



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH RACIONALIZACE VÝROBY TVAROVÉ ČÁSTI VSTŘIKOVACÍ FORMY

SUGGESTION FOR RATIONALIZATION OF INJECTION MOULD PART PRODUCTION

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Eva Kamenická

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2023

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	<b>Bc. Eva Kamenická</b>
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23

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:

## Návrh racionalizace výroby tvarové části vstřikovací formy

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat tvorbou návrhu a racionalizací procesu výroby tvářecí části formy určené pro vstřikování plastů s cílem zkrácení výrobního času. Realizovaná část formy bude tenkostěnná a charakteristická komplexními tvarovými plochami s vysokým procentem úběru materiálu. K racionalizaci výroby bude zapotřebí experimentální analýza zahrnující různé kombinace typů řezných nástrojů, strategií frézování, řezných podmínek a dalších parametrů, které povedou k zefektivnění stávajícího výrobního procesu. Výsledná měření budou prováděna v závodě společnosti Illinois Tool Works Inc. ve Velké Bíteši, který je zároveň zadavatelem tématu této práce. Práce bude ukončena zhodnocením, včetně rozboru navrženého řešení a porovnáním se stávající variantou výroby.

### Cíle diplomové práce:

Teoretický a technický rozbor problematiky výroby tvarových částí vstřikovacích forem.

Charakteristika stávajícího výrobního procesu.

Experimentální část – návrh metodiky a provedení experimentů.

Návrh inovace výrobního procesu – zefektivnění stávajícího stavu.

Realizace a zhodnocení výroby tvarové vložky formy.

### Seznam doporučené literatury:

Die & Mould Making (Application guide). SANDVIK COROMANT. 2001. 188 s.

JAIN, A., BAJPAI, V. INTRODUCTION TO HIGH SPEED MACHINING (HSM) [online]. Indian Institute of Technology (ISM), Dhanbad. 2020. Dostupné na:

[https://www.researchgate.net/publication/339093429\\_Introduction\\_to\\_high-speed\\_machining\\_HSM](https://www.researchgate.net/publication/339093429_Introduction_to_high-speed_machining_HSM)

BEGIC-HAJDAREVIC, D., CEKIC, A., KULENOVIC, M. Experimental Study on the High Speed Machining of Hardened Steel [online]. 2013. Dostupné na:  
[https://www.researchgate.net/publication/261104049\\_Experimental\\_Study\\_on\\_the\\_High\\_Speed\\_Machining\\_of\\_Hardened\\_Steel](https://www.researchgate.net/publication/261104049_Experimental_Study_on_the_High_Speed_Machining_of_Hardened_Steel)

IŽOL, P. Hodnotenie stratégií frézovania pre výrobu tvarových plôch. Habilitační práce [online]. Technická univerzita v Košiciach. 2016. Dostupné na:  
<https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=922D20CCC953BCA4FD22C7E3887D&seo=CRZP-detail-kniha>

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 21. 10. 2022

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom zefektívnenia výroby tvarovej časti vstrekovacej formy a dielu formy zodpovedného za chladenie plastového výrobku. Hlavným cieľom je skrátenie výrobného času so súčasným dodržaním vysokých požiadaviek na rozmerovú a geometrickú presnosť a integritu povrchu vyrábaných súčastí. Práca sa na začiatku venuje teoretickému rozboru problematiky výroby tvarových častí foriem. Nasleduje analýza východzieho stavu, ktorá pozostáva z charakteristiky daných súčastí, dostupných výrobných prostriedkov a z popisu pôvodného technologického postupu. Experimentálna časť práce vysvetľuje postupy a zdôvodňuje voľby pri tvorbe nových programov v prostredí CAM softvéru Cimatron. Niekoľko možných variánt nástrojov a rezných parametrov bolo experimentálne odskúšaných a ich konečná voľba je v práci odôvodnená. Výstupom práce je nový technologický postup pre výrobu oboch súčastí, ktorý bol v praxi realizovaný a ohodnotený na základe výsledkov testov kvality súčastí i plastového výrobku. V závere práce možno nájsť zhodnotenie výstupu práce a časové porovnanie predošlého postupu s novým návrhom. Všetky experimenty a merania, vrátane výroby samotných súčastí, boli realizované v nástrojárni závodu spoločnosti ITW PRONOVIA, s.r.o. vo Veľkej Bíteši, ktorá je zároveň zadávateľom tejto práce.

### Kľúčové slová

výroba foriem, vstrekovacia forma, kvalita povrchu, Cimatron, vysokorýchlostné frézovanie, VoluMill

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with suggestion for rationalization of production of an injection mould cavity plate and of a part responsible for cooling of the final plastic product. The main objective is to reduce the production time while meeting the high requirements for dimensional and geometric accuracy and surface integrity of the manufactured parts. The thesis starts with a theoretical analysis of the production of mould parts. This is followed by an analysis of the initial state of production, which consists of the characteristics of the previously mentioned manufactured parts, the available production means and a description of the original technological process. The experimental part of the thesis explains the procedures and justifies the choices made in the creation of new programmes within the CAM software Cimatron. Several possible variations of tools and cutting parameters have been experimentally tested and their final choice is justified in the thesis. The output of the thesis is a new manufacturing process for the production of both components, which has been applied in practice and evaluated on the basis of the results of testing the quality of the components and the plastic product itself. In the conclusion of the thesis can be found an evaluation of the output of the thesis and a time comparison of the previous process with the new suggestion. All experiments and measurements, including the production of the components themselves, were carried out in the toolroom of ITW PRONOVIA, s.r.o. in Veľká Bíteš, which is also the creator of the topic of this thesis.

### Key words

mould making, injection mould, surface quality, Cimatron, high speed milling, VoluMill

---



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

KAMENICKÁ, Eva. *Návrh racionalizace výroby tvarové části vstříkovací formy* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149653>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

---

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Návrh racionalizace výroby tvarové části vstřikovací formy vypracovala samostatne s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

Brno, 22. 5. 2023

miesto, dátum

Eva Kamenická

---

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem touto cestou pánu doc. Ing. Josefovi Sedlákovi, Ph.D. za odborné vedenie a cenné pripomienky, ktoré mi poskytol pri vypracovaní diplomovej práce.

Ďalej by som rada poďakovala spoločnosti ITW PRONOVIA, s.r.o. za príležitosť vypracovania tejto diplomovej práce, za možnosť využitia priestorov ich nástrojárne a za poskytnutie materiálnych prostriedkov pre testovanie. Obzvlášť ďakujem za spoluprácu technologom a technikom nástrojárne. Menovite ďakujem pánu Lukášovi Pokornému za jeho odborné rady, ochotu a trpezlivosť, ktoré mi počas vypracovania poskytol.

Veľmi ďakujem tiež zamestnancom divízie Cimatronu firmy technology-support, s.r.o. za podporu mojich aktivít v rámci vypracovania práce, za zapožičanie licencie pre plnú verziu CAD/CAM Cimatron a možnosť práce s týmto softvérom. Menovite ďakujem panej Zuzane Douškovej za sprostredkovanie a výbornú komunikáciu, pánu Ondřejovi Vopravilovi za poskytnuté školenie a pánu Jakubovi Štětinovi za technickú podporu.

Ďakujem aj spoločnosti Šlechta a.s. za umožnenie návštevy ich dielne a za všetky informácie poskytnuté v súvislosti s procesom leštenia foriem.

V neposlednej rade ďakujem mojej najbližšej rodine, menovite Anne, Ladislavovi, Marošovi, Tomášovi a Michalovi za morálnu aj odbornú podporu nielen počas magisterských, ale počas celých mojich štúdií.

---

---

## OBSAH

Zadanie práce

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

PodĎakovanie

Obsah

ÚVOD .....	9
1 PROBLEMATIKA VÝROBY TVAROVÝCH ČASTÍ VSTREKOVACÍCH FORIEM ..	10
1.1 Stratégie frézovania tvarových dutín vstrekovacích foriem .....	10
1.2 Zásady frézovania tvarových dutín vstrekovacích foriem.....	13
1.2.1 Rezné podmienky .....	14
1.2.2 Frézovanie naklopeným nástrojom.....	16
1.3 Vysokorýchlostné obrábanie HSM a jeho aplikácia pri frézovaní foriem .....	17
1.3.1 Frézovanie za sucha.....	19
1.3.2 Frézovanie tvrdých materiálov .....	20
1.4 Elektroerozívne obrábanie EDM.....	20
1.4.1 Elektroerozívne hlbenie .....	21
2 ANALÝZA VÝCHODZIEHO STAVU .....	22
2.1 Plastový produkt.....	23
2.2 Charakteristika vybraných súčastí formy .....	24
2.2.1 Tvarová vložka formy .....	25
2.2.2 Chladiaca súčasť .....	26
2.2.3 Polotovary vybraných súčastí .....	26
2.3 Výrobné prostriedky .....	27
2.3.1 Stroj EXERON HSC 300 .....	27
2.3.2 Nástroje PM-TECH .....	29
2.3.3 CAD/CAM systém Cimatron .....	30
2.4 Východzí technologický postup pre tvarovú vložku formy .....	31
2.5 Východzí technologický postup pre chladiacu súčasť .....	33
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ .....	35
3.1 Tvorba programu v CAD/CAM Cimatron .....	35
3.1.1 Voľba stratégií pre tvarovú vložku formy .....	36
3.1.2 Voľba stratégií pre chladiacu súčasť .....	40
3.1.3 Určenie rezných podmienok .....	41
3.2 Metodika prevedených experimentov .....	41
3.2.1 Testovanie hrubovacích operácií .....	42
3.2.2 Testovanie dokončovacích operácií.....	47

---

---

3.2.3	Finálny test .....	50
3.3	Zmeny v programe vykonané na základe výsledkov testov .....	52
4	APLIKÁCIA NOVÉHO POSTUPU PRI VÝROBE SÚČASTÍ.....	54
4.1	Príprava polotovarov vybraných súčastí formy.....	54
4.2	Obrábanie vybraných súčastí formy .....	56
4.3	Leštenie vstrekovacej dutiny .....	59
4.4	Testy kvality .....	60
4.5	Porovnanie s východzím stavom .....	62
	ZÁVER.....	64

Zoznam použitých zdrojov

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Zoznam príloh

## ÚVOD

Technológia vstrekovania plastov je výrobný proces využívajúci vstrekovacie formy ako nástroje pre cenovo efektívnu výrobu veľkého počtu dielov z termoplastických materiálov. Nakoľko je táto technológia používaná pri hromadnej výrobe, konštrukcia a výroba vstrekovacích foriem predstavuje významný článok výrobného reťazca. Kvalita, cena a dodacie lehoty foriem ovplyvňujú vysoký počet vyrobených súčastí, a to najmä v automobilovom priemysle. Výrobcom vstrekovacích foriem sú preto nútení vyvíjať a zavádzať nové technológie a riešenia s cieľom zefektívnenia výrobného procesu. [1]

Forma je konštrukčne pomerne komplikované zariadenie, ktoré možno z metodického hľadiska rozdeliť na viacero oblastí. Jednou z týchto oblastí sú tvarové časti formy obsahujúce vstrekovacia dutinu, do ktorej je na vstrekovacom stroji pri vysokej teplote a tlaku vstrekovaný tekutý termoplast. Termoplast po vytuhnutí v dutine získava konečný tvar a rozmery plastového výrobku. Tvarové súčasti formy sú veľmi špecifické vzhľadom na konkrétny plastový výrobok, na všetky sa však kladú nemalé nároky z hľadiska kvality, produktivity a spoľahlivosti. Tvarová súčasť je výmennou časťou uzatváracej jednotky formy a vzhľadom na vysoké teploty a tlaky pôsobiace pri procese je jej životnosť kratšia, než je tomu u iných súčastí formy. Tvarové časti foriem sa vyrábajú predovšetkým technológiou frézovania a elektroerozívneho hĺbenia. Frézovanie je všeobecne považované za lepšiu voľbu vzhľadom na nižší výrobný čas a náklady. Elektroerozívne hĺbenie však umožňuje vyrobiť i nevyfrézovateľné súčasti, preto sa (so zreteľom na tvarovú zložitosť vstrekovacích dutín) v priemysle foriem taktiež často využíva. [2]

Táto diplomová práca sa venuje návrhu zefektívnenia výroby tvarovej časti formy a jej funkčného protidielu zodpovedného za ochladenie (vytvrdenie) plastového výrobku. Zadanie pochádza od závodu spoločnosti ITW PRONOVIA s.r.o. venujúceho sa výrobe plastových dielov pre automobilový priemysel. Závod disponuje nástrojárnou určenou primárne pre údržbu foriem, ale taktiež pre výrobu menších tvarových častí foriem v prípade ich poškodenia. Vzhľadom na hlavný účel tejto nástrojárne sú tu aktuálne postupy výroby tvarových súčastí pomerne konzervatívne; cieľom je vyrobiť súčasť spoľahlivo a v bežnom pracovnom cykle nástrojárne nie je veľa priestoru na experimentovanie a hľadanie nových riešení, ktoré so sebou prinášajú isté riziká. Napriek tomu je rýchla výroba a náhrada tvarovej súčasti formy vo vstrekovacom stroji žiaduca z hľadiska financií. Rýchla náhrada formy umožní obnovenie výroby plastových dielov a tým generovanie ziskov v kratšom čase.

Pre zefektívnenie procesu výroby daných súčastí formy bol autorkou vytvorený nový technologický postup pozostávajúci z prípravy polotovarov a frézovania súčastí. Postup bol vystavaný na základe výsledkov prevedených experimentov, medzi ktoré patria simulácie a analýzy v prostredí CAM softvéru, voľba rezných parametrov na základe skúmania opotrebenia nástrojov a skúšky zvolených nástrojov a rezných parametrov v podmienkach nástrojárne. Nový technologický postup bol realizovaný pri výrobe samotných súčastí formy, ktoré sa následne podrobili testom kvality, vrátane testov rozmerovej presnosti a integrity povrchu plastových dielov vyrobených pri použití danej formy. Celý návrh nového postupu je v závere práce zhodnotený a porovnaný s predošlým technologickým postupom so zameraním najmä na časovú úsporu pri výrobe súčastí za súčasného dodržania požiadaviek kvality.

# 1 PROBLEMATIKA VÝROBY TVAROVÝCH ČASTÍ VSTREKOVACÍCH FORIEM

Vstrekovacia forma je nástrojom, ktorý v technológii vstrekovania plastov polymérnym taveninám dodáva výsledný tvar. Je to komplexný systém zabezpečujúci celú radu funkcií, pričom medzi ne primárne radíme dopravenie taveniny do tvarovej dutiny formy, odvod tepla z taveniny a vyhodenie tuhého dielu z formy. Na tieto základné funkcie sa viaže množstvo ďalších funkcií a konštrukčných riešení, ktoré musí forma spĺňať. [3]

Z celého reťazca zariadení potrebných pre vznik plastového dielu technológiou vstrekovania je forma zariadením nielen najdôležitejším, ale aj najdrahším. Podľa [4] proces návrhu a výroby 10 až 60-tonovej formy môže pozostávať z:

- 2 mesiacov práce na návrhu,
- 4 mesiacov obrábania (až do 6000 hodín),
- 5 až 6 mesiacov testovania.

Už tieto informácie naznačujú, že vo väčšine prípadov bude obrábanie v cene formy tvoriť najväčšiu položku, nakoľko sú odstraňované veľké objemy kovu a výsledná forma musí spĺňať vysoké požiadavky na rozmerovú presnosť a akosť povrchu. [5]

Pre obrobenie je najzložitejšou časťou formy práve tvarová dutina. Tento pojem predstavuje dutinu, do ktorej priteká tekutý termoplast a v ktorej nadobúda svoj objem. Tvarom odpovedá výslednému plastovému dielcu. Čím je vyrábaný komponent väčší a zložitejší, tým je dôležitejšia fáza plánovania výroby vložky formy; zvolenie správnej metódy obrábania, nástrojov, držiakov, prípravkov, rezných podmienok, využitie potenciálu CA systémov atď. Okrem frézovania sa na výrobu tvarových dutín používa aj technológia elektroerozívneho obrábania a často aj ich kombinácia. Spomenuté technológie budú priblížené v nasledujúcich podkapitolách. [5, 6]

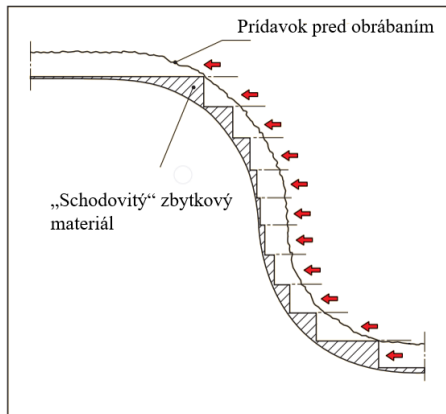
## 1.1 Stratégie frézovania tvarových dutín vstrekovacích foriem

Pod pojmom stratégia frézovania sa rozumejú systémom CAM (*Computer Aided Manufacturing*) definované a optimalizované dráhy nástroja, ktoré majú za účel dopomôcť k čo najefektívnejšiemu obrobeniu plochy súčiastky. Pre tvorbu zložitých tvarových dutín foriem technológiou obrábania je potrebné frézovanie dvojrozmerných a trojrozmerných konvexných a konkávných tvarov, pričom treba dať do súladu protichodné kritériá, akými sú minimalizácia výrobného času a nákladov a vysoké požiadavky pre presnosť rozmerov a kvalitu povrchu. Na voľbu stratégie frézovania a rezných podmienok je preto kladený veľký dôraz, nakoľko správna stratégia umožňuje dosiahnuť povrch dobrých geometrických a akostných vlastností a výrazne tak znížiť nielen pracovný čas pri obrábaní, ale aj pri manuálnych dokončovacích prácach, akou je, špecificky pre výrobu foriem, leštenie. Frézovacie stratégie sa, podľa spôsobu úberu materiálu, delia na [7–9]:

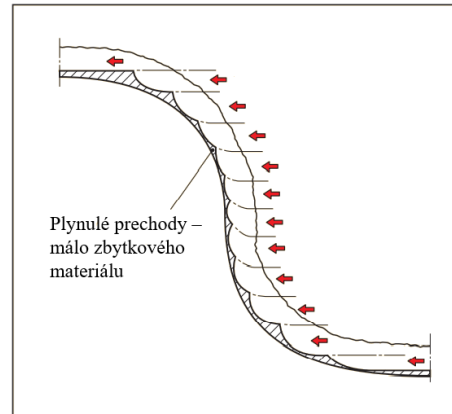
- hrubovanie,
- dohrubovanie,
- predokončovanie,
- dokončovanie,
- zbytkové obrábanie.

Hrubovanie má za cieľ odobrať maximálny objem materiálu za čo najkratší čas, čo je aj hlavným kritériom voľby konkrétnej stratégie. Na povrchu sa ponecháva vrstva navyše, tzv. prídavok po hrubovaní, ktorý bude odobrať pri nasledujúcich operáciách. Pri hrubovaní

sa uprednostňujú rezné nástroje s vymeniteľnými kruhovými doštičkami a aplikácie s veľkým rohovým rádiusom pred nástrojmi s malým rádiusom. Dôvodom je zamedzenie vzniku schodovitého prídavku, ktorý spôsobuje vznik nežiaducich síl na nástroj pri nasledujúcej operácii a tým jeho opotrebenie. Pre preddokončovacie operácie, ktoré slúžia na zrovnomenenie prídavku po hrubovaní, sa taktiež môžu použiť vymeniteľné kruhové doštičky alebo guľové stopkové frézy. Ako je zjavné z obr. 1 a z obr. 2, výsledkom je zanechanie menšieho prídavku na dokončovanie s menej výraznými výbežkami medzi prechodmi nástroja. [5]



Obr. 1 Prídavok po frézovaní nástrojom s malým rádiusom [5].



Obr. 2 Prídavok po frézovaní nástrojom s väčším rádiusom [5].

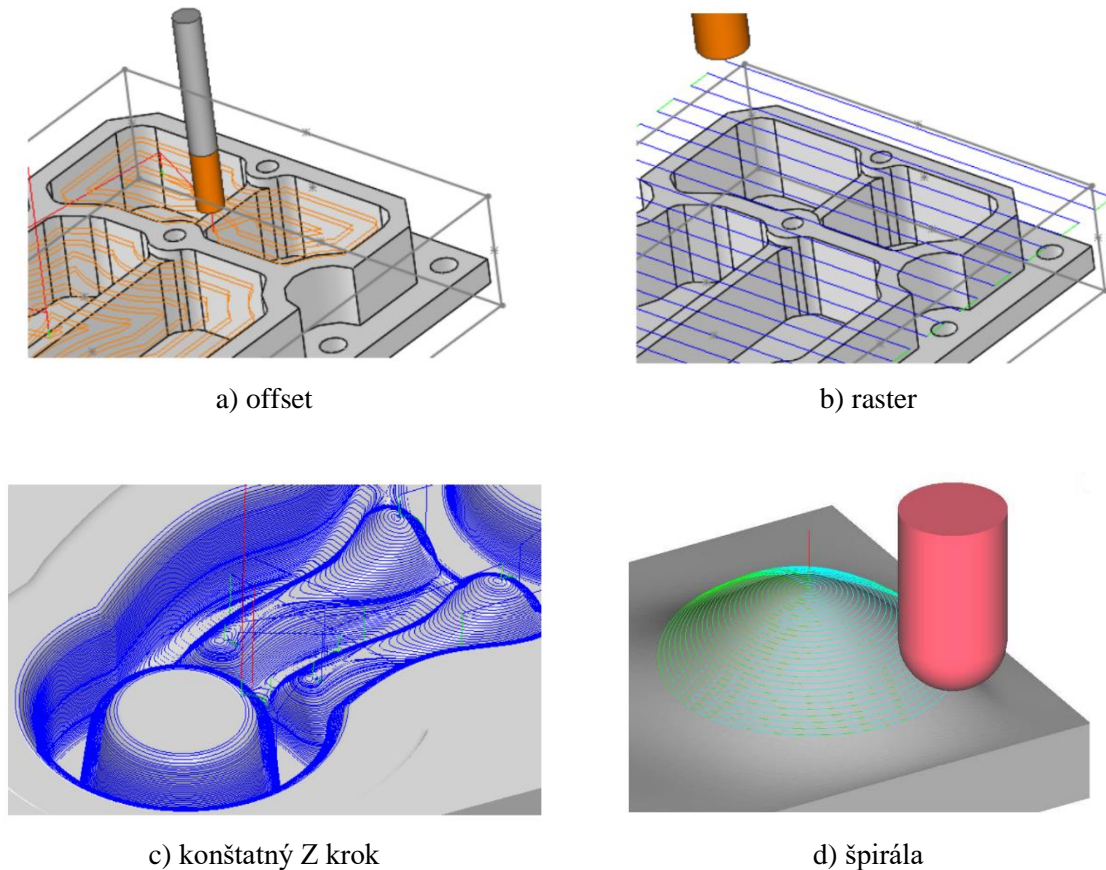
Dokončovacie operácie majú za úlohu zabezpečiť požadované konečné rozmery a kvalitu povrchu po frézovaní. Voľba nástroja sa tu stáva komplikovanejšou, nakoľko priveľké priemery fréz neumožňujú prístup do všetkých častí dutín a príliš malé priemery zvyšujú počet prechodov nástroja, pretože pre dosiahnutie vysokej kvality povrchu je nutné zmenšiť rozostupy prechodov. Z prvého menovaného dôvodu, najmä pri menších a tvarovo zložitejších obrobkoch, už nie je možné použiť frézy s vymeniteľnými britovými doštičkami. Najčastejším riešením bývajú stopkové frézy s guľovým čelom. Pre preddokončovacie a dokončovacie stratégie platí, že najvhodnejšia kombinácia stratégií a nástrojov sa volí na základe tvaru vyrábanej súčasti. Zvyčajne sa volí viacero priemerov, počnúc najväčším, prechádzajúc na menšie priemery pre dočistenie najmenších rohov, dutín a drážok. [5, 9]

Z dôvodu dosiahnutia čo najvyššej presnosti sa odporúča prevádzať jednotlivé typy operácií na samostatných strojoch. Stroj je vystavený oveľa väčšiemu namáhaniu a pracovnému zaťaženiu počas hrubovania, než počas dokončovania. To môže mať dopad na geometrickú presnosť a integritu povrchu v prípade, že celá škála operácií sa vykonáva na jednom obrábacom stroji. Investícia do lepších podmienok obrábania by sa vrátila v podobe ušetrenia času a nákladov na nasledovné leštenie. [5]

Ďalším delením stratégií frézovania je delenie podľa vhodnosti pre určitý typ plôch. Stratégie možno rozdeliť do niekoľkých základných skupín podľa obr. 3. Stratégie typu offset (a) generujú dráhy nástroja odsadzovaním od obrysu požadovaného tvaru. Na nasledujúcom obrázku (b) je vyobrazená stratégia raster, resp. riadkovanie, zvyčajne používaná pre zarovnávanie čela polotovaru. Pozostáva z jednoduchých paralelných dráh v smere vpred a vzad kombinovaným frézovaním (súbežné a nesúbežné). Pri tejto stratégii je vhodné nastaviť zaoblenie ostrých rohov dráhy nástroja, čo síce generuje vyšší počet riadkov programu, na druhej strane však zaručuje plynulé prechody frézy a znižuje namáhanie stroja. Variantou tejto stratégie je rezanie len v jednom smere, pričom návrat nástroja sa prevádza rýchloposuvom. Tu je výhodou jednotný spôsob frézovania (typicky súbežné), avšak klesá rýchlosť obrábania. Treťou skupinou (c) sú stratégie založené na postupnom odoberaní materiálu v konštantnej výške vzhľadom k osi Z (tzv. konštantný Z krok). V programovacích

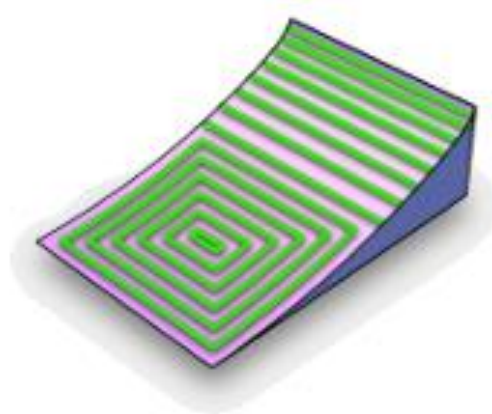


systémoch sú uvedené i ďalšie stratégie, ktoré sú často špecializované na konkrétny tvar plôch, napríklad stratégia špirála (d). [10]



Obr. 3 Stratégie frézovania podľa vhodnosti pre typ plochy [10].

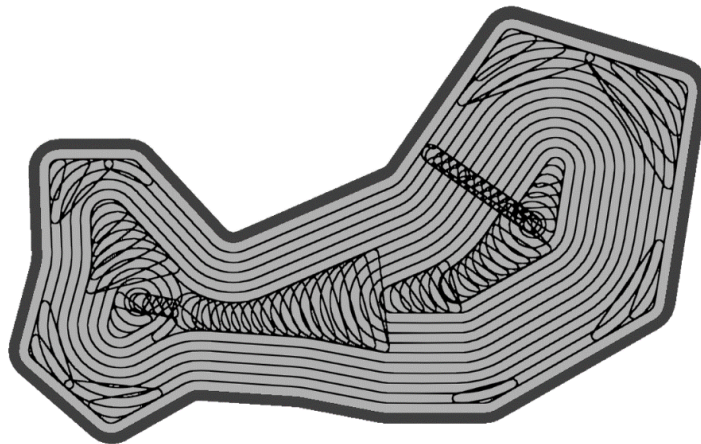
Dôležitou stratégiou z hľadiska dokončovania tvarových plôch je stratégia frézovania podľa limitného uhlu (obr. 4), tiež známa pod názvom „dokončovanie strmé a plošné“. Jej použitie je vhodné pri obrábaní plôch s voľnými uhlami, nakoľko táto stratégia je schopná vytvoriť individuálnu dráhu nástroja pre strmé a plytké oblasti v rámci jednej operácie. Strmé oblasti sú obrábané za pomoci kontúrovacích dráh, zatiaľ čo plytké oblasti paralelne alebo stratégiou *scallop*, ktorá generuje dráhu nástroja s konštantným skutočným posunom medzi prejazdmi pozdĺž celej geometrie povrchu. Limit medzi strmými a plytkými plochami je určený užívateľom zadaním limitného uhlu. [11, 12]



Obr. 4 Ilustračný obrázok strmého a plošného dokončovania zo softvéru PowerMill Ultimate.

Najčastejším hodnotiacim parametrom voľby stratégie podľa typu plochy je drsnosť, tzn. mikrogeometrická odchýlka od ideálneho povrchu. Ďalším hodnotiacim parametrom je textúra povrchu, tzn. vzorkovanie, ktoré zanecháva klin nástroja na povrchu. [9]

Ďalšou stratégiou, o ktorej je potrebné sa zmieniť, je hrubovacia stratégia VoluMill (obr. 5). Jedná sa o vysokovýkonnú stratégiu určenú pre úbery veľkého množstva materiálu pri frézovaní a jej využitie je obzvlášť výhodné pri frézovaní dutín foriem. Princíp spočíva v použití metódy vysokorýchlostného obrábania v kombinácii s vysokou hodnotou hĺbky rezu a malým, konštantným bočným krokom. Všetky dráhy nástroja sú zaoblené. Metóda si vyžaduje použitie kvalitných monolitných rezných nástrojov s povlakom, ktoré sú vhodné pre danú aplikáciu a pre vysoké posuvy. Taktiež sa odporúča použitie frézy s 5 a viacerými zubmi. Pri dodržaní všetkých podmienok dokáže VoluMill ušetriť na hrubovaní vyše 50% času v porovnaní s tradičnými hrubovacími metódami. [13]



Obr. 5 Príklad dráhy nástroja pri stratégii VoluMill [13].

Podľa počtu smerov, v ktorých je možné súvisle riadiť pohyby nástroja, sa rozlišuje 2D až 5D frézovanie. Pri trojosových frézoch prebieha hrubovanie zvyčajne dominantným využitím dvoch osí v rovinách kolmých na os Z. Ďalšou možnosťou je ponorné frézovanie (tzv. *plunge milling*), kedy prerušovaný rez prebieha na čele nástroja. To vedie k zmene charakteru rezných síl z prevažne radiálnych na prevažne axiálne, čo môže byť výhodné napríklad pri hrubovaní hlbokých dutín, kedy je proces komplikovaný veľkým vysunutím nástroja z držiaka, ktoré, vo väčšine prípadov, podnecuje vznik vibrácií. Ponorné frézovanie je tiež alternatívou v iných prípadoch s problematikou vzniku vibrácií, ako je hrubovanie ťažko obrobitelných materiálov a v prípadoch, keď existujú obmedzenia z hľadiska výkonu a stability stroja. Pre nízke rýchlosti úberu kovu sa však ponorné frézovanie zvyčajne nevolí ako prvá možnosť. [14, 15]

## 1.2 Zásady frézovania tvarových dutín vstrekovacích foriem

Aby bolo možné určiť čo najefektívnejší technologický postup pre výrobu tvarovej súčasti frézovaním, je vhodné začať nasledovným metodickým postupom [7]:

- určenie minimálneho polomeru rohov,
- určenie maximálnej hĺbky dutiny,
- prevedenie približného výpočtu odobraného materiálu,
- určenie vhodných, samostatných strojov pre jednotlivé etapy obrábania (pre dosiahnutie čo najvyššej kvality obrábanej plochy),
- kontrola nástrojovej a upínacej sústavy (pre minimalizáciu vibrácií).

Spomenuté body sú fázou prípravy. Posúdenie tvaru súčasti je východiskom pre určenie geometricky vhodných nástrojov a správnej metódy obrábania. Samotné frézovanie tvarových

dutín podlieha mnohým ďalším zásadám, ktoré dokážu tento proces urýchliť a zároveň udržiavať vysokú kvalitu obrobenej plochy. [7]

Už z účelu hrubovania, popísaného v predošlej kapitole, vyplýva niekoľko základných pravidiel. V prvom rade, trajektória nástroja by mala byť čo najkratšia. Je potrebné vyhýbať sa pohybom nástroja, pri ktorých sa neodoberá materiál alebo pri ktorých sa znovu prechádza už obrobená plocha. Veľmi dôležité je tiež, aby bol záber nástroja plynulý, bez prudkých zmien smeru, ktoré by negatívne pôsobili na opotrebenie nástroja a zvyšovali by i zaťaženie stroja; jeho lineárnych vedení, guľčkových skrutiek a vretenových ložísk. [5, 8]

Rovnaké kritérium platí aj pri dokončovaní tvarových plôch s vysokými nárokmi na presnosť a kvalitu povrchu. Je dôležité navrhnuť dráhu nástroja tak, aby fréza bola neustále, plynule v zábere – nesmie zastaviť a zmeniť smer, musí do neho vždy narolovať. V opačnom prípade hrozí vznik vibrácií a podrezania materiálu a to hlavne v oblasti rohov, kde je veľká časť obvodu nástroja v reze. Vo všeobecnosti tiež platí, že vstup a výstup frézy z materiálu je plynulý a prebieha za zníženej posuvovej rýchlosti. [5]

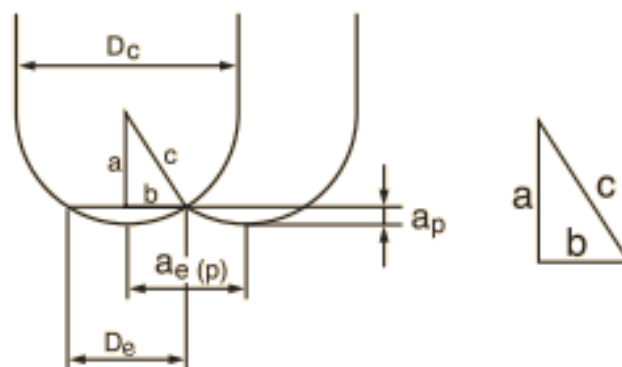
### 1.2.1 Rezné podmienky

Rezné podmienky by mali byť vždy usporodované obrábanému materiálu, vykonanej operácii a podmienkam kvality výrobku a bezpečnosti pre konkrétny výrobný proces. Ako už bolo naznačené, jednou z kľúčových podmienok je konštantný prídavok po hrubovaní podľa rovnice (1.1). [5]

$$\frac{a_e}{a_p} = konst., \quad (1.1)$$

kde:  $a_e$  - šírka záberu [mm],  
 $a_p$  - hĺbka rezu [mm].

Konštantný prídavok umožňuje konštantnú vysokú reznú a posuvovú rýchlosť, čím zabezpečuje vyššiu rýchlosť procesu a kvalitu obrobenej plochy. Zároveň sa v kline nástroja generuje menej tepla, je menej namáhaný a má tak vyššiu trvanlivosť. Rovnako aj namáhanie stroja je menšie. Konštantný prídavok je taktiež jedným zo základných kritérií pre dokončovanie metódou HSM. [5]



Obr. 6 Skutočný priemer nástroja v reze [5].

Pri výpočte skutočnej reznej rýchlosti podľa vzťahu (1.2) je potrebné využiť skutočný priemer frézy alebo tiež tzv. efektívny priemer v reze  $D_e$ . Ak by sa v prípade guľových stopkových fréz a fréz s kruhovými doštičkami použil na výpočet nominálny priemer  $D_c$ , výsledkom by bola výrazne nižšia rezná rýchlosť, než aká môže byť pri daných podmienkach dosiahnutá. Tento negatívny efekt graduje s klesajúcou hĺbkou rezu  $a_p$ , ako je zrejmé z obr. 6. [5, 7]

Efektívna rýchlosť v reze [5]:

$$v_e = \frac{\pi \cdot D_e \cdot n}{1000}, \quad (1.2)$$

kde:  $v_e$  - skutočná rezná rýchlosť [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  
 $D_e$  - skutočný priemer v reze [mm],  
 $n$  - otáčky vretena [ $\text{min}^{-1}$ ].

Z obr. 6 je tiež možné odvodiť vzorec pre výpočet efektívneho priemeru  $D_e$  [5]:

$$D_e = 2 \sqrt{a_p (D_c - a_p)} \quad (1.3)$$

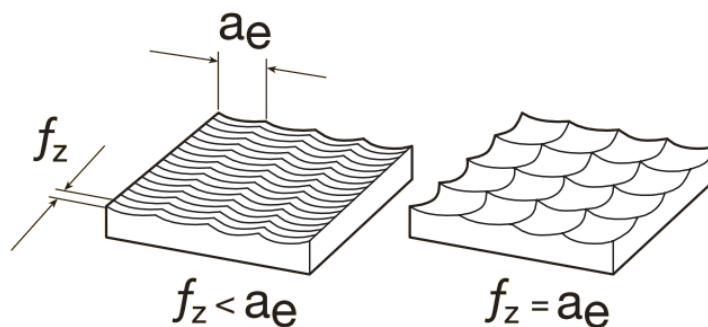
kde:  $a_p$  - hĺbka rezu [mm],  
 $D_e$  - skutočný priemer v reze [mm],  
 $D_c$  - nominálny priemer [mm].

