (duté) nástrojové elektrody či otvory v obrobku. Podmínkou je dobré nastavení směru proudění dielektrika - například při hloubení žebrování je nevhodné umístit výplach kolmo ve směru žeber, ale je nutné ho umístit podél směru žeber. Při použití více výplachů je zapotřebí dát pozor, aby proudy výplachů nesměřovaly proti sobě a tím nedocházelo k hromadění zbytků obráběného materiálu mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem. [2]

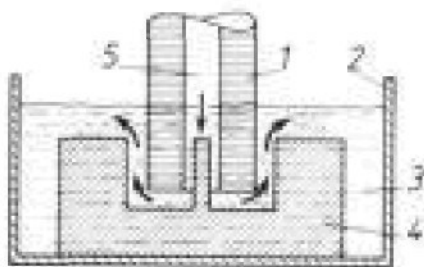


1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 5-přívod dielektrika

Obr. 2.27 Vnější vyplachování[2]

2) Tlakové vyplachování vnitřní obr.2.28 – při tomto způsobu vyplachování je dielektrikum vháněno do místa obrábění buď shora vrtem v elektrodě, nebo zespodu obrobkem. Rozhodující pro účinnost vymývání je průtokové množství,

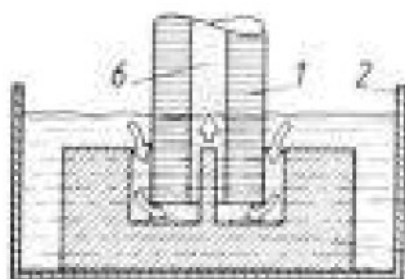
méně potom tlak. Tento způsob se často využívá k obrábění hlubokých děr, při němž se jako nástrojová elektroda používá trubka.



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 5-přívod dielektrika

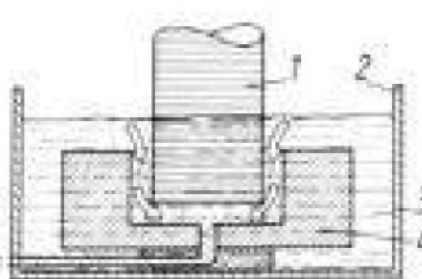
Obr. 2.28 Tlakové vyplachování vnitřní[2]

3) Vyplachování odsáváním - pomocí elektrody obr. 2.29 nebo pomocí obrobku obr. 2.30. Jedná se o vhodný způsob pro výplach, pokud je pod místem obrábění otvor, například otvor pro vyhazovací pin ve vstřikovací formě. V případě tohoto výplachu jsou částice z mezery odsávány. Tato metoda se doporučuje především tam, kde je potřeba dosáhnout jemného konečného opracování a rovnoběžných stěn obrobku. V případě úzkých pracovních mezer je pro zajištění stability obráběcího procesu nutné dbát, aby se dostatečné množství dielektrika dostalo do mezery.



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 6-odsávání dielektrika

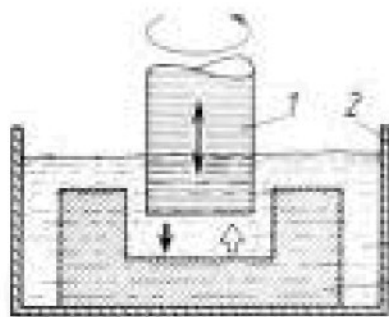
Obr. 2.29 Odsávání pomocí elektrody[2]



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 6-odsávání dielektrika

Obr. 2.30 Odsávání pomocí obrobku[2]

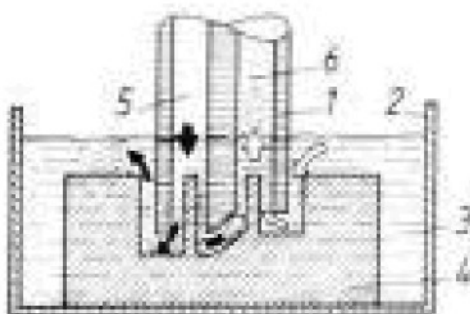
4) Pulzní výplach obr. 2.31 - je charakterizován přerušením procesu elektroeroze na 0,15 s až 10 s a současným vyjetí nástrojové elektrody z hloubeného místa o 0,02 mm až 10 mm, čímž se zvětší pracovní mezera mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou a docílí se vypláchnutí. Tento způsob je vhodný při výrobě hlubokých dutin za použití tenkých elektrod. Pulzní výplach lze i naprogramovat.



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek,

Obr. 2.31 Pulzní výplach[2]

5) Kombinovaný výplach obr. 2.32 – jedná se o kombinaci odsávání a tlakového vyplachování, případně i o vnější vyplachování. Používá se zejména u hloubení hlubokých dutin složitých tvarů a tvarů s vysokou přesností. [2]

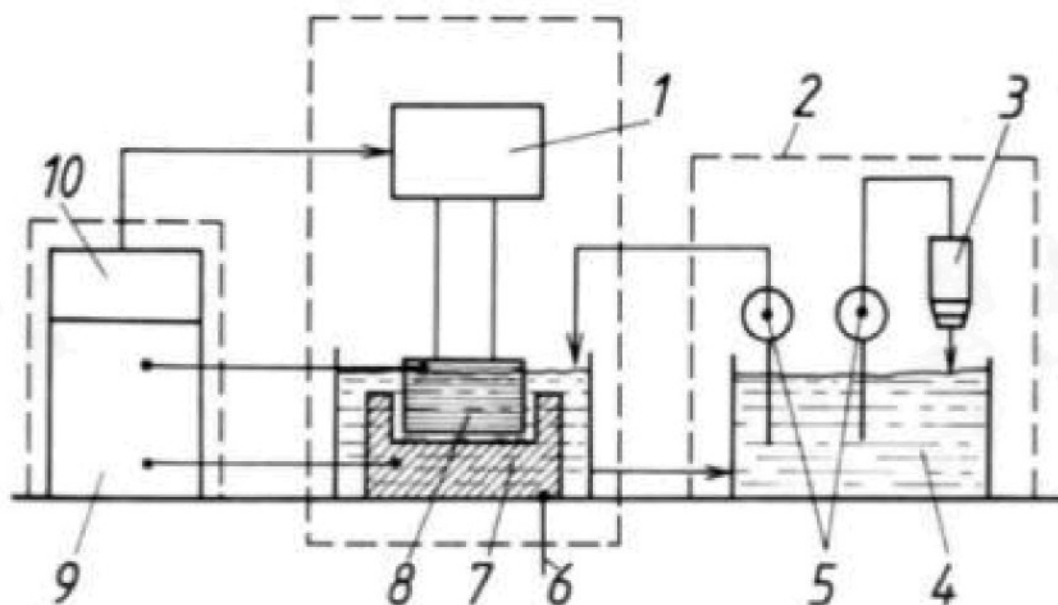


1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 6-odsávání dielektrika

Obr. 2.32 Kombinovaný výplach[2]

2.9 Stroje pro elektroerozivního obrábění

Na obrázku 2.33 je znázorněno schéma elektroerozivního stroje a na obrázku 2.34 je snímek stroje v reálném provedení [2].



1 – pracovní hlava, 2 – filtrační zařízení, 3 – filtr, 4 – dielektrikum, 5 – čerpadlo, 6 – pracovní stůl, 7 – obrobek, 8 – nástrojová elektroda, 9 – generátor, 10 – CNC řídicí systém

Obr. 2.33 Schéma elektroerozivního stroje[2]

Moderní hloubicí stroje mají všechny činnosti řízeny systémem CNC, řízení polohy stolu, směru a rychlosti pohybů. Samozřejmostí je plně automatické řízení výměny nástrojových elektrod. V některých podnicích je polotovar nástrojové elektrody umístěn do speciálního držáku a upnut do obráběcího centra, kde je z polotovaru vyrobena nástrojová elektroda. Takto vyrobené nástrojové elektrody jsou spolu s držákem umístěny do zásobníku nástrojových elektrod a následně jsou nástrojové elektrody používány k obrábění v elektroerozivním stroji. Tento postup výrazně snižuje čas na ustavování elektrod do stroje a tím zvyšuje efektivitu celého procesu obrábění. Takto lze bezobslužně nechat stroj pracovat nepřetržitě několik desítek hodin.



Obr. 2.34 Elektroerozivní obráběcí stroj (hloubička) Exeron 314 [2]

Řídicí systémy CNC umožňují snadné naprogramování stroje s již předem nastavenými technologiemi pro obrábění různých materiálů, případně vytvářet vlastní programy či modifikovat předem definované programy.[2]

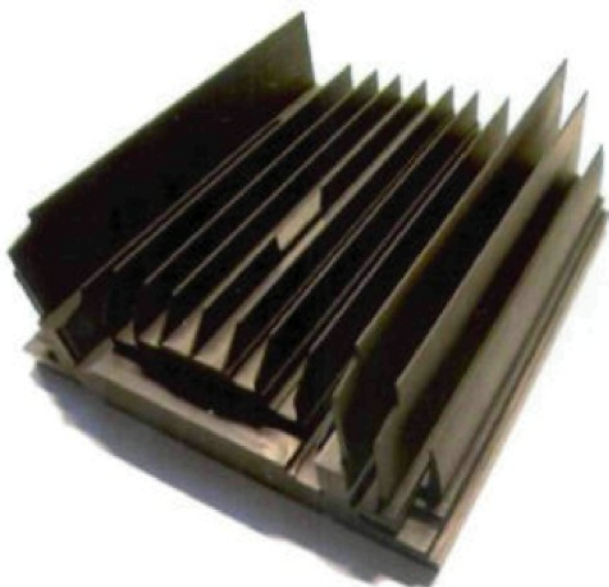
2.10 Nástrojové elektrody

Nástroji pro elektroerozivní obrábění jsou tzv. nástrojové elektrody. Nástrojové elektrody jsou připravovány pro každý tvar a pro každé obrábění samostatně. Výroba elektrod tvoří značný podíl na celkové ceně hloubeného dílu. Náklady na zhotovení činí až 50 % z celkových nákladů, proto je nutno dobře zvolit materiál a způsob výroby.

Z hlediska materiálu můžeme rozdělit nástrojové elektrody na elektrody kovové, jejichž materiálem je např. měď, slitina wolframu a mědi, slitina wolframu a stříbra, ocel, slitina chromu a mědi, mosaz, a elektrody nekovové, u nichž se využívá grafit. Třetí skupinu tvoří tzv. kombinované elektrody neboli elektrody z kompozice grafitu a mědi [2].

Materiál nástrojové elektrody by měl mít následující vlastnosti:

- odolnost proti elektrické erozi,
- dobrou tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu,
- vysoký bod tání,
- vhodnou mechanickou pevnost,
- tvarovou stálost,
- dobrou obrobiteľnosť.



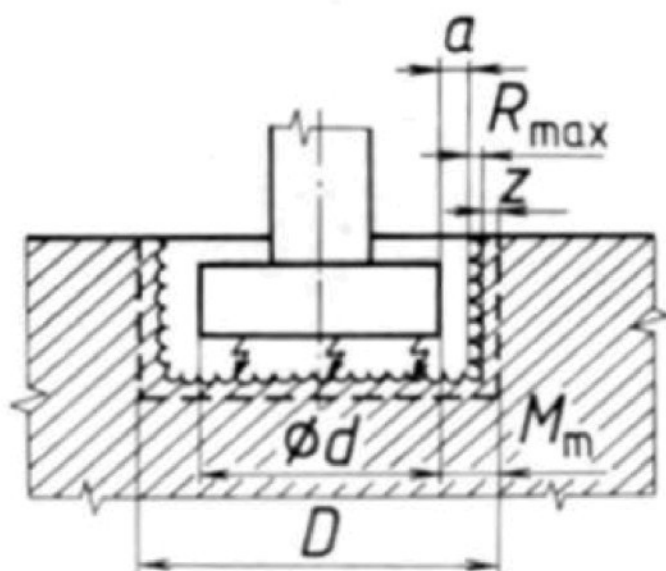
Obr. 2.35 Nástrojová elektroda – žebra vyrobená z grafitu [2]

Rozměr a tvar nástrojové elektrody je podmíněn především tvarem požadované dutiny, která je zmenšena o projiskření (anglicky GAP). Toto projiskření je dáno materiálem elektrody, materiálem obrobku, generátorem a požadavkem na povrch.

Elektrody se dále rozdělují na hrubovací a dokončovací. Hrubovací elektroda slouží k hrubování požadovaného tvaru a nejsou na ni kladeny tak vysoké požadavky vzhledem k tvaru a kvalitě povrchu. Výpočet rozměru kruhové elektrody je dán vztahem [2]:

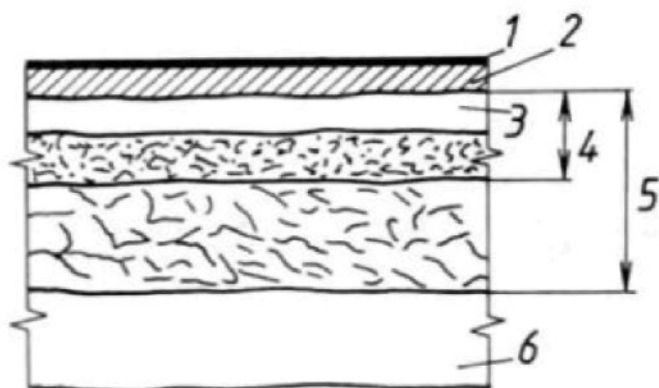
$$d = D - 2 \cdot (a + R_{\max} + z) = d - 2 \cdot M_m \quad (4)$$

kde: dprůměr nástrojové elektrody,
 Dpožadovaný rozměr dutiny,
 Avelikosti pracovní mezery (GAP),
 $R_{\max}$požadovaná drsnost obrobeného povrchu,
 Ztloušťka narušené vrstvy,
 M_mminimální hodnota, o kterou musí být hrubovací nástrojová elektroda menší, pro dosažení průměru dutiny.



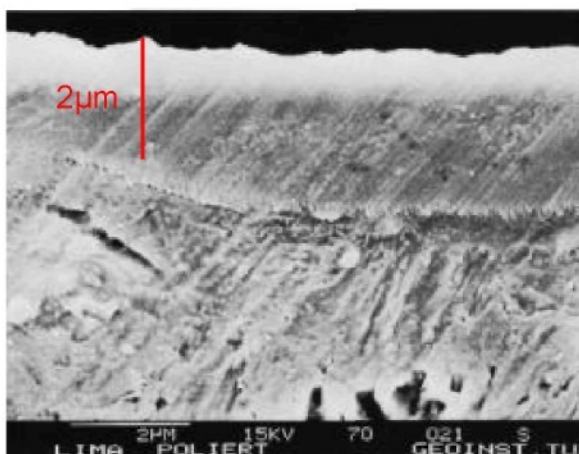
Obr. 2.36 Rozměry kruhové hrubovací elektrody[2]

Při hrubování může vznikat tzv. bílá vrstva, což je narušená vrstva po hrubování vysokými proudy. Narušení je do tloušťky 0.01 mm a je eliminováno dokončovací elektrodou. Po dokončovacím obrábění je tloušťka bílé vrstvy do 2μm viz obr. 2.38.



1 – mikrovrstva tvořená chemickými sloučeninami vzniklými difúzí prvků dielektrika, 2 – vrstva obsahující prvky materiálu nástrojové elektrody, 3 – tzv. bílá vrstva (silně nauhličená znovu ztuhlá tavenina martenzitické struktury), 4 – pásmo tepelného ovlivnění (zakalený a popuštěný 3 základní materiál obrobku), 5 – pásmo plastické deformace vyvolané rázy pulzů, 6 – základní materiál obrobku

Obr. 2.37 Složení povrchu opracované plochy (bílá vrstva) [2]



Obr. 2.38 Bílá vrstva po dokončovacím obrábění [3]

U dokončovací elektrody je mimo jiné kladen velký důraz na tvar a kvalitu jejího povrchu. Výpočet rozměru dokončovací elektrody:

$$d_{fin} = D - 2 \cdot a \quad (5)$$

kde: d_{fin} průměr dokončovací elektrody [mm],
 D požadovaný rozměr výrobku [mm],
 a velikost pracovní mezery [mm].

3. Metodika

3.1 Metodika experimentu

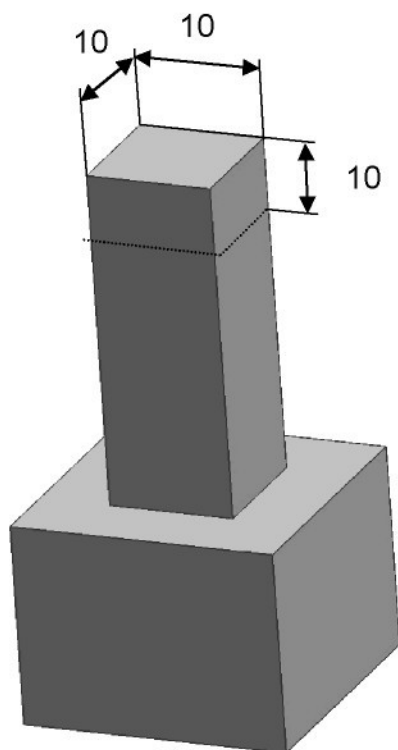
Experimenty byly vybrány tak, aby se co nejvíce podobaly reálné situaci hloubení ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. a zároveň byla zajištěna jednoduchá měřitelnost čelního opotřebení nástrojových elektrod.

Z tohoto důvodu byl zvolen jednoduchý tvar elektrody a objem obráběného materiálu, který se pohybuje v řádu 1 cm^3 .

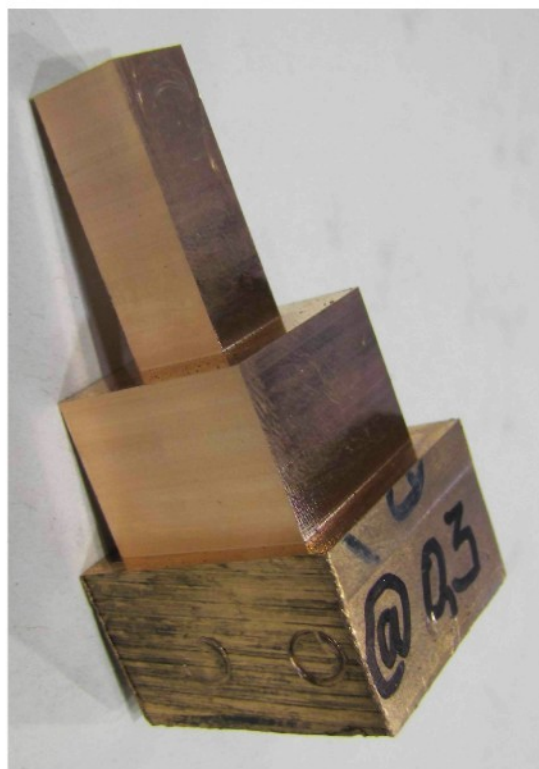
3.2 Elektrody pro experiment

U elektrod pro experiment byl zvolen takový tvar elektrody, který odpovídá nejčastěji používanému tvaru a hloubce úběru v praxi, přičemž z tohoto tvaru bude možné zjistit opotřebení nástrojové elektrody a drsnost povrchu.

Jedná se o čtvercový tvar elektrody s plochou 100 mm^2 a délkou činné části 10 mm.



Obr. 3.1 3D model elektrody pro test hloubení



Obr. 3.2 Elektroda pro test hloubení, měděná

3.2.1 Materiály pro nástrojové elektrody

Na nástrojové elektrody budou použity tyto materiály.

Měď – je používána ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.,

Grafit EDM-1 - grafit s ultra jemnou zrnitostí, vhodný pro hrubovací i dokončovací operace. Je odolný vůči opotřebení, umožňuje vysokou rychlost obrábění a jemné opracování povrchu dutiny. Uplatňuje se zejména při hloubení žeber. Dobře se frézuje a řeže na drátořezu.

Grafit EDM-200 - izotropní super jemný grafit s dobrou pevností, odolností proti opotřebení a možností jemného opracování povrchu. Velmi dobře se frézuje. Uplatňuje se při obrábění složitějších tvarů, např. sítí žeber. Dodává se v blocích a přířezech.

Grafit EDM-C200 - jemný grafit s vysokou hustotou syčený mědí. Snadno se frézuje a řeže na drátořezu. Vhodný zejména k obrábění speciálních kovů a slitin. Umožňuje redukovat počet elektrod. Má vynikající vlastnosti při úběru kovu a je odolný vůči opotřebení.

Grafit EDM-C3 - vysoce hutný grafit syčený mědí. Snadno se frézuje a řeže na drátořezu. Uplatňuje se při obrábění slitin s obsahem mědi. Správné použití umožňuje redukovat počet elektrod. Materiál splňuje požadavky na jejich opotřebení, úběr kovu a jakost povrchu [5].

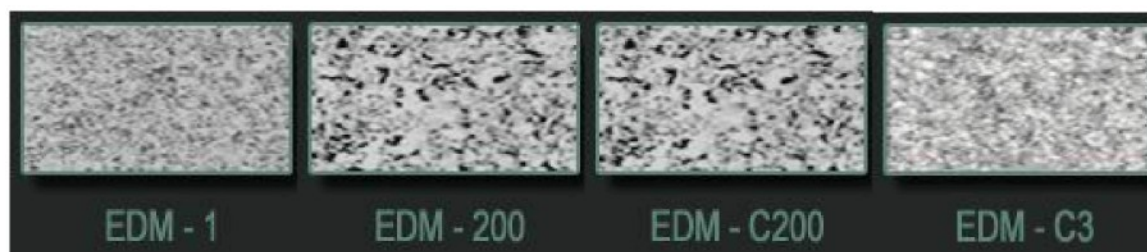
Měděné elektrody byly vybrány, jelikož se v současné době používají ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.. Měď pro elektroerozivní obrábění dodává firma Car Well Trade, s.r.o..

Grafitové elektrody byly doporučeny firmou Tedok s.r.o. jako alternativa k nahrazení měděných elektrod. Vlastnosti grafitu dodávaného touto firmou jsou uvedeny v tab. 3.1.

Název	Velikost částic [μm]	Pevnost v ohybu [kg.cm ⁻²]	Pevnost v tlaku [kg.cm ⁻²]	Tvrdost [Shore]	Měrný el. odpor [μΩ.m]
EDM - 1	do 5	682	998	69	19,3
EDM - 200	do 10	569	984	68	14,7
EDM - 200	do 10	851	1631	62	2,9
EDM - C3	do 5	1427	1993	66	3,2

Tab.3.1 Vlastností grafitů [5]

Na obrázku 3.3 je znázorněna mikrostruktura materiálů EDM-1 EDM-200 EDM-C200 a EDM-C3.



Obr. 3.3 Mikrostruktura jednotlivých materiálů z grafitu [5]

V tabulce 3.2 je soupis všech elektrod potřebných jak pro samotný experiment, tak opakovatelnost experimentu.

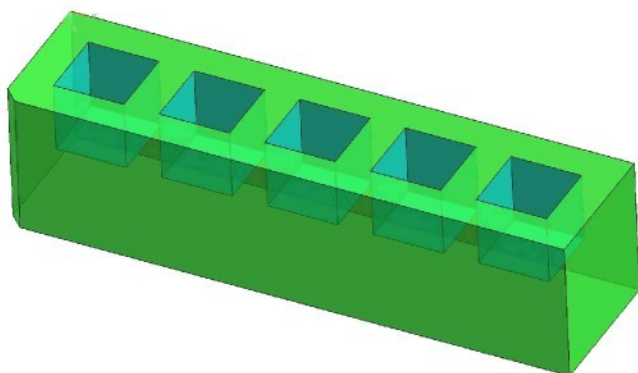
Druh testu	Materiál	Počet kusů	
		Hrubovací	Dokončovací
Opakovatelnost experimentu	Cu	5	5
Experiment	Cu	2	2
	EDM-1	2	2
	EDM-200	2	2
	EDM-C3	2	2
	EDM-C200	2	2

Tab. 3.2 Soupis elektrod pro experiment

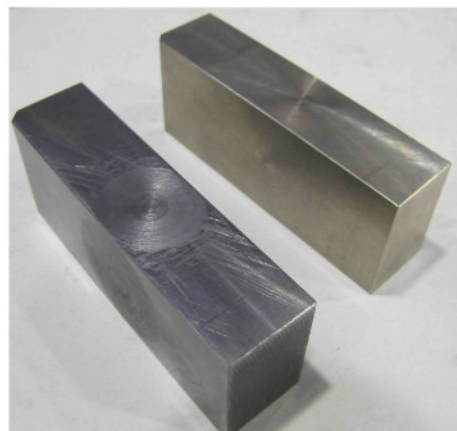
3.3 Obráběný materiál pro experiment

Pro samotný experiment budou připraveny dva polotovary z těchto materiálů: nástrojová ocel (HPM7) a materiál MoldMAX® V. Pro opakovatelnost experimentu bude připraven ten samý polotovar z materiálu MoldMAX® V.

Polotovar, na kterém bude experiment prováděn, je výrobek speciálně navržený pro tento experiment obr 3.4.



Obr 3.4 3D model výrobku pro experiment



Vlevo HPM7 vpravo MoldMAX[®] V
Obr 3.5 Polotovary pro experiment.

V tabulce 3.3 je soupis všech obráběných materiálů pro experiment.

Druh testu	Materiál	Počet kusů
Opakovatelnost experimentu	MoldMAX [®] V	1
Experiment	MoldMAX [®] V	1
	HPM7	1

Tab 3.3 Soupis obráběných materiálů

3.4 Strojní vybavení experimentu

Strojní vybavení, na němž budou prováděny experimenty a měření:

- 1) Roboform 23 P- hloubička, na které budou prováděny všechny experimenty. Velikost obráběcího prostoru 739 mm x 450 mm x 270 mm. Max hmotnost obrobku 180 kg, maximální hmotnost nástrojové elektrody 50 kg. Typ generátoru pulzní 32A,



Obr 3.6 Roboform 23 P [11]

- 2) Deckel Maho DMU 60T - CNC frézka, která je přizpůsobena výrobě grafitových elektrod,
- 3) Deckel Maho DMU 125T hi-dyn – CNC frézka, na které se budou vyrábět měděné elektrody,
- 4) Intos FNGJ50 – nástrojářská frézka, na které bude vyráběn polotovár pro hloubení,
- 5) Keyence Digital Microscope VHX-600 – mikroskop s 50-tinásobným zvětšením,
- 6) Mitutoyo SJ-400 – přístroj na měření drsnosti.

