

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ROZVOJ TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ FOREM POVLAKOVANÝMI TVAROVÝMI FRÉZAMI

PROGRESS IN TECHNOLOGY OF MOLD MILLING WITH COATED PROFILE TOOLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ DOLEŽEL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Doležel

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Rozvoj technologie frézování forem povlakovanými tvarovými frézami

v anglickém jazyce:

Progress in technology of mold milling with coated profile tools

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se zabývá rozvojem technologie frézování forem povlakovanými tvarovými frézami.

Cíle diplomové práce:

1. Analýza soudobých trendů výrobních technologií forem, nástrojů a jejich povlaků.
2. Návrh tvaru experimentální formy.
3. Návrh a verifikace vybraných CNC technologií.
4. Technologicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěry pro výrobní praxi.

Seznam odborné literatury:

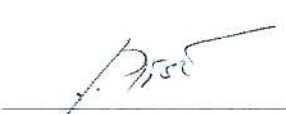
- CSELLE, T.; HOLUBAR, P. Driving Forces of Today's Manufacturing Technology : III Conference for Milling. In III Conference for Milling. Brno : Cerm, 2003. s. 33-66.
- HOLUBÁŘ, P.; JÍLEK, M.; ŠÍMA, M. Otěruvzdorné PVD povlaky z nanokrystalických kompozitů. MM Průmyslové spektrum. 2002, 5, s. 5.
- TLUSTÝ, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.
- SALGADO, M.A., et al. Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting forces. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 45, Issue 6, May 2005, pp. 727-73.
- HAN-UL, LEE, DONG-WOO, CHO. Development of a reference cutting force model for rough milling feedrate scheduling using FEM analysis. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 47, Issue 1, January 2007, pp. 158-167.
- HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1.ed., Praha, MM publishing s.r.o., 2008, 235 s.
- BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1.vyd., Slovensko, Trenčin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno : CERM, 2006. s. 230. 1. vyd.. ISBN 80-214-2374-9.
- BARÁNEK, I., ŠANDORA, J.: Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212, ISBN 80-8075-013-0.
- SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3
- TRENT, E.M., WRIGHT, P.K. Metal Cutting. Fourth Edition. Butterworth-Heinemann. Boston, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, 2000. pp. 446. ISBN 0-7506-7069-X.
- AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Produktivní obrábění kovů. Švédsko CMSE. 1997. 300s.
- HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110 s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.


prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu




prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možným rozvojem frézování forem různými druhy povlakovanými moderními frézami. První část je věnována analýze soudobých trendů výrobních technologií forem. V analýze jsou uvedeny různé druhy strojů a nástrojů pro výrobu různých druhů forem a zápustek. Další část se věnuje návrhu zápustky pro část nůžek na plech. Pokračuje se návrhem výroby po tepelném zpracování a dokončení zápustky frézováním. Pro frézování zápustky jsou navrženy nástroje, NC program a možný rozvoj výroby zápustky pomocí nového obráběcího centra a možnost optimalizace výroby. Předposledním bodem práce je technicko ekonomické zhodnocení daného směru rozvoje porovnání kladu a záporu jednotlivých metod. V závěrečném zhodnocení je vše shrnuto.

Klíčová slova:

Forma, zápustka, elektroeroze, nástrojová elektroda, dielektrikum, elektrolyza, elektrolyt, laser, obráběcí centrum, frézovací strategie, fréza, slinutý karbid, povlak, vyměnitelná břitová destička, kalení, popouštění, optimalizace.

ABSTRACT

This diploma thesis is involved in possible development of different types of milling molds coated with modern plows. The first part is devoted to an analysis of contemporary trends in forms production technology. The analysis includes the different types of machines and tools for making various kinds of molds and dies. Another part deals with design of dies for sheet metal shears. The thesis continues by design of the production procedure after heat treatment and finishing die by milling. For milling of die are designed milling tools, the NC program and the possible development of manufacturing the die using a new machining center and the possibility of production optimization. The penultimate point of the thesis is technical and economical evaluation of the direction of development and comparison of positives and negatives of each method. At the final evaluation is all summed up.

Key words :

Form, forging die, Electrical Discharge Machining, tool electrode, dielectric, electrolysis, electrolyte, laser, machining center, Milling strategy, mill, cemented carbide, coating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLEŽEL, O. *Rozvoj technologie frézování forem povlakovanými tvarovými frézami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 82 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Rozvoj technologie frézování forem povlakovanými tvarovými frézami* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 27.května 2011

.....
Ondřej Doležel

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi v průběhu vypracování diplomové práce a celého studia pomáhali. Především děkuji vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	7
1 Analýza soudobých trendů výrobních technologií forem, nástrojů a jejich povlaků	8
1.1 Elektroerozivní obrábění	8
1.1.1 Princip metody	8
1.1.2 Hloubení dutin zápustek a forem.....	11
1.1.3 Dielektrikum	15
1.1.4 Nástrojové elektrody.....	17
1.1.5 Dosahované parametry	22
1.2 Elektrochemické obrábění	23
1.2.1 Princip metody	23
1.2.2 Elektrochemické hloubení dutin zápustek a forem proudícím	25
1.2.3 Nástrojové elektrody.....	27
1.3 Laserové obrábění.....	28
1.3.1 Princip laseru	28
1.3.2 Gravírování laserem.....	29
1.4 Frézování	31
1.4.1 Princip frézování	31
1.4.2 Frézování dutin zápustek a forem	32
1.4.3 Nástroje pro výrobu forem.....	40
2 Návrh tvaru experimentální formy.....	47
2.1 Návrh tvaru zápustky na rovný díl nůžek.....	47
3 Návrh a verifikace vybraných CNC technologií.....	50
3.1 Materiál a tepelné zpracování	50
3.2 Návrh výroby pro dokončení zápustky.....	53
3.2.1 Rozvoj výroby a strojní vybavení.....	53
3.2.2 Volba nástrojů a řezných podmínek	55
3.2.3 Tvorba drah a následné vytvoření NC programu	60
3.2.4 Optimalizace a efekty rozvoje	69
3.2.5 Porovnání efektivní řezné rychlosti při frézování s nenakloněným a s nakloněným řezným nástrojem	72
4 Technologicko-ekonomické zhodnocení.....	74
Závěr.....	77
Seznam použitých zdrojů	78
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	81
Seznam příloh.....	82

ÚVOD

Celosvětová výroba forem a zápustek je v dnešní době jedním z nejdůležitějších výrobních odvětvích. Český nástrojařský průmysl má mnoho firem, které se zabývají výrobou forem nebo zápustek.

Různé druhy forem se využívá při hromadné výrobě kovových i plastových dílu. Převážně však v různých průmyslových odvětvích např. : v automobilním, leteckém, elektronickém průmyslu atd.

Samotné formy jsou z drahých nástrojových ocelí, které jsou kaleny na vysoké tvrdosti proto je jejich výroba náročná na zatížení stojů i nástrojů což prodlužuje výrobní časy. S použitím moderních metod obrábění na nových strojích s použitím nových nástrojů je možné tyto výrobní časy zkrátit. Pro to mnoho firem v současné době pořizuje a modernizuje svůj výrobní park, aby byli schopni si tímto rozvojem udržet konkurenceschopnost na trhu.

Proto je důležité sledování soudobých trendů výrobních technologií forem a použitých nástrojů . Výrobní technologie se v podstatě dělí do dvou skupin obrábění nekonvenční (např.: elektroerozivní) a konvenční (např.:frézování). Kdy trendy jsou především v kombinaci těchto výrobních metod a rozvoji výroby směrem ke zkrácení výrobních času forem za dodržení vysoké kvality povrchu, aby už nebyla potřeba ručních uprav po samotném obrábění. Další velký rozvoj zaznamenává elektrotechnika, kdy se snažíme zkrátit i samotný návrh formy použitím CAD/CAM systémů.

Dále se zaměříme na návrhem tvaru formy a následným návrhem výrobní CNC technologie. Posléze provedeme ekonomické zhodnocení. V závěru vyhodnotíme poznatky pro výrobní praxi.

1 ANALÝZA SOUDOBÝCH TRENDŮ VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ FOREM, NÁSTROJŮ A JEJICH POVLAKŮ

Výrobní technologie forem se v dnešní době dělí na konvenční obrábění jeho hlavním představitelem je frézování a na nekonvenční obrábění jeho hlavními zástupci jsou elektroerozivní obrábění, elektrochemické obrábění a obrábění laserovým paprskem.

Každá z těchto metod prošla určitým vývojem a našla své uplatnění ve výrobní praxi. Dnes se dokonce snažíme o kombinování těchto technologií do multifunkčních obráběcích center, abychom dosáhli vyššího výrobního výkonu.

1.1 Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění (mezinárodní označení EDM Electrical Discharge Machining) patří v současnosti k dobře zavedeným progresivním výrobním procesům¹. Je to metoda beztržiskového (bezsilového) řízeného obrábění elektricky vodivých materiálů pomocí elektroeroze².

Úběru materiálu je založené na využití tepelné energie, na kterou se přemění elektrický výboj vznikající mezi elektrodami (nástroj a obrobek)¹. Kdy vlivem vysoké koncentrace energie (10^5 až 10^7 W/mm²) materiál taje a odpařuje se³.

Tato metoda se nejčastěji používá při výrobě vstřikovacích forem na plasty, při výrobě zápusťek, střížných a lisovacích nástrojů a v neposlední řadě při obrábění problematicky obrobitelných kovů⁴.

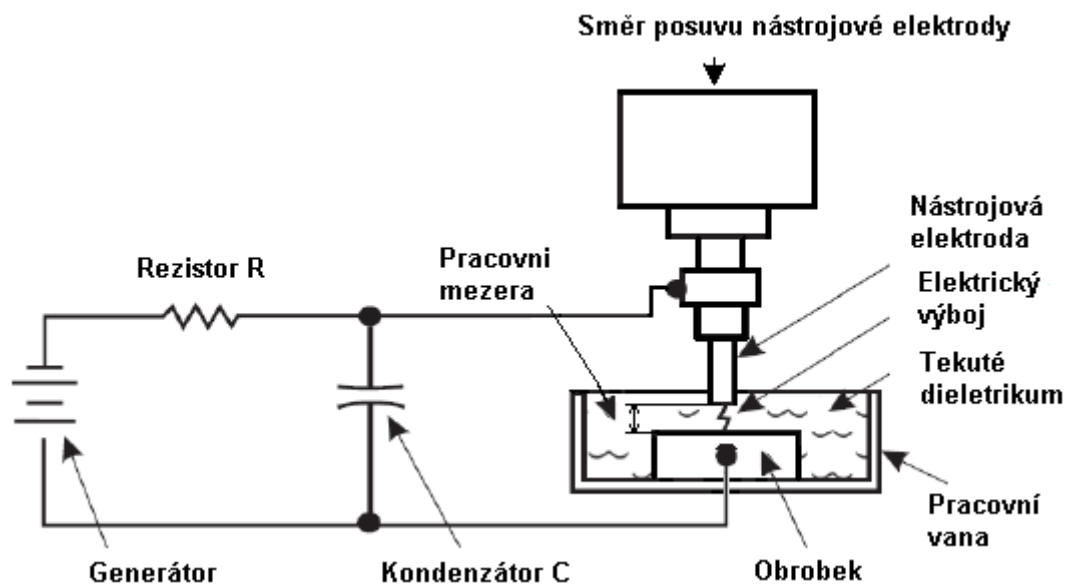
V současnosti se elektroerozivní obrábění dělí do dvou hlavních skupin podle jeho technologických možností¹:

- tvarové elektroerozivní obrábění (hloubení)
- drátové řezání

1.1.1 Princip metody

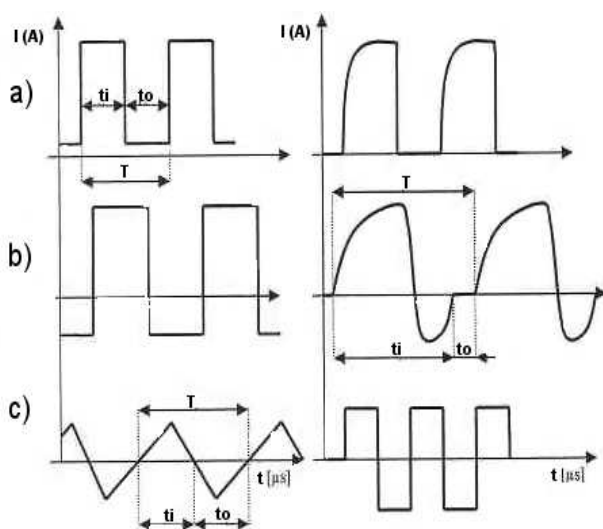
Elektroerozivní obrábění je technologický proces, při kterém k úběru materiálu dochází elektricky. Pomocí vyvolání rychle se periodicky opakujících impulzů jiskrového výboje za přítomnosti dielektrika (kapalného média). Velmi malé částice (mikročástice) ve formě dutých kuliček jsou odstraňovány z materiálu tavením a odpařením. Z mezery mezi nástrojem a obrobkem jsou produkty elektrolyzy odnášeny pomocí dielektrické kapaliny, která mezi nimi proudí¹.

Obrábění probíhá na dvou elektrodách z elektricky vodivého materiálu mezi kterými probíhá výboj^{1,5}. Anodu (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a katodou (nejčastěji ji tvoří obrobek)³. Tyto elektrody jsou umístěna v těsné blízkosti odděleny jiskrovou mezerou a ponořeny v dielektrické kapalině⁵. Což je většinou kapalina s vysokým elektrickým odporem³.

Obr. 1.1 Princip elektroerozivního obrábění⁶.

Když je elektroda vzdálena od obrobku, má napětí obvykle hodnotu 100V. Poté, co se elektroda přiblíží k obrobku, nastane ionizace oddělující kapaliny. Když nastane výboj, napětí klesne na nižší hodnotu. To se stane při vzdálenosti elektrod 0,01 - 0,4 mm. Proces vzniku elektrického výboje mezi dvěma elektrodami, které jsou ponořené v dielektriku, je komplexní jev⁵.

Stejnoseměrný proud je dodáván do pracovního okruhu s odporem R a kapacitou kondenzátoru C v pulzech, které mají převážně čtvercový průběh (obr.1.2)^{1,5}. Tyto pulzy vytváří krátké výboje mezi elektrodami (obr.1.3)¹. Výboj vzniká v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole, které vytváří ionizovaný (vodivý) kanál umožňující přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem (obr. 1.1)⁵. Výsledkem výboje je krátce trvající koncentrace elektrické energie a mechanické energie elektronů na anodě¹.



Legenda :

- a) jednopólové impulzy
- b) střídavé impulzy nesymetrické
- c) dvoupólové impulzy symetrické

Obr. 1.2 Rozdělení impulzu dle tvaru⁷.

Celkový proces odebírání materiálu se pak skládá ze střídajících se impulzních výbojů, statisticky rozložených po celé ploše⁵. Elektrodynamické síly a spád vnitřních napětí následkem tepelného pole zapříčiňuje, že natavený kov je vymršťovaný do dielektrika¹. Doba přerušení umožní, aby narušené částice byly odplaveny z místa narušení proudící kapalinou. Čas přerušení musí být delší než čas deionizace, aby bylo zabráněno plynulému tvoření výboje ve stejném místě⁵.

Nástroj je neustále přibližován posuvovým mechanismem k ploše obrobku a současně vibruje. Vibrační pohyb vytváří podmínky pro výboj a umožňuje odstraňování zplodin odebraného materiálu a výměnu dielektrika v mezeře. Posuvový a vibrační pohyb je obvykle vyvozen střídavým proudem⁵.

Charakteristické parametry elektroeroze jsou určeny tvarem a velikostí energie impulzů(obr. 1.2), pracovní mezerou a dielektrikem⁵.

Parametry, které charakterizují proces elektroerozivního obrábění, jsou¹:

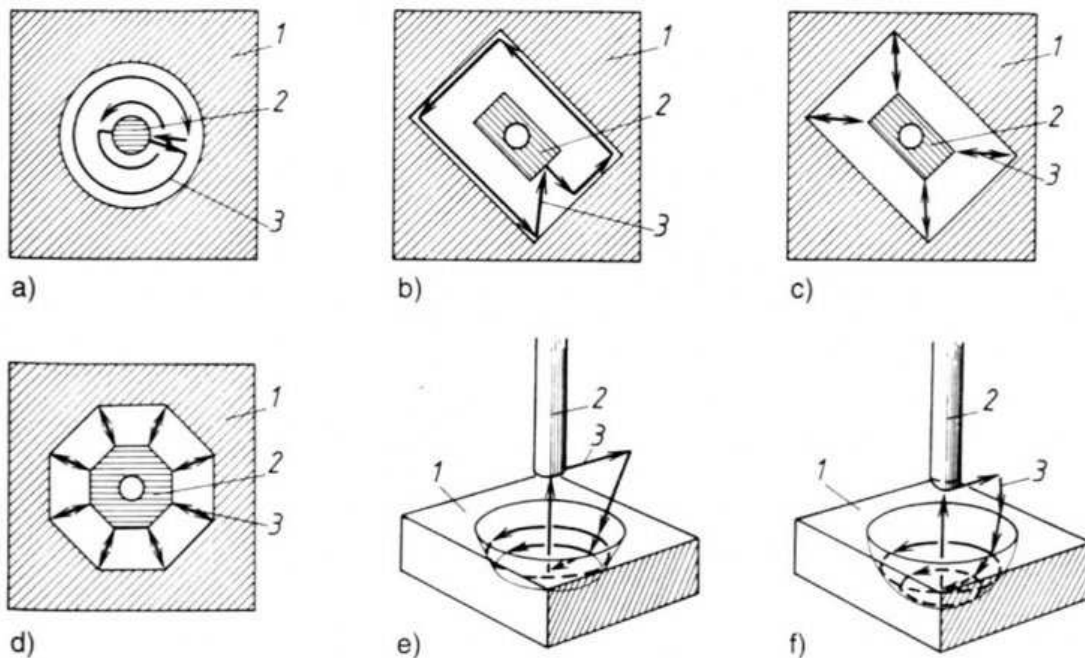
- Zařízení pro EDM (stroj) – jeho tuhost a stabilita, kapacita přítoku dielektrika, řídicí systém a stupeň automatizace.
- Dielektrická kapalina – její chemické složení a fyzikální vlastnosti, stupeň kontaminace produktů eroze, intenzita a způsob proudění dielektrické kapaliny, pracovní vzdálenost mezi elektrodami.
- Tvoření výboje tj. elektrické podmínky vzniku výboje – výsledný tvar výboje, energie impulzu a frekvence výboje; trvání výboje (0,001 až 0,0001 sekundy).
- Nástrojová elektroda – její chemické a fyzikální vlastnosti, tvar a rozměry. Nástrojové elektrody jsou z vodivých materiálů, přičemž jejich tvrdost může být menší jako tvrdost opracovaného materiálu.
- Materiál obrobku – jeho chemické a fyzikální vlastnosti, výsledný tvar a rozměry.

1.1.2 Hloubení dutin záпустek a forem

Při technologii hloubení se využívá výboje elektrické jiskry mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem¹. Používaná nástrojová tvarová elektroda má zpravidla negativní tvar obráběné plochy⁵. Elektrojskové obrábění vnitřních tvarových ploch se provádí standardním postupem tak, že elektroda je posouvána směrem do obrobku a vytváří požadovaný profil. Tímto se dosahuje trojrozměrného obrábění¹.

Výrazného zlepšení možností elektrojskového obrábění bylo dosaženo zavedením tzv. vychylovačů elektrod, které umožní vychylování elektrod do všech směrů. Toto přídatné zařízení umožňuje zhotovování složitějších tvarů pomocí jednoduchých elektrod snižuje spotřebu elektrod korekcí jejich úbytku

(např.: díru o průměru 10 H7 je možno vyjiskřit trubkovou elektrodou průměru 6 mm). Různé aplikace realizované vychylovačem elektrod jsou na (obr. 1.5). Pro řízení obráběcího procesu se výhodně uplatní CNC řídicí systémy⁵.

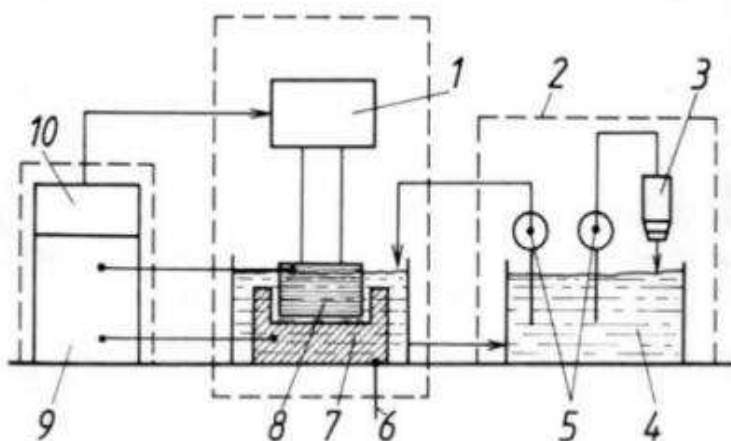


Legenda :

a) kruhové, b), c) obdélníkové, d) osmihranné, e) kuželové, f) kulové;
1 - obrobek, 2 - nástrojová elektroda, 3 - pracovní pohyby nástrojové elektrody

Obr. 1.5 Výroba dutiny kombinací tvaru a pohybu nástrojové elektrody⁵.

Samotná výroba zápusťek a forem metodou elektroerozivního obrábění se provádí na elektroerozivním stroji, který je schematicky vyobrazeny na (obr.1.6).



Legenda :

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. 1.6 Schéma elektroerozivního stroje³.

Moderní stroje (obr.1.7) mají všechny činnosti řízeny CNC řídicím systémem. Konkrétně se jedná o řízení směru a rychlosti pohybů, polohy pracovního stolu, pracovních parametrů generátoru, přívodu dielektrika, automatické výměny elektrod v zásobníku (obr.1.6), rychlosti přísuvu elektrody a kontrolu probíhající elektroeroze. Řídicí systémy (např.: Advance) umožňují snadné naprogramování stroje. Postup úběru materiálu lze simulovat na obrazovce (obr.1.8). Elektroerozivní stroje pro hloubení dutin se vyrábějí také v provedení, které umožňuje bezobslužný provoz až po dobu 48 hodin. Jednotlivé technologické aplikace vyžadují různé formy elektrických výbojů, které jsou na nástrojovou elektrodu a na obrobek přiváděny z generátoru ve formě pulzů o určité frekvenci. Každý pulz je charakterizován napětím, proudem a tvarem³.



Obr. 1.7 Hloubička model EA28V Advance od firmy Mitsubishi s CNC řídicím systémem Advance a automatickým zásobníkem nástrojových elektrod⁹.

Základem stroje EA28-V Advance vybaveného vysoce výkonným 120 ampérovým generátorem je velmi tuhá litinová konstrukce a teplotně stabilní základna. Pojezdy v osách X, Y, Z 650 x 450 x 350 mm, maximální rozměry obrobku 1 050 x 760 x 350 mm a hmotnost obrobku až 2000 kg dávají představu o rozsahu možných aplikací. Hloubička je standardně vybavena automaticky vyjížděcí pracovní nádrží, stejně jako další Modely Advance. K vybavení patří také filtrační a chladicí jednotka dielektrika, přímé odměřování ve všech osách a vysokorychlostní pohyb osy Z, který zajišťuje dokonalý výplach a vysoký výkon obrábění¹⁰. Pro možnost maximálního využití všech předností strojů modelu Advance je k nim dodáván i výměník elektrod a palet (obr.1.6). Řízení této kompaktní jednotky včetně systému čipové identifikace je prováděno CNC řídicím systémem Advance ten je schopným zcela automaticky ovládat 48 elektrod a 6 palet¹¹.

Nové CNC řízení Advance zaujme uživatelskou přívětivostí, jednoduchostí a spolehlivostí. Navzdory velkému rozsahu funkcí je postavené řízení na Windows XP intuitivní a jednoduše ovladatelné jak pro zkušené uživatele, tak začátečníky. Jednoduchá struktura logických menu a čistý design navádějí rychle a spolehlivě k požadovanému cíli. Lze provádět 2D nebo 3D simulace vytvořeného programu před i během obrábění. Optimální rozložení parametrů

generátoru je vytvořeno expertním systémem E.S.P.E.R.¹¹. Ten automaticky vybírá optimální strategii procesu na základě několika jednoduchých parametrů, jež jsou obsluze vždy známy. Obsluha je tudíž pouze zadá do předem vytvořeného dialogu, který ji provede celým procesem programování a nastavení. Postup není náročný na potřebu předchozích zkušeností v obsluze elektroerozivních strojů. Integrované technologie dosahují vysoké účinnosti a efektivity v širokém rozsahu aplikací, ať už se jedná o obrábění dlouhých a tenkých žebér nebo například obrábění velkých ploch obsahujících řadu drobných detailů. K dalším výhodám patří automatická modifikace základních technologií a nastavení parametrů, automatická detekce obráběné plochy či optimální nastavení generátoru¹⁰.

Uživatelům v každodenní práci dále pomáhají nejrůznější analýzy, optimalizace a monitorování programu. Řízení se obsluhuje prostřednictvím robustního 15"ového dotykového displeje (obr.1.8) s pevnými tlačítky pro často používané funkce, nebo i pomocí klávesnice a myši. Řízení lze připojit do sítě Ethernet pomocí karty, která patří ke standardnímu vybavení stroje. Pro přesun jakýchkoliv dat dále slouží dva USB porty, jež jsou uživatelům stroje k dispozici¹⁰.