Ďalším dôležitým aplikačným parametrom je výber samotného spôsobu frézovania. Podľa [5], preferovaným spôsobom by takmer vždy malo byť súsledné frézovanie pred nesúsledným. Pri súslednom frézovaní sa pri vniku nástroja do materiálu tvorí trieska o svojej maximálnej hrúbke, behom rezu sa táto hrúbka znižuje, až dosiahne nulovú hodnotu pri výjazde z materiálu. Pri nesúslednom frézovaní je proces opačný, pričom je ostrie vystavené väčšiemu treniu a vzniká v ňom nadmerné teplo. Všeobecne platí, že životnosť nástroja je pri nesúslednom frézovaní nižšia než pri súslednom. Ďalším dôvodom pre výber súsledného frézovania sú relatívne nižšie radiálne sily, ktoré negatívne pôsobia na ložiská vretena.

Výnimkou môže byť bočné frézovanie (dokončovanie), keď môže byť voľbou práve nesúsledné frézovanie. To platí najmä pri frézovaní tvrdých materiálov, kedy môže dôjsť k vychýleniu nástroja a k nedodržaniu geometrickej tolerancie rovinnosti steny (k nedodržaniu  $90^\circ$  uhla rohu). Pôsobenie síl pri nesúslednom frézovaní podnecuje „vťahovanie“ nástroja smerom do materiálu, čím znižuje vychýlenie. [5]

Podľa [7], pre dosiahnutie čo najkvalitnejšieho povrchu pri dokončovaní je vhodné zvoliť hodnotu posuvu na zub  $f_z$  rovnú hodnote šírky rezu  $a_e$ . Ak platí, že  $f_z \approx a_e$ , výsledkom je hladká a symetrická štruktúra povrchu vo všetkých smeroch. Takýto povrch je priaznivý z hľadiska jednoduchšieho leštenia, pričom nezávisí na vybranej metóde leštenia. Taktiež sa znižuje čas obrábania. Vplyv týchto parametrov je graficky znázornený na obr. 7.

Kritériom pre určenie hodnôt  $f_z$  a  $a_e$  (a ďalších parametrov) je požadovaná kvalita povrchu, ktorá je, pri výrobe foriem, jednou z najviac špecifikovaných a kontrolovaných požiadaviek zákazníkov. Z toho vyplýva, že hlbšie poznatky o vplyve rezných parametrov na kvalitu povrchu sú v tejto oblasti priemyslu absolútnou nevyhnutnosťou. [5]



Obr. 7 Vplyv parametrov  $f_z$  a  $a_e$  na kvalitu povrchu [5].

Pre lepšiu názornosť bude ďalej predstavený konkrétny príklad vplyvu rezných parametrov na kvalitu povrchu. V experimentálnej štúdií [16] uskutočnenej na Univerzite v Sarajeve boli

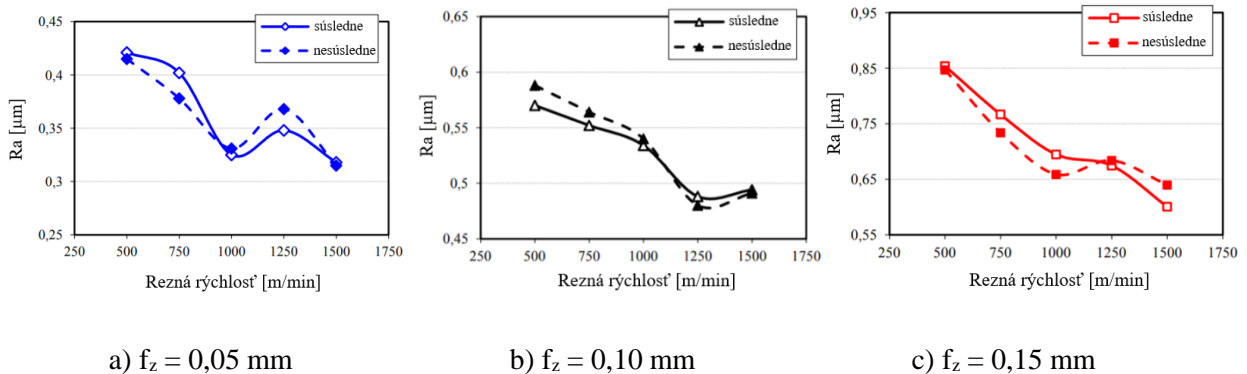


skúmané vplyvy rezných parametrov na drsnosť povrchu pri vysokorýchlostnom čelnom frézovaní do tvrdenej ocele. Podmienky experimentov boli nasledovné:

- Experimenty boli uskutočnené na pôvodne univerzálnom frézovacom a vrtacom stroji, adaptovanom prestavaním, resp. pridaním moderných HSM komponentov.
- Zvolenými nástrojmi boli dve frézy s vymeniteľnými britovými doštičkami o priemere 20 mm a 40 mm od výrobcu SANDVIK Coromant.
- Obrábanym materiálom bola tvrdená nástrojová oceľ X37CrMoV5-1 (~51 HRC).
- Experimenty boli uskutočnené pre súsledné aj nesúsledné frézovanie.
- Procesná kvapalina nebola použitá, obrábanie prebehlo za sucha.
- Na meranie drsnosti povrchu bolo použité zariadenie Perthometer Concept.

Na obr. 8 sú zobrazené grafické výstupy experimentu pre frézu o priemere 20 mm pri nasledovných rezných podmienkach:

- $v_e = [500; 750; 1000; 1250; 1500] \text{ m. min}^{-1}$ ,
- $f_z = [0,05; 0,10; 0,15] \text{ mm}$ ,
- $a_p = 0,30 \text{ mm}$ ,
- $a_e = 12 \text{ mm}$ .



Obr. 8 Výsledky experimentu skúmajúceho vplyv reznej rýchlosti na drsnosť povrchu pre daný posuv na zub [16].

Na všetkých troch grafických závislostiach na obr. 8 je vidieť, že priemerná aritmetická odchýlka profilu  $R_a$  v daných podmienkach klesá so stúpajúcou reznou rýchlosťou. Taktiež je tu experimentálne dokázaný vplyv veľkosti posuvu na zub; s jeho stúpajúcou hodnotou stúpa i drsnosť povrchu. Ďalším záverom vyvodeným autormi štúdie je absencia vplyvu spôsobu frézovania (súsledné/nesúsledné) na drsnosť povrchu. [16]

V tejto práci sú predstavené iba výsledky pre frézu o priemere 20 mm, v štúdií [16] sa však rovnako nachádzajú aj výsledky pre priemer 40 mm. Pri porovnaní grafov pre tieto dva nástroje sa dá potvrdiť ďalšie teoretické východisko spomenuté v predošlých kapitolách; nižšia drsnosť bola dosiahnutá pri použití nástroja s väčším priemerom. [16]

### 1.2.2 Frézovanie nakloneným nástrojom

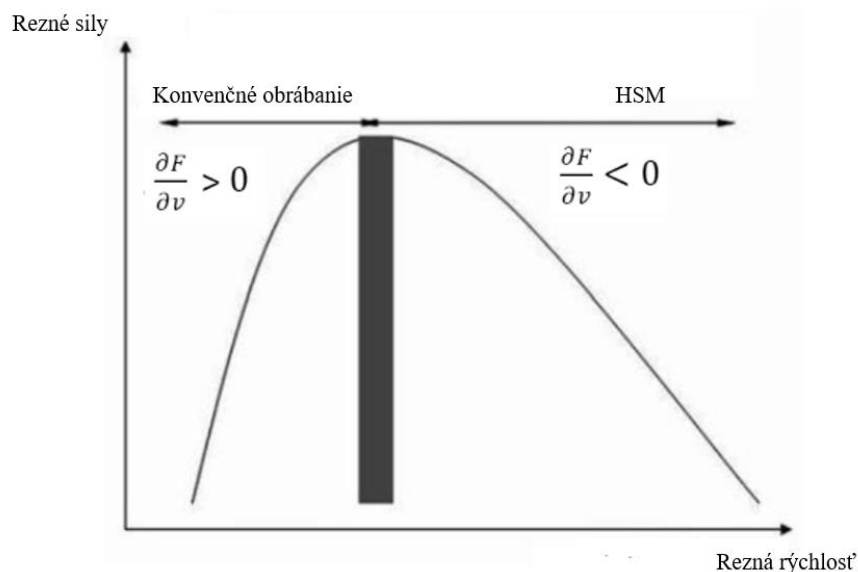
Pri použití polgulových fréz v procese frézovania tvarových dutín môžu nastať komplikácie v prípade, že sa os nástroja dostane do kolmej polohy vzhľadom na obrábanú plochu. Kolmé frézovanie špičkou nástroja je pre rezný proces nepriaznivé kvôli nulovej reznej rýchlosti v jeho osi. Vzniká tu nadmerná teplota, zhoršuje sa drsnosť povrchu. Taktiež odvod triesky sa stáva komplikovanejší, nakoľko priestor medzi jednotlivými hranami je na špičke nástroja príliš úzky, môže dochádzať k jej pechovaniu. [8]

Riešením môže byť naklonenie nástroja alebo obrobku o 10 až 30° tak, aby ich relatívne polohy nezvierali pravý uhol. Konkrétny uhol závisí od rezných podmienok, tvaru dutiny, použitého nástroja a ďalších podmienok obrábania. Takéto naklonenie zaručuje zlepšenie drsnosti povrchu vo všetkých smeroch a umožňuje jednoduchší odvod triesok. Taktiež sa zväčší efektívny priemer záberu v reze, čo umožňuje navýšenie rýchlosti posuvu a šírky záberu v reze. Nástroj môže byť naklonený v smere posuvu alebo v smere kolmom na posuv. [8]

V prípade, keď je výroba obmedzená na trojosové výrobné zariadenie, najjednoduchším riešením je voľba inej geometrie nástroja (napr. toroidnej frézy). Ďalšou možnosťou je konštrukčná úprava formy, pri ktorej sa eliminujú plochy s malým uhlom náklonu.

### 1.3 Vysokorýchlostné obrábanie HSM a jeho aplikácia pri frézovaní foriem

Koncept vysokorýchlostného obrábania HSM (*High Speed Machining*), prípadne HSC (*High Speed Cutting*), bol prvýkrát predstavený Dr. C. Salomonom. Výsledky jeho experimentálnej štúdie, prevedenej na neželezných kovoch a skúmajúcej vzťah medzi reznou rýchlosťou a teplotou vznikajúcou pri reznom procese, boli patentované v roku 1931 v Nemecku. Podľa Salomona sa obrábací proces môže považovať za HSM v prípade, keď rezné sily klesajú pri neustále stúpajúcej reznej rýchlosti (obr. 9). Pri konvenčnom obrábaní to platí naopak. Zatiaľ čo pri Salomonom skúmaných neželezných kovoch je pokles rezných síl výrazný, pri oceli a liatinách je omnoho menší. Preto sa objavili snahy o definovanie HSM na základe iných parametrov a do dnešnej doby existuje viacero názorov a do určitej miery „zmätok“ v definícii tohto pojmu. [5, 17]



Obr. 9 Názorná ukážka správania rezných síl v závislosti od reznej rýchlosti [17].

Vo všeobecnosti sa za HSM môže považovať pokročilá technika obrábania, keď rezné rýchlosti dosahujú omnoho vyššie hodnoty než pri konvenčnom obrábaní. Aplikuje sa predovšetkým pri výrobe tvarovo zložitých súčastí a výsledkom je vyššia produktivita, lepšia kvalita, stálosť a hospodárnosť. Ako bolo spomenuté, je dôležité pracovať so skutočnou reznou rýchlosťou pre efektívny priemer frézy v reze. [17]

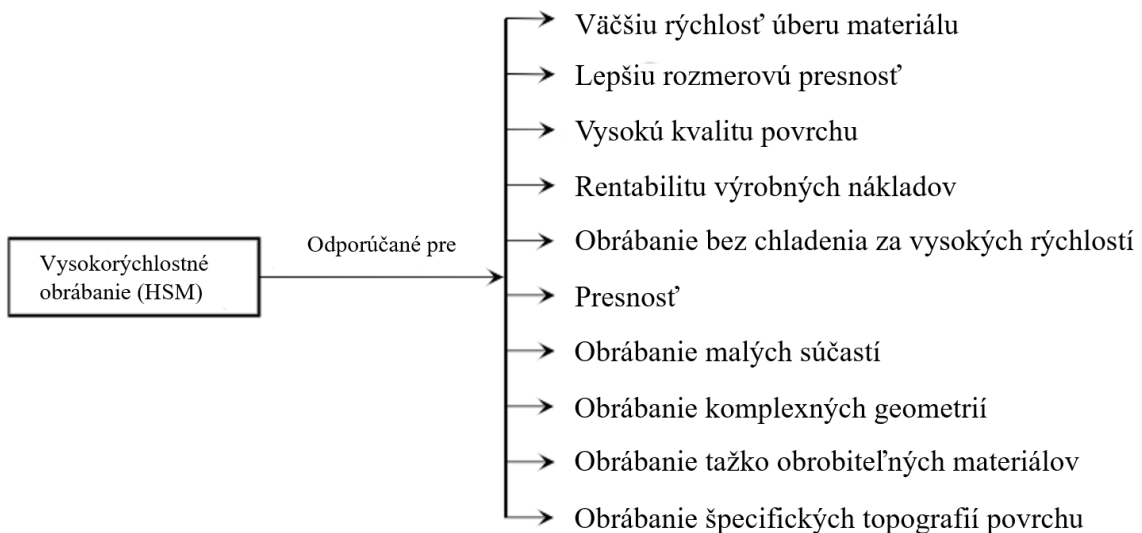
Veľmi typické, až nevyhnutné, sú pri HSM aplikáciách veľmi nízke hodnoty šírky a hĺbky rezu v porovnaní s konvenčným frézovaním. Pomer  $a_e/a_p$  by nemal prekročiť hodnotu 0,2/0,2 mm. Podľa rovnice (1.4) teda logicky klesá i rýchlosť úberu materiálu  $Q$ . HSM preto nie je vhodné pre hrubovanie ocelí, pri ktorom sa odoberajú veľké množstvá materiálu. Výnimkou sú stratégie s veľkou hĺbkou rezu a malým bočným krokom, ako napr. trochoidné frézovanie alebo stratégia VoluMill. [5]

Vzťah pre výpočet rýchlosti úberu kovu [18]:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000}, \quad (1.4)$$

kde:  $Q$  - rýchlosť úberu materiálu [ $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ],  
 $a_p$  - hĺbka rezu [mm],  
 $a_e$  - šírka záberu [mm],  
 $v_f$  - posuv stola [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ].

HSM je obrábací proces vykonávaný za použitia špeciálnych metód a výrobných prostriedkov. Pôvodne bola táto technika vyvinutá pre výrobu komponentov z hliníkových zliatin v leteckom priemysle. V dnešnej dobe sa, vďaka vývoju rezných nástrojov a materiálov, môže HSM používať i na výrobu ťažko obrábateľných materiálov, ako sú napr. titán a jeho zliatiny, kalená či nástrojová oceľ. Zároveň má finálny výrobok vysokú rozmerovú a tvarovú presnosť a vysokú kvalitu povrchu. Preto sa HSM metóda vo veľkej miere uplatňuje vo viacerých odvetviach priemyslu, mimo iného aj vo výrobe foriem a zápustiek. Kompletný zoznam podmienok, pre ktoré je vhodná aplikácia HSM, sa nachádza na obr. 10. [17]



Obr. 10 Zhrnutie odporúčaných aplikácií pre metódu HSM [17].

Formy pre vstrekovanie plastov majú často menšie rozmery, čo ich robí ešte vhodnejšími pre použitie HSM. Najvhodnejšie sú malé formy s plytšími dutinami; v tomto prípade je možné pri výrobe efektívne previesť HSM pre všetky operácie od hrubovania po dokončovanie [5].

V prípade prevedenia všetkých operácií použitím HSM je, podľa [5], z ekonomického hľadiska výhodné obmedziť sa na rozmery obrobku maximálne  $400 \times 400 \times 150$  mm. V prípade väčších foriem sa preferuje hrubovanie použitím konvenčných metód, zatiaľ čo pri dokončovaní väčšinou prevažuje HSM, a to z nasledujúcich dôvodov [5]:

- Teplota nástroja a obrobku sa drží relatívne nízko. Krátke a plytké rezy spôsobujú krátky kontakt reznej hrany s materiálom a teplo sa nestačí šíriť.
- Plytké rezy tiež spôsobujú nízke radiálne sily pôsobiace na nástroj a vreteno.
- Nízka rezná sila zabezpečuje malé a konštantné vychýlenie nástroja.
- Možnosť obrábania vysokých a tenkých stien.
- Možnosť dosiahnuť nízku drsnosť povrchu (až **Ra** 0,2  $\mu\text{m}$ ).

Je potrebné zmieniť aj riziká spojené s HSM. Jedným z nich je samotná bezpečnosť procesu; pri vysokých rezných rýchlostiach existuje riziko uvoľnenia britovej doštičky z nástroja.

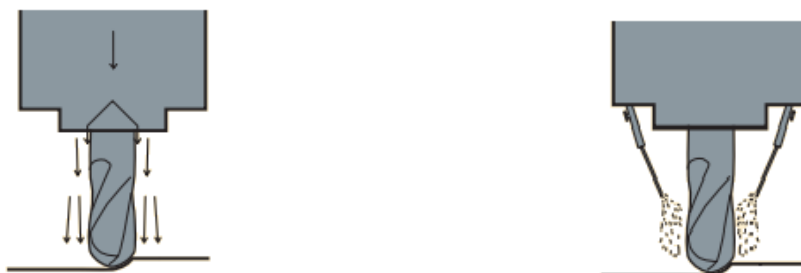
Akákoli ľudská chyba pri príprave procesu (či už sa jedná o softvér, alebo hardvér) má zvyčajne veľké následky. Kvôli vysokým posuvom núdzové STOP tlačidlo stráca na účinnosti. Výraznejšie zrýchľovanie a spomaľovanie otáčania vretena spôsobuje vyššie opotrebenie lineárnych vedení, ložisiek a guľčkových skrutiek spojených s vyššími nákladmi na údržbu. [5]

### 1.3.1 Frézovanie za sucha

Ako bolo spomenuté, krátky záber nástroja pri HSM zabraňuje šíreniu tepla do nástroja a obrobku. Namiesto toho je toto teplo odvádzané trieskou. Napriek tomu, vysoká rezná rýchlosť pri obrábaní tvrdých materiálov však stále spôsobuje relatívne vysoké teploty v reze (aj 1000 °C). Procesná kvapalina aplikovaná v reze sa v takomto prípade okamžite vyparí bez akéhokoľvek chladiaceho účinku. Použitie procesnej kvapaliny pri HSM teda nie je nutné, práve naopak, jej aplikácia by spôsobovala ochladzovanie rezného nástroja počas jeho polohy mimo záberu. Nastali by striedavé tepelné rázy spôsobujúce vznik mikrotrhlín a výrazné skrátenie životnosti nástroja. Vylúčenie procesnej kvapaliny má aj ďalšie výhody: lepšie formovanie triesky, ušetrenie na nákladoch na obstaranie a likvidáciu kvapaliny, ušetrenie na nákladoch na údržbu chladiaceho systému, enviromentálne a zdravotné aspekty (čistota pracovného prostredia). Preto sa HSM zvyčajne prevádza bez použitia procesnej kvapaliny. Namiesto nej sa používa chladenie vzduchom – jedná sa o frézovanie za sucha. [5, 19]

Pri takomto spôsobe obrábania sa kladie vysoký dôraz na rezné materiály, ktoré musia mať dostatočnú pevnosť, tvrdosť a oteruvzdornosť pri vysokých teplotách. Tieto vlastnosti vykazujú najmä polykryštalický diamant, kubický nitrid bóru, cermety, rezná keramika a jemnozrné spekané karbidy v kombinácii s povlakmi. [19]

Vyššie zmienené materiály majú zároveň i minimálnu tepelnú vodivosť, vďaka čomu sa väčšina tepla odvádza trieskou. Horúca trieska môže tepelne ovplyvniť nástroj aj obrobok, preto je dôležité ju z rezu okamžite odstrániť. Pri obrábaní „za mokra“ túto úlohu spĺňa práve procesná kvapalina, takže pri jej absencii je potrebné hľadať iné riešenia. Ideálne je použitie stlačeného vzduchu prúdiaceho z vretena znázornené na obr. 11 a). Ďalšou možnosťou je technológia MQL (*Minimum Quantity Lubrication*), v preklade „metóda minimálneho použitia procesnej kvapaliny“. Jedná sa o zmiešavanie malého množstva procesnej kvapaliny s tlakovým vzduchom vedeným do miesta rezu. Metóda je zobrazená na obr. 11 b). [5]



a) stlačeným vzduchom prúdiacim z vretena

b) metódou MQL

Obr. 11 Spôsoby vyfukovania triesky z rezu [5].

Aj pri použití HSM metódy existujú prípady, v ktorých by použitie procesnej kvapaliny mohlo byť nevyhnutné. V súvislosti s témou tejto práce je potrebné zmieniť predovšetkým prípad obrábania tenkostenných súčastí, ktoré sú náchylné na deformáciu reznými silami. Vysoké teploty podporujú deformáciu a ochladzovanie procesnou kvapalinou tu môže hrať dôležitú rolu v zachovaní tolerancií. Ak takýto prípad nastane, procesnej kvapaliny by malo byť aplikované veľké množstvo a ako rezný materiál by mali byť použité ideálne cementované karbidy s povlakom. [5, 19]



### 1.3.2 Frézovanie tvrdých materiálov

Frézovanie materiálov s tvrdosťou nad 55 HRC (niekedy sa uvádza aj hranica 45 HRC) sa považuje za tvrdé frézovanie. Tvárniace nástroje, vrátane vstrekovacích foriem, sú vždy konštruované z tvrdých materiálov, nakoľko musia splniť požiadavky pre zaistenie opakovanej a mnohonásobnej reprodukcie výrobku. Pevnosť a tvrdosť formy sa zaisťuje nielen voľbou materiálu, ale aj procesom tepelného spracovania a konečnými povrchovými úpravami. Vo väčšine prípadov sa minimálne časť procesu obrábania foriem (v závislosti od zaradenia tepelného spracovania v poradí operácií výroby) prevádza tvrdým frézovaním. [2, 20]

Tepelné spracovanie pozostáva spravidla zo zušľachtovania. Konkrétne parametre zušľachtovania závisia od materiálu formy, jej veľkosti, zaťažovania, požadovanej životnosti, tolerancií, kvality povrchu atď. Do procesu môže byť zaradené i žihanie na mätko pre lepšiu obrobiteľnosť ocele alebo žihanie na odstránenie vnútorných pnutí. [2]

Zaradenie zušľachtovania v procese výroby formy môže byť nasledovné [5]:

- Zušľachtenie polovýrobku: nastáva po hrubovaní a preddokončovaní, pričom dokončovanie sa vykonáva do tvrdého materiálu.
- Zušľachtenie polotovaru: nastáva pred obrábaním, pričom všetky operácie obrábania sa aplikujú na tvrdý materiál.

Vysoká tvrdosť a pevnosť obrábaného materiálu spôsobujú nadmerné abrazívne opotrebenie chrbita klinu nástroja a generovanie tepla. Tvrdé frézovanie preto aplikuje princípy HSM a zároveň suchého frézovania. Dôvody vyplývajú z informácií spomenutých v predošlých kapitolách; kontaktný uhol medzi nástrojom a obrobkom musí byť malý a rezná rýchlosť dostatočná, aby sa nástroj a obrobok neprehriali. Množstvo vygenerovaného tepla sa kompenzuje plytkým rezom a absencia procesnej kvapaliny zvyšuje trvanlivosť nástroja. [20]

### 1.4 Elektroerozívne obrábanie EDM

EDM (*Electrical Discharge Machining*) sa radí medzi nekonvenčné elektrické technológie využívajúce elektrickú energiu bez jej premeny na mechanickú. Fyzikálny princíp EDM je založený na odtavovaní a odparovaní materiálu elektrickým výbojom v priestore medzi dvomi elektródami. Tento priestor je naplnený dielektrickou kvapalinou, tzn. izolantom schopným polarizácie. Nástroj (katóda) a obrobok (anóda) sú pripojené na zdroj elektrického napätia a umiestnené vo vzájomnej vzdialenosti tzv. iskrovej medzery (0,001 až 0,5 mm). Vzniká tu výbojový kanál tvorený plazmou, ktorá umožňuje presuny veľkého množstva elektrického prúdu. Vzniknutá energia sa čiastočne odvedie elektródami vo forme tepla, zvyšok energie sa spotrebuje na zmenu skupenstva povrchu elektród zanechávajúc na nich tepelné, tlakové, elektrické a štrukturálne zmeny. Oddelený materiál vo forme mikročastíc sa transportuje z iskrovej medzery čiastočne expanziou v plynnom skupenstve, čiastočne je odplavený prúdiacim dielektrikom. [8, 21]

Podľa špecifickejších podmienok úberu materiálu sa EDM člení na [21]:

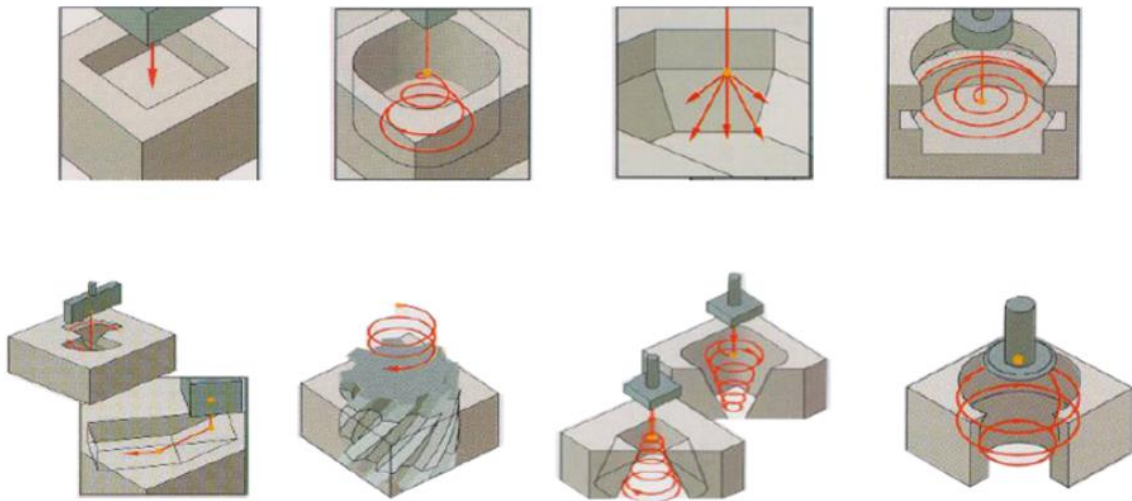
- elektroerozívne hĺbenie,
- elektroerozívne rezanie.

Z hľadiska výroby tvarových dutín je dôležité si priblížiť najmä elektroerozívne hĺbenie, nakoľko sa pri výrobe foriem zvykne kombinovať s trieskovým obrábaním.

### 1.4.1 Elektroerozivne hĺbenie

Elektroerozivne hĺbenie sa používa najmä pri výrobe zložitých foriem, zápustiek a iných tvarových nástrojov, ktorých výroba je nerealizovateľná alebo len veľmi ťažko realizovateľná inou technológiou. Elektroódy, na rozdiel od frézovacích nástrojov, dokážu vytvoriť ťažko prístupné dutiny, napr. diery so zakrivenou osou alebo s kontinuálne premenlivým priemerom. Ďalšou výhodou tejto metódy pri výrobe foriem je absencia mechanického namáhania steny vyrábanej súčasti, čo umožňuje výrobu tenkých stien bez deformácie. [8]

Pri elektroerozivnom hĺbení má nástrojová elektroóda tvar modelu dutiny, ktorý sa kopíruje do obrábaného materiálu (obr. 12). Posuv nástroja do materiálu je pomalý a regulovaný tak, aby bola iskrová medzera konštantnej veľkosti, odpovedajúcej pomerom v iskrišti. Pri malej iskrovej medzere sú napätia a energie nízke a elektroerozivný účinok je malý. Ak je, naopak, medzera príliš veľká, elektrický výboj ani nenastane. Nástroj sa pohybuje po naprogramovaných dráhach kmitaním o amplitúde 0,005 až 0,02 mm. Rozjazdy nástroja do strán umožňujú výrobu zložitých tvarov dutín relatívne jednoduchou elektroódou. [21]



Obr. 12 Ukážky možností výroby dutín kombináciou tvaru a pohybov elektroódy [22].

Materiály pre výrobu elektroód musia mať vysoký bod tavenia a byť veľmi dobre tepelne vodivé. Tieto podmienky spĺňajú napr. meď, mosadz, grafit, wolfram. Elektroódy sa vyrábajú najčastejšie trieskovým obrábaním, ale aj zlievaním či spekaním. S prihliadnutím na hodnotu materiálu a tvarovú zložitosť elektroód je ich výroba zvyčajne komplexný a drahý proces. Taktiež samotné EDM hĺbenie je zdĺhavé. [5, 21]

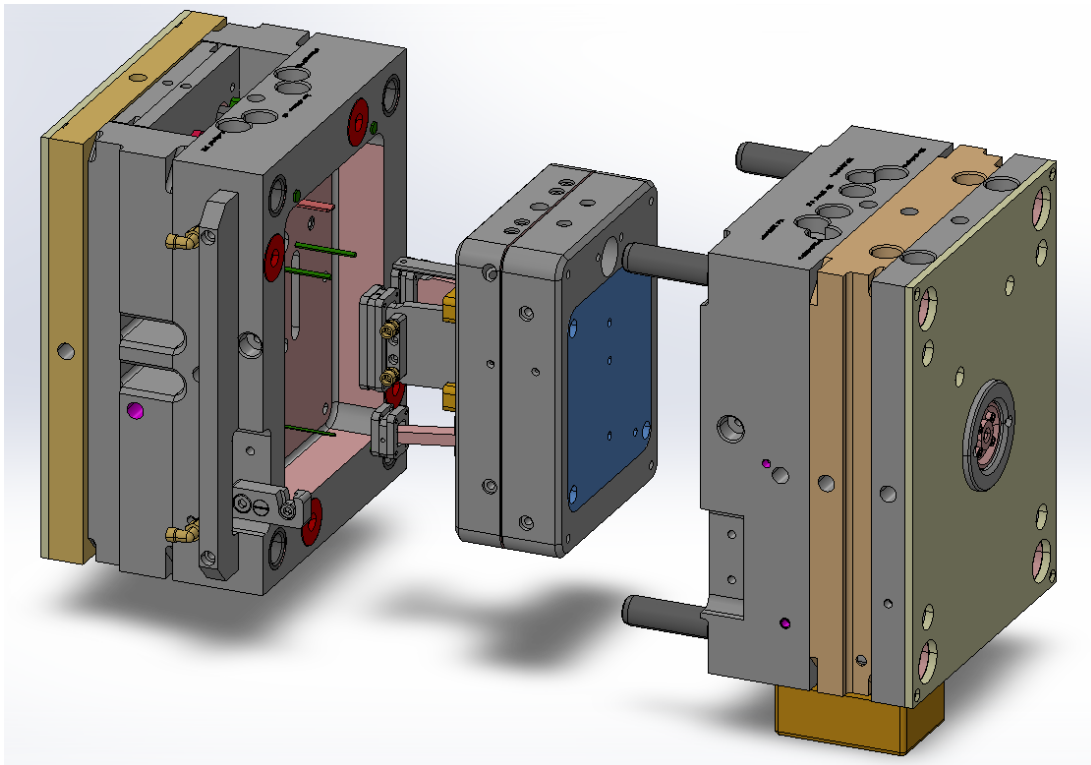
Ďalšou nevýhodou EDM hĺbenia je vznik tepelne ovplyvnenej oblasti na povrchu súčasti. Vzniká tu 10 až 40  $\mu\text{m}$  hrubá oduhličená vrstva so zvýšenou tvrdosťou až cez 60 HRC. Hlbšie pod touto vrstvou sa ešte nachádza širšia oblasť znečistená materiálom elektroódy prenikajúcim difúziou do obrábaného povrchu. Stvrdnutá vrstva na povrchu v kontraste s výrazne mäkkšou matricou vytvára nežiaduce pnutia a musí byť odstránená časovo náročným ručným leštením. Pri zdĺhavom ručnom leštení môže ľahko dôjsť k ľudskej chybe, keď je leštenie nerovnomerné a dôjde k odchýlke od požadovaného tvaru dutiny. Taktiež môže dôjsť k zrazeniu ostrej hrany deliacej roviny. V prípade zle prevedeného EDM hĺbenia môžu vzniknúť aj vertikálne únavové praskliny v povrchovej vrstve. [18, 21]

Kvôli všetkým vyššie zmieneným dôvodom sa vo výrobe objavuje snaha nahradiť EDM hĺbenie metódou HSM, ktorá je efektívnejšia a úspornejšia [21].

## 2 ANALÝZA VÝCHODZIEHO STAVU

Zadávatelom diplomovej práce je závod spoločnosti ITW PRONOVIA, s.r.o. (skrátene ITW) vo Veľkej Bíteši, ktorá je súčasťou nadnárodnej korporácie Illinois Tool Works Inc. založenej v roku 1912 v Chicagu, USA. ITW sa venuje mnohým odvetviám priemyslu (automobilový, letecký, ropný, zdravotnícky atď.). Jej divízia, ITW PRONOVIA, sa zameriava výlučne na výrobu produktov pre automobilový priemysel. V jej portfóliu je možné nájsť najmä plastové palivové a chladiace systémy, dekoratívne plastové diely karosérie, dverné kľúčkové systémy a komponenty pre airbagy. Výrobky putujú do automobilov významných svetových značiek, ako sú napr. BMW, Renault, Jaguar Land Rover, VW, Audi a ďalšie. [23]

ITW PRONOVIA vo svojej výrobe využíva technológiu lisovania a vstrekovania plastov vo veľkej miere. Disponuje približne 2500 formami, z ktorých najväčšie vážia až 5 ton. Všetky tieto formy sú dodávané špecializovanými výrobcami, ale v závode boli zriadené nástrojárne pre ich údržbu, čistenie a opravy poškodených častí ako sú napr. vylomené vyhadzovače alebo praskliny v tvarových dutinách foriem. Pre opravu malých prasklín je nástrojáreň vybavená zvaračkami pre mikronaváranie. Taktiež je tam možné vyrobiť tvarové časti foriem frézovaním a EDM hĺbením v prípade, že sa tie používané nezvratne poškodia. Práve tento prípad sa týka diplomovej práce, ktorá má za úlohu zefektívniť výrobný proces dvoch vybraných častí vstrekovacej formy (tvarovej vložky formy a chladiacej súčasti) a umožniť tak ich rýchlu výmenu za časti formy poškodené pri výrobnom procese. V opačnom prípade je výroba na vstrekovacom stroji pozastavená. Dve spomínané časti formy sa v nástrojárni vyrábajú približne len dvakrát ročne, jedná sa teda o nástrojáreň čistej podpory, nie výrobnú. Následkom toho sa zvýšené požiadavky kladú taktiež na spoľahlivosť procesu, pretože výroba chybných súčastí by neznamerala len stratu priamych nákladov, ale predovšetkým by negatívne ovplyvnila príjmy z výroby na vstrekovacích strojoch. Kompletná sústava danej formy je vidieť na obr. 13. V nasledujúcich kapitolách bude popísaný doterajší technologický postup vybraných súčastí tejto formy, jeho vstupy, výrobné možnosti a požiadavky na plastový diel aj obrobky.



Obr. 13 Forma pre vstrekovanie plastov.