3.5 Opakovatelnost experimentu

Vzhledem k časové a finanční náročnosti experimentu nebylo možné opakovat několikrát všechny experimenty tak, aby byla zachována jejich objektivnost. Proto bylo provedeno určení úrovně spolehlivosti na jednom experimentu. Jako podklad pro úroveň spolehlivosti byla použita norma ČSN ISO 8688-1. Stupeň významnosti byl zvolen **dost významný**, což odpovídá úrovni spolehlivosti 99 % [6].

Za testovaný materiál pro opakovatelnost testu byla vybrána měď jako nástrojová elektroda. Z obráběného materiálu byl vybrán materiál MoldMAX® V.

Důvody pro výběr těchto dvou materiálů byly následující. Materiál MoldMAX® V byl vybrán, jelikož jeho obrábění pomocí mědi nebylo v žádném technologickém nastavení stroje k dispozici. Toto nastavení se provádělo ručně pouze na základě dosavadních poznatků specialisty na elektroerozivní obrábění v DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. Z těchto důvodů se předpokládá, že výsledky tohoto obrábění budou nejméně stabilní.

Pro výpočet opakovatelnosti experimentu je nutné vypočítat průměrnou hodnotu $\bar{x}$ a směrodatnou odchylku s jak pro dobu obrábění, tak pro opotřebení elektrody.

Průměrné hodnoty opotřebení x_{op} se dosáhne dělením součtu výsledků v každé zkoušce.

$$x_{op} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i_op}}{n} \quad (6)$$

kde: x_{op} aritmetický průměr opotřebení nástrojové elektrody [mm],

x_{i_op} jednotlivé hodnoty opotřebení nástrojové elektrody [mm],

n počet měření.

Pro výpočet průměrného času obrábění x_{cas} se použije podobný vzorec.

$$x_{cas} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i_cas}}{n} \quad (7)$$

kde: x_{cas} průměrný čas obrábění [min],

x_{i_cas} jednotlivá měření času obrábění [min].

Dále počítáme směrodatnou odchylku s_{cas} pro dobu obrábění.

$$s_{cas} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i_cas} - x_{cas})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

kde: s_{cas} směrodatná odchylka pro dobu obrábění [min].

Výpočet směrodatné odchylky opotřebení:

$$s_{op} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i_op} - x_{op})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

kde: s_{op} směrodatná odchylka pro dobu obrábění [-].

Statistický interval spolehlivosti, v jehož rámci budou umístěny výsledky dalšího zkušebního testu s předpokládanou pravděpodobností pro čas, se vypočítá následovně:

$$x_{\max_cas} = x_{cas} + t_{99} \cdot \frac{s}{n-1} \quad (10)$$

$$x_{\min_cas} = x_{cas} - t_{99} \cdot \frac{s}{n-1} \quad (11)$$

kde: t_{99} ... je konstanta získaná z tabulky tab. 3.4 pro úroveň spolehlivosti 99% ($t_{99}=4,604$),

$x_{\min_cas}$minimální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experimentů, počítáno pro čas,

$x_{\max_cas}$...maximální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experimentů, počítáno pro čas.

Stupne velnosti (n-1) alebo (n _A + n _B - 2)	hodnota t		
	Úroveň spolehlivosti		
	95 %	99 %	99,9 %
1	12,706	63,657	636,5
2	4,302 7	9,925	31,60
3	3,182 5	5,841	12,94
4	2,776 4	4,604	8,610
5	2,570 6	4,032	6,859
6	2,446 9	3,707	5,959
7	2,364 6	3,499	5,405
8	2,306 0	3,355	5,041
9	2,262 2	3,250	4,781
10	2,228 1	3,169	4,587
11	2,201 0	3,106	4,537
12	2,178 8	3,055	4,318
13	2,160 4	3,012	4,221
14	2,144 8	2,977	4,140
15	2,131 5	2,947	4,073
16	2,119 9	2,921	4,013
17	2,109 8	2,898	3,963
18	2,100 9	2,878	3,922
19	2,093 1	2,861	3,883
20	2,086 0		
30	2,042 3		
40	2,021 1		
60	2,000 3		
120	1,979 9		
∞	1,960 0		
Stupeň významnosti	*	**	***
	významný	dost významný	veľmi významný

Tab.3.4 Studentové hodnoty t pro různé úrovně spolehlivosti [6]

Pro opotřebení:

$$x_{\max_op} = x_{op} + t_{99} \cdot \frac{s_{op}}{n-1} \quad (12)$$

$$x_{\min_op} = x_{op} - t_{99} \cdot \frac{s_{op}}{n-1} \quad (13)$$

kde : $x_{\min_op}$ minimální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experimentů, počítáno pro opotřebení,
 $x_{\max_op}$ maximální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experimentů, počítáno pro opotřebení.

Ověření, zda existuje podstatný rozdíl mezi měřeními, porovnáme pomocí výpočtu t_{skut} a následně porovnáme s hodnotou t_{tab} .

$$t_{skut_cas} = \frac{x_{cas_max} - x_{cas_min}}{\sqrt{\frac{n \cdot s_{cas}^2}{n-1} \cdot \frac{1}{n}}} \quad (14)$$

kde: t_{skut_cas} skutečný interval spolehlivosti pro čas,
 x_{cas_max} maximální hodnota měření času,
 x_{cas_min} minimální hodnota měření času.

$$t_{skut_op} = \frac{x_{op_max} - x_{op_min}}{\sqrt{\frac{n \cdot s_{op}^2}{n-1} \cdot \frac{1}{n}}} \quad (15)$$

kde: t_{skut_op} skutečný interval opotřebení pro opotřebení,
 x_{op_max} maximální hodnota měření opotřebení,
 x_{op_min} minimální hodnota měření opotřebení.

Pro opotřebení i dobu obrábění musí být hodnota t_{skut_op} a hodnota t_{skut_cas} větší než hodnota v tabulce $t_{99}=4.604$. Pokud bude splněna tato podmínka, opakovatelnost experimentu je v úrovni spolehlivosti větší než 99%.

3.6 Porovnání drsnosti povrchu

Povrch po elektroerozivním obrábění je jiný než po konvenčním obrábění. Konvenční obrábění zanechává stopy nástroje, kdežto elektroerozivní obrábění zanechává stopy po elektrických výbojích ve tvaru kráterů. Velikost kráteru je závislá na několika veličinách: především na velikosti proudu, délce pulzů a na frekvenci pulzů. Pro dosažení kvalitního povrchu je obecně lepší použít nižší proud a kratší pulzy o vyšší frekvenci. Nevýhodou dokončování při vysoké kvalitě povrchu je značné opotřebení nástrojové elektrody a velmi pomalý úběr.

Jelikož drsnost povrchu je značně odlišná od konvenčního obrábění, nepoužívá se označení ve stupnici R_a , ale používá se vlastní bezrozměrná jednotka VDI. Etalon s různou drsností dle VDI je na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 Etalon s drsností dle VDI

Na obrázku 4.4 je znázorněn etalon dle VDI, který slouží k určování drsnosti povrchu. Povrch se subjektivně porovnává s etalonem. Existuje orientační převodní tabulka, podle níž se dá převést VDI na R_a . viz. obrázek 3.8.

Nr	$R_a \mu m$
0	0,10
3	0,15
6	0,20
9	0,30
12	0,40
15	0,55
18	0,80
21	1,10
24	1,60
27	2,20
30	3,20
33	4,50
36	6,30
39	9,00
42	12,5
45	18,0

Obr. 3.8 Přebodní tabulka drsnosti mezi normou VDI a R_a

4. Experimentální část

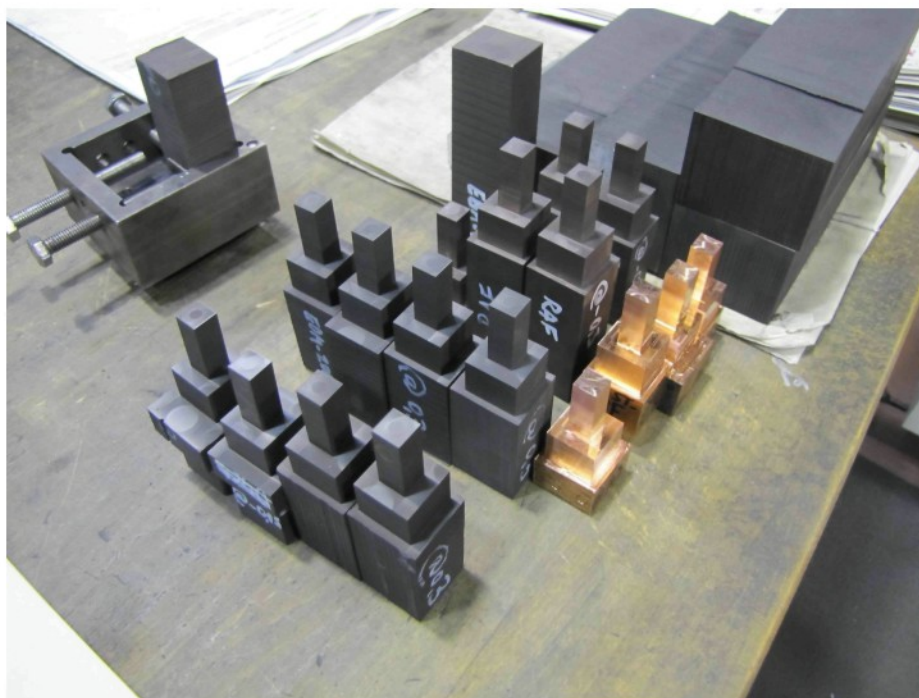
4.1 Příprava experimentu

Příprava na experimenty byla rovněž prováděna ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.. Přípravné práce u výroby nástrojových elektrod a obráběného materiálu prováděla obsluha jednotlivých strojů.

4.1.1 Výroba elektrod

Elektrody se vyráběly na CNC strojích. Grafitová elektroda na *Deckel MAHO DMU 60T* a měděná elektroda na *Deckel MAHO DMU 125H hi-dyn*.

Programátor připravil program *0734-jirka-CU.wkf* na výrobu elektrod z mědi a program *0734-jirka-GR.wkf* na výrobu elektrod z grafitu. Stejný program byl vytvořen pro hrubovací a dokončovací elektrody pouze s rozdílnou jiskrovou mezerou. Pro všechny druhy grafitu se používá jeden program *0734-jirka-GR.wkf*, proto je čas výroby grafitových elektrod stejný.



Obr.4.1 Výroba elektrod pro experiment

Základní řezné podmínky jsou vypsány v tabulce tab. 4.1 VISI – Machining report.

VISI - Machining Report			
Program: 0734-jirka-CU.wkf			
Operace	Parametr		J
N1	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	4450	s ⁻¹
	posuv	350	mm.s ⁻¹
	Čas	54,2	min
N2	Nástroj	B2NK-12	
	Délka	26	mm
	Otáčky	2200	s ⁻¹
	posuv	150	mm.s ⁻¹
	Čas	25,3	min
N3	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	125	mm.s ⁻¹
	Čas	19,8	min
N4	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	125	mm.s ⁻¹
	Čas	18,5	min
Chlazení: Emulze			
Celkový čas			117,8 min

VISI - Machining Report			
Program: 0734-jirka-GR.wkf			
Operace	Parametr		J
N1	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	4450	s ⁻¹
	posuv	700	mm.s ⁻¹
	Čas	26,3	min
N2	Nástroj	B2NK-12	
	Délka	26	mm
	Otáčky	2200	s ⁻¹
	posuv	300	mm.s ⁻¹
	Čas	11,8	min
N3	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	250	mm.s ⁻¹
	Čas	10,2	min
N4	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	250	mm.s ⁻¹
	Čas	9,8	min
Chlazení: Vzduch			
Celkový čas			58,1 min

Tab.4.1 Řezné podmínky z VISI – Machining reportu

4.1.2 Obráběný materiál

Obráběný materiál z MoldMAX[®] V i z nástrojové oceli je vyráběn na nástrojářské fríze podle 2D výkresu, který je součástí přílohy 4. Jde o hranoly 20 mm x 30 mm x 80 mm, které mají z důvodu správné orientace obrobku při následném měření jednu hranu sraženou 3 x 45°.

Dále jsou připravovány 2 kusy z materiálu MoldMAX[®] V a 1 kus z nástrojové oceli.

Jeden vzorek z materiálu MoldMAX[®] V je připraven pro samotný experiment a druhý pro zajištění opakovatelnosti experimentu.

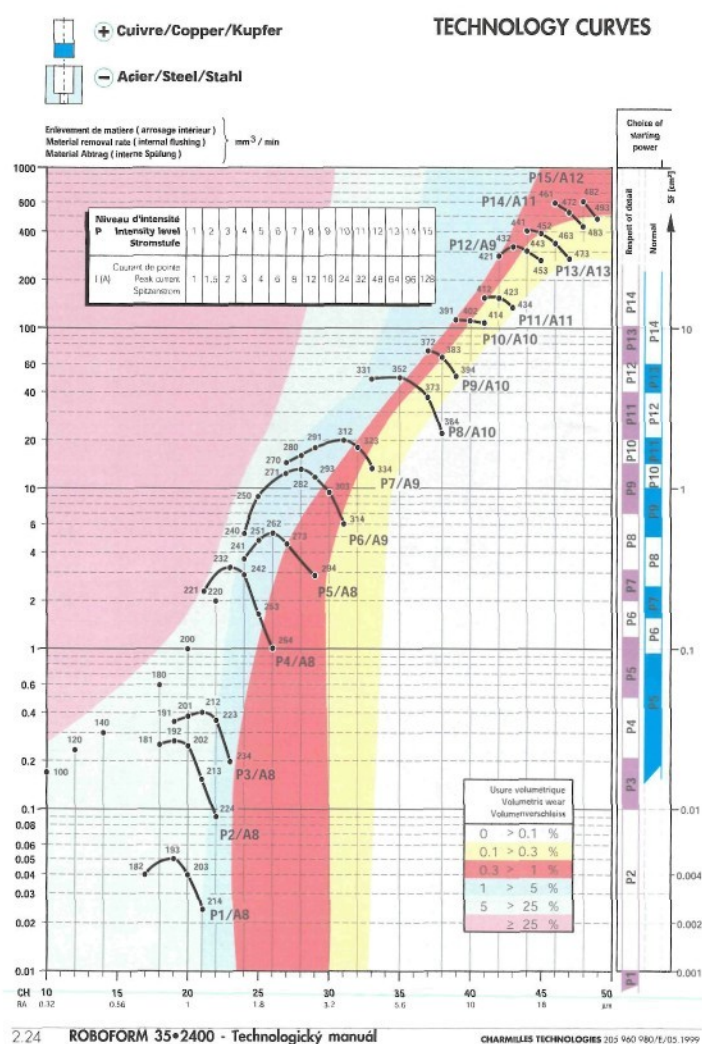
4.2 Experiment

Experiment je prováděn přímo ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. na oddělení Tool & Die pomocí hloubičky Roboform 23.

4.2.1 Nastavení obráběcích podmínek

Nastavení obráběcích podmínek se řídí technologickými křivkami a programy, které již byly ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. vytvořeny. Kombinace obrábění materiálů, které nejsou uvedeny v žádném technologickém nastavení, jako je obrábění materiálu MoldMAX® V měděnou elektrodou, jsou nastavovány ručně na základě konzultace se specialistou na elektroerozivní obrábění ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o..

Technologické tabulky jsou definovány typem použití aplikace a materiálovou dvojicí obrobek a nástrojovou elektrodou. Na obrázku 4.2 jsou znázorněny technologické křivky pro obrábění nástrojové oceli pomocí měděné elektrody.

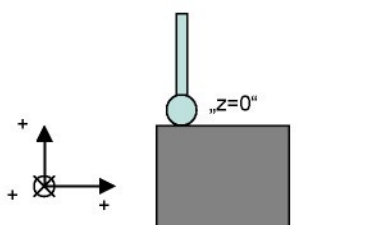


Obr.4.2 Technologické křivky měď – nástrojová ocel [Technologický manual EOBOFORM 35*2400 1999]

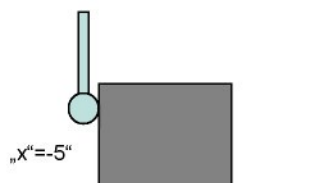
4.2.2 Ustavení obrobku a nástrojové elektrody

Obrobek z nástrojové oceli bude upnut pomocí magnetického stolu. Je vyrovnán za využití číselníkového úchylkoměru rovnoběžně s osou „x“. Obráběný materiál MoldMAX® V je upevněn pomocí přesného svěráku a následně vyrovnán v ose „y“. Jelikož je obrobek upnut do svěráku, je nutné vyrovnat obrobek v ose „z“. Rovnoběžnost osy „y“ je zaručena zúhlováním obou obrobků.

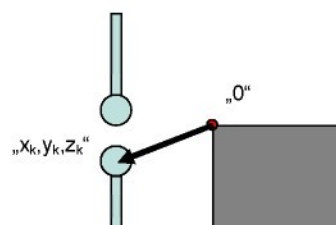
Po ustavení obrobku je místo nástrojové elektrody připevněna pomocná kulička, pomocí které se zjistí poloha obrobku, obr. 4.3, na kterém je znázorněno zadání souřadnice „z“. Obrázek 4.4 znázorňuje zadání souřadnice „x“, která je zadána záporným poloměrem kuličky. Stejným způsobem je zadána souřadnice „y“. Tím je vytvořen nulový bod obrobku. Další kulička je umístěna na stůl obrobku a jsou na ni přeneseny souřadnice „ x_k, y_k, z_k “ obr.4.5, které označují polohu kuličky vůči nulovému bodu obrobku.



Obr. 4.3 Zadání souřadnice „z“

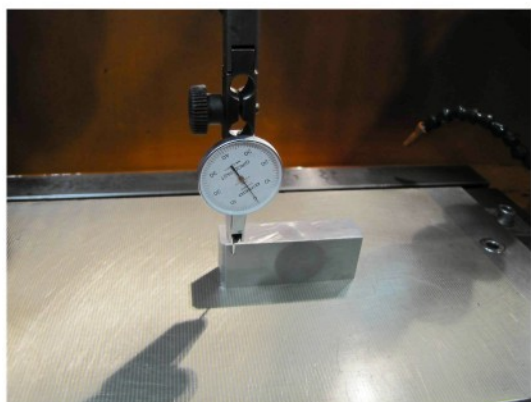


Obr. 4.4 Zadání souřadnice „x“

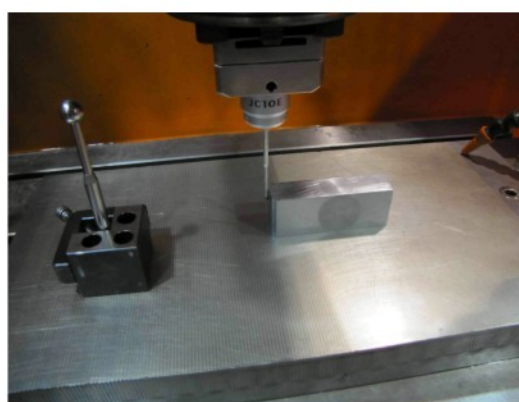


Obr. 4.5 Přenesení souřadnic na pomocnou kuličku

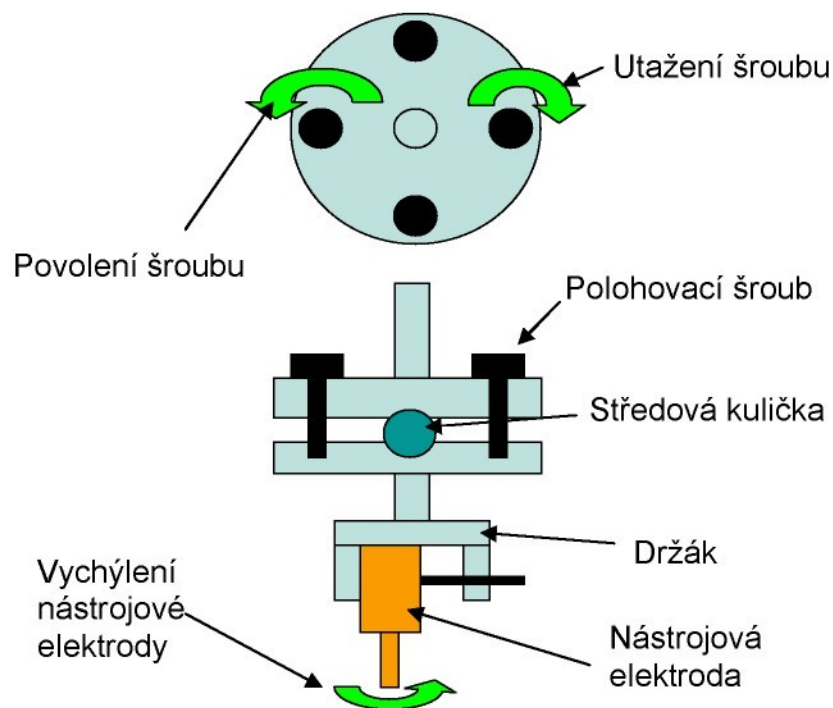
Nástrojové elektrody budou ustaveny do držáku. Držák je pomocí přesné kleštiny upevněn do speciálního nástavce. Tento nástavec umožní vyrovnat elektrodu tak, aby byla vůči obrobku kolmá obrázek 4.8. Povolováním a utahováním šroubů se nastavuje rovnoběžnost nástrojové elektrody vůči souřadnému systému



Obr. 4.6 Ustavení obroku.

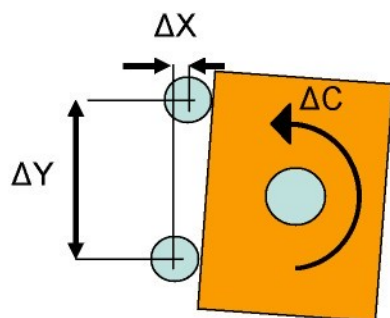


Obr. 4.7 Přenesení souřadnic



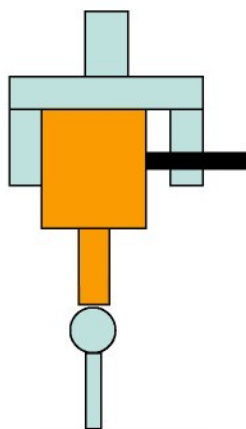
Obr.4.8 Speciální nástavec pro vyrovnaní nástrojové elektrody.

Vyrovnaní rotace osa „c“ nástrojové elektrody se provede ručně pomocí číselníkového úchylkoměru a nebo automaticky pomocí příkazu ROTY12, na jehož základě si stroj „otřuká“ nástrojovou elektrodu o ustavovací kuličku ve vzdálenosti 12 mm a následně provede korekci rotace osy „c“. Z důvodu úspory času byla vybrána možnost automatického vyrovnaní pomocí příkazu.

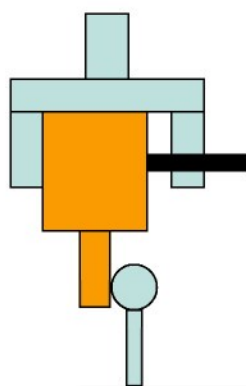


Obr.4.9 Schéma automatického vyrovnaní nástrojové elektrody pomocí příkazu, ROTY12

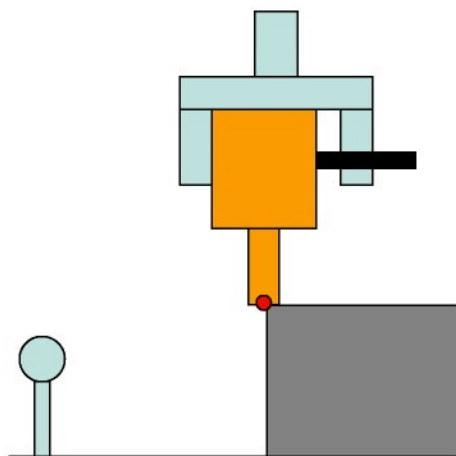
Po vyrovnaní obrobku a nástrojové elektrody se přenesou souřadnice z pomocné kuličky na nástrojovou elektrodu. Přenesení souřadnice „z“ je znázorněno na obrázku 4.10 a přenesení souřadnic „x“ a „y“ na obrázku. 4.11. Jakmile se souřadnice obrobku a nástrojové elektrody nachází ve stejném souřadném systému obr. 4.12 je možné zadávat souřadnice obrábění.



Obr. 4.10 Najetí souřadnice „z“ na nástrojovou elektrodu



Obr. 4.11 Najetí souřadnice „x“ a „y“ na nástrojovou elektrodu



Obr. 4.12 Souřadnicový systém obrobku je totožný se souřadnicovým systémem nástrojové elektrody.

4.2.3 Průběh experimentů

Experimenty byly prováděny v tomto pořadí:

Jako první obráběný materiál byla zvolena nástrojová ocel a hloubení hrubovacími elektrodami v tomto pořadí:

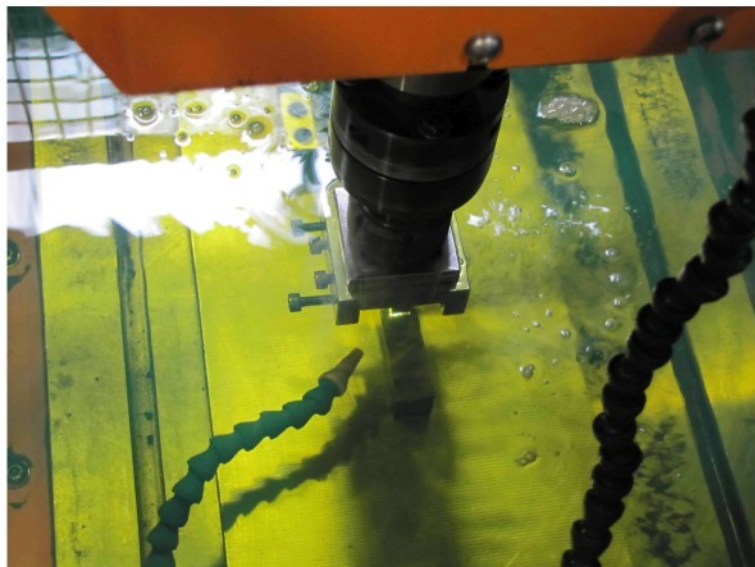
- 1) měděná elektroda
- 2) grafit EDM-1
- 3) grafit EDM-200
- 4) grafit EDM-C200
- 5) grafit EDM-C3

Čas byl sledován na displeji stroje a každou minutu byla odečítána hloubka, ve které se nástrojová elektroda nachází. Jedná se o odečet hloubky, kterou ukazuje stroj. Reálnou hloubku není možné v průběhu obrábění zjistit, jelikož není v danou chvíli známe opotřebení nástrojové elektrody.