Obr. 1.8 15"ový dotykový displej⁸.

Ustavení a najetí obrobku je prováděno pomocí jednoduchých, logických a posloupných obrazovek s intuitivními obrázky a pohledy. Novější zjednodušená verze nabízí Easy SetUp strategii, která kombinuje všechna hlavní nastavení v jedné obrazovce¹⁰.

Stroje Advance jsou dodávány s USB paměťovou kartou. Jakoukoliv aktualizaci softwaru lze provádět pouze prostřednictvím této paměťové karty. Proces zahrnuje zálohu všech uživatelských i strojních dat před každou systémovou aktualizací. Individuální nastavení tak mohou být dle potřeby uživatele obnovena¹⁰.

Dalšími příklady moderních obráběcích strojů, který mají podobné funkce a mohou se také používat k výrobě forem a zápuštěk jsou hloubičky od firem Exeron (obr.1.9) a GF AgieCharmilles (obr.1.10). V dnešní době je na trhu velké množství výrobců elektroerozivních hloubiček při volbě je vždy důležité brát

ohled na druh výroby v daném podniku a dodávaným službám (servisní kontroly, opravy apod.) k danému stojí a příslušenství.



Obr. 1.9 EDM hloubička model EDM 316 / 316XXL od firmy Exeron¹².



Obr. 1.10 EDM hloubička model AC Progress VP4 EXACT 2 HS od firmy GF AgieCharmilles¹³.

1.1.3 Dielektrikum

Dielektrikum je pracovní kapalně prostředí, ve kterém se uskutečňuje vlastní elektroerozivní výboj. Současně plní nejrůznější funkce nutné pro stabilní průběh elektroerozivního obrábění. Působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo z pracovní mezery, ohraničuje výbojový kanál, odvádí drobné produkty eroze z míst výbojů a zabraňuje usazování uhlíku a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody, jehož následkem by docházelo ke zkratům. Jako dielektrika se používají strojní olej, transformátorový olej, petrolej, destilovaná voda, deionizovaná voda a speciální dielektrika dodávaná výrobcí strojů. Při elektroerozivním hloubení se používají nejčastěji dielektrika na bázi petroleje, které umožňují dobrou kontrolu nad výboji^{1,3,7,14}.

Požadavky na dielektrické kapaliny^{3,7,14} :

- dostatečné dielektrické vlastnosti (odpor) umožňující vznik výboje průrazem dielektrika
- dobrou smáčivost a malou viskozitu, zajišťující rychlé obnovení izolace v místě výboje
- bod vzplanutí dielektrika musí být vyšší než 60°C , protože při výbojích vznikají vysoké teploty, které způsobují ohřátí elektrod a dielektrika
- chemická neutrálnost pro zamezení vzniku koroze
- hygienická a ekologická nezávadnost, nesmí docházet k rozkladu a vzniku zdraví nebezpečných plynů. U některých typů dielektrik (např. petroleje) je nutné při velkých výkonech obrábění odsávání;
- nízká pořizovací cena.

Součástí elektroerozivního stroje jsou zásobník dielektrické kapaliny, čerpadlo, potrubí, filtrační a chladicí zařízení. Je velmi důležité, aby dielektrikum při elektroerozi nebylo příliš znečištěné. Pro vlastní filtraci se používají zařízení různých konstrukcí (např. papírové filtry, usazovací filtry nebo odstředivé filtrační zařízení). Správné vyplachování je charakterizováno rovnoměrností. Přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu, tzv. vyplachování, je možné realizovat několika způsoby^{7,14}.

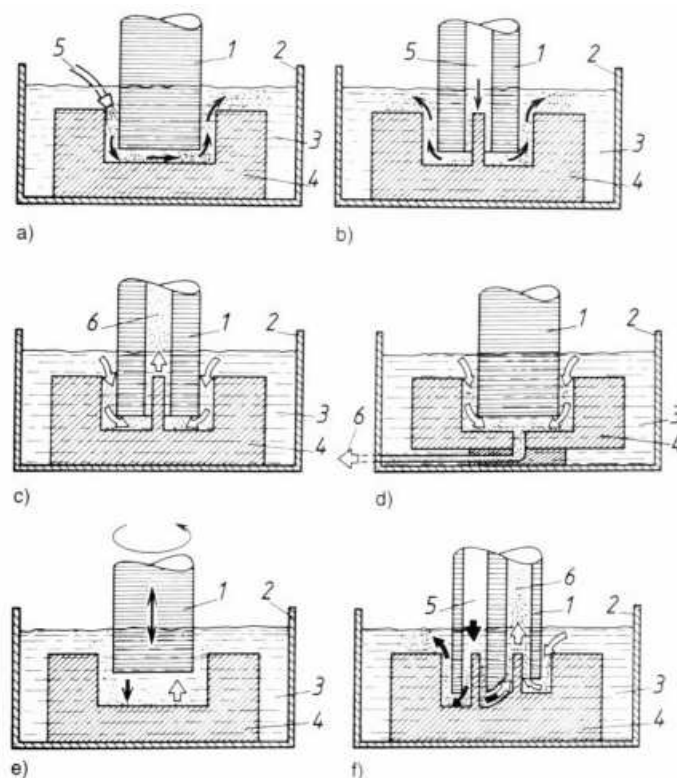
Vnější vyplachování (Obr. 1.11a) se nejčastěji používá při obrábění dutin o větší hloubce. V praxi se využívá toto vyplachování zároveň s pulzním. Odstraňování nečistot mezi nástrojem a obrobkem je ulehčováno kmitavým pohybem elektrody^{3,7,15}.

U vnitřního tlakového vyplachování (Obr. 1.11b) je dielektrikum přiváděno otvorem v nástrojové elektrodě přímo do pracovního prostoru. Nevýhodou je menší tvarová přesnost boků hloubené dutiny. Důvodem jsou odváděné částice, které jsou zdrojem bočních výbojů^{3,7,15}.

Vyplachování odsáváním (Obr. 1.11c,d) se uskutečňuje odsáváním dielektrika dutinou v nástrojové elektrodě nebo v obrobku. Vyznačuje se velmi dobrou tvarovou přesností obráběné dutiny³.

Pulzní vyplachování (Obr. 1.11e) je charakterizováno přerušením procesu elektroeroze na 0,15 – 10s. Současně se oddaluje (případně rotuje) nástrojová elektroda od obrobku o 0,02 – 10mm. Dochází tím ke zvětšení pracovní mezery mezi obrobkem a elektrodou a dosáhne se tak jejího dokonalého vypláchnutí. Při vyjíždění elektrody se vypíná pracovní proud, aby se zabránilo vzniku bočních výbojů. Po nastavení elektrody do pracovní vzdálenosti je proud opět spuštěn. Tento způsob vyplachování je výhodný při výrobě hlubokých dutin, při použití tenkých elektrod nebo při obrábění načisto^{3,7,15}.

Kombinované vyplachování (Obr. 1.11f) je kombinace vnitřního tlakového vyplachování a odsávání. Touto metodou lze dosáhnout přesných tvarů obráběné dutiny. Používá se především tam, kde hloubíme tvarově komplikovanou dutinu například u forem a zápusťek³.



Legenda :

- a) vnější,
- b) tlakové vnitřní
- c), d) odsáváním
- e) pulzní
- f) kombinované

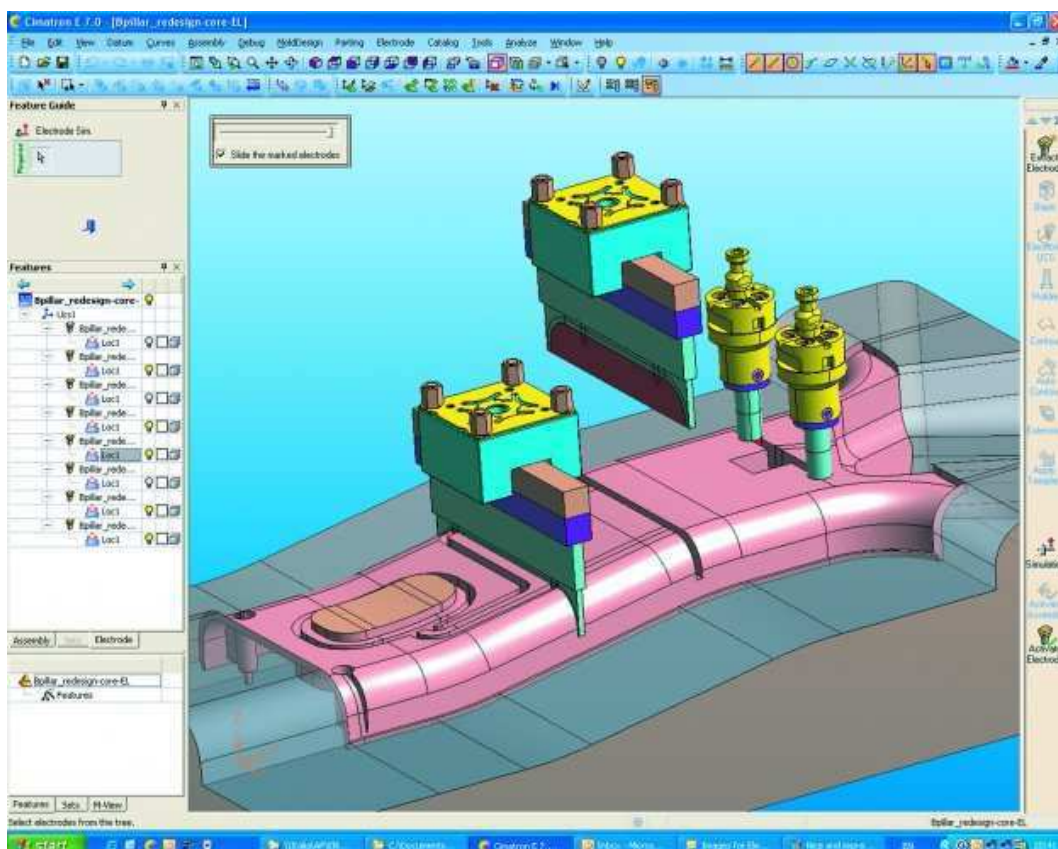
- 1 – nástrojová elektroda
- 2 – pracovní vana
- 3 – dielektrikum
- 4 – obrobek
- 5 – přívod dielektrika
- 6 – odsávání dielektrika

Obr. 1.11 Přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu - vyplachování³.

1.1.4 Nástrojové elektrody

Jako nástroje se u elektroerozivního obrábění používají nástrojové elektrody, které jsou důležité z hlediska technického (určují přesnost rozměrů, jakost obrobenej plochy a výkon obrábění) i ekonomického. Nástrojová elektroda se navrhuje a konstruuje pro každý případ obrábění samostatně. Náklady na její zhotovení činí mnohdy až 50% z celkových výrobních nákladů³.

Výroba elektrod je časově náročná, vyžaduje velkou přesnost a zpomaluje produkci forem. Nástrojárny, které chtějí obstát v konkurenčním prostředí tržní ekonomiky, potřebují systémové aplikační řešení určené přímo pro návrh a výrobu elektrod. Používání kompletního softwarového řešení (např. : Cimatron Electrode Solution obr.1.12) pro konstrukci elektrod ve výrobním procesu. Umožňuje vytvoření modelu elektrody včetně výkresu a dokumentace přizpůsobitelné potřebám zákazníka, hladkou integraci do NC kódu a automatické EDM programování. Podstatně usnadňuje celý proces od návrhu k výrobku a minimalizuje počet nezbytných kroků. Zefektivňuje přenos dat uvnitř organizace a redukuje pravděpodobnost chyb a množství opakujících se operací¹⁶.



Obr. 1.12 Cimatron Electrode Solution podstatně usnadňuje celý proces od návrhu elektrody k výrobku¹⁶.

Velmi důležité je při návrhu nástrojové elektrody volit pečlivě použitý materiál³. Ten se volí podle materiálu obrobku, použitého stroje, způsobu výroby a opotřebování během daného procesu. Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobitelnost, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se při vlastní práci nedeformoval⁵.

Materiály pro výrobu elektrod (tab.1.1)³:

- Kovové: elektrolytická měď, slitina wolframu a mědi, ocel, mosaz slitina wolframu a stříbra, slitina chromu a mědi
- Nekovové: grafit
- Kombinované: kompozice grafitu a mědi.

Vybrané materiály podle účelného použití nástrojových elektrod v návaznosti na danou úlohu obrábění jsou uvedeny v tabulce 1.2.

Tab. 1.1 Materiály nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění⁵.

Grafit	Je nejčastěji používaný materiál. Snadno se obrábí, vykazuje dobré charakteristiky opotřebení a je málo citlivý na tepelné výkyvy. Při hrubovacích pracích se opotřebení elektrody pohybuje kolem $\eta = 1\%$ a při dokončování $\eta = (5 \div 10) \%$. Díky své hmotnosti lze realizovat velmi rozměrné elektrody, které se využívají například při obrábění forem nárazníků automobilů. Obráběním grafitu lze vytvořit vysoké lamely široké pouze 0,1 mm.
Měď	Má příznivé charakteristiky opotřebení stejně jako grafit. Mědí se obrábí veškeré karbidy. Lze dosahovat drsnosti obrobeneho povrchu lepší než $Ra = 0,5\mu m$.
Měď - wolfram a stříbro - wolfram	Jsou to nákladné materiály. Nejedná se o pravé slitiny. Wolfram je lisován a spékán s mědí nebo stříbrem. Podíl wolframu se pohybuje v rozmezí (50 až 80) %. Vysoké procenta wolframu znamenají malé opotřebení elektrody (třikrát až pětikrát nižší oproti měděné elektrodě) avšak opracování je obtížnější. Tento materiál nemůže být tvarován po slinování, protože je velmi křehký. Používá se na obrábění hlubokých drážek, oceli, slinutých karbidů a karbidů wolframu.
Měď a grafit	Jedná se o grafit s mědí. Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit, je výhodný pro obrábění karbidu wolframu.
Mosaz	Je relativně levný a snadno obrobitelný materiál. Z hlediska opotřebení není výhodný. Dnes se nahrazuje především grafitem nebo mědí.
Wolfram	Se používá pro obrábění slinutého karbidu a výrobu malých děr, tj. menších než 0,2 mm.

Tab. 1.2 Volba materiálu elektrody pro hrubování (H) a obrábění načisto (D)³.

Materiál elektrody	Materiál obrobku	Operace obrábění	Jakost opracované plochy	Poznámka
wolframkarbid	ocel	H	střední	malý úběr
		D	dobrá	
mosaz	ocel	H	dobrá	vhodné pro výrobu malých otvorů
		D	dobrá	
měď	hliník	H	dobrá	malý úběr
		D	dobrá	
mosaz	titan	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď	litina	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď	korozivzdorná ocel	H	střední	stabilita oblouku u některých jakostí ocelí je nejistá
		D	střední	
měď	wolframkarbid	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď-wolfram	ocel	H	dobrá	vhodné pro malé vysoce přesné lisovací nástroje
		D	dobrá	
slitina mědi	wolframkarbid	H	dobrá	vhodná pro výrobky z karbidu wolframu
		D	dobrá	
grafit	litina	H	dobrá	vyšší úběr při záporné polaritě, větší opotřebení elektrody
		D	dobrá	
grafit	měď	H	střední	malý úběr
		D	střední	
grafit	rychlořezná ocel	H	střední	střední úběr
		D	střední	
grafit	korozivzdorná ocel	H	střední	dobrý úběr
		D	střední	
grafit	ocel	H	dobrá	dobrý úběr
		D	dobrá	
grafit	wolfram	H	střední	střední úběr
		D	střední	

Dalším důležitým aspektem je způsob upínání ve vřetenu podle použitého stroje. U strojů s automatickou výměnou elektrod také uložení a identifikace elektrody v zásobníku nástrojů³.

Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu. U elektroerozivního obrábění se na elektrodě objevují a hodnotí opotřebení boků, opotřebení rohů a opotřebení konce elektrody. Z těchto druhů opotřebení je opotřebení rohů elektrody nejvýznamnější kritérium pro její úpravu (orovnáím)⁵.

U moderních elektroerozivních strojů s automatickou výměnou nástrojových elektrod je výhodné rozdělit celkový tvar obráběné dutiny na jednodušší, snadněji a přesněji vyrobitelné tvary: kruhy, obdélníky, čtverce, trojúhelníky apod. Další možnost zjednodušení tvaru nástrojové elektrody poskytuje CNC řídicí systém, který umožňuje vhodnou kombinací tvaru a pohybu elektrody vyrobit tvarově velmi složité dutiny³.

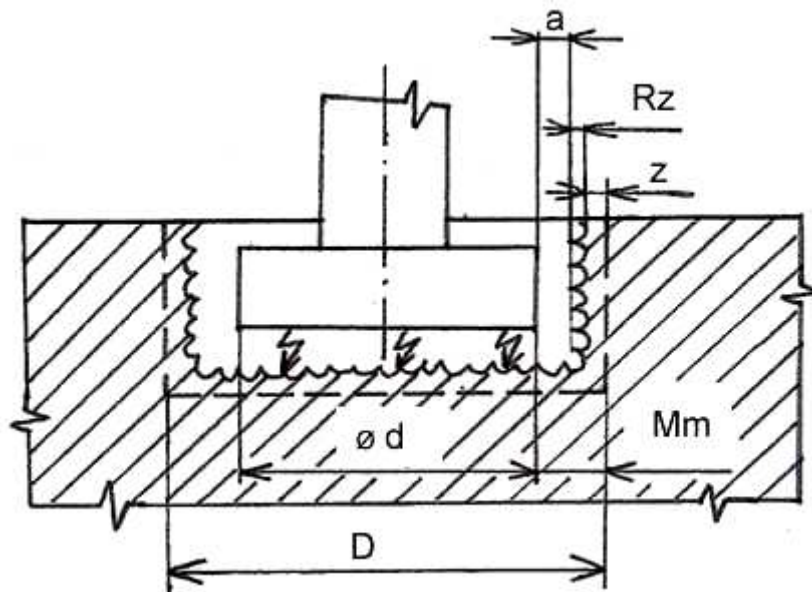
Při stanovení rozměrů nástrojových elektrod se vychází z ³:

- požadovaného rozměru dutiny
- velikosti pracovní mezery, která je funkcí pracovních parametrů generátoru (volí se z podkladů dodávaných výrobcem strojů)
- požadované drsnosti obrobeného povrchu, která je funkcí pracovních parametrů generátoru a tvarové chyby vzniklé např.: při hrubování (dané způsobem vyplachování, tvarem dutiny apod.)
- tloušťky narušení obrobeného povrchu - má význam pouze při velkých energiích výbojů (obvykle dosahuje hodnot 0,005 až 0,01 mm)
- minimální hodnoty, o kterou musí být nástroj menší, aby se dosáhlo požadovaného rozměru dutiny. Při výrobě ostrých rohů je nutná korekce tvaru nástrojové elektrody.

Příklad stanovení rozměru hrubovací elektrody na hloubení dutiny kruhového tvaru (obr. 1.13.)³:

$$d = D - 2(a + R_z + z) = d - 2M_m . \quad (1.1)$$

kde: d – průměr nástrojové elektrody [mm]
 D – požadovaný rozměr dutiny [mm]
 a – velikosti pracovní mezery [mm]
 R_z – maximální aritmetická úchylka obrobeného povrchu [mm]
 z – tloušťka narušeného povrchu [mm]
 M_m – minimální hodnota, o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru dutiny [mm]

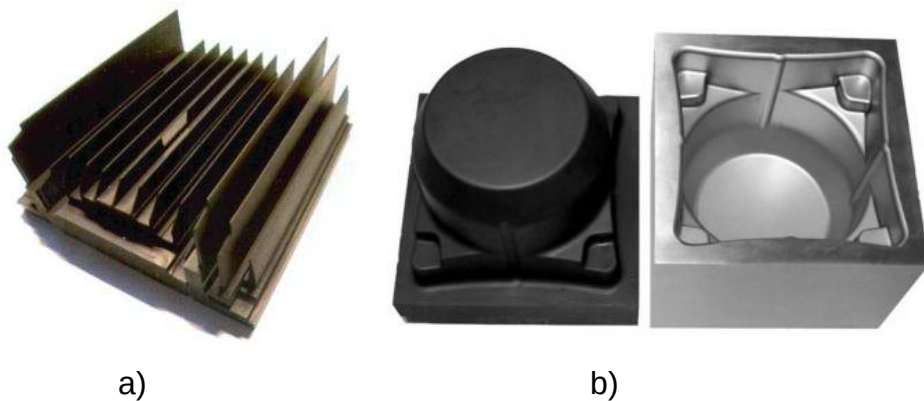


Obr. 1.13. Stanovení rozměru hrubovací nástrojové elektrody³.

Stanovení rozměru dokončovací elektrody je dáno vztahem³:

$$d = D - 2a . \quad (1.2)$$

K základním metodám zhotovování nástrojových elektrod patří obrábění, lisování, lití, prášková metalurgie, stříkání a galvanoplastika⁵.



Obr. 1.14. Nástrojové elektrody

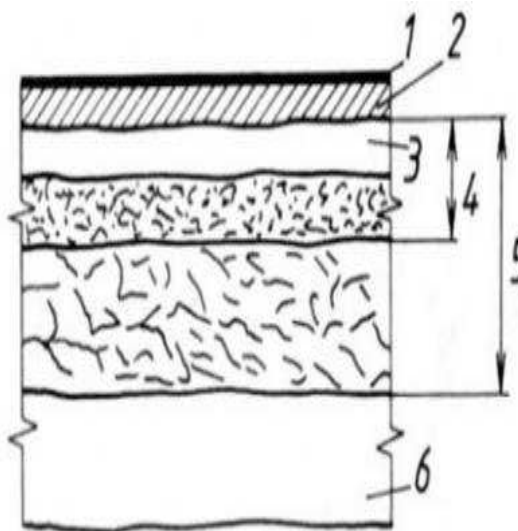
a) Elektroda s ostrými hranami vyrobená z grafitu³

b) Grafitová elektroda a ocelový obrobek - hloubka 130 mm, Ra 1,69¹⁰

1.1.5 Dosahované parametry

Výroba složitých tvarových povrchů při hloubení dutin zápustek a forem se technologicky liší v provedení nástrojové elektrody a ve tvaru obráběného povrchu. Kvalita povrchu opracované plochy je dána její drsností a také jejím stavem, tzn. složením. Dosahovaný úběr materiálu obrobku činí 8 až 10 mm³/min. Drsnost povrchu dosahovaná elektorerozivním obráběním je v rozmezí Ra 50 - 0,2 μm a úzce souvisí s energií jednotlivých výbojů. Dosahovaný stupeň přesnosti je v rozmezí IT 6 až 12⁵.

Obecně se dá konstatovat, že nejlepší kvality povrchu se dosahuje při nižších hodnotách proudu, krátkých impulzech a vysokých frekvencích výbojů. Kvalitní povrch s sebou nese zvýšené opotřebení nástrojové elektrody a s rostoucí energií výbojů i stav povrchové vrstvy. Drsnost povrchu a stav povrchové vrstvy vymezuje oblast použití elektroerozivního obrábění. Studium obrobků byly zjištěny změny povrchových vrstev, jejichž rozložení je zachyceno na obrázku (obr 1.15). Ovlivnění povrchové opracované plochy může být až do hloubky 10 - 300 μm⁷.



Legenda :

- 1 – mikrovrstva tvořená chemickými sloučeninami vzniklými difuzí 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 základní materiál obrobku)
- 5 – pásmo plastické deformace vyvolané rázy pulzů
- 6 – základní materiál obrobku

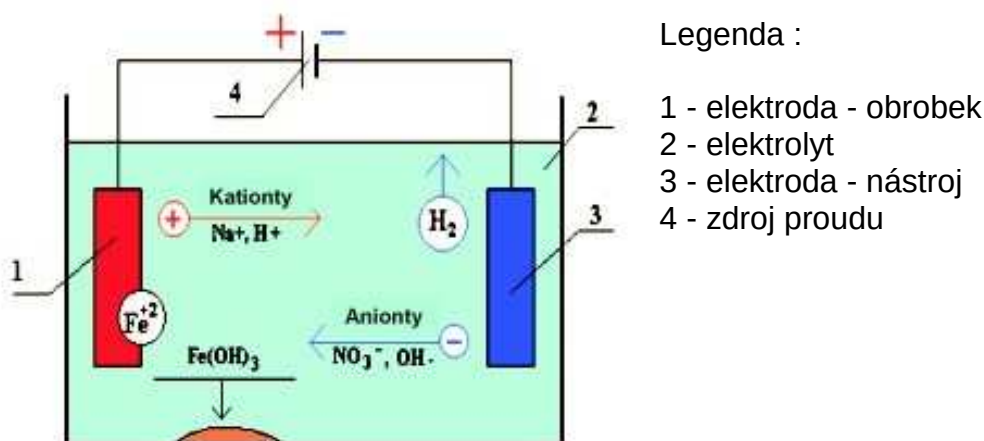
Obr. 1.15 Rozdělení impulsu dle tvaru³.

1.2 Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění je metoda beztržiskového (bezsilového) řízeného obrábění elektricky vodivých materiálů. Využívá poznatků o působení elektrického proudu na elektrolyt, podstatou metody je fyzikální jev zvaný elektrolýza². Hlavní zákonitosti elektrochemického obrábění jsou dány Faradayovým zákonem o elektrickém náboji, který říká, že množství odstraněného materiálu je úměrné velikosti proudu a času jeho působení. Dále pak teorií elektrolytů a termodynamikou galvanických článků^{2,17}.