## 2.1 Plastový produkt

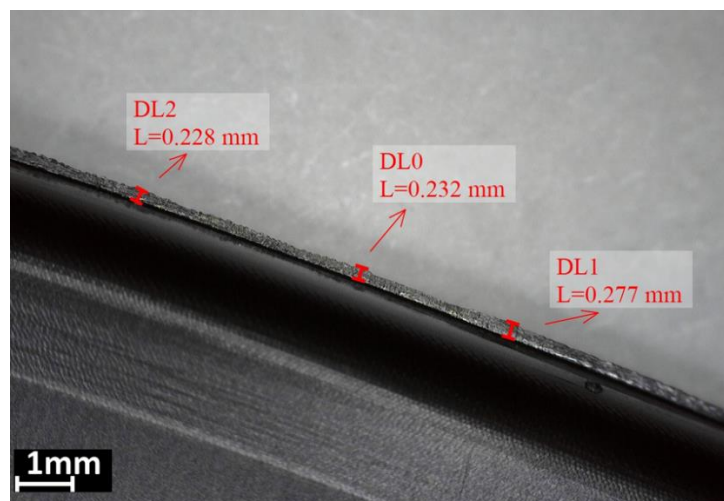
Finálnym produktom vstrekovania je plastová klapka tankovacej nádrže pre automobil, vyobrazená na obr. 14. Jedná sa o tenkú, tvarovú súčasť, pri ktorej sa prihliada predovšetkým na estetický dojem. Povrch vonkajšej strany musí byť hladký, bez priehlbín, škrabancov a iných nedokonalostí, ktoré by boli viditeľné po nalakovaní. Tieto požiadavky sa prenášajú na kvalitu povrchu formy.



Obr. 14 Klapka tankovacej nádrže pre automobil.

Materiálom veka je NORYL GTX973. Jedná sa o vodivú, nevystuženú zliatinu polyfenyléteru (PPE) a polyamidu (PA). Tento materiál je určený špeciálne pre vstrekovanie a jeho zloženie umožňuje elektrostatické a práškové lakovanie bez základného náteru. NORYL GTX973 vykazuje vysokú pevnosť a odolnosť proti nárazu a používa sa na výrobu lakovaných dielov pre automobilový priemysel, medzi ktoré patria panely karosérie, blatníky a klapky nádrže. Kompletné informácie o charakteristike materiálu je možné nájsť v materiálovom liste v prílohe č. 1. [24]

Častou chybou, ktorá sa objavuje predovšetkým vplyvom opotrebenia foriem, je zaoblenie rádiusu rohu medzi vstrekovacou dutinou a deliacou plochou. Tento jav spôsobuje zatekanie materiálu medzi súčasti formy a výsledkom je otrep na okraji plastovej klapky viditeľný na obr. 15. Jeho odstránenie predstavuje zbytočné náklady a niekedy pri ňom dochádza k ľudskej chybe a ku znehodnoteniu dielca. Z tohto dôvodu sa pri výrobe formy kladú zvýšené požiadavky pre vyfrézovanie čo najostrejšieho rohu deliacej roviny.



Obr. 15 Otrep na okraji klapky nádrže.



Pre bližšie pochopenie problematiky výroby tejto súčasti je potrebné priblížiť nároky zákazníka. Súčasť sa u výrobcu automobilov podrobuje rozsiahlym testom pre kontrolu povrchu. Pri týchto testoch sa typicky používajú senzory využívajúce projekciu sekvencie vzorov na detekciu ich difúzných odrazov od povrchu. Vytvorené mračno bodov je následne softvérovo vyhodnotené. Sebemenšie odchýlky geometrického tvaru, diskontinuita povrchu alebo i extrémne malé defekty sú zákazníkom reklamované. [25]

Na obr. 16 možno vidieť ukážku analýzy povrchu pomocou premietania rovnobežných pruhov odhaľujúcich prípadné prepadliny a vybúlenia. Vľavo sa nachádza klapka splňujúca požiadavky na kvalitu. Vpravo sa nachádza klapka po temperovaní, kde test odhaľuje mierne vybúlenie v označenej oblasti. Takáto súčasť už nie je automobilkou prijateľná a je potrebná náprava z hľadiska kvality/konštrukcie formy.



a) bezchybný diel

b) diel s vybúlením

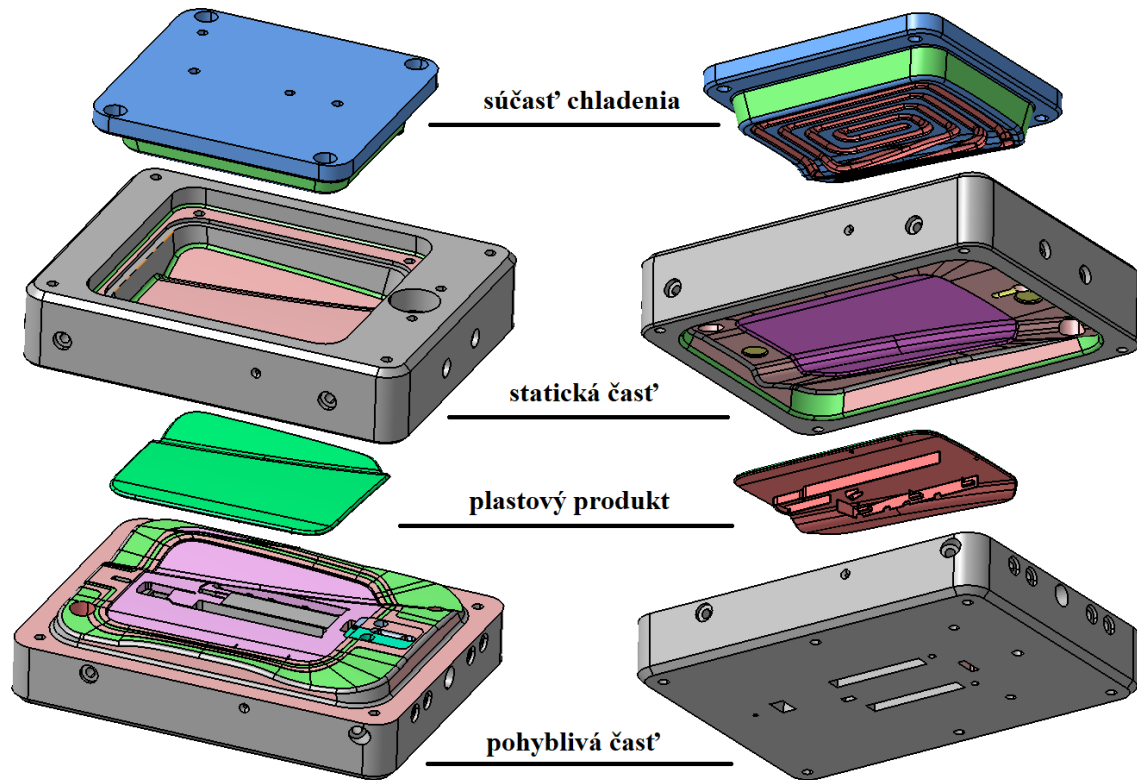
Obr. 16 Analýza povrchu klapky premietaním pruhov [26].

## 2.2 Charakteristika vybraných súčastí formy

Hlavným predmetom záujmu práce sú dve vybrané súčasti, jedná sa o:

- tvarovú vložku formy,
- chladiacu súčasť.

Tvarová vložka je súčasťou statickej časti formy. Na jednej jej strane sa nachádza dutina s negatívnym tvarom vstrekovaného dielu (tzv. vstrekovacia dutina), obklopená obecnou deliacou plochou. Táto dutina zabezpečuje tvar vonkajšej, pohľadovej časti veka. Plochy dutiny musia spĺňať vysoké požiadavky na kvalitu povrchu, konkrétne sa požaduje dodržanie parametru drsnosti maximálne  $R_a 0,8 \mu\text{m}$ . Táto požiadavka pochádza od firmy vykonávajúcej záverečné leštenie vstrekovacej dutiny. Na deliacej ploche sa nachádza vtoková drážka napojená na vtokový kanál. Z opačnej strany tvarovej vložky sa taktiež nachádza dutina, do ktorej sa vloží súčasť a ktorá je zodpovedná za temperovanie. Tvar dutiny je určený pre čo najrovnomernejšie chladenie plastového dielu. Ďalej sa na 3D modeli statickej časti formy nachádzajú diery pre vodiace kolíky a na bočných stranách i dlhé, priechodzie diery pre dodatočné chladenie. Tieto prvky sa už vo výrobe nepoužívajú a preto nebudú súčasťou návrhu nového technologického postupu. Tvar vnútornej strany plastového dielu je zabezpečený pohyblivou časťou formy. Pre lepšiu názornosť je sústava vyobrazená na obr. 17.



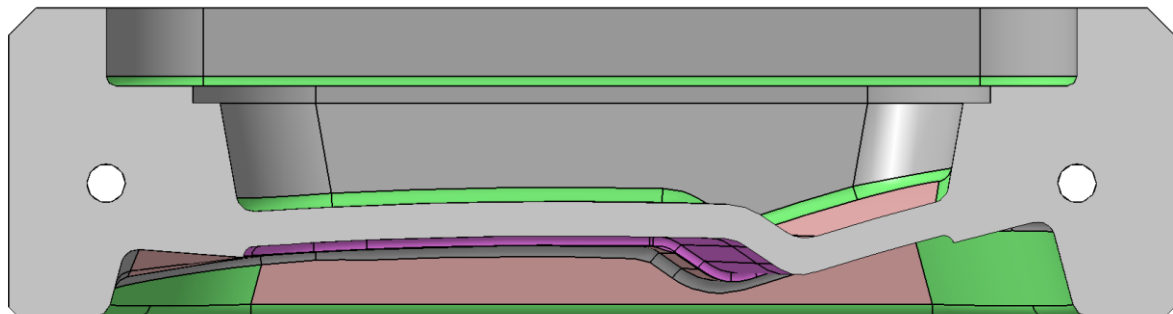
Obr. 17 Sústava tvarových častí formy.

### 2.2.1 Tvarová vložka formy

Tvarová vložka (statická časť) formy je charakteristická veľkým úberom materiálu. Objem materiálu na odobratie je ľahko zistiteľný z CAD systému, v prípade tejto obrábanej súčasti boli vytvorené negatívne diely dutín v softvéri Catia V5 a ich objemy boli nasledovné:

- 787,172 cm<sup>3</sup> pre dutinu z pohľadovej strany,
- 1433,282 cm<sup>3</sup> pre dutinu zo strany chladenia.

Medzi dutinami formy sa nachádza stena o hrúbke približne 17 mm. Vzhľadom na veľkosť súčasti sa táto stena považuje za tenkú a je náchylná k deformáciám reznými silami. Prierez súčasti je znázornený na obr. 18.



Obr. 18 Prierez tvarovej vložky formy.

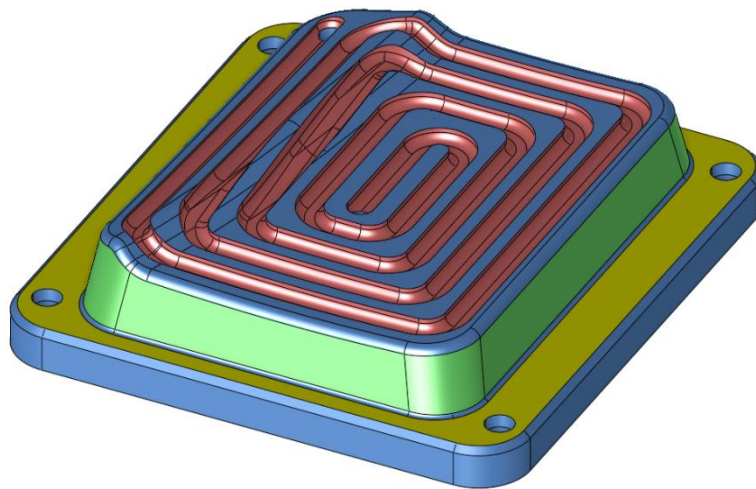
Ďalšími problematickými časťami sú horizontálne plochy. Na súčasti sa pomedzi obecné plochy nachádza niekoľko plôch s veľmi malými uhlami náklonu v rozmedzí 0 až 5°. Tieto časti sú problematické z hľadiska frézovania polgul'ovou frézou, ktorá pri trojosovom obrábaní horizontálnych plôch dosahuje nulové rezné rýchlosti v osi nástroja. Vzhľadom na geometriu

tvarevej vložky sa tomuto javu pri dokončovaní nebude dať vyhnúť (naklopenie nástroja ani konštrukčná úprava modelu tu nie sú možnosťou).

Najmenší rádius na tvarovej vložke je R2 mm, z čoho vyplýva potreba využitia polguľovej frézy o priemere 4 mm pre dočistenie rohov. Ako sa neskôr ukázalo, práve rádius R2 mm na pohľadovej strane je najzložitejším prvkom pre vyfrézovanie, a to kvôli zvýšeným nárokom na integritu povrchu v tejto oblasti súčasne s vysokým rizikom vzniku vibrácií.

### 2.2.2 Chladiaca súčasť

Chladiaci diel (obr. 19) je funkčným protidielom tvarovej vložky a preto je taktiež súčasťou návrhu vylepšenia postupu pre výrobu vložky. Rovnako ako pri tvarovej vložke, i pre tento diel bude vytvorený nový postup frézovania.



Obr. 19 Chladiaca súčasť formy.

Diel sa zakladá do väčšej z dutín vložky formy. Chladienie spočíva v prúdeň chladiacej kvapaliny špirálovitou drážkou, pričom vtok a výtok kvapaliny sú zabezpečené dvomi priechodzími dierami na začiatku a na konci drážky. Na rozdiel od samotnej vložky, na tento diel nie sú kladené príliš vysoké požiadavky na presnosť ani na kvalitu povrchu. Mierny únik chladiacej kvapaliny z drážky nie je problémom, nakoľko celkové tesnenie je zabezpečené tesniacou gumičkou nalepenou medzi vložkou formy a chladiacim dielom, a to v oblasti plochy vyznačenej žltou farbou na obr. 19. Pre dobré uloženie gumičky by preto táto plocha mala byť rovná a hladká. Drážka pre gumičku sa nachádza na strane chladienia tvarovej vložky a jej rozmery sú normalizované. Centrovacie (zelené) plochy sú odľahčené o 0,03 mm pre jednoduchšie uloženie do vložky, preto sa na ich presnosť nekladú vysoké požiadavky.

### 2.2.3 Polotovary vybraných súčastí formy

Typ materiálu a tepelné spracovanie polotovaru sú zhodné pre obidve vyrábané súčasti. Polotovary sa líšia len rozmermi; polotovarom pre tvarovú vložku formy bude kváder o rozmeroch 427×347×70 mm a pre chladiacu súčasť o rozmeroch 316×300×55 mm. Polotovary sú z materiálu AISI P20 (ekvivalent DIN 1.2311) kaleného na vzduchu a popusteného na tvrdosť 290 až 330 HB ( $\approx$  30 až 34 HRC). Jedná sa o chrom-mangán-molybdénovú nástrojovú oceľ špeciálne určenú pre výrobu nástrojov pre tvárnenie za tepla. Oceľ vykazuje dobrú obrábiteľnosť, rovnomernú tvrdosť, dobrú homogenitu a leštiace vlastnosti. Chemické zloženie materiálu sa nachádza v tab. 1 a kompletný materiálový list je možné nájsť v prílohe č. 2.

Tab. 1 Chemické zloženie materiálu AISI P20 [27].

Prvok	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Obsah [hm. %]	0,37	0,30	1,40	2,00	1,00	0,20

Teplné spracovanie prebieha podľa postupu v tab. 2. Stupeň popúšťania sa riadi požadovanou tvrdosťou a húževnatosťou nástroja podľa popúšťacieho diagramu. Pre dosiahnutie tvrdosti 290 až 330 HB sa oceľ popúšťa na teplote 600 °C.

Tab. 2 Teplné spracovanie materiálu AISI P20 [28].

Spôsob TS	T [°C]	Popis
Kovanie	850-1100	Pomaly ochladzovať v suchom popole alebo v peci.
Žihanie na mätko	580-600	Prehriať na 4 hod. a pomaly ochladzovať v peci.
Žihanie na zníž. pnutí	600-650	Prehriať na 1 až 2 hod. a pomaly ochladzovať v peci.
Kalenie	840-870	Ochladzovať v oleji/na vzduchu (180 až 220 °C).
Popúšťanie	500-650	Ochladzovať na vzduchu.

## 2.3 Výrobné prostriedky

Pri návrhu nového technologického postupu je potrebné prispôbiť sa možnostiam nástrojorne v ITW PRONOVIA a využiť prostriedky, ktoré majú momentálne v nástrojári k dispozícii. Ide predovšetkým o stroje a softvéry. S prihliadnutím na to, že sa jedná o nástrojareň údržbovú, nie výrobnú, a výroba daných súčastí formy je kusová, nepožaduje sa v rámci návrhu nového technologického postupu žiadna prevratná zmena výrobných prostriedkov, ako napr. nákup nových strojov alebo použitie odlišných technológií pre výrobu súčastí. Tieto vstupy, akými sú použitie technológie obrábania, frézovacie centrum EXERON HSC 300 alebo CAD/CAM softvér Cimatron, sú vopred dané a diplomová práca sa zameriava na vyťaženie maxima ich potenciálu pri výrobe vybraných súčastí.

Nástroje používané pri doterajšej výrobe obrábanej súčasti boli monolitné frézy zo spekaných karbidov od PM-TECH, ktoré sú určené pre obrábanie tvrdých materiálov. Tieto frézy sa v praxi, priamo v nástrojári ITW PRONOVIA, preukázali ako kvalitné a spoľahlivé nástroje, preto je zachovanie týchto fréz v novom návrhu podmienkou spoločnosti. S prihliadnutím na nový postup frézovania dôjde k zmene typu fréz použitých pri výrobe súčastí. Charakteristika menovaných výrobných prostriedkov je stručne zhrnutá v nasledujúcich podkapitolách.

### 2.3.1 Stroj EXERON HSC 300

Využívané výrobné zariadenie je trojosové frézovacie centrum EXERON HSC 300. Firma Exeron GmbH sa dlhodobo a úspešne zaoberá vývojom a výrobou strojov určených pre technológie HSM a EDM. [29]

Stroj HSC 300 (obr. 20) má všeobecne oblasť využitia najmä pri obrábaní tvrdých materiálov a pri výrobe elektród menších rozmerov metódou HSM. Využívaným riadiacim systémom je HEIDENHEIN TNC 640. Stroj má portálovú konštrukciu, pričom lôže, portály a priečnik sú stavané z polymérneho betónu. Diely sú silno predimenzované, čo dopomáha k vysokej tuhosti konštrukcie a minimalizácii vibrácií. Ložiská u všetkých os majú trvalú vazelinovú náplň. Pohony sú priamo pripojené, prírubové. Stroj disponuje automatickou výmenou nástrojov s dvojitém manipulátorom, zásobník je tanierový so systémom *pick-up* a je oddelený od pracovného priestoru, čiže je chránený pred trieskami. Maximálny počet nástrojov v zásobníku je 40. [29]





Obr. 20 Frézovacie centrum EXERON HSC 300 [29].

Zabudované vreteno je typu StepTec HVC 140. Jedná sa o vreteno so štandardným rozhraním pre držiak typu HSK 40-E, ktoré dosahuje maximálnu hodnotu otáčok  $42\,000\text{ min}^{-1}$ . Vďaka guľčikovým ložiskám z keramiky dokáže zvládnuť dlhé pracovné cykly (až 24 hod). Vreteno je chladené vodou a za pomoci čidiel je možné sledovať jeho teplotu v reálnom čase. Taktiež je možné sledovať vibrácie; vreteno ich zaznamenáva a zobrazuje hodnotu vibrácií v percentách. Stroj má bezpečnostnú poistku, ktorá ho automaticky zastaví pri dosiahnutí hodnoty vibrácií 80 %, výrobca však doporučuje dlhodobu zaťažovať vreteno na maximálne 25 %. Súhrn parametrov stroja HSC 300 sa nachádza v tab. 3. [29]

Tab. 3 Parametre frézovacieho centra HSC 300 [29].

Parameter	Hodnota	Jednotka
Dráha pojazdu X/Y/Z	380/300/300	[mm]
Priechod portálom šírka/výška	520/400	[mm]
Odstup stôl-vreteno	405	[mm]
Upínacia plocha stola	470 × 400	[mm]
Hmotnosť dielca	max. 300	[kg]
Rýchlosť posuvu	30	[m.min <sup>-1</sup> ]
Posuv	30	[m.min <sup>-1</sup> ]
Zrýchlenie	1,5	[g]
Typ vretena	StepTec HVC 140	
Otáčky vretena	42 000	[min <sup>-1</sup> ]
Výkon vretena	max. 13	[kW]
Držiak nástroja	HSK 40-E	
Tanierový zásobník	max. 40 miest	
Priemer nástroja	max. Ø 16	[mm]
Dĺžka nástroja	max. 130	[mm]
Zastavaná plocha	3 800 × 2 300	[mm]
Výška stroja	2 900	[mm]
Hmotnosť stroja	4 200	[kg]
Príkon	16	[kW]

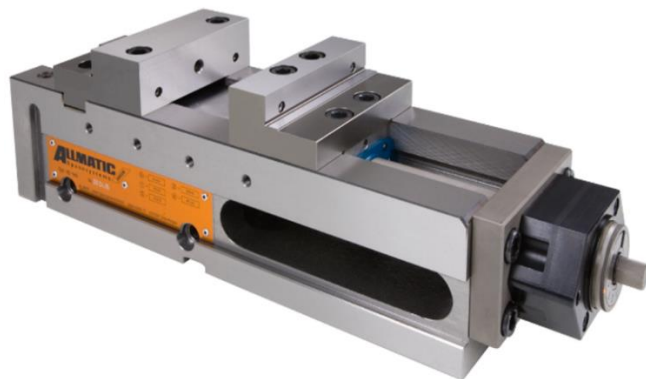
V technických údajoch stroja sa uvádza maximálny upnutelný priemer nástroja 16 mm, ale použitie nástroja o tomto priemere zvyšuje intenzitu vibrácií, ktoré ľahko presahujú hodnotu 25% aj pri miernych rezných podmienkach. Z dlhodobého hľadiska je teda vhodné používanie nástrojov o priemere 12 mm a menej. Zo zmieneneho vyplýva ďalšia okrajová podmienka pre tvorbu nového technologického postupu.

Na upnutie nástrojov sa v ITW používajú tepelné upínače od firmy Diebold (obr. 21) s kuželom HSK-E40. Meranie nástrojov je na stroji zabezpečené optickým meracím zariadením, umiestneným v pracovnom priestore a chráneným vzduchovými clonami. Zariadenie meria rozmery nástroja počas rotácie vretena, čím sa kompenzuje dilatácia ložísiiek. Opakovateľná merateľná presnosť tohto systému sa podľa výrobcu nachádza v toleranciách 1  $\mu\text{m}$ . Tu je vhodné poznamenať, že nástroje sa merajú v studenom stave a pri vysokopresnom, niekoľko hodín trvajúcom obrábaní môže i tak dôjsť k odchýlkam presnosti obrábania vplyvom tepelnej rozťažnosti, a to v rádoch tisícín až stotín milimetra. [29]

Na upínanie obrobkov na tomto stroji sa v nástrojári ITW používa hydraulický zverák typu TC 125 od firmy Allmatic Spannsysteme (obr. 22). Pre meranie polohy obrobku je stroj vybavený systémom s meracou dotykovou sondou od firmy Renishaw.



Obr. 21 Tepelný upínač od Diebold. [30]

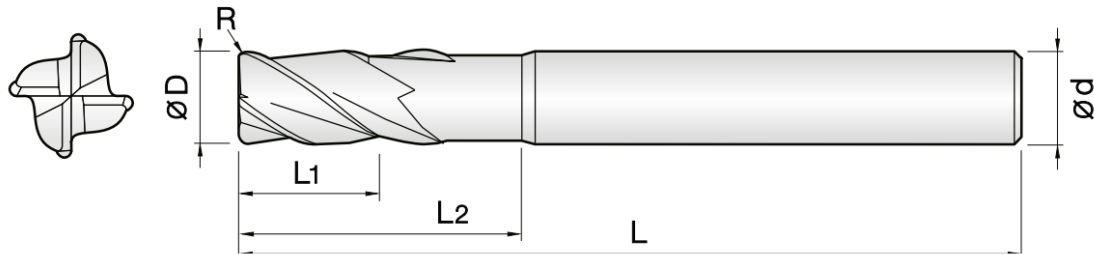


Obr. 22 Hydraulický zverák TC 125. [31]

### 2.3.2 Nástroje PM-TECH

Spoločnosť PM-TECH sa zaoberá predajom, testovaním, poradenstvom a vývojom rezných nástrojov, meradiel a upínacích prostriedkov v Česku a na Slovensku. Ich portfólio zahŕňa široký výber monolitných fréz pre obrábanie tvrdých kovov. V tejto kapitole bude predstavená nástrojová sada PM-TECH monolitných fréz, ktorá bola využívaná pri doterajšom výrobnom postupe. [32]

Pre hrubovanie súčasti sa používala 4-bitá toroidná fréza pre rebrovanie, špeciálne určená pre tvrdené ocele až do 68 HRC. Prirodzene, pre hrubovanie bol zvolený najväčší použiteľný priemer 12 mm. Fréza je vyrobená zo spekaných karbidov a na nej je aplikovaný PVD povlak TiSiN-S, ktorý zaručuje dobrú odolnosť proti opotrebeniu. Schéma frézy sa nachádza na obr. 23 príslušné zakótované parametre v Tab. 4. [33]

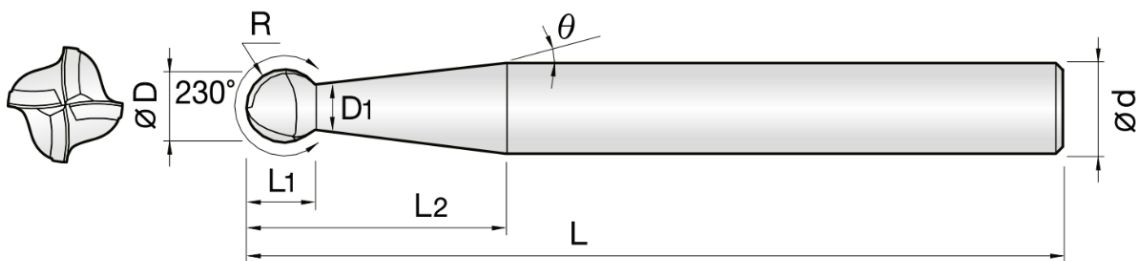


Obr. 23 Toroidná fréza pre rebrovanie do 68 HRC od PM-TECH [33].

Tab. 4 Parametre toroidnej frézy pre rebrovanie od PM-TECH [33].

Parameter	ØD	R	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L	Ød	Firemné označenie
Hodnota [mm]	12	1	13	26	80	12	4JJCR-120-010-260

Pre dohrubovacie a dokončovacie operácie sa využívala 4-bitá guľová fréza s uhlom guľového zakončenia  $230^\circ$  (obr. 24). Podobne ako fréza na hrubovanie, i táto fréza je určená pre materiály do tvrdosti 68 HRC, vyrobená zo spekaných karbidov a má rovnaký PVD povlak.  $230^\circ$ -stupňový rádius umožňuje väčší rozsah 3D obrábania, nakoľko je možné obrobit' i mierne podrezy. V nástrojári ITW PRONOVIA má táto fréza všeobecne veľké využitie a z dôvodu obmedzenia počtu nástrojov na sklade je preto používaná aj pre danú súčasť formy napriek tomu, že  $230^\circ$  rádius tu priamy prínos nemá. Pri východnom technologickom postupe boli použité celkovo dve frézy tohto typu a to o priemere 8 mm a 6 mm. Ako už bolo spomenuté, najmenší rádius na tvarovej vložke ( $R2\text{ mm}$ ) je potrebné vytvoriť priemerom frézy 4 mm. Konečný obrobok teda pôvodne nezodpovedal požadovanému 3D modelu. To však ani nebolo nutné z dôvodu následného elektroerozívneho obrábania elektródou, ktoré bolo súčasťou východzieho postupu a ktoré zabezpečilo konečný tvar súčasti. Geometrické parametre pre obidva použité priemery je možné nájsť v tab. 5.


 Obr. 24 Guľová fréza s  $230^\circ$ -stupňovým rádiusom do 68 HRC od PM-TECH [33].

 Tab. 5 Parametre guľovej frézy s  $230^\circ$ -stupňovým rádiusom od PM-TECH [33].

Parameter	ØD	R	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L	Ød	θ	Firemné označenie
Hodnota [mm]	8	4	5,7	28	100	8	$1^\circ$	4JJSP-080-010-280
	6	3	4,2	30	90	6	$0^\circ$	4JJSP-060-300-S06

### 2.3.3 CAD/CAM systém Cimatron

Čím zložitejšia je obrábaná súčasť, tým dôležitejšou sa stáva etapa plánovania výroby. V oblasti priemyslu venujúcej sa výrobe foriem sa preto kladie ešte väčší dôraz na správnu voľbu výrobných techník a CAD/CAM riešení. Investícia do kvalitného CAD/CAM softvéru je nevyhnutná pre konkurencieschopnosť, no okrem toho je tiež dôležité využiť jeho potenciál naplno a snažiť sa upustiť od konzervatívnych programovacích metód. Tradičné spôsoby programovania sú síce rýchlejšie a jednoduchšie na nastavenie, ale čas strávený skúšaním a aplikovaním nových spôsobov sa môže viacnásobne vrátiť v podobe kratšieho času obrábania. Moderné CAD/CAM systémy umožňujú aplikovanie nových metód, niektoré z nich

dokonca zahŕňajú funkcie uľahčujúce prácu v konkrétnom odvetví. Medzi tieto špecializované softvéry sa radí i Cimatron. [5]

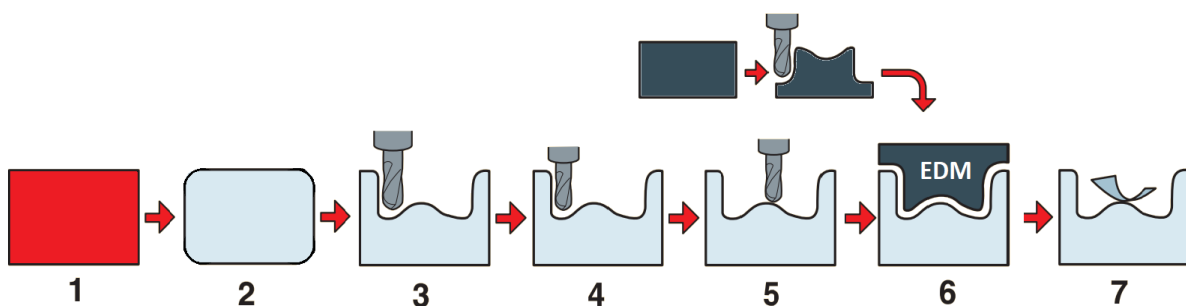
Cimatron je CAD/CAM softvér vyvinutý v Izraeli a prispôsobený pre potreby nástrojární. Má 35-ročnú históriu vývoja a podľa článku [34] s ním pracuje až približne tretina nástrojární v Nemecku. Konfigurácie softvéru ponúkajú špecializované riešenia postupových a transferových lisovacích nástrojov, vstrekovacích foriem, elektród a NC frézovania (dva a pol až päťosového kontinuálneho frézovania). Jeho funkcie výrazne uľahčujú a urýchľujú celý proces od tvorby ponuky, cez konštrukciu, až po výrobu nástrojov. Modul určený pre návrh a výrobu foriem zahŕňa napríklad nasledovné funkcie [35]:

- analýza zaformovania dielov,
- automatická tvorba otvorov a závitov pre skrutky, vyhadzovače, pružiny, tesniace krúžky atď. naprieč komponentmi,
- analýza bezpečnej vzdialenosti chladiaceho okruhu od ostatných komponentov,
- funkcie pre optimalizáciu toku materiálu kanálom,
- automatizovaná tvorba vyhadzovacích systémov za použitia importovaných katalógov normálií,
- analýza vstrelu plastu umožňujúca odhaliť prípadné komplikácie (studený spoj, uzavretý vzduch) a ďalšie.

Cimatron taktiež umožňuje efektívnu tvorbu elektród a nastavenie EDM strojov [35]. Jedná sa teda o veľmi komplexný a komplikovaný systém umožňujúci množstvo špecializovaných funkcií. Každý modul či stratégia má svoje určenie a limity, ktoré je nutné pochopiť pre predchádzanie vzniku chýb. Autorka absolvovala dvojdnové školenie v priestoroch firmy technology-support, s.r.o., ktoré poskytlo základné poznatky pre manipuláciu so softvérom. Získanie schopností na úrovni potrebnej pre tvorbu programov u vybraných súčastí si však vyžadovalo oveľa väčšie množstvo času práce so softvérom. Cieľom autorky bolo preskúmať možnosti Cimatronu a využiť spôsoby obrábania, ktoré doteraz neboli v ITW pri tvorbe programov uplatňované. Spôsoby, ktoré by boli vhodne aplikovateľné pri výrobe daných súčastí a viedli by k úspore času obrábania. Ako sa neskôr ukázalo, všetka táto práca sa vyplatila.

## 2.4 Východzí technologický postup pre tvarovú vložku formy

Východzí technologický postup pre výrobu tvarovej vložky formy pozostával z krokov schématicky znázornených na obr. 25.



Obr. 25 Východzí postup výroby tvarovej vložky [5].

Jednotlivé kroky východzieho postupu boli nasledovné:

1. tepelné spracovanie,

2. příprava polotovaru,
3. hrubovanie,
4. dohrubovanie + brúsenie základní,
5. preddokončovanie + dokončenie,
6. frézovanie elektródy + dokončenie vstrekovacej dutiny EDM hĺbením,
7. ručné leštenie.

Proces obrábania počínal hrubovaním oboch strán súčasti; najskôr strany chladenia, potom strany vstrekovania. Po hrubovaní došlo ku uvoľneniu vnútorných napätí vplyvom rezného procesu a došlo ku skrúteniu vložky. Pre zaručenie vzájomnej kolmosti boli základne súčasti zbrúsené a pokračovalo sa dokončovaním obidvoch strán súčasti v rovnakom poradí, ako pri hrubovaní. Operácie frézovania a brúsenie sú pre jednotlivé strany zhrnuté v tab. 6 a v tab. 7.

Tab. 6 Súhrn operácií pre frézovanie strany chladenia pri východnom postupe.

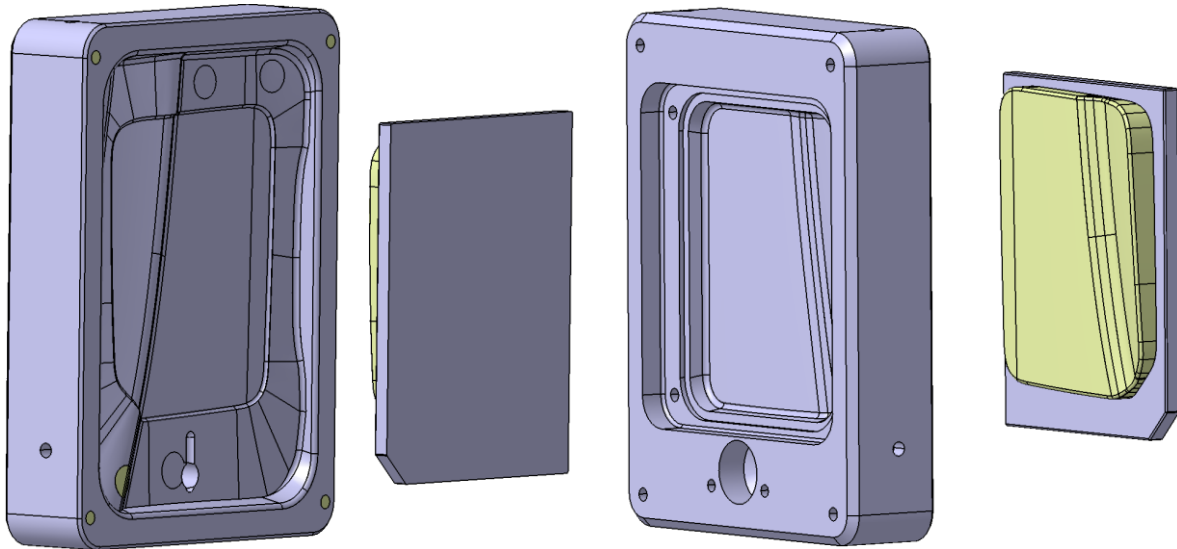
Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Toroidná fréza	Ø12	Zarovnanie čelnej plochy	Špirála
2	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie dutiny	Špirála
3	Toroidná fréza	Ø12	Dohrubovanie dutiny	Špirála
4	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie otvoru pre trysku	Špirála
5	Toroidná fréza	Ø12	Zrazenie hrany na obvode	Špirála
6	Brúsenie			
7	Toroidná fréza	Ø12	Preddokončenie dutiny	Špirála
8	Toroidná fréza	Ø12	Dokonč. horizontálnych plôch	Dokonč. podľa limit. uhlu
9	Guľová fréza	Ø8	Dohrub. tvarovej plochy	Špirála
10	Guľová fréza	Ø8	Dokonč. tvarovej plochy	Dokonč. podľa limit. uhlu
11	Toroidná fréza	Ø12	Dokonč. zrazenej hrany	Dokonč. podľa limit. uhlu
12	Toroidná fréza	Ø12	Dokonč. otvoru pre trysku	Dokonč. podľa limit. uhlu

Tab. 7 Súhrn operácií pre frézovanie pohľadovej strany pri východnom postupe.

Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Toroidná fréza	Ø12	Zarovnanie čelnej plochy	Špirála
2	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie dutiny	Špirála
3	Toroidná fréza	Ø12	Dohrubovanie dutiny	Špirála
4	Brúsenie			
5	Guľová fréza	Ø8	Preddokončovanie dutiny	Špirála
6	Guľová fréza	Ø8	Dokončenie dutiny	Dokonč. podľa limit. uhlu
7	Toroidná fréza	Ø12	Zrazenie hrany na obvode	Špirála
8	Guľová fréza	Ø6	Dočistenie celého modelu	Zbytkové frézovanie

Z tabuliek možno vyčítať, že pre obrobenie celej súčasti boli použité tri stratégie. Pri frézovaní zložitej súčasti je vhodné rozdeliť plochy súčasti podľa tvaru a funkčnosti a obrábať ich postupne, pričom sa zvolí väčšie spektrum stratégií. Potom je možné voliť stratégie tak, aby každá z nich bola uspôsobená požiadavkám danej plochy. V konečnom dôsledku takýto postup ušetrí pri obrábaní množstvo času. Je ale nutné poznamenať, že tvorba komplikovanejšieho programu si so sebou nesie väčšie riziko vzniku chyby, ktorá môže byť ľahšie prehliadnutá a môže spôsobiť fatálne následky vo výrobe. Rovnaký princíp rozdelenia plôch podľa tvaru a funkčnosti platí aj pre rezné podmienky. Rezné podmienky použité vo východnom postupe frézovania je možné nájsť v prílohe č. 6.

Po dočistení pohľadovej strany (tab. 7, op. 8) bol v rohu vstrekovacej dutiny o rádiuse 2 mm zanechaný zbytkový materiál. Tento materiál sa odstraňoval v nasledovnom EDM hlbení medenou elektródou. Sústavu súčasti formy a elektródy možno vidieť z dvoch rôznych uhlov pohľadu na obr. 26.



Obr. 26 Sústava tvarovej vložky a elektródy.

Dôvodom pre použitie elektródy pre finálne dokončenie pohľadovej strany je zaručenie povrchu formy bez akýchkoľvek rýh spôsobených vibráciami pri dokončovaní. Výskyt prípadných rýh v tejto oblasti súčasti by znamenal jej úplné znehodnotenie. EDM hlbenie taktiež eliminuje riziko zdeformovania tenkej steny pôsobením rezných síl. Táto technológia je ale, už sama o sebe, časovo náročná. Nízka požadovaná hodnota parametru drsnosti erodovaného povrchu  $Ra$  0,8  $\mu\text{m}$  EDM proces ešte viac predlžuje. Okrem samotného hlbenia je tiež potrebné vyrobiť i elektródu, čo značí ďalšie navýšenie výrobného času a výdavkov. Popis operácií frézovania medenej elektródy je taktiež zhrnutý v tab. 8.

Tab. 8 Súhrn operácií pre frézovanie elektródy.

Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Guľová fréza	$\text{Ø}8$	Hrubovanie modelu	Špirála
2	Guľová fréza	$\text{Ø}6$	Dohrubovanie výstupku	Špirála
3	Guľová fréza	$\text{Ø}6$	Dokončenie výstupku	Dokonč. podľa limit. uhlu
4	Guľová fréza	$\text{Ø}8$	Dokončenie základne	Dokonč. podľa limit. uhlu

Na záver sú plochy vstrekovacej dutiny na pohľadovej strane súčasti ručne leštené. Po vyleštení sa tvarová vložka podrobuje meraniu geometrie. Následne sa spolu s chladiacim dielom namontujú do formy a prebiehajú testy vstrekovania, pri ktorých sa skúma kvalita plastových výrobkov vytvorených použitím formy.

## 2.5 Východzí technologický postup pre chladiacu súčasť

Súčasť chladenia je frézovaná na dve upnutia, pričom pri prvom dochádza k zarovnaniu čela, ktoré sa podľa pôvodného postupu konalo použitím stratégie špirála. Ďalej sú pri prvom upnutí vyhotovené otvory v súčasti, vrátane priechodzích otvorov. Pri druhom upnutí sa frézuje strana so špirálovitou drážkou určenou pre chladenie. Pôvodne bola celá strana hrubovaná v rámci jednej operácie. Dohrubovanie sa prevádzalo využitím guľovej frézy o priemere 6 mm, dokončovanie toroidnou frézou a zbytkové frézovanie opäť guľovou. Kompletný postup pre frézovanie tejto strany obrobku možno nájsť v tab. 9.



Tab. 9 Postup frézovania strany súčasti s chladiacou drážkou.

<b>Op.</b>	<b>Nástroj</b>	<b>D</b>	<b>Operácia</b>	<b>Stratégia</b>
1	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie modelu	Špirála
2	Guľová fréza	Ø6	Dohrubovanie modelu	Špirála
3	Toroidná fréza	Ø12	Dokončenie tvarovej časti	Dokonč. podľa limit. uhlu
4	Toroidná fréza	Ø12	Dokonč. dosadacej plochy	Dokonč. podľa limit. uhlu
5	Guľová fréza	Ø6	Dočistenie celého modelu	Zbytkové frézovanie

### 3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Praktická časť diplomovej práce je rozdelená na tri hlavné etapy. Prvou etapou bola tvorba programu v prostredí CAD/CAM systému Cimatron, ktorá bola zameraná na výber skupiny stratégií frézovania umožňujúcich rýchlu výrobu tvarovej vložky formy súčasne s dosiahnutím požadovanej kvality povrchu a geometrickej a rozmerovej presnosti. Zároveň boli zvolené aj nástroje vhodné pre použitie pri týchto stratégiách. Nasledovala voľba počiatočných rezných podmienok pre celý obrábací proces s ohľadom na obrábaný materiál, možnosti stroja, nástroja, upnutia nástroja i obrobku, funkčnosť obrábaných plôch atď.

Druhou fázou praktickej časti bolo testovanie podmienok zvolených pri fáze predošlej. Experimenty boli prevádzané na menších vzorkách za rovnakých okrajových podmienok (stroj, obrábaný materiál...), za akých neskôr prebehla výroba samotných súčastí formy. Cieľom bolo overenie vhodnosti frézovacích stratégií a nástrojov pre výrobu najproblematickejšej časti – pohľadovej strany tvarovej vložky. Taktiež sa skúmal vplyv počiatočne zvolených rezných parametrov, ktoré sa pri následných ďalších experimentoch upravovali, pričom sa hľadala najvhodnejšia kombinácia z hľadiska presnosti, kvality povrchu a obrábacieho času. Súvisle s priebehom experimentov boli v Cimatrone navrhnuté postupy výroby strany chladienia pohľadovej vložky a výroby chladiacej súčasti. Pri týchto postupoch už boli aplikované poznatky vyplývajúce z výsledkov testov.

Poslednou etapou bola realizácia výroby obidvoch súčastí. Táto etapa zahŕňa celý proces od prípravy polotovaru až po ručné leštenie. Následné testy kvality tvarovej vložky a vzorkovanie umožnili celkové zhodnotenie návrhu nového technologického postupu a dodatočné odporúčania.

Pred ponorením sa do úvahy nad návrhom zefektívnenia východzieho stavu výroby je dôležité definovať „zefektívnenie“. V prípade tejto diplomovej práce sa, podľa požiadaviek firmy, prihliada predovšetkým na skrátenie obrábacieho času. Urýchlenie výroby a náhrada poškodenej vložky za súčasného splnenia požiadaviek kvality má v tejto práci prednosť pred inými ekonomickými aspektmi, ako sú napríklad náklady na nákup rezných nástrojov, spotreba energií apod.

#### 3.1 Tvorba programu v CAD/CAM Cimatron

Ako už bolo spomenuté, pre urýchlenie výrobného procesu je vhodné eliminovať fázu výroby elektródy a EDM obrábanie, ktoré sú časovo náročné. Frézovacie stratégie sa teda musia voliť spôsobom, ktorý umožní obrobenie súčastí do finálneho tvaru technológiou frézovania. Vzhľadom na úber veľkého množstva materiálu z valcovaného polotovaru a tenkú stenu tvarovej vložky je potrebné postupovať opatrne, aby sa predišlo skrúteniu a iným deformáciám obrobku. Frézovací proces sa teda bude deliť na pomerne veľké množstvo krokov, medzi ktoré bude patriť i dohrubovanie a preddokončovanie s malými prídavkami.

Základným východiskom pre voľbu frézovacích stratégií je funkcia jednotlivých plôch obrobku. Podľa nej sa dá určiť požadovaná presnosť a kvalita, z čoho ďalej vychádza dráha nástroja (hlbka, šírka rezu) a rezné podmienky (posuvová rýchlosť). Plochy súčastí preto budú rozdelené podľa funkčnosti a obrábané jednotlivo rôznymi stratégiami, zabezpečujúcimi splnenie individuálnych požiadaviek na kvalitu danej plochy.

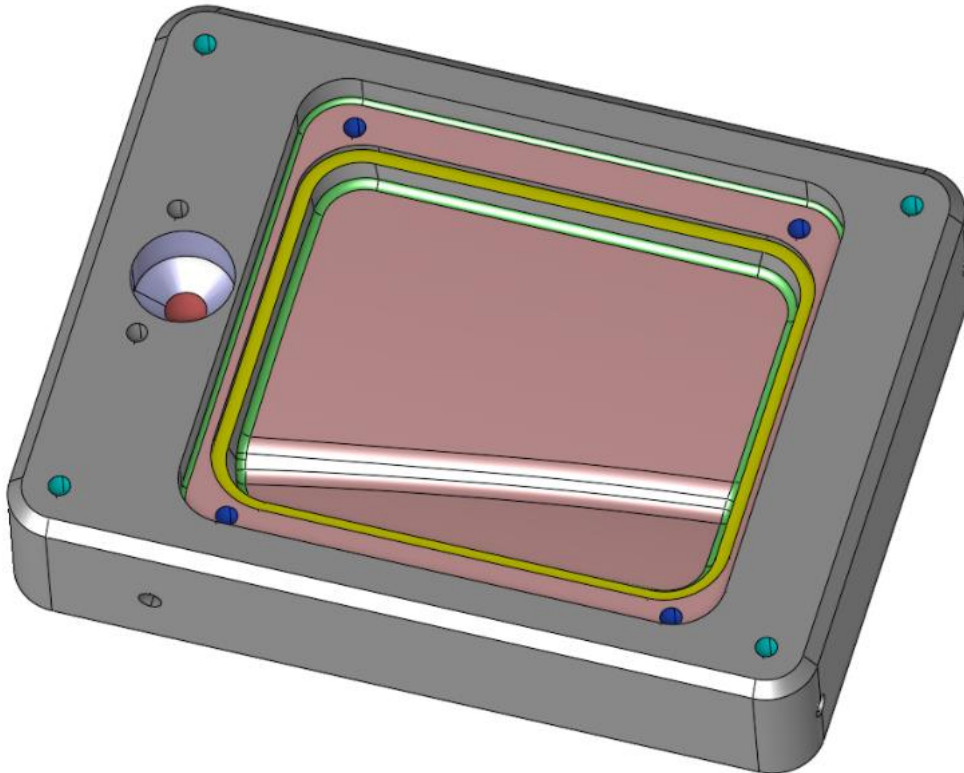
Následujúce kapitoly stručne zhrňajú a odôvodňujú voľbu jednotlivých operácií, stratégií a príslušných nástrojov pre obrábanie obidvoch súčastí. Dôraz bude kladený na pohľadovú stranu tvarovej vložky formy, ktorá je, kvôli svojim vysokým nárokom na kvalitu, najzložitejším prvkom pre vypracovanie nového návrhu. Niektoré postupy boli ďalej upravované s ohľadom na výsledky neskôr prevedených testov a bližšieho skúmania simulácií.



Eventuálne chyby boli odstránené a v prípade viacerých možných alternatív postupu boli vybrané postupy s kratším obrábacím časom indikovaným v softvéri Cimatron.

### 3.1.1 Voľba stratégií pre tvarovú vložku formy

Z dôvodu zbytkových napätí v polotovare je výhodnejšie postupovať spôsobom, kedy bude najviac materiálu odobratého na začiatku procesu obrábania. Ako prvá sa teda bude frézovať strana, kde dochádza k väčšiemu úberu pri hrubovaní – strana chladenia tvarovej vložky. Túto stranu možno vidieť na obr. 27.



Obr. 27 Strana chladenia tvarovej vložky formy.

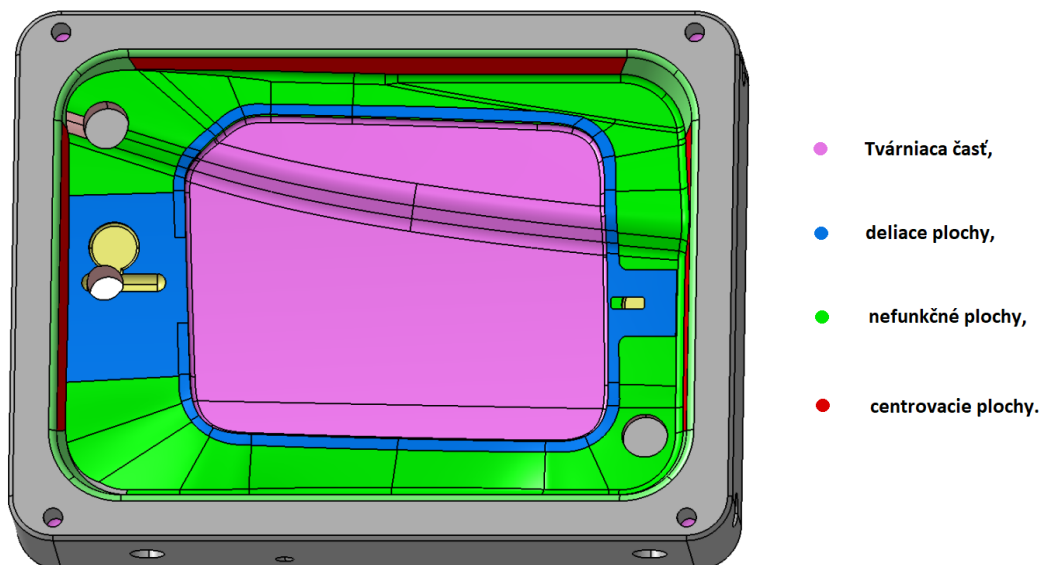
Na rozdiel od pohľadovej strany formy, tu sa nekladú príliš vysoké nároky na kvalitu povrchu. Taktiež geometria dutiny je jednoduchšia. Vzhľadom na funkčnosť plôch je dôležitá presnosť priechodzieho otvoru pre vtok plastu o priemere 16 H7 mm, ktorý musí lícovať trysku vstrekovacieho stroja. Tento otvor je na obr. 27 znázornený červenou farbou. Zvýšenú pozornosť tiež treba venovať žltej ploche, ktorá slúži na uloženie tesniacej gumičky. Diery vyznačené tmavomodrou farbou sú určené pre imbusové skrutky upínajúce chladiacu súčasť ku tvarovej vložke formy. Svetlomodré diery slúžia na ukotvenie súčasti do zvyšku konštrukcie formy pomocou závitových tyčí. Návrh nového postupu frézovania súčasti je zhrnutý v tab. 10.

Tento postup bol vypracovaný autorkou súvisle v čase prevádzania experimentov v kap. 3.2. Je teda vystavaný na základe ich výsledkov a bol použitý v tejto forme aj pri realizácii výroby skutočnej súčasti. Naproti tomu, postup frézovania komplikovanejšej, pohľadovej strany súčasti, ktorý je popísaný nižšie, bol navrhnutý ako počiatočný postup slúžiaci ako predmet testovania a bol neskôr upravovaný na základe výsledkov týchto testov.

Tab. 10 Súhrn navrhovaných operácií a príslušných stratégií pre stranu chladenia tvarovej vložky.

Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Toroidná fréza	Ø12	Zarovnanie čelnej plochy	VoluMill
2	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie dutiny	VoluMill
3	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie otvoru pre trysku	VoluMill
4	Toroidná fréza	Ø12	Zrazenie hrany na obvode	VoluMill
5	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie otvoru pre vtok	Špirálový profil
6	Guľová fréza	Ø8	Dohrubovanie tvarových plôch	Špirála
7	Vrták	Ø8	Vrtanie dier pre závitové tyče	Hlboké vrtanie
8	Vrták	Ø8	Vrtanie dier pre imbusové skrutky	Hlboké vrtanie
9	Hrubovanie pohľadovej strany (Tab. 11)			
10	Toroidná fréza	Ø12	Dokončenie horizontálnych plôch	VoluMill
11	Toroidná fréza	Ø12	Dokončenie otvoru pre trysku	Podľa limit. uhlu
12	Toroidná fréza	Ø12	Preddokončenie tvarových plôch	Špirála
13	Guľová fréza	Ø8	Dokončenie hrany na obvode	Špirála
14	Guľová fréza	Ø8	Preddokončenie tvarových plôch	Špirála
15	Guľová fréza	Ø8	Dokončenie tvarových plôch	Podľa limit. uhlu
16	Guľová fréza	Ø6	Dokončenie rohu R3,5	Čistenie rohov

Plochy pohľadovej strany vložky formy sú podľa funkčnosti rozdelené na obr. 28. Pri tvárniacej časti formy je predovšetkým dôležitá kvalita povrchu; plocha musí byť hladká, bez akýchkoľvek stôp po frézovacom nástroji. U deliacej plochy je nevyhnutná rozmerová presnosť a ostrosť hrany medzi deliacou a tvarovou časťou. Tie zaručujú doľahnutie deliacich plôch častí formy na seba a zabráňujú tak úniku tekutého plastu mimo dutinu. Podobne aj u centrovacích plôch je dôležitá presnosť pre správne dosadenie častí formy. Zelenou farbou sú vyznačené nefunkčné plochy. Tieto plochy sú tak označené z dôvodu, že v ich miestach už nie je doľahnutie častí formy kľúčové, ako to bolo napríklad okolo spomínanej ostrej hrany alebo v mieste vstreku materiálu, kde je potrebné tesnenie. Za účelom urýchlenia frézovacieho procesu je možné tieto plochy mierne odľahčiť, nakoľko v tom prípade už nie je potrebné prihliadať na ich presnosť a na kvalitu ich povrchu. Je tak potom možné navýšiť šírku záberu frézy a tiež posuvovú rýchlosť. Keďže nefunkčné plochy tvoria pomerne veľkú časť obrábanej dutiny, ich odľahčenie by mohlo viesť k úspore času.



Obr. 28 Rozdelenie plôch pohľadovej strany vložky podľa funkčnosti.

Pri bližšom pohľade na vložku je vidieť, že model je chybný. Je možné nájsť rádius rohu prechádzajúci v ostrú hranu a tiež niekoľko plôch, ktoré nemajú tangenciálnu návaznosť. Samotný model teda nie je vyfrézovateľný. Všetky tieto defekty sa však nachádzajú na nefunkčných plochách a môžu byť jednoducho riešené spomenutým odľahčením. ITW PRONOVIA si formy necháva navrhovať firmou špecializovanou na konštrukciu foriem, ktorá nechce so zákazníkmi zdieľať „živé“ 3D modely s editačným stromom. K dispozícii je teda výlučne model vo formáte \*.step, ktorého konštrukčná úprava by bola pomerne zložitá a tiež riskantná (riziko zmeny geometrie funkčnej oblasti). Nakoľko konštrukčná úprava formy nie je súčasťou zadania tejto práce a chyby v modeli priamo neovplyvňujú funkčnosť obrobku, tieto chyby budú v práci zanedbané.

Autorka experimentovala s možnosťami softvéru CAD/CAM Cimatron a simulovala kombinácie rôznych stratégií, ktoré by umožňovali vyfrézovanie vložky formy čo najefektívnejšie. S prihliadnutím na všetky okrajové podmienky a požiadavky, menované v predošlých kapitolách, bol zvolený počítačový postup zhrnutý v tab. 11.

Tab. 11 Počítačový návrh operácií a príslušných stratégií pre pohľadovú stranu tvarovej vložky.

Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Toroidná fréza	Ø12	Zarovnanie čelnej plochy	VoluMill
2	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie dutiny	VoluMill
3	Toroidná fréza	Ø12	Zrazenie hrany na obvode	VoluMill
4	Toroidná fréza	Ø12	Dohrubovanie dutiny	Špirála
5	Guľová fréza	Ø8	Dohrubovanie dutiny	Špirála
6	Guľová fréza	Ø6	Hrubovanie vtokovej drážky	Špirála
7	Brúsenie			
8	Guľová fréza	Ø6	Preddokončenie dutiny	Špirála
9	Guľová fréza	Ø6	Dokonč. tvárniacich a deliacich plôch	Podľa limit. uhlu
10	Guľová fréza	Ø6	Dokonč. centrovacích plôch	Podľa limit. uhlu
11	Guľová fréza	Ø8	Dokončenie zrazenej hrany	FinishAll
12	Guľová fréza	Ø8	Odľahčenie nefunkčných plôch	Špirála
13	Guľová fréza	Ø6	Dokončenie drážky	Podľa limit. uhlu
14	Guľová fréza	Ø6	Čistenie rohu R3,5	Čistenie rohov
15	Guľová fréza	Ø4	Čistenie rohu R2	Čistenie rohov

Pre zarovnanie čelnej plochy (op. 1) bola zvolená stratégia VoluMill. Hrúbka odobranej vrstvy z čela je 6 mm a vďaka použitiu tejto stratégie môže byť odobraná na jeden prejazd. Časovo táto možnosť vychádza lepšie v porovnaní s rasterom a to i v prípade využitia kombinácie súsledného a nesúsledného frézovania. Pomocou stratégie VoluMill môže byť celá hrúbka materiálu odobraná súsledným frézovaním a vysokou rýchlosťou.

Hrubovanie dutiny (op. 2) sa prevádza rovnakou stratégiou. Nástroj sa zanoruje do materiálu po špirále pod uhlom 1°. Pôvodným zámerom autorky bolo predvrtanie diery, na ktorú by hrubovanie navádzalo rozširovaním otvoru, avšak Cimatron nemá funkciu, ktorá by umožňovala nastaviť začiatkový bod dráhy pre VoluMill. Hrubuje sa súsledne, na prídavok 0,8 mm, zvolená hĺbka rezu je 10 mm a šírka rezu 0,84 mm (0,07D). Prídavok 0,8 mm bol pôvodne volený pomerne vysoký z dôvodu obáv vibrácií, neskôr sa po prevedení testov hodnoty ešte upravovali. Nakoľko sa jedná o plynú tvarovú dutinu, bolo potrebné využitie funkcie „obrábanie medzi vrstvami“ s vertikálnym krokom 1 mm, vďaka čomu došlo k dohrubovaniu dutiny po horizontálnych vrstvách so vzájomným odsadením 1 mm a tak k dosiahnutiu tvaru, ktorý sa približoval výslednému tvaru dutiny.

VoluMill bol tiež zvolený pre zrazenie hrany na obvode súčasti (op. 3). Tentokrát bola hodnota obrábania medzi vrstvami nastavená na vertikálny krok 0,5 mm a prídavok pre dokončovanie na 0,3 mm. Jedná sa o nefunkčnú plochu, snahou je obrobit' ju iba na dve operácie. Nasleduje dohrubovanie dutiny špirálou (op. 4), ktorého cieľom bolo zmenšiť vysoký prídavok z predošlej operácie z 0,8 na 0,3 mm s použitím toroidnej frézy. Pri op. 5 sa už prechádza na použitie guľovej frézy o priemere 8 mm na rovnaký prídavok 0,3 mm za účelom odstránenia najväčších schodov vzniknutých pri použití toroidnej frézy s rohovým rádiusom R1 mm.

Priechodzí otvor pre vtok bol vyfrézovaný pri predošlom upnutí. Drážka nadväzujúca na tento otvor a smerujúca k vstrekovacej dutine (obr. 28), nie je funkčnou plochou a slúži len pre prívod natlakovaného plastu, preto na jej presnosť, na rozdiel od priechodzej diery, nie sú kladené vysoké nároky. Drážka je vyhrubovaná a následne dokončená špirálou (op. 6) za použitia guľovej frézy a neskôr dokončená podľa limitného uhlu (op. 13). Ostatné diery a zahĺbenia viditeľné na modeli na obr. 28 sa už momentálne nepoužívajú, preto ich výroba nebude do programu zahrnutá.

Po hrubovacích operáciach, vykonaných na oboch stranách vložky, sa všetkých 6 strán vložky prebrúsi (op. 7). Cieľom je zaručenie kolmosti plôch a eliminácia deformácií (skrútenia) vzniknutých uvoľnením vnútorných napätí pri hrubovaní. Po brúsení sa pokračuje s dokončovacími operáciami pri oboch stranách.

Preddokončenie dutiny frézou o priemere 6 mm (op. 8) na prídavok 0,2 mm má za úlohu zlepšiť integritu plôch a pripraviť ich tak na dokončovanie. Je tu nastavený variabilný bočný krok v rozmedzí 0,2 až 2,4 mm. Rozostup dráh sa teda generuje v závislosti na tvare obrábaného povrchu.

Op. 9 a op. 10 sú dokončovacie operácie funkčných plôch guľovou frézou o priemere 6 mm. Obzvlášť pri op. 9, v ktorej sa dokončuje tvárniaca časť formy, sú nároky na integritu povrchu veľmi vysoké. Bol preto zvolený veľmi malý bočný krok (0,139 mm), ktorý zaručuje dosiahnutie požadovanej hodnoty parametru **Ra** 0,8  $\mu\text{m}$  pre danú plochu. Op. 9 pozostáva z frézovania ako tvárniacej časti, tak aj deliacich plôch podľa obr. 28 jednou stratégiou (dokončovanie podľa limitného uhlu). Na prechode týchto plôch sa nachádza ostrá hrana, naprieč ktorou vedú dráhy nástroja. Nástroj má pri prechode tendenciu túto hranu zraziť na rádius v rádoch stotín milimetra. Pre zachovanie ostrosti hrany bola na ňu použitá v Cimatrone funkcia „ostrá hrana“, ktorá dráhy prepočíta a upraví ich tak, aby k tomuto zrazeniu nedošlo.

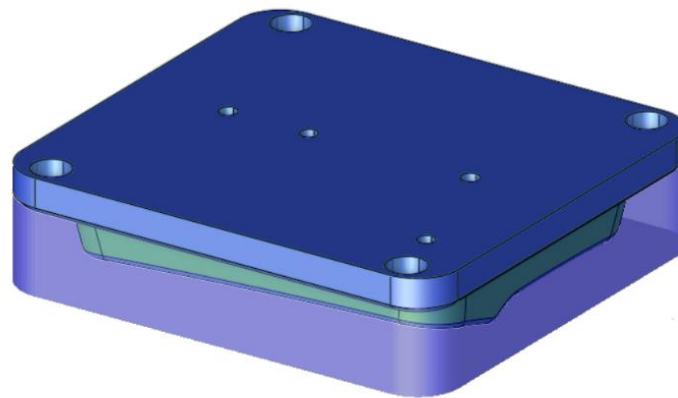
Hrana na obvode súčasti je dokončená guľovou frézou o priemere 8 mm (op. 11). Použitá stratégia sa v Cimatrone nazýva „Finish Mill All“ a v podstate sa jedná o dokončovanie 3D kontúrovaním. Nasledujúca operácia slúži na odľahčenie nefunkčných plôch (op. 12). Podľa obr. 28 boli vytvorené dodatočné kontúry, ktoré ohraničovali ich oblasť a kde malo frézovanie prebehnúť na negatívny prídavok -0,2 mm. Cieľom bolo ušetriť čas pri obrábaní, keďže pri odľahčení už nie je potrebné hľadieť na presnosť a kvalitu povrchu.

Op. 14 a op. 15 sa venujú dočisteniu rohov dutiny. Roh o rádiuse R3,5 sa síce radí medzi nefunkčné plochy súčasti, ale po predošlých operáciach v ňom ostal prebytok materiálu nepekného tvaru (podobný otrepu) a vzhľadom na krátky čas operácie bolo toto dočistenie (op. 14) pôvodne zaradené do programu. Plochy o rádiuse R2 v tvarovej časti sú najproblematickejšou oblasťou celej súčasti. Po použití frézy o priemere 6 mm pri dokončovaní (op. 9) tu ostane zbytkový materiál, ktorý je potrebné dodatočne odstrániť frézou o priemere 4 mm za použitia jednej zo stratégií zbytkového obrábania (op. 15). Táto oblasť je riziková z hľadiska náchylnosti k vzniku stôp po nástroji na obrábanom povrchu kvôli vibráciám nástroja. Ryhy o hĺbke 0,03 mm a viac už sa nedajú vyleštiť a znamenajú znehodnotenie súčasti. Ďalšou obavou je vznik viditeľného prechodu medzi pôvodne dokončovanou plochou

a dočísťovaným rohom z dôvodu použitia nového, studeného nástroja v porovnaní s predošlým nástrojom. Tepelné dilatácie tu môžu spôsobiť nepresnosti, ktoré by taktiež viedli k úplnému znehodnoteniu súčasti. Možnosťou, akou sa tomuto scenáru možno vyhnúť, je previesť celé dokončovanie tvárniacej dutiny jednou frézou o priemere 4 mm. Obidve tieto alternatívy boli neskôr odskúšané a vyhodnotené.

### 3.1.2 Voľba stratégií pre chladiacu súčasť

V prípade chladiacej súčasti sa frézovanie začína na jednoduchšej strane a pozostáva zo zarovnania čela stratégiou VoluMill, frézovania zahĺbení a vrtania dier pre štyri imbusové skrutky, vrtania dvoch priechodzích dier pre tok chladiacej kvapaliny a dvoch dier pre závitové tyče. Príslušná strana súčasti je zobrazená na obr. 29 s čiastočne priesvitným polotovarom.



Obr. 29 Prvá strana súčasti chladienia.

Všetky diery boli vrtané hlbokým vrtaním. Zahĺbenia pre hlavy imbusových skrutiek boli frézované stratégiou profilu po špirále, nakoľko VoluMill pre takúto malú kapsu nefungoval správne a zanechával množstvo zbytkového materiálu. Rezné podmienky ale boli zachované, nakoľko sa, v tomto konkrétnom prípade, jedná o tú istú dráhu. Stále platí, že pri zanáraní do materiálu boli aplikované polovičné posuvové rýchlosti. Celý postup je zhrnutý v tab. 12.

Tab. 12 Súhrn navrhovaných operácií a príslušných stratégií pre prvú stranu chladiacej súčasti.

Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Toroidná fréza	Ø12	Zarovnanie čelnej plochy	VoluMill
2	Brúsenie čelnej plochy			
3	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie zahĺbení	Špirálový profil
4	Toroidná fréza	Ø12	Dokončenie zahĺbení	Špirálový profil
5	Vrták	Ø11	Vrtanie dier pre skrutky	Hlboké vrtanie
6	Vrták	Ø8	Vrtanie dier pre tok kvapaliny	Hlboké vrtanie
7	Vrták	Ø8,5	Vrtanie dier pre závitové tyče	Hlboké vrtanie

Strana súčasti s chladiacou drážkou (obr. 19, kap. 2.2.2.) sa zdá byť relatívne komplikovaná, ale tvorba programu pre ňu bola značne jednoduchšia než u tvarovej vložky, vzhľadom na nízke nároky na kvalitu povrchu tvarovej časti. Program bol stavaný na základe požiadaviek na presnosť dosadacej plochy a centrovacích plôch. Zložitý tvar plochy s chladiacou špirálou nebol obrábaný komplexne jednou stratégiou. Aby sa predišlo riziku chybných výpočtov dráhy, súčasť bola najskôr vyhrubovaná a dokončená, pričom drážka pre tok kvapaliny bola v softvéri zaslepená. Táto drážka sa hrubovala a dokončovala na konci procesu samostatne za využitia guľových fréz o priemere 8 a 6 mm. Postup jednotlivých operácií možno opäť vidieť v tab. 13.



Tab. 13 Súhrn navrhovaných operácií a príslušných stratégií pre druhú stranu chladiacej súčasti.

Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie modelu	VoluMill
2	Guľová fréza	Ø8	Dohrubovanie modelu	Špirála
3	Toroidná fréza	Ø12	Dokonč. horizont. dosadacej plochy	VoluMill
4	Toroidná fréza	Ø12	Dokončenie centrovacích plôch	Podľa limit. uhlu
5	Guľová fréza	Ø8	Dokončenie tvarovej plochy	Podľa limit. uhlu
6	Guľová fréza	Ø8	Dokončenie zrazenej hrany	FinishAll
7	Guľová fréza	Ø8	Hrubovanie drážky	Špirála
8	Guľová fréza	Ø6	Dohrubovanie drážky	Špirála
9	Guľová fréza	Ø6	Dokončenie drážky	Podľa limit. uhlu

### 3.1.3 Určenie rezných podmienok

Pri určení rezných podmienok pre testovanie sa vychádzalo z niekoľkých zdrojov. V prvom rade bolo potrebné určiť podmienky pre hrubovacíu stratégiu VoluMill. Nakoľko sa VoluMill radí medzi menej známe stratégie a použitím parametrov sa silno vymyká konvenčným spôsobom hrubovania, určenie počiatkových podmienok nie je úplne jednoznačné. Na základe všeobecných odporúčaní zdroja [36] boli teoreticky určené predbežné podmienky, ktoré sa neskôr upravovali vzhľadom na výsledky skúmania opotrebenia frézy pri odobraní určitého objemu materiálu. Tieto predbežné rezné podmienky pre hrubovanie stratégiou VoluMill sú teda nasledovné:

- $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- $v_f = 3 \text{ 100 mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- $a_p = 24 \text{ mm}$ ,
- $a_e = 0,84 \text{ mm}$ .

Pri určení podmienok pre dohrubovanie, preddokončovanie, dokončovanie a dočistenie rohov guľovými frézami sa vychádzalo z odporúčaných rezných podmienok pre frézy od PM-TECH. Tento dokument je voľne dostupný na ich stránkach a pre daný nástroj vždy obsahuje dve varianty odporúčaných podmienok; pre vysokú trvanlivosť a pre vysoký výkon. Pre účely tejto práce boli volené podmienky pre vysoký výkon a boli mierne upravované vzhľadom na konkrétny nástroj, nakoľko dokument neobsahoval podmienky pre všetky presné typy nástrojov použitých v tejto práci. Vzhľadom na počet nástrojov a stratégií použitých pri obrábaní súčasti formy a súčasti pre chladienie tu nebudú menované rezné podmienky (a ich varianty) pre všetky operácie osobitne. Podmienky pre guľové frézy sa totiž mierne líšia s ohľadom na danú operáciu. Zvyčajne sa však pohybovali okolo hodnôt uvedených v tab. 14. Finálne podmienky pre výrobu tvarovej vložky možno nájsť v prílohe č. 7.

Tab. 14 Približné rezné podmienky použité pri operáciách s guľovými frézami.