Po odhrubování všech pěti vzorků nástrojovými elektrodami byl obrobek vyndán z hloubičky a stejným způsobem byl odhrubován druhý obráběný materiál MoldMAX® V.

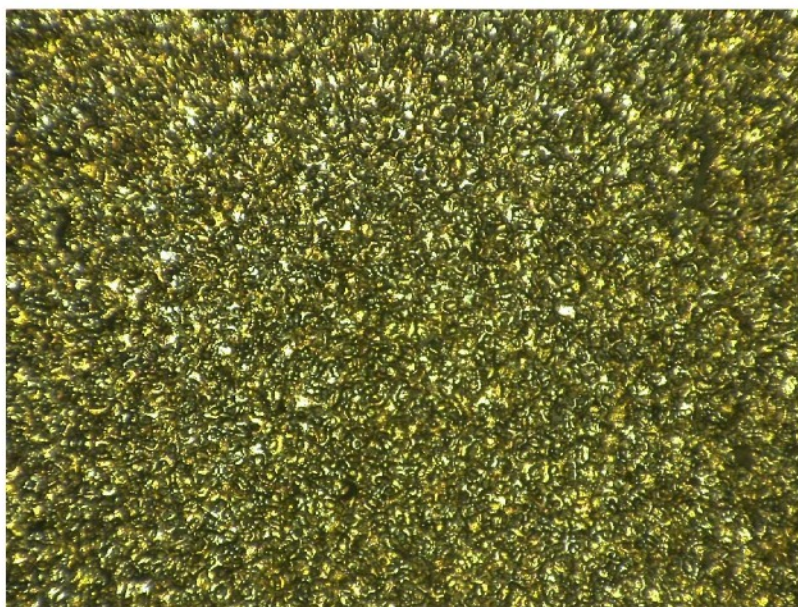
Po odhrubování obou materiálů a následném vyčištění od dielektrika byly změřeny aktuální hloubky obráběných otvorů.

Výsledky měření byly zaznamenány a následně byla pořízena fotodokumentace obráběné plochy pomocí optického mikroskopu.



Obr. 4.13 Proces obrábění při experimentu.

Po zdokumentování obráběných ploch byly znovu obrobky ustaveny do hloubičky a byl spuštěn dokončovací program. Po jeho dokončení byl opět vyčištěn povrch, změřeny hloubky otvorů po jednotlivých experimentech a pořízeny snímky mikroskopem, obrázek 4.14.



Obr. 4.14 50-ti násobně zvětšený detail hrubované plochy, nástrojová ocel obráběna grafitem EDM-1.

5. Výsledky

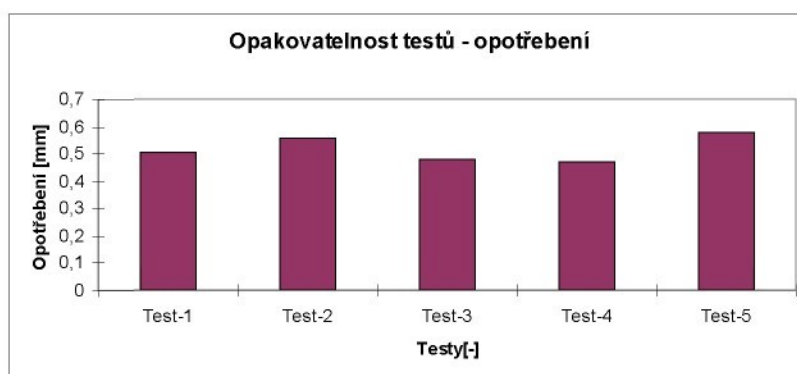
Výsledky experimentu jsou sledovány z hlediska ekonomického zhodnocení a dále podle času elektroerozivního obrábění, opotřebení nástrojové elektrody, rychlosti přípravy jednotlivých elektrod a kvality obrobeného povrchu.

5.1 Výsledky opakovatelnosti experimentů

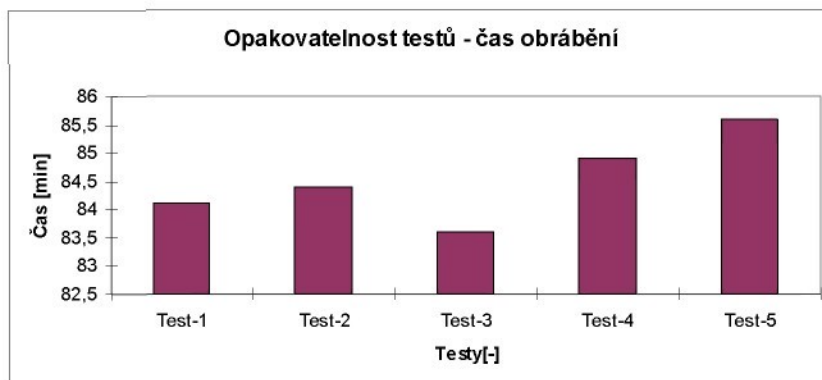
V tabulce 5.1 jsou uvedeny výsledky testů opakovatelnosti, které byly následně vyneseny do grafu 5.2, kde je vynesena čas hloubení. V grafu 5.1 je vyneseno opotřebení nástrojové elektrody.

Test	Čas[min]	Opotřebení[mm]
Test-1	84,1	0,506
Test-2	84,4	0,559
Test-3	83,6	0,481
Test-4	84,9	0,468
Test-5	85,6	0,578

Tab.5.1 Tabulka výsledků opakovatelnosti měření



Graf.5.1 Graf výsledků opakovatelnosti měření - opotřebení



Graf.5.2 Graf výsledků opakovatelnosti měření - čas obrábění

Statistické ukazatele, které se používají k výpočtu stability procesu jsou vyneseny v tabulce 5.2.

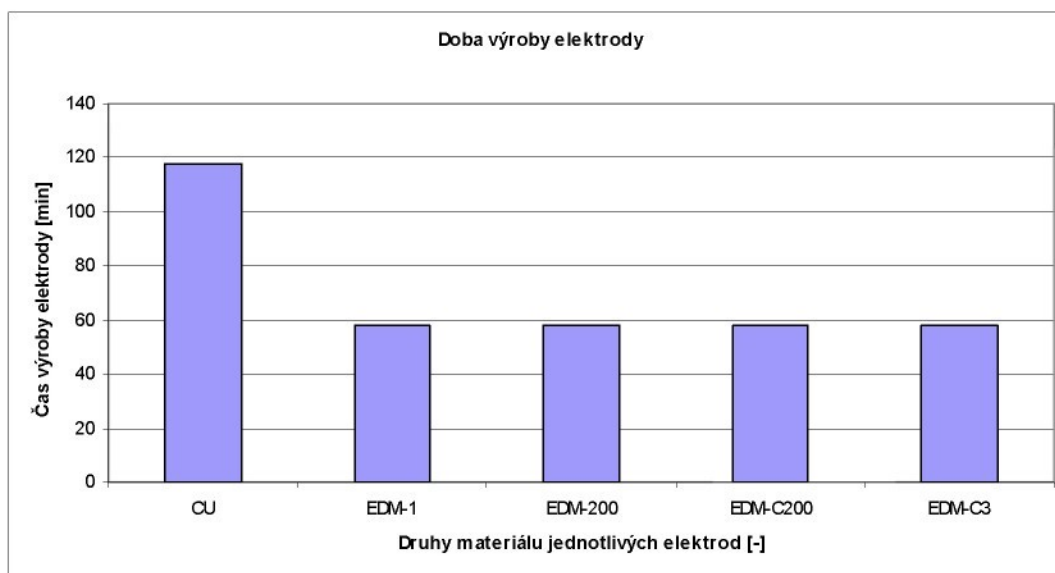
Veličina	Symbol	Opotřebení	Jednotky	Čas	Jednotky
Průměrná hodnota	$\bar{x}$	0,518	[mm]	84,52	[min]
Směrodatná odchylka	s	0,043	[-]	0,766	[-]
Statistický interval max	$x_{\max}$	0,623	[mm]	86,284	[min]
Statistický interval min	$x_{\min}$	0,410	[mm]	82,756	[min]
Skutečný interval spolehlivosti	t_{skut}	4,783	[-]	5,222	[-]

Tab. 5.2 Statistické ukazatele pro výpočet stability měření

Hodnota $t_{\text{skut_op}}=4.783$ pro opotřebení i hodnota $t_{\text{skut_cas}}=5.222$ pro dobu obrábění je větší než hodnota v tabulce 3.4 $t_{99}=4.604$ z čehož vyplývá, že opakovatelnost experimentu v úrovni spolehlivosti je větší než 99%.

5.2 Doba přípravy elektrod

Graf 5.3 umožňuje porovnat dobu přípravy jednotlivých elektrod. Z grafu je patrné, že doba přípravy měděné elektrody je dvojnásobná oproti času výroby grafitové elektrody.



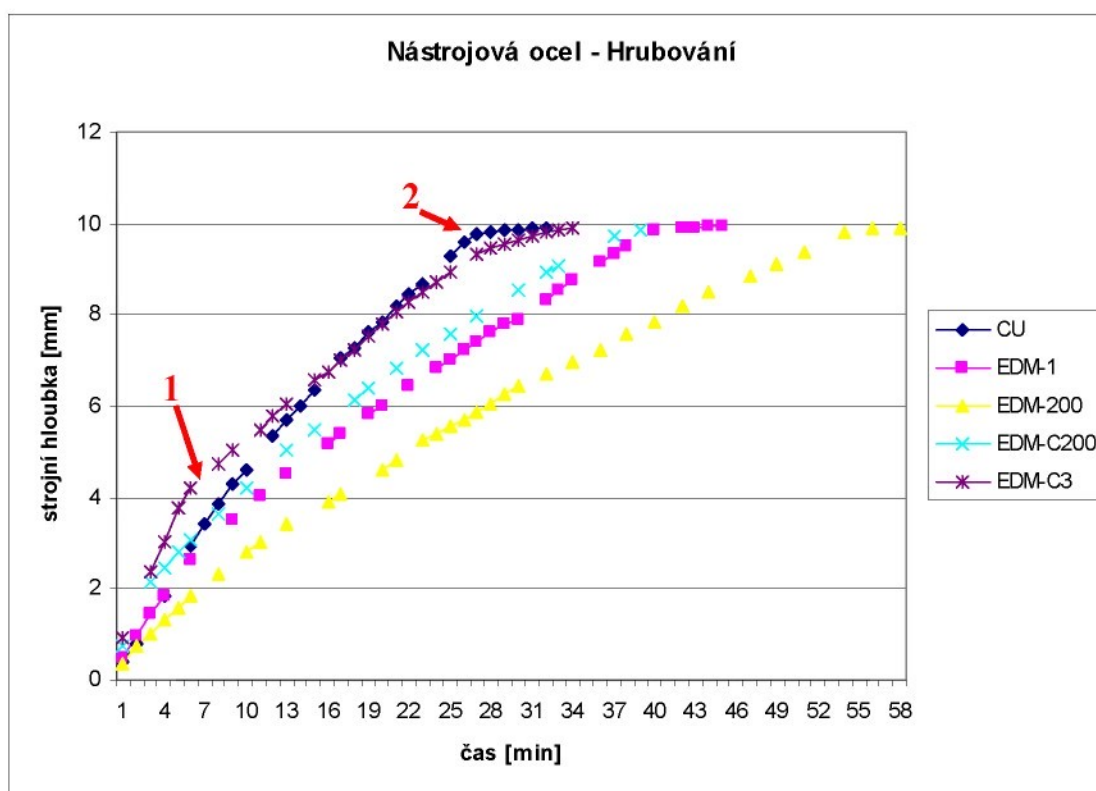
Graf.5.3 Doba výroby elektrod z různých materiálů

5.3 Porovnání obráběcích časů

Při sledování průběhu času byla zvolena jako nezávislá hodnota čas, jelikož ji lze snadněji kontrolovat a k ní byla zapisována závislá hodnota hloubka elektrody.

5.3.1 Porovnání obráběcích časů hrubovací elektrodou

Jako první probíhal test obrábění nástrojové oceli hrubovací elektrodou. Výsledky testu jsou zobrazeny grafu 5.4, kompletní tabulka hodnot je v příloze 2. Hrubování bylo naprogramováno od nulové hloubky do hloubky 10 mm. Ve skutečnosti hloubení probíhalo do nižší hloubky. Od naprogramované hloubky bylo odečteno projiskření elektrody. Výsledná hloubka hrubovací elektrody byla dále menší o hodnotu opotřebení nástrojové elektrody.



Graf. 5.4 Hrubování do nástrojové oceli různými druhy elektrod

Na procesu hrubování je vidět, že z počátku je obrábění velmi rychlé. Nejvíce patrné je to na elektrodě vyrobené z Grafitu EDM-C3, (v grafu 5.4 označená „1“). Úběr v hloubce kolem 2 mm je 0,8 mm/min. V hloubce 8 mm je úběr 0,21 mm/min. Na ostatních materiálech není tento zlom tak skokový a dochází také ke zpomalení obrábění. Příčinou je horší odvod nečistot z místa obrábění, který způsobuje výskyt

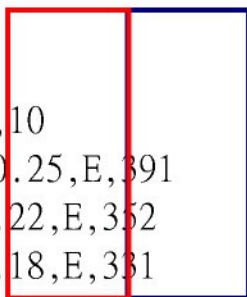
chybných pulzů obrábění, čímž je stroj nucen obrábění zpomalit. Přestože dojde ke zpomalení obrábění, proces zůstane stabilní. V případě, že by stroj automatickou korekci neprovedl, mohlo by dojít k následujícím problémům:

- výrazné zpomalení obrábění, v krajním případě až zastavení obrábění,
- natavení zbytků obráběného materiálu na elektrodu, tím dojde ke zvětšení nástrojové elektrody (pohloubení tvaru).

V našem případě stroj provádí tyto korekce plně automaticky.

Do oblasti (2) v grafu 5.4 se pohybuje elektroda pouze v jedné ose a to v ose „z“. Když elektroda dosáhne určité hloubky, v našem případě to je přibližně 9,6 mm, začne se snižovat tzv. generátorové číslo (zmenšení elektrického proudu), začínají se zmenšovat výboje. Tím dochází ke zpomalení obrábění a zároveň k menším kráterům na povrchu obrobku.

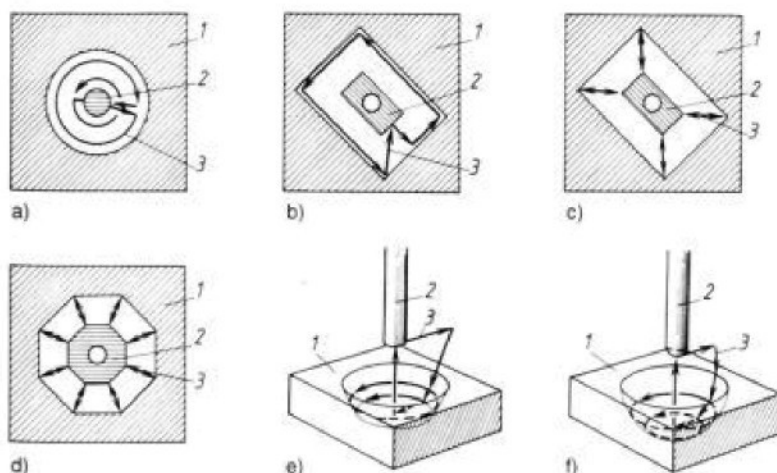
```
1:PN/CUST025
2:COORD/METR
3:AUXF/26
4AUXF/60
5:TECHNO/F,UCUAC
6:FLUSH/LL,1,LR,1
7:L1=$1
8:AXE/Z
9:FROM/X,0,Y,0,Z,10
10:DOWN/L,L1,H,-0.25,E,391
11:ORB/L,L1,H,-0.22,E,352
12:ORB/L,L1,H,-0.18,E,331
13:ORB/L,L1,H,-0.12,E,291
14:ORB/L,L1,H,-0.10,E,282,RET
15:FLUSH/LL,0,LR,0
16:AUXF/23
17:END
```



*v červeném poli jsou jednotlivé
jiskrové mezery a v modrém poli
jsou znázorněna čísla
generátorů*

*Obr. 5.1 Program pro
elektroerozivní obrábění*

Aby bylo možno obrábět i pomocí menších výbojů, musí stroj vykonat pohyb v ose „x“ a v ose „y“ a samozřejmě je vykonán i pohyb v ose „z“. Tento pracovní pohyb nástrojové elektrody se nazývá orbování.



1) obrobek, 2) nástrojová elektroda, 3) pracovní pohyb nástrojové elektrody.
a) kruhové, b) obdelníkové po obvodu, c) obdelníkové do rohů, d) osmihrané, e) kuželové, f) kulové

Obr. 5.2 Orbování nástrojové elektrody.

Pořadí rychlosti hrubování je znázorněno v následující tabulce tab. 5.3, kde jsou zaznamenány výsledné časy hrubování do nástrojové oceli.

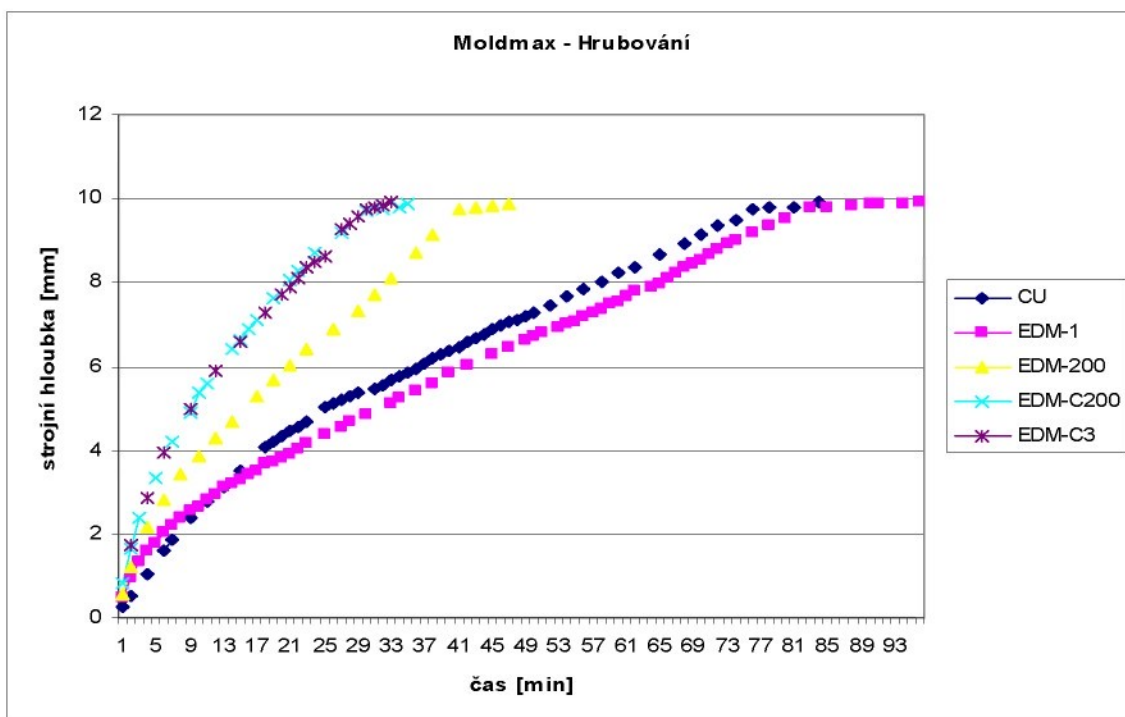
Hrubování - nástrojová ocel		
Pořadí	Čas hrubování [min:sec]	Materiál elektrody
1	33:16	CU
2	34:45	EDM-C3
3	42:20	EDM-C200
4	45:27	EDM-1
5	59:40	EDM-200

Tab..5.3 Pořadí rychlosti obrábění a časy obrábění hrubovacích elektrod při hloubení do nástrojové oceli

Stejný princip byl použit i při hrubování materiálu MoldMAX[®] V. Výsledky jsou zobrazeny v příloze 2 hodnoty vyneseny do grafu 5.5.

Hrubování - MoldMAX [®] V		
Pořadí	Čas hrubování [min:sec]	Materiál elektrody
1	33:12	EDM-C3
2	35:34	EDM-C200
3	47:52	EDM-200
4	84:35	CU
5	96:18	EDM-1

Tab..5.4 Pořadí rychlosti obrábění a časy obrábění hrubovacích elektrod při hloubení do materiálu MoldMAX[®] V



Graf. 5.5 Hrubování do materiálu MoldMAX®V různými druhy materiálu

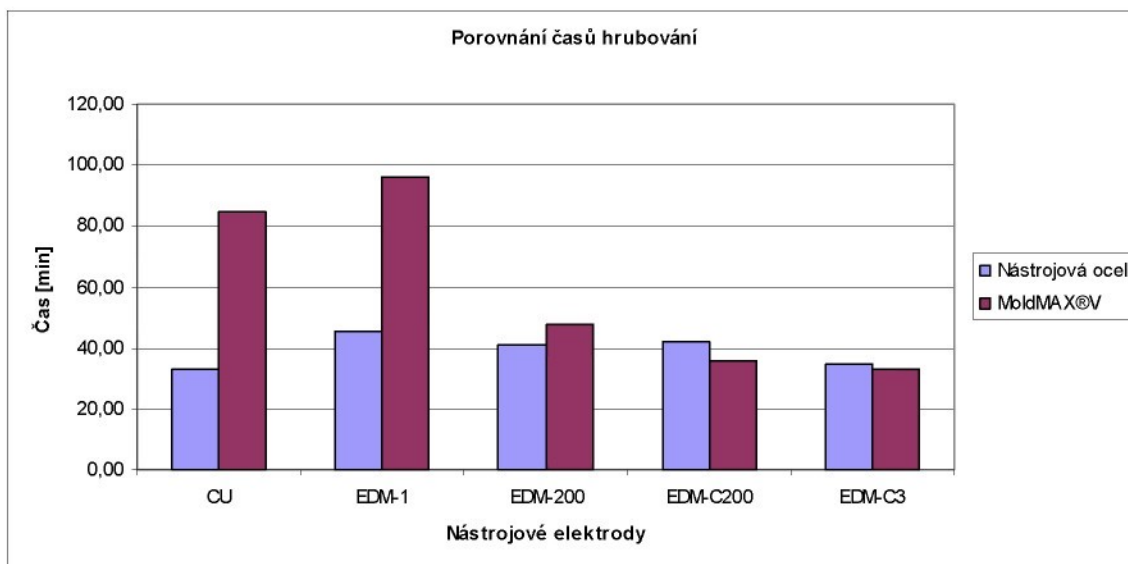
I zde je pozorováno postupné zpomalování obrábění, jako tomu bylo při obrábění nástrojové oceli. Pořadí rychlosti hrubování je v tabulce 5.4, kde jsou uvedeny výsledné časy hrububování do materiálu MoldMAX® V.

Následující graf 5.6 a tabulka 5.5 porovnává rozdíly v rychlosti obrábění nástrojové elektrody a materiálu MoldMAX® V.

Materiál elektrody	Nástrojová ocel [min]	Moldmax [min]
CU	33,27	84,58
EDM-1	45,45	96,30
EDM-200	40,67	47,87
EDM-C200	42,33	35,57
EDM-C3	34,75	33,20

Tab. 5.5 Porovnání časů hrubování do nástrojové oceli a do MoldMAX®V

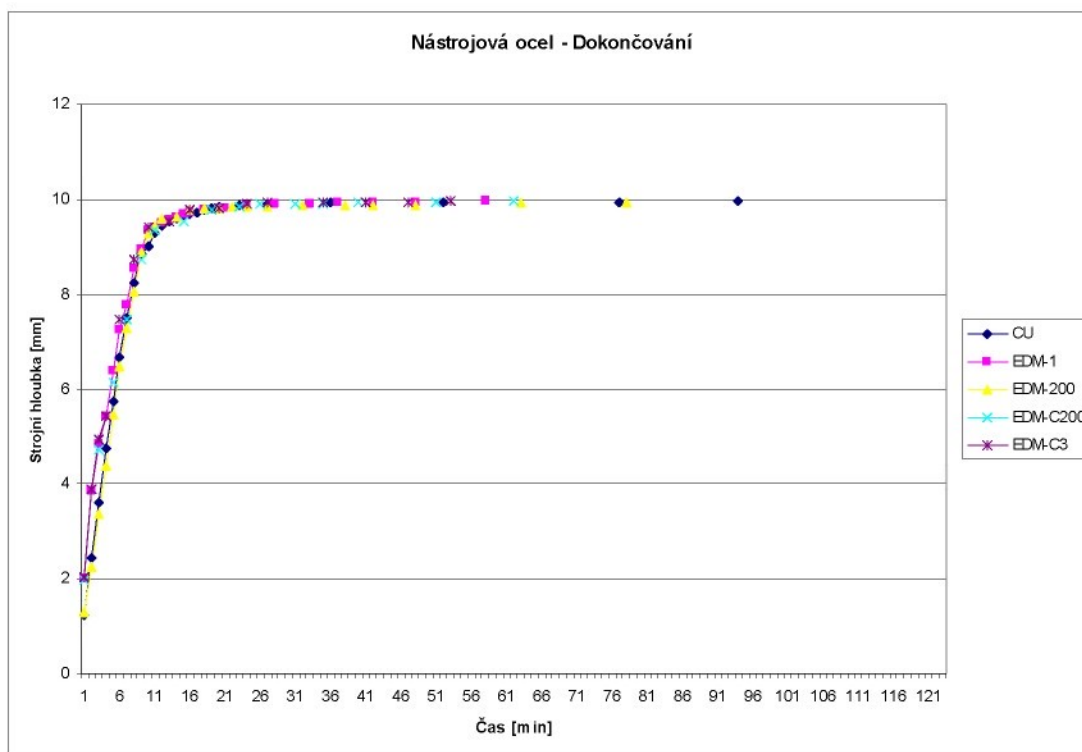
Modrý sloupec ukazuje dobu obrábění nástrojové oceli, červený sloupec ukazuje dobu obrábění materiálu MoldMAX® V. Z výsledků je vidět, že největší rozdíl je u elektrod z mědi a EDM-1.