1.2.1 Princip metody

Elektrické napětí je aplikované na kovové elektrody ponořené do vodného roztoku neutrální soli (obr. 1. 16). Obrobek (anoda) je připojená ke kladnému pólu zdroje energie, elektroda (katoda) k zápornému pólu. Ukázka schématu elektrochemického článku v kterém anoda i katoda jsou železné elektrody (obr. 1. 14). Jako elektrolyt je použit vodní roztok dusičnanu sodného jehož molekuly se dělí do dusičných a sodíkových iontů. Kromě toho vznikají další produkty odloučení: H^+ a OH^- ¹⁷.



Obr. 1.16 Princip elektrochemického obrábění¹⁷.

Když se zapne elektrické napětí do tohoto elektrochemického článku, začne redukční proces mezi katodou a anodou. Nebo-li dochází k reakci, při níž se kationty elektrolytu slučují s anionty kovu na povrchu anody a postupně rozrušují (ubírají) kov z anody. Anoda kopíruje tvar katody (nástrojové elektrody). Atom železa vydá dva elektrony a ty projdou krystalovou mřížkou do elektrolytu ve formě podvojných iontů Fe^{+2} . Tyto ionty při interakci s dusičnými ionty vytvoří rozpustnou směs dusičnanu železa $[Fe(NO_3)_2]$. V důsledku reakce mezi dusičnanem železa a ionty OH^- se nejdříve vytvoří hydroxid železitý $[Fe(OH)_2]$, a ten se potom transformuje do $[Fe(OH)_3]$, který se vysráží na dně nádrže jako kal. Ten je lehce odstranitelný pomocí filtru, separátoru nebo se jednoduše vypustí ze dna nádrže¹⁷.

Tento proces se během procházení proudu neustále opakuje. Ionty vodíku jsou přijímány katodou a spojují se do atomů vodíku, které se sloučí do plynné molekuly vodíku. Ionty sodíku se v roztoku nijak nerozkládají a procesu se neúčastní. Teoreticky se při rozkládání elektrickým proudem kromě elektrické energie ztrácí pouze voda¹⁷.

Měrný úběr materiálu závisí na minimální pracovní mezeře mezi elektrodami, jejím udržení na stále stejné velikosti (cca 0,025 + 1,3 mm), na teplotě, rychlosti proudění a složení elektrolytu². Proud se mění v rozmezí 50÷20000 A s proudovou hustotou 0,2 + 3 A/mm² a 30 V stejnosměrného proudu v mezeře mezi nástrojem a obrobkem. Elektrolyt proudí touto mezerou rychlostí 30 ÷ 60 m/s a je ovládán čerpadlem, které vyvíjí tlak 70÷2 800 KPa. Teplota elektrolytu se mění od 24 do 65°C. Oddělené částice jsou zachycovány z elektrolytu a filtrovány pro další použití elektrolytu⁵.

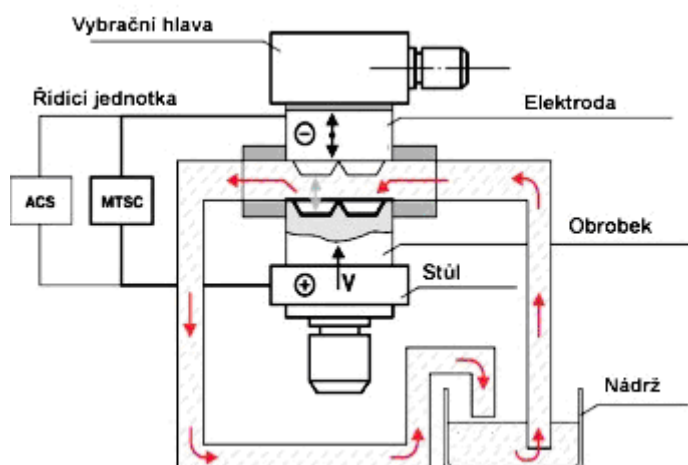
Elektrolyty jsou obvykle vodní roztoky anorganických solí, jako je chlorid sodný, chlorid draselný, nitrid sodný, dusičnan sodný nebo chlorečnan sodný apod. Elektrolyt může obsahovat i jiná aditiva. Speciální elektrolyty jako jsou např. velmi aktivní kyseliny(kyselina chlorovodíková) nebo zásady (hydroxid sodný), mohou být použity pro speciální zařízení elektrochemického obrábění, nebo pro opracování speciálních materiálů. Elektrochemické obrábění lze použít pro obrábění řady součástí včetně těch, které není možné obrobit standardními metodami. Úběr materiálu není vůbec závislý na tvrdosti obrobku. Jedná se o materiály tvrdé, jako je kalená ocel, žárupevné slitiny, tvarované plochy a hluboké díry^{2,5}. Mezi materiály, které jsou elektrochemickým obráběním špatně obrobitelné, patří šedá litina (téměř neobrobitelná), slitiny s velkým obsahem uhlíku a duraly obsahující křemík. V průmyslu existuje řada variant využití principu elektrochemického obrábění v různých technologiích obrábění²:

- obrábění s nuceným odstraňováním produktů vzniklých chemickými reakcemi:
 - o obrábění proudícím elektrolytem:
 - ☐ hloubení tvarů a dutin zápusťek a forem
 - ☐ hloubení otvorů malých průměrů
 - ☐ odstraňování otřepů
 - ☐ dělení materiálů
 - o s mechanickým odstraňováním (někdy označované jako anodomechanické obrábění):
 - ☐ broušení
 - ☐ lapování
 - ☐ honování
- povrchové obrábění bez odstraňování produktů vzniklých chemickými reakcemi:
 - o leštění a povrchové značení

Z tohoto hlediska se budeme dále věnovat pouze obrábění proudícím elektrolytem, které se používá pro hloubení tvarů a dutin zápustek a forem.

1.2.2 Elektrochemické hloubení dutin zápustek a forem proudícím

Elektrochemické obrábění proudícím elektrolytem se také používá při hloubení dutin forem a zápustek (obr. 1.17)².



Obr. 1.17 Schéma zařízení pro elektrochemické hloubení dutin¹⁷

Během obrábění se obrobek pohybuje směrem nahoru s upínacím stolem rychlostí $V = 0.01 - 0.45 \text{ mm/min}$ a kopíruje tvar elektrody do obrobku s přesností 0.01 mm ¹⁷. Velikost přísuvové rychlosti závisí na²:

- pracovním proudem
- velikosti a tvaru obráběné plochy
- rychlosti rozpouštění anody
- přípustné výši teploty elektrolytu

Obrábění forem je uskutečněné pomocí stejnosměrných pulsů z MTCS generátoru. Jako nástroje se používá elektroda, která je upnuta na vibrační hlavě, která kmitá frekvencí F a s rozkmitem A . Elektrické proudové impulzy generátoru jsou synchronizované s kmitáním elektrody. Nastavená pracovní mezera je řízena ACS - adaptivním řídicím systémem. Nástroj a obrobek jsou odděleny pracovní mezerou, která je před nastavena v rozmezí $0,05$ až 2 mm . Pracovní mezerou protéká elektrolyt rychlosti 10 až 50 m/s pod tlakem až $2,5 \text{ MPa}$. V tenké vrstvě elektrolytu dochází za pomoci protékajícího elektrického proudu k elektrochemickému procesu vyplavování materiálu obrobku¹⁷.

Přívod elektrolytu mezi obrobek a nástroj (elektrodu) musí být plynulý, elektrolyt musí rovnoměrně vyplňovat celou pracovní mezeru². Vyplavené částice jsou vyplachované z pracovní mezery a odtékají do pracovní nádrže kde se usazují¹⁷.

Poslední desetiletí umožnilo další výrazný vývoj nové generace "ekologicky nezávadných elektrochemických strojů"¹⁷. Tyto moderní stroje (obr.1.16a) mají CNC řídicím systémem, který řídí jednotlivé procesy. Jako je řízení směru a rychlosti pohybů, polohy pracovního stolu, pracovních parametrů generátoru, přívodu elektrolytu a kontrolu probíhající činnosti. Řídicí systémy umožňují snadné naprogramování stroje².

Příkladem moderního obráběcího stroje, který se snaží využívat všechny dostupné technologie je elektrochemické hloubička modelu TEHO-4000PM od ruské firmy STANKOFINEXPO (obr. 1. 16a)¹⁷.



a)



b)



c)

Obr. 1. 18. a) Elektrochemické hloubička model TEHO-4000PM od ruské firmy STANKOFINEXPO¹⁷; b) CNC řídicím¹⁷; c) Pracovní prostor¹⁷

Stroj je určen pro tvarování obrobků z konstrukční, nástrojové, nerezavějící a žáruvzdorné oceli. Také lze obrábět barevné kovy měď, hliník a jejich slitiny, mosazi a bronz, litinu a drahé kovy. Mechanismus úběru materiálu při elektrochemickém obrábění je založený na elektrolytickém procesu¹⁷.

Přesnost výroby je poskytována špičkovými komponenty stroje a dosahuje drsnosti Ra 2,5 - 1,6μm a stupně přesnosti IT9 - 12^{5,17}. Základem stroje TEHO-4000PM je široko rozsahový pulzní generátor s mnohem vyšší úrovní anodového rozpouštění kovů. K vybavení patří také filtrační a chladicí jednotka elektrolytu, která používá čerpadlo GRUNDFOS. To je instalováno v souladu s evropskými požadavky na hluk v místnosti. Vysoce přesný pohyb stolu řídí moderní elektrický krokový motor SIEMENS s krokem 0,05 mm/min¹⁷.

Stroj řídí počítačový systém ADVANTECH s funkcí automatického udržování amplitudy napětí a procesních parametrů. Velikost upínacího prostoru X, Y, Z 700 x 600 x 440 mm (obr.1.16c). Veškeré informace o aktuálních parametrech se zobrazují na obrazovce (obr.1.16b)¹⁷.

1.2.3 Nástrojové elektrody

Kritickým bodem při uplatňování elektrochemického obrábění je materiál a tvar nástroje. Při řešení tohoto problému se většinou uplatňují empirické postupy⁵. Výpočet tvaru nástroje je uváděn ve specializovaných publikacích². Konstruktor musí stanovit možné úchytky a toleranci mezery, aby bylo dosaženo vysokého úběru materiálu. Rozměry nástroje musí být rozdílné od zrcadlového obrazu, aby bylo možno dosáhnout překrytí, které se pohybuje v rozmezí 0,025 až 1,3 mm podle průtoku elektrolytu. Součást i katoda musí mít odpovídající proudovou kapacitu⁵. Vždy je však nutno vypočítaný tvar experimentálně ověřit. Chceme-li dosáhnout přesný tvar obráběné plochy, je nutné provést korekci tvaru nástroje, případně na místa, kde by došlo k nežádoucímu úběru materiálu, nanést na boky nástroje izolační vrstvu².

Nástroj může být izolován různým způsobem v závislosti na jeho tvaru. Nejvýhodnější metodou je nanášení izolací stříkáním. Nejčastěji používané materiály jsou teflon, epoxidy, povlaky nanášené ve formě prášku a další. Povrch nástroje je vesměs leštěný. Materiál použitý pro tyto nástroje musí mít dostatečnou tuhost, musí být snadno obrobitelný, mít dobrou elektrickou a tepelnou vodivost a být odolný proti chemickému působení elektrolytu². Nástroje se vyrábějí z mosazi, mědi, bronzu, korozivzdorné oceli, titanu, grafitu a kompozice (složené z grafitu a mědi)^{2,5}. Jako optimální se doporučuje bronz nebo mosaz⁵. Lze také jednoduše použít k obrábění již hotovou vyrobenou součást (obr. 1.19)¹⁷.



a)



b)

Obr. 1.19 a) Měděná elektroda a ocelový obrobek¹⁷
b) Klíč využitý jako elektroda na ocelový razník¹⁷

1.3 Laserové obrábění

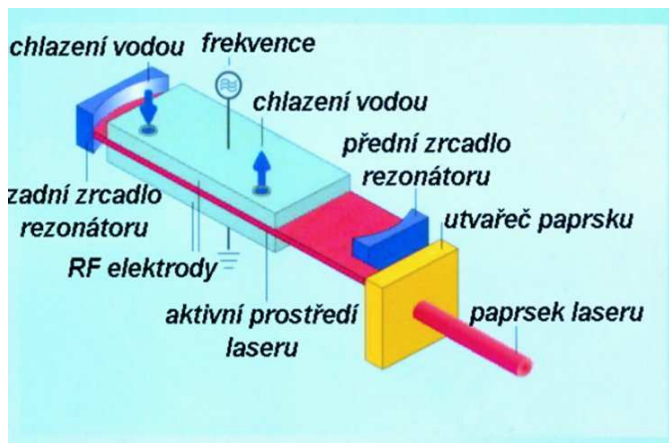
Při laserovém obrábění dochází k odebírání materiálu účinkem úzkého paprsku silného monochromatického světla soustředěného na velmi malou plošku. V místě dopadu se energie světelného záření mění na energii tepelnou o hustotě energie řádově 10^8 W/mm^2 . Teplota, která se přitom vyvine (řádově 10^4 °C) stačí k roztavení, popř. k odpaření materiálu obrobku⁵.

1.3.1 Princip laseru

LASER- z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation znamená zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Definice říká, že laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního (vnitřně uspořádaného, sfázovaného optického záření), které vyniká extrémní monochromatickostí (všechny fotony mají stejnou vlnovou délku a frekvenci), nízkou divergencí svazku (všechny fotony laserového záření se pohybují stejným směrem), vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie. Tyto vlastnosti neposkytuje žádné jiné záření, kromě záření generované laserem¹⁸.

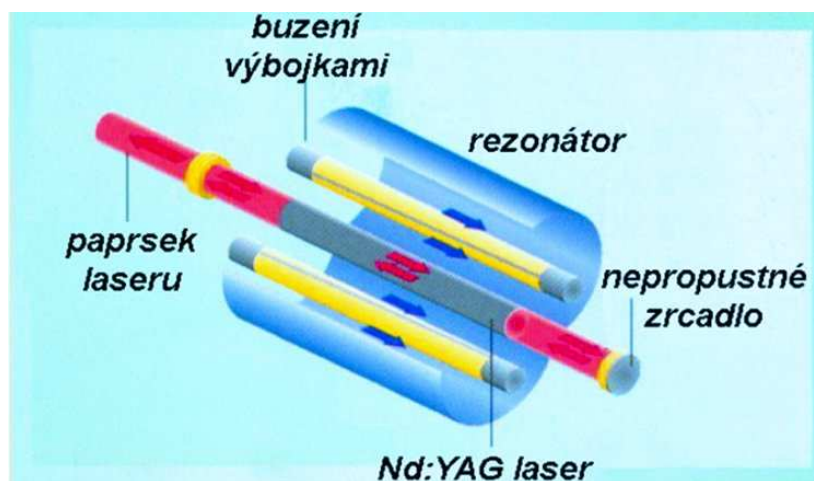
V dnešní technické společnosti je mnoho různých druhů laserů. Ty můžeme rozlišovat podle mnoha hledisek např.: podle skupenství aktivní látky (laserového média), vlnové délky záření, režimu paprsku, výkonu, konstrukce zařízení, použití apod. Podle aktivního prostředí je lze rozdělit např. na : plynové, kapalně, pevnolátkové a lasery využívající svazky nabitých částic. Pro laserové obrábění se nejčastěji používají plynové a pevnolátkové lasery. Proto se na tyto druhy aktivního prostředí zaměříme.

Aktivní prostředí plynového laseru je v plynné fázi, tyto lasery pracují v kontinuálním i pulzním režimu. Do této skupiny patří helium-neonový laser, měďný laser, jódový laser, argonový laser, helium-kadmiový laser, vodíkový laser, dusíkový laser, excimerové lasery a CO₂ lasery. V technologii opracování materiálů se používají především CO₂ lasery (obr. 1.20) pro řezání a svařování a excimerové lasery pro popisování, mikroobrábění keramických materiálů, obrábění diamantu, čištění povrchů strojních součástí i uměleckých děl a vrtání děr od průměru $10 \mu\text{m}$ ¹⁹.



Obr. 1.20 Princip CO₂ laseru¹⁹.

Aktivním prostředím v pevnolátkovém laseru je pevná opticky propustná látka - krystaly, oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty, tungstáty, molybdáty, vanadáty, beryláty, sklo a keramika. Do této skupiny patří rubínový laser, neodymový laser, Nd:YAG laser, Nd:YLF laser, Er:YAG laser a Ho/CTH:YAG laser. Dnes nejvíce používaným typem pevnolátkového laseru je Nd:YAG laser (obr. 1.21). Laser pracuje jak v pulzním, tak kontinuálním režimu. Je vhodný pro vrtání, sváření, řezání, gravírování, popisování¹⁹.



Obr. 1.21 Princip Nd:YAG laseru¹⁹.

1.3.2 Gravírování laserem

Podstatou metody je odpařování materiálu v místě, kde působí paprsek laseru. Gravírování se používá pro vytváření jednoduchých i velmi složitých reliéfů, především do kalených ocelí např.: do forem pro stříkání plastů a zápustek. Laserové gravitování je však velmi omezeno hloubkou je proces podobný značení, s tím rozdílem, že při opakovaném úběru dosáhneme větších hloubek řádově v mm. Takže spíše patří k dokončování forem například po frézování. Kdy se do vyrobené formy gravitováním vytvoří požadovaný reliéf nebo prostorový obrazec. Gravírování může být v rovině, v několika různých hloubkách nebo lze vytvářet prostorové reliéfy. Příklad plastického prostorového obrazce je na (obr. 1.22)¹⁹.



a)

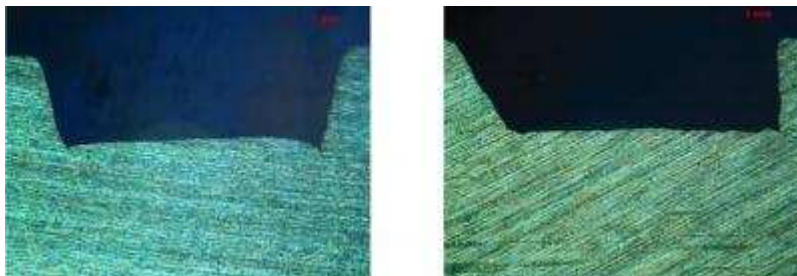


b)

Obr. 1.22 Gravírování reliéfu koně¹⁹

a) výsledek gravitování – dutina; b) otisk

Kůň byl gravírován v oceli 19 436 do hloubky 0,5 mm. Model byl na počítači "rozřezán" na 50 vrstev, tloušťka jedné vrstvy odebírané paprskem laseru byla 0,01 mm. Při gravírování hlubokých dutin je nutné řešit technologii vytváření kolmých stěn dutiny. Lze však také kromě kolmých stěn i ryby (stěny se záporným sklonem) (obr. 1.23)¹⁹.



Obr. 1.23 Dutiny obrobené laserem před a po korekci pravé stěny dutiny (ocel 14 220)¹⁹.

Pro gravírování do kovových materiálů se používají především pevnolátkové lasery typu Nd:YAG lasery. Příkladem stroje využívající laser pro gravírování forem po frézování je obráběcí centrum MCVL 1000 Laser (obr. 1.22) s vestavěným laserem které dodává česká firma Kovosvit MAS.



Obr. 1.24 Obráběcí centrum MCVL 1000 Laser s vestavěným laserem o výstupním výkonu 50 W¹⁷.

Základem tohoto obráběcího centra je běžně dodávané a v praxi osvědčené frézovací centrum, u kterého je na vřeteníku vedle vřetena umístěn Nd:YAG laser. Kromě toho je stroj vybaven souvisle řízeným otočným a naklápěcím stolem. Toto uspořádání umožňuje provádět na jednom stroji na jedno upnutí obrobku až pětiosé obrábění běžnými řeznými nástroji, rychlostní obrábění a následně laserové technologie, např.: gravírování nebo popisování paprskem laseru. Stroj se uplatní v kusové i sériové výrobě přesných, tvarově složitých součástí, při výrobě forem, zápusťek a při komplexním obrábění plochých a skříňových součástí z kovových materiálů i plastů¹⁹.

Z hlediska třískového obrábění lze frézovat libovolné prostorové plochy rovinné, šikmé a kruhové, vrtat a vyvrtávat přesné otvory viz kapitola 1.4.

Pomocí vestavěného laseru o výstupním výkonu 50 W se rozšiřují možnosti stroje nejen o gravírování jemných tvarově složitých obrazců, ale je možné rovněž výrobky označovat požadovaným popisem, čárovým kódem nebo logem výrobce¹⁹.

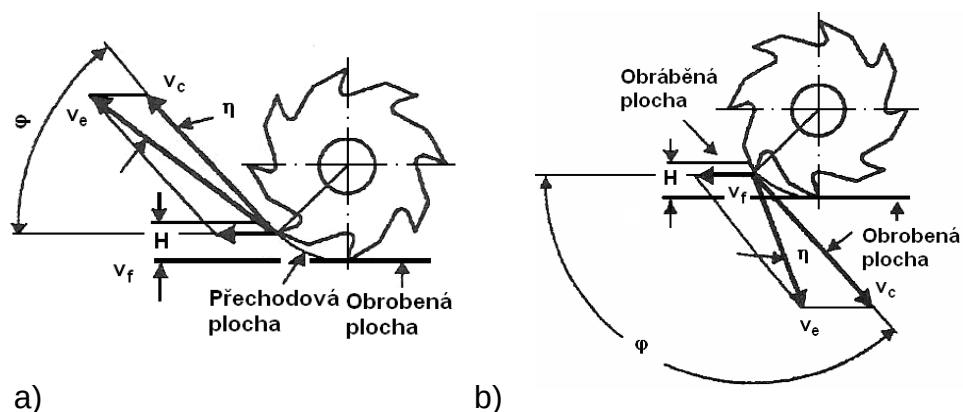
Další technologií, pro použití laseru ve výrobní technologii, je leštění povrchů. Leštění paprskem laseru má výrobcům forem umožnit náhradu ruční práce automaticky pracujícím strojem. Kdy v testech byla dosažena drsnost na nástrojových ocelích Ra 0,2 - 3 μm ¹⁹.

1.4 Frézování

Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebírá břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky⁵.

1.4.1 Princip frézování

Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozliší frézování válcové (frézování obvodem) a frézování čelní (frézování čelem). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako frézování okružní a planetové. U všech způsobů je důležitá volba kinematiky obráběcího procesu. Ta se rozlišuje na frézování nesousledné (protisměrné) a sousledné (sousměrné) (obr.1.25)⁵.

Obr. 1.25 Kinematika válcového frézování⁵

a) nesousledné frézování; b) sousledné frézování

Při frézování v CNC řízených obráběcích centrech vychází z planetové frézování. Pohyb frézy může být řízen u těchto strojů po drahách, takže lze obrábět části nebo i celé tvarové plochy. Tento způsob se využívá pro frézování zápustek, forem a složitých tvarových výrobků (např.: části turbín atd.)⁵.

1.4.2 Frézování dutin zápustek a forem

Frézování je v dnešní době jednou z neuplatňovanějších technologií výroby zápustek a forem. S rostoucími nároky zákazníků, se technologie snaží co možná nejvíce ulehčit a urychlit cestu k dosažení co nejkvalitnějšího výsledku. Velké možnosti jsou dobře patrné např. v typech používaných materiálů. Obrovský posun vpřed v poslední době zažívá vývoj stále lepších a progresivnějších nástrojů pro obrábění, které umožňují dosáhnout vyšších rychlostí a pracovních posuvů, a také kvalitního povrchu obrobené plochy. Tomu také odpovídá vývoj samotných obráběcích strojů a jejich řídicích systémů. A určitě nelze zapomenout na CAD/CAM pracoviště, která mají na svědomí, že stroj ožije a převede naši vizi do reality. I zde je rozvoj díky rychlosti výpočetní techniky opravdu obrovský²⁰.

Návrh tvaru formy či zápustky se provádí v 3D CAD systémech např.: Autodesk Inventor, SolidWorks, Catia apod. Kde se vytvoří model formy. Tento model se posléze na importuje do CAM systému např.: PowerMILL, SURFCAM, Kovoprog apod. Kde se pomocí drah vytvoří vlastní výrobní NC program s danými nástroji a pro daný typ stroje. Pro potřeby výrobců forem je ze všeho nejdůležitějším faktorem při návrhu a výrobě forem čas, respektive maximální možné zkrácení času stráveného při práci s návrhem konstrukcí formy stejně jako s dalšími etapami její výroby. Proto se snaží využívat specializované CAD/CAM softwary. Např.: CimatronE, Tebis CAD, VISI CAD/CAM atd. Specializovaný CAD/CAM software by měl v první řadě umožnit (mimo jiné) především dostatečnou, tzn. tu nejvyšší možnou rychlost při návrhu modelu a 3D konstrukci formy. Systém by měl umožňovat automatické provedení hrubého návrhu chlazení, vyhazovačů a vtokové soustavy, a toto předběžné řešení by mělo být snadno modifikovatelné bez komplikací by tak bylo možné vytváření alternativních variant²¹.