D [mm]	$v_f$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]
8	1 550	126
6	1 600	128
4	1 200	114

## 3.2 Metodika prevedených experimentov

Všetky testy prebiehali v nástrojári firmy ITW PRONOVIA za rovnakých podmienok, pri akých neskôr prebehla realizácia výroby samotných súčastí. To značí rovnaký obrábaný materiál, stroj, nástroje, spôsob upnutia nástrojov a obrobku atď. Prístup k jednotlivým



experimentom sa líši vzhľadom na ich jednotlivé ciele. Testovanie možno rozdeliť na tri základné kroky:

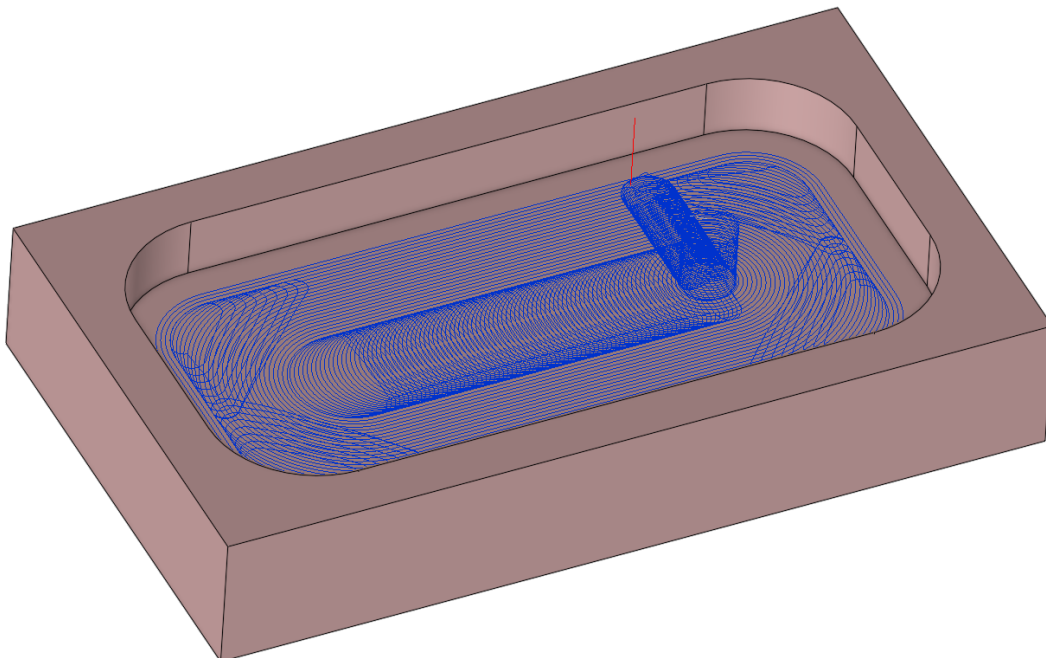
- testovanie hrubovacích operácií,
- testovanie dokončovacích operácií,
- finálny (súhrnný) test.

Cieľom testovania hrubovacích operácií bolo predovšetkým nájsť vhodnú geometriu nástroja pre VoluMill, ktorá by dokázala previesť obrábanie za vysokých rezných podmienok určených v predošlej kapitole. Pri dokončovaní sa testovali rôzne priemery guľových fréz, rezné podmienky a prídavky, pričom sa najviac prihliadalo na kvalitu povrchu.

Finálne testovanie sa uskutočnilo na jednej konečnej vzorke, ktorá sa svojim tvarom veľmi podobala finálnej súčasti. Na vzorke sa obrábala iba najproblematickejšia časť, teda pohľadová strana tvarovej vložky formy. Boli tu aplikované stratégie, nástroje a rezné podmienky stanovené pri predošlých testoch. Zmyslom tohto testu bolo odskúšať celý proces v jeho integrite a na autentickom modeli ešte predtým, než sa spustí výroba samotnej vložky formy. Všetky testovania a zistené výsledky sú popísané v nasledujúcich kapitolách.

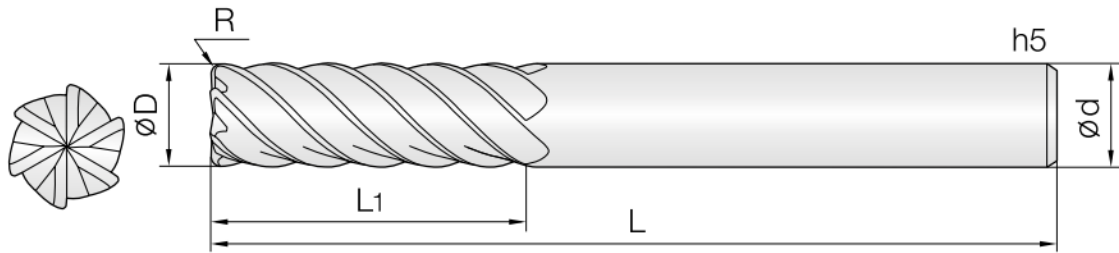
### 3.2.1 Testovanie hrubovacích operácií

Hrubovanie prebehlo na jednoduchej vzorke tvaru kvádra o veľkosti 160×91×27 mm. Vzorke má dve zahĺbenia o hĺbke 10 mm (jedno zhora, jedno zdola). Obe zahĺbenia boli frézované stratégiou VoluMill a na každé z nich bola použitá iná fréza o priemere 12 mm. VoluMill počínal zanorením do materiálu po špirále pod uhlom 1°, počas ktorého bola posuvová rýchlosť znížená na 50 %. Chladenie a odvod triesok boli zabezpečené vzduchom. Vzorku i s dráhou nástroja je možné vidieť na obr. 30.



Obr. 30 Skúšobná vzorka pre testovanie hrubovania.

Ako prvá bola použitá toroidná fréza zo spekaných karbidov o priemere 12 mm, určená pre frézovanie kalených ocelí do 68 HRC (ďalej označovaná ako fréza č. 1). Fréza č. 1 má 6 britov, uhol sklonu skrutkovice 45° a je na nej aplikovaný PVD povlak TiSiN-S. Schéma frézy sa nachádza na obr. 31 a príslušné zakótované parametre v tab. 15.



Obr. 31 Fréza č. 1 [33].

Tab. 15 Popis parametrov toroidnej frézy č. 1 [33].

Parameter	ØD	R	L <sub>1</sub>	L	Ød	Firemné označenie
Hodnota [mm]	12	1	30	80	12	6JJCRL-120-010-080

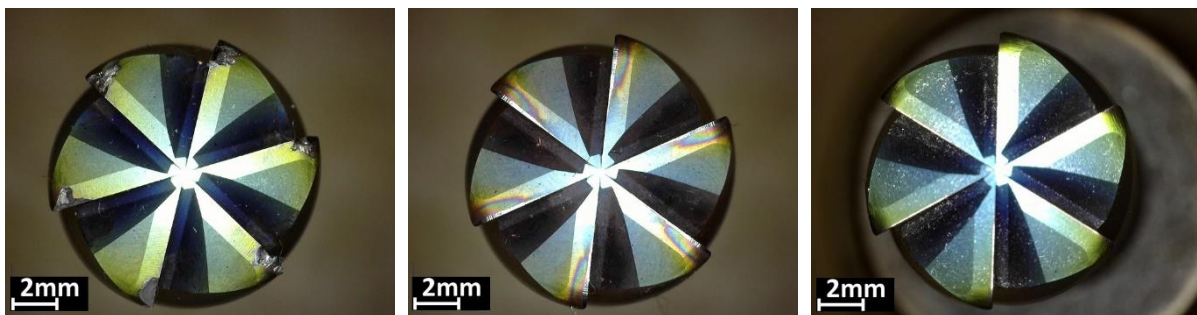
Fréza č. 1 bola zvolená pre testovanie vďaka jej tuhšej konštrukcii a dlhej reznej časti. Ďalším opodstatnením tohto výberu bol vyšší počet britov frézy. Vo všeobecnosti sa odporúča vykonávať VoluMill s frézami o 5 a viacerých britoch, nakoľko vyšší počet britov umožňuje dosiahnuť vyššie posuvy. Fréza bola odskúšaná za podmienok, ktoré sú uvedené v tab. 16.

Tab. 16 Rezné podmienky pre testy frézy č. 1.

Podmienky	a <sub>p</sub> [mm]	a <sub>e</sub> [mm]	v <sub>f</sub> [mm.min <sup>-1</sup> ]	v <sub>c</sub> [m.min <sup>-1</sup> ]
Test č. 1	10	0,84	3 100	250
Test č. 2	10	0,40	2 300	124
Test č. 3	10	0,35	2 000	106

Test č. 1 prebiehal za podmienok určených v kap. 3.1.3, jediným rozdielnym parametrom bola hĺbka rezu a<sub>p</sub>, prispôbená hĺbke kapsy na skúšobnej vzorke. Okamžite po začiatku frézovania došlo k ulomeniu všetkých britov frézy (obr. 32 a)) a k viditeľnému prehriatiu obrobku v miestach rezu. Už po prvom teste bolo teda jasné, že geometria tejto frézy nie je vhodná pre danú aplikáciu. Boli však spustené ďalšie dva testy, kvôli zisteniu (približných) limitných podmienok nástroja pre vyfrézovanie zahĺbenia.

V teste č. 2 boli nároky na základe výsledku testu č. 1 značne znížené. Napriek tomu došlo opäť k prehriatiu a ešte počas zanárania nástroja do obrobku bol spálený povlak v okolí ostria (obr. 32 b)). Preto boli rezné podmienky opätovne znížené pre test č. 3, ktorý už prebehol kompletne a po dokončení testu bolo vidieť len ľahké opotrebenie v oblasti reznej hrany (obr. 32 c)). Súdiac podľa tohto opotrebenia, hoci relatívne nízkeho, pre obrobenie celej strany súčasti formy jedným nástrojom by bolo potrebné zvýšiť životnosť nástroja a teda podmienky opäť znížiť. To by viedlo k príliš vysokým obrábacím časom a lepšou možnosťou bolo odskúšanie inej geometrie nástroja.



a) Test č. 1

b) Test č. 2

c) Test č. 3

Obr. 32 Stav opotrebenia frézy č. 1 po testoch.

Po výsledkoch testov frézy č. 1 možno konštatovať nevhodnosť tohto nástroja pre stratégiu VoluMill. Počas rezného procesu nedochádzalo k žiaducemu odvodu tepla do triesok. Hlavnou príčinou bola geometria nástroja, ktorá nezabezpečovala dostatočne rýchly a plynulý odvod triesky. Pravdepodobne sa jednalo o nasledujúce prvky geometrie:

- príliš malý rozstup medzi jednotlivými britmi frézy,
- príliš veľký uhol skrutkovice,
- tvar geometrie v oblasti osi nástroja, ktorý neumožňuje odchod triesky skrz stred.

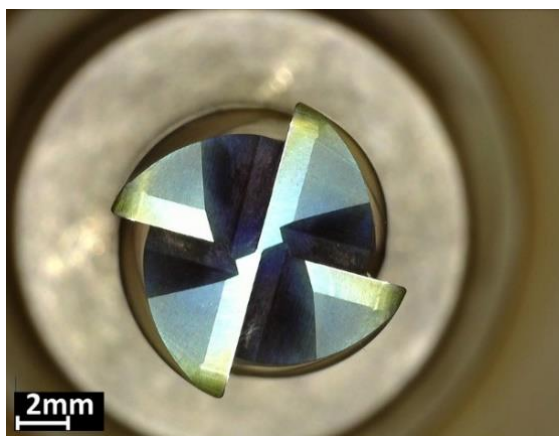
Na základe týchto poznatkov bola zvolená fréza, ktorá bola používaná v predošlom technologickom postupe pri konvenčnom hrubovaní (ďalej označovaná ako fréza č. 2). Jedná sa o toroidnú frézu pre rebrovanie s podbrúsením cez stred (obr. 23, kap. 2.3.2). Táto fréza taktiež podstúpila test za pôvodných, odporúčaných podmienok zhodných s podmienkami testu č. 1.

Ďalšou možnou príčinou problémov bolo nedostatočné chladenie. Ešte pred odskúšaním frézy č. 2 prebehla úprava trysky pre prívod vzduchu z chladiaceho systému, pri ktorej sa prevrtaním zväčšil otvor na konci trysky. Upravená bola tiež jej pozícia. Pôvodne bol vzduch smerovaný do rezu pod uhlom približne  $70^\circ$  k rovine stolu frézky, tento bol zväčšený na približne  $85^\circ$  pre lepší dosah do vnútra frézovaného zahĺbenia.

Po prevedení zmien prebehol test frézy č. 2 úspešne pre vopred stanovené odporúčané podmienky:

- $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- $v_f = 3 \text{ 100 mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- $a_p = 10 \text{ mm}$ ,
- $a_e = 0,84 \text{ mm}$ .

Hĺbka rezu je v tomto prípade limitovaná dĺžkou reznej časti a bude ponechaná na hodnotu  $a_p = 10 \text{ mm}$  po zvyšok testovania, i pri realizácii výroby súčastí formy. Detail frézy č. 2 po testovaní je možno vidieť na obr. 33. Na fréze takmer nie je poznať známky opotrebenia. Ďalším faktorom naznačujúcim správny prenos tepla pri obrábacom procese je modrá farba triesky na obr. 34 vysvetlená veľkým tepelným ovplyvnením. Bol teda uskutočnený iba jeden test a fréza č. 2 bola označená ako vhodná pre použitie pri stratégii VoluMill.



Obr. 33 Fréza č. 2 po teste.



Obr. 34 Trieska vyprodukovaná pri testovaní frézy č. 2.

Ďalšou fázou v testovaní bolo navýšenie rezných podmienok na maximum, pričom ale objem na jednej strane súčasti musel byť bezpečne odobratý jedným nástrojom. V charakteristike

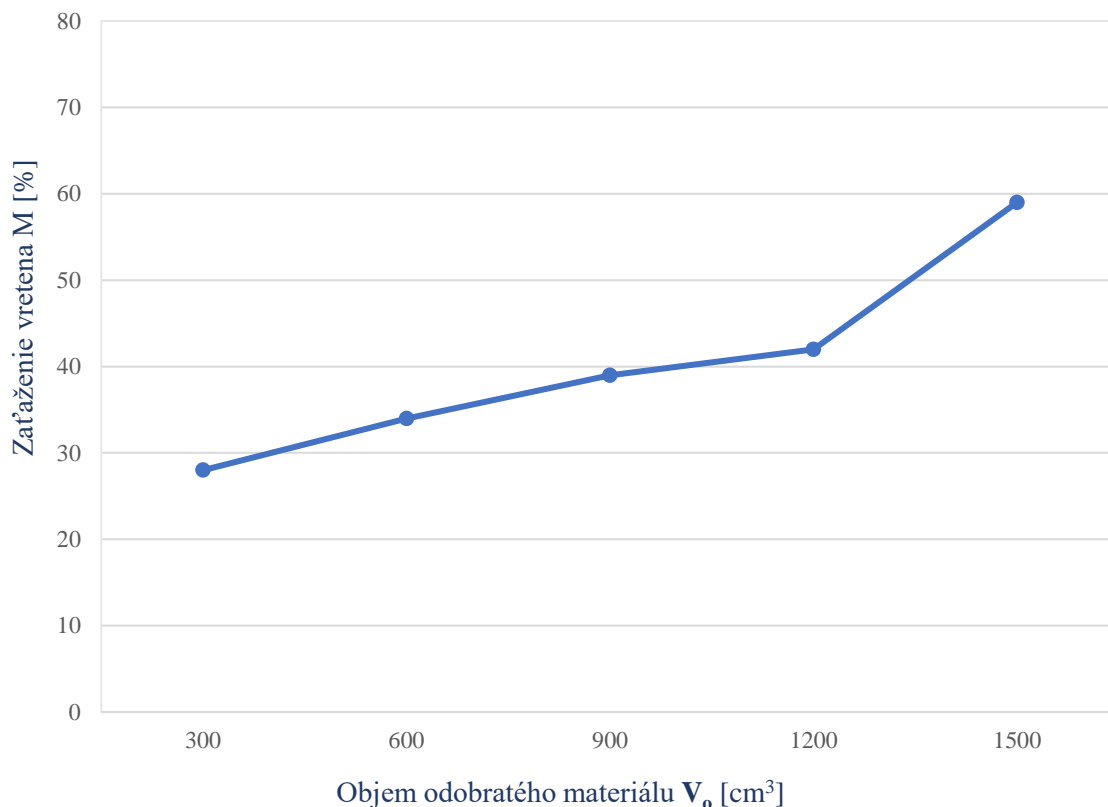
tvarevej vložky formy bolo uvedené, že objem dutiny na strane chladenia zodpovedá približne hodnote  $1\,433\text{ cm}^3$ . To je najväčší objem potrebný na odobratie jedným nástrojom (pri zanedbaní prídavkov). V softvéri Catia V5 bol opäť vytvorený model skúšobnej vzorky, tentokrát však bola vzorka väčšia a objem odobratého materiálu bol rovný  $1\,500\text{ cm}^3$ .

Test trvanlivosti prebiehal za použitia frézy č. 2, pričom bol pravidelne prerušený pri každom prekročení hranice odobratého materiálu o objeme  $300\text{ cm}^3$ . Pred prerušením cyklu bola odčítaná hodnota momentového zaťaženia vretena  $M$ . Výška tejto hodnoty naznačuje veľkosť radiálnych rezných síl, ktoré úmerne rastú s opotrebením nástroja. Momentové zaťaženie vretena sa udáva v percentách vzhľadom na menovitý točivý moment, ktorý je v prípade stroja HSC 300 rovný hodnote  $6,5\text{ N.m}$ .

Skúška trvanlivosti prebehla celkovo až trikrát, prvýkrát za vopred stanovených rezných podmienok (podmienky z testu č. 1). Ďalšia skúška prebehla rovnakým spôsobom, ale rezná a posuvová rýchlosť boli navýšené o  $10\%$ . Po prevedení tejto skúšky ešte stále existoval priestor na navýšenie podmienok (opotrebenie nástroja nebolo vysoké), takže došlo k navýšeniu o ďalších  $10\%$ . To viedlo k získaniu konečných rezných podmienok pre stratégiu VoluMill použitých pri výrobe samotných súčastí:

- $v_c = 308\text{ m.min}^{-1}$ ,
- $v_f = 3\,816\text{ mm.min}^{-1}$ ,
- $a_p = 10\text{ mm}$ ,
- $a_e = 0,84\text{ mm}$ .



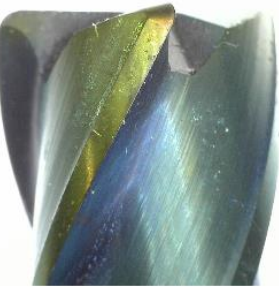
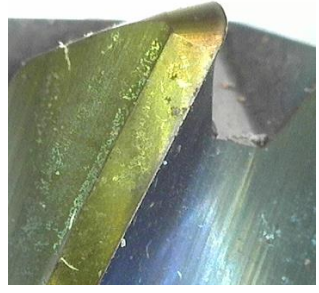
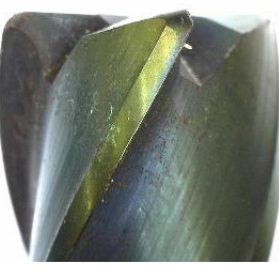


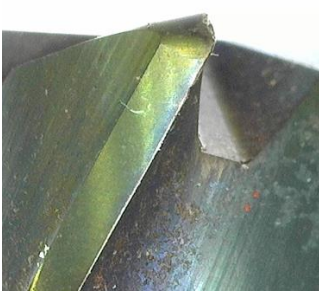
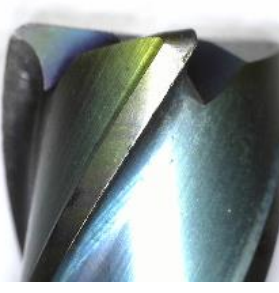
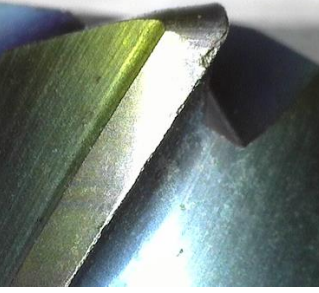
Priebeh opotrebenia frézy počas obrábania za týchto rezných podmienok aj s percentuálnym vyjadrením zaťaženia vretena je popísaný v tab. 17. na obr. 35 možno vidieť graf závislosti momentového zaťaženia vretena na množstve odobratého materiálu (opotrebení nástroja).



Obr. 35 Závislosť momentového zaťaženia vretena na objeme odobratého materiálu.

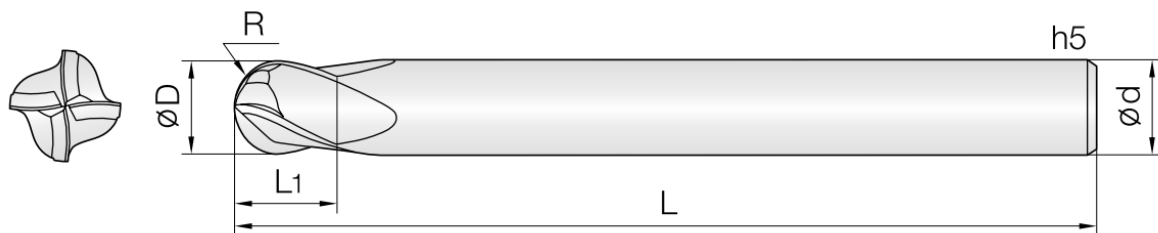


Tab. 17 Priebeh opotrebenia frézy v závislosti na objeme odobratého materiálu pri konečných rezných podmienkach.

1. prerušenie	Detail	$V_0$ [cm <sup>3</sup> ]	M [N.m]
		300	28 %
		Takmer nulové opotrebenie frézy.	
2. prerušenie	Detail	$V_0$ [cm <sup>3</sup> ]	M [N.m]
		600	34 %
		Strata povlaku na brite.	
3. prerušenie	Detail	$V_0$ [cm <sup>3</sup> ]	M [N.m]
		900	39 %
		Strata povlaku na brite a začínajúce opotrebenie bitu.	
4. prerušenie	Detail	$V_0$ [cm <sup>3</sup> ]	M [N.m]
		1 200	42 %
		Strata povlaku na brite a mierne opotrebenie bitu.	
5. prerušenie	Detail	$V_0$ [cm <sup>3</sup> ]	M [N.m]
		1 500	59 %
		Silné opotrebenie bitu vrátane odštiepenia.	

Po testovaní hrubovania stratégiou VoluMill je ďalej možné konštatovať, že obrábanie touto stratégiou prinieslo dobré výsledky nielen v rámci úspory strojného času. Obrobený povrch dosiahol dobrú kvalitu a stratégia môže byť považovaná ako vhodná i pre dokončovacie operácie. Tento poznatok bol neskôr využitý pri dokončovaní horizontálnych plôch strany chladenia vložky formy. Taktiež je po výsledkoch testov zjavné, že pôvodne zamýšľaný prídavok po hrubovaní stratégiou VoluMill 0,8 mm môže byť znížený na menšiu hodnotu, čo povedie k ďalšej úspore času skrátením dohrubovacích operácií.

V tejto kapitole je, pre získanie kompletného prehľadu o nástrojovej sade, vhodné zmieniť tiež frézu použitú pre dohrubovanie modelu po stratégií VoluMill. Jedná sa o krátku guľovú frézu zo spekaných karbidov s PVD povlakom TiSiN-S (obr. 36). Parametre frézy sa nachádzajú v tab. 18.



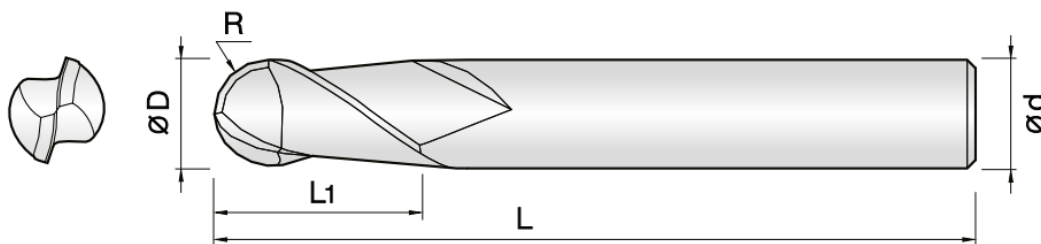
Obr. 36 Krátka, guľová fréza do 68 HRC od PM-TECH [33].

Tab. 18 Parametre krátkej, guľovej frézy od PM-TECH [33].

Parameter	ØD	R	L <sub>1</sub>	L	Ød	Firemné označenie
Hodnota [mm]	8	4	8	60	8	4JJSB-080-080-S08

### 3.2.2 Testovanie dokončovacích operácií

Konkrétne typy fréz pre dokončovanie boli zvolené ešte pred začiatkom testovania a v priebehu testovania sa nemenili. Bolo potrebné vybrať guľové frézy pre priemery 6 a 4 mm. Obidve zvolené frézy sú opäť karbidové, s PVD povlakom TiSiN-S a sú určené pre použitie na kalené ocele do 68 HRC. Frézu priemeru 6 mm je vidieť na obr. 37 a jej parametre v tab. 19.



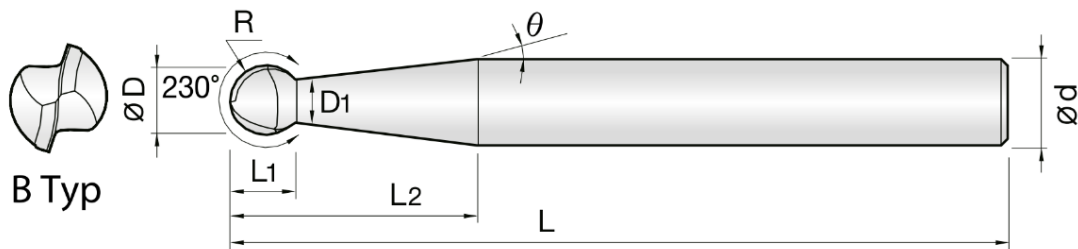
Obr. 37 Krátka, guľová fréza do 68 HRC od PM-TECH [33].

Tab. 19 Parametre krátkej, guľovej frézy od PM-TECH [33].

Parameter	ØD	R	L <sub>1</sub>	L	Ød	Firemné označenie
Hodnota [mm]	6	3	6	50	6	2JJSB-060-060-050

Fréza priemeru 4 mm sa v počiatočnom návrhu postupu využíva výlučne na dočistenie rohov. Podobne, ako pri fréze na obr. 37, aj tu boli zvolené dva brity. Dôvodom je snaha minimalizovať rezné sily a tým i riziko vzniku vibrácií [5]. Fréza pre dočistenie rohov je zobrazená na obr. 38 a jej parametre sa nachádzajú v tab. 20.





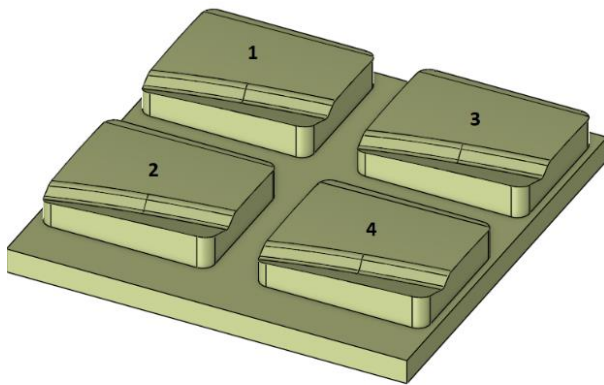
Obr. 38 Gul'ová fréza s 230-stupňovým rádiusom do 68 HRC od PM-TECH [33].

Tab. 20 Parametre gul'ovej frézy s 230-stupňovým rádiusom od PM-TECH [33].

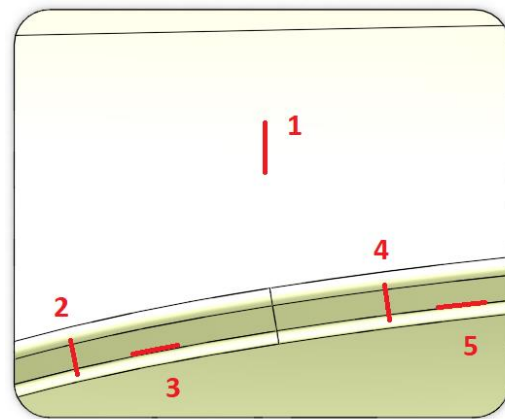
Parameter	ØD	R	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L	Ød	θ	Firemné označenie
Hodnota [mm]	4	2	2,8	25	80	6	3°	2JJSP-040-030-250

Dokončovanie sa testovalo na štyroch vzorkách, ktoré mali negatívny tvar vstrekovacej dutiny a všetky štyri boli súčasťou jednej skúšobnej dosky o rozmeroch 162×162×27 mm. Skúšobnú dosku i s označením jednotlivých vzoriek je vidieť na obr. 39. Model skúšobnej dosky bol vytvorený v CAD systéme Catia V5 tak, že tvar vzoriek zodpovedá tvaru klapky nádrže a obsahuje všetky tvary a rádiusy potrebné pre testovanie. Model bol navrhnutý spôsobom, aby umožňoval rýchlejšie obrobenie a lepší prístup nástroja k obrábanej ploche, než by tomu bolo u frézovania dutiny.

Hlavným kritériom pre hodnotenie testu bola integrita povrchu; na vzorke sa nesmeli nachádzať žiadne ryhy po nástroji a musela byť dosiahnutá požadovaná priemerná aritmetická odchýlka profilu **Ra** 0,8 µm vo všetkých miestach merania. Kvalita povrchu bola meraná za použitia drsnomeru MarSurf M 400 a vyhodnotená na základe parametra **Ra**. Každá vzorka bola meraná v piatich miestach, ktoré sú vyznačené na obr. 40. Z množiny možných riešení pre podmienky dokončovania boli zvolené podmienky s najlepšimi výsledkami na základe ich vzájomného porovnania.



Obr. 39 Skúšobné vzorky pre dokončovanie.



Obr. 40 Pozície prejazdu drsnomeru.

Najrizikovejšou operáciou pri dokončovaní je frézovanie vnútorného rádiusu R2 gul'ovou frézou o priemere 4 mm. V prípade skúšobných vzoriek sa tento rádius nachádza v oblasti pozícií merania 3 a 5 na obr. 40. Ako bolo spomenuté pri voľbe dokončovacích stratégií, problematiku obrábania tohto rádiusu možno riešiť dvomi spôsobmi. Obidve možné alternatívy tu boli odskúšané:

- dokončenie výstupku s frézou Ø D6 a dočistenie rohu s frézou Ø D4 (vzorky č. 1 a č. 2),
- dokončenie celého výstupku s frézou Ø D4 (vzorky č. 3 a č. 4).

Okrem zmeny priemeru nástroja sa vzorky líšili i v prídavkoch na dokončovanie ( $p_a$ ) a v rezných podmienkach. Podmienky obrábania každej zo vzoriek sú zhrnuté v tab. 21.

Tab. 21 Podmienky aplikované pri dokončovaní skúšobných vzoriek.

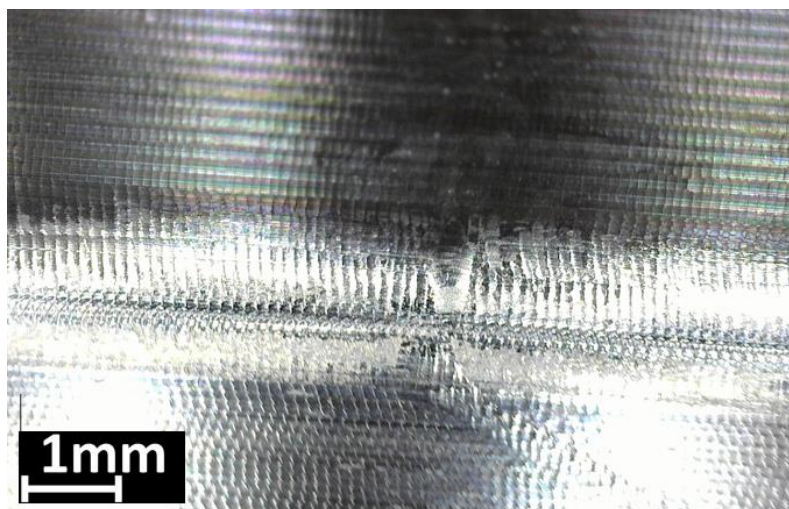
Č. vzorky	$p_a$ [mm]	$\varnothing D$ [mm]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]	$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [mm.min <sup>-1</sup> ]
1	0,200	D4 + D6	0,200	0,139	128	1 650
2	0,100	D4 + D6	0,139	0,139	128	1 650
3	0,200	D4	0,113	0,113	114	1 310
4	0,100	D4	0,113	0,113	114	1 310

V tab. 22 sa nachádzajú výsledky meraní parametru  $R_a$  pre každú zo štyroch vzoriek (protokol merania možno nájsť v prílohe č. 3). Hraničná hodnota  $R_a$  0,8  $\mu\text{m}$  bola prekročená pri meraní na pozícii č. 1, vzorka č. 2. Tento výsledok je prekvapivý, nakoľko podmienky pre testy vzorky č. 1 a vzorky č. 2 sa líšia iba v prídavku na dokončovanie, pričom tento prídavok bol nižší v prípade obrábania vzorky, ktorá podmienku pre parameter  $R_a$  nesplnila. Pravdepodobne je to zapríčinené meraním v inom mieste vzorky, na ktorom sa uhol sklonu danej plochy mierne líši od sklonu plochy meranej pri vzorke č. 1. Pre získanie hodnovernejších výsledkov by bolo potrebné uskutočniť väčší počet meraní, no na základe týchto výsledkov boli podmienky uplatnené pre vzorku č. 2 vyradené z množiny možných riešení.

Tab. 22 Výsledky meraní priemernej aritmetickej odchýlky profilu  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ].

Pozícia č.	1	2	3	4	5	$\overline{R_a}$
Vzorka č.						
1	0,78	0,42	0,60	0,59	0,43	0,564
2	0,99	0,55	0,42	0,54	0,57	0,614
3	0,68	0,40	0,51	0,63	0,63	0,570
4	0,56	0,60	0,34	0,69	0,38	0,514

Z výsledkov meraní na jednotlivých pozíciách bola tiež vypočítaná priemerná hodnota parametra  $R_a$  pre každú vzorku. Možno konštatovať, že priemerne najlepšie výsledky kvality povrchu dosiahla vzorka č. 4. U tejto vzorky boli pri optickej kontrole viditeľné ryhy po nástroji v oblasti problematického rádiusu (obr. 41) spôsobené vibráciami. Tieto stopy sa objavili v rovnakých miestach aj u vzorky č. 3, čo naznačuje nevhodnú kombináciu stratégie a nástrojov. Z tohto dôvodu boli pre finálny návrh zvolené podmienky vzorky č. 1, nakoľko ako jediné splnili požiadavky na kvalitu povrchu.

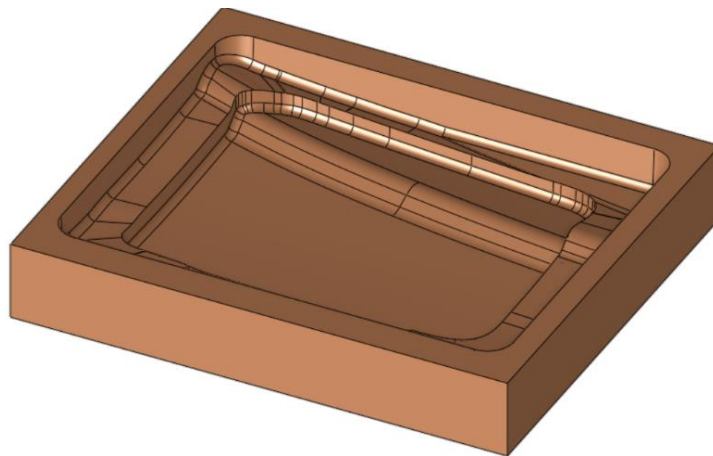


Obr. 41 Stopa po zavibrovaní frézy v oblasti rádiusu R2 mm.

Podľa výsledkov testov je možné zhodnotiť, že operácia zbytkového obrábania nemá negatívny vplyv na kvalitu povrchu pri frézovaní rádiusu R2 mm a môže byť použitá v programe finálneho návrhu.

### 3.2.3 Finálny test

Tento test slúžil na preverenie postupu frézovania pohľadovej strany tvarovej súčasti formy v jeho celkovej integrite. Boli tu aplikované stratégie, nástroje, rezné podmienky a ďalšie poznatky, ktoré boli zistené v predošlých experimentoch a softvérových simuláciách. Test bol spustený na skúšobnej vzorke o rozmeroch 160×160×40 mm. Model vzorky (obr. 42) bol taktiež vytvorený v modelovacom programe Catia V5. Východiskom bol pôvodný 3D model tvarovej vložky vo formáte \*.step, ktorý bol prevedený na plošný, následne upravený na požadovaný tvar a rozmery a potom prevedený späť na objemový model. V porovnaní so skutočnou súčastou je teda skúšobná vzorka tvarovo podobná, ale rozmerovo niekoľkonásobne menšia. Veľkosť rádiusu R2 mm ostala i tu zachovaná.



Obr. 42 Model vzorky pre finálny test.