Graf. 5.6 Porovnání časů hrubování do nástrojové oceli a do materiálu MoldMAX® V

5.3.2 Porovnání obráběcích časů dokončovací elektrodou.

Obrábění dokončovací elektrodou pokračuje po hrubování. Následující graf 5.7 popisuje průběh obrábění nástrojové oceli.



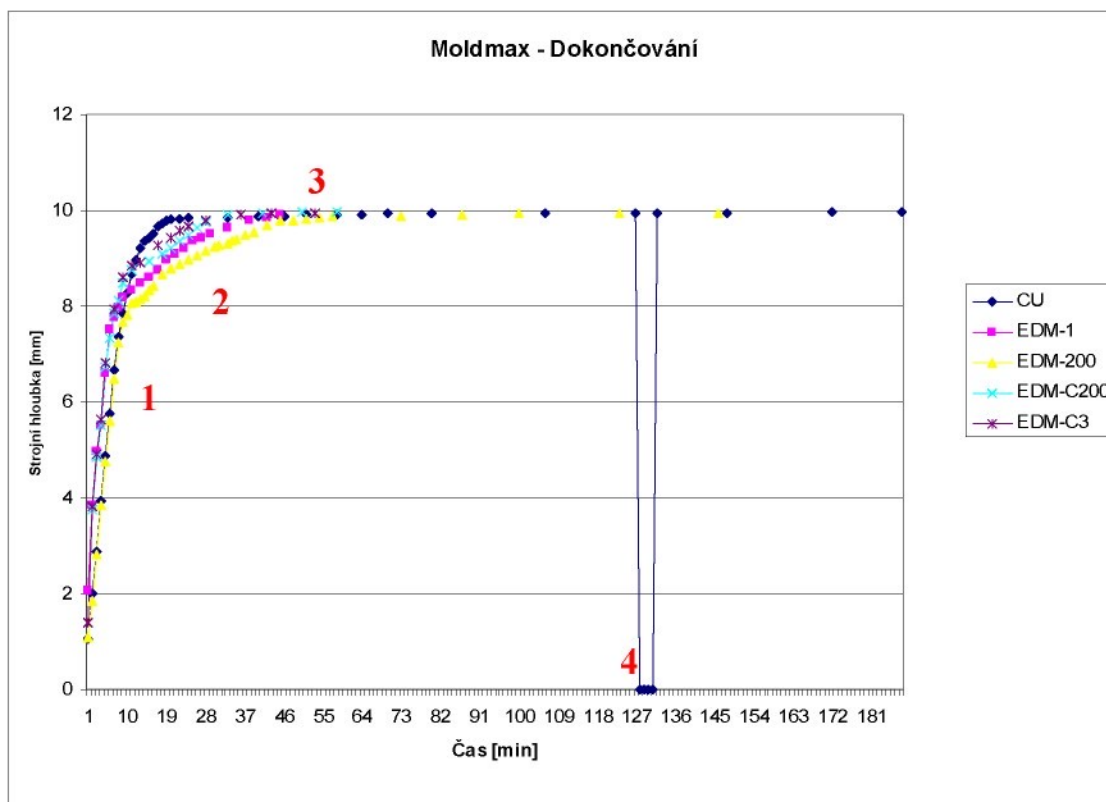
Graf. 5.7 Časový průběh dokončovacího hloubení do nástrojové oceli

Stejná metoda je použita u dokončovacích elektrod pro materiál MoldMAX® V. Průběh obrábění je znázorněn v grafu 5.8 a kompletní hodnoty se nacházejí v příloze 2.

Z počátku hloubení dokončovací elektrody je rychlost obrábění vysoká cca 1 mm až 2 mm za minutu (1) v grafu 5.8. Tato rychlost je způsobená úběrem malé čelní plochy, protože se obrábí pouze malou plochou. Velikost čelní plochy je rozdíl předhrubované plochy a čelní plochy elektrody. Obrábění se zpomalí (zhruba na 0,1mm až 0,2 mm za minutu), jelikož dojde ke zvětšení čelní obráběcí plochy (2) v grafu 5.8. Náznorně to zobrazuje graf obrábění materiálu MoldMAX® V pomocí elektrody EDM-200. K dalšímu zpomalení dochází v bodu (3) grafu 5.8, když finišování elektroda začne orbovat, dojde k postupnému snižování generátorového čísla (snížení elektrického proudu). Tento proces je detailně popsán u hrubování.

Dokončování - Moldmax		
Pořadí	Čas hrubování [min:sec]	Materiál elektrody
1	53:49	EDM-C3
2	58:49	EDM-C200
3	65:38	EDM-1
4	146:47	EDM-200
5	188:26	CU

Tab..5.6 Pořadí hrubování materiálu MoldMAX®V



Graf. 5.8 Časový průběh dokončovacího hloubení do materiálu MoldMAX® V

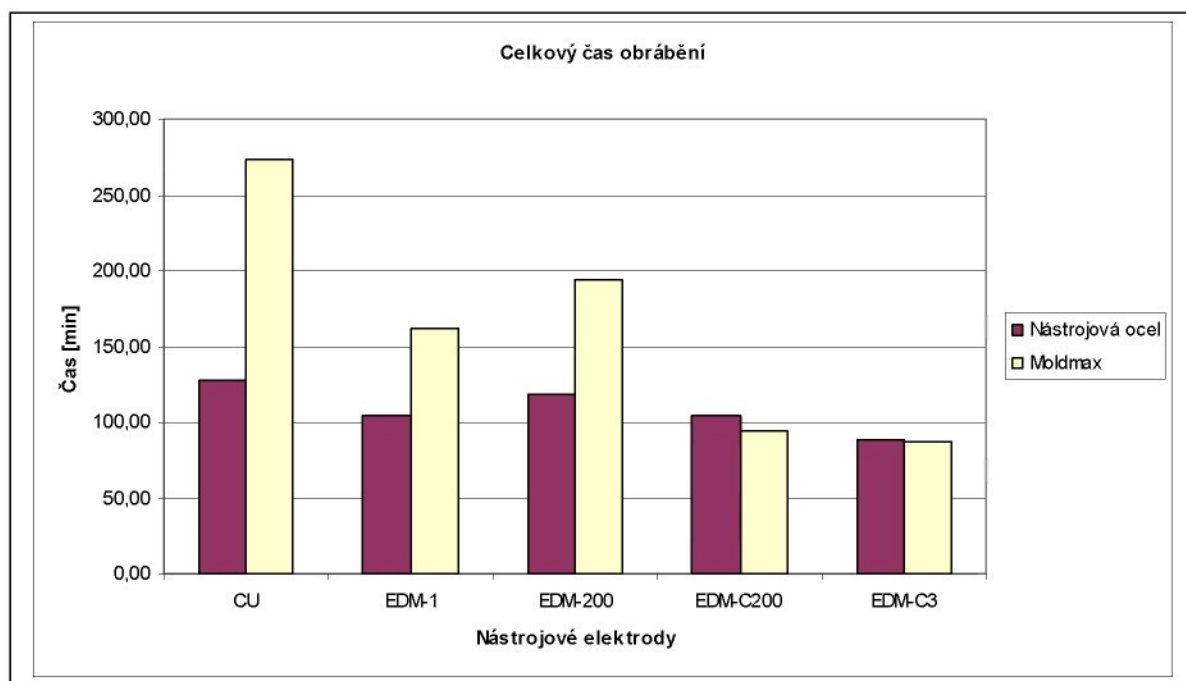
V oblasti grafu 5.8 (4) došlo k zastavení úběru materiálu (100% chybných pulsu), proto se muselo přerušit obrábění a místo se muselo vyčistit od nečistot. Po tomto zásahu se obrábění vrátilo do normálu.

5.3.3 Celkové časy obrábění

V tabulce 5.7 a grafu 5.9 jsou vyneseny celkové časy obrábění jak pro materiál MoldMAX® V, tak pro nástrojovou ocel.

Materiál elektrody	Nástrojová ocel [min]	Moldmax [min]
CU	127,70	273,01
EDM-1	104,38	161,93
EDM-200	118,89	194,65
EDM-C200	104,55	94,39
EDM-C3	88,05	87,02

Tab 5.7 Rychlost obrábění nástrojové elektrody a materiálu MoldMAX® V pro dokončování



Graf. 5.9 Celkový čas obrábění

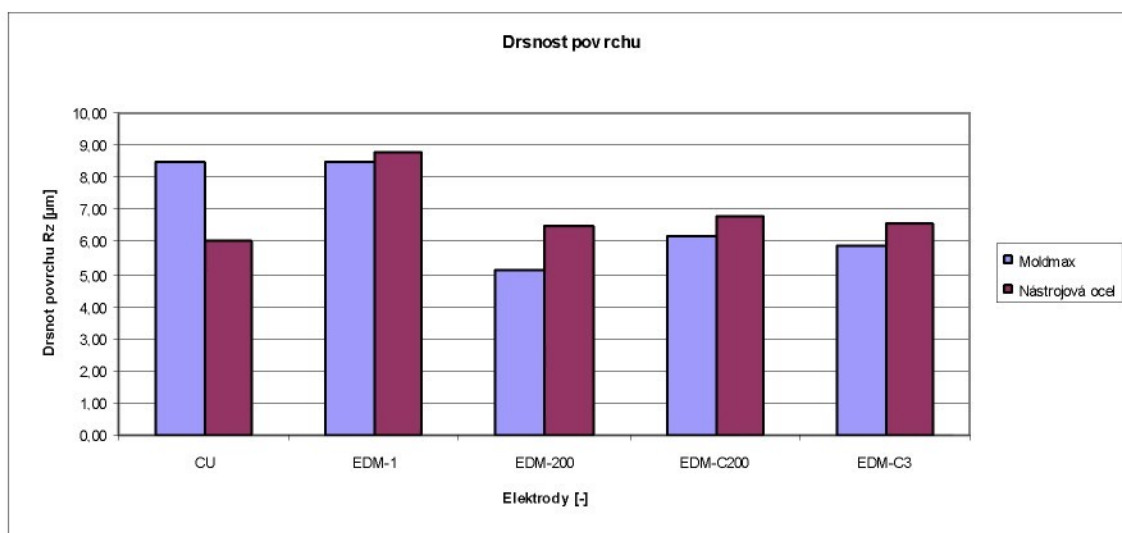
Nejkratší čas pro obrábění jak nástrojové oceli, tak materiál MoldMAX® V má grafitová elektroda sycená mědí EDM-C3, kde čas obrábění je 87 min a 88 min.

5.4. Naměřené drsnosti povrchů

Měření VDI je velice subjektivní, a proto byla změřena drsnost Rz na 5 mm délky obráběné plochy a tato drsnost byla porovnána mezi jednotlivými výsledky testů. Výsledky jsou porovnány v příložené tabulce 5.8 a v grafu 5.10, kde je znázorněn jak obráběný materiál, tak nástrojová elektroda.

Obráběný materiál	Materiál elektrody	Rz [μ m]
Moldmax	CU	8,50
	EDM-1	8,50
	EDM-200	5,10
	EDM-C200	6,20
	EDM-C3	5,90
Nástrojová ocel	CU	6
	EDM-1	8,8
	EDM-200	6,5
	EDM-C200	6,8
	EDM-C3	6,6

Tab. 5.8 Drsnost povrchu



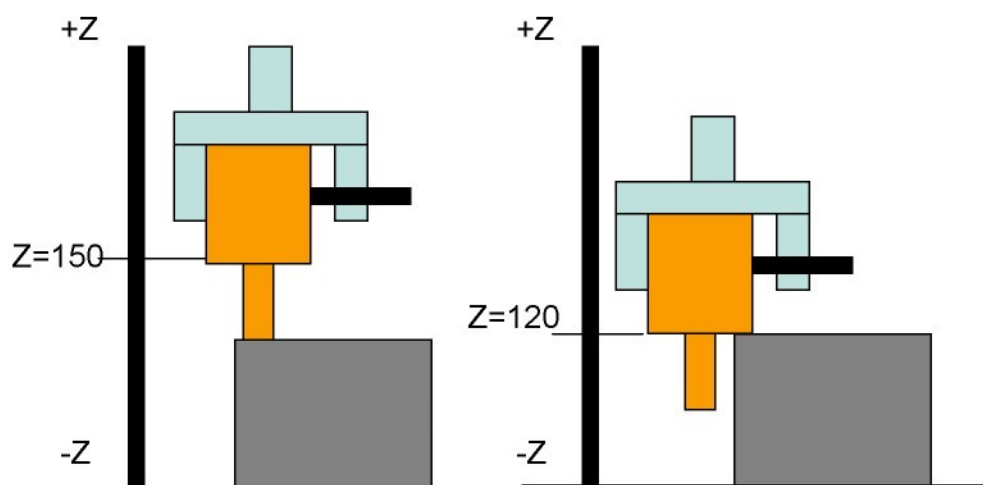
Graf: 5.10 Drsnost povrchu

Z výsledků měření drsnosti povrchu je patrné, že rozdíl mezi nejhrubším $R_z = 8,8 \mu\text{m}$ a nejjemnějším povrchem $R_z = 6 \mu\text{m}$ je velmi malý. Nejlepší povrch při obrábění nástrojové oceli i materiálu MoldMAX® V je EDM-200. Protokoly z jednotlivých měření jsou v příloze 3.

5.5 Opotřebení nástrojových elektrod

Opotřebení je jednou z hlavních hodnot, kterou je zapotřebí sledovat při elektroerozivním obrábění. Vysoké opotřebení nástrojové elektrody má za následek vyšší nepřesnost vyráběného dílu. Případně je nutno použít více elektrod a tím pádem prodražení celého procesu obrábění.

Měření opotřebení se provádělo přímo na obráběcím stroji před obráběním a tím samým způsobem po obrábění. Způsob měření je znázorněn na obr. 5.3. Nejprve byla zjištěna souřadnice „Z“=150mm čela nástroje a následně souřadnice „Z“=120mm plochy pro ustavování elektrody. Rozdílem těchto dvou souřadnic (30mm) byla zjištěna délka elektrody.



Obr. 5.3 Způsob měření délky elektrody pro výpočet opotřebení

5.5.1 Opotřebení hrubovací elektrody

Opotřebení hrubovací elektrody sice nemá přímý vliv na kvalitu rozměru, ale nechává větší množství obráběného materiálu na dokončovací elektrodě. Jelikož dokončovací elektroda má menší rychlost úběru oproti hrubovací, výrazně se s tím prodlužuje doba obrábění a má nepřímý vliv i na opotřebení nástrojové elektrody.

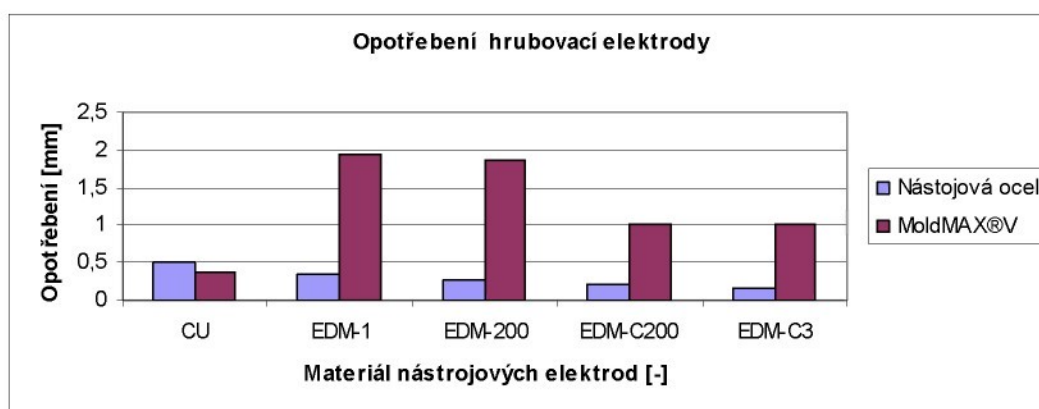
V následujících tabulkách 5.9 a 5.10 jsou vyneseny hodnoty rozměrů nástrojových elektrod před a po obrábění. Také je zde vypočteno opotřebení hrubovací elektrody. Rozdíl délky elektrody před obráběním a po obrábění je brán jako opotřebení elektrody. Hodnoty pro nástrojovou ocel jsou v tab. 5.9 a pro materiál MoldMAX® V tab. 5.10. Oba materiály jsou pro porovnání vyneseny do grafu graf 5.11.

	Opotřebení hrubovací elektrody - nástrojová ocel				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	24,933	25,066	25,224	24,94	25,066
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,427	24,733	24,966	24,73	24,915
Opotřebení elektrody [mm]	0,506	0,333	0,258	0,21	0,151

Tab. 5.9 Opotřebení hrubovací elektrody nástrojová ocel

	Opotřebení hrubovací elektrody - MoldMAX®V				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	24,998	25,023	25,03	24,976	25,079
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,617	23,073	23,171	23,97	24,08
Opotřebení elektrody [mm]	0,381	1,95	1,859	1,006	0,999

Tab. 5.10 Opotřebení hrubovací elektrody materiálu MoldMAX®V



Graf. 5.11 Opotřebení hrubovací elektrody

Z naměřených hodnot je patrné, že při obrábění měděnou elektrodou dochází k přibližně stejnému opotřebení jak u nástrojové oceli, tak u materiálu MoldMAX® V. Grafit má nižší opotřebení u nástrojové oceli než u materiálu MoldMAX® V. Grafitové elektrody s přidavkem mědi dosahují polovičního opotřebení vůči grafitu bez mědi.

5.5.2 Opotřebení dokončovací elektrody

Měření opotřebení se provádělo přímo na obráběcím stroji před obráběním a tím samym způsobem po obrábění. Způsob měření je znázorněn na obr. 5.3. Opotřebení dokončovací elektrody bylo měřeno stejným způsobem jako opotřebení hrubovací elektrody.

	Opotřebení dokončovací elektrody - nástrojová ocel				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	25,014	25,005	25,024	25,001	24,995
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,975	24,960	25,005	24,990	24,985
Opotřebení elektrody [mm]	0,039	0,045	0,019	0,012	0,010
Hloubka otvoru po hrubování [mm]	9,14	9,372	9,447	9,495	9,554

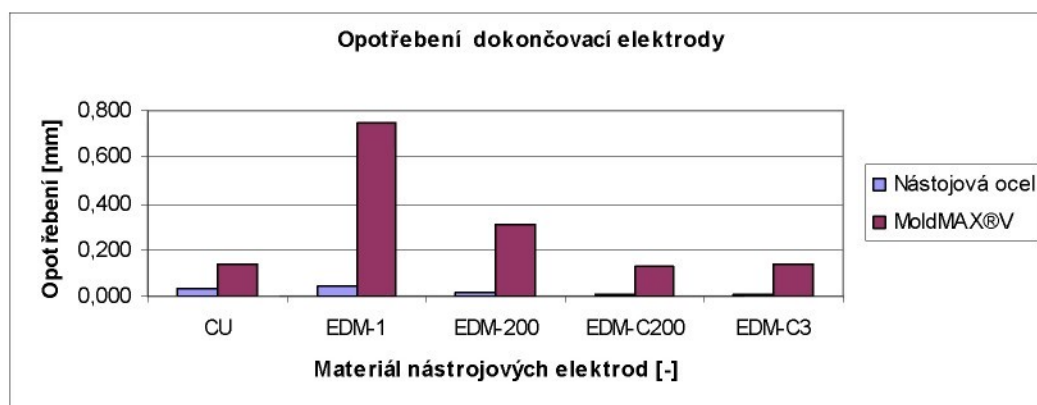
Tab. 5.11 Opotřebení dokončovací elektrody pro nástrojovou ocel

V tabulce 5.11 jsou uvedeny hodnoty naměřených délek elektrod a opotřebení pro nástrojovou ocel a v tab. 5.12 pro MoldMAX[®] V.

	Opotřebení dokončovací elektrody - MoldMAX [®] V				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	25,014	25,012	25,007	25,02	25,018
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,875	24,264	24,695	24,888	24,884
Opotřebení elektrody [mm]	0,139	0,748	0,312	0,132	0,134
Hloubka otvoru po hrubování [mm]	9,277	7,765	7,856	8,709	8,716

Tab. 5.12 Opotřebení dokončovací elektrody pro materiál MoldMAX[®]V

Hodnoty opotřebení pro dokončovací elektrody jsou vyneseny v grafu 5.11.



Graf. 5.12 Opotřebení dokončovací elektrody pro nástrojovou ocel a MoldMAX[®]V

Z naměřených hodnot je zřejmé mnohem nižší opotřebení elektrod, které obráběly nástrojovou ocel, než které obráběly materiál MoldMAX® V.

Protože opotřebení hrubovací elektrody je pokaždé jiné, má tím dokončovací elektroda rozdílnou hloubku úběru, proto se počítá s procentuálním opotřebením dokončovací elektrody podle vzorce:

$$OP_{\text{proc}} = \frac{hl_{\text{vykres}} - hl_{\text{skut}}}{OP_{\text{fin_el}}} \quad (16)$$

kde: OP_{proc} ... procentuální opotřebení nástrojové elektrody [%]

hl_{vykres} ... výkresová hloubka otvoru [mm]

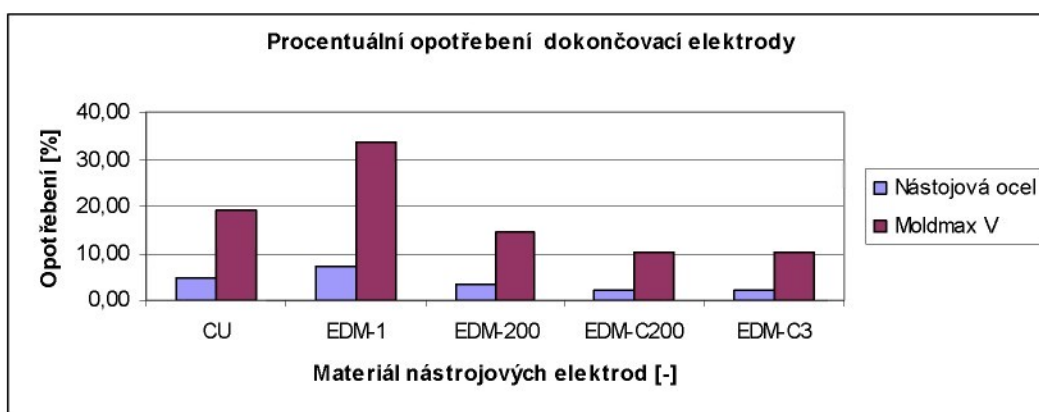
hl_{skut} ... skutečná hloubka otvoru po hrubování [mm]

$OP_{\text{fin_el}}$... opotřebení dokončovací elektrody [mm]

Hodnoty pro výpočet jsou vyneseny v tabulce 5.13 a výsledné procentuální opotřebení je vyneseno do grafu 5.13.

	Procentuální opotřebení dokončovací elektrody [%]				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
MoldMAX® V	4,50	7,24	3,49	2,28	2,16
Nástrojová ocel	19,21	33,47	14,56	10,22	10,41

Tab. 5.13 Opotřebení dokončovací elektrody pro MoldMAX® V



Graf. 5.13 Opotřebení dokončovací elektrody pro nástrojovou ocel a MoldMAX® V

I u obrábění dokončovací elektrodou je menší opotřebení elektrody při obrábění nástrojové oceli než při obrábění materiálu MoldMAX® V. Nejnižšího procentuálního opotřebení u dokončování dosahují grafitové elektrody s přídavkem mědi.

5.6 Ekonomické hodnocení

Ekonomické hodnocení je počítáno pro tyto konkrétní podmínky. Pro jiný případ se může lišit, jelikož poměr ceny práce na výrobu elektrody a ceny polotovaru může být jiný.

5.6.1 Náklady na výrobu jednotlivých elektrod

Náklady na výrobu elektrod jsou počítány stejně jak pro hrubovací, tak dokončovací elektrodu, protože se vyrábějí ze stejného materiálu a jsou připravovány stejným programem.

Cena elektrody se skládá ze dvou složek: z ceny vstupního materiálu pro elektrodu a z ceny výroby elektrody.

$$C_{el} = C_{mat} + N_{vy_el} \quad (16)$$

kde: C_{el} cena elektrody [Kč],
 C_{mat} cena polotovaru [Kč],
 N_{vy_el} ... náklady na výrobu elektrody [Kč].

Výpočet ceny materiálu nástrojové elektrody:

$$C_{mat} = \frac{V_{pol} \cdot JC_{pol}}{10^6} \quad (17)$$

kde: V_{pol} objem polotovaru elektrody [mm³],
 JC_{pol} jednotková cena polotovaru elektrody [Kč/dm³].

Výpočet objemu polotovaru:

$$JC_{polo} = a \cdot b \cdot c \quad (18)$$

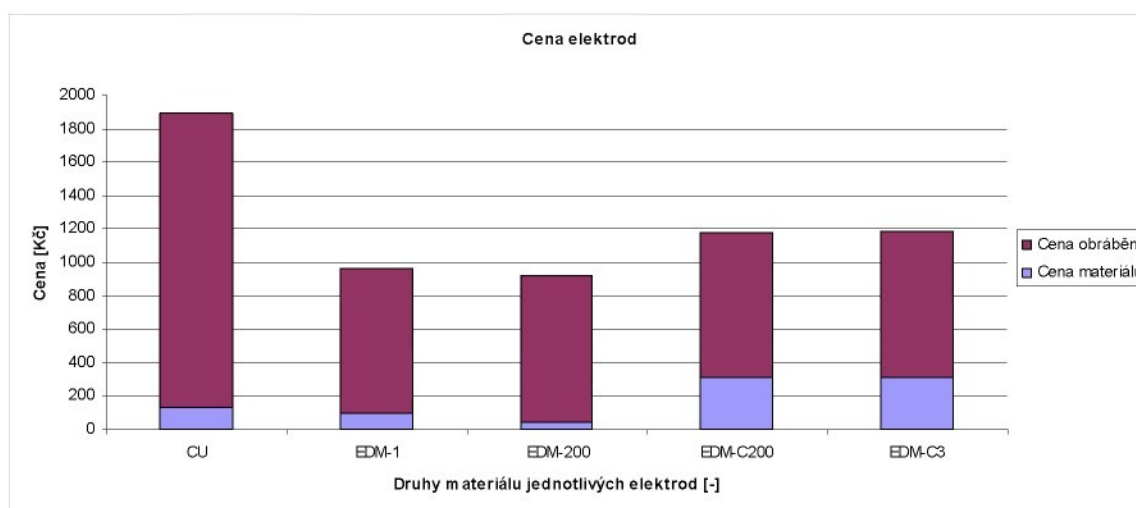
kde: a, b, c ... rozměry polotovaru [mm].