Výsledkem je potom rychlé získání koncepce formy ve 3D, kterou lze použít jako prvotní základ pro finální verzi, jež je předložena ke schválení. Zároveň by měl software umět automaticky generovat kusovníky, nabízet možnost před objednání normalizovaných dílů a předložení výchozích polotovarů pro obrábění ještě před definitivním konečného tvaru jednotlivých částí formy. Specializovaný CAD/CAM software pro výrobu forem by měl představovat integrované řešení podporující všechny fáze procesu návrhu, vývoje a výroby formy. Systém tak zastřešuje vše až po finální vygenerování NC kódů pro obrábění a výkresy montážní sestavy²¹.

Výroba zápustek a forem se provádí na moderních CNC obráběcích centrech. Obrábění se uskutečňuje odebráním třísky různými druhy fréz dle požadovaného tvaru formy či zápustky (obr.1.24).



Obr.1.26. Příklad výroby forem na CNC stroji²².

Jak již bylo řečeno CAM systémy umožňují programovat výrobní proces na CNC obráběcích centrech. Každé obráběcí centrum má ještě vlastní řídicí systém např. : Sinumerik, HEIDENHAIN, Fanuc GE atd. dodaný zpravidla výrobcem. Tyto systémy umožňují převést naprogramované dráhy v CAM systému pomocí postprocesoru na daný NC program, kterým se následně řídí obráběcí centrum.

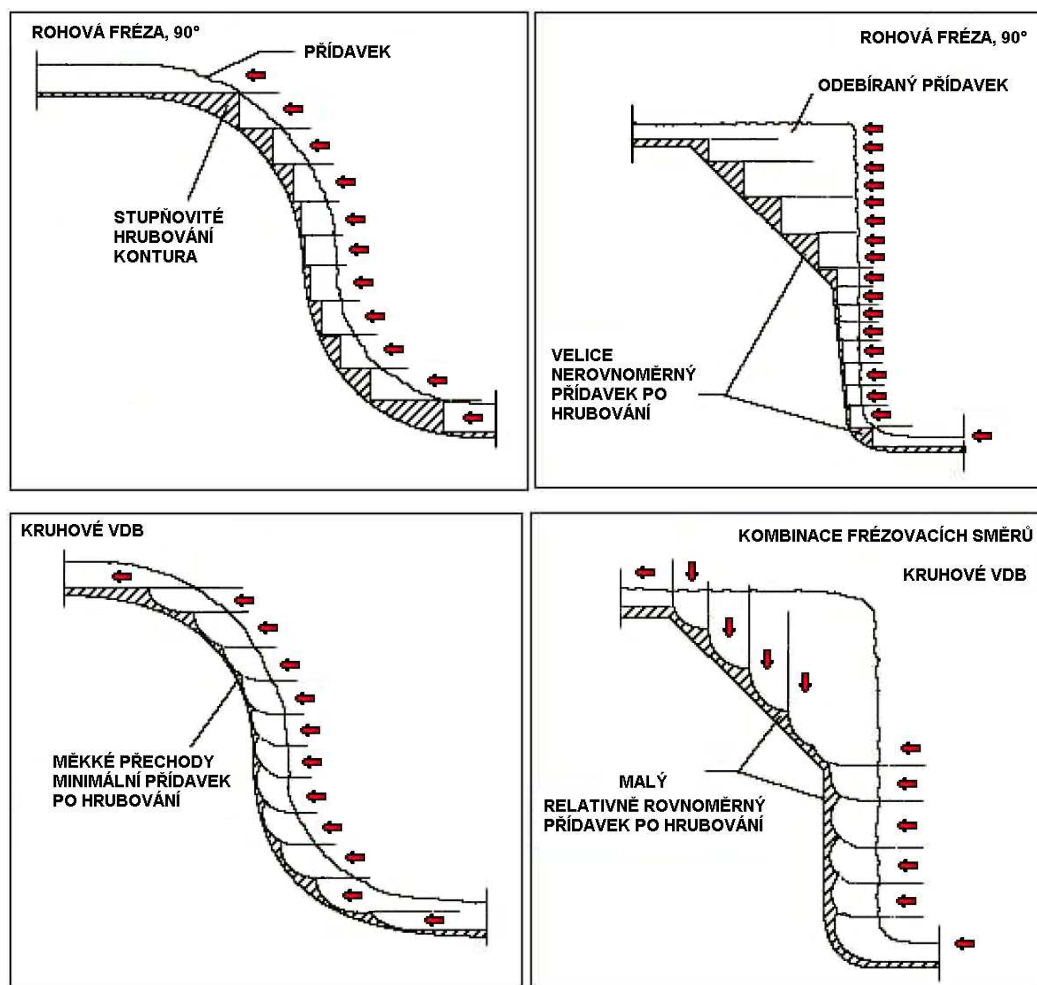
Proto, aby vysokorychlostní tvrdé obrábění bylo možné ekonomicky uplatňovat při výrobě forem a zápustek, musí být striktně dodržovány určité technologické zásady nejen při volbě rezných podmínek, nástrojů apod., ale také při volbě frézovacích strategií. Všechny tyto aspekty nám umožňuje navrhovat CAM systém tak abychom dospěli k nejvýhodnější frézovací strategii k výrobě dané formy. Protože vlastní výroba je zcela závislá především na

frézovací strategii při výrobě forem a zápusťek z materiálů s vyšší pevností a tvrdostí. Tyto strategie se z pravidla dělí na hrubování a dokončování²³.

Kdy cílem hrubování je hospodárně a co nejrychleji odebrat co největší objem materiálu a tím přiblížit konturu pro následné dokončování. Při velmi pečlivém přiblížení se požadované kontuře již při hrubování, je možné v některých případech upustit od předdokončování a značně omezit vlastní dokončování. Velmi často se dosahuje výrazně lepšího přiblížení k cílové tvarové kontuře pomocí nástroje se zaobleným tvarem břitu. Obrábění s nástroji s kruhovým ostřím je však obtížnější na procesní řízení z důvodu zajištění odpovídající procesní spolehlivosti. Hrubování je nejčastěji realizováno pomocí frézovacích hlav s VBD²³.

Z hlediska tvaru proti čtvercovým, popř. kosočtvercovým VBD hovoří kromě špatného přizpůsobení cílové kontuře také poměrně velké radiální síly, které negativně ovlivňují obrobený povrch. Pro použití kruhového tvaru VBD hovoří jejich plynulejší záběr²³.

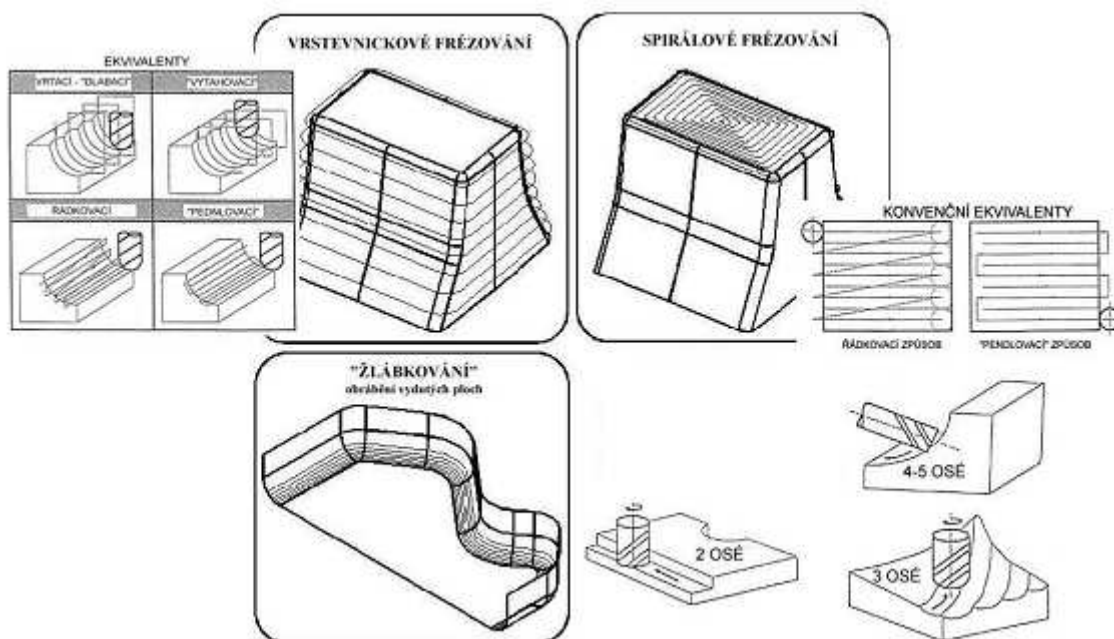
Jsou také s výhodou využívány při víceosém obrábění tvarových ploch a s jejich pomocí lze kombinovat klasické frézování s torickým²³.



Obr. 1.27 Různé příklady hrubovacích postupů²³.

Nepostradatelným předpokladem při frézování ocelí je kontinuální a sousledný záběr břitu frézy. Orientace jednotlivých drah musí být volena též s ohledem na to, aby nedocházelo ke krátkým a prudkým stoupáním či klesáním. Při vysokorychlostním frézování se nejvíce osvědčilo tzv. kapsování (kapsovací frézování), při kterém je kontura zhotovována ve spirálových drahách a lze zde poměrně dobře dodržet rovnoměrné záběrové podmínky při respektování výše uvedených omezení či doporučení²³.

K optimalizaci dokončování bylo vyvinuto velké množství frézovacích strategií, jenž jsou voleny v závislosti na příslušné topografii obráběné plochy (obr.1 28). Nejprve mohou být obrobena přechodové plochy a plochy navazující od nich směrem nahoru (pokud to dovoluje jejich vertikální směr), a to vrstevnicovým způsobem. Při tom mohou být obráběny i překrývající plochy ve směru vrstevnic, čímž jsou zachovány kontinuální dráhy nástroje bez extrémních změn směru a s konstantními záběrovými podmínkami. Pro samostatné plochy nebo soubory ploch, jejichž sklon je velice malý či nulový, je samozřejmě výhodnější použít spirálové frézování, při kterém rovněž lze zachovávat stálé záběrové podmínky. Současně je nutné se vyvarovat prudkým změnám směru pohybu nástroje a záběrových podmínek²³.



Obr. 1.28. Optimální frézovací strategie při obrábění na čisto²³.

Při obrábění částí forem či záпустek, které umožňují použití nástrojů velkých rozměrů, lze dosáhnout velmi malých strojních časů při velmi dobré trvanlivosti břitu nástroje. Technologicky optimální způsob pohybu nástroje je dán jeho řízením orientovaným na dané přídkavky, přičemž jsou zanechávány přídkavky ve směru daných kontur, resp. ve směru pohybu nástroje (žlábkování). Vedle těchto všeobecně použitelných strategií jsou zapotřebí speciální NC funkce k obrábění problematických oblastí, představovaných např. vnitřními rohy nebo úzkými a hlubokými dutinami²³.

Obvyklý způsob obrábění rohů je lineárním pohybem nástroje, což se ale děje při nerovnoměrných záběrových podmínkách. Nejčastěji je používán nástroj, jehož průměr odpovídá požadovanému rádiusu daného rohu. Při této kombinaci ovšem vznikají mnohé komplikace. Při lineárním pohybu musí dojít v zlomovém bodě, sice na velice krátkou dobu, k zastavení pohybu kvůli změně směru posuvu, přičemž otáčky nástroje zůstávají zachovány. Tato situace přináší nadprůměrné třecí teplo a extrémně se zvyšuje náchylnost k vibracím. Tím bývá poškozován jak nástroj, tak i obráběný povrch, a to nejen co se týká jeho drsnosti a přesnosti, ale i vlastní integrity, především u materiálů citlivých na procesní teplo. Při použití nástroje s totožným poloměrem, jako má obráběný roh, dochází též k extrémním záběrovým podmínkám oproti rovinným plochám zhotovovaného dílu, což způsobuje neúměrné namáhání nástroje, při větších hodnotách přídatku v rohu mnohdy i lom nástroje²³.

Poměrně jednoduché řešení spočívá v použití nástroje, jehož průměr je menší než rádius zhotovovaného rohu. Je zde možné využít kruhovou interpolaci a tím se vyhnout zlomovému bodu a zastavení nástroje se všemi jeho komplikacemi. Dnes ještě málo používanou alternativou odebrání materiálu v rozích je také axiální frézování²³.

Při odebrání materiálu je vedle strategie nutno optimalizovat také způsob najetí a vyjetí břitu do řezu či z řezu. Úspěšné najetí břitu do řezu závisí u otevřených kontur nejčastěji na optimálním poloměru přiblížení. Pokaždé, když břit frézy přichází do záběru, je v závislosti na obráběném materiálu, průřezu odřezávané vrstvy a druhu frézování vystaven méně či více šokovému zatížení. První kontakt mezi břitem a obrobkem může ovlivnit celý následující proces řezání a dokonce způsobit destrukci břitu. Vše záleží na tom, ve kterém místě na břitu k prvnímu kontaktu s obrobkem dojde. Všeobecně je vhodné, aby tímto místem byl střed destičky, resp. plochy čela, což je ovlivněno radiální hloubkou řezu²³.

Jako paradoxní se může jevit skutečnost, že břitová destička může být při vyjíždění z řezu značně namáhána. Pokud se jedná o tlakové namáhání, je například VBD z SK velice odolná, ale v případě tahového nebo dokonce ohybového namáhání může dojít k překročení hodnoty pevnosti tohoto materiálu a následně dochází k porušení či destrukci břitové destičky. Zde je rozhodující veličinou opět hodnota radiální hloubky řezu²³.

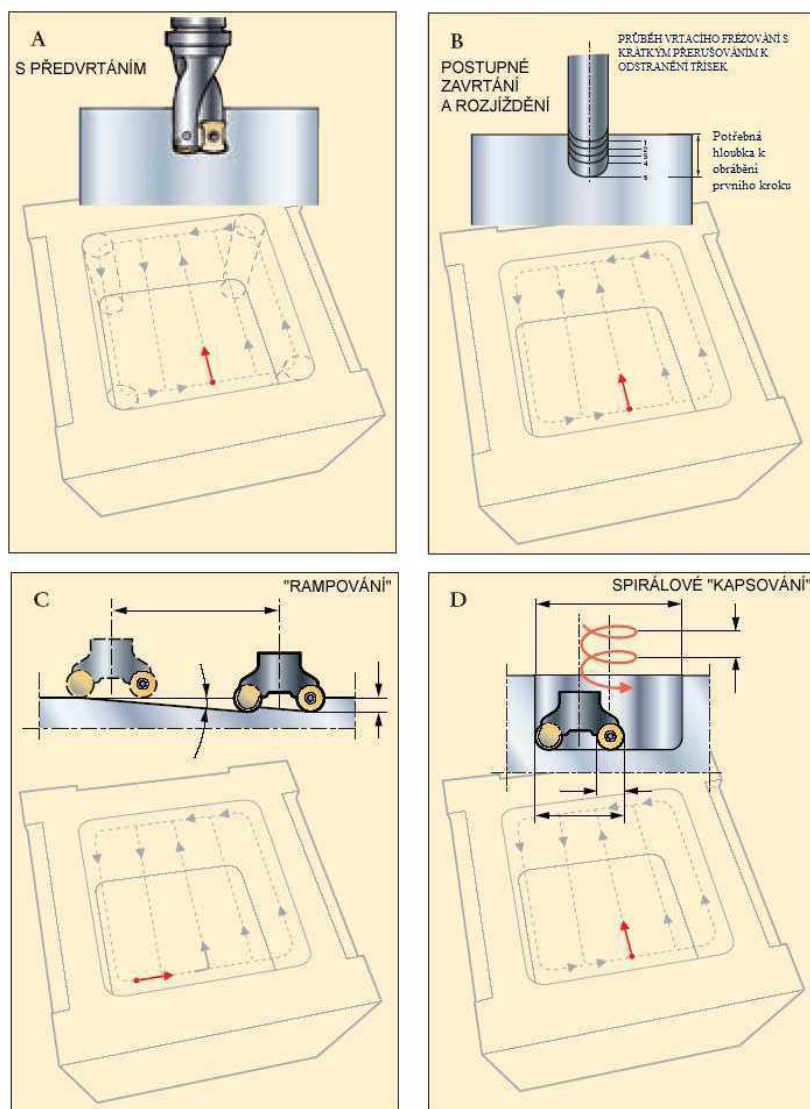
Jednou z nejstarších a dodnes hojně využívaných metod je předvrtání počátečního otvoru na požadovanou hloubku dutiny. Poté přichází na řadu klasická fréza, např. s VBD, která při konstantní souřadnici Z provede předfrézování dané kontury. V některých případech jsou zhotovovány další otvory v rozích dutiny, což ale většinou působí negativně, neboť takto vynucené přerušení řezu má neblahý vliv na trvanlivost břitu, především u SK a rezné keramiky. Kromě toho musí nástroj při každém průchodu v dutině překonávat velké množství zbylých třísek, což také nepříznivě ovlivňuje jeho trvanlivost, nemluvě o teple akumulovaném v těchto třískách, které může ovlivňovat nejen nástroj, ale i obrobený povrch (obr. 1.29a)²³.

Při použití kulových monolitních nástrojů pro zavrtávací frézování na určitou souřadnici Z se nedoporučuje příliš časté vyjíždění ze záběru s ohledem na odstraňování třísek. Při takovémto axiálním frézování sice vznikají problémy

především z důvodu komplikovaného odvodu třísek od středu nástroje, ale ty se častějším vyjížděním ze záběru eliminují jen minimálně. Proto je výhodnější využít najíždění šikmo a s kruhovou interpolací rovnou na plnou hloubku než začínat cyklus axiálním zavrtáváním. Přitom ale musí být zajištěn spolehlivý odvod třísek (obr. 1.29b) ²³.

Za jednu z nejlepších metod se považuje lineální šikmé najíždění na plnou axiální hloubku prvního kroku, tzv. rampování. Startovací bod je volen především s ohledem na geometrii tvarové plochy, obecně však v některé z krajních poloh, což umožňuje poměrně velkou radiální hodnotu nájezdu. Opět je hlavním problémem odstraňování třísek. Radiální řezný pohyb se děje společně s axiálním zajižděním do materiálu buď lineárně, nebo ještě výhodněji pomocí kruhové interpolace, která je obzvláště důležitá u vysokorychlostního obrábění (obr. 1.29c) ²³.

Při použití fréz s kruhovými VBD je možné využít také velice výhodnou metodu spočívající v kruhové interpolaci se spirálovým pohybem v axiálním směru (obr. 1.29d) ²³.

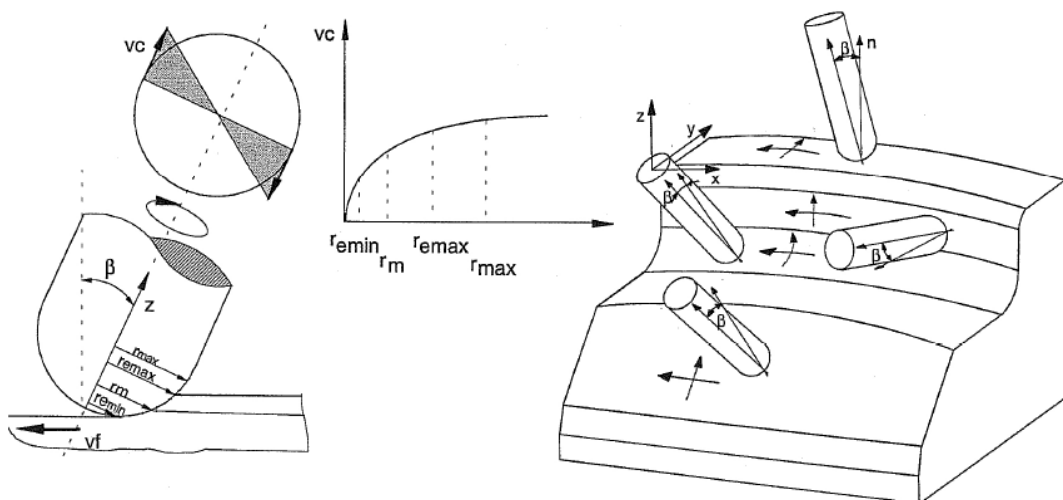


Obr. 1.29 Metody najíždění do řezu²³

Veškeré moderní CAD/CAM technologie a nové druhy strategií a nástrojů by se nedali použít pro výrobu zápustek a forem nebýt nových vysoce moderních CNC obráběcích center. Ty to centra umožňují obrábět podle tytu ve 3,4 nebo v 5 osách²³.

Při klasickém tříosém obrábění je osa nástroje pevná. Interpolace při obrábění prostorových ploch je realizována jen prostřednictvím tří lineárních pohybů, což je sice výrazně jednodušší způsob z hlediska programování NC dat, ale při nasazení kulových nástrojů v dokončovací etapě dochází k nepříznivým záběrovým podmínkám, které spolu s nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje neblaze působí na celý řezný proces. Ta to negativa je možné eliminovat víceosým frézováním, tzv. naklápěním nástroje ve směru čtvrté, popř. páté osy²³.

Díky několikaletému výzkumu v této oblasti byly analyzovány a stanoveny velikosti úhlů naklápění pro HSC frézování tepelně zpracovaných nástrojových ocelí. Z hlediska opotřebení břitů, procesní spolehlivosti, přesnosti a drsnosti obráběné plochy bylo zjištěno jako optimální naklonění nástroje o 10° až 20° do směru posuvu (platí pro sousledné frézování). Jedná se o tzv. vlečení nástroje (obr.1.30)²³.



Obr. 1.30 Význam využití víceosého frézování²³

Příkladem moderního obráběcího stroje který se snaží využívat všechny dostupné technologie je vysokorychlostní 5-osé obráběcí centra od firmy DMG (Deckel Maho Gildemeister) model HSC 105 linear (obr.1.31).



a)



b)

Obr.1.31 a) CNC 5osé obráběcí centrum model HSC 105 linear od firmy DMG²⁴;
b) Detail vřetenové hlavy a rotačního stolu CNC 5osé obráběcí centrum model HSC 105 linear²⁵

Stoje od firmy DMG modelové řady HSC linear jsou vysoce moderním řešením pro výrobu forem. Model HSC 105 linear (obr. 1.30a) je vybaven lineárními pohony v osách X,Y a Z, pracovními posuvy až 90 m/min, rychloposuvy 90 m/min a disponují zrychlením 2 g. Pojezdy v osách X, Y, Z 1050 x 800 x 560 mm, upínací plocha stolu je 1200x 850 mm a hmotnost obrobku až 1800kg dávají představu o rozsahu možných aplikací. Otáčky na vřetenu až 42 000 min⁻¹ a výkon 35 kW. Maximální tuhost a přesnost stroje zaručuje portálová koncepce stavby stroje, jsou použity přímé měřicí systémy ve spojení s vysokorychlostními 3D řídicími systémy iTNC 530 od Heidenhein nebo 840D Powerline od Siemense. Další inovací, kterou tyto stroje nabízejí, je možnost simultánního opracování v pěti osách, které je realizováno pomocí výkyvné osy ve vřetenové hlavě a rotačního stolu (obr. 1.30b). Zásobník nástrojů má kapacitu až 120 míst a výměnu od řezu do řezu lze zvládnout za 1,8 sekundy^{24,25}.

Dalšími příklady moderních obráběcích strojů, které mají podobné funkce a mohou se také používat k výrobě forem a zápuštěk jsou obráběcí centra od firem Fehlmann (obr.1.31a) a Yamazaki Mazak (obr.1.31b). V dnešní době je na trhu velké množství výrobců CNC obráběcích center. Při volbě je vždy důležité brát ohled na druh výroby v daném podniku a dodávaným službám (servisní kontroly, opravy apod.) k danému stroji a příslušenství.



a)



b)

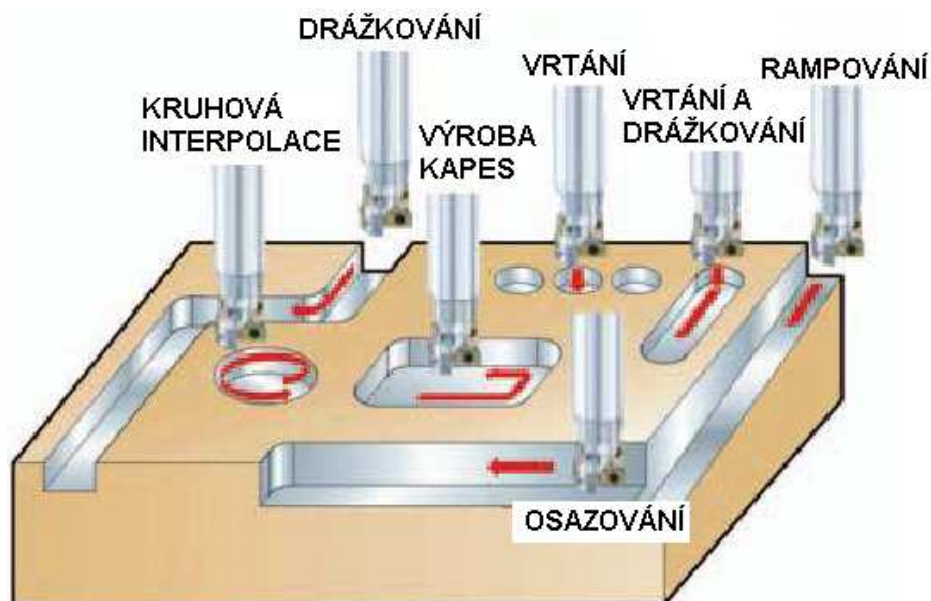
Obr. 1.32 a) CNC 5 osé obráběcí centrum model PICOMAX 825 VERSA od firmy Fehlmann²⁶; b) CNC 5 osé obráběcí centrum model HyperVRX630 od firmy Yamazaki Mazak²⁷

1.4.3 Nástroje pro výrobu forem

Výroba forem patří mezi velmi časté výrobní operace českých strojírenských podniků. Zde jsou shrnuty možnosti použití co nejuniverzálnějších nástrojů, které by bylo možné opakovaně používat na formy, jež se od sebe často velmi výrazně liší²⁸.