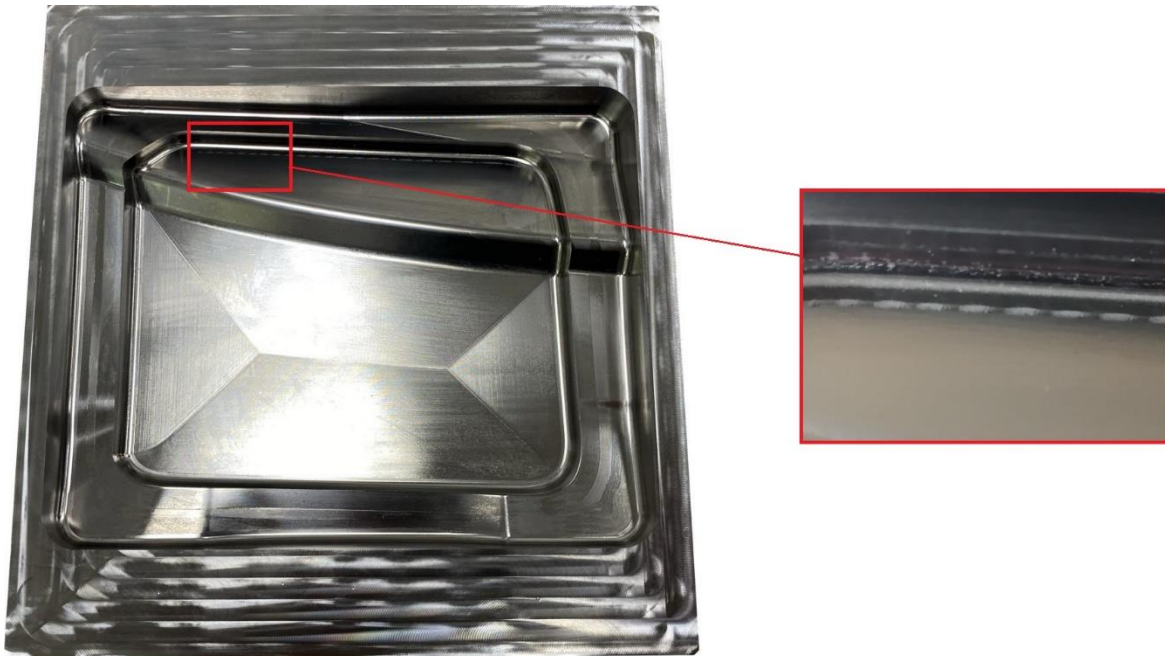
Test odhalil chybu pri dohrubovacej operácii toroidnou frézou (op. 4, tab. 11). Stratégia špirála sa ukázala ako nevhodná pre tento konkrétny tvarový povrch. Nástroj v určitej oblasti nachádzal do plného materiálu, čím došlo k jeho preťaženiu a prehriatiu. Táto chyba nebola počas simulovania v Cimatrone postrehnutá (ani autorkou, ani funkciou detekcie kolízií). Viditeľne bol tepelne ovplyvnený aj obrobok. Program bol po zistení chyby prerušený a skúšobná vzorka bola dohrubovaná guľovou frézou. Na obr. 43 možno vidieť fotku vzorky po dohrubovaní guľovou frézou s detailom na miesta vjazdu frézy do plného materiálu.



Obr. 43 Stopy na povrchu vzorky po nájazdoch frézy do plného materiálu.

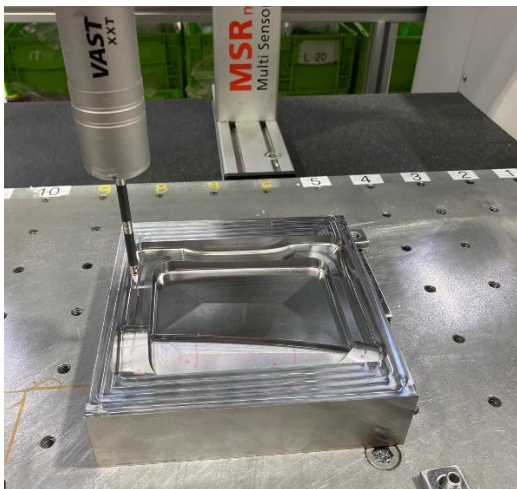


Okrem vyššie zmienenej chyby pri teste nenastali žiadne ďalšie komplikácie. Po dokončení programu bolo na hotovom obrobku vidieť v oblasti rádiusu R2 mm stopy po nástroji (obr. 44). Po bližšom skúmaní simulácie v Cimatrone vysvitlo, že tieto drobné ryhy vznikli ešte pri dokončovaní dutiny guľovou frézou o priemere 6 mm. Dôvod vzniku tejto chyby nie je jasný, ale pravdepodobne sa jedná o chybný výpočet softvéru (ryhy boli viditeľné i v simulácii pri analýze zbytkového materiálu). Vzniknutý problém bol neskôr odstránený odsadením hranice od kontúry ostrej hrany o 0,1 mm.

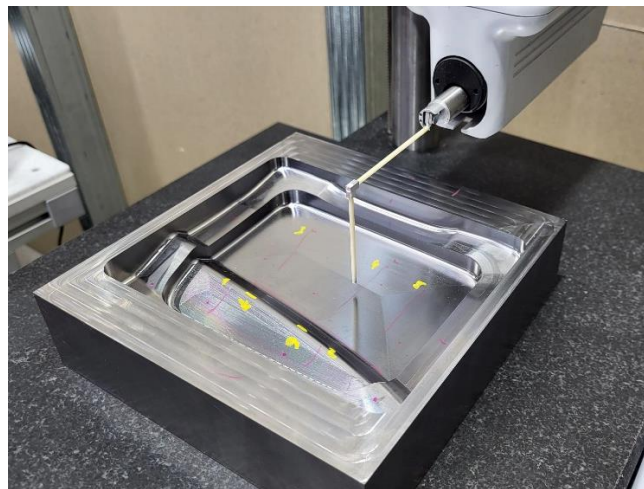


Obr. 44 Hotová finálna vzorka s detailom na stopy po guľovej fréze.

Finálna vzorka sa ďalej podrobila meraniam na 3D meracom prístroji a na drsnomeri. Meranie odchýlky geometrického tvaru potvrdilo odchýlku v rozsahu 0,00 až +0,03 mm pre všetky merané body (celkovo 42 bodov). Tieto výsledky sa nachádzajú v požadovanom tolerančnom intervale [-0,05; +0,05] mm. Merané boli plochy vstrekovacej dutiny, centrovacie i nefunkčné plochy obrobku. Protokol z merania sa nachádza v prílohe č. 4.

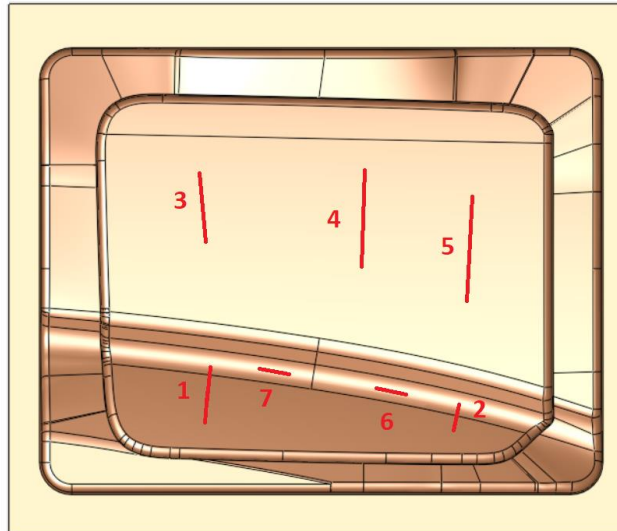


Obr. 45 Meranie geometrie finálnej vzorky.



Obr. 46 Meranie drsnosti finálnej vzorky.

Kvalita povrchu bola zisťovaná v 7 miestach finálnej vzorky, vyznačených na obr. 47. Okrem parametra **R<sub>a</sub>** bola nameraná aj najväčšia výška profilu **R<sub>z</sub>**. Výsledky merania pre všetkých 7 pozícií sú zhrnuté v tab. 23 a kompletný protokol možno nájsť v prílohe č. 5.



Obr. 47 Pozície prejazdu drsnomeru po finálnej vzorke.

Tab. 23 Výsledky meraní parametrov kvality povrchu Ra a Rz [ $\mu\text{m}$ ].

Pozícia č.	1	2	3	4	5	6	7
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,23	0,25	0,64	0,71	0,39	0,33	0,35
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,33	1,45	3,18	3,14	1,88	1,78	1,91

Žiadna z nameraných hodnôt **Ra** neprekračuje požiadavku  $0,8 \mu\text{m}$ . Podobne, ako pri výsledkoch testov dokončovacích operácií, aj tu sú najvyššie namerané hodnoty **Ra** v oblasti plôch s malým uhlom náklonu (pozície č. 3, 4, 5). To môže byť vysvetlené nízkou, až nulovou reznou rýchlosťou v osi guľovej frézy pri obrábaní týchto plôch. Nakoľko sa ale všetky namerané hodnoty nachádzajú v tolerancii, nie je potrebné tento jav riešiť.

Po prevedených meraniach možno zhodnotiť, že kvalita povrchu a geometrická a rozmerová presnosť obrobku spĺňajú požiadavky, čo značí, že nástroje a rezné podmienky sú správne nastavené. Test tiež odhalil celkovo dve procesné chyby. Jednou bola nesprávna voľba stratégie pre dohrubovanie a druhou nepatrný nájazd nástroja do materiálu obrobku pozdĺž okraja dutiny pri dokončovacej operácii.

### 3.3 Zmeny v programe vykonané na základe výsledkov testov

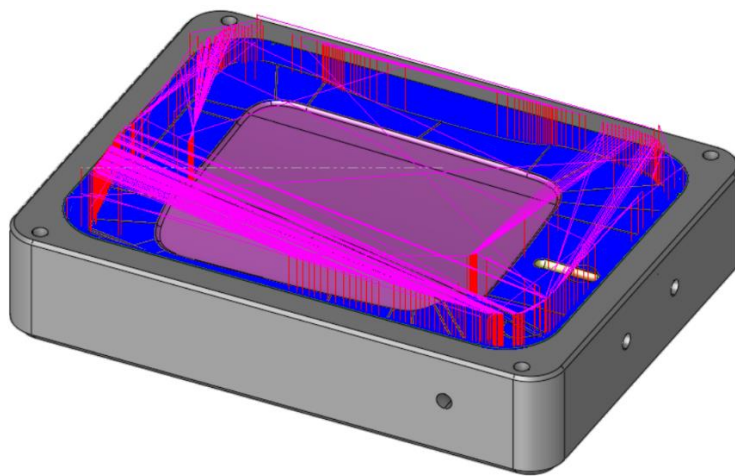
Ako prvý vznikol návrh programu pre obrábanie pohľadovej strany vložky formy. Tento slúžil ako podklad pre testovanie, obzvlášť pri finálnom teste na skúšobnom vzorku v kap. 3.2.3. Tvorba programov pre všetky zvyšné upnutia súčastí prebiehala počas a po prevedených experimentoch a získané výsledky v nich už boli odzrkadlené. Zmeny popísané na nasledujúcich riadkoch sa teda týkajú práve programu pre pohľadovú stranu vložky (tab. 11). Jedná sa o nasledovné zmeny:

- zníženie operačného prídavku po hrubovaní stratégiou VoluMill,
- odstránenie dohrubovacej operácie toroidnou frérou,
- odstránenie operácie pre odľahčenie nefunkčných plôch,
- odstránenie operácie pre čistenie rohu R3,5 mm,
- dokončenie deliacich, nefunkčných a centrovacích plôch v rámci jednej operácie,
- dokončenie tvárniacej časti (vstrekovacej dutiny) samostatne,
- odsadenie kontúry pri dokončovaní tvárniacej časti o 0,1 mm,

- zmena nastavenia výpočtu bodov dráhy pre čistenie rohu R2 mm.

Pri testovaní hrubovacích stratégií sa prídavok po hrubovaní 0,8 mm ukázal ako zbytočne vysoký. Bol znížený na hodnotu 0,35 mm, čo taktiež súvisí s nasledovnou zmenou odstránenia dohrubovacej operácie toroidnou frézou. Tá sa, mimochodom, aj tak ukázala ako nevhodná pri finálnom teste, kedy fréza pri špirálovom dohrubovaní nabiehala do plného materiálu (obr. 43).

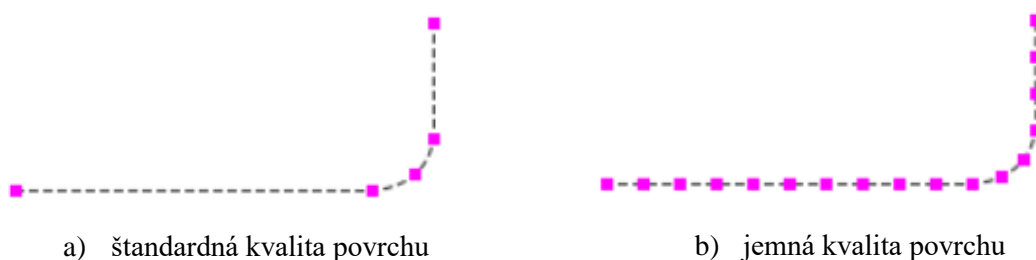
Prevedené zmeny v prídavkoch zapríčinili, že operácia pre odľahčenie nefunkčných plôch sa stala nevýhodnou, pretože by bolo potrebné odstrániť materiál na viac prejazdov. Po porovnaní časov obrábania indikovaných v Cimatrone sa ukázalo, že časovo výhodnejšie bude plynulé dokončenie deliacich, nefunkčných aj centrovacích plôch v rámci jednej operácie. Pre lepšiu názornosť sú vygenerované dráhy ukázané na obr. 48 modrou farbou. Sú usporiadané nahusto vplyvom malej šírky rezu  $a_e = 0,139$  mm. Vďaka spojeniu dokončovania všetkých týchto plôch do jednej operácie sa frézou o priemere 6 mm plynulo vyfrézoval rádius R3,5 mm tak, že čistenie rohu už nebolo potrebné. Vzhľadom na to bola operácia čistenia rohu R3,5 odstránená.



Obr. 48 Dráhy nástroja pri dokončovaní deliacich, nefunkčných a centrovacích plôch.

Tvárnica časť dutiny (vyznačená ružovou farbou na obr. 48) bola teda dokončená samostatne, čo je tiež priaznivé z hľadiska snahy dosiahnutia ostrej hrany medzi deliacou rovinou a vstrekovacou dutinou. Pri tejto operácii došlo aj k spomínanému odsadeniu kontúry od ostrej hrany, aby sa predišlo vzniku rýh po nástroji patrných na obr. 44.

Posledná zmena sa týka operácie dočistenia rohu R2 mm. Operácia spočívala v hrubovaní rohu guľovou frézou o priemere 4 mm s vertikálnym aj horizontálnym krokom 0,1 mm a v následnom dokončení rohu za rovnakých podmienok. Zmena tu nastala v prepočte bodov dráhy nástroja, čím sa upravila jej plynulosť zo štandardnej kvality na jemnú kvalitu povrchu (obr. 49). Dráha bola vypočítaná z výrazne vyššieho počtu bodov, ktorých vzájomná vzdialenosť bola nastavená na 0,05 mm. Cieľom bolo predísť možným nepresnostiam pri čistení rohu. Na druhej strane, táto zmena spôsobila výrazné zväčšenie súboru a zvýšenie doby výpočtu.



a) štandardná kvalita povrchu

b) jemná kvalita povrchu

Obr. 49 Nastavenie výpočtu bodov dráhy pri operácii čistenia rohov.



## 4 APLIKÁCIA NOVÉHO POSTUPU PRI VÝROBE SÚČASTÍ

Konečnou demonštráciou výsledkov tejto diplomovej práce je realizácia výroby samotných súčastí formy, ktoré budú ďalej použité vo výrobe na vstrekovacích lisoch. Výroba súčastí pozostáva z prípravy polotovarov v nástrojárni ITW PRONOVIA, z obrábania tvarovej vložky a chladiacej súčasti rovnako v nástrojárni ITW a z ručného leštenia vo firme Šlechta. Pri výrobe bol aplikovaný návrh nového technologického postupu. Výsledok výroby tvarovej vložky formy bol zhodnotený na základe optickej kontroly a 3D merania. Hlavným kritériom súčastí chladenia bolo jej správne uloženie vo vložke formy, preto nebola podrobená testom v takom rozsahu, ako tvarová vložka. V závere kapitoly je možné nájsť časové porovnanie predošlého a nového technologického postupu.

Nový technologický postup pre pohľadovú stranu vložky formy, pri ktorom boli aplikované zmeny z predošlej kapitoly, je zhrnutý v tab. 24. Výroba strany chladenia tvarovej vložky, rovnako ako aj celej súčasti chladenia, prebiehala podľa postupov určených v kap. 3.1.

Tab. 24 Upravený postup operácií a príslušných stratégií pre pohľadovú stranu tvarovej vložky.

Op.	Nástroj	D	Operácia	Stratégia
1	Toroidná fréza	Ø12	Zarovnanie čelnej plochy	VoluMill
2	Toroidná fréza	Ø12	Hrubovanie dutiny	VoluMill
3	Toroidná fréza	Ø12	Zrazenie hrany na obvode	VoluMill
4	Guľová fréza	Ø8	Dohrubovanie dutiny	Špirála
5	Guľová fréza	Ø6	Hrubovanie vtokovej drážky	Špirála
6	Brúsenie			
7	Guľová fréza	Ø6	Preddokončenie dutiny	Špirála
8	Guľová fréza	Ø6	Dokončenie tvárniacich plôch	Podľa limit. uhlu
9	Guľová fréza	Ø6	Dokonč. centrovacích, nefunkčných a deliacich plôch	Podľa limit. uhlu
10	Guľová fréza	Ø8	Dokončenie zrazenej hrany	FinishAll
11	Guľová fréza	Ø6	Dokončenie drážky	Podľa limit. uhlu
12	Guľová fréza	Ø4	Čistenie rohu R2	Čistenie rohov

Použitým spôsobom chladenia pre stratégiu VoluMill bol stlačený vzduch. Vysvetlenie vychádza z teórie popísanej na začiatku práce. Pre ostatné stratégie, kde neboli aplikované tak vysoké rezné podmienky, bola na chladenie využitá technológia MQL (olejová hmla). Pre každý nástroj bolo použité najmenšie možné vyloženie nástroja kvôli snahe minimalizovať vibrácie. Vyloženie bolo dané buď maximálnou obrábanou hĺbkou tak, aby nedošlo ku kolízii obrobku s upínačom, alebo (v prípade frézy o priemere 4 mm) bol nástroj vložený do kužela na doraz.

Pred samotnou výrobou bol dôraz kladený na kontrolu simulácie. CAD/CAM systém Cimatron disponuje veľmi detailnou simuláciou umožňujúcou postrehnúť aj najmenšie nedokonalosti na povrchu, vzniknuté vplyvom nesprávne zvolených parametrov alebo chybného výpočtu. Autorka kontrolovala dráhy nástrojov pre každú operáciu, najmä nájazdy do materiálu, pri ktorých kolízie nie sú vždy v simulácii indikované, aby sa predišlo situácii z obr. 43. Ďalej bola kontrolovaná kvalita výsledného povrchu v simulácii a taktiež zbytkový materiál.

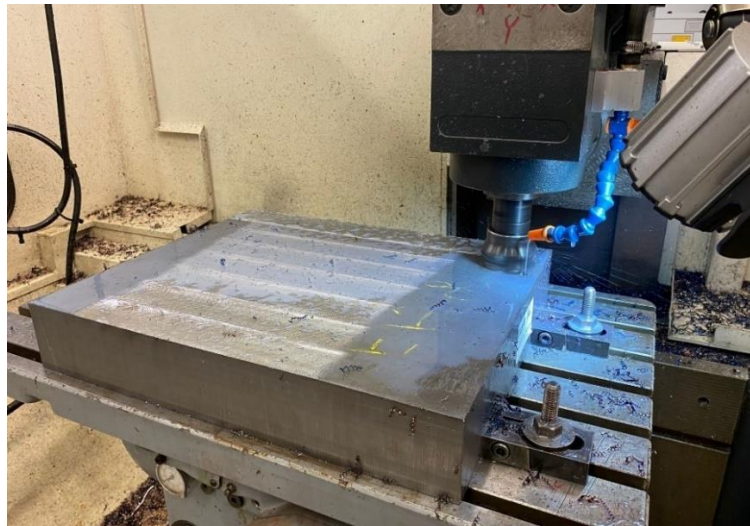
### 4.1 Príprava polotovarov vybraných súčastí formy

Vopred tepelne spracované polotovary o daných rozmeroch boli objednané zo spoločnosti JKZ Bučovice, a.s., ktorá sa zameriava na dodávku nástrojových a špeciálnych ocelí. Polotovar je pred samotným frézovaním do tvaru požadovanej súčasti potrebné upraviť, pričom táto úprava už prebehla v nástrojárni ITW.

V rámci návrhu racionalizácie postupu výroby súčastí bol autorkou navrhnutý postup prípravy polotovaru pozostávajúci z nasledujúcich úkonov:

- odstránenie okují orovnávacím kameňom,
- navrtanie diery pre prevlečenie drôtu pre elektroerozívne rezanie,
- zarovnanie jednej plochy polotovaru frézovaním pre správne ustavenie,
- elektroerozívne rezanie polotovaru.

Obidva polotovary boli objednané v rozmeroch dostupných v skladových zásobách JKZ Bučovice, ktoré úplne nekorešponujú s rozmermi súčastí. Samozrejme, je možné objednať aj presný rozmer, ale z finančného hľadiska je výhodnejšie polotovary upraviť v podmienkach nástrojárne. Úprava tvaru polotovaru pre tvarovú vložku vhodného pre frézovanie na stroji EXERON HSC 300 spočíva vo frézovaní čelnej plochy na modernizovanej frézke DECKEL typu FP4AT (obr. 50), ktorá umožňuje upnutie väčšieho polotovaru a taktiež väčšieho priemeru nástroja než frézovacie centrum HSC 300. Riadkovaním sa rozmer polotovaru v osi Z zmenšil na celkový prídavok 8 mm.



Obr. 50 Zarovnanie plochy polotovaru tvarovej vložky riadkovaním.

Zarovnanie plochy taktiež umožnilo ustavenie do elektroerozívnej rezačky FANUC ALPHA 0iD, na ktorej bol vyzeraný tvar súčastí vrátane rohov. Tieto rohy sú odľahčené o 0,2 mm z dôvodu ľahšieho ustavovania súčastí do zostavy formy. Naopak, bočné steny tvarovej vložky boli rezané s prídavkom 0,3 mm, ktorý bol prídavkom pre neskoršie brúsenie plôch po hrubovaní. Tvar vyrezaný z dovezeného polotovaru tvarovej vložky formy je vidieť na obr. 51.



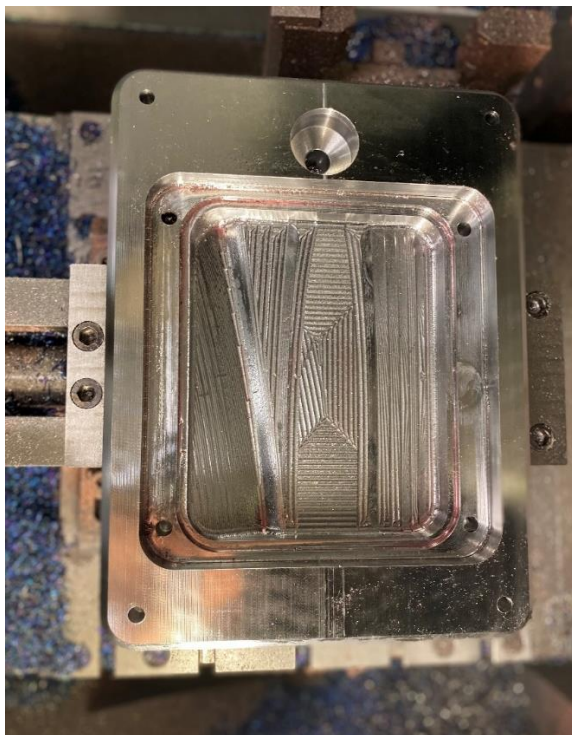
Obr. 51 Vyrezaný tvar vložky formy z pôvodného polotovaru.

Dôvodom použitia technológie elektroerozívneho rezania namiesto frézovania je predovšetkým jednoduchosť jej použitia. Pri rezaní nie je potrebné preupínanie súčasti, je ušetrený čas pracovníkov a uvoľnená kapacita použitia frézky DECKEL, ktorá je v nástrojárni využívaná podstatne častejšie než drôtorezačka. Pri rezaní bol použitý mosadzný drôt o priemere 0,25 mm a celkový proces rezania tvarovej vložky trval 3 hod a 29 min. Pre prevlečenie drôtu bol navítaný štartovací otvor na magnetickej vŕtačke BDS Maschinen MAB 825. Okuje vzniknuté pri tepelnom spracovaní by spôsobovali časté trhanie drôtu pri nasledovnom elektroerozívnom rezaní. V tomto prípade boli odstránené ručne orovnávacím kameňom.

Pri príprave polotovaru chladiacej súčasti bol zvolený ten istý princíp, avšak rezanie prebehlo s odľahčením bočných strán o 0,03 mm. S prihliadnutím na menšie nároky na presnosť uloženia chladiacej súčasti v tvarovej vložke formy autorka vyhodnotila, že v tomto prípade bude rezanie bočných strán postačujúce a nie je nutné ich dodatočné brúsenie. Brúsená teda bola len jedna čelná strana súčasti (obr. 29).

## 4.2 Obrábanie vybraných súčastí formy

Ako prvá sa obrábala tvarová vložka formy. Tvar vložky po hrubovaní a dohrubovaní prvej strany (strany chladenia) sa nachádza na obr. 52 a). Na jednej z horizontálnych plôch dutiny, viditeľnej v pravej časti fotky, možno spozorovať stopy zanechané nástrojom pri bočnom zanáraní do materiálu po kruhovej interpolácii počas hrubovania stratégiou VoluMill. Celkove je možné z tejto fotografie konštatovať dobrú kvalitu povrchu na horizontálnych plochách, zanechanú po obrábaní VoluMillom. Po vyhrubovaní strany chladenia nasledovalo hrubovanie a dohrubovanie pohľadovej strany vložky, ktorého výsledok je zdokumentovaný na obr. 52 b).



a) strana chladenia



b) strana vstrekovania

Obr. 52 Tvarová vložka po hrubovaní a dohrubovaní.

V takomto vyhrubovanom stave tvarová vložka pokračovala na brúsku (obr. 53), kde boli všetky jej čelné plochy zbrúsené (pri EDM rezaní bol ponechaný prídavok na brúsenie) s cieľom zabezpečiť kolmosť strán po deformáciách spôsobených uvoľnením vnútorných napätí pri hrubovaní. Brúsenie prebehlo na rovinatej brúske ELB Schliiff SWD15VA. Pred



brúsením bol kotúč orovnaný diamantovým hrotom, počas brúsenia boli rovinnosť a kolmosť jednotlivých strán kontrolované za použitia stotínového úchylkomeru. Po nabrúsení strán vložky bolo vhodné ešte pred dokončováním odskúšať jej uloženie do formy (obr. 54). Tento spôsob je vhodnou kontrolou správnosti procesu brúsenia.

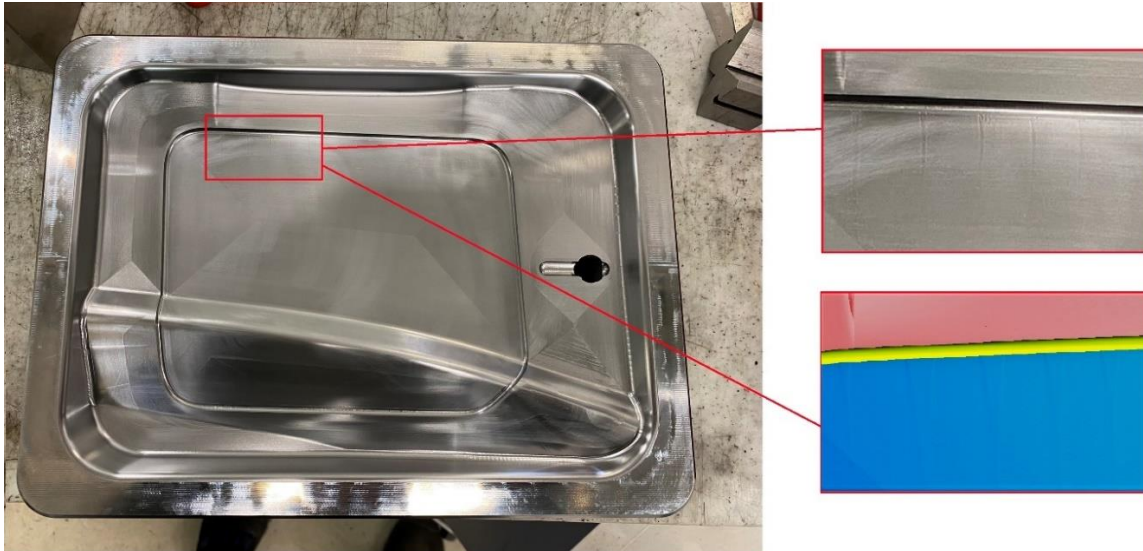


Obr. 53 Kontrola kolmosti strán úchylkomerom. Obr. 54 Kontrola uloženia vložky v ráme formy.

Následovali dokončovacie operácie frézovania tvarovej vložky zo strany chladenia (obr. 55) a potom pohľadovej strany vložky (obr. 56). Dokončovanie priechodzieho otvoru pre vtok o priemere 16 H7 mm prebehlo počas dokončovania strany chladenia. Po príslušnej operácii bol cyklus prerušený a rozmery otvoru boli skontrolované trojdotykovým dutinomerom. Výsledkom kontroly bolo zistenie dodržania hodnôt v rámci tolerančného intervalu H7 a žiadne dodatočné opravy neboli potrebné.



Obr. 55 Dokončená strana chladenia tvarovej vložky.



Obr. 56 Dokončená pohľadová strana vložky s detailom na stopy po dráhe nástroja na skutočnej súčasti a v simulácii.

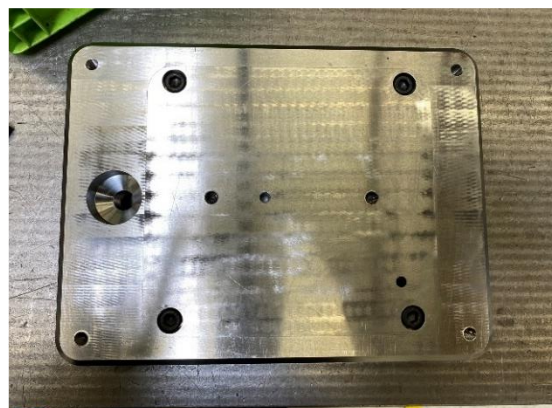
Po dokončení tvarovej vložky prebehla optická kontrola povrchu. V oblasti problematického rádiusu  $R2$  mm na spodnej strane sa nachádzali drobné známky po vibráciách nástroja pri čistení rohu, tieto však boli vyhodnotené ako zanedbateľné a ľahko odstrániteľné ručným leštením. Bolo by nutné vykonať rozsiahlejšie skúmanie, aby bolo možné pri obrábaní za daných okrajových podmienok tomuto javu predísť.

Ďalej boli tiež spozorované stopy nástroja, ktoré sú vyznačené v detailoch v červených obdĺžnikoch na obr. 56. Tieto stopy boli pravdepodobne spôsobené chybným výpočtom dráhy nástroja, ktorá sa v týchto oblastiach nezmyselne zakrivovala. Na obr. 56 vpravo dole sa nachádza obrázok zo simulácie v Cimatrone, na ktorom je túto chybu tiež jednoznačne vidieť. Pri snahe chybu odstrániť sa ukázalo, že jedinou možnosťou zbavenia sa zakrivenia dráh v tejto oblasti by bola voľba novej stratégie, čo by však viedlo k iným, vážnejším defektom. Podobne ako v prvom prípade, aj tieto stopy po nástroji sú ľahko odstrániteľné leštením.

Nasledovalo frézovanie súčasti chladenia (obr. 57), ktorej výroba prebehla taktiež bezproblémovo. Podobne, ako sa testovalo uloženie tvarovej vložky do konštrukcie formy na obr. 54, sa testovalo aj uloženie súčasti chladenia do tvarovej vložky. Pre kontrolu dol'ahnutia funkčných plôch súčasti bola použitá tušírovacia pasta. Uloženie bolo korektné, navzájom zmontované súčasti sú znázornené na obr. 58. Dodatočnú fotodokumentáciu možno nájsť v prílohe č. 8.



Obr. 57 Súčasť chladenia.



Obr. 58 Uloženie súčasti chladenia vo vložke.



### 4.3 Leštenie vstrekovacej dutiny

Autorka navštívila firmu Šlechta a.s., v ktorej prebehlo ručné leštenie plôch vstrekovacej dutiny. Táto firma sa špecializuje na leštenie a údržbu foriem a iných nástrojov. Cieľom leštenia v prípade tvarovej vložky je odstránenie aj tých najmenších nezrovnalostí povrchu a zníženie drsnosti.

Existujú rôzne stupne leštenia. Tým najvyšším je dosiahnutie zrkadlového lesku, čo zodpovedá hodnote priemernej aritmetickej odchyľky profilu až **Ra** 0,001  $\mu\text{m}$ . Plochy tejto tvarovej vložky boli leštené na tzv. technický lesk, pričom výsledná hodnota parametra **Ra** po lešení zodpovedá 0,20  $\mu\text{m}$ . Pre leštenie tvarových plôch je potrebná široká škála brúsnych materiálov rôznych tvarov a zrnitosti, typicky sa používajú brúsne kamienky, šmirgľový papier, ultrazvukové leštičky, štetce, brúsne (diamantové) pasty atď. Konkrétna voľba spôsobu a nástrojov závisí na tvare plochy a požadovanom lesku.

Na obr. 59 možno vidieť pracovníka demonštrujúceho leštenie tvarovej vložky. Leštenie prebieha postupne od hrubovania, až po jemnejšie opracovanie (menšie zrnitosti brúsnych materiálov), pričom všeobecne platí, že sa začína najproblematickejšími prvkami. Prirodzene, čím nižšiu drsnosť má východzí povrch, tým rýchlejšie prebehne i leštenie. Autorka tu nemôže udávať presné časy ani postupy leštenia, ale ako príklad sa dá uviesť porovnanie leštenia pri obrábaní vstrekovacej dutiny:

- elektródou (**Ra** 0,8  $\mu\text{m}$ ),
- guľovou frézou (**Ra** 0,2 až 0,7  $\mu\text{m}$  v závislosti od konkrétnej pozície).

V predošlom postupe dochádzalo k dokončeniu dutiny technológiou EDM. Pri novom návrhu, kde dokončenie frézou zabezpečilo lepšiu kvalitu povrchu v porovnaní s kvalitou povrchu erodovaného, je možné ušetriť na lešení tejto konkrétnej vstrekovacej dutiny tvarovej vložky až 40 % času.



Obr. 59 Leštenie ultrazvukovou leštičkou.



Obr. 60 Detail na ostrú hranu po lešení rádiu R2 mm.