V tabulce 5.14 je zobrazen kompletní přehled údajů o ceně, rozměrech elektrod z jednotlivých materiálů a hodinových sazbách CNC

Popis	Jednotka	Materiál elektrody				
		CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Objem polotovaru pro elektrodu	[dm ³]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Rozměr a	[mm]	25	25	25	25	25
Rozměr b	[mm]	25	25	25	25	25
Rozměr c	[mm]	40	40	40	40	40
Jednotková cena polotovaru	[Kč/dm ³]	5200	3900	1840	12250	12500
Cena polotovaru	[Kč]	130	97,5	46	306,25	312,5
Cena hodinové sazby na CNC	[Kč/hod]	900	900	900	900	900
Doba výroby elektrody	[min]	117,8	58,1	58,1	58,1	58,1
Cena Výroby elektrod	[Kč]	1767	871,5	871,5	871,5	871,5
Cena elektrody	[Kč]	1897	969	917,5	1177,75	1184

Tab. 5.14 Opotřebení dokončovací elektrody pro nástrojovou ocel a MoldMAX[®]V

Graf 5.14 zobrazuje poměr nákladů na výrobu elektrod a cenu polotovaru materiálu. Z grafu je patrné, že náklady na výrobu elektrody jsou řádově vyšší, než je cena materiálu pro elektrody. Cena měděné elektrody je nejvyšší z důvodu delšího obráběcího času oproti elektrodám grafitovým.



Graf. 5.14 Cena elektrod pro jednotlivé materiály

5.6.2 Náklady na hrubování

Náklady pro elektrozivní obrábění se počítají z násobku hodinové sazby EDM stroje a doby obrábění:

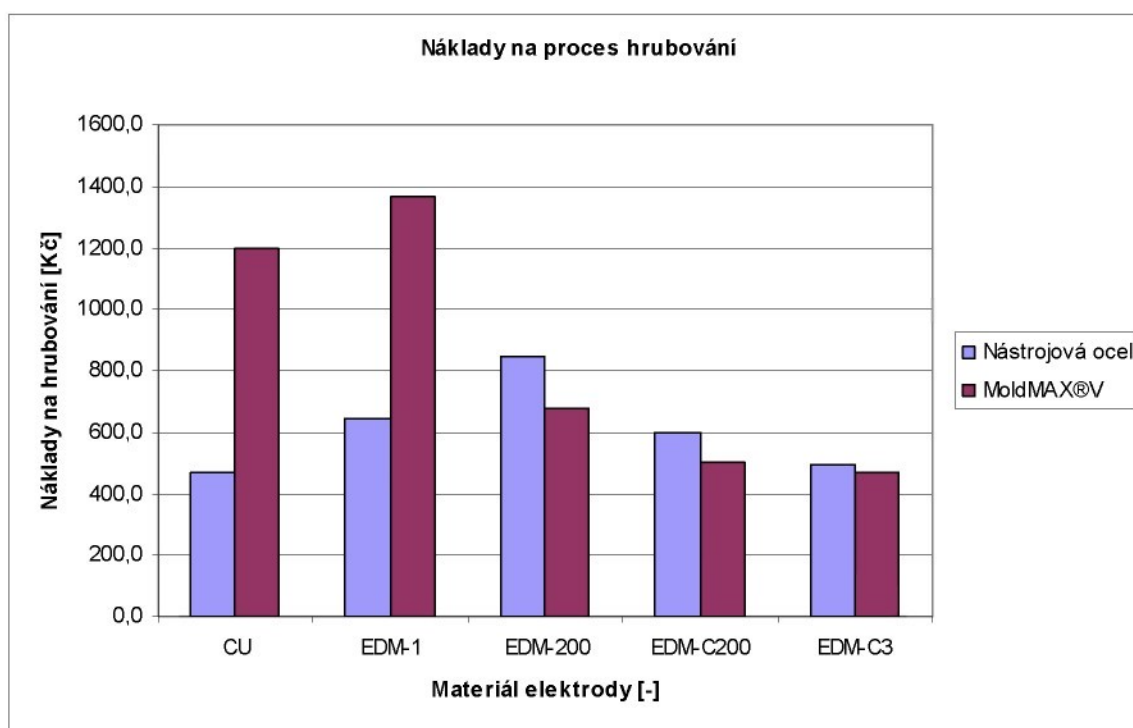
$$N_{\text{hrub}} = t_{\text{hrub}} \cdot JCS_{\text{EDM}} \quad (19)$$

kde: N_{hrub} ... Náklady na hrubování [Kč],
 t_{hrub} ... čas hrubování [hod],
 JCS_{EDM} ... jednotková cena stroje EDM [Kč/hod].

Náklady na hrubování pro nástrojovou ocel a materiál MoldMAX® V jsou zobrazeny v grafu 5.15. Z grafu je patrné, že náklady na proces hrubování měděné elektrody a elektrody z grafitu EDM-1 jsou velice rozdílné pokud jde o obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX® V. Nejméně znatelný rozdíl mezi obráběním se jeví u grafitové elektrody s přídavkem mědi EDM-C3 a EDM-C200.

Náklady na hrubování	Nástrojová ocel	Moldmax
CU	471,3	1198,2
EDM-1	643,9	1364,3
EDM-200	845,3	678,2
EDM-C200	599,7	503,9
EDM-C3	492,3	470,3

Tab. 5.15 Náklady na proces hrubování nástrojové elektrody a materiálu MoldMAX® V



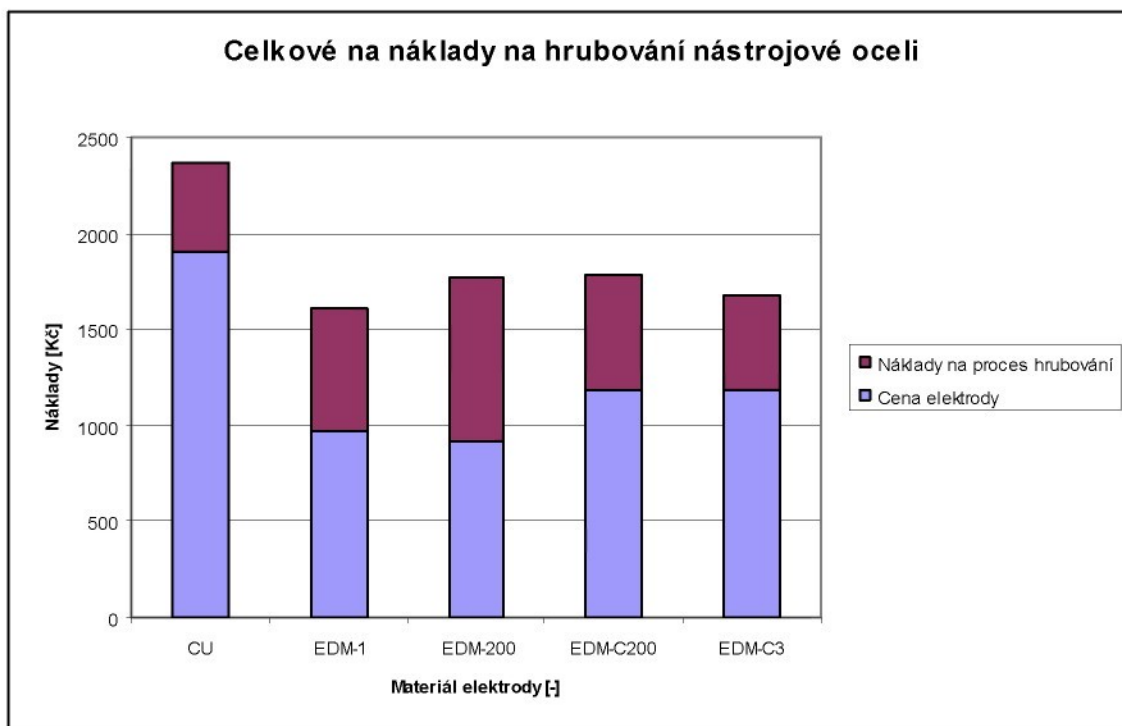
Graf. 5.15 Náklady na proces hrubování nástrojové elektrody a materiálu MoldMAXu V

Celkové náklady na hrubování vypočítáme podle vzorce:

$$CN_{\text{hrub}} = C_{\text{el}} + N_{\text{hrub}} \quad (20)$$

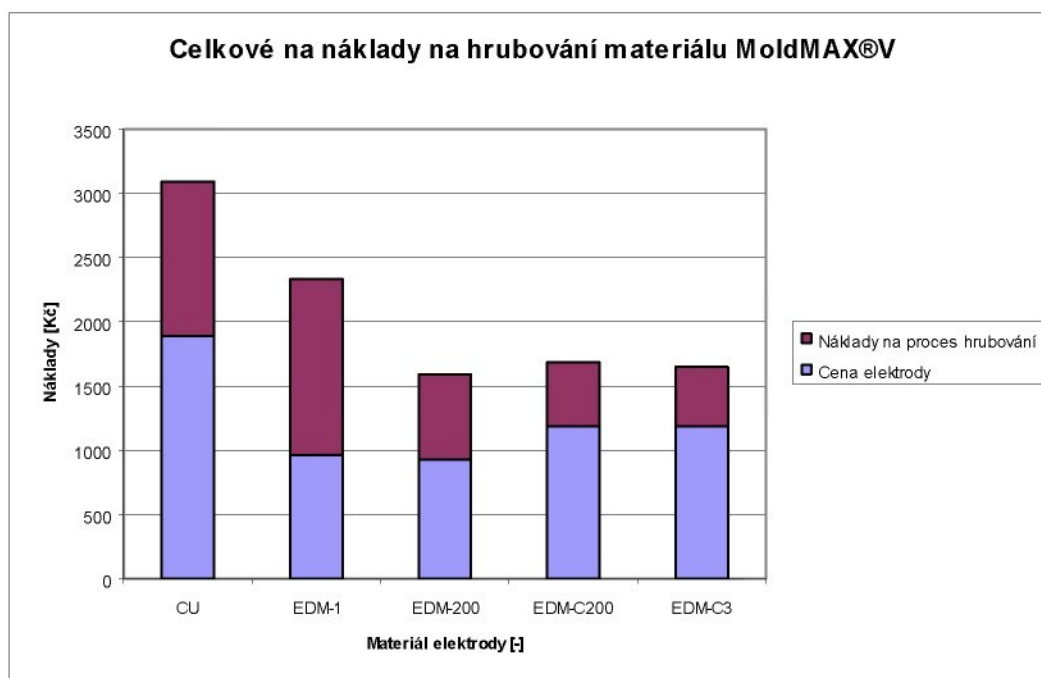
kde: CN_{hrub} Celkové náklady na hrubování[Kč].

Celkové náklady na hrubování nástrojové oceli jsou uvedeny v grafu 5.16 a pro materiálu MoldMAX®V v grafu 5.17.



Graf. 5.16 Celkové náklady na hrubování nástrojovou elektrodou

Nejnižší náklady na obrábění nástrojové oceli má elektroda z EDM-1, kde náklady činí 1 613 Kč. Nejdražší je hrubování pomocí měděné elektrody, kde náklady dosahují výše 2 368 Kč.



Graf. 5.17 Celkové náklady na hrubování materiálu MoldMAX®V

Nejnižší náklady na hrubování materiálu MoldMAX® V jsou pomocí nástrojové elektrody z grafitu EDM-200, kde náklady na předhrubování dosahují výše 1 595 Kč, podobné náklady mají grafitové elektrody s přídavkem mědi EDM-C3 a EDM-C200, jejichž náklady na vyhloubení hrubováním jsou 1 654 Kč, respektive 1 681 Kč. Nejvyšší náklady na obrábění jsou u měděné elektrody, kde cena hrubování dosahuje výše 3 095 Kč, tato cena je dvojnásobná oproti ceně hrubování EDM-200.

5.6.2 Náklady na dokončování

Náklady na dokončování se počítají stejně jako při hrubování.

$$N_{fin} = t_{fin} \cdot JCS_{EDM} \quad (21)$$

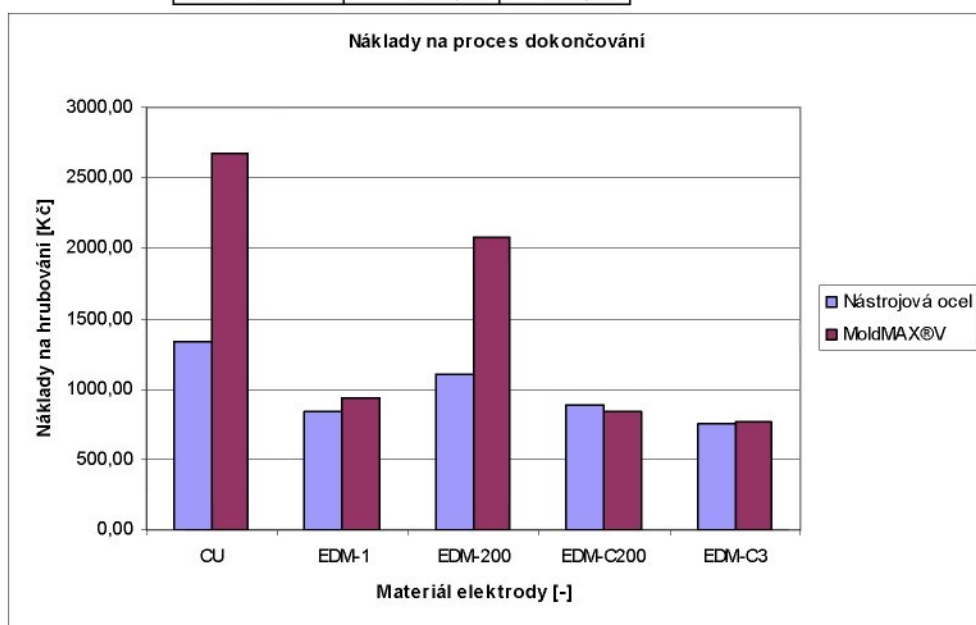
kde: N_{fin} ... náklady na dokončování [Kč],

t_{fin} ... čas dokončování [hod].

Náklady na dokončování pro nástrojovou ocel a materiálu MoldMAX® V jsou zobrazeny v tabulce 5.16 a vyneseny do grafu 5.18.

Náklady na dokončování	Nástrojová ocel	Moldmax
CU	1337,76	2669,43
EDM-1	834,84	929,76
EDM-200	1108,12	2079,38
EDM-C200	881,45	833,28
EDM-C3	755,08	762,45

Tab. 5.16 Náklady na proces dokončování



Graf. 5.18 Náklady na proces dokončování

Celkové náklady na dokončování spočítáme podle vzorce:

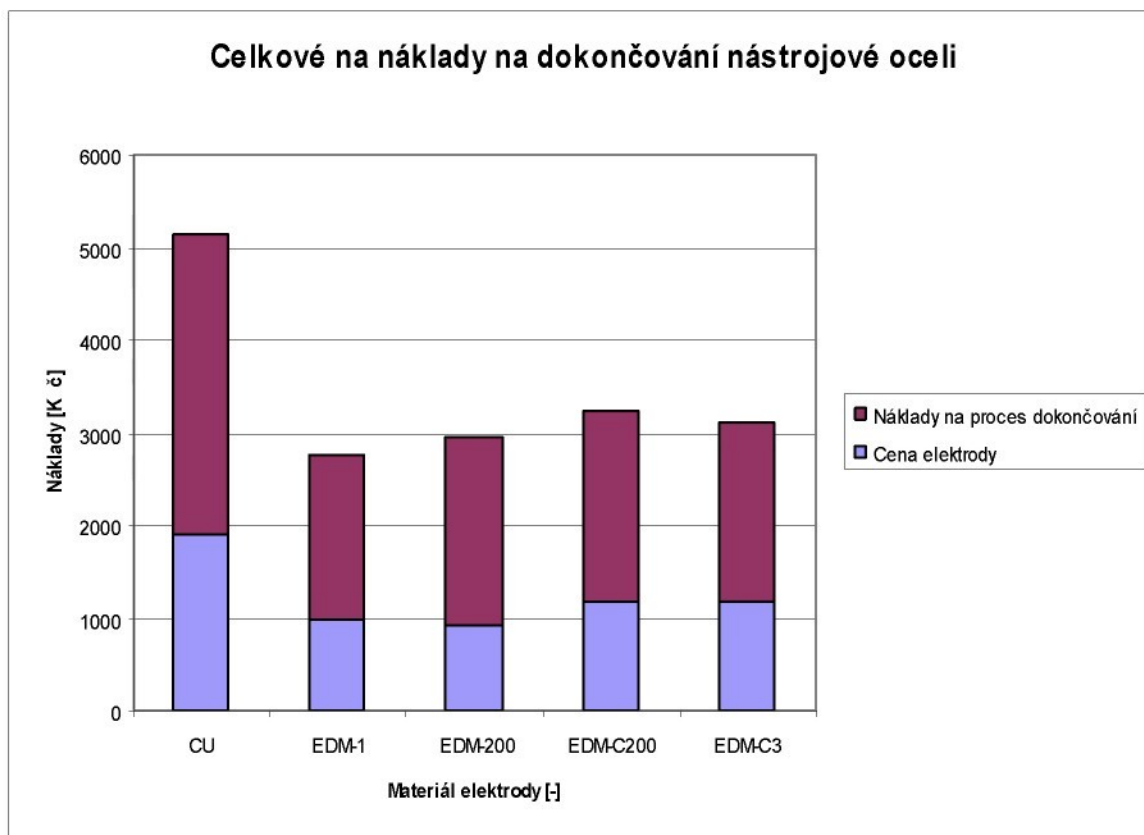
$$CN_{fin} = C_{el} + N_{fin} \quad (22)$$

kde: CN_{fin} Celkové náklady na dokončení [Kč]

Celkové náklady na dokončování nástrojové oceli jsou uvedeny tab.5.17 a vyneseny v grafu 5.19 a pro materiál MoldMAX® V v tabulce 5.18 a grafu 5.20.

Elektroda	Cena elektrody [Kč]	Náklady na proces dokončování nástrojové oceli[Kč]	Celkové náklady na dokončování nástrojové oceli [Kč]
CU	1897	3235	5132
EDM-1	969	1804	2773
EDM-200	918	2026	2943
EDM-C200	1178	2059	3237
EDM-C3	1184	1939	3123

Tab. 5.17 Celkové náklady na dokončování nástrojové oceli

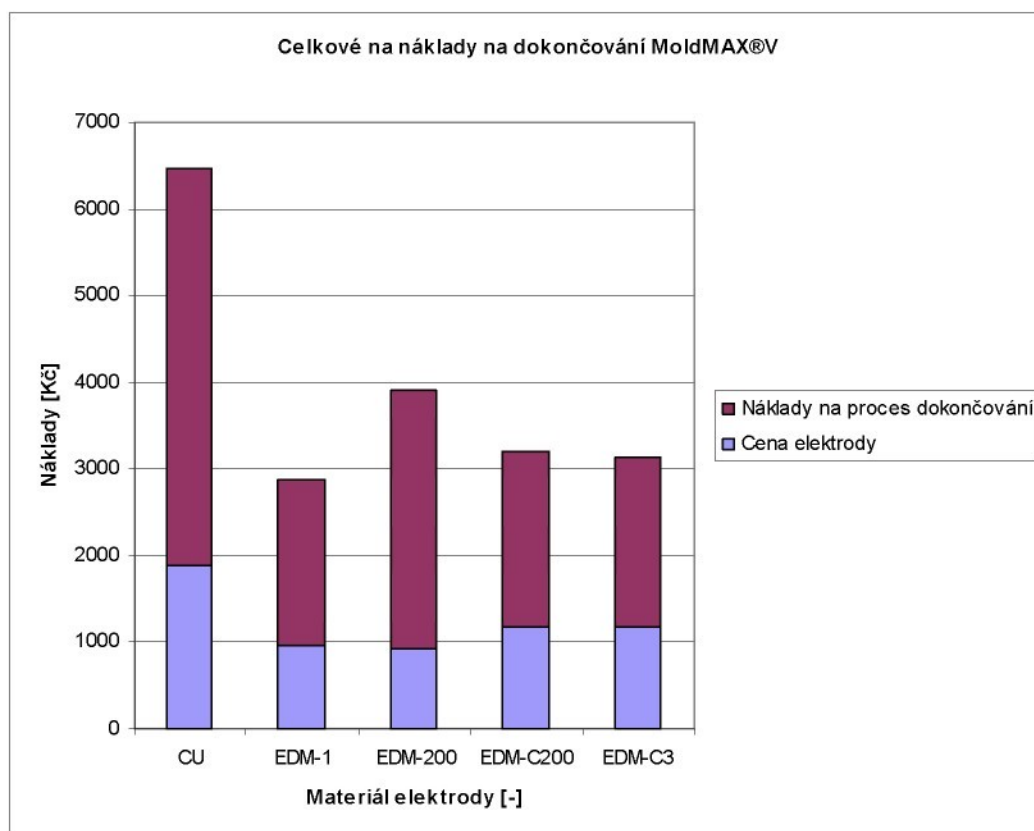


Graf. 5.19 Celkové náklady na dokončování nástrojové oceli

Celkové nejnižší náklady na dokončení nástrojové oceli jsou u materiálu z grafitu EDM-1, kde je cena 2 773 Kč. U ostatních grafitů je cena okolo 3000 Kč. U elektrody z mědi se dostáváme na téměř dvounásobné náklady.

Elektroda	Cena elektrody [Kč]	Náklady na proces dokončování materiálu MoldMAX®V[Kč]	Celkové náklady na dokončování materiálu MoldMAX®V[Kč]
CU	1897	4566	6463
EDM-1	969	1899	2868
EDM-200	918	2997	3914
EDM-C200	1178	2011	3189
EDM-C3	1184	1946	3130

Tab. 5.18 Celkové náklady na dokončování materiálu MoldMAX®V



Graf. 5.20 Celkové náklady na dokončování materiálu MoldMAX®V

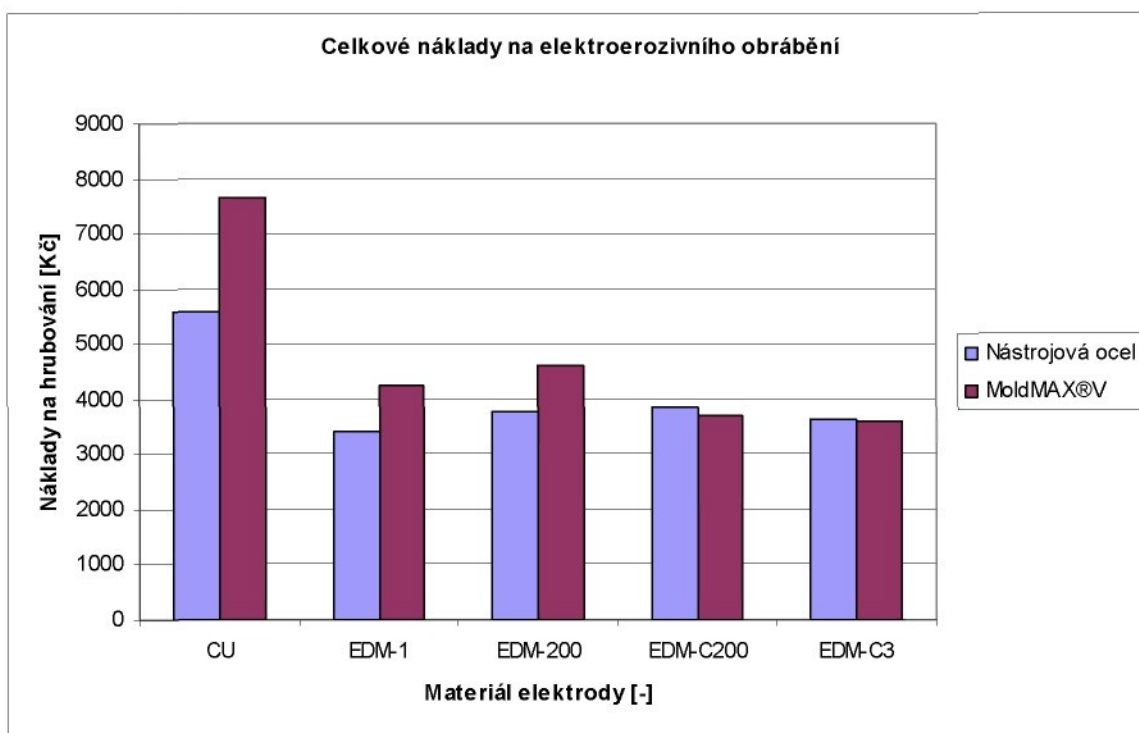
U obrábění materiálu MoldMAX® V jsou nejnižší náklady na dokončování u grafitů EDM-1 těsně pod 2 868 Kč. U grafitů sycených mědí celková cena přesahuje 3 000 Kč. Obrábění dokončovací elektrodou z mědi je velice nákladné a dosahuje ceny okolo 6 500 Kč.

5.6.3 Celkové náklady

Celkové náklady na elektroerozivní obrábění se skládají z celkových nákladů na hrubování a dokončování. Přehled celkových nákladů je uveden v tabulce 5.19 a v grafu 5.21.

Celkové náklady	Nástrojová ocel	MoldMAX®V
CU	5603,1	7661,6
EDM-1	3416,7	4232,0
EDM-200	3788,4	4592,5
EDM-C200	3836,6	3692,7
EDM-C3	3615,4	3600,8

Tab. 5.19 Celkové náklady na dokončování materiálu MoldMAX®V



Graf. 5.21 Celkové náklady na elektroerozivní obrábění

Z výsledků je patrné, že není nižší náklady na obrábění nástrojové oceli jsou pomocí nástrojové elektrody z grafitu EDM-1, kde náklady činí 3 416 Kč. Nejvyšší náklady na obrábění MoldMAX®V, jsou pomocí nástrojové elektrody z grafitu EDM-C3, kde náklady činí 3 600 Kč. Nejdražší na obrábění dopadla měděná elektroda, kde obrábění materiálu MoldMAX®V stálo 7 661 Kč a obrábění nástrojové oceli 5 603 Kč.