Hrubovací nástroje:

Jedním z takových nástrojů, jsou víceúčelové vrtací frézy modelu MEZ od japonské firmy Kyocera (na českém trhu je zastoupena firmou Grumant, s. r.o.). Díky univerzálnosti těchto fréz je lze použít pro řadu operací např.: výrobu drážek, výrobu kapes, frézování šikmých ploch, výrobu osazení a vrtání do plného materiálu (obr.1.32)²⁸.



Obr. 1.32 Typy operací, na které lze použít vrtací frézy MEZ²⁸.

Zejména možnost vrtání do plného materiálu a poté následného rozfrézování díry pomocí kruhové interpolace (obr. 1.33) nabízí ekonomičtější a produktivnější řešení než dosavadní postupy. Není nutné držet celou řadu produktivních, ale velmi nákladných vrtáků velkých průměrů skladem, ani není třeba ztrácet mnoho minut pracovního času používáním těchto vrtáků²⁸.

Zmíněné frézy se standardně vyrábějí ve třech provedeních²⁸:

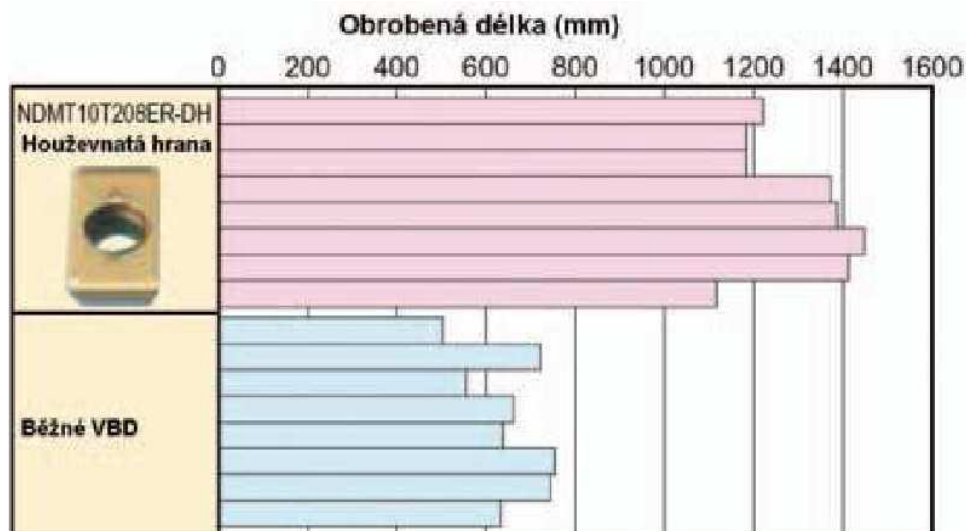
Prvním je krátký typ s vnitřním chlazením dodávaný v řezných průměrech 16, 20, 25 a 32 mm s celkovou délkou (např.: u frézy o průměru 16 mm odpovídající $l_c = 80$ mm).

Druhým typem je standardní provedení bez vnitřního chlazení v řezných průměrech 16, 20, 25, 32, 40 a 50 mm.

Třetím typem je extradelouhá fréza bez vnitřního chlazení, vyráběná v řezných průměrech 16, 20, 25, 32, 40 a 50 mm (např.: fréza o průměru 16 mm – $l_c = 120$ mm).

Tyto frézy jsou na rozdíl od předchozí generace opatřeny speciální povrchovou úpravou silver coat (stříbrný povlak), která má oproti běžným frézám řadu předností: vysokou tvrdost povrchu, zvyšuje odolnost proti otěru třískou, zvyšuje odolnost proti korozi a zlepšuje odvod tepla. Velké změny doznala rovněž i konstrukce frézy, která přinesla nemálo výhod. Nový tvar zesíleného žebra mezi vyměnitelnými břitovými destičkami zvyšuje tuhost frézy a dovoluje vyšší výkon obrábění. Přítomnost čistící drážky zlepšuje odchod třísek, a tím snižuje pravděpodobnost zatavení frézy²⁸.

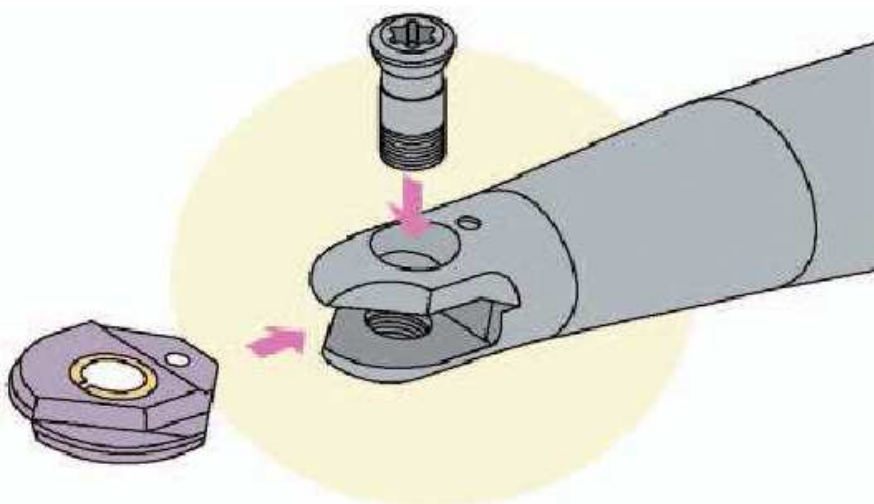
Výrazné změny se dočkala i konstrukce vlastní VBD s novým lisovaným utvářečem třísky. Tvar čela v rohu VBD je konstruován pro vysokoobjemové obrábění. Hrana VBD byla zpevněna pro velké úběry materiálu. Nová houževnatá hrana zvyšuje odolnost proti otěru při vysokých posuvech a snižuje řezný odpor (obr.1.34)²⁸.



Obr. 1.34 Porovnání životnosti VBD NDMT10T208ER-DH s běžnými VBD²⁸.

Hrubovací a polodokončovací nástroje:

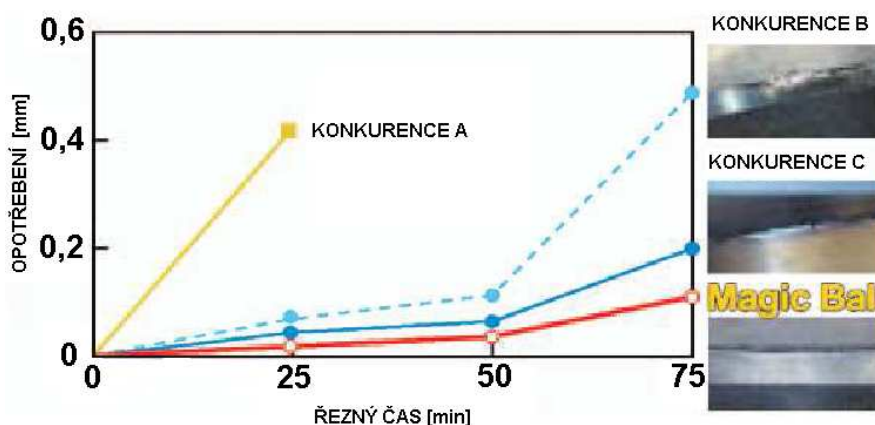
Dalším univerzálním nástrojem jsou frézy Magic Ball (kouzelná koule). Jedná se o kulový typ frézy s VBD, kterou vyrábí také japonská firma Kyocera. Na první pohled se konstrukce tělesa a VBD neliší od nástrojů, které jsou dostupné na českém trhu. Frézy typu Magic Ball byly zkonstruovány tak, aby splňovaly nejvyšší požadavky na přesnost, produktivitu a vysokou životnost při opracovávání těžkoobrobitelných materiálů²⁹.



Obr. 1.35 Konstrukce upnutí destičky²⁸.

Jeden z nejdůležitějších nových poznatků o těchto frézách je, že jsou vyrobeny v mnohem užší toleranci, než je uvedeno na výkresech. Proklamovaná tolerance poloměru VBD je $\pm 0,01$ mm, ale ve skutečnosti se tato hodnota pohybuje okolo $\pm 0,002$ mm. Tato skutečnost spolu s konstrukcí upnutí VBD do tělesa frézy pomocí vlisovaného bronzového kroužku (obr.1.35), výrazně zvyšuje životnost nástroje a umožňuje výrobu vysoce kvalitních povrchů obrobku. Vlisovaný bronzový kroužek zajišťuje, aby VBD dosedla přesně na své místo, tlumí vibrace, které vznikají během řezného procesu, a zamezuje přímému kontaktu upínacího šroubu s VBD, což zabraňuje případnému poškození VBD šroubem²⁸.

Tyto frézy se vyrábějí v řezných průměrech 8, 10, 12, 16, 20, 25 mm a ve dvou délkových provedeních (krátkém a dlouhém). VBD jsou vyráběny z nového typu mikrozrnného karbidu, označeného PR915, s multivrstvým povlakem naneseným metodou PVD. Tento nový typ karbidu se vyznačuje vysokou otěruvzdorností a stálostí řezné hrany. Vynikající vlastnosti těchto fréz jsou patrné např.: z grafu porovnání závislosti opotřebení řezné hrany na řezném čase (obr. 1.36)²⁸.

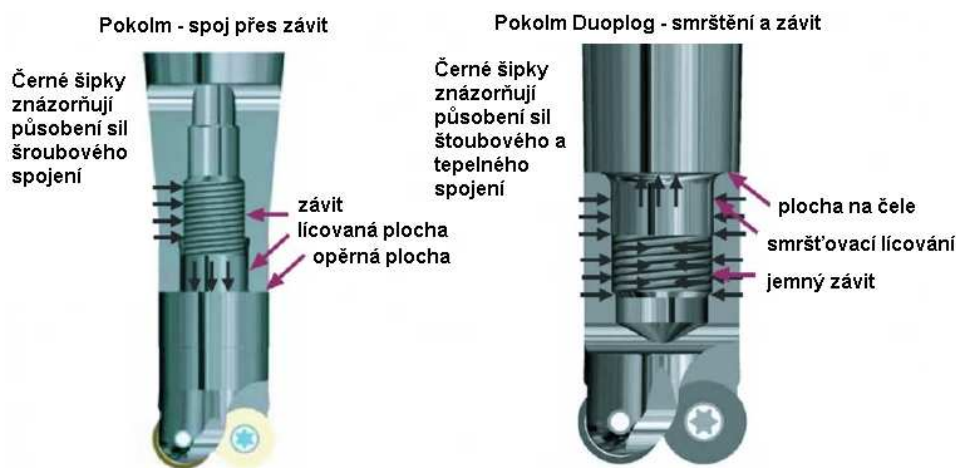


Obr. 1.36. Závislost opotřebení řezné hrany na řezném čase²⁸.

Dalším zástupcem na trhu s nástoji je firma Pokolm, která vyvinula frézovací systém Trigaworx. Ten byl určen především pro operace výkonného hrubování hlubokých tvarů, ale své místo si velmi rychle našel i u operací hrubování mělkých tvarů, dutin a kapes³⁰.

Systém pracuje na bázi tzv. rychloposuvového frézování (HFC), kdy úběr materiálu je dán především velmi vysokou rychlostí posuvu, překrytím nástroje a nízkou hloubkou řezu. Dnes již můžeme hovořit o třetí generaci systému Trigaworx, který umožňuje odebrat velký objem materiálu za minutu i při hrubování hlubokých tvarů s minimálními vibracemi. U tohoto systému se dosahuje posuvu na zub fz až 3 mm. Speciálně vyvinutá destička Trigacut zmenšuje prostřednictvím polygonálního tvaru radiální řezné síly, a tím zabraňuje vzniku vibrací. Pro následné polodokončování a dokončování je ideální aplikovat upínací systém DuoPlug. Jde o výjimečný systém upínání, spojující princip tuhého lícovaného spoje se závitem a účinkem tepelného smrštění. Je to velmi tuhé spojení bez vůle a házivostí, což je velmi důležité právě při dokončování nebo při frézování ve velkých hloubkách²⁸.

Systém DuoPlug v kombinaci s Trigaworx je ideální sestavou pro výkonné obrábění hlubokých tvarů, a to jak z hlediska hrubování, tak i dokončování. Optimalizovaná VBD Trigacut má tři břity. Tím, že je chod nástroje při frézování klidnější, zvyšuje se životnost nástroje a současně je chráněn i stroj a upínače. Toto spojení dosahuje nejvyšších výkonů především při frézování hlubokých tvarů, kde ostatní systémy pracují na hranici stability řezného procesu. Porovnáme-li závitové spojení Pokolm a spoj Pokolm DuoPlug, lze říci, že závitové spojení Pokolm je již dnes synonymem pro standardní výkonné spojení frézovací hlavičky s upínačem. Systém DuoPlug je výjimečný svou kombinací dvou principů spojení znázorněných na (obr. 1.37) a to tepelného – smrštění a tepelného – závitového spojení²⁹.



Obr. 1.37 Princip šroubového spoje Pokolm (vlevo), princip spoje DuoPlug (vpravo)²⁹.

Závitové spojení Pokolm je standardně aplikováno na upínačích z oceli, těžkého kovu a slinutého karbidu. Tento standardní spoj zaručuje požadované přesnosti a tolerance upnutí.

Systém DuoPlug poskytuje vysokou stabilitu při nejvyšší tuhosti a přesnosti systému. Materiálem upínače je slinutý karbid. Oproti standardnímu šroubovému spoji zde působí síla smrštění mezi nástrojem a upínačem na celé lícované ploše otvoru a velké části plochy závitu. Výkon tohoto upínacího systému je stabilní i při vytvoření spojení nástroje s válcovým trnem z SK, sloužícím pro frézování kolmých stěn ve velkých hloubkách. Šroubový spoj je univerzální – vzhledem ke své stabilitě při frézování v malých a středních hloubkách je vhodný jak pro hrubování, tak i dokončování. Výhodou tohoto spoje je i příznivý poměr ceny a výkonu. Kvalita upnutí pomocí DuoPlug je opakovatelná. Jsou patrné i viditelně vyšší upínací síly oproti známým šroubovým systémům, což zabezpečuje vysokou pevnost spoje, ale i tepelnou odolnost. Systém DuoPlug vlivem nižších vibrací při velkém vyložení nástroje zaručuje i vyšší životnost nástroje a VBD. Tím je dosahováno vyšší přesnosti při dokončování včetně vyšší kvality obrobené plochy. Systém zajišťuje vysokou stabilitu řezného procesu²⁹.

Dokončovací nástroje :

Formy a zápustky se ve většině případů po předhrubování kalí. Následně je třeba odebrat přídavek zbývající pro dokončení na čisto. Při opracování tohoto přídavku je tvrdost přes 56 HRC či pevností nad 2000 N/mm^2 tu už se zpravidla mluví o tvrdém obrábění. Význam tvrdého frézování roste zejména při obrábění volných tvarů formy rádiusovými nebo válcovými frézami. Přitom se obrábí materiál, jehož tvrdost může dosahovat až cca 70 HRC. Vyžadovaná kvalita povrchu je zpravidla dosahována dodatečným ručním leštěním, tedy procesem, který může být v závislosti na vynaložené práci velice nákladný³⁰.

Aby bylo možno čas pro ruční leštění co nejvíce zkrátit, musí být při frézování s určitým geometrickým břittem dosaženo průměrné aritmetické úchytky povrchu R_a 1 nebo nižší, který se velmi blíží povrchu leštěnému. Provádět obrábění v této oblasti běžně dostupnými frézami ze slinutého karbidu není rozumně realizovatelné³⁰.

Pro zvládnutí tohoto úkolu musí nástroj splňovat určité předpoklady. Firma Horn pro tento účel vyvinula frézy řady DS (obr. 1.38), jejichž vlastnosti spočívají v optimální kombinaci speciálního substrátu ze slinutého karbidu, vhodné geometrie a pro tento účel určeného povlaku. Firmu Paul Horn GmbH na českém a slovenském trhu zastupuje společnost SK Technik³⁰.

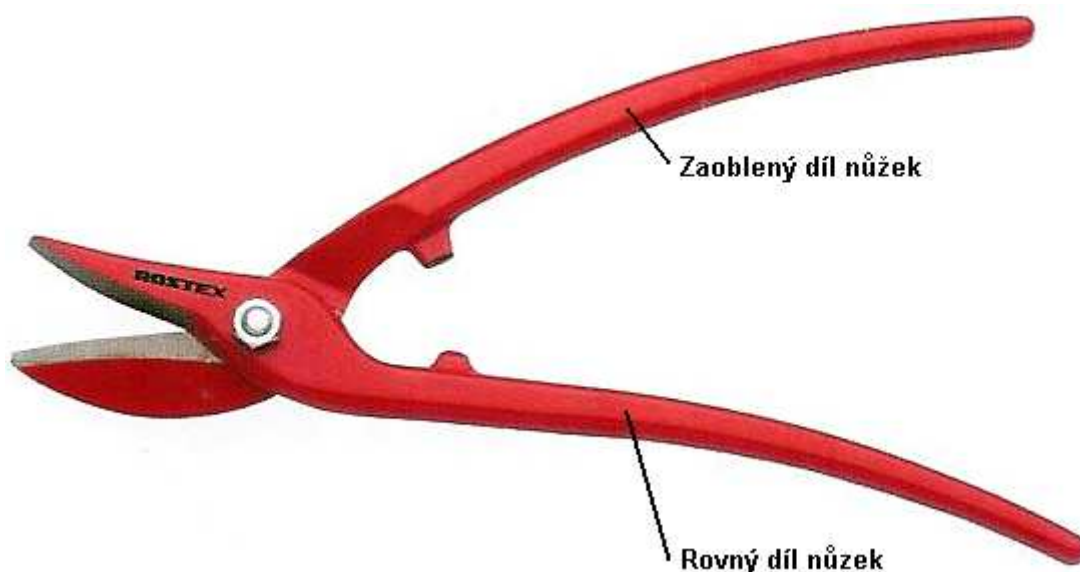
Jen malá část z velkého množství typů fréz ze slinutého karbidu je vhodná k tvrdému frézování. Z pohledu geometrie je u frézovacího nástroje rozhodující souhra více faktorů. K základním požadavkům patří přesnost v řádu mikrometrů. Frézovací stopky fréz řady DS jsou vyráběny výhradně v toleranci h5. Maximální řezné stability se dosahuje díky excentrickému obloukovému výbrusu, který obzvláště u Torus fréz zajišťuje přechod z rádius na vedlejší břit. Obrábění kalených materiálů má jen málo společného s obráběním měkkých materiálů, frézy pro tvrdé frézování proto mají odlišné úhly čela, hřbetu a ostří. Rádiusové frézy, Torus frézy nebo mikrofrézy DS, určené k tvrdému obrábění, se dodávají výhradně jako dvoubřité. Oba hlavní břity musí být nabroušeny s plynulým přechodem. Hloubka řezu je u tvrdého frézování závislá na druhu a tvrdosti obráběného materiálu, maximálně ale činí $a_p = 0,2 \text{ mm}$ ³¹. Povlak o tloušťce $3 \mu\text{m}$ zabraňuje přímému opotřebení SK. Nejlépe se osvědčily povlaky TiAlN s maximální pracovní teplotou od $800 \text{ }^\circ\text{C}$ do $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Povlak zvyšuje tvrdost povrchu nástroje a výrazně snižuje tření oproti nepovlakovanému SK. Vlastnosti povlaku, který má přímý kontakt s obráběným materiálem, se společně s vlastnostmi slinutého karbidu a geometrií rovnocenně podílejí na vlastnostech celého nástroje³⁰.



Obr.1.38 Ukázka fréz modelové řady DC od firmy Horn³¹

2 NÁVRH TVARU EXPERIMENTÁLNÍ FORMY

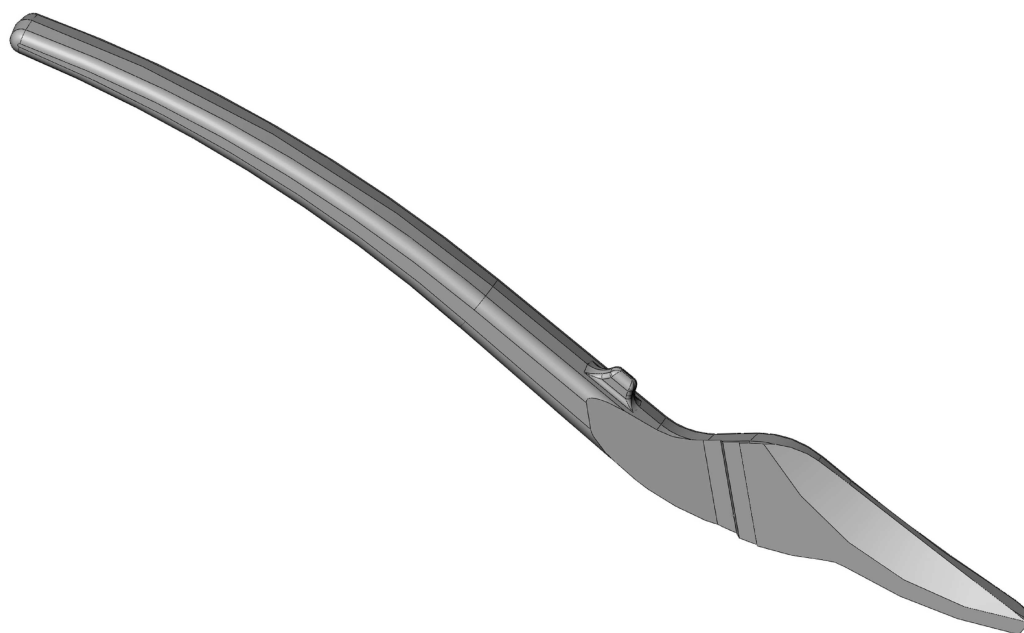
Pro návrh tvaru formy vždy vychází z požadovaného cílového výrobku. V našem případě se jedná o výrobek firmy Rostex Vyškov. Tato firma se zabývá především výrobou kování na dveře, ale mimo jiné vyrábí další řadu výrobků, jedním z nich jsou i nůžky na plech výstřihové (obr.2.1). Tyto nůžky jsou celo kované. Pro jejich výrobu je tedy potřeba navrhnout dvě sady zápustek pro výrobu rovného a zaobleného dílu. Dále se bude zabývat výrobou pouze sady zápustek pro rovný díl nůžek. K návrhu všech modelů použijeme CAD softwaru SolidWorks10.



Obr. 2.1 Nůžky na plech od firmy Rostex Vyškov³²

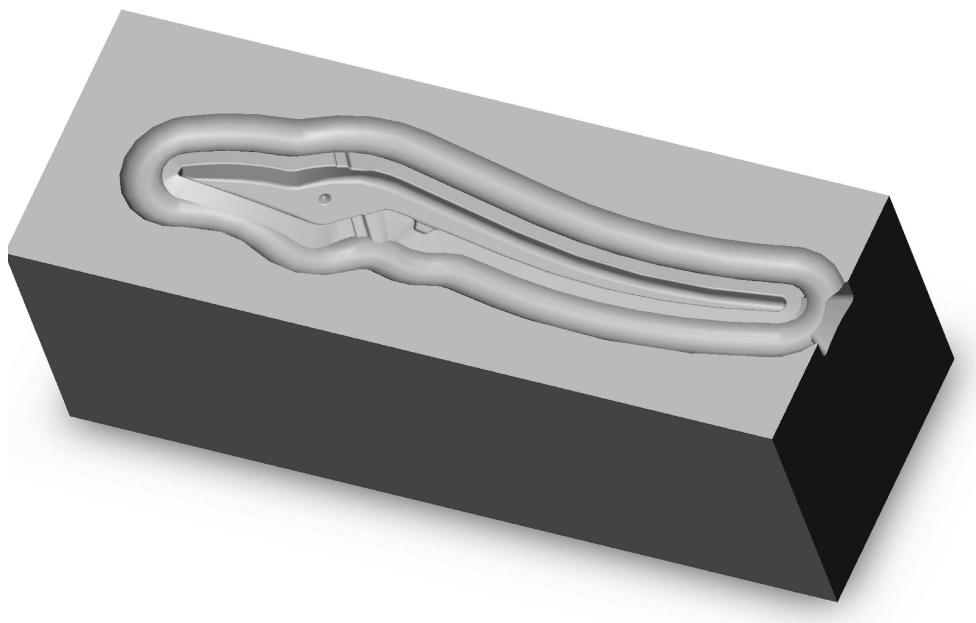
2.1 Návrh tvaru zápustky na rovný díl nůžek

Nejprve musíme navrhnout model rovného dílu nůžek podle výkresové dokumentace od firmy Rostex. Poté navrhnout k tomuto modelu všechny přídatky k funkčním plochám, které po vykování budou obráběny. Na konec vytvořit model rovného dílu nůžek s přídatky (obr.2.2). Takto připravený model použijeme pro vytvoření zápustek.