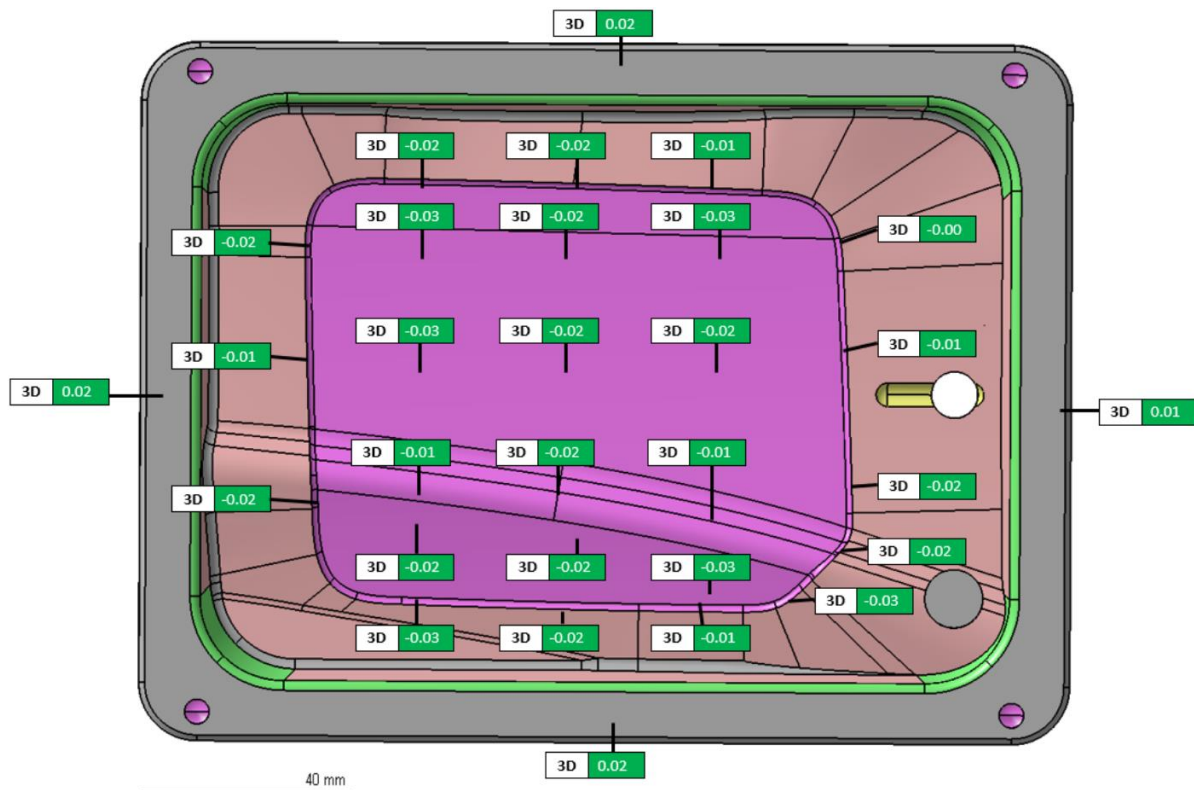
Geometrický tvar formy je zachovaný, z vrstvy sa odoberá len niekoľko tisícín až približne dve stotiny milimetra. Leštený diel sa počas procesu premeriava na 3D meracom prístroji, aby



nedošlo k nadmernému odlešteniu. Na obr. 60 možno vidieť už vyleštený rádius R2 mm na okraji vstrekovacej dutiny. I tu sa jedná o problematický prvok, u ktorého je potrebné ochrániť ostrú hranu maskovaním a postupovať opatrne. Pri leštení nástrojov aj malá chybička môže spôsobiť veľkú škodu. Táto práca si nesie svoje riziká a spoľahlivé výsledky si vyžadujú roky praxe.

#### 4.4 Testy kvality

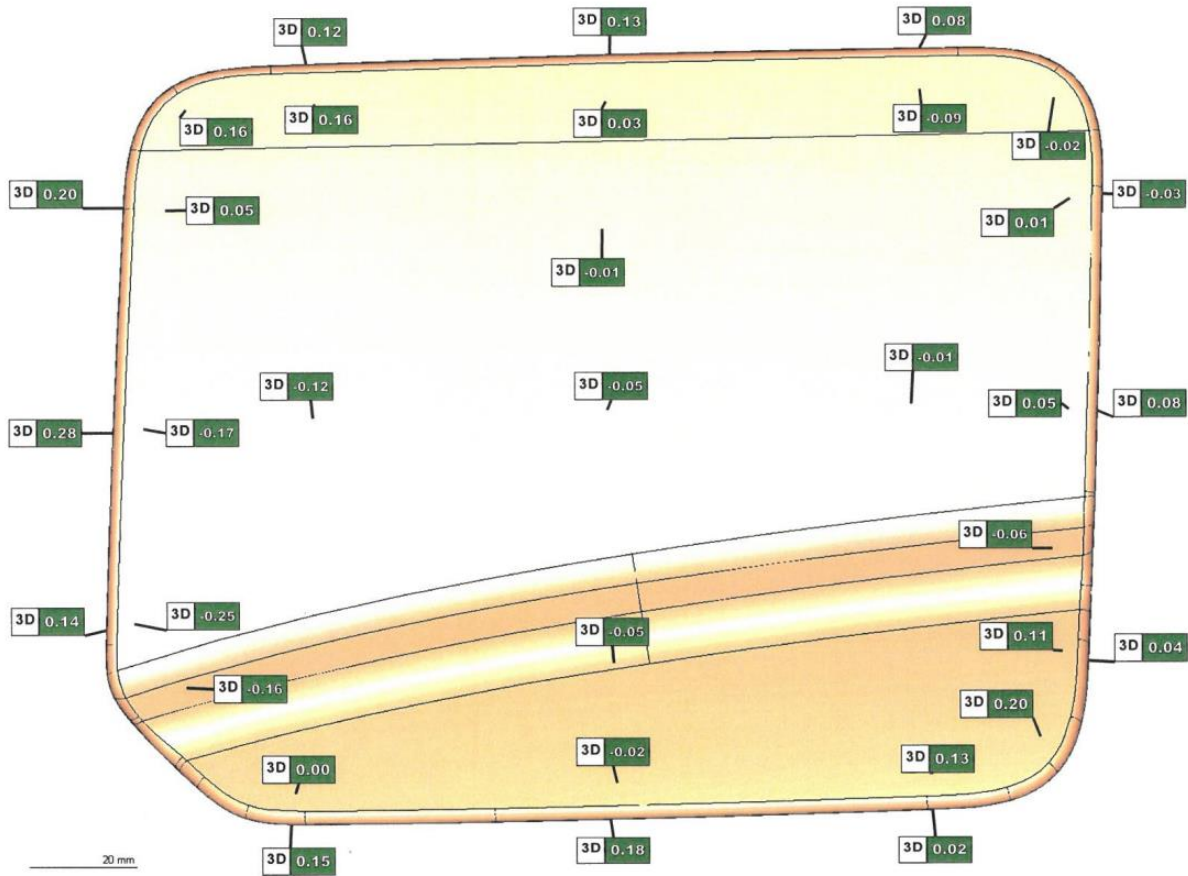
Testy kvality spočívajú v meraní geometrie samotnej tvarovej vložky po leštení a v testoch vzorkovania. Výsledok merania vložky na 3D meracom zariadení je zobrazený na obr. 61. Meranými plochami boli vstrekovacia dutina (ružová) a čelná plocha (šedá farba). Tolerančný interval je stanovený na hodnoty  $[-0,05; +0,05]$  mm, teda možno konštatovať, že požiadavky na tvar a rozmery súčasti boli splnené. Väčšina hodnôt sa nachádza v zápornej časti intervalu, čo môže byť následkom odobrania tenkej vrstvy pri leštení. Kompletný protokol z merania možno vidieť v prílohe č. 4.



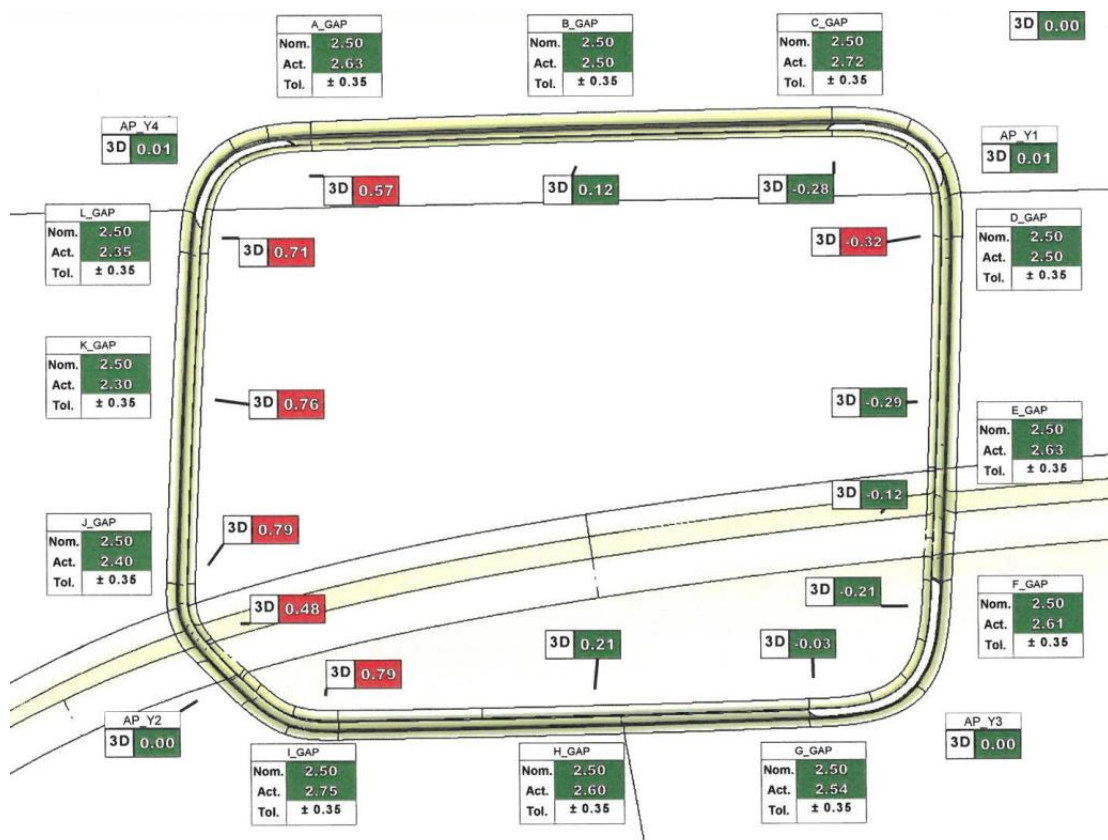
Obr. 61 Výsledky testov geometrie tvarovej vložky po leštení.

Posledným a ultimátnym testom je tzv. vzorkovanie, kedy sa nová vložka použije na výrobu prvých vzoriek plastových klapiek. Netemperovaná klapka je ďalej meraná na 3D meracom zariadení a to aj samostatne, aj ako súčasť zostavy tankovacej nádrže. Povrch klapky sa tiež scanuje pre detekciu prepadlín a vybúlení a kontroluje sa aj jej odolnosť voči teplote.

Na obr. 62 možno vidieť výsledok merania rozmerov a tvarov prvého výrobku vytvoreného za pomoci novej formy. Tolerančný interval je tu samozrejme širší než u tvarovej vložky, jedná sa o interval  $[-0,3; +0,3]$  mm. Všetky namerané hodnoty teda zodpovedajú požiadavkám.



Obr. 62 Výsledky testov geometrie vzorkovej klapky nádrže.



Obr. 63 Výsledky testov geometrie zostavy karosérie a palivovej nádrže.

Na obr. 63 sú znázornené výsledky testu inštalácie klapky do zvyšku sústavy. ITW má vo svojom metrologickom laboratóriu k dispozícii výrezy karosérií (tzv. *cubings*) z okolia tankovacej nádrže, slúžiace pre správne nastavenie montáže klapky do zostavy palivového systému a karosérie. Palivový systém sa následne exportuje ako celok. Kontroluje sa funkčnosť zostavy a uloženie klapky, pričom sa nastavuje jej zalícovanie s plechmi karosérie a tiež rovnomerná medzera medzi klapkou a karosériou. Vzhľadom na toleranciu rozmerov a tvaru tvárnených plechov je často nutná zmena relatívnej polohy klapky a karosérie. Je potrebné nastaviť jej montáž tak, aby sa predišlo vystúpeniu alebo prepadu klapky voči zvyšku zostavy. Tieto úpravy montáže vysvetľujú červené hodnoty na obr. 63. Hodnoty sa síce nachádzajú mimo tolerančný interval, ale výsledok tohto merania nemôže byť, v konečnom dôsledku, hodnotený negatívne.

Kontrolou kvality teda prešli obidve vzorkové klapky, ktoré sa stali „etalónmi“ pre nasledovnú výrobu. Na záver možno skonštatovať, že testy kvality tvarovej vložky formy boli úspešné a tak bola ihneď po testoch oficiálne uvoľnená do výroby.

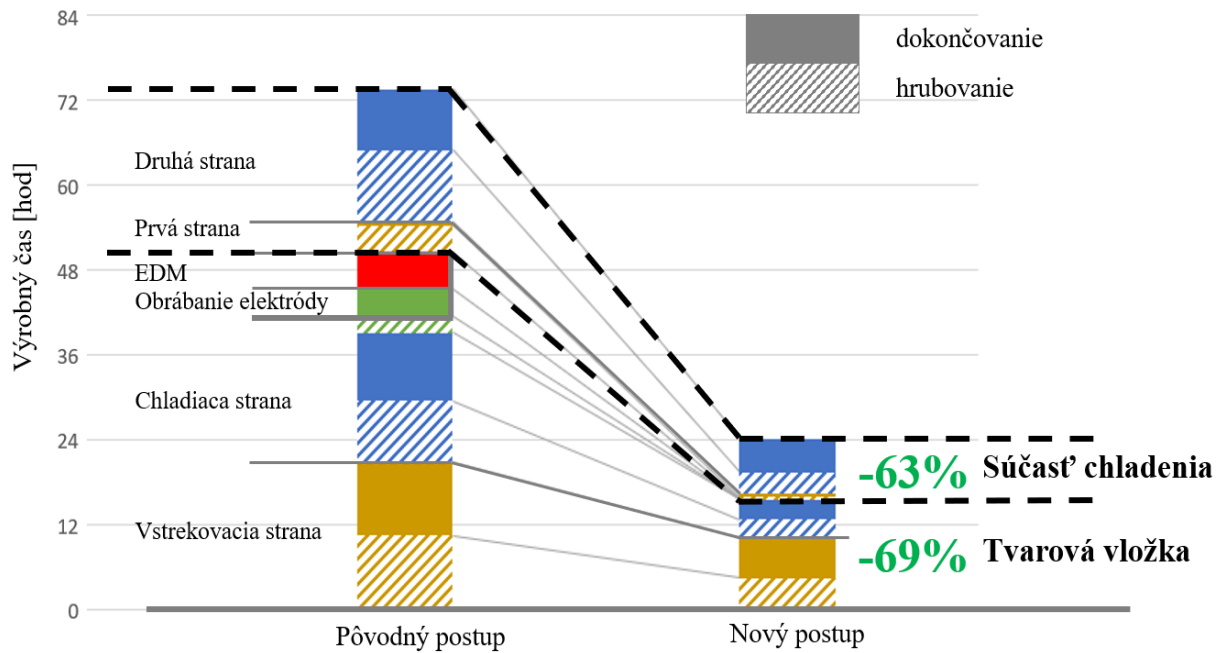
#### 4.5 Porovnanie s východným stavom

Pri porovnaní pôvodného technologického postupu a nového návrhu sa bude vychádzať z jedinej veličiny, a to z výrobného času. Údaje o počte vyrobených kusov klapiek za hodinu a ich cena sa považujú za citlivé údaje, takže nie je možné presne tu reflektovať skrátenie výrobného času na profit.

V grafickej závislosti na obr. 64 je porovnaný pôvodný postup s návrhom nového postupu. Toto porovnanie nezahŕňa prípravu polotovaru a leštenie. Údaje o čase leštenia konkrétnej súčasti sa taktiež nemôžu v tejto práci zdieľať, ale je dobré pripomenúť, že vzhľadom na zlepšenie kvality povrchu sa na samotnom leštení ušetrilo približne 40 % (čo vychádza na čas v rádoch hodín). Grafické porovnanie ale zahŕňa obrábanie EDM a v súvislosti s ním aj výrobu elektródy. Konkrétne časy obrábania jednotlivých strán oboch súčastí sú uvedené v podobe tabuľky na obr. 65.

Z grafickej závislosti je možné vyčítať, že pri výrobe tvarovej vložky podľa nového návrhu došlo k úspore 69 % strojného času obrábania a pri súčasti chladenia to bolo 63 %. Samotným vyradením procesu EDM sa ušetrilo takmer 11 a pol hodiny strojného času. Veľa času bolo tiež ušetreného pri hrubovaní vďaka použitiu stratégie VoluMill. Táto stratégia umožňuje obrábanie za použitia vysokých rezných a posuvových rýchlostí. Tu je nutné poznamenať, že stratégia VoluMill je v softvéri Cimatron novinkou dostupnou iba v jeho najnovšej verzii a nie je súčasťou základného balíka. Modul pre VoluMill je potrebné dokúpiť samostatne, pričom ITW PRONOVIA týmto modulom zatiaľ nedisponuje a preto nebol vo firme využívaný.

Sprievodným javom použitia stratégie VoluMill je nižšia trvanlivosť nástroja, rezné podmienky však boli nastavené tak, aby jeden nástroj dokázal vyhrubovať jednu stranu súčasti samostatne. V predošlom postupe na vyhrubovanie celej tvarovej vložky formy postačila jedna fréza. Rovnako je potrebné dokúpiť guľovú frézu o priemere 4 mm pre dokončenie najmenších rádiusov, ktoré boli v predošlom postupe dokončované EDM obrábaním (na druhej strane odpadli náklady na výrobu elektródy). Náklady na samotný nákup nástrojov sú síce v novom postupe vyššie, avšak výsledkom je skrátenie celkového strojného času procesu výroby približne na tretinu, čo činí náklady na nákup niekoľkých fréz zanedbateľnými v porovnaní s financiami získanými skorším uvedením vstrekovacieho stroja do prevádzky a v porovnaní s úsporou strojného času na frézovacom centre HSC 300.



Obr. 64 Porovnanie výrobných časov pôvodného a nového technologického postupu vo forme grafu.

Súčasť	Obrábaná strana	Spôsob úberu materiálu	Pôvodný postup [hh:mm]	Nový postup [hh:mm]
Tvarová vložka	Vstrekovacia strana	hrubovanie	10:20	04:25
		dokončovanie	10:22	05:44
	Chladiaca strana	hrubovanie	08:44	02:29
		dokončovanie	09:36	02:52
	Obrábanie elektródy	hrubovanie	02:16	-
		dokončovanie	04:03	-
	EDM (vstrekovacej strany)	dokončovanie	05:08	-
Súčasť chladenia	Prvá strana	hrubovanie	03:47	00:19
		dokončovanie	00:30	00:30
	Druhá strana	hrubovanie	10:10	03:05
		dokončovanie	08:40	04:44
	Spolu		73:36	24:08

Obr. 65 Porovnanie výrobných časov pôvodného a nového technologického postupu vo forme tabuľky.



---

## ZÁVER

Výroba tvarových častí vstrekovacích foriem v sebe kombinuje vysoké požiadavky na kvalitu povrchu, presnosť výroby a spoľahlivosť procesu. K celkovej zložitosti tohto odvetvia prispieva i tvarový povrch vyžadujúci si komplexné riešenia. Všetky tieto požiadavky musia byť splnené a zároveň v súlade s protichodným kritériom minimalizovať výrobný čas. S cieľom racionalizácie výroby vybraných súčastí formy sa autorka s danou problematikou zoznámila a vytvorila návrh nového postupu výroby tvarovej vložky formy a jej funkčného protidielu zodpovedného za chladenie.

Postup pozostáva z prípravy polotovaru, obrábania a ručného leštenia. Jadrom nového návrhu je obrábací proces, ktorý bol vypracovaný v CAD/CAM systéme Cimatron a stratégie, nástroje a počiatkové rezné parametre boli volené s ohľadom na okrajové podmienky a požiadavky na obrobky. S cieľom znížiť výrobný čas a zvýšiť spoľahlivosť procesu bolo v priestoroch nástrojárne v ITW PRONOVIA, s.r.o. uskutočnených viacero druhov experimentov. Pri testoch hrubovania sa skúmal vplyv geometrie nástroja na obrábanie stratégiou VoluMill. Taktiež sa skúmalo opotrebenie nástroja podľa momentového zaťaženia vretena. Bol nájdený vhodný typ nástroja, ich potrebný počet a vhodné rezné parametre pre túto stratégiu, čo vo výsledku umožnilo jej použitie pri neskoršej výrobe samotných súčastí formy. VoluMill nie je súčasťou klasického balíka Cimatronu, no jedná sa o efektívnu, vysokorýchlostnú stratégiu a autorka preto doporučuje firme ITW PRONOVIA dokúpiť modul umožňujúci prácu so stratégiou VoluMill.

Testy dokončovacích operácií umožnili odskúšať a vybrať vhodnú kombináciu nástrojov, rezných podmienok a veľkosť prídavku na dokončovanie. Pri výrobe foriem môže i malé pochybenie pri výrobe spôsobiť úplne znehodnotenie celej súčasti. Preto bol dôraz kladený aj na určitosť a bezpečnosť procesu, napríklad na snahu minimalizovať vibrácie nástroja. Vďaka týmto krokom sa podarilo z technologického postupu úplne vylúčiť dokončovanie elektroeróziou a obrobit' i tvarovo zložitú plochu s vysokými nárokmi na kvalitu frézovaním až na ich finálny tvar. Všetky získané poznatky boli aplikované pri súhrnnom teste na vzorke tvarovo podobnej, ale rozmerovo menšej než tvarová vložka, pričom uhly a rádiusy ostali zachované. Cieľom bolo odskúšať a odladiť obrábací postup v celej jeho integrite a čo najautentickejšie ešte pred spustením výroby súčastí formy. Test skutočne odhalil niekoľko menších procesných problémov, pričom všetky boli jednoducho riešiteľné konfigurovaním programu v prostredí Cimatronu.

Po prevedení posledných zmien bol nový návrh aplikovaný pri výrobe dvoch vybraných súčastí formy. Záverečné testy kvality a vzorkovanie ukázali, že výroba súčastí (najmä tvarovej vložky, kde boli požiadavky na kvalitu najvyššie) bola úspešná a obe súčasti boli uvoľnené do výroby na vstrekovacích lisoch. Pri porovnaní východzieho a nového technologického postupu je možné konštatovať značnú úsporu času pri výrobe každej zo súčastí. Za použitia rovnakej technológie a výrobných zariadení, nový postup umožňuje výrobu daných súčastí za približne tretinu pôvodného výrobného času. Konkrétne sa výrobné časy súčastí skrátili na:

- 31 % z pôvodného času u výroby tvarovej vložky,
- 37 % z pôvodného času u výroby súčasti chladenia.

Do tohto vyhodnotenia nie sú zarátané príprava polotovaru a ručné leštenie, u ktorých nie je možné s istotou určiť čas trvania. U leštenia však existuje predpoklad na skrátenie času o ďalších približne 40 %. Nakoľko nový návrh bol úspešne realizovaný a viedol k vysokej úspore času v rámci výroby náhrady za poškodené diely formy, autorka odporúča nástrojarni v ITW PRONOVIA nahradiť pôvodný technologický postup týmto návrhom. Záverom sa dá konštatovať, že všetky stanovené ciele boli v diplomovej práci splnené.

---



---

**ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV**

- [1] TAYLAN, Altan, Lilly BLAINE a Y.C. YEN. *Manufacturing of Dies and Molds* [online]. 2001. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607629886>
- [2] JANČUŠOVÁ, Mária. *Formy na tvárnenie plastov*. B.m.: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2010. ISBN 978-80-554-0191-1.
- [3] ZEMAN, Lubomír. *Podmienky a koncepcia zaformovania - Konštrukcia a výroba vstrekovacích foriem, časť 1*. [online]. B.m.: PlasticPortal.cz, 2020. Dostupné z: <https://www.plasticportal.sk/sk/podmienky-a-koncepcia-zaformovania-konstrukcia-a-vyroba-vstrekovacich-foriem-lubomir-zeman-cast-1/c/6198/>
- [4] POULACHON, Gérard. *Industrie des moules et matrices*. In: . 2015.
- [5] SANDVIK COROMANT. *Die & Mould Making (Application guide)*. 2001.
- [6] FORMLABS.COM. *How to estimate injection molding cost?* [online]. 2021. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/injection-molding-cost/>
- [7] SANDVIK COROMANT. *Tvarové frézování* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [8] JÍLEK, Bohumil. *Výroba vstříkovací formy - Diplomová práce*. 2009.
- [9] IŽOL, Peter. *Hodnotenie stratégií frézovania pre výrobu tvarových plôch (Habilitationná práca)* [online]. B.m., 2016. Technická univerzita v Košiciach. Dostupné z: <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=922D20CCC953BCA4FD22C7E3887D&seo=CRZP-detail-kniha>
- [10] GREŠOVÁ, Zuzana a Peter IŽOL. *FRÉZOVACIE STRATÉGIE – ROZDELENIE A HODNOTENIE* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/38-2018/pdf/010-015.pdf>
- [11] CIMCO. *3D Scallop* [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.mastercam.dk/docs/hsmpp/Strategy3DScallop.html>
- [12] ARKANCE SYSTEMS. *Autodesk Fusion 360 - Machining Extension* [online]. 2019. Dostupné z: <https://f360.cz/machining-extension/>
- [13] LEUCHTER, Alon. *CimatronE's VoluMill for Mold-Makers*. 2014.
- [14] LABOUREAU, Laurent. *La chaîne numérique*. 2017.
- [15] SANDVIK COROMANT. *Ponorné frézování* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/plunge-milling.aspx>
- [16] BEGIC-HAJDAREVIC, Derzija, Ahmet CEKIC a Malik KULENOVIC. *Experimental Study on the High Speed Machining of Hardened Steel* [online]. 2013. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/261104049\\_Experimental\\_Study\\_on\\_the\\_High\\_Speed\\_Machining\\_of\\_Hardened\\_Steel](https://www.researchgate.net/publication/261104049_Experimental_Study_on_the_High_Speed_Machining_of_Hardened_Steel)
- [17] JAIN, Ankit a Vivek BAJPAI. *INTRODUCTION TO HIGH SPEED MACHINING (HSM)* [online]. B.m., 2020. Indian Institute of Technology (ISM) Dhanbad. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/339093429\\_Introduction\\_to\\_high-speed\\_machining\\_HSM](https://www.researchgate.net/publication/339093429_Introduction_to_high-speed_machining_HSM)
-

- 
- [18] SANDVIK COROMANT. *Výpočtové vztahy a definice pro frézování* [online]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [19] JÍLEK, Bohumil. *Výroba vstříkovací formy* [online]. B.m., 2009. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/16540?locale-attribute=en>
- [20] PALUŠKA, Matej. *Obrábání kalených materiálů na vertikálním 3-osom obrábacom centre (Diplomová práce)* [online]. B.m., 2015. Žilinská univerzita v Žiline. Dostupné z: <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=5706AE11B6D530C9961CE10E055D&seo=CRZP-detail-kniha>
- [21] OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění (vzdělávací a tréninkový modul)*. 2012.
- [22] FARID, Mohd. EDM Die-Sinking (Part II). *ADTEC Melaka* [online]. 2012. Dostupné z: <https://manufacturing-edm.blogspot.com/p/edm-die-sinking.html>
- [23] ITW PRONOVIA. *O společnosti* [online]. Dostupné z: <https://www.itwpronovia.cz/cs/o-spolecnosti/>
- [24] SABIC. *NORYL GTX™ RESIN* [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.sabic.com/en/products/specialties/noryl-resins/noryl-gtx-resin>
- [25] MICRO-EPSILON. *3D snímače pro kontrolu geometrie, tvarů a povrchů matných předmětů* [online]. 2023. Dostupné z: [https://www.micro-epsilon.cz/2D\\_3D/3D-sensors/surfaceCONTROL/](https://www.micro-epsilon.cz/2D_3D/3D-sensors/surfaceCONTROL/)
- [26] ILLINOIS TOOL WORKS. Tool Specifications. 2022.
- [27] UDDEHOLM. *Uddeholm Impax Supreme*. 2011.
- [28] JKZ BUČOVICE. W. NR. 1.2311 [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12311/>
- [29] PENTA TRADING. *FRÉZOVACÍ HSC CENTRUM HSC 300* [online]. Dostupné z: <https://adoc.pub/queue/frezovaci-hsc-centrum-hsc-300.html#>
- [30] TECHNO-TOOL AG. *Schrumpffutter DIN 69893* [online]. 2023. Dostupné z: [https://www.technotool.ch/de/Shop/spanntechnik/Futter/21599114/Schrumpffutter\\_DIN\\_69893\\_Form\\_E\\_HSK\\_40\\_lang\\_Ø\\_8\\_x\\_80\\_mm](https://www.technotool.ch/de/Shop/spanntechnik/Futter/21599114/Schrumpffutter_DIN_69893_Form_E_HSK_40_lang_Ø_8_x_80_mm)
- [31] ALLMATIC SPANNSYSTEME. *TC 125* [online]. 2023. Dostupné z: [https://www.allmatic.de/shop/en/Products/phased\\_out\\_products/TC/TC\\_125.html](https://www.allmatic.de/shop/en/Products/phased_out_products/TC/TC_125.html)
- [32] PM-TECH. *Řezné nástroje, upínání a měřidla pro CNC obrábění* [online]. 2023. Dostupné z: [https://www.pm-tech.cz/?gclid=CjwKCAjwjYKjBhB5EiwAiFdSfl7L9B7Y3cg-cdrbEI7IS-G6O36H2sJJRSP-WXPtTa9Pnr0PUSaoRoCnYcQAvD\\_BwE](https://www.pm-tech.cz/?gclid=CjwKCAjwjYKjBhB5EiwAiFdSfl7L9B7Y3cg-cdrbEI7IS-G6O36H2sJJRSP-WXPtTa9Pnr0PUSaoRoCnYcQAvD_BwE)
- [33] PM-TECH. *Frézy pro obrábění ocelí - katalog trvdokovových fréz na ocel do 50-68 HRC* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.pm-tech.cz/frezy-tvrdocovove-oceli-do-50-68-hrc/>
- [34] DOUŠKOVÁ, Zuzana. *Cimatron. TechMagazín*. 2017.
- [35] ŠTĚTINA, Jakub a Zuzana DOUŠKOVÁ. *Cimatron. CAD 4*. 2018.
- [36] CELERETIVE. *How do I determine what feedrate, spindle speed and depth of cuts to use?* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.volumill.com/frequently-asked-questions>
-

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

### Symbody

Označení	Legenda	Jednotka
D	priemer reznej časti nástroja	[mm]
D <sub>c</sub>	nominálny priemer reznej časti nástroja	[mm]
D <sub>e</sub>	efektívny priemer nástroja v reze	[mm]
L	dĺžka	[mm]
M	momentové zaťaženie	[N.m], [%]
Q	rýchlosť úberu materiálu	[cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]
R	rádus	[mm]
R <sub>a</sub>	priemerná aritmetická odchýlka profilu	[μm]
R <sub>z</sub>	najväčšia výška profilu	[μm]
V <sub>o</sub>	odobraný objem	[cm <sup>3</sup> ]
a <sub>e</sub>	šírka záberu	[mm]
a <sub>p</sub>	hlĺbka rezu	[mm]
d	priemer upínacej časti nástroja	[mm]
f <sub>z</sub>	posuv na zub	[mm]
n	otáčky vretena	[min <sup>-1</sup> ]
p <sub>d</sub>	prídavok na dokončovanie	[mm]
v <sub>c</sub>	rezná rýchlosť	[m.min <sup>-1</sup> ]
v <sub>e</sub>	efektívna rezná rýchlosť	[m.min <sup>-1</sup> ]
v <sub>f</sub>	posuvová rýchlosť	[mm.min <sup>-1</sup> ]

### Skratky

Označenie	Legenda
3D	3-dimensional
AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDM	Electrical Discharge Machining
HB	Hardness Brinell
HRC	Hardness Rockwell C (scale)
HSC	High Speed Cutting
HSK	Hohlschaftkegel
HSM	High Speed Machining
ITW	Illinois Tool Works
MQL	Minimum Quantity Lubrication
NC	Numerical Control
PA	Polyamid
PPE	Polyfenyléter
PVD	Physical Vapour Deposition
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
USA	United States of America

---

## ZOZNAM PRÍLOH

---

- Príloha 1 Materiálový list NORYL GTX973
- Príloha 2 Materiálový list Uddeholm Impax Supreme (AISI P20)
- Príloha 3 Protokol z merania drsnosti pri testovaní dokončovacích operácií
- Príloha 4 Protokol z merania geometrie finálnej vzorky
- Príloha 5 Protokol z merania drsnosti finálnej vzorky
- Príloha 6 Východzie podmienky pre obrábanie tvarovej vložky
- Príloha 7 Nový návrh rezných podmienok pre obrábanie tvarovej vložky
- Príloha 8 Fotodokumentácia výroby a merania tvarových častí foriem



GE Plastics

**NORYL GTX® GTX973**  
*Europe-Africa-Middle East: COMMERCIAL*

NORYL GTX973 is a material especially designed for electrostatic painting and powder coating applications. The material combines high heat resistance with impact and conductivity in a unique way.

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	UNIT	STANDARD
<b>MECHANICAL</b>			
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	12	mg/1000cy	GE Method
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	60	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	55	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	4	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	30	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2300	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	90	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2300	MPa	ISO 178
Hardness, H358/30	100	MPa	ISO 2039-1
<b>IMPACT</b>			
Izod Impact, notched 80°10°4 +23°C	15	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80°10°4 -30°C	7	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80°10°4 sp=62mm	15	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80°10°4 sp=62mm	6	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
<b>THERMAL</b>			
CTE, 23°C to 60°C, flow	9.E-05	1/°C	ISO 11359-2
CTE, 23°C to 60°C, xflow	9.E-05	1/°C	ISO 11359-2
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	PASSES	-	IEC 60695-10-2
Vicat Softening Temp, Rate B/50	195	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/120	200	°C	ISO 306
HDT/Be, 0.45MPa Edgew 120°10°4 sp=100mm	190	°C	ISO 75/Be
<b>PHYSICAL</b>			
Mold Shrinkage on Tensile Bar, flow (2)	1.4 - 1.8	%	GE Method
Density	1.1	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Water Absorption, (23°C/sat)	4.2	%	ISO 62
Moisture Absorption (23°C / 50% RH)	1.2	%	ISO 62
Melt Volume Rate, MVR at 280°C/5.0 kg	12	cm <sup>3</sup> /10 min	ISO 1133
<b>ELECTRICAL</b>			
Volume Resistivity	1.E+03 - 1.E+04	Ohm-cm	GE Method

1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colours. All values are measured at least after 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume rate are measured on injection moulded samples. All samples are prepared according to ISO 294.

2) Only typical data for material selection purpose. Not to be used for part or tool design.  
3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.  
4) Own measurement according to UL.





**GE Plastics**

**NORYL GTX® GTX973**  
 Europe-Africa-Middle East: COMMERCIAL

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	UNIT	STANDARD
<b>FLAME CHARACTERISTICS</b>			
Glow Wire Flammability Index 650°C, passes at	3.2	mm	IEC 60695-2-12

1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colours. All values are measured at least after 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume rate are measured on injection moulded samples. All samples are prepared according to ISO 294.

2) Only typical data for material selection purpose. Not to be used for part or tool design.  
 3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.  
 4) Own measurement according to UL.

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA. All information, recommendation or advice given by General Electric Company USA, or any of its subsidiaries, affiliates or authorized representatives, whether written or oral, is given in good faith, to the best of its knowledge and based on current procedures in effect. Each user of the products shall convince himself, through all available sources (including finished product testing in its appropriate environment) of the suitability of the products supplied for its own particular purpose. Because actual use of the products by the user is beyond the control of General Electric Company, its subsidiaries and affiliates, such use is in the exclusive responsibility of the user. General Electric Company, its subsidiaries and affiliates cannot be held responsible respectively liable for any loss incurred through incorrect or faulty use of the products. Information, recommendations and/or advice are neither made to infringe on any patents, nor to grant a license under any patent or intellectual property right of General Electric Company or any of its subsidiaries or affiliated companies, nor to grant the right to file for any patent protection.



**GE Plastics**

**NORYL GTX® GTX973**  
 Europe-Africa-Middle East: COMMERCIAL

PROCESSING PARAMETERS	TYPICAL VALUE	UNIT
<b>Injection Molding</b>		
Drying Temperature	100 - 120	°C
Drying Time	2 - 3	hrs
Maximum Moisture Content	0.02	%
Melt Temperature	290 - 320	°C
Nozzle Temperature	280 - 310	°C
Front - Zone 3 Temperature	290 - 320	°C
Middle - Zone 2 Temperature	280 - 300	°C
Rear - Zone 1 Temperature	260 - 280	°C
Hopper Temperature	60 - 80	°C
Mold Temperature	80 - 120	°C

1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colours. All values are measured at least after 48 hours storage at 23 °C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume rate are measured on injection moulded samples. All samples are prepared according to ISO 294.

2) Only typical data for material selection purpose. Not to be used for part or tool design.  
 3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.  
 4) Own measurement according to UL.