5.6.4 Zhodnocení celkových nákladů při poruše vstřikovací formy

Při vyčíslení výše ztráty vznikající firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. nelze počítat pouze náklady na elektroerozivní obrábění, ale při posuzování vhodnosti využití nástrojových elektrod musí být brány do úvahy i náklady ztráty, které firmě vznikají při odstavení výrobní linky (vstřikovací formy). Výše ztráty při odstavení výrobní linky činí 4 000 Kč za hodinu. Tato výše ztráty je použita při přepočtu času na přípravu nástrojové elektrody, docílení kvality povrchu a opotřebení na peněžní vyjádření.

Doba přípravy nástrojové elektrody:

$$ZT_{ele} = t_{vyroby_ele} \cdot OD$$

kde: ZT_{ele} finanční ztráta během výroby elektrody,
 t_{vyroby_ele} doba výroby elektrody,
 OD doba odstávky výrobní linky.

Doba obrábění:

$$ZT_{ob} = t_{obr} \cdot OD$$

kde: ZT_{ob} finanční ztráta během obrábění,
 t_{obr} doba elektroerozivního obrábění.

Kvalita povrchu podle specifikace má být na obrobený povrch Rz 3,2 μ m.
Každé zlepšení povrchu o jedno Rz zabere nástrojári 5min.

$$ZT_{lesteni} = t_{lesteni} (OD + NPS)$$

Kde: $t_{lesteni}$ doba leštění obrobku,
 NPS náklady na pracovní sílu [Kč],
 $ZT_{lesteni}$ finanční ztráta během leštění.

Opotřebení čelní plochy elektrody způsobuje delší dobu obrábění:

$$t_{op} = \frac{op_{fin} + op_{fin}}{v_{op_fin}}$$

kde: t_{op} doba potřebná k obrobení nepřesnosti z opotřebení,
 op_{hr} ... opotřebení hrubovací elektrody,
 op_{fin} ... opotřebení dokončovací elektrody,
 V_{op_fin} ... velikost úběru dokončovací elektrody,

$$ZT_{op} = t_{op} \cdot OD$$

kde: ZT_{op} ... finanční ztráta během leštění.

Následně se všechny dílčí finanční ztráty pro jednotlivé experimenty sečtou a přičtou se náklady na elektroerozivní obrábění.

$$ZCN = ZT_{ele} + ZT_{ob} + ZT_{op} + CN_{EDM}$$

kde: ZCN zhodnocení celkových nákladů,
 CN_{EDM} celkové náklady na elektroerozivní obrábění.

Při zhodnocení celkových nákladů, vyšla nejlépe elektroda z grafitu s přídavkem mědi EDM-C3 jak pro obrábění nástrojové oceli tak pro obrábění materiálu MoldMAX® V tab. 5.20 a 5.21.

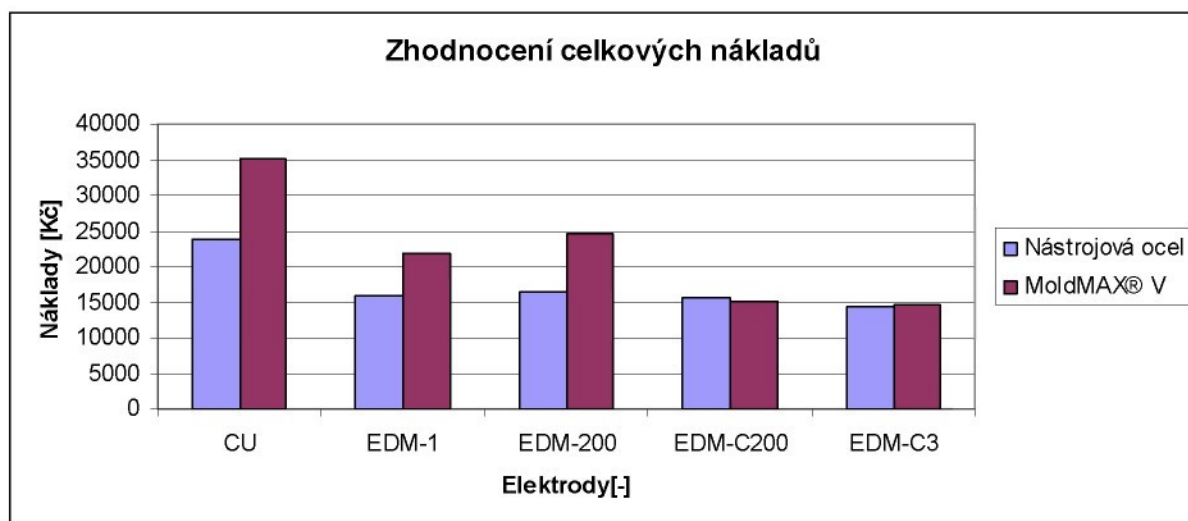
Hodnotící parametr	Nástrojová ocel (HPM7)				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Ekonomické hodnocení[Kč]	5603	3417	3788	3837	3615
Čas obrábění[Kč]	8428	6889	7847	6900	5811
Rychlost přípravy elektrod[Kč]	7775	3835	3835	3835	3835
Kvalita povrchu[Kč]	1650	1650	660	990	990
Nepřesnost výroby[Kč]	379	165	160	102	63
Zhodnocení celkových nákladů[Kč]	23835	15955	16289	15663	14314

Tab. 5.20 Zhodnocení celkových nákladů nástrojové oceli

Hodnotící parametr	MoldMAX® V				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Ekonomické hodnocení[Kč]	7662	4232	4593	3693	3601
Čas obrábění[Kč]	18019	10687	12847	6230	5743
Rychlost přípravy elektrod[Kč]	7775	3835	3835	3835	3835
Kvalita povrchu[Kč]	990	1650	990	990	990
Nepřesnost výroby[Kč]	723	1296	2343	488	444
Zhodnocení celkových nákladů[Kč]	35168	21700	24607	15235	14613

Tab. 5.21 Zhodnocení celkových nákladů materiálu MoldMAX®V

V grafu 5.21 jsou porovnány celkové náklady na elektroerozivní obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX® V pomocí měděných a grafitových elektrod.



Graf. 5.21 Zhodnocení celkových nákladů

6. Shrnutí a hodnocení výsledků

Diplomová práce se zabývá elektroerozivním obráběním nástrojové oceli a materiálu MoldMAX® V pomocí měděných a grafitových nástrojových elektrod.

V úvodu diplomové práce pro je stanoven hlavní cíl porovnat obrábění pomocí jednotlivých elektrod z ekonomického hlediska pro firmu DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.. Dílčí cíle jsou porovnat elektroerozivní obrábění z hlediska času obrábění, opotřebení nástrojových elektrod, rychlosti přípravy jednotlivých elektrod, kvality obráběné plochy a vhodnosti jednotlivých typů elektrod.

Další kapitola popisuje teorii elektroerozivního obrábění. Zde jsou shrnuty teoretické poznatky o elektroerozivním obrábění. Následující kapitola popisuje metodiku experimentů, tvary a materiál použitých nástrojových elektrod, druhy obráběných materiálů. Z důvodů časové náročnosti experimentu a zároveň provádění testů při běžném provozu nástrojárny, byla provedena opakovatelnost v pěti měřeních.

Experiment obrábění materiálu MoldMAX® V měděnou elektrodou byl opakován pětkrát, na základě výsledků experimentu byly všechny další experimenty prováděny pouze jednou.

V experimentální části je popsán způsob přípravy na experiment a samotný průběh experimentu.

Následující kapitola se zabývá výsledky experimentu. Z ekonomického hlediska je nejvýhodnější pro obrábění nástrojové oceli využití grafitové elektrody EDM-1, kde náklady na jeden experiment činí 3 416 Kč. Pro obrábění materiálu MoldMAX® V jsou nejnižší náklady při použití grafitové elektrody EDM-C3, kde náklady na jeden experiment činí 3 600 Kč.

Nejrychlejší obrábění nástrojové elektrody bylo pomocí elektrody z grafitu EDM-C3, kde hrubování a dokončování trvalo 88 min. Nejrychlejší obrábění materiálu MoldMAX® V byla také elektroda z grafitu EDM-C3, kde čas obrábění byl 87 min.

Pro výrobu všech grafitových elektrod byl použit stejný obráběcí program. Z tohoto důvodu nejkratší čas výroby elektrody byl 88 min u všech grafitových elektrod stejný. Pro výrobu měděné elektrody nešel tento program použít,

z důvodů horší obrobiteľnosti mědi. Rychlost výroby elektrody z mědi trvala dvojnásobný čas.

Opotřebení čelní plochy při hrubování bylo zvoleno v milimetrech. Nejnižší opotřebení čelní plochy elektrod při hrubování nástrojové oceli měla elektroda z grafitu EDM-C3 a to 0,01 mm. Opotřebení čelní plochy při hrubování materiálu MoldMAX® V bylo dosaženo podobných výsledků hned u třech testovaných elektrod a to EDM-C200 s opotřebením čelní plochy 0,132 mm, EDM-C3 0,134 mm a měděnou elektrodou, kde čelní opotřebení bylo 0,139 mm. Pro dokončovací elektrody byl zvolen relativní poměr opotřebení. Procento opotřebení čelní plochy při obrábění nástrojové oceli dopadlo nejlépe pomocí grafitové elektrody sycené mědí EDM-C3 a bylo 2,16 %. Procento opotřebení čelní plochy při obrábění materiálu MoldMAX® V dopadlo také nejlépe pomocí grafitové elektrody sycené mědí EDM-C200 a bylo 10,22 %.

Nejllepší naměřená hodnota drsnosti povrchu po obrábění nástrojové oceli byla Rz 6 μm obrábění měděnou elektrodou. Po obrábění materiálu MoldMAX® V byla nejllepší hodnota Rz 5,1 μm obrábění nástrojovou elektrodou z EDM-200.

Další kritérium pro výrobu elektrod je jejich vhodnost pro konkrétní tvar elektrody. V tomto testu se neprojevil žádný rozdíl mezi grafitovou a měděnou elektrodou, ale při obrábění tenkých a hlubokých žeber je zcela nevhodné použití měděných elektrod vzhledem jejich malé pevnosti.

Na závěr bylo provedeno hodnocení celkových nákladů z hlediska dosažení co nejmenší ztráty při odstavení výrobní linky. Do těchto nákladů byla zahrnuta cena doby elektroerozivního obrábění, přípravy nástrojové elektrody, docílení kvality povrchu, opotřebení a náklady na obrábění. Výsledek tohoto zhodnocení ukazuje výhodnost grafitové elektrody sycené mědí EDM-C3 jak pro obrábění nástrojové oceli tak materiálu MoldMAX® V. Váha těchto ukazatelů je použitelná pouze pro firmu DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o..

Seznam použité literatury

1. MORRÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Plzeň: ZČU Plzeň – ediční středisko, 1994. ISBN 80-7082-161-2.
2. ŘASA, J. MM Průmyslové spektrum 7,8 2007, str. 60,61
3. www.oelheld.de/download/Senkerosion.pdf 2.4.2011
4. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. ČVUT Praha, Ediční středisko, 1989.
5. <http://www.tedok.cz/> 15.3.2011 <http://www.tedok.cz/tabulka-spravne-volby>
6. ČSN ISO 8688-1
7. Denso [on-line] www.denso.cz 24.2.2011
8. ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl - Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha, Scientia, spol. s r.o., 2000. 256 s. 80-7183-207-3.
9. MLEJNEK, M. *Návrh hospodárného postupu obrábění tvarových částí tlakových forem pro lití hliníkových slitin ve firmě ŠkodaAuto Mladá Boleslav*. [Diplomová práce]. Liberec, TU v Liberci, 2005- 76 s.
10. MUNDUCH, O. *Návrh hospodárného postupu obrábění matic střižných nástrojů ve firmě svoboda – Stamping, s.r.o Jihlava*. [Bakalářská práce]. Liberec, TU v Liberci, 2010. 57 s.
11. <http://www.service-edm.com/machines/oldest-die-sinking/roboform23.jpg> 15.5.2011

Přílohy

Data Sheet

MoldMAX® V

Brush Wellman's MoldMAX® V (MMV) is a high conductivity, moderately high strength, copper nickel silicon chromium alloy. Applications include injection mold and blow mold cores and cavities.

CHEMICAL COMPOSITION (weight percent)

Alloy	Nickel	Silicon	Chromium	Copper
MoldMAX® V	6.5 - 7.5	1.5 - 2.5	0.6 - 1.2	Balance

PHYSICAL PROPERTIES

Elastic Modulus	Melting Point (Solidus)	Density	Thermal Expansion	Thermal Conductivity (100°C)	Heat Capacity (100°C)
18,500 ksi 130 GPa	~1800 °F ~980 °C	.314 lb/in ³ 8.69 g/cm ³	9.72 x 10 ⁻⁶ °F ⁻¹ 17.5 x 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	92 BTU/hr-ft-°F 160 W/m-K	0.098 BTU/lb-°F 0.41 J/g-K

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

0.2% Offset Yield Strength	Ultimate Tensile Strength	Fatigue Strength 10 ⁷ Cycles (R=-1)	Elongation	Impact Strength (CVN)	Hardness
105 ksi 725 MPa	125 ksi 860 MPa	40 ksi 275 MPa	7%	5 ft-lb 7 J	270 HBR (28 HRC)

*Hardness is tested via Brinell Test Method at 3000 Kgf load and equivalent Rc values converted per ASTM-E-140, Table 1. Properties may vary by shape and thickness.

FORMS AVAILABLE

Rounds, plates, and parts finished machined per customer drawings

RELATED INFORMATION

Additional information on MoldMAX® products can be obtained by calling 800-375-4205.

Corporate Headquarters

Brush Wellman Inc.
17876 St. Clair Avenue
Cleveland, OH 44110 USA
TEL: +(1) 216-486-4200
FAX: +(1) 216-383-6868
EMAIL: sales@brushwellman.com
www.brushwellman.com

North American Service Centers

Brush Wellman Inc.
606 Lamont Road
Elmhurst, IL 60126
TOLL FREE: 800-323-2438
LOCAL: +(1) 630-832-9650
FAX: +(1) 630-832-9657

Brush Wellman Inc.
27555 College Park Drive
Warren, MI 48093
TOLL FREE: 800-521-8800
LOCAL: +(1) 586-772-2700
FAX: +(1) 586-772-2472

International Service Centers

CHINA/HONG KONG

Brush International, Inc.
Hong Kong Representative Office
Room 604, Blk 1, Enterprise
Square
9 Sheung Yuet Road,
Kowloon Bay, Kowloon
Hong Kong
TEL: + (852) 2318-1960 / 1907
FAX: + (852) 2318-1879
CONTACT: Mr. Jeffrey Oei
EMAIL:
Jeffrey_Oei@brushwellman.com

CHINA/SHANGHAI

Brush Wellman (Singapore) Pte
Ltd.
Shanghai Representative Office
22B HuaMin Empire Plaza,
No.726 Yan An West Road
Shanghai 200050, P.R.C
TEL: + (86) 21-5237-2328
FAX: + (86) 21-5237-2823
CONTACT: Mr. Levis Jin
EMAIL:
Levis_Jin@brushwellman.com

GERMANY

Brush Wellman GmbH
Motorstrasse 34
D-70499 Stuttgart
Germany
TEL: +(49) 711-830-930
FAX: +(49) 711-833-822
CONTACT: Mr. Karl Ludwig Rausch
EMAIL:
K_L_Rausch@brushwellman.com

JAPAN

Brush Wellman (Japan), Ltd.
Daichi Marusan Building 9
Kanda Jimbocho, 3-Chome,
Chiyoda-Ku,
Tokyo 101-0051, Japan
TEL: +(81) 33 230 2961
FAX: +(81) 33 230 2908
CONTACT: Mr. Kazuo Hase
EMAIL:
Kazuo_Hase@brushwellman.com

REPUBLIC OF KOREA

Brush Wellman (Japan), Ltd.
Korean Representative Office
Room No. 621, Iriom Bldg, 599-1
Yeonsu-2 Dong
Yeonsu-Ku, Incheon City, Korea
TEL: +(82) 32-811-2171
FAX: +(82) 32-811-2175
CONTACT: Mr. Yun Joo Kim
EMAIL:
Yun_Joo_Kim@brushwellman.com

SINGAPORE/ASEAN

Brush Wellman (Singapore) Pte
Ltd.
110 Paya Lebar Road #02-01
Singapore 409009
TEL: +(65) 6842-4456
FAX: +(65) 6842-6646
CONTACT: Mr. Tony Ong
EMAIL:
Tony_Ong@brushwellman.com

TAIWAN, R.O.C.

Brush International, Inc.
Taiwan Representative Office
11th FL-6, No. 188 Section 5,
Nanking East Road,
Taipei, Taiwan, Republic of China
TEL: +(886) 2-2747-8800 x-121
FAX: +(886) 2-2747-1485
CONTACT: Kevin Wang
EMAIL:
Kevin_Wang@brushwellman.com

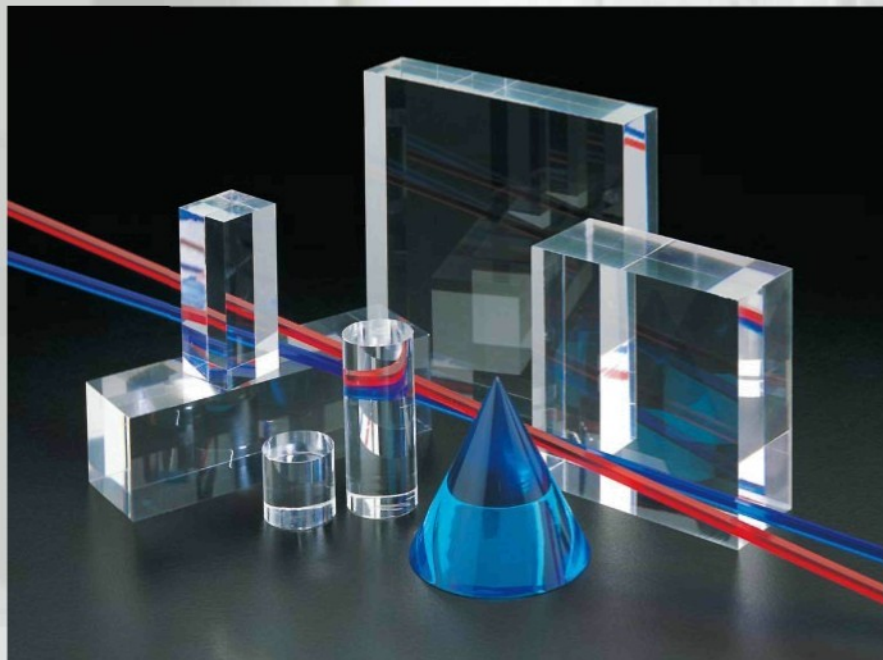
UNITED KINGDOM & IRELAND

Brush Wellman Limited
Units 4/5 Ely Road
Theale Commercial Estate
Theale Reading
Berkshire, RG7 4BQ England
TEL: +(44) 118-930-3733
FAX: +(44) 118-930-3635
CONTACT: Mr. Guy Shapland
EMAIL:
Guy_Shapland@brushwellman.com

YSS

PLASTIC MOLD STEELS

HPM Series



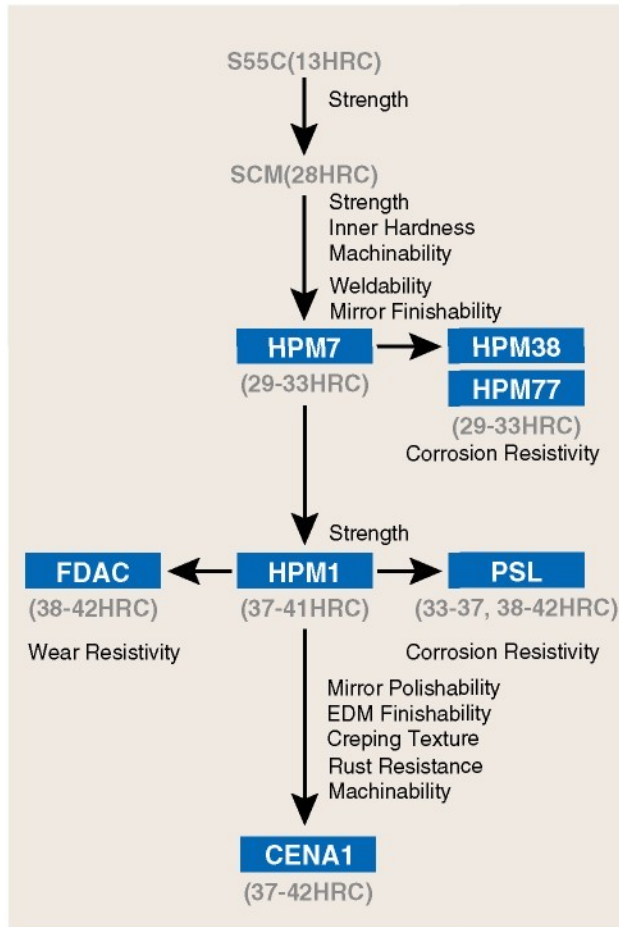
In compliance with advanced plastic molding technology

YSS plastic mold steels "HPM" series are increasing popularity in compliance with advanced plastic molding technology. "HPM" series are fulfilling demands of plastic industry for molds that provide crepe-and mirror-finishability and mold durability for corrosive gas generating and reinforced resins.

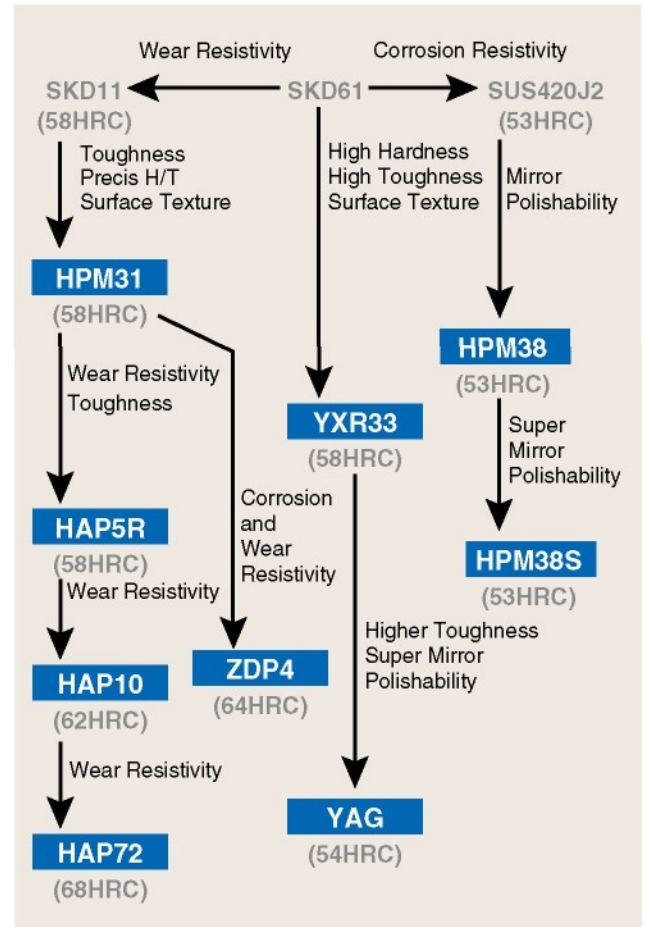
Mold Material and Application

Group	Hardness Employed (HRC)	Grade	Material Type	Application Example
Prehardened	29~33	HPM7	P20 improved	Mold required good weldability & machinability (Autoparts, Home electronics, House equipment)
		HPM38	420 improved	Flame retardant resin, Transparent parts, Rubber
		HPM77	420 improved & resulpherized	Corrosion resistant mold plates, Rubber mold
	(Round Bar) 38~42 (Flat Bar) 33~37	PSL	630 improved	Mold for polyvinyl chloride, Frothy resin, Rubber
	37~42	CENA1	Cr contained NiAl precipitation grade	Rust resistant mold with sensitive surface as mirror polishing, creping, EDM (OA electronics, Transparent case etc)
	37~41	HPM1	P21 improved & resulpherized	Mold for general use (Home electronics etc), Plate & holder
	38~42	FDAC	H13 improved & resulpherized	Engineering resin, Slide core
	50~55	HPM38	420 improved	Mold for Anti-corrosion / Mirror polish (Floppy, Cassette, Medical instruments, Food container, etc)
		HPM38S	420 improved	Mold for super mirror polish (Optical disc / Lense)
For Quench and Temper	56~60	HPM31	D2 improved	Wear resistant mold for engineering resin (Gear, Connector, IC)
		YXR33	Matrix HSS	Mold required high toughness & high hardness (Core pin, Thin wall)
	60~63	ZCD-M	D2 improved	IC mold
	60~65	HAP10	P/M HSS	Reinforced engineering resin, IC mold
		ZDP4	P/M Cold Die Steel	Reinforced and flame retardant engineering resin, IC mold, Slide parts, Cutter required exceptional wear resistance
For Aging	40~45	HPM75	High hardness, non- magnetic, resulphurized	Molding in magnetic field (Plastic magnet)
	52~57	YAG	Maraging Steel	Mold required exceptional toughness (Core pin, Thin wall), Super mirror polish (Optical lense)

Sequence by Technical Needs



General Mold (Prehardened Steel)



Precise Mold (Steel for Hardening)

Properties Comparison Table

Material	Machinability	Heat deformation	EDM/Creeping texture	Mirror polishability	Weldability	Rust resistance	Wear resistance	Toughness	Cost
HPM7	5	—	3	3	5	2	2	4	4
HPM38	3	5	5	5	3	4	3	3	2
HPM77	4	—	2	2	3	4	2	3	3
PSL	2	—	4	3	5	5	2	4	2
CENA1	3	—	5	4	3	3	2	3	2
HPM1	5	—	2	2	2	2	2	2	3
FDAC	3	—	2	2	3	2	3	3	3
HPM38S	3	5	5	5+	3	4	3	3	1
HPM31	3	4	5	4	2	3	4	3	2
YXR33	3	3	5	4	3	3	4	4	2
ZCD-M	2	3	5	2	1	3	4	2	2
HAP10	3	3	5	4	2	1	4	4	1
ZDP4	1	2	4	4	1	3	5	1	1
HPM75	1	4	2	2	1	4	3	3	1
YAG	2	4	5	5	5	2	3	5	1
S55C	5	—	3	1	3	1	1	3	5
SCM440	3	—	3	2	2	2	2	3	4

Ratings: 5-Best 3-Ordinary 2,1-Poor
(Remarks) Please refer above as general concept.