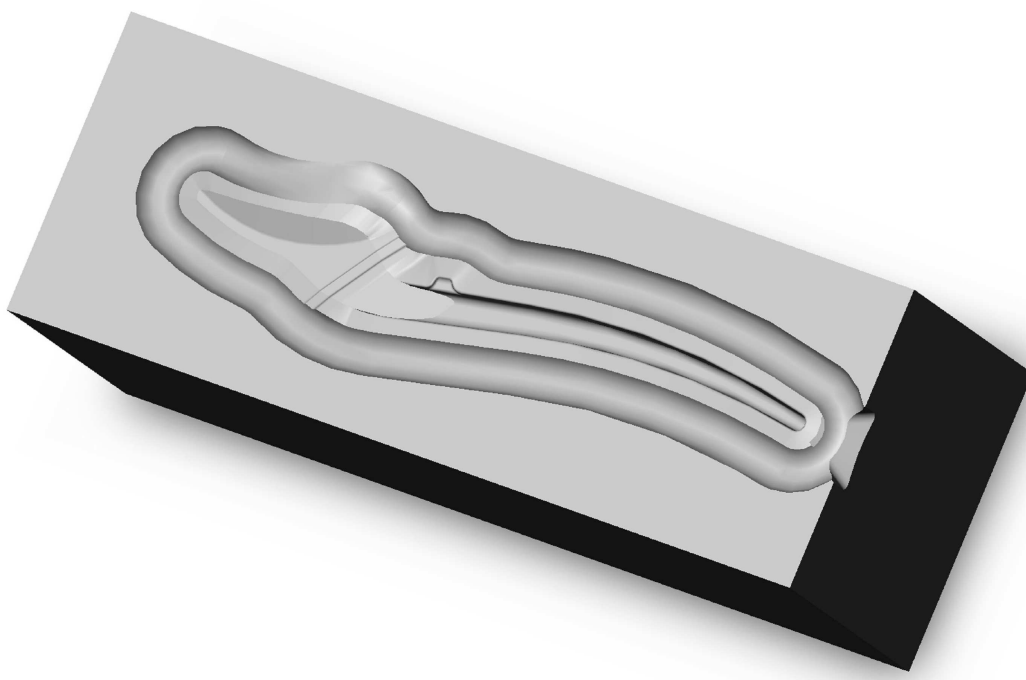


Obr.2.2. Model rovného dílu nůžek s přídávky na obrábění

Takto připravený model použijeme pro vytvoření zápustek. Kdy v programu SolidWorks10 využijeme funkci pro výrobu forem. Takto nahrubo vytvořený model formy upravíme přidáním výronkové drážky s prostorem, kam bude vytlačen přebytečný materiál. Takto navržený model zápustky se dělí na horní (obr.2.3) a dolní (obr.2.4) díl.



Obr.2.3 Model spodního dílu zápustky



Obr.2.4 Model horního dílu zápustky

Modely spodního a horního dílu zápustky budou dále využity při návrhu výroby a tvorbě NC programu. Výkresová dokumentace zápustky je v příloze 1,2.

3 NÁVRH A VERIFIKACE VYBRANÝCH CNC TECHNOLOGIÍ

Firma Rostex Vyškov se rozhodla pro znovu zavedení výroby nůžek na plech výstřihových (obr.2.1), které delší dobu nevyráběla. Což znamenalo především obnovit výrobu a to tím, že vyrobí nové zápustky. Při výrobě zápustek jsem se zaměřil na tepelné zpracování, které je prováděno po hrubování. Dále pak návrhem dokončovacího obrábění na konečný tvar zápustky.

3.1 Materiál a tepelné zpracování

Obě zápustky jsou vyráběny z oceli ČSN X37CrMoV5-1(ČSN 19 552.3), která je tepelně zpracovaná žíháním na měkko a v tomto stádiu dosahuje tvrdosti max. 230 HB. Tento materiál je středně legovaná chrom-molybden-vanadová ocel vhodná pro práci za tepla, takže se v k výrobě zápustek velmi hodí. Chemické složení oceli je uvedeno v tabulce 3.1.

Tab.3.1Chemického složení oceli ČSN X37CrMoV5-1

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
0,33-0,41	0,80-1,20	0,25-0,50	4,80-5,50	1,10-1,50	-	0,30-0,50

Polotovary pro výrobu zápustek jsou dva kvádry o velikosti 115 x 116 x 330 mm o hmotnosti 34.6kg. Na tomto polotovaru jsou nejprve na konvenčních stojích vytvořeny mimo jiné také drážky, které slouží k uchycení při dalším obrábění samotného tvaru zápustky.



Obr.3.1 Příklad drážky a principu uchycení na pracovním stole.

Na takto připravených polotovarech se provede hrubování tvaru zápustky. Kdy po hrubování zůstane přídavek na dokončování 0,2mm s tolerancí 0,05mm.

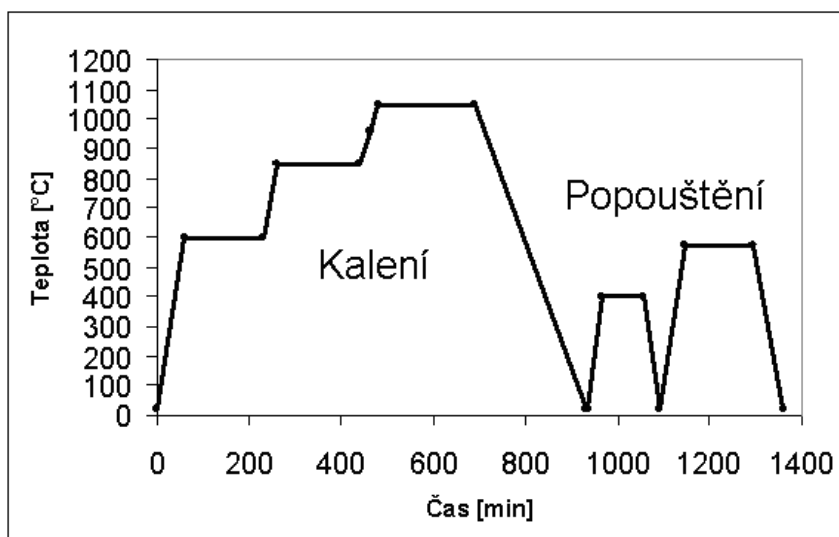
Takto obrobený polotovár je následně tepelně zpracováván, tak aby se zvýšila jeho tvrdost a houževnatost.

Tepelné zpracování se provádí v elektrické indukční peci obr.(3.2)



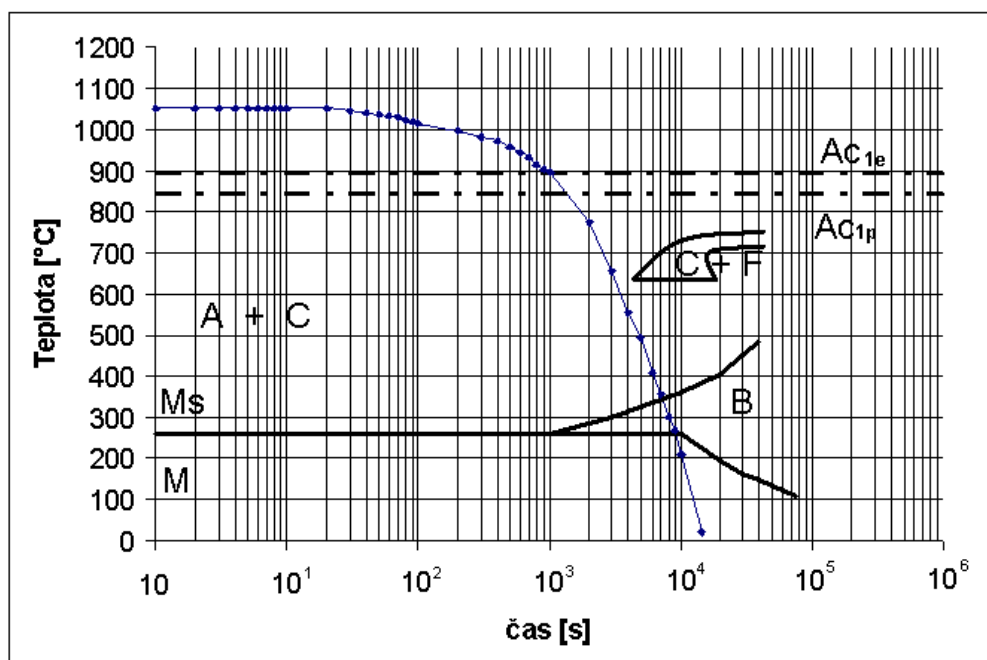
Obr.3.2 Indukční pec

Tepelné zpracování probíhá tak, že se nejprve provede kalení na vzduchu a poté popouštění. Kalení probíhá nejprve postupným ohřevem materiálu (obr.3.3.).



Obr.3.3 Schéma tepelného zpracování

Polotovár zahřejeme na teplotu 600°C na této teplotě setrvá po dobu 3 hodin. Poté se zahřejí na teplotu 850°C na této teplotě setrvá 3 hodiny. Dále se zvýší teplota na 960°C a na této teplotě je ponechán 5 minut. Na konec se zahřejí na teplotu 1050°C na které vydrží 3,5 hodiny. Po té je polotovár vyjmut z pece a nechá se zchladnout pozvolna na vzduchu, což trvá zhruba 4 hodiny. Chlazení probíhá pozvolna a dochází ke změně struktury materiálu podle diagramu ARA(obr.3.4).



Obr. 3.4. ARA diagram chlazení oceli ČSN X37CrMoV5-1(ČSN 19 552.3)

Po kalení má polotovár tvrdost až 58HRC a proto k snížení na požadovanou tvrdost a ke zlepšení houževnatosti materiálu provedeme popouštění. Popouštění pobíhá také dle schématu tepelného zpracování (obr.3.3). Polotovár se zahřejí na teplotu 400°C a ponechání na této teplotě po dobu 1,5 hodiny. Následně se nechá zchladnout. Po zchlazení se opětovně zahřejí na 575°C a na této teplotě vydrží 2,5 hodiny. Po zchlazení se provede měření tvrdosti na Rockwellově tvrdoměru (obr.3.5).



Obr.3.5 Stolní tvrdoměr Rockwell

Požadovaná tvrdost horního i dolního dílu zápustky je 52HRC.

3.2 Návrh výroby pro dokončení zápustky

Dříve byl tvar zápustky vyráběn elektroerozivní metodou. To s sebou neslo mnohá úskalí od výroby matrice na vykování měděných elektrod až po složité upevňování a roztažnost elektrody při samotném hloubení. Dále pak po obrobení se musela celá zápustka ručně dolešťovat na požadovanou drsnost.

Aby se těmto problémům předešlo bylo nutné přenést výrobu zápustek na frézovací centrum.

3.2.1 Rozvoj výroby a strojní vybavení

Pro výrobu zápustek lze využít stávající 3osé CNC frézovací centrum od firmy DMG model DMC 63 V (obr.3.6). S těmito hlavními parametry :

Rozměr stolu: 500 x 800 mm

Vysokootáčkové vřeteno 8 000 ot/min

Řídící systém: SINUMERIK 802C base line



Obr.3.6 3osé CNC frézovací centrum od firmy DMG model DMC 63 V

Pro rozvoj technologie frézování firma Rostex plánuje v tomto roce pořízení nové 5osé CNC obráběcí centrum od firmy DMG model DMC 60T (obr.3.7). S těmito hlavními parametry :

Rozměr stolu: 500 x 630

Vysokootáčkové vřeteno 12 000 ot/min

Řídicí systém: SINUMERIK 810D



Obr.3.7 5osé CNC obráběcí centrum od firmy DMG model DMC 60T³³

Proto můžeme uvažovat o dvou variantách výroby. Kdy první varianta je obrábění provádět na uvedeném 3osém CNC frézovacím centru (obr. 3.6). Druhá varianta vyplývá z pořízení nového 5osého CNC obráběcího centra (obr. 3.7), kam by se výroba mohla přesunout a využít tak možnosti na klonění vřetene při frézování.

Prozatím máme k dispozici jenom 3osé CNC frézovací centrum od firmy DMG model DMC 63 a proto volíme 3osé obrábění pro výrobu zápustky.

3.2.2 Volba nástrojů a řezných podmínek

Nástroje byly voleny dle výkresové a modelové dokumentace zápustek s ohledem na potřebu vyrobít zaoblené a šikmé plochy s dobrou drsností povrchu.

Byly zvoleny tyto nástroje od firem Pokolm a Fraisa, které budou použity při dokončování zápustky. Pro dokončování spodního a horního dílu zápustky byly zvoleny tyto nástroje :

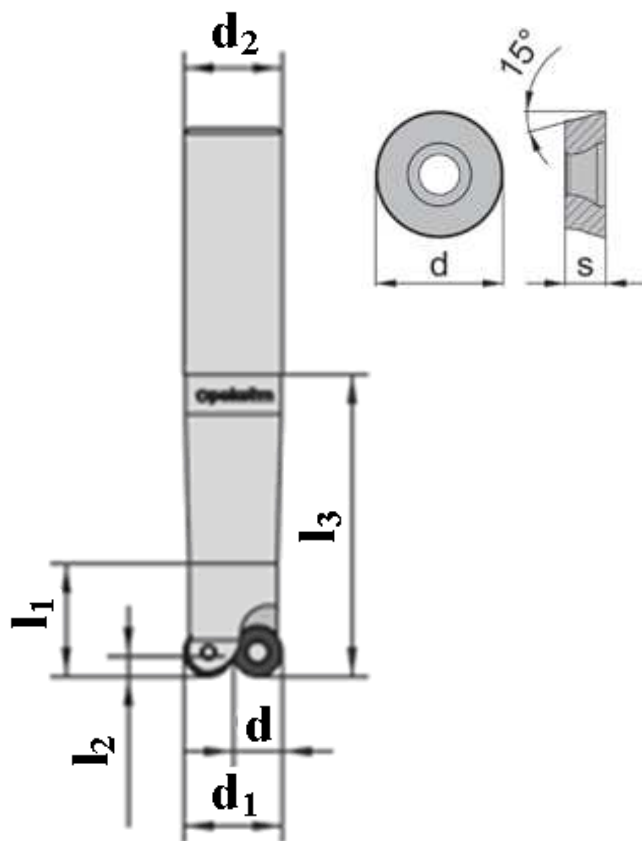
Nástroj číslo 10 stopková fréza od firmy Pokolm (obr. 3.8) s kruhovými VDB (vyměnitelné břitové destičky) (obr. 3.8)³⁴:

Tab. 2. Parametry nástroje

Parametr	Hodnota
d	5
d ₁	10
d ₂	10
l ₁	24
l ₃	30
r	2,5
z _n	2
Katalogové č.	30 10 125

Tab. 3. Parametry kruhové VDB

Parametr	Hodnota
Kvalita	HSC 05
Povlak	PVTi
d	5
s	1,5
r	2,5
Katalogové č.	01 05 835



Obr. 3.8 Stopková fréza od firmy Pokolm a kruhová VDB

Výpočet otáček pro nástroj č.10:

$$n_1 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{250 \cdot 1000}{\pi \cdot 10} = 7957,75 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \underline{\underline{8000 \text{ min}^{-1}}}, \quad (3.1)$$

Výpočet posunové rychlosti pro nástroje č. 10:

$$v_{f1} = n_1 \cdot f_z \cdot z_n = 8000 \cdot 0,0875 \cdot 2 = 1400 \text{ mm / min} \Rightarrow \underline{\underline{1400 \text{ mm / min}}} \quad (3.2)$$

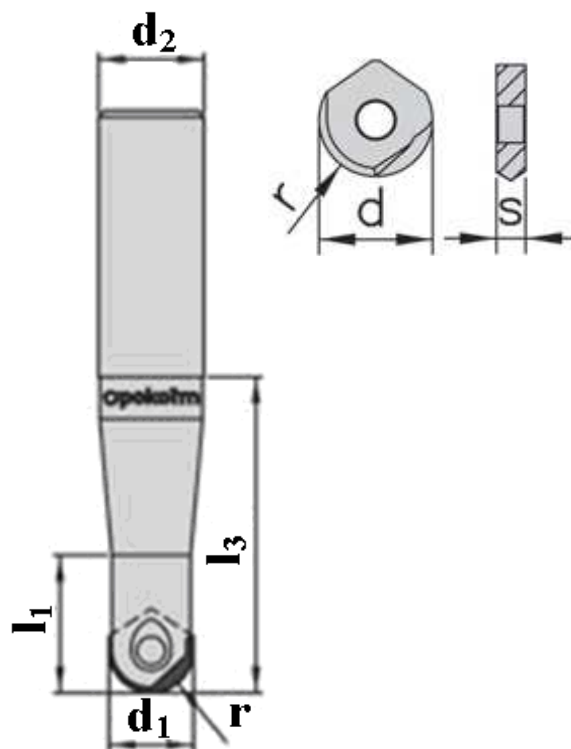
Nástroj číslo 20 stopková fréza Uniworx od firmy Pokolm (obr.3.9) s kruhovými VDB pro Uniworx (obr.3.9)³⁴:

Tab. 4. Parametry nástroje

Parametr	Hodnota
d_1	8
d_2	12
d_3	1,8
l_1	20
l_3	50
$r / f8$	4
z_n	2
Katalogové č. :	50 08 114

Tab. 5. Parametry kruhové VDB pro Uniworx

Parametr	Hodnota
Kvalita	HSC 05
Povlak	PVTi
d	8
s	2
r	4
Katalogové č.	08 835 V



Obr.3.9 Stopková fréza od firmy Pokolm a kruhová VDB pro Uniworx

Výpočet otáček pro nástroj č.20:

$$n_2 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{150 \cdot 1000}{\pi \cdot 8} = 5968,31 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \underline{\underline{6000 \text{ min}^{-1}}} \quad (3.3)$$

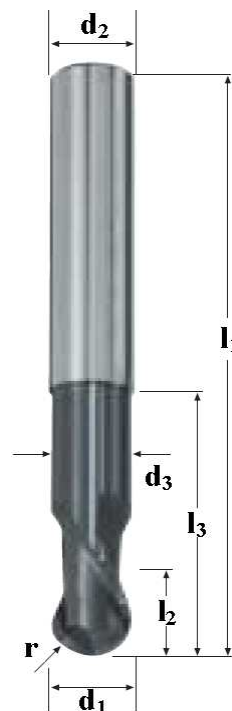
Výpočet posunové rychlosti pro nástroje č.20:

$$v_{f2} = n_2 \cdot f_z \cdot z_n = 6000 \cdot 0,075 \cdot 2 = 900 \text{ mm / min} \Rightarrow \underline{\underline{900 \text{ mm / min}}} \quad (3.4)$$

35. Nástroj číslo 30 stopková fréza s kulovou hlavou od firmy Fraisa (obr.3.10).

Tab. 6. Parametry nástroje

Parametr	Hodnota
d_1	4
d_2 / h_6	6
d_3	3,7
l_1	57
l_2	5
l_3	12
r / f_8	2
z_n	2
Katalogové č.	U5286.220



Obr.3.10 stopková fréza s kulovou hlavou od firmy Fraisa

Výpočet otáček pro nástroj č. 30:

$$n_3 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{100 \cdot 1000}{\pi \cdot 4} = 7957,75 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \underline{\underline{8000 \text{ min}^{-1}}} \quad (3.5)$$

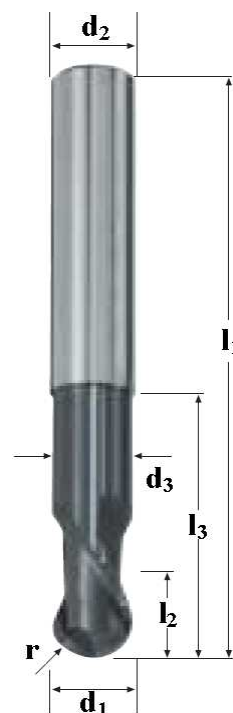
Výpočet posunové rychlosti pro nástroje č. 30:

$$v_{f3} = n_3 * f_z * z_n = 8000 * 0,06 * 2 = 960 \text{ mm / min} \Rightarrow \underline{\underline{960 \text{ mm / min}}} \quad (3.6)$$

Nástroj číslo 40 stopková fréza s kulovou hlavou od firmy Fraisa (obr.3.11)³⁵:

Tab. 6. Parametry nástroje

Parametr	Hodnota
d_1	2
d_2 / h_6	6
d_3	1,8
l_1	57
l_2	3
l_3	6
r / f_8	1
z_n	2
Katalogové č.	U5286.140



Obr.3.11 Stopková fréza s kulovou hlavou od firmy Fraisa

Výpočet otáček pro nástroj č.40:

$$n_4 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{50 \cdot 1000}{\pi \cdot 2} = 7957,75 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \underline{\underline{8000 \text{ min}^{-1}}} \quad (3.7)$$

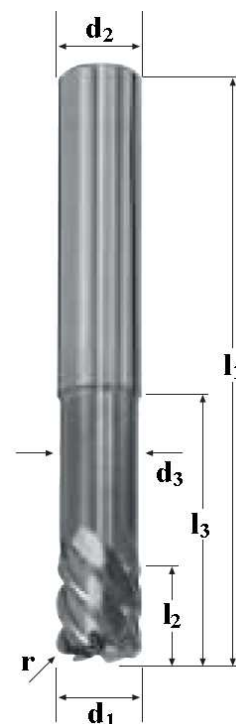
Výpočet posunové rychlosti pro nástroje č. 40:

$$v_{f4} = n_4 * f_z * z_n = 8000 * 0,041 * 2 = 656 \text{ mm / min} \Rightarrow \underline{\underline{650 \text{ mm / min}}} \quad (3.8)$$

Nástroj číslo 50 vysoce výkonná stopková fréza s hladkým břitem, torická od firmy Fraisa (obr.3.12)¹²⁵.

Tab. 7. Parametry nástroje

Parametr	Hodnota
$d_1 / e8$	6
$d_2 / h6$	6
d_3	5,5
l_1	57
l_2	7
l_3	20
$r \ 0/+0,03$	0,5
z_n	4
Katalogové č.	U5350.297



Obr.3.12 Vysoce výkonná stopková fréza s hladkým břitem, torická od firmy Fraisa

Výpočet otáček pro nástroj 50:

$$n_5 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{140 \cdot 1000}{\pi \cdot 6} = 7427,23 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \underline{\underline{7425 \text{ min}^{-1}}} \quad (3.9)$$

Výpočet posunové rychlosti pro nástroje 50:

$$v_{f5} = n_4 * f_z * z_n = 7425 * 0,15 * 4 = 4455 \text{ mm / min} \Rightarrow \underline{\underline{4455 \text{ mm / min}}} \quad (3.10)$$

3.2.3 Tvorba drah a následné vytvoření NC programu

Pro vytvoření NC programu bylo použito CAM softwaru od firmy Delcam PowerMILL10. Model součásti byl vytvořen v 3D CAD softwaru SolidWorks10. Je tedy nutné provést převod dat z formátu SolidWorks do formátu kompatibilního softwaru PowerMILL, tedy s koncovkou .DGK. Pro tento převod je k dispozici program Exchange, který umožňuje importovat daný formát a následně jej převést do formátu požadovaného formátu DGK.

Po načtení modelu zápustky je nutné zpracovat načtenou geometrii a provést potřebnou transformaci modelu, vytvořit pracovní rovinu, definovat polotovár, definovat oblasti přejezdu a nastavení bezpečné vzdálenosti v pracovní oblasti.

Po tomto základním nastavení se přechází k volbě strategií pro dokončování a k vytvoření drah pro jednotlivé nástroje. Poté zvolené dráhy přesuneme v určitém pořadí do záložky NC program tam nastavíme daný postprocesor pro daný typ stroje v našem případě pro 3osé CNC frézovací centrum od firmy DMG model DMC 63V (obr.3.6) s řídicím systémem SINUMERIK 802C base line.

Dráhy jednotlivých nástrojů a ukázka NC programu pro výrobu spodního dílu zápustky:

1.Dokončování nástrojem č.20 (obr.3.13):



Obr.3.13 Operace dokončování č.1.

Ukázka vytvořeného NC programu :

```
N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T20 FREZA KULOVA - PRUM 8./ ROHOVY RADIUS 4.
N6 M6 ("10000")
N7 S6000 M3
N8 G94 F900.
N9 G0 X220. Y13.768
N10 G0 Z26.
N11 G0 Z2.4
N12 G1 Z-0.1 F150.
```


N13 X219.441 Y13.377 F900.

N14 X219.369 Y13.317

N15 X219.314 Y13.297

N16 X219.294 Y13.289

N17 X219.266 Y13.275

N18 X219.174 Y13.238

N19 X219.064 Y13.205

N20 X219.037 Y13.2

N21 X218.922 Y13.16

N22 X218.871 Y13.167

N23 X218.856 Y13.163

N24 X218.809 Y13.151

N25 X218.719 Y13.178

N26 X218.679 Y13.18

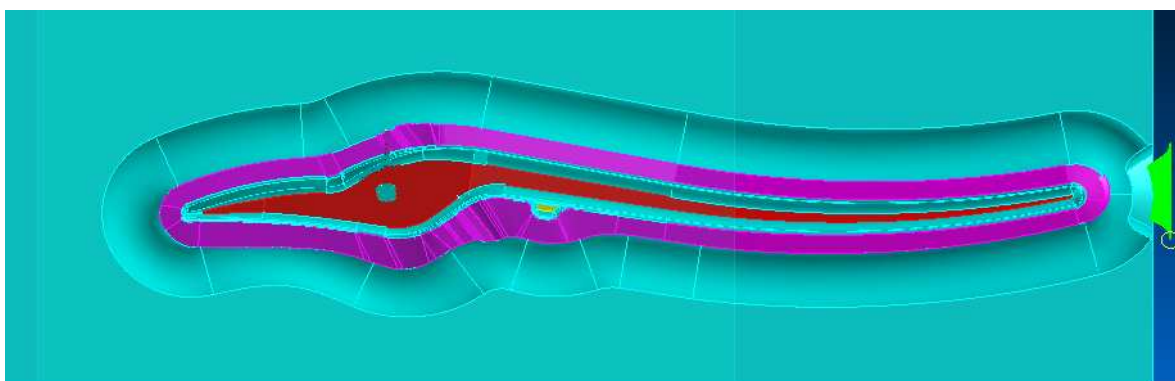
N27 X218.561 Y13.2

N28 X218.445 Y13.232

N29 X218.414 Y13.245

N30 X218.337 Y13.258

2.Dokončování nástrojem č.10 (obr.3.14):



Obr.3.14 Operace dokončování č.2.

Ukázka vytvořeného NC programu :

N1 G90

N2 G54

N3 G40

N4 G64 ;HSM OBRABENI

N5 ; T10 FREZA CELNI - PRUM 10./ ROHOVY RADIUS 2.5

N6 M6 ("10000")

N7 S8000 M3

N8 G94 F2800.

N9 G0 X225.001 Y15.2

N10 G0 Z25.

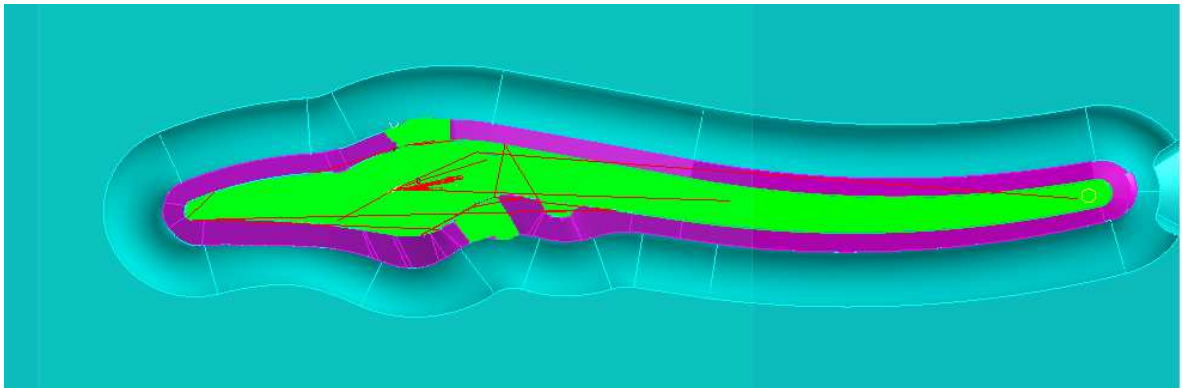
N11 G0 Z-5.1

N12 G1 Z-7.6 F500.

N13 X225.003 Y14.853 F2800.

N14 X224.933 Y14.253
N15 X224.792 Y13.665
N16 X224.586 Y13.109
N17 X224.308 Y12.569
N18 X223.969 Y12.069
N19 X223.581 Y11.626
N20 X223.544 Y11.588
N21 X223.118 Y11.206
N22 X221.842 Y10.313
N23 X221.745 Y10.235
N24 X221.454 Y10.041
N25 X218.423 Y7.919
N26 X218.508 Y7.712
N27 X218.793 Y6.977
N28 X219.008 Y6.366
N29 X219.152 Y5.927
N30 X219.253 Y5.597

3.Dokončování nástrojem č.30 (obr.3.15):



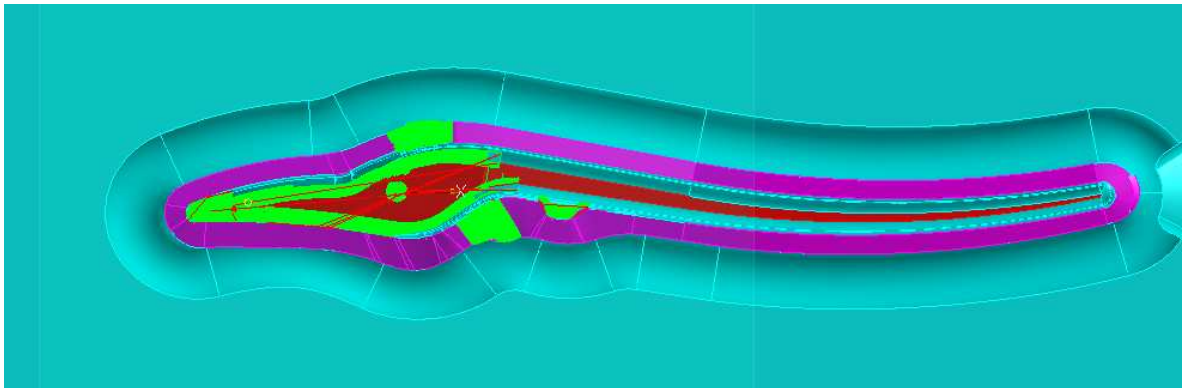
Obr.3.15 Operace dokončování č.3.

Ukázka vytvořeného NC programu :

N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T30 FREZA KULOVA - PRUM 4/ ROHOVY RADIUS 2
N6 M6 ("10000")
N7 S8000 M3
N8 G94 F960.
N9 G0 X-2.933 Y10.899
N10 G0 Z50.
N11 G0 Z2.42
N12 G1 Z-0.08 F200.
N13 X-2.421 Y11.068 F960.

N14 X-2.705 Y10.935
N15 X-3.056 Y10.643
N16 X-3.593 Y10.414
N17 X-3.907 Y10.357
N18 X-4.078 Y10.209
N19 X-5.046 Y9.776
N20 X-6.03 Y9.346
N21 X-6.633 Y9.074
N22 X-6.685 Y9.043
N23 X-7.102 Y8.847
N24 X-7.281 Y8.772
N25 X-7.793 Y8.528
N26 X-7.875 Y8.477
N27 X-8.195 Y8.317
N28 X-8.473 Y8.195
N29 X-9.383 Y7.733
N30 X-9.875 Y7.476

4.Dokončování nástrojem č.40 (obr.3.16):



Obr.3.16 Operace dokončování č.4.

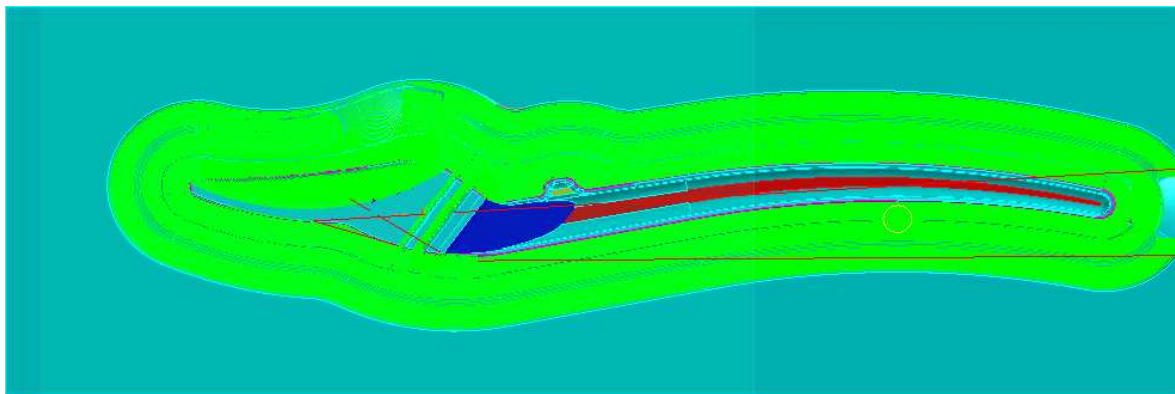
Ukázka vytvořeného NC programu :

N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T40 FREZA KULOVA - PRUM 2 / ROHOVY RADIUS 1
N6 M6 ("10000")
N7 S8000 M3
N8 G94 F650.
N9 G0 X-58.895 Y-7.58
N10 G0 Z25.
N11 G0 Z2.4
N12 G1 Z-0.1 F150.
N13 X-58.873 Y-7.609 F650.

N14 X-58.853 Y-7.461
N15 X-58.844 Y-7.428
N16 X-58.715 Y-7.547
N17 X-58.663 Y-7.546
N18 X-58.595 Y-7.649
N19 X-58.602 Y-7.658
N20 X-58.532 Y-7.734
N21 X-58.55 Y-7.748
N22 X-58.41 Y-7.938
N23 X-58.356 Y-7.938
N24 X-58.348 Y-8.013
N25 X-58.29 Y-8.092
N26 X-58.323 Y-8.152
N27 X-58.355 Y-8.186
N28 X-58.366 Y-8.243
N29 X-58.469 Y-8.305
N30 X-58.511 Y-8.328

Dráhy jednotlivých nástrojů a ukázka NC programu pro výrobu horního dílu zápustky:

1.Dokončování nástrojem č.20 (obr.3.17):



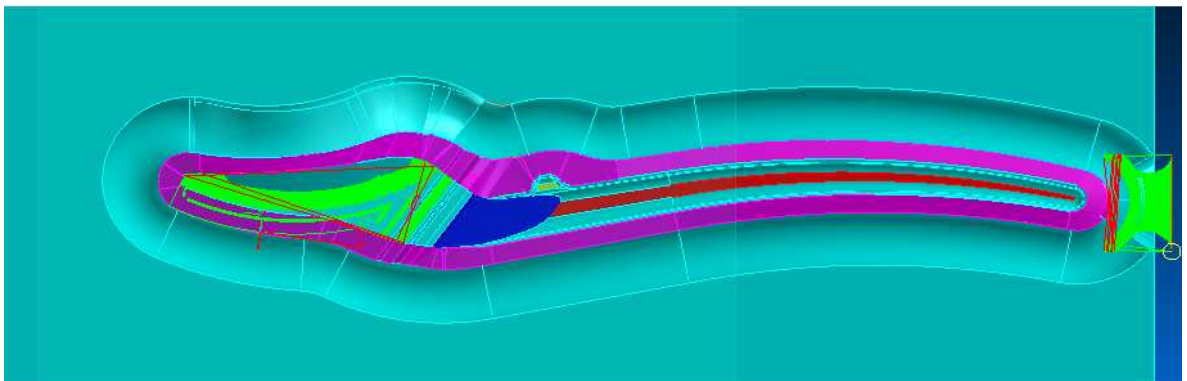
Obr.3.17 Operace dokončování č.1.

Ukázka vytvořeného NC programu :

N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T20 FREZA KULOVA - PRUM 8./ ROHOVY RADIUS 4.
N6 M6 ("10000")
N7 S6000 M3
N8 G94 F900.
N9 G0 X-15.012 Y11.108
N10 G0 Z30.
N11 G0 Z6.5
N12 G1 Z4. F150.

N13 X-15.166 Y10.857 F900.
N14 X-15.357 Y10.609
N15 X-15.543 Y10.552
N16 X-15.556 Y10.538
N17 X-16.109 Y10.375
N18 X-16.232 Y10.345
N19 X-16.459 Y10.278
N20 X-16.73 Y10.216
N21 X-17.689 Y10.021
N22 X-18.587 Y9.876
N23 X-19.04 Y9.823
N24 X-19.209 Y9.797
N25 X-19.843 Y9.74
N26 X-20.864 Y9.719
N27 X-21.738 Y9.695
N28 X-22.054 Y9.703
N29 X-22.431 Y9.73
N30 X-22.465 Y9.752

2.Dokončování nástrojem č.10 (obr.3.18):



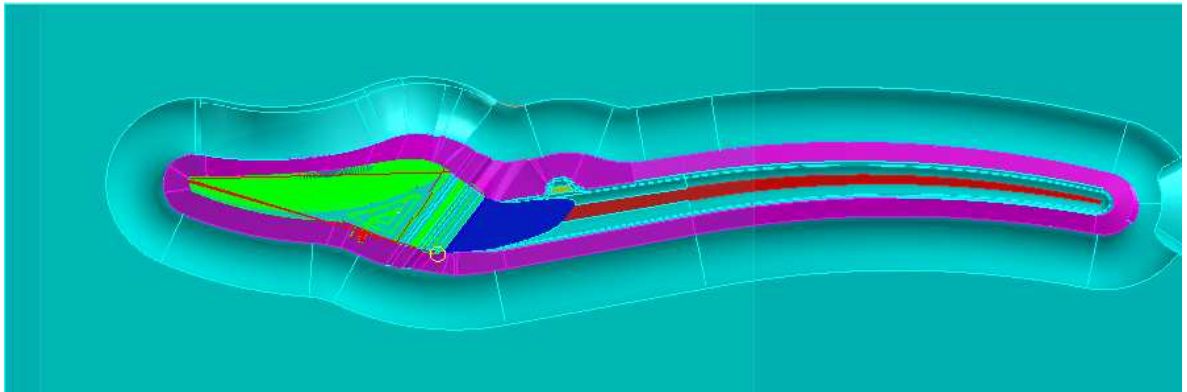
Obr.3.18 Operace dokončování č.2.

Ukázka vytvořeného NC programu :

```
N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T10 FREZA CELNI - PRUM 10./ ROHOVY RADIUS 2.5
N6 M6 ("10000")
N7 S8000 M3
N8 G94 F2800.
N9 G0 X7.468 Y13.396
N10 G0 Z25.
N11 G0 Z4.45
N12 G1 Z1.95 F500.
N13 X7.409 Y13.201 F2800.
```

N14 X7.121 Y12.212
N15 X7.102 Y12.188
N16 X7.1 Y12.183
N17 X7.032 Y12.096
N18 X6.712 Y11.681
N19 X6.447 Y11.331
N20 X6.445 Y11.327
N21 X6.407 Y11.298
N22 X6.403 Y11.296
N23 X6.389 Y11.28
N24 X6.388 Y11.276
N25 X6.137 Y11.088
N26 X6.133 Y11.086
N27 X5.686 Y10.74
N28 X5.604 Y10.697
N29 X5.583 Y10.681
N30 X5.458 Y10.616

3.Dokončování nástrojem č.50 (obr.3.19):



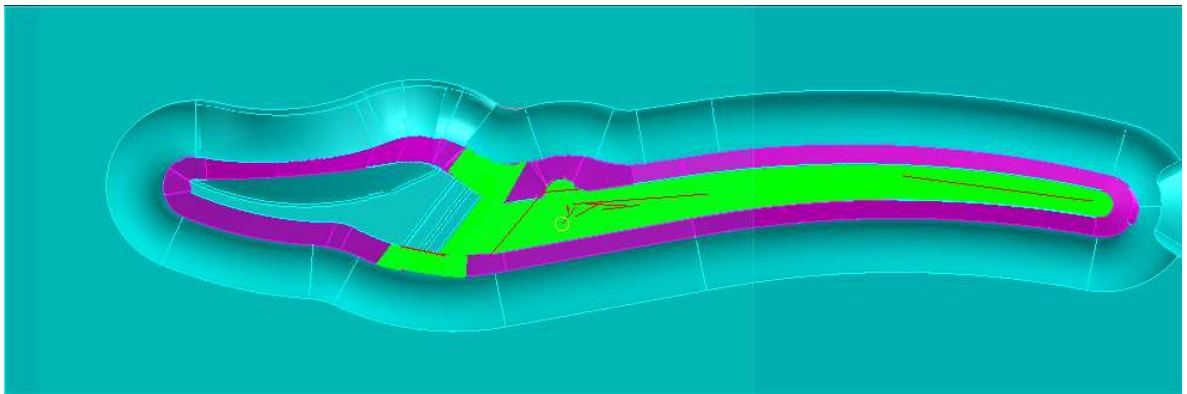
Obr.3.19 Operace dokončování č.3.

Ukázka vytvořeného NC programu :

N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T50 FREZA CTVRTKOVA - PRUM 6/ ROHOVY RADIUS 0.8
N6 M6 ("10000")
N7 S7425 M3
N8 G94 F4455.
N9 G0 X-15.43 Y10.898
N10 G0 Z30.
N11 G0 Z6.5
N12 G1 Z4. F500.
N13 X-15.842 Y10.448 F4455.
N14 X-16.519 Y9.814

N15 X-16.994 Y9.417
N16 X-17.63 Y8.978
N17 X-17.577 Y8.819
N18 X-17.196 Y8.493
N19 X-17.589 Y8.425
N20 X-19.067 Y8.205
N21 X-19.848 Y8.133
N22 X-20.744 Y8.097
N23 X-21.011 Y8.092
N24 X-20.951 Y8.488
N25 X-20.931 Y8.722
N26 X-21.313 Y8.85
N27 X-22.216 Y9.209
N28 X-23.281 Y9.747
N29 X-23.092 Y9.992
N30 X-23.707 Y9.935 Z3.989 F500

4.Dokončování nástrojem č.30 (obr.3.20):



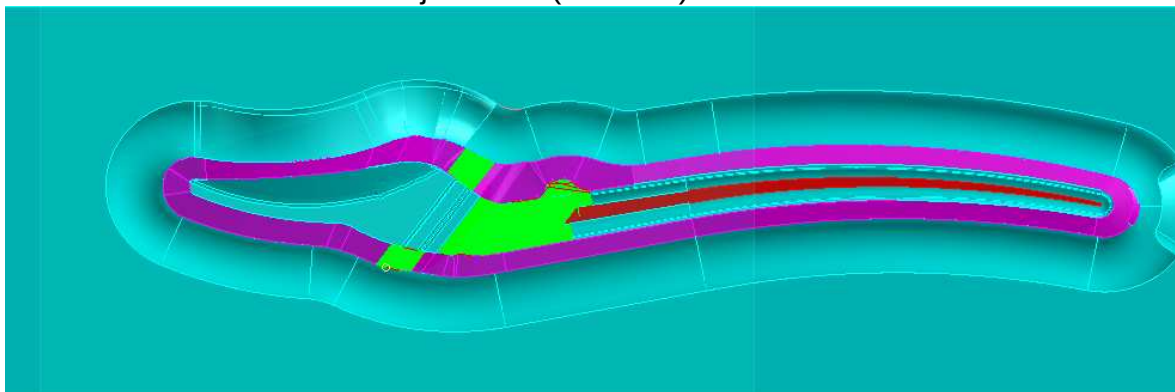
Obr.3.20 Operace dokončování č.4.

Ukázka vytvořeného NC programu :

N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T30 FREZA KULOVA - PRUM 4/ ROHOVY RADIUS 2
N6 M6 ("10000")
N7 S8000 M3
N8 G94 F960.
N9 G0 X23.727 Y3.034
N10 G0 Z30.
N11 G0 Z3.272
N12 G1 Z0.772 F200.
N13 X18.926 Y-3.565 F960.
N14 X11.735 Y-13.463
N15 X11.739 Y-13.464 Z0.772 F200.

N16 X11.907 Y-13.483 Z0.756
N17 X11.941 Y-13.487 Z0.753
N18 X12.043 Y-13.499 Z0.74
N19 X12.094 Y-13.505 Z0.732
N20 X12.098 Y-13.505 Z0.732
N21 X22.798 Y1.223 F960.
N22 X23.979 Y2.836
N23 X24.004 Y2.857
N24 X24.009 Y2.854 Z0.731 F200.
N25 X24.104 Y2.807 Z0.715
N26 X24.143 Y2.788 Z0.707
N27 X24.211 Y2.755 Z0.694
N28 X24.219 Y2.751 Z0.692
N29 X24.162 Y2.693 F960.
N30 X19.222 Y-4.105

5.Dokončování nástrojem č.40 (obr.3.21):



Obr.3.21 Operace dokončování č.5.

Ukázka vytvořeného NC programu :

N1 G90
N2 G54
N3 G40
N4 G64 ;HSM OBRABENI
N5 ; T40 FREZA KULOVA - PRUM 2/ ROHOVY RADIUS 1
N6 M6 ("10000")
N7 S8000 M3
N8 G94 F650.
N9 G0 X23.59 Y3.136
N10 G0 Z30.
N11 G0 Z3.287
N12 G1 Z0.787 F150.
N13 X23.555 Y3.129 F650.
N14 X16.167 Y-6.993
N15 X11.486 Y-13.435
N16 X11.504 Y-13.437 Z0.786 F150.

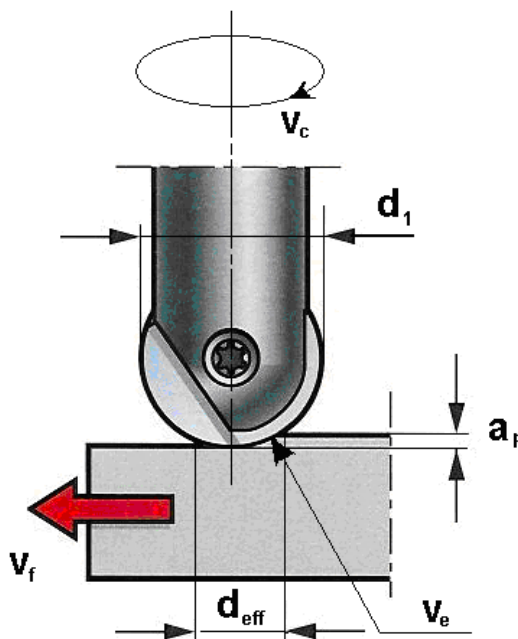
N17 X11.765 Y-13.467 Z0.764
N18 X11.78 Y-13.468 Z0.763
N19 X11.786 Y-13.469 Z0.762
N20 X23.733 Y2.976 F650.
N21 X23.783 Y2.995
N22 X23.791 Y2.99 Z0.761 F150.
N23 X23.832 Y2.963 Z0.754
N24 X23.839 Y2.958 Z0.753
N25 X23.913 Y2.91 Z0.74
N26 X23.927 Y2.901 Z0.737
N27 X23.866 Y2.873 F650.
N28 X19.415 Y-3.226
N29 X11.961 Y-13.489
N30 X12.135 Y-13.509 Z0.712 F150.

U každé operace uvádím jen krátkou ukázkou NC programu, protože celý NC program by byl na několik tisíc stran proto není uveden ani v příloze.

3.2.4 Optimalizace a efekty rozvoje

Při použití kulových fréz při 3osém frézování (obr.3.22), kdy odebíráme při dokončování jen malou hloubku řezu a_p se sníží efektivní průměr frézy d_{eff} a tím také efektivní řezná rychlost v_{ef} . Přitom nástroj s materiálem svírá pravý úhel, je na kulovém ostří v ose frézy nulový průměr frézy a tím i nulová řezná rychlost. V tomto místě nástroj neobrábí, ale tváří materiál obrobku, což je nežádoucí.

Z toho důvodu zde dochází k nežádoucím jevům, jako je zvyšování teploty při obrábění, přechování třísky a zvýšení tvorby nárustků. Tyto vlivy mají za důsledek zhoršení drsnosti obrobených ploch materiálu a snížení trvanlivosti nástroje.



Obr. 3.22 Efektivní průměr frézy bez náklonu³⁶

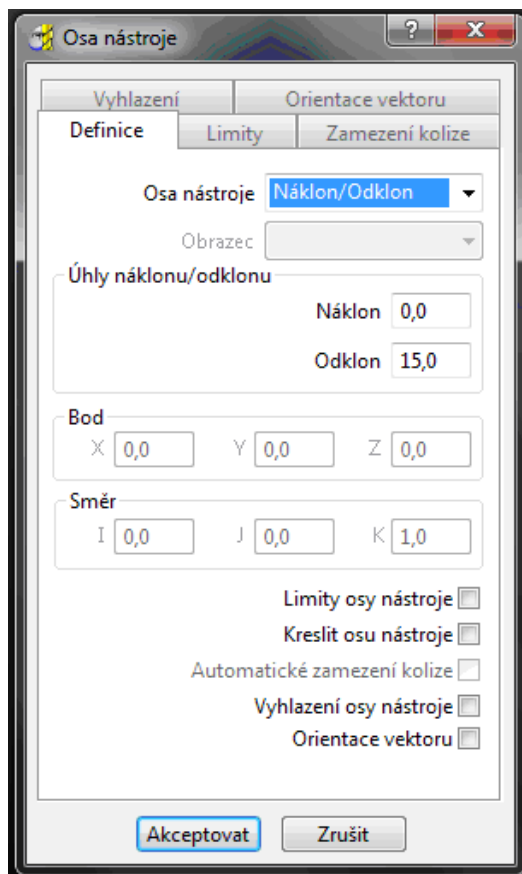
$$d_{\text{eff}} = 2 \cdot \sqrt{d_1 \cdot a_p - a_p^2} \quad [\text{mm}] \quad (3.11)$$

Kde: a_p je hloubka řezu (axiální přísuv nástroje) [mm]

d_1 je průměr frézy [mm]

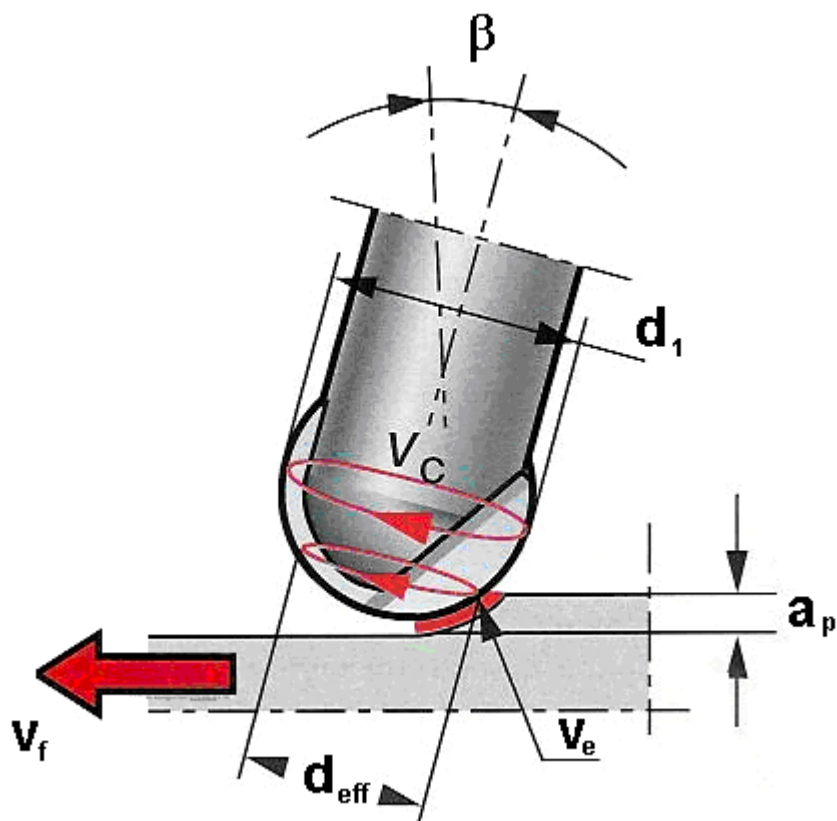
d_{eff} je efektivní průměr frézy [mm]

Zmíněné jevy by bylo možné eliminovat přesunutím výroby na 5osé obráběcí centrum (obr.125). To zatím není možné, ale díky programu PowerMILL10 lze tu to možnost nasimulovat. Díky funkci osa nástroje (obr.3.50), kde jde nastavit naklonění nástroje (obr.3.70) pro jednotlivé dráhy kulových fréz.