Properties Comparison

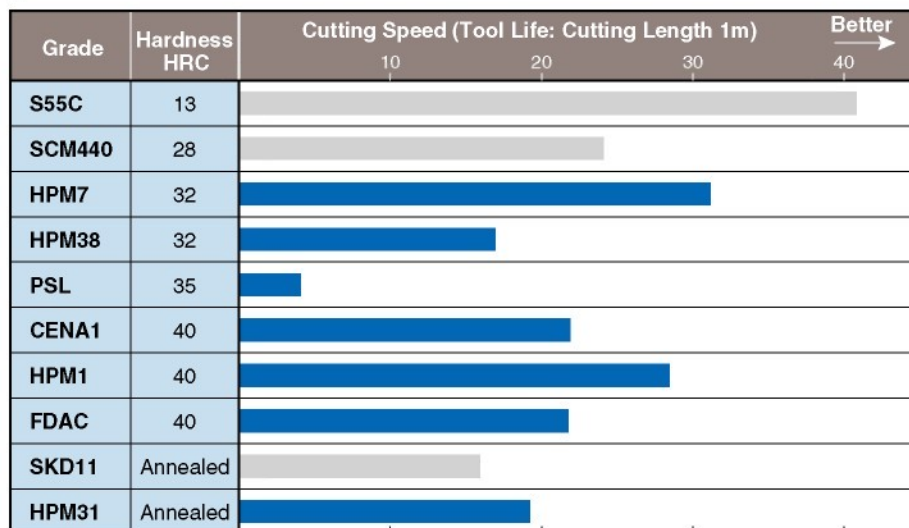
Machinability

Drilling

Tool: SKH51 ϕ 10

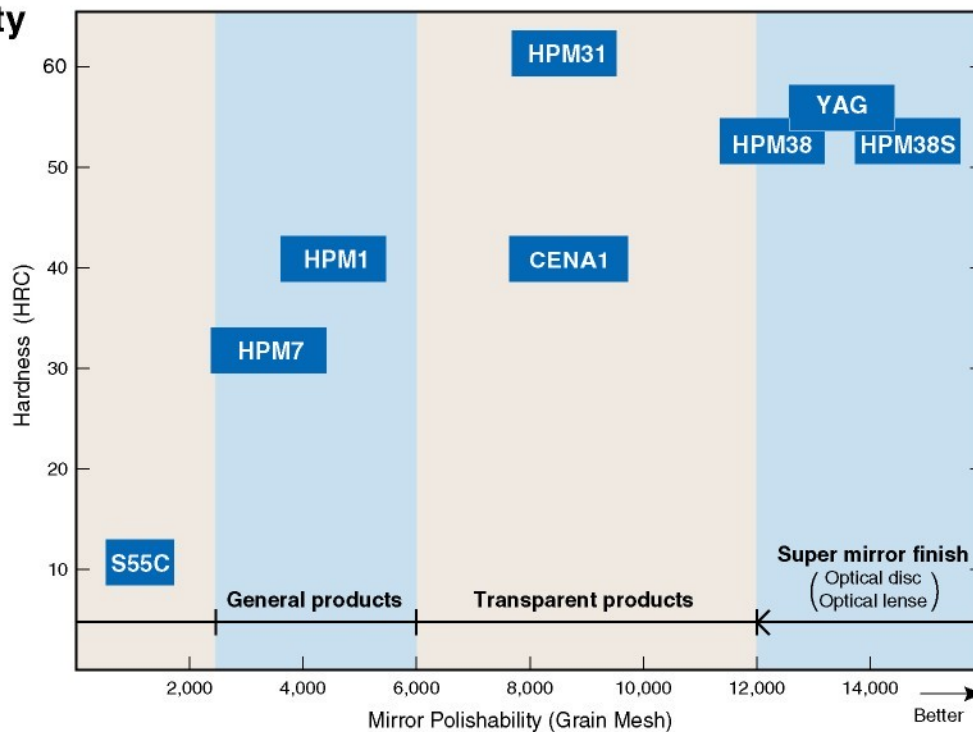
Feed: 0.15mm / rev

Depth: 30mm (blind hole)Dry



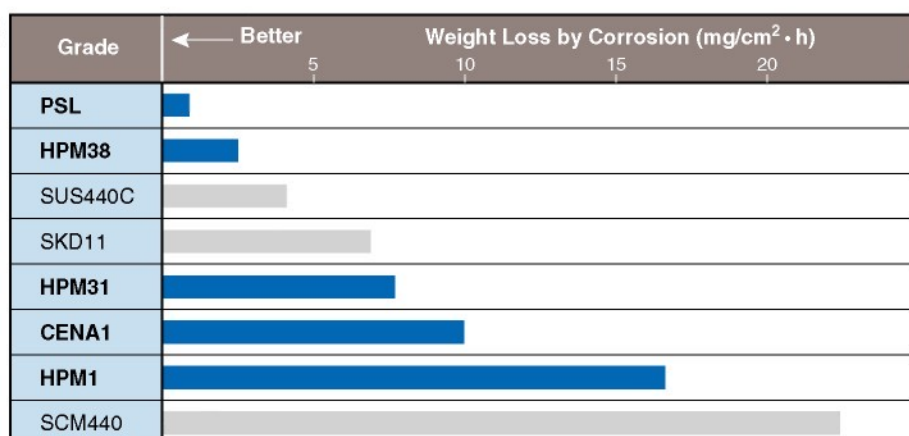
Polishing Property

(Schematic Diagram)



Corrosion Resistance

(5%Sulfuric Acid Solution)



Properties Comparison

Wear Resistance

Ohgoshi Wear Test

Work Material SMC415

Load 6.8kg

Total Friction Length 400m

Friction Speed 0.78m/sec

Grade	Hardness HRC	Wear Ratio (mm ³ /mm ² · mm) x 10 ⁻⁷	
		← Better	0.5 1.0
SKD12	59		
SKD11	60		
HPM31	59		
ZDP4	65		
SUS440C	57		
SKH51	63		
HAP10	64		

Mechanical Properties

Grade	Hardness HRC	Tensile Strength N/mm ²	0.2%Yield Strength N/mm ²	Elongation %	Reduction of Area %
HPM7	32	975	855	20	55
HPM38	52	1,910	1,620	13	35
HPM77	32	990	845	16	41
PSL	39	1,170	1,100	11	34
CENA1	40	1,225	1,150	15	50
HPM1	40	L 1,225	1,030	18	40
		T 1,215	1,010	10	25
HPM75	42	1,305	1,110	11	28
YAG	53	2,010	1,910	10	48

Physical Properties

Grade	Thermal Expantion Coef. (x 10 ⁻⁶ °C)				Thermal Conductivity (W/m · K)				
	100°C	200°C	300°C	400°C	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C
HPM7	11.6	12.2	12.8	13.4	34.3	38.3	39.8	40.4	40.6
HPM38	10.4	11.1	11.5	11.8	22.1	25.5	26.7	28.5	29.6
HPM77	10.1	10.7	11.1	11.5	22.3	24.9	26.3	27.9	29.5
PSL	10.6	11.1	11.9	12.1	15.8	20.0	22.2	24.2	25.5
CENA1	10.8	11.5	12.0	12.4	20.5	22.9	25.9	28.2	30.5
HPM1	11.4	11.8	12.3	12.8	31.5	36.6	38.4	39.4	40.1
HPM31	12.4	13.1	13.6	14.1	22.1	25.5	26.7	28.5	30.0
HAP10	10.6	10.8	11.1	11.4	19.2	20.0	20.9	21.3	22.5
HPM75	16.1	17.2	18.0	18.6	12.3	14.5	16.4	18.7	20.4
YAG	—	10.8	—	—	20.9	—	25.5	—	27.6

Resin Types and Grade Selection

Resin		Required Life and Grade Recommended				
		Required Properties for Mold	SHORT < 10 milliom	MEDIUM < 50 milliom	LONG < 100 milliom	MASS PRODUCTION > 100 milliom
Thermo-plastic	General	Machinability	HPM7	HPM7	CENA1 HPM1 FDAC	CENA1 FDAC) + Nitriding
	Engineering Resin	Wear Resistivity	HPM7	HPM7+ Nitriding	CENA1 FDAC) + Nitriding	HPM38 HPM31
	Reinforced	High Wear Resistivity	FDAC CENA1 HPM1	CENA1 FDAC) + Nitriding, Plating	HPM31	ZDP4 HAP10
	Flame Retardant	Corrosion Resistivity	HPM38 CENA1	HPM38 PSL	HPM38	HPM38 + Plating
	Transparent	Mirror Polishability	CENA1	CENA1 HPM38	HPM38	HPM38
Thermo-set	eneral	Wear Resistivity	CENA1 HPM1 FDAC	CENA1 HPM1, FDAC) + Plating	HPM31	HPM38
	Reinforced	High Wear Resistivity	CENA1 FDAC) + Nitriding	HPM31	HPM31 + Plating	HAP10 ZDP4) + Plating

General Resin : PS, PE, PP, AS, ABS etc.

Engineering Resin : PC, PPE, PA, POM, PBT, PET etc.

Advanced Engineering Resin : PPS, PI, PES, PEEK etc.

40HRC Prehardened Grade

CENA1 Prehardened: 37~ 42HRC
Precipitation Hardening,
Rust-Resisting Grade for
Precise Mold

CENA1 is new concept grade breaking through with rust resistivity and excellent machinability. **CENA1** is manufactured by consumable electrode remelting method, having exceptional high purity and suit for critical surface finish.

Features

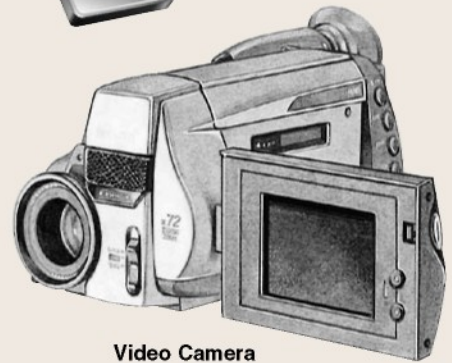
- No heat treatment is necessary. Uniform hardness distribution. (37~42HRC)
- Higher rust resistivity compared with P21 type grade.
- Excellent machinability makes machined surface better.
- Excellent mirror polishability, crepe- and EDM finishability.
- Good weldability with least hardness elevation.
- Good nitriding hardenability and can be used for wear resisting application.

Application

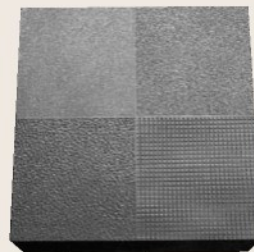
- Critical surface finish mold for transparent parts, etc.
- Engineering resin products.



Mobile Telephone



Video Camera



Creping Sample



Non-glare
Treatment Sample



EDM Sample
CENA1 100X100X50 (mm)

40HRC Prehardened Grade

HPM1

Prehardened: 37~41HRC
Free Machining Precipitation
Hardening Grade for Precise
Mold

HPM1 is free machining plastic mold steel prehardened to 40HRC . With superb machinability, HPM1 is fitted for general applications.

Features

- No heat treatment is necessary. (37~41HRC)
- Excellent machinability among 40HRC prehardened grades.
- Uniform hardness even in large crosssection and less wear of parting.

Application

- General plastic products.
- Home electronics, auto parts.
- Daily goods for mass production.
- Precision mold for rubber.
- High hardness die plate, holders.

FDAC

Prehardened: 38~42HRC
Free Machining
Hot Working Die Steel

Features

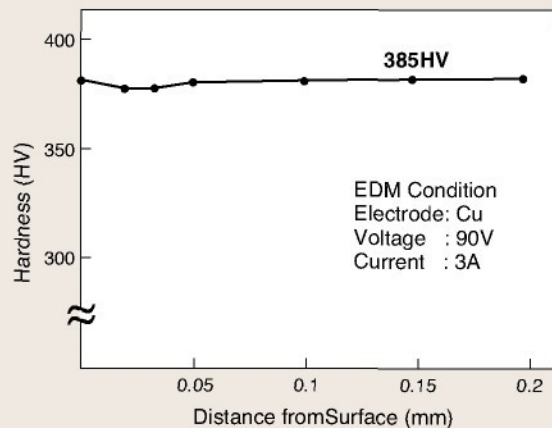
- No heat treatment is necessary. (38~42HRC)
- High wear resistance and toughness.
- High abrasion resistance.
- High hardness obtained by nitriding.

Application

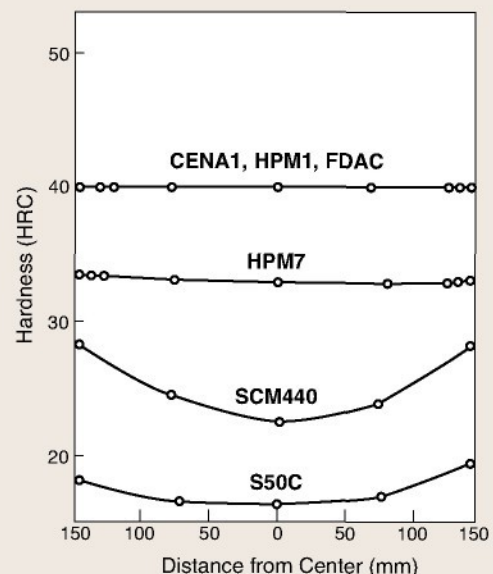
- Slide parts, Pin.
- Engineering resin products.



Personal Computer



Hardness Distribution of EDMachined Surface in Depth (HPM1)



Cross Section Hardness Distribution
(300mm Square Size)

32HRC Prehardened Grade

HPM7

Prehardened: 29~33HRC
For Medium and Large Mold
for General Application

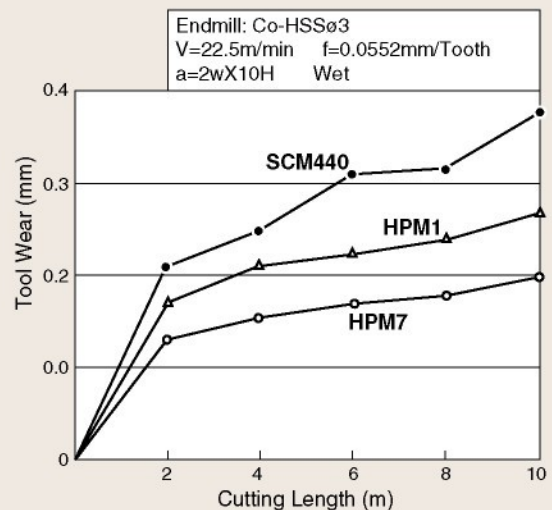
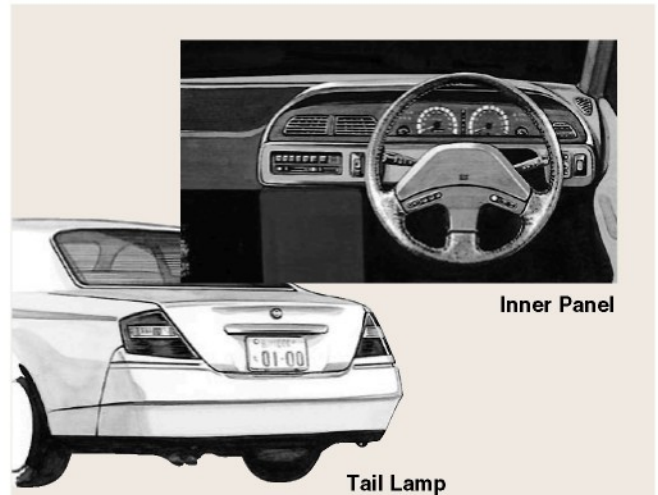
HPM7 is plastic mold steel prehardened to 29~33HRC fitted for medium and large size mold, having good machinability and weldability. In addition, it has good mirror polishability and EDMachinability to make itself one of the best steel among P20 improved grades.

Features

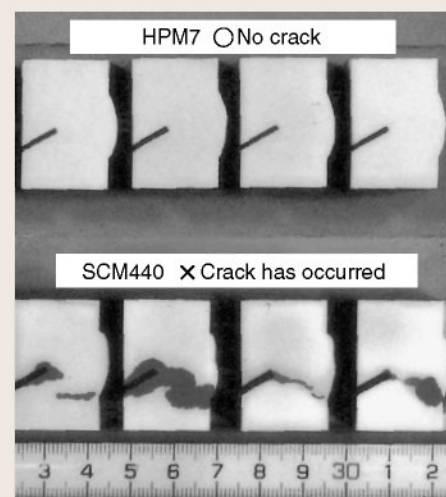
- Uniform hardness distribution even in large crosssection. (29-33HRC)
- Machinability is better than P20 or free machining carbon steel.
- Excellent weldability with least hardness elevation.
- Good mirror polishability.
- Less streak texture and least hardness elevation on EDM surface makes finishing easier.
- Excellent toughness.
- Excellent nitriding property.

Application

- Auto parts ex. Headlight lense, Taillamp, Inner panel etc.
- Home electronics, House equipment ex. TV cabinet, Air conditioner housing etc.
- Others large daily goods, Large container, Pipe, Rubber.



Machinability Comparison



y-groove Weld Crack Test
JIS Z 3158
TIG Welding
No pre-heating / No post-heating

Prehardened Stainless Grade

HPM38

Prehardened: 29~33HRC
Hardenable to: 50~55HRC
For Anti-Corrosion and Mirror
Polish Mold

HPM38 is Mo contained 13Cr martensitic stainless steel prehardened to 29-33HRC, manufactured by consumable electrode remelting method, further hardenable to 50-55HRC. It is fitted for molds which require corrosion resistance and superb mirror polishability. In addition, it suits for precise heat treatment. Excellent corrosion resistance also makes mold storage easier.

Features

- Excellent mirror polishability.
- Better corrosion-resistivity than 420.
- Chromium plating is not necessary.
- Least heat treatment deformation, best fitted for precise mold.
- As HPM38 is supplied as prehardened condition, it can be used without further heat treatment also.

Application

- Transparent items: Lense, Container for cosmetics, etc.
- Flame retardant resin products: Home electronics, OA equipment.
- For saving plating: Food container, Medical instruments.

Heat Treatment

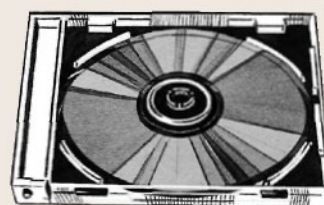
- Quenching: 1,000~1,050°C Air Cooling.
- Tempering: 200~500°C Air Cooling.

HPM38S

Prehardened: 29~33HRC
Hardenable to: 50~55HRC
For Super Mirror Polish
Mold

Features

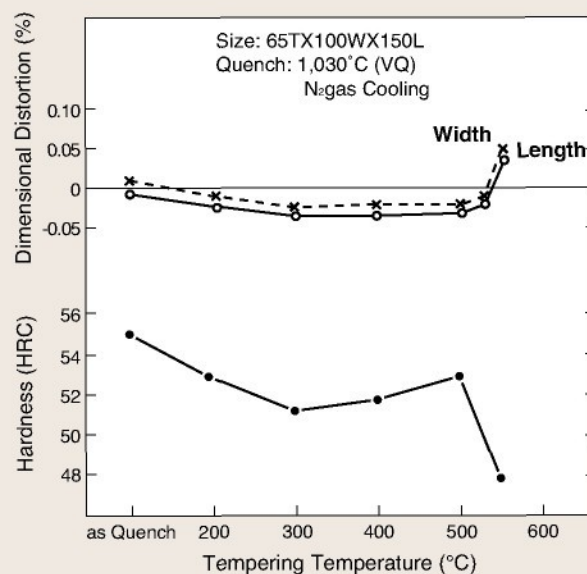
- Superior mirror polishability to below $0.01\mu\text{m}$ surface roughness.
- Other features are same as HPM38.
- CD, DVD, MO, and optical lense.



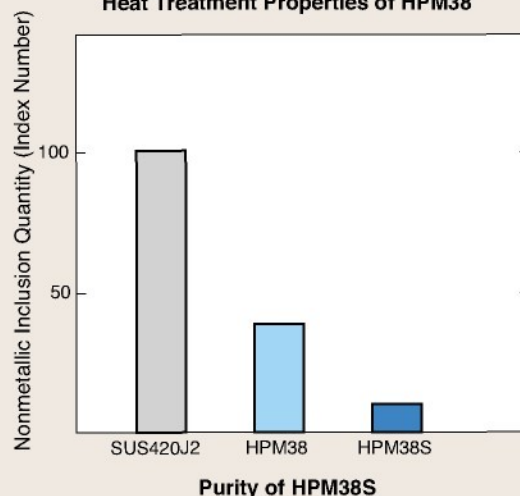
CD, DVD



Food Container



Heat Treatment Properties of HPM38



Prehardened Stainless Grade

PSL Prehardened: 33~37HRC (Flat bar)
38~42HRC (Round bar)
For Higher Grade Anti-Corrosion Mold

PSL is precipitation hardening stainless steel which shows superior corrosion resistance as used for corrosive gas yielding resins or resins with flame retardant additives without plating.

Features

- Best corrosion resistance among plastic mold steels. Plating is not needed.
- Least hardness elevation on EDM or welded surface and easier finishing jobs.

Application

- Polyvinyl chloride: Pipe fittings, Pipe, Sash etc.
- Resins with flame retardant additives
- Precision mold for rubber

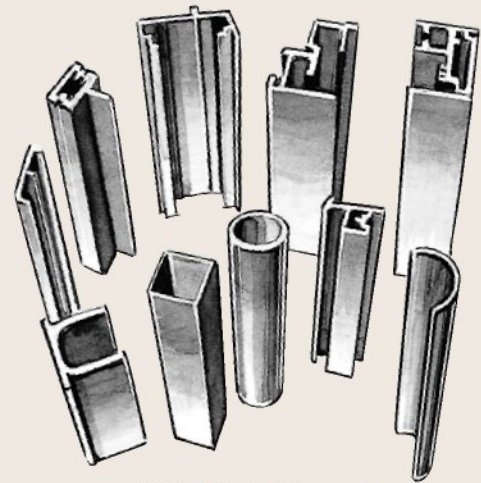
HPM77 Prehardened : 29~33HRC
Free Machining Martensitic
Stainless Grade for Mold
Base

Features

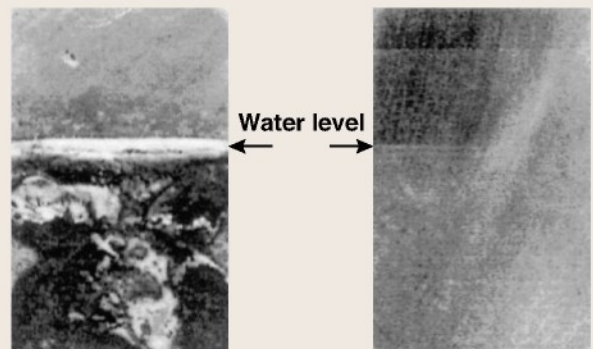
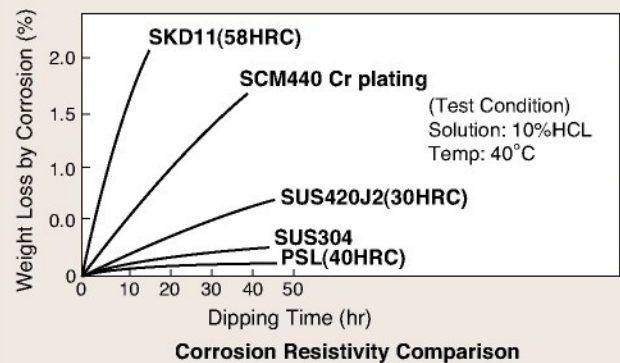
- Good corrosion resistance and well fitted for rust protection of water cooling holes or surface of mold base.
- Excellent machinability
- Prehardened and good mechanical properties

Application

- Holder for compact disc mold or lense mold.
- Holder for food or medical container mold and precise engineering resin mold.
- Mold for rubber
- Anti-corrosive support tools



PVC Extruded Products



S55C

HPM77

Rust after 1month dipping in water

High Wear Resistance Grade

HPM31

Hardenable to: 55~60HRC
High Wear Resistant Grade
for Mass Production

HPM31 is wear resistant plastic mold steel with fine carbide uniformly distributed by means of appropriate alloy design and consumable electrode remelting process. Least heat treatment distortion, it suits for precise heat treatment.

Features

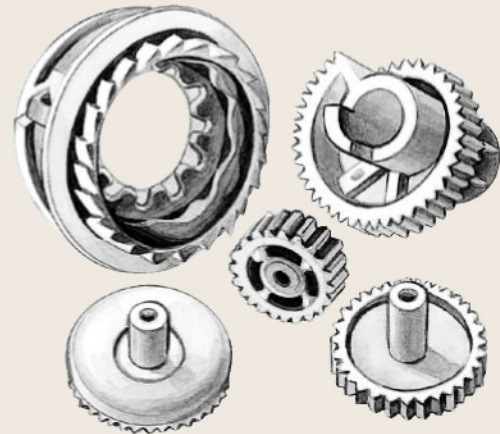
- High wear resistance as same as D2.
- Much better machinability and grindability than D2.
- Least heat treatment deformation, best fitted for precise mold.
- Good mirror polishability, crepe- and EDM finishability
- High hardness and toughness.

Application

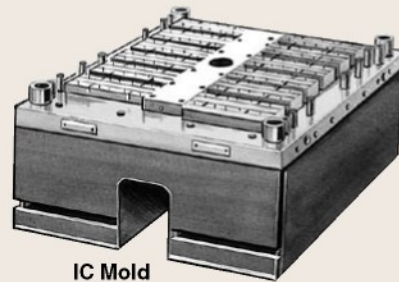
- Engineering resin products and thermosetting resin products.
- Precise mold: IC mold, Connector, Watch parts, Camera parts.

Heat Treatment

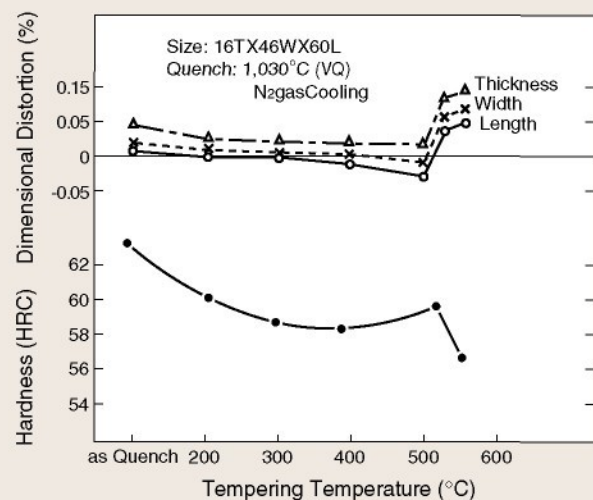
- Quenching: 1,000~1,050°C Air Cooling.
- Tempering: 200~550°C Air Cooling.



Engineering Resin Gear



IC Mold



Heat Treatment Properties of HPM31

Aging Grade

YAG

Hardenable to: 50~57HRC
Super High Toughness
Maraging Steel

As YAG is delivered as solution heat treated condition, you are advised to conduct aging at 480-520°C in order to get hardness between 50-57HRC after engraving cavity.

Features

- Superior toughness and mechanical properties under high hardness and best fitted against breakage.
- Super mirror polishability.
- Hardness about 55HRC is obtainable by aging at 480°C with least distortion.

Application

- Optical lense.
- Thin core pin.
- Ejector pin, either of smaller dia-meter or of longer length.

HPM75

Hardenable to: 40~45HRC
Non-Magnetic High
Hardness Free Machining
Plastic Mold Steel

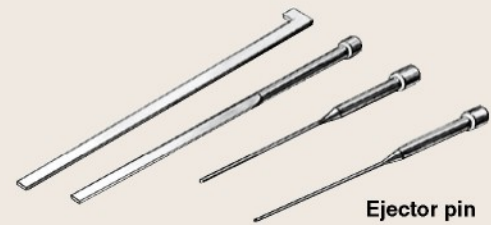
Features

- Permeability (μ) is 1.01, equally non-magnetic as 304.
- 40-45HRC is obtainable by aging of 700°CX5h and has higher wear resistance.
- Good nitriding properties.

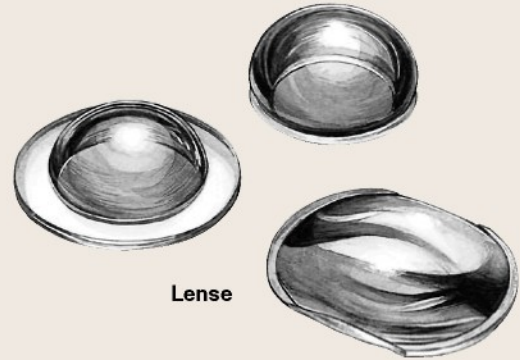
Remarks:
Slower machining recommended as it is easily hardened by machining.

Application

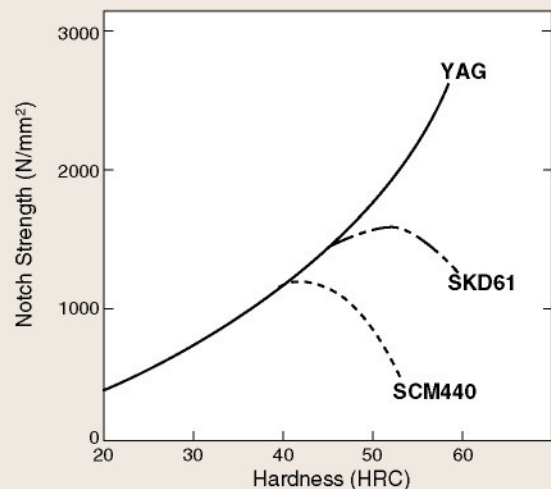
- Plastic magnet.
- Wear resistant, non-magnetic supportive tools.



Ejector pin



Lense



Relationship between Hardness and Notched Tensile Strength



Plastic Magnet

Higher Grade Polishing Method of Plastic Mold

Polish procedure Example

Polish by oil grinding stone (use kerosene) ----- #180→#240→#320→#400→#600→#800
 Polish by oil sand paper (use kerosene) ----- #600→#800→#1000→#1200→#1500
 Finish Polishing by diamond compound (use felt cloth) #1800→#3000→#8000→#14000
 (9μm) (6μm) (3μm) (1μm)

Important points of polishing

1. Each procedure is to be strictly kept.
2. When changing from one number to another, check if there are remained scratch by changing polishing direction. (move 45-90 degrees)
3. When changing numbers, wash and remove last polishing grains completely.
4. Polishing by diamond compound needs to be done in short times. Excessive polish can produce pinholes or orange peel.
5. Don't use alumina and chromium oxide for finishing as the polish capabilities are lower than diamond.
6. During long interruption, the object must be protected from the rust.

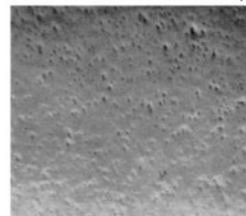
Remarks:

A. For superior polishing use diamond compound.

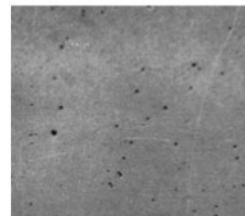
Don't use alumina nor chromium-oxide compound.



Diamond Compound Finish



Aluminium Oxide Finish Not Good



Chromium Oxide Finish Not Good

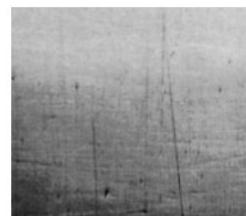
B. Load for polishing should be kept lowest possible.

C. Foregoing polish should be done prudently.

D. Rust proof measures must be taken in any interruption of jobs.



Scratch remains due to overload.



Seam and pinhole texture at crossing by less foregoing polish



Pinhole texture by inappropriate rust proof.

Welding of Plastic Mold

Attentive points

1.Preparations before welding

- A. Form of location to get welded should be made smooth as Figure 1.
- B. Cracks and treated surface (nitrided or plated) must be eliminated.
- C. Oil, dust, moisture and scale must be removed thoroughly.

2.Welding rod

- A. Welding rod of similar composition as mold is to be used so that welding may not bring about unevenness of mirror finish or creping surface.
 When the mold is made from HPM1, use welding rod made from HPM1-W.
 Likewise, in case of TIG welding there are T-HTM-31 and T-HTM-38 in the market for welding for mold made from HPM31 and HPM38.
- B. In case of using coated electrode, mold should be dried by heating to 250-300°C.
- C. For cavity welding, TIG welding should be applied.
 (TIG: Tungsten Inert Gas)

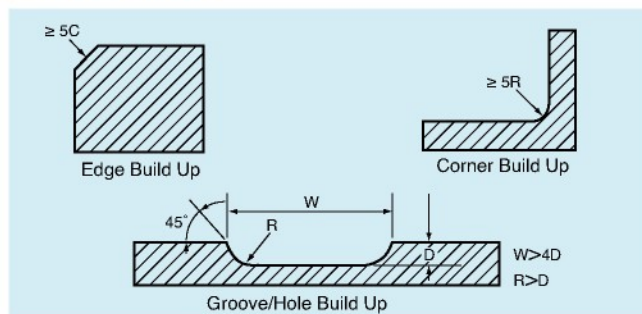


Figure 1. Standing shapes for build up welding

3.Welding

- A. Figure 2 shows example of actual welding jobs of representative grades.
- B. Tempering should be conducted soon after welding in case of prehardened steel or hardened and tempered steel according to Figure 2.
 Tempering is effective to protect mold from crack and to stabilize mirror finish and creped surface by having uniform hardness and structure.

Welding Rod Grade	Welding	Rod	Condition	Heat Cycle
CENA1	TIG	CENA1-W	• TIG Welding Rod { 2.4φ 80~160A { 3.2φ 110~200A Flow Rate 10~15L/min	Pre-heat 200~400°C Welding Post-heat 200~400°C Cool Slowly Tempering 450~550°C 1hr/25mm Air Cooling
HPM7	TIG	HPM7-W	• Shielded Metal Ark Welding Rod { 3.2φ 90~120A { 4.0φ 130~160A	Pre-heat 100~150°C Welding Post-heat 200~300°C Cool Slowly Tempering 500~600°C 1hr/25mm Air Cooling
	Shielded Metal Ark	TH50		

Figure2. Welding procedure

Hitachi Metals, Ltd. <http://www.hitachi-metals.co.jp/>

Head Office SEAVANS North Building, 1-2-1, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105-8614, Japan Specialty Steel Company
Tel. +81-3-5765-4410
Fax. +81-3-5765-8317

Hitachi Metals America, Ltd.

Head Office 2 Manhattanville Road, Suite 301, Purchase, NY 10577, U.S.A.
Tel. +1-914-694-9200
Fax. +1-914-694-9279

Other Office Chicago, Detroit, Charlotte, San Jose

Hitachi Metals Europe GmbH

Head Office Immermannstrasse 14-16, 40210 Duesseldorf, Germany
Tel. +49-211-16009-0
Fax. +49-211-16009-29

Hitachi Metals Singapore Pte. Ltd.

12 Gul Avenue, Singapore 629656
Tel. +65-6861-7711
Fax. +65-6861-1519

Hitachi Metals (Shanghai) Ltd.

11F, Tian An Center, No.338 NanJing Road (West), Shanghai, 200003, China
Tel. +86-21-6358-6368
Fax. +86-21-6358-6327

Hitachi Metals(Dong Guan)Specialty Steel Co.,Ltd.

Guangzhou Liaison Office Cha Shan Town, Dong Guan City, 522380 China
Tel. +86-769-640-6726
Fax. +86-769-640-6716

Dalian Branch 3-2, Koushin Mould Industrial Park III B-1-1-1F, T. Z. Dalian, China
Tel. +86-411-8718-1011/1022
Fax. +86-411-8718-1033

Tianjin Branch No.13 Workshop, Wenxin Industrial Park, Jingxiang Road, Xiaodian Town, Beichen Economic Development Zone, Tianjin, China
Tel. +86-22-8699-3101/3102
Fax. +86-22-8699-3103

Hitachi Metals, Ltd.

Beijing Liaison Office Room No.1418, Beijing Fortune Building, 5 Dong San Huan Bei-Lu, Chaoyang District, Beijing, 100004 China
Tel. +86-10-6590-8775
Fax. +86-10-6590-8776

- The characteristics listed on this catalog are representative values and they do not guarantee the quality of the product.
- This catalog and its contents are subject to change without notice.
- Do not duplicate this catalog without permission from Hitachi Metals, Ltd.
- Please contact a representative of our Specialty Steel Division if there are any questions or problems.

Our address and contact indicated in this catalog are those as of December 2009.
If you cannot put a call through, please contact our Corporate Communication Group.
in Tokyo below.

Tel: +81-3-5765-4076

Fax: +81-3-5765-8312

E-mail : hmcc@hitachi-metals.co.jp

Nástrojová ocel - hrubování					
čas	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
1	0,4	0,5	0,37	0,76	0,91
2	0,79	0,98	0,75		
3		1,43	1,02	2,14	2,35
4	1,84	1,82	1,31	2,45	3,03
5			1,58	2,81	3,77
6	2,95	2,61	1,86	3,05	4,2
7	3,43				
8	3,85		2,32	3,63	4,74
9	4,31	3,51			5,02
10	4,61		2,79	4,21	
11		4,02	3,02		5,49
12	5,36				5,78
13	5,7	4,52	3,41	5,02	6,05
14	6,02				
15	6,37			5,47	6,56
16		5,17	3,91		6,75
17	7,05	5,38	4,06		6,99
18	7,28			6,15	7,23
19	7,6	5,81		6,4	7,52
20	7,86	6,02	4,62		7,78
21	8,18		4,81	6,82	8,04
22	8,45	6,42			8,27
23	8,69		5,26	7,24	8,51
24		6,82	5,4		8,7
25	9,3	7,02	5,58	7,56	8,93
26	9,6	7,23	5,7		
27	9,77	7,42	5,88	7,98	9,33
28	9,8	7,63	6,05		9,46
29	9,84	7,8	6,28		9,55
30	9,87	7,9	6,44	8,56	9,63
31	9,89				9,72
32	9,9	8,34	6,7	8,92	9,81
33		8,56		9,06	9,85
34		8,77	6,95		9,89
35					
36		9,15	7,22		
37		9,34		9,74	
38		9,52	7,57		
39				9,85	
40		9,87	7,85		
41					
42		9,88	8,19		
43		9,89			
44		9,92	8,48		
45		9,96			
46					
47			8,84		
48					
49			9,11		
50					
51			9,39		
52					
53					
54			9,8		

55					
56			9,88		
57					
58			9,88		
73			9,88		

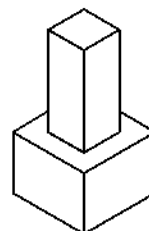
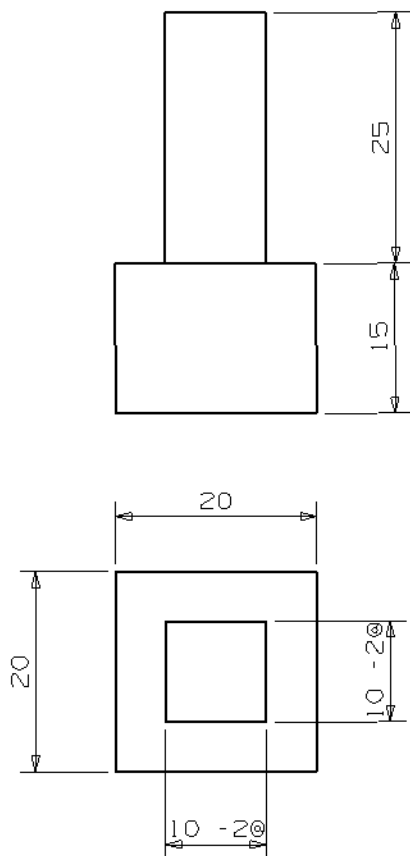
Nástrojová ocel - dokončování					
čas	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
1	1,23	2,01	1,3	1,98	2,05
2	2,43	3,86	2,24		3,89
3	3,62	4,84	3,35	4,73	4,95
4	4,75	5,42	4,39		5,42
5	5,74	6,38	5,45	6,15	
6	6,67	7,26	6,47		7,46
7	7,51	7,78	7,28	7,48	
8	8,23	8,54	8,06		8,73
9	8,86	8,95	8,89	8,74	
10	9,02	9,35	9,3		9,42
11	9,27	9,42	9,45	9,35	
12	9,43	9,5	9,58		
13	9,52	9,57			9,52
14	9,58	9,62	9,62		
15	9,64	9,68		9,52	
16	9,69	9,73	9,78		9,78
17	9,72				
18	9,78	9,78	9,82		
19	9,82			9,78	
20	9,85		9,82		9,82
21		9,8			
22			9,83		
23	9,87			9,85	
24		9,87	9,84		9,9
25					
26				9,9	
27	9,89		9,85		9,92
28		9,9			
29					
30					
31				9,91	
32			9,86		
33		9,91			
34					
35				9,91	9,93
36	9,92				
37		9,92			
38			9,87		
39					
40				9,93	
41					9,93
42		9,93	9,87		
47					9,94
48		9,94	9,88		
51				9,94	
52	9,93				
53					9,95
58		9,95			
62				9,95	
63			9,93		
73	9,94				
73			9,94		
73	9,95				

MoldMAX V - hrubování					
čas	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
1	0,28	0,49	0,58	0,82	
2	0,53	0,95	1,21	1,65	1,72
3		1,33		2,4	
4	1,03	1,59	2,16		2,84
5		1,79		3,35	
6	1,59	2,04	2,8		3,96
7	1,88	2,22		4,21	
8		2,4	3,43		
9	2,37	2,55		4,9	4,99
10		2,66	3,85	5,38	
11	2,77	2,83		5,57	
12		2,95	4,29		5,9
13	3,13	3,1			
14		3,19	4,7	6,39	
15	3,5	3,31		6,64	6,58
16		3,42		6,88	
17		3,52	5,27	7,12	
18	4,08	3,67			7,26
19	4,2	3,74	5,66	7,61	
20	4,33	3,8			7,7
21	4,45	3,92	6,01	8,04	7,9
22	4,57	4,05		8,26	8,12
23	4,7	4,17	6,39		8,35
24				8,7	8,48
25	5,01	4,37			8,6
26	5,1		6,88		
27	5,19	4,56		9,2	9,25
28	5,27	4,67			9,41
29	5,38		7,34		9,57
30		4,86		9,7	9,75
31	5,45		7,7		9,79
32	5,55			9,75	9,84
33	5,68	5,13	8,1		9,9
34	5,77	5,23		9,81	
35	5,86			9,88	
36	5,95	5,42	8,7		
37	6,08				
38	6,18	5,61	9,15		
39	6,26				
40	6,37	5,83			
41	6,45		9,75		
42	6,57	6,01			
43	6,69		9,8		
44	6,77				
45	6,88	6,27	9,85		
46	6,96				
47	7,04	6,45	9,89		
48	7,12				
49	7,21	6,63			
50	7,29	6,7			
51		6,79			
52	7,47				
53		6,93			
54	7,65	7			

55		7,08			
56	7,83	7,17			
57		7,26			
58	8,03	7,35			
59		7,48			
60	8,21	7,55			
61		7,67			
62	8,38	7,78			
63					
64		7,9			
65	8,68	7,99			
66		8,12			
67		8,22			
68	8,93	8,34			
69		8,46			
70	9,12	8,55			
71		8,67			
72	9,35	8,79			
73		8,91			
74	9,5	9			
75					
76	9,73	9,19			
77					
78	9,78	9,37			
79					
80		9,55			
81	9,8				
82					
83		9,8			
84	9,9				
85		9,81			
86					
87					
88		9,84			
89					
90		9,86			
91		9,88			
92					
93					
94		9,89			
95					
96		9,9			

MoldMAX V - dokončování					
čas	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
1	1,05	2,05	1,08	1,4	1,38
2	1,99	3,85	1,84	3,75	3,82
3	2,89	4,98	2,81	4,85	4,9
4	3,95	5,52	3,86	5,53	5,64
5	4,87	6,62	4,75	6,72	6,81
6	5,75	7,53	5,62	7,32	
7	6,68	7,76	6,48	7,86	7,95
8	7,35	7,96	7,25	8,12	
9	7,86	8,18	7,68	8,5	8,6
10	8,26		7,82		
11	8,66	8,32	8,05	8,75	8,84
12	8,98		8,1		
13	9,21	8,48	8,16	8,91	8,92
14	9,35		8,22		
15	9,42	8,62	8,32	8,95	
16	9,53		8,43		
17	9,68	8,77			9,28
18	9,72		8,68	9,1	
19	9,78	8,98			
20	9,82		8,78	9,21	9,43
21		9,1			
22	9,83		8,88	9,35	9,58
23		9,21			
24	9,85		8,97	9,48	9,68
25		9,35			
26			9,06	9,65	
27		9,41			
28			9,14	9,77	9,79
29		9,52			
30			9,25		
31			9,27		
32					
33	9,86	9,63	9,31	9,9	
34			9,36		
35			9,4		
36					9,9
37			9,48		
38		9,78			
39			9,56		
40	9,87				
41				9,95	
42		9,85	9,7		
43					9,94
44					
45	9,88	9,9	9,78		
46	9,89				
47					
48		9,92	9,8		
49					
50				9,96	
51	9,9	9,93	9,83		
52					
53					9,95
54			9,85		

55					
56					
57		9,94	9,88		
58	9,91			9,98	
64	9,92				
65		9,95			
70	9,93				
73			9,89		
80	9,95				
87			9,9		
100			9,95		
106	9,95				
123			9,95		
127	9,95				
128	0				
129	0				
130	0				
131	0				
132	9,95				
146			9,95		
147					
148	9,95				
172	9,96				
188	9,96				



DMCZ

tolerance of "H" (HOLE) $\pm 0.02/0$ (SHAFT) $0/-0.02$
tolerance of "h" ± 0.01
Unless otherwise specified, general face, insert pin pitch and
ejector pin pitch are ± 0.05
R tolerance by hands is $0R: \pm 0.5/0$, $0.0R: 0/-0.5$

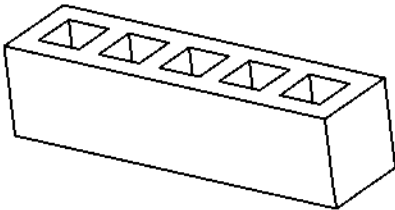
符合 SYM	変 更 事 項 REVISION RECORD	改定番号 EC NO.	年月日 DATE	変更者 DR
△				
△				
△				

Elektrod	@-Raf	@-Fin	pcs
CU	0,3	0,15	7+7
EDU-1	0,25	0,10	2+2
EDM-200	0,25	0,10	2+2
EDMC-200	0,25	0,10	2+2
EDM-C3	0,25	0,10	2+2

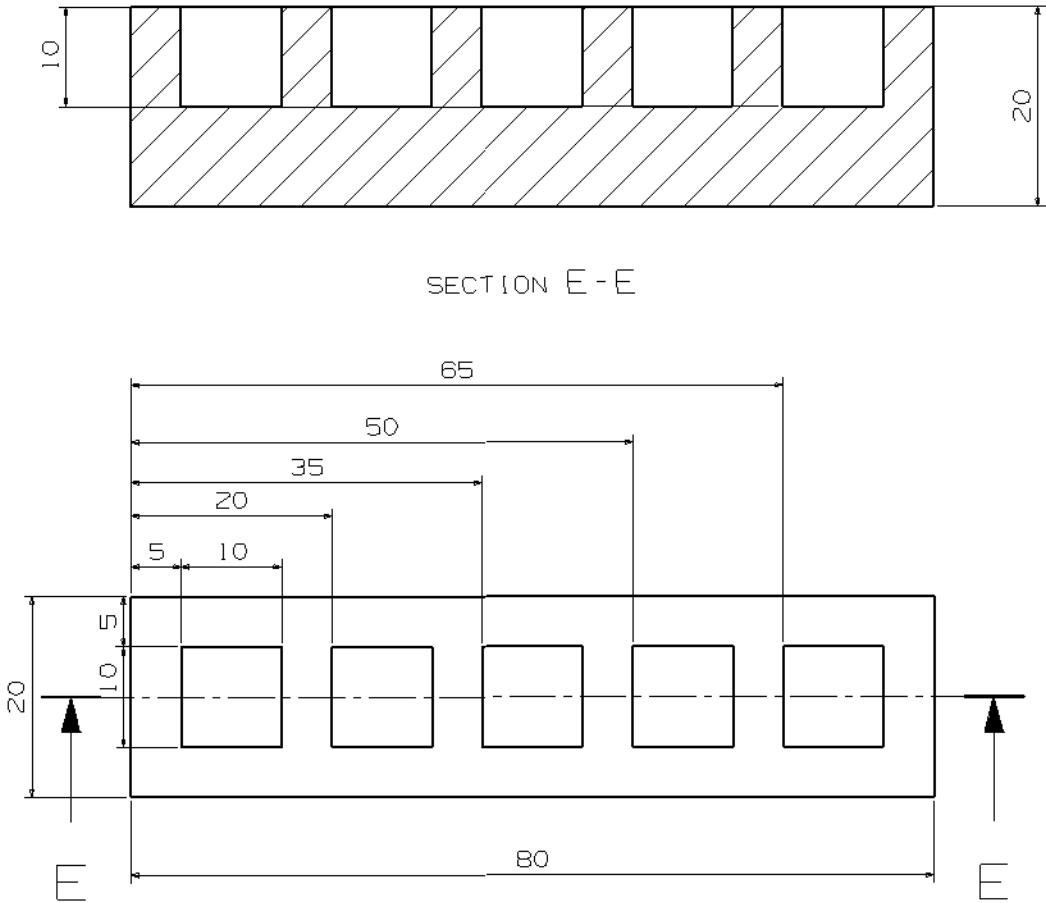
工 事 番 号 JOB NO.			
仕上寸法 FINISHED DIMENSION			
熱 処 理 HEAT TREATMENT			
表 面 処 理 SURFACE TREATMENT			
名 称 PART NAME			
尺 度 SCALE	寸 法 UNIT	材 質 MATERIAL	備 考 REMARKS
1/1	層 数 FLOOR	2	品 番 ITEM NO.
設 計 者 DRAWN BY	Valenta	TEL	2536
備 考 REMARKS			

車 種	CAR MODEL		
名 称	PART NAME CASE HEATER INJECTION MOLD	レイヤ	PART LAYER NO. LAY
品 番	PART NO.		
アドレス	MODEL FILE ADDRESS モデル: Test.prt		
検 印	Drawing sheet 設計 DESIGNED	検 図 CHECKED	検 数 CHECKED
			承認 APPROVED
			葉 数 SHEET No.

符合 SYM	変更事項 REVISION RECORD	改番番号 EC NO.	年月日 DATE	変更者 DR
△				
△				
△				



SECTION E - E



DMCZ

工 事 番 号 JOB NO.			
仕 寸 法 FINISHED DIMENSION			
熱 処 理 HEAT TREATMENT			
表 面 処 理 SURFACE TREATMENT			
名 称 PART NAME			
R 度 尺 寸 R SCALE	材 質 MATERIAL	HPM7+Mo1dmaxV	
1/1 層 数 LAYER	1+2 品 番 PART NO.	Test	
設 計 者 DRAWN BY	Valenta	図 番 DRAWING NO.	2536
備 考 REMARKS			

車 種 CAR MODEL			
名 称 PART NAME			レイヤ PART LAYER NO. LAY
品 番 PART NO.			
ア ド レ ス MODEL FILE ADDRESS モデル: Test.prt			
検 印 Drawing check	設計 DESIGNED	検 査 CHECKED	承認 APPROVED
			葉 数 SHEET No.

tolerance of "φ" (HOLE)±0.02/0 (SHAFT) 0/-0.02
 tolerance of "±" ±0.01
 Unless otherwise specified, general face, insert pin pitch and
 ejector pin pitch are ±0.05
 R tolerance by hands is DR:±0.5/0, BR:0/-0.5