Obr.3.50. Nastavení náklonu nástroje

Tuto změna nastavení provedeme u nástrojů č.:20,30,40. Kdy dojde ke zvýšení efektivního průměru frézy d_{eff} a díky tomu i k zvýšení efektivní řezné rychlosti. Důležité je, aby směr posuvu nástroje byl tažný a také aby způsob frézování byl sousledný. Díky tomu má nástroj tišší chod a obrobený povrch má lepší drsnost.

Obr. 28 Efektivní průměr frézy při frézování taženým nástrojem³⁶

$$d_{ef} = d_1 \cdot \sin \left[\beta + \arccos \left(\frac{d_1 - 2 \cdot a_p}{d_1} \right) \right] \quad [\text{mm}] \quad (3.12)$$

Kde: a_p je hloubka řezu (axiální přísuv nástroje) [mm]

β je úhel naklonění nástroje ve směru posuvu [°]

d_1 je průměr frézy [mm]

d_{ef} je efektivní průměr frézy [mm]

$$v_e = \frac{\pi \cdot n \cdot d_{ef}}{1000} \quad [\text{mm}] \quad (3.13)$$

Kde: d_{ef} je efektivní průměr frézy [mm].

n jsou otáčky frézy [min⁻¹],

v_e je skutečná (efektivní) řezná rychlost [m/min],

3.2.5 Porovnání efektivní řezné rychlosti při frézování s nenakloněným a s nakloněným řezným nástrojem

Parametry obrábění pro nástroje č.:20 (obr.21) :

$$d_1 = 8 \text{ mm}$$

$$n_2 = 6000 \text{ min}^{-1}$$

$$a_p = 0.05 \text{ mm}$$

Parametry obrábění pro nástroje č.: 30(obr.315) :

$$d_1 = 4 \text{ mm}$$

$$n_3 = 8000 \text{ min}^{-1}$$

$$a_p = 0.05 \text{ mm}$$

Parametry obrábění pro nástroje č.: 40(obr.238) :

$$d_1 = 2 \text{ mm}$$

$$n_4 = 8000 \text{ min}^{-1}$$

$$a_p = 0.05 \text{ mm}$$

Výpočet efektivní řezné rychlosti v_e bez náklonu nástroje č. 20.:

$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{d_1 \cdot a_p - a_p^2} = 2 \cdot \sqrt{8 \cdot 0,05 - 0,05^2} = \underline{\underline{1,261 \text{ mm}}} \quad (3.14)$$

$$v_e = \frac{\pi \cdot n_2 \cdot d_{eff}}{1000} = \frac{\pi \cdot 8000 \cdot 1,261}{1000} = \underline{\underline{31,692 \text{ m / min}}} \quad (3.15)$$

Výpočet efektivní řezné rychlosti v_e s náklonem nástroje č. 20 o 15°

$$d_{eff} = d_1 \cdot \sin \left[\beta + \arccos \left(\frac{d_1 - 2 \cdot a_p}{d_1} \right) \right] = 8 \cdot \sin \left[15 + \arccos \left(\frac{8 - 2 \cdot 0,05}{8} \right) \right] = \underline{\underline{3,263 \text{ mm}}} \quad (3.16)$$

$$v_e = \frac{\pi \cdot n_2 \cdot d_{eff}}{1000} = \frac{\pi \cdot 8000 \cdot 3,263}{1000} = \underline{\underline{81,998 \text{ m / min}}} \quad (3.17)$$

Výpočet efektivní řezné rychlosti v_e bez náklonu nástroje č. 30.:

$$d_{\text{eef}} = 2 \cdot \sqrt{d_1 \cdot a_p - a_p^2} = 2 \cdot \sqrt{4 \cdot 0,05 - 0,05^2} = \underline{\underline{0,889 \text{ mm}}} \quad (3.18)$$

$$v_{c_{\text{eff}}} = \frac{\pi \cdot n \cdot d_{\text{eff}}}{1000} = \frac{\pi \cdot 8000 \cdot 0,889}{1000} = \underline{\underline{22,338 \text{ m / min}}} \quad (3.19)$$

Výpočet efektivní řezné rychlosti v_e s náklonem nástroje č. 30 o 15° :

$$d_{\text{eef}} = d_1 \cdot \sin \left[\beta + \arccos \left(\frac{d_1 - 2 \cdot a_p}{d_1} \right) \right] = 4 \cdot \sin \left[15 + \arccos \left(\frac{4 - 2 \cdot 0,05}{4} \right) \right] = \underline{\underline{1,868 \text{ mm}}} \quad (3.20)$$

$$v_e = \frac{\pi \cdot n_3 \cdot d_{\text{eff}}}{1000} = \frac{\pi \cdot 8000 \cdot 1,868}{1000} = \underline{\underline{46,950 \text{ m / min}}} \quad (3.21)$$

Výpočet efektivní řezné rychlosti v_e bez náklonu nástroje č. 40.:

$$d_{\text{eef}} = 2 \cdot \sqrt{d_1 \cdot a_p - a_p^2} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,05 - 0,05^2} = \underline{\underline{0,624 \text{ mm}}} \quad (3.22)$$

$$v_e = \frac{\pi \cdot n_4 \cdot d_{\text{eff}}}{1000} = \frac{\pi \cdot 8000 \cdot 0,624}{1000} = \underline{\underline{15,695 \text{ m / min}}} \quad (3.23)$$

Výpočet efektivní řezné rychlosti v_e s náklonem nástroje č. 40 o 15° :

$$d_{\text{eef}} = d_1 \cdot \sin \left[\beta + \arccos \left(\frac{d_1 - 2 \cdot a_p}{d_1} \right) \right] = 2 \cdot \sin \left[15 + \arccos \left(\frac{2 - 2 \cdot 0,05}{2} \right) \right] = \underline{\underline{1,095 \text{ mm}}} \quad (3.24)$$

$$v_e = \frac{\pi \cdot n_4 \cdot d_{\text{eff}}}{1000} = \frac{\pi \cdot 8000 \cdot 1,095}{1000} = \underline{\underline{27,52 \text{ m / min}}} \quad (3.25)$$

Z vypočtených vztahů vyplývá, že efektivní řezná rychlost se při použití náklonu frézovacího nástroje o 15° zvýšila u nástroje č.: 20 o 158,7%, u nástroje č.: 30 o 110,2% a u nástroje č.: 40 o 75%. Dále ze zcela zabránilo tomu, aby nástroj pracoval s nulovou rychlostí a docházelo tak ke tváření.

4 TECHNOLOGICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Při výrobě forem se používal dříve tradiční výrobní řetězce zahrnující výrobu fyzického modelu, hrubování materiálu před tepelným zpracováním, tepelné zpracování, výrobu elektrod a dokončovací etapu skládající se z elektroeroze s následným manuálním či pouze poloautomatickým dokončováním. Takto vyráběné formy již nemají z důvodu nízké flexibility a značné časové náročnosti velkou šanci na úspěch²³.

Nové technologie podstatně zkracují celý výrobní řetězec a rozpracovanost výroby, protože veškerá výroba je realizována frézováním a to buď hrubováním před a dokončováním po tepelném zpracování. Mnohdy už je polotovar celkově tepelně zpracován a obrábí se na jedno upnutí²³.

V našem případě se zatím používá první způsob s ohledem na momentální strojní vybavení a jeho zatěžování.

V programu PowerMILL10 je funkce statistika drah (obr.4.1) ta nám umožňuje zjistit strojní časy obrábění jednotlivých nástrojů (tab.4.1) při dokončování jak při 3osém obrábění tak i při 5osém obráběním.

Nájezdy a přejezdy	
	Délka
Rychloposuv	1846,02
Přirůstkem	692,0
Pod úhlem	0,00
Další	0,00
Celkový	2538,02

Pohyby nástroje	
	Délka
Lineárně	190550,57
Oblouky	0,00
Celkový	190550,57

Celkový	
	Délka
Celkový	193088,59

Čas	
	Čas
Rychloposuv	0:00:36
Přirůstkem	0:00:04
Pod úhlem	0:00:00
Další	0:00:00
Celkový	0:00:41

Čas	
	Čas
Lineárně	2:16:06
Oblouky	0:00:00
Celkový	2:16:06

Celkový	
	Délka
Celkový	193088,59

Čas	
	Čas
Celkový	2:34:06

Zdvihy	
	Zdvihy
Zdvihy	346

Obr.4.1.Funkce statistika drah pro nástroj č.20.

Tab.4.1 Strojní časy dokončování jednotlivých nástrojů při frézování horní zápustky

	Strojní čas při frézování standardním způsobem [min]	Strojní čas při naklonění frézy o 15° [min]
Nástroj č.:10	5	5
Nástroj č.:20	154	152
Nástroj č.:30	102	101
Nástroj č.:40	47	45
Nástroj č.:50	5	5
Celkový strojí čas v [min]	313	308
Celkový strojí čas v [h]	5,22	5,14

Tab.4.2 Strojní časy dokončování jednotlivých nástrojů při frézování dolní zápustky

	Strojní čas při frézování standardním způsobem [min]	Strojní čas při naklonění frézy o 15° [min]
Nástroj č.:10	1	1
Nástroj č.:20	159	157
Nástroj č.:30	169	167
Nástroj č.:40	81	79
Celkový strojí čas v [min]	410	404
Celkový strojí čas v [h]	6,83	6,74

Ze zjištěných hodnot vyplývá, že rozvoj z 3osého na 5osé obrábění nemá velký vliv na změnu jednoho z hlavních činitelů ceny a to je strojní čas obrábění. Dále varianta nákupu nového stoje jenom z důvodu přesunu výroby této zápustky by byla ekonomicky velmi nevýhodná. Stávající cena 800kč/h obrábění na 3osém frézovacím centru je mnohem nižší než by byla hodina obrábění na úplně novém stoji. Zajisté by došlo ke značnému prodloužení trvanlivosti nástrojů protože by nedocházelo k hlavnímu negativnímu vlivu k tváření při obrábění kulovými frézami, jak vyplývá z porovnání rychlostí. To by mělo za důsledek i lepší výslednou jakost obrobené plochy. Proto by se už

nemusely ručně dolešťována kolmé stěny uvnitř zápustky, jak je tomu u 3osého obrábění. Samotné nástroje však nejsou v našem případě tak důležitým činitelem při stanovení ceny zápustky. Dalším důležitým ekonomickým hlediskem je cena materiálu, ta se mnohdy liší a proto je důležité nakupovat od ověřených výrobců aby nedošlo k potížím, jak při samotné výrobě nebo tepelném zpracování (polotovary nepůjde zakalit na požadovanou tvrdost), tak i při samotném používání zápustky (značné a rychlé opotřebení). Naše zápustka (horní i dolní díl) je vyrobena vyšší než by mohla být z důvodu případné renovace. Proto se materiál podílí tak významně na ceně při celkové váze polotovarů 72,8kg a cenně od kvalitního dodavatele kolem 120kč/kg. Tepelné zpracování se podílí na ceně také jen menší částkou asi jen 30kč/kg. Další technologické operace jako před obrobení polotovaru vyvrtání děr pro vodící kolíky, vytvoření drážek pro upnutí, případné ruční doleštění také nemají tak výrazný vliv na cenu zápustky. Hlavní ekonomické činitele jsou zobrazeny v tabulce 4.3.

Tab. 4.2 Procentuálního zastoupení jednotlivých operací a materiálu na ceně zápustky.

	Hrubování na 3osé CNC frézovacím centru [%]	Dokončování na 3osé CNC frézovacím centru [%]	Materiál [%]	Tepelné zpracování [%]	Operace na konvenčních stojích a ruční leštění [%]
Náklady na výrobu spodního dílu zápustky	15	38	30	7	10
Náklady na výrobu horního dílu zápustky	20	28	30	7	15

Celková cena sady zápustek (horního a dolního dílu) se pohybuje od 28000 - 30000kč. Na celkovou cenu má také vliv konkurence na trhu a další ekonomické podmínky (kurzy měn apod.).

ZÁVĚR

V oblasti výroby forem všech druhů, jak na plastové výrobky, tak na ostatní výrobky z různých materiálů je stále důležitější zkracování návrhových a především výrobních časů, které se velmi podílí na celkové ceně a možnosti konkurence v dané oblasti. Díky velkému rozmachu nových technologií ve všech směrech výroby je důležitý i rozvoj v programových možnostech při navrhování a zpracování jednotlivých projektů, které využívají komplexních CAD/CAM systémů a mohou velmi ušetřit samotný návrhový čas až k NC programu a samotné výrobě.

Hlavním trendem při výrobě forem je v současnosti obrábění na 5osích obráběcích centrech velmi vysokými rychlostmi (HCS) za použití moderních nástrojů ze slinutého karbidu, které jsou povlakovány speciálními povlaky. Tyto povlaky zvyšují několikanásobně životnost nástroje.

Dalším trendem je obrábění na jedno upnutí, kdy se materiál tepelně zpracuje na požadovanou tvrdost, mnohdy až na 70HRC. Díky souladu vývoje ve všech obráběcích odvětvích (stroj, nástroj, řídicí systém) je možné i takto tvrdý materiál úspěšně obrábět pomocí speciálního substrátu ze slinutého karbidu, který je použitý u nových nástrojů. Tyto nástroje kromě velmi kvalitního SK musí mít i specifické úhly čela, hřbetu a ostří.

Důležité je, že i při tak velkých rychlostech a tvrdých obrobcích je zachována vysoce kvalitní drsnost kolem hodnoty Ra 1 i nižší obrobené plochy.

Tyto nové moderní technologie pomalu vytlačují nekonvenční technologie v čele s hlavním zástupcem elektroerozivním obráběním, tak jak je pro firmy možné obměňovat strojní park

Bohužel se zatím u velmi složitých forem bez elektroeroze neobejdeme. Podle trendů je na snaze, že s rychlým rozvojem lidstva bude snad možno vyrábět všechny typy forem bez elektroeroze. A i kdyby ne, tak dalším moderním trendem v oblasti výroby forem je automatické multifunkční centrum, které v sobě zahrnuje jak výhody frézování tak i elektroeroze.

V této práci byl proveden návrh výroby pro dokončování zápusťky na nůžky na plech. Obrábění bylo prováděno nástroji s kruhovými VBD ze slinutých karbidů a nástroji monolitními tvarovými SK.

Byly navrženy dva způsoby výroby a to 3osím obráběním pro které byl vytvořen i NC program a s 5osím obráběním, které by zamezilo špatnému vlivu při dokončování kulovými frézami. Kdy nastává v případě 3osého obrábění značné zatížení nástroje na ose nástroje, kde je nulová řezná rychlost a nástroj obrobek neobrábí ale tváří. Díky 5osému obrábění s nakloněným vřetenem bylo možno tuto situaci optimalizovat a dosáhnout tak vyšší relativní rychlosti. Z technicko ekonomického hlediska vyplývá, že obrábět danou zápusťkou na 5osém stojí je v podstatě zbytečné, protože cena nástroje nehraje při samotném obrábění významnou roli.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1.vyd. Košice : Vianela, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4
- [2] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění*. MM průmyslové spektrum. 2007/10, s. 58. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>>.
- [3] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění*. MM průmyslové spektrum. 2007/7, s. 60. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
- [4] POSLUŠNÝ, Petr. *Elektroerozivní obrábění*. MM průmyslové spektrum. 2006/7, s. 37. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni>>.
- [5] KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2.vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005/12. 270 s. ISBN 80-214-3068-0
- [6] *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* – ukázka kapitoly [online]. Dearborn, USA: Society of manufacturing engineers. 2001 [cit. 2011-05-16]. Dostupné také z : <http://books.google.com/books?id=FJbdIKGmfSgC&printsec=frontcover&dq=ELECTRICAL+DISCHARGE+MACHINING&hl=cs&ei=XMrdTaazONHwsgajrLzQBQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCkQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false>.
- [7] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1.vyd. Praha : ČVUT v Praze, 1989. 122 s.
- [8] GF AgieCharmilles [online]. 2008/7 [cit. 2011-05-26]. *When to EDM*. Dostupné z WWW: <http://us.gfac.com/products/edm/When_to_EDM_JULY08.pdf>.
- [9] *Technologie, die Sie begeistert* [online]. Ratingen : MITSUBISHI ELECTRIC EUROPE, 2009 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://www.edmtrade.cz/admin/upload/files/r1492-2009-08-10-16-52-20-EA-V_Advance_D_0609.pdf>.
- [10] POSLUŠNÝ, Petr. *Jednoduché hloubení na nejvyšší úrovni*. MM průmyslové spektrum [online]. 2010/7, [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/jednoduche-hloubeni-na-nejvyssi-urovni>>.
- [11] POSLUŠNÝ, Petr. *Uživatelsky přívětivé elektroerozivní stroje*. MM průmyslové spektrum [online]. 2009/5, 1, [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/uzivatelsky-privitive-elektroerozivni-stroje>>.

- [12] Exeron.de [online]. 2010 [cit. 2011-05-26]. *Exoren /EDM*. Dostupné z WWW: <<http://www.exeron.de/ceasy/modules/cms/main.php5?cPageId=42>>
- [13] Gfac.com [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. *GF AgieCharmilles*. Dostupné z WWW: <<http://www.gfac.com/gfac/products/wire-cut-edm/high-speed-machining/ac-progress-vp4.html>>.
- [14] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Tiskové středisko ZČU, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [15] Příručka k zařízení AGIETRON Impact, Innovation, Exact. [CD-ROM]. 2001, [cit. 2011-04-18].
- [16] HULÍN, Pavel. *Komplexní CAD/CAM systém pro výrobu nástrojů a forem*. MM průmyslové spektrum [online]. 2007/6, [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-cad-cam-system-pro-vyrobu-nastroju-a-forem>>.
- [17] Lm-eroze.cz [online]. 2006 [cit. 2011-05-26]. *O elektrochemii*. Dostupné z WWW: <http://www.lm-eroze.cz/index.php?action=show&id_java=x21&id=21>
- [18] ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace* [online]. 2002/8, [cit. 2011-04-24]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>.
- [19] ŘASA, Jaroslav; JINDROVÁ, Radka. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem*. MM průmyslové spektrum [online]. 2006/7, [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>.
- [20] *Výroba forem a pětiosé obrábění*. MM průmyslové spektrum [online]. 2005/9, [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-forem-a-petiose-obrabeni>>.
- [21] KAŇKA, Jan. Proč pro výrobu forem používat specializovaný CAD/CAM?. MM průmyslové spektrum [online]. 2009/1, [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/proc-pro-vyrobu-forem-pouzivat-specializovany-cad-cam>>.
- [22] VOLF, Josef. Nst.cz [online]. 2009/9 [cit. 2011-05-26]. *Fáze výroby forem*. Dostupné z WWW: <<http://www.nst.cz/?vyroba>>.
- [23] SKOPEČEK, Tomáš; HOFMANN, Petr. *Frézovací strategie při výrobě forem a zápuštěk*. MM průmyslové spektrum. 2005/5, s. 22. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapustek>>. ISSN 1212–2572.
- [24] Za.dmg.com [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. *HSC 105 linear / HSC Processing*. Dostupné z WWW: <<http://za.dmg.com/en,milling,hsc105linear?opendocument>>.

- [25] Technik.ihned.cz [online]. 2005/4 [cit. 2011-05-26]. EUROMOLD. Dostupné z WWW: <http://technik.ihned.cz/c4-10004050-15932340-800000_d-euromold-aneb-jak-zrychlit-proces-od-napadu-presprototyp-az-po-seriovou-vyrobu>.
- [26] Fehlmann.com [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. *Fehlmann AG Maschinenfabrik*. Dostupné z WWW: <<http://www.fehlmann.com/de/produkte/bearbeitungszentren-in-portalbauweise/picomax-reg-825-versa/index.html>>.
- [27] Misan.cz [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. *Hyper VARIAXIS 630*. Dostupné z WWW: <<http://www.misan.cz/mazak/katalog-detail/hypervrx630-hyper-variaxis-630/>>.
- [28] BINDER, *Nástroje pro výrobu forem*. Technický měsíčník MM Průmyslové spektrum, 2003/6 – Číslo 6 – CZK 65 – ISSN 1212 - 2572.
- [29] PRÁŠIL, Tomáš., *Nové nástroje pro vysokorychlostní a vysokoposuvové frézování*. Technický měsíčník MM Průmyslové spektrum, 2006/12 – Číslo 12 – CZK 65 – ISSN 1212 – 2572.
- [30] *Tvrdé frézování*. Technický měsíčník MM Průmyslové spektrum, 2005/4 – Číslo 4 – CZK 65 – ISSN 1212 – 2572.
- [31] *Phorn.de* [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. HOCHLEISTUNGSBEARBEITUNG. Dostupné z WWW: <http://www.phorn.de/fileadmin/user_upload/de/PDF/PDF_FraesKatalog_de_en/KapitelM_Stah_System_DS.pdf>.
- [32] Rostex.cz [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. Katalog nářadí. Dostupné z WWW: <<http://www.rostex.cz/cs/vyrobní-program/naradi-zahradnicke/nuzky-na-plech/nuzky-na-plech-vystrihove-2344-250-mm.html>>.
- [33] *cz.dmg.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. DMC 60 T . Dostupné z WWW: <<http://cz.dmg.com/en,milling,dmc60t?opendocument>>.
- [34] Voha-tosec.d [online]. 2010 [cit. 2011-05-26]. P-V Katalog 2010 cs. Dostupné z WWW: <<http://voha-tosec.de/brochures.html>>.
- [35] *Fraisa.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. Katalog firmy Frasa. Dostupné z WWW: <<http://www.fraisa.com/getattachment/d88acb32-72cb-45d8-af44-d4ab334f8c38/HM-Fraswerkzeuge-%281%29.aspx>>.
- [36] *Technická příručka obrábění Sandvik Coromant*. Švédsko : Elanders, 2005. 550 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
d	[mm]	průměr nástrojové elektrody
D	[mm]	požadovaný rozměr dutiny
a	[mm]	velikosti pracovní mezery
R _z	[mm]	maximální aritmetická úchylka obrobeného povrchu
z	[mm]	tloušťka narušeného povrchu
M _m	[mm]	minimální hodnota, o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru dutiny
R _a	[μm]	střední aritmetická drsnost povrchu
ASC	[-]	adaptivním řídicím systémem
F	[Hz]	frekvence
A	[mm]	rozkmit
CNC	[-]	computer numerical kontrol- počítačové numerické ovládání
IT	[-]	stupeň přesnosti
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička
SK	[-]	slinutý karbid
HSC	[-]	hide speed cutting - Vysoko rychlostní obrábění
l _c	[mm]	celková velikost frézy
d ₁	[mm]	průměr nástroje
n	[/min]	otáčky na vřetení
v _c	[m/min]	řezná rychlost
f _z	[mm]	posuv na zub
Z _n	[-]	celkový počet zubu břitu na nástroji
v _f	[mm/min]	rychlost posuvu
d _{eff}	[mm]	efektivní průměr frézy
v _e	[m/min]	otáčky
a _p	[mm]	hloubka řezu
β	[°]	úhel naklonění nástroje ve směru posuvu
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
HV	[-]	tvrdost dle Vickerse
PVD	[-]	physical vapour deposition – fyzikální napařování z plynné fáze

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výkres sestavy zápusky - č.výkresu: O62-DP/01-00