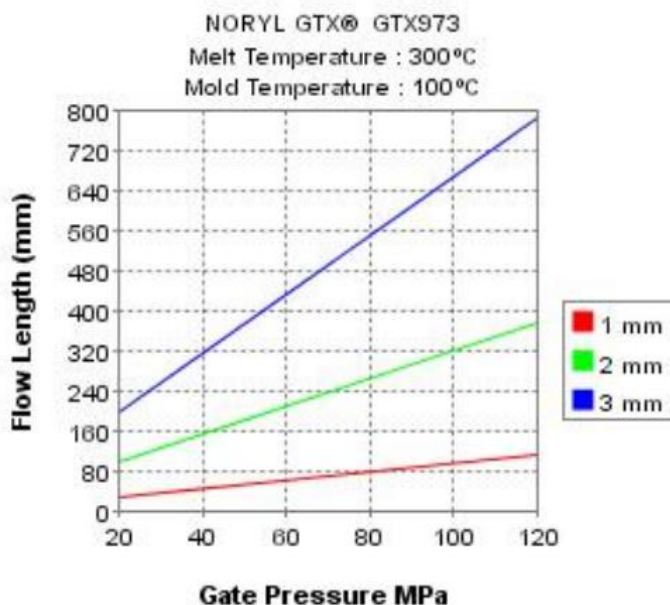
PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA. All information, recommendation or advice given by General Electric Company USA, or any of its subsidiaries, affiliates or authorized representatives, whether written or oral, is given in good faith, to the best of its knowledge and based on current procedures in effect. Each user of the products shall convince himself, through all available sources (including finished product testing in its appropriate environment) of the suitability of the products supplied for its own particular purpose. Because actual use of the products by the user is beyond the control of General Electric Company, its subsidiaries and affiliates, such use is the exclusive responsibility of the user. General Electric Company, its subsidiaries and affiliates cannot be held responsible respectively liable for any loss incurred through incorrect or faulty use of the products. Information, recommendations and/or advice are neither made to infringe on any patents, nor to grant a license under any patent or intellectual property right of General Electric Company or any of its subsidiaries or affiliated companies, nor to grant the right to file for any patent protection.



**GE Plastics**

**NORYL GTX® GTX973**  
 Europe-Africa-Middle East: COMMERCIAL

**CALCULATED FLOW LENGTH INDICATION**  
 Moldflow® Radial Flow Analysis



**Note:** Technical support is recommended if Gate Pressure is greater than 80 MPa. Contact your local representative.

© Moldflow is a registered trademark of the Moldflow Corporation.

1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colours. All values are measured at least after 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume rate are measured on injection moulded samples. All samples are prepared according to ISO 294.

2) Only typical data for material selection purpose. Not to be used for part or tool design.  
 3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.  
 4) Own measurement according to UL.

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA. All information, recommendation or advice given by General Electric Company USA, or any of its subsidiaries, affiliates or authorized representatives, whether written or oral, is given in good faith, to the best of its knowledge and based on current procedures in effect. Each user of the products shall convince himself, through all available sources (including finished product testing in its appropriate environment) of the suitability of the products supplied for its own particular purpose. Because actual use of the products by the user is beyond the control of General Electric Company, its subsidiaries and affiliates, such use is in the exclusive responsibility of the user. General Electric Company, its subsidiaries and affiliates cannot be held responsible respectively liable for any loss incurred through incorrect or faulty use of the products. Information, recommendations and/or advice are neither made to infringe on any patents, nor to grant a license under any patent or intellectual property right of General Electric Company or any of its subsidiaries or affiliated companies, nor to grant the right to file for any patent protection.

## GENERAL

Uddeholm Impax Supreme is a premium-quality vacuum-degassed Cr-Ni-Mo-alloyed steel which is supplied in the hardened and tempered condition, offering the following benefits:

- No hardening risks
- No hardening costs
- Time saving, e.g. no waiting for heat treatment
- Lower tool cost (e.g. no distortion to rectify)
- Modifications easily carried out
- Can be subsequently nitrided to increase surface wear resistance or locally flame hardened to reduce surface damage

Uddeholm Impax Supreme is manufactured to consistently high quality standards with a very low sulphur content, giving a steel with the following characteristics:

- Good polishing and photo-etching properties
- Good machinability
- High purity and good homogeneity
- Uniform hardness

Note: Uddeholm Impax Supreme is 100% ultrasonic tested.

Heavier sections are supplied premachined which offers the following advantages compared with un-machined material:

- Saving of weight
- Non-decarburized surface
- Exact nominal size (plus tolerance)
- Less machining
- Absence of scale minimizes machine and tool wear

Approx. analysis %	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
	0.37	0.3	1.4	2.0	1.0	0.2
Standard spec.	AISI P20 modified					
Delivery condition	Hardened and tempered to 290–330 HB					
Colour code	Yellow/green					

## APPLICATIONS

- Injection moulds for thermoplastics
- Extrusion dies for thermoplastics
- Blow moulds
- Forming tools, press-brake dies (possibly flame hardened or nitrided)
- Aluminium die casting prototype dies
- Structural components, shafts

## PROPERTIES

### PHYSICAL DATA

Hardened and tempered to 310 HB.

Temperature	20°C (68°F)	200°C (390°F)
Density, kg/m <sup>3</sup> lbs/in <sup>3</sup>	7 800 0.282	7 750 0.280
Coefficient of thermal expansion per °C from 20° per °F from 68°F	– –	12.7 x 10 <sup>-6</sup> 7.0 x 10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity W/m °C Btu in/ft <sup>2</sup> h °F	–	28 194
Modulus of elasticity N/mm <sup>2</sup> tsi psi	205 000 13 280 29.7 x 10 <sup>6</sup>	200 000 12 960 29.0 x 10 <sup>6</sup>
Specific heat capacity J/kg °C Btu/lb°F	460 0.110	– –

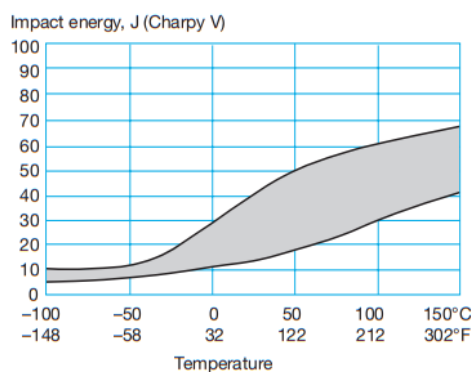
### MECHANICAL PROPERTIES

Impact strength, tensile strength and the compressive strength depends on the hardness in the delivered condition.

#### IMPACT STRENGTH

The energy absorption at impact testing depends on the test material (bar size and delivered hardness), testing temperature and the specimen (type, location, and orientation in the bar).

The graph below shows how the impact energy changes as a function of the test temperature and hardness variation within the delivery hardness range.



## UDDEHOLM IMPAX SUPREME

**TENSILE STRENGTH**

Approx. values. Samples were taken from a flat bar, 90 x 300 mm (3.5" x 11.8").

Hardness: 325 HB.

Testing temperature	20°C (68°F)	200°C (390°F)
Ultimate tensile strength Rm N/mm <sup>2</sup>	1020	930
Yield strength Rp0.2 N/mm <sup>2</sup>	900	800

**COMPRESSIVE STRENGTH**

Compressive yield strength Rc0.2 N/mm <sup>2</sup>	850–1000
--	----------

**HEAT TREATMENT**

Uddeholm Impax Supreme is intended for use in the hardened and tempered condition, i.e. the delivery condition.

When, however, the steel is to be heat treated to a higher hardness or case hardened, the following instructions may be helpful.

**SOFT ANNEALING**

Protect the steel and heat through to 700°C (1300°F). Then cool in the furnace at 10°C (50°F) per hour to 600°C (1110°F), then freely in air.

**STRESS RELIEVING**

After rough machining the tool should be heated through to 550°C (1020°F), holding time 2 hours. Cool slowly to room temperature.

**HARDENING**

Note: The steel should be fully soft annealed before hardening.

Preheating temperature: 500–600°C (930–1110°F).

Austenitizing temperature: 850°C (1560°F).

The steel should be heated through to the austenitizing temperature and held at temperature for 30 minutes.

Protect the tool against decarburization and oxidation during the hardening process.

**QUENCHING MEDIA**

- High speed gas/circulating atmosphere (Only suitable for small dimensions)
- Oil (60–80°C/140–175°F)
- Martempering bath 300°C (570°F) max. 4 minutes, then air

Note: Temper immediately tool reaches 50–70°C (120–160°F).

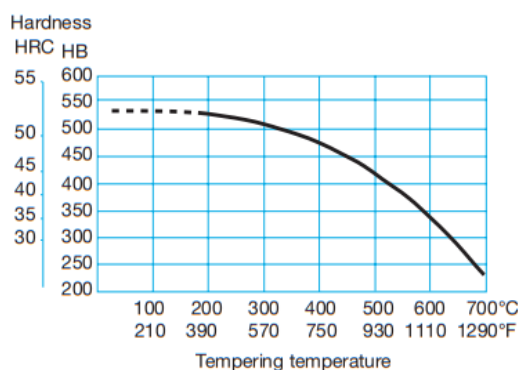
**TEMPERING**

Choose the tempering temperature according to the hardness required by reference to the tempering graph. Temper twice with intermediate cooling to room temperature.

Lowest tempering temperature 180°C (360°F) for small inserts, but preferred minimum is 250°C (480°F). Holding time at temperature minimum 2 hours.

**TEMPERING GRAPH**

The diagram is valid for small samples 15 x 15 x 40 mm (0.6 x 0.6 x 1.6 in.) austenitized 30 min. at 850°C (1560°F), quenched in air and tempered 2 + 2 hours.

**FLAME AND INDUCTION HARDENING**

Uddeholm Impax Supreme can be flame or induction hardened to a hardness of approx. 50 HRC. Cooling in air is preferable.

Further information can be obtained from the Uddeholm Technical Services Report "Flame hardening of Uddeholm Impax Supreme".



## NITRIDING AND NITROCARBURIZING

Nitriding gives a hard surface which is very resistant to wear and erosion. A nitrided surface also increases the corrosion resistance.

For best result the following steps should be followed:

1. Rough machining
2. Stress tempering at 550°C (1020°F)
3. Grinding
4. Nitriding

Following surface hardness and nitriding depths will be achieved after nitriding:

	Temperature		Time h	Surface hardness HV <sub>1</sub>	Depth of case	
	°C	°F			mm	inch
Gas nitriding	525	977	20	650	0.30	0.012
	525	977	30	650	0.35	0.013
Ion- nitriding	480	896	24	700	0.30	0.012
	480	896	48	700	0.40	0.016
Nitrocar- burizing	570	1058	2	700	0.10	0.004

## CUTTING DATA RECOMMENDATIONS

The cutting data below are to be considered as guiding values which must be adapted to existing local conditions.

More information can be found in our technical information "Cutting data recommendations".

### TURNING

Cutting data parameters	Turning with carbide		Turning with high speed steel
	Rough turning	Fine turning	Fine turning
Cutting speed, (v <sub>c</sub> ) m/min f.p.m.	120–170 394–558	170–220 558–722	15–20 49–66
Feed, (f) mm/r i.p.r.	0.2–0.4 0.008–0.016	0.05–0.2 0.002–0.008	0.05–0.3 0.002–0.012
Depth of cut, (a <sub>p</sub> ) mm inch	2–4 0.08–0.16	0.5–2 0.02–0.08	0.5–3 0.02–0.12
Carbide desig- nation, ISO	P20–P30 Coated carbide	P10 Coated carbide or Cermet	–

## DRILLING

### HIGH SPEED STEEL TWIST DRILL

Drill diameter		Cutting speed, (v <sub>c</sub> )		Feed, (f)	
mm	inch	m/min	f.p.m.	mm/r	i.p.r.
–5	–3/16	14–16*	46–52	0.08–0.15	0.003–0.006
5–10	3/16–3/8	14–16*	46–52	0.15–0.25	0.006–0.010
10–15	3/8–5/8	14–16*	46–52	0.25–0.30	0.010–0.012
15–20	5/8–3/4	14–16*	46–52	0.30–0.35	0.012–0.014

\* For coated high speed steel drill v<sub>c</sub> = 24–26 m/min (79–85 f.p.m.)

### CARBIDE DRILL

Cutting data parameters	Type of drill		
	Indexable insert	Solid carbide	Carbide tip <sup>1)</sup>
Cutting speed, (v <sub>c</sub> ) m/min f.p.m.	180–200 600–656	120–150 394–492	60–80 197–262
Feed, (f) mm/r i.p.r.	0.05–0.15 <sup>2)</sup> 0.002–0.006 <sup>2)</sup>	0.08–0.20 <sup>3)</sup> 0.003–0.008 <sup>3)</sup>	0.15–0.25 <sup>4)</sup> 0.006–0.01 <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Drill with replaceable or brazed carbide tip

<sup>2)</sup> Feed rate for drill diameter 20–40 mm (0.8"–1.6")

<sup>3)</sup> Feed rate for drill diameter 5–20 mm (0.2"–0.8")

<sup>4)</sup> Feed rate for drill diameter 10–20 mm (0.4"–0.8")

## MILLING

### FACE AND SQUARE SHOULDER MILLING

Cutting data parameters	Milling with carbide	
	Rough milling	Fine milling
Cutting speed, (v <sub>c</sub> ) m/min f.p.m.	80–150 265–492	150–190 492–623
Feed, (f <sub>t</sub> ) mm/tooth inch/tooth	0.2–0.4 0.008–0.016	0.1–0.2 0.004–0.008
Depth of cut, (a <sub>p</sub> ) mm inch	2–4 0.08–0.16	–2 –0.08
Carbide designation ISO	P20–P40 Coated carbide	P10–P20 Coated carbide or Cermet

**END MILLING**

Cutting data parameters	Milling cutter		
	Solid carbide	Carbide indexable insert	High speed steel
Cutting speed, (v <sub>c</sub> ) m/min f.p.m.	70–110 230–361	80–120 262–394	15–20 <sup>1)</sup> 49–66 <sup>1)</sup>
Feed, (f <sub>z</sub> ) mm/tooth inch/tooth	0.03–0.20 <sup>2)</sup> 0.001–0.008 <sup>2)</sup>	0.08–0.20 <sup>2)</sup> 0.003–0.008 <sup>2)</sup>	0.05–0.35 <sup>2)</sup> 0.002–0.014 <sup>2)</sup>
Carbide designation, ISO	–	P20–P40	–

<sup>1)</sup> For coated high speed steel end mill v<sub>c</sub> = 35–40 m/min (115–131 f.p.m.)

<sup>2)</sup> Depending on radial depth of cut and cutter diameter

**GRINDING**

A general grinding wheel recommendation is given below. More information can be found in the Uddeholm brochure “Grinding of Tool Steel”.

Type of grinding	Wheel recommendation
Face grinding straight wheel	A 46 HV
Face grinding segments	A 24 GV
Cylindrical grinding	A 60 KV
Internal grinding	A 46 JV
Profile grinding	A 100 KV

**WELDING**

Good results when welding tool steel can be achieved if proper precautions are taken during welding (elevated working temperature, joint preparation, choice of consumables and welding procedure). If the tool is to be polished or photo-etched, it is necessary to work with an electrode type of matching composition.

Welding method	TIG	MMA (SMAW)
Working temperature	200–250°C (390–480°F)	200–250°C (390–480°F)
Consumables	IMPAX TIG-WELD	IMPAX WELD
Hardness after welding	300–330 HB	300–330 HB

Further information is given in the Uddeholm brochures “Welding of Tool Steel” and “Uddeholm Impax Weld/TIG-Weld”.

**ELECTRICAL-DISCHARGE MACHINING – EDM**

If spark-erosion, EDM, is performed in the as delivered condition, the tool should then be given an additional temper at approx. 550°C (1020°F). If the steel has been rehardened, the additional tempering temperature should be 25°C (50°F) lower than the last tempering temperature used.

Further information can be obtained from the Uddeholm brochure “EDM of tool steel”.

**HARD-CHROMIUM-PLATING**

After hard-chromium-plating, the tool should be tempered for approx. 4 hours at 180°C (350°F) within 4 hours of plating in order to avoid hydrogen embrittlement.

**PHOTO-ETCHING**

Uddeholm Impax Supreme is particularly suitable for texturing by the photo-etching process. Its very low sulphur content ensures accurate and consistent pattern reproduction.

For heavy sections an extra tempering at 550°C (1020°F) before photo-etching is recommended.

**POLISHING**

Uddeholm Impax Supreme has good polishability in the hardened and tempered condition. After grinding, polishing is undertaken with aluminium oxide or diamond paste.


Note: Each steel grade has an optimum polishing time which largely depends on hardness and polishing technique. Over-polishing can lead to a poor surface finish (e.g. an “orange peel” effect).

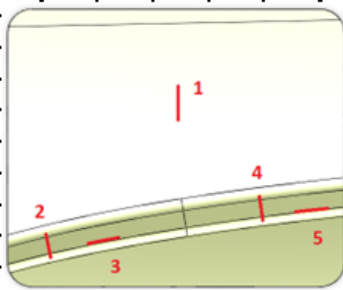
Further information is given in the Uddeholm publication “Polishing of mould steel”.

**FURTHER INFORMATION**

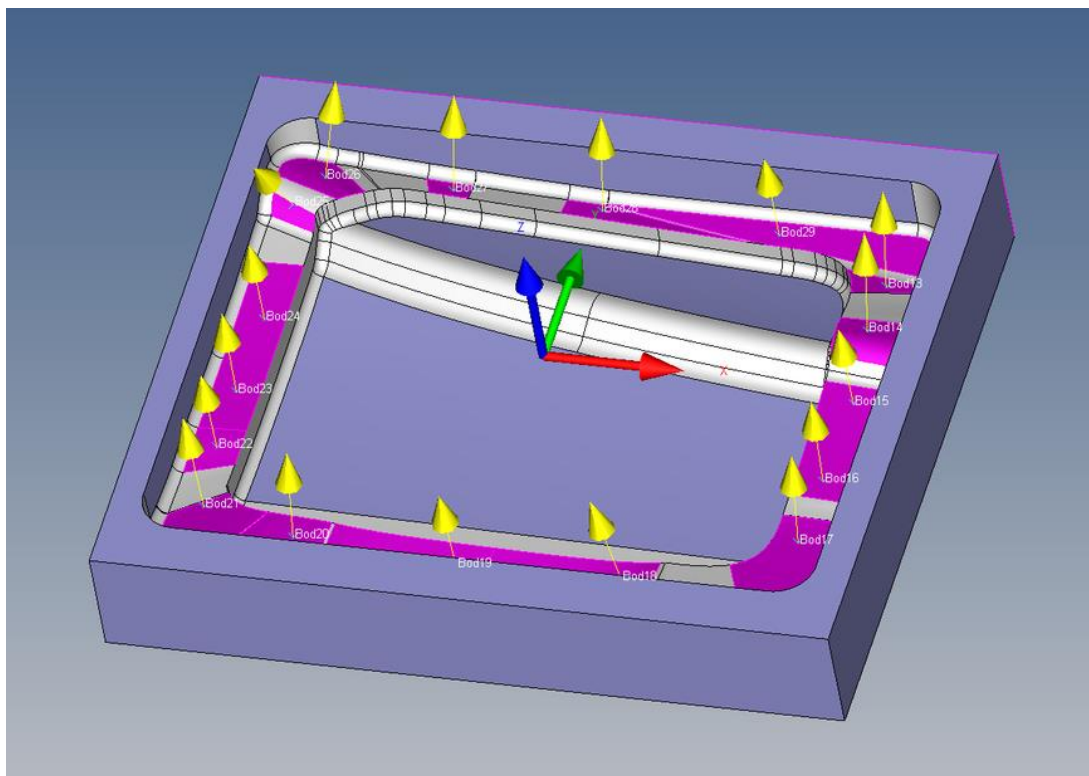
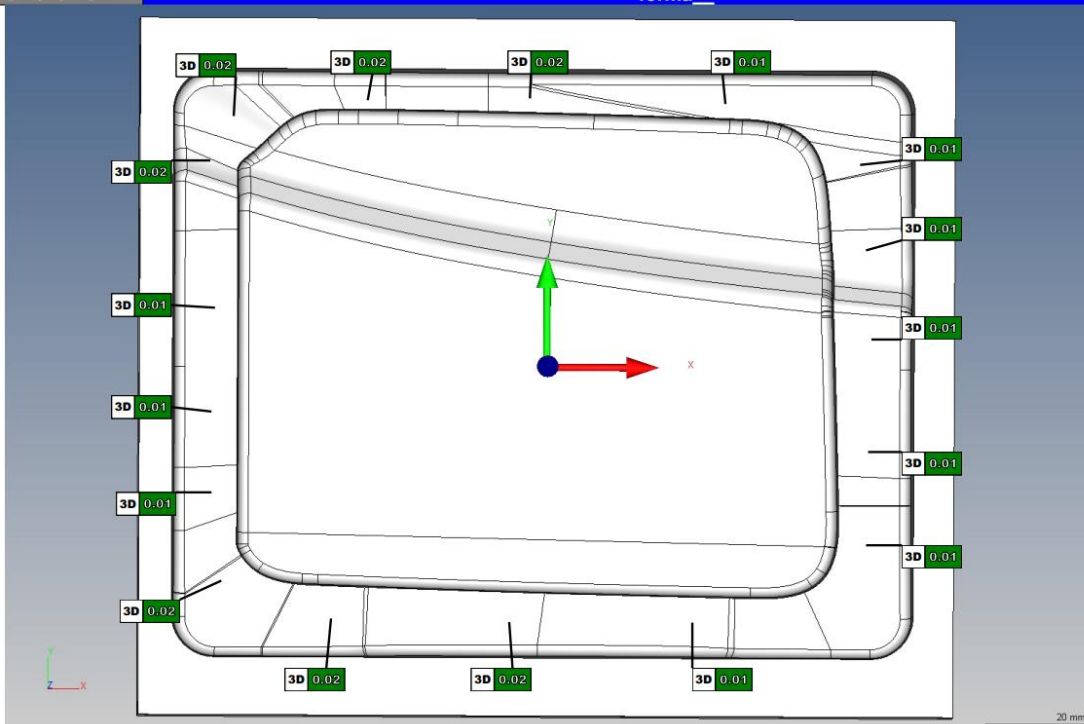
Contact your local Uddeholm office for further information on the selection, heat treatment, application and availability of Uddeholm tool steels, including the publication “Steels for moulds”.

Protokol z merania drsnosti pri testovaní dokončovacích operácií

ITW Automotive OEM <small>Powertrain Plastics. Body &amp; Fuel</small>		Měřicí protokol / Report					CZ 		M19020017					
							Page: 1/1							
Zákazník / Model: N/A		Datum produkce: 12.04.2023					Barva:							
Název dílu: Skúšobná vzorka							Datum měření: 13.4.2023							
Číslo dílu: N/A							Změřil: LP							
Index: N/A							Poznámka:							
Materiál: Impax Supreme							Důvod měření: Kontrola nastavení rezných podmienok							
Pozice	Kavita	Popis	Nominal	Tolerance		Skutečná hodnota (mm)					Odhylka	Hodnocení	Poznámka	Měřidlo
				max.	min.	1	2	3	4	5				
		Vzorka č. 1	0,80	0,00	-0,80	0,78	0,42	0,60	0,59	0,43	-0,02	OK		MarSurf M 400
		Vzorka č. 2	0,80	0,00	-0,80	0,99	0,55	0,42	0,54	0,57	0,19	NOK		MarSurf M 400
		Vzorka č. 3	0,80	0,00	-0,80	0,68	0,40	0,51	0,63	0,63	-0,12	OK	stopy po nástroji v oblasti R2	MarSurf M 400
		Vzorka č. 4	0,80	0,00	-0,80	0,56	0,60	0,34	0,69	0,38	-0,11	OK	stopy po nástroji v oblasti R2	MarSurf M 400

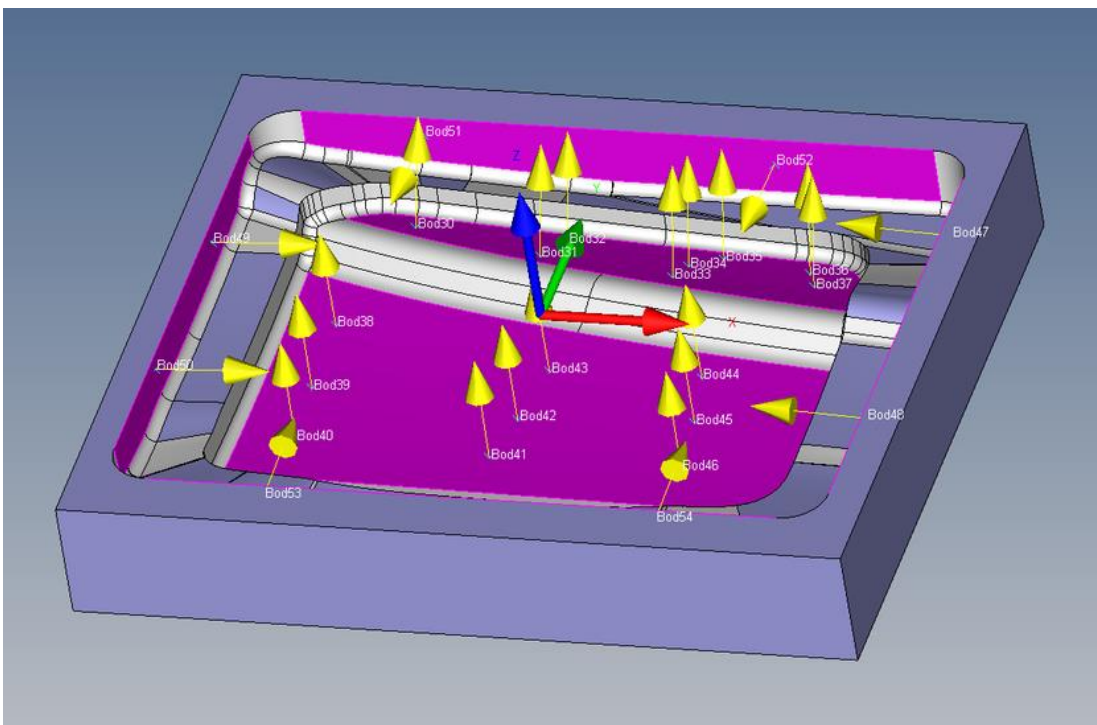
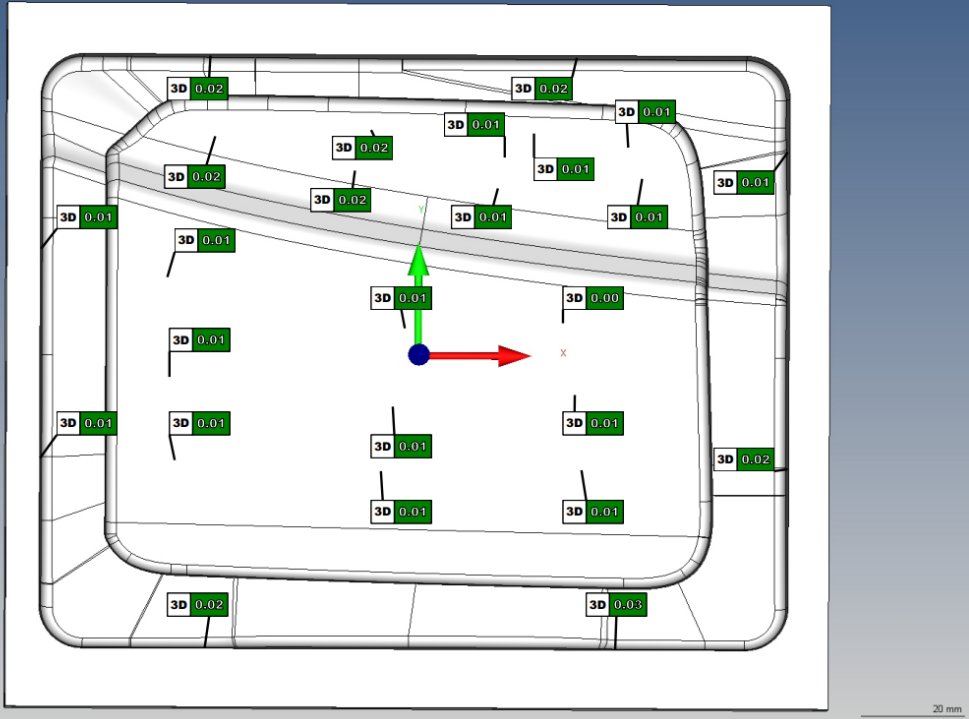


<b>ITW Automotive OEM</b> <small>Powertrain Plastics, Body &amp; Fuel EU</small>	<b>Data:</b> 2023.04.17_forma	<b>Created by:</b>	<b>Page:</b> 1 von 2
	<b>Production:</b>	<b>Request:</b>	<b>Time:</b> 10:48:06
<b>ZEISS</b>	<b>Comment:</b>		<b>Name:</b> #jc
<b>CMM:</b> 501630 -...	<b>Generation:</b>		<b>Operator:</b>
<b>Measurement Plan:</b>	<b>CAD:</b>	<b>Drawing:</b>	




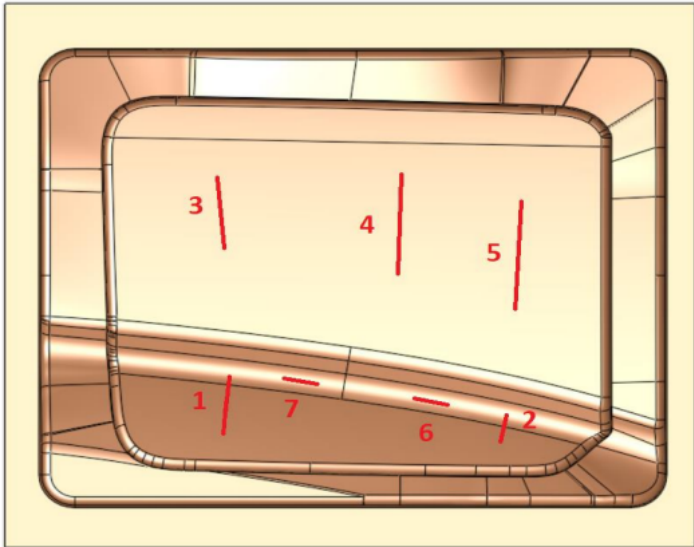
Príloha 4  
Protokol z merania geometrie finálnej vzorky

 Powertrain Plastics, Body & Fuel EU	Data: 2023.04.17_forma	Created by:	Page: 2 von 2
	Production:	Request:	Time: 10:48:06
 CONT_G2	Comment:		Name: #jc
CMM: 501630 -...	Generation:	Drawing:	Operátor:
Measurement Plan:	forma_		





ITW Automotive OEM <small>Powertain Plastics, Body &amp; Fuel</small>		Měřicí protokol / Report					CZ 		M19020017						
		Datum produkce: 12.04.2023							Page: 1/1						
Zákazník / Model: N/A		Datum měření: 17.4.2023													
Název dílu: Finálna vzorka		Barva:													
Číslo dílu: N/A		Datum měření: 17.4.2023													
Index: N/A		Změřil: LP													
Materiál: Impax Supreme		Poznámka:													
Důvod měření: Kontrola nastavenia rezných podmienok															
Pozice	Kavita	Popis	Nominal	Tolerance		Skutečná hodnota (mm)					Odchyľka	Hodnocení	Poznámka	Měřidlo	
				max.	min.	1	2	3	4	5					
1		Meranie Ra	0,80	0,00	-0,80	0,23						-0,57	OK		MarSurf M 400
2		Meranie Ra	0,80	0,00	-0,80	0,38						-0,42	OK		MarSurf M 400
3		Meranie Ra	0,80	0,00	-0,80	0,64						-0,16	OK		MarSurf M 400
4		Meranie Ra	0,80	0,00	-0,80	0,71						-0,10	OK		MarSurf M 400
5		Meranie Ra	0,80	0,00	-0,80	0,39						-0,42	OK		MarSurf M 400
6		Meranie Ra	0,80	0,00	-0,80	0,33						-0,47	OK		MarSurf M 400
7		Meranie Ra	0,80	0,00	-0,80	0,35						-0,45	OK		MarSurf M 400
1		Meranie Rz	3,50	0,00	-3,50	1,33						-2,17	OK		MarSurf M 400
2		Meranie Rz	3,50	0,00	-3,50	1,86						-1,64	OK		MarSurf M 400
3		Meranie Rz	3,50	0,00	-3,50	3,18						-0,32	OK		MarSurf M 400
4		Meranie Rz	3,50	0,00	-3,50	3,14						-0,36	OK		MarSurf M 400
5		Meranie Rz	3,50	0,00	-3,50	1,88						-1,62	OK		MarSurf M 400
6		Meranie Rz	3,50	0,00	-3,50	1,78						-1,72	OK		MarSurf M 400
7		Meranie Rz	3,50	0,00	-3,50	1,91						-1,59	OK		MarSurf M 400
1		Meranie Rmax	4,55	0,00	-4,55	1,51						-3,04	OK		MarSurf M 400
2		Meranie Rmax	4,55	0,00	-4,55	2,77						-1,78	OK		MarSurf M 400
3		Meranie Rmax	4,55	0,00	-4,55	4,45						-0,10	OK		MarSurf M 400
4		Meranie Rmax	4,55	0,00	-4,55	4,03						-0,52	OK		MarSurf M 400
5		Meranie Rmax	4,55	0,00	-4,55	2,89						-1,66	OK		MarSurf M 400
6		Meranie Rmax	4,55	0,00	-4,55	2,10						-2,45	OK		MarSurf M 400
7		Meranie Rmax	4,55	0,00	-4,55	2,19						-2,36	OK		MarSurf M 400



## Východzie rezné podmienky pre obrábanie tvarovej vložky

## Strana chladenia tvarovej vložky

Operácia	Nástroj	D [mm]	z	ap [mm]	ae [mm]	Q [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]	n [min <sup>-1</sup> ]	vc [m.min <sup>-1</sup> ]	Def [mm]	vcef [m.min <sup>-1</sup> ]	vf [mm.min <sup>-1</sup> ]	t [h:m:s]
Zarovnanie čelnej plochy	toroidná	12	4	0,5	4,8	4,44	2300	86,71			1850	0:46:22
Hrubovanie dutiny	toroidná	12	4	0,5	4,8	4,44	2300	86,71			1850	3:19:48
Dohrubovanie dutiny	toroidná	12	4	0,5	4,8	4,44	2300	86,71			1850	1:19:14
Hrubovanie otvoru pre trysku	toroidná	12	4	0,5	4,8	4,44	2300	86,71			1850	0:33:06
Zrazenie hrany na obvode	toroidná	12	4	0,5	4,8	4,44	2300	86,71			1850	0:09:18
Preddokončenie dutiny	toroidná	12	4	0,2	4,8	1,78	2300	86,71			1850	1:11:55
Dokončenie horizontálnych plôch	toroidná	12	4	0,1	0,1	0,02	2300	86,71			1850	2:22:38
Dohrubovanie tvarovej plochy	guľová 230°	8	4	0,2	0,14	0,06	4500	113,10	2,50	35,31	2142	1:24:13
Dokončenie tvarovej plochy	guľová 230°	8	4	0,1	0,1	0,01	4500	113,10	1,78	25,13	1100	5:10:00
Dokončenie zrazenej hrany	toroidná	12	4	0,1	0,1	0,02	2300	86,71			1850	0:35:58
Dokončenie otvoru pre trysku	toroidná	12	4	0,1	0,1	0,02	2300	86,71			1850	1:26:44

Σ t = 18:19:16

## Pohľadová strana tvarovej vložky

Operácia	Nástroj	D [mm]	z	ap [mm]	ae [mm]	Q [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]	n [min <sup>-1</sup> ]	vc [m.min <sup>-1</sup> ]	Def [mm]	vcef [m.min <sup>-1</sup> ]	vf [mm.min <sup>-1</sup> ]	t [h:m:s]
Zarovnanie čelnej plochy	toroidná	12	4	0,5	4,8	4,44	2300	86,71			1850	2:08:50
Hrubovanie dutiny	toroidná	12	4	0,5	4,8	4,44	2300	86,71			1850	3:43:09
Dohrubovanie dutiny	toroidná	12	4	0,25	4,8	2,22	2300	86,71			1850	0:55:59
Preddokončenie dutiny	guľová 230°	8	4	0,3	0,14	0,05	4000	100,53	3,04	38,20	1200	2:53:30
Dokončenie dutiny	guľová 230°	8	4	0,1	0,1	0,01	4000	100,53	1,78	22,34	1200	9:12:05
Zrazenie hrany na obvode	toroidná	12	4	0,2	1	0,18	1600	60,32			900	0:39:21
Dočistenie celého modelu	guľová 230°	6	4	0,1	0,1	0,01	6600	124,41	1,54	31,85	1300	0:54:32

Σ t = 20:27:26

## Nový návrh rezných podmienok pre obrábanie tvarovej vložky

## Strana chladenia tvarovej vložky

Operácia	Nástroj	D [mm]	z	ap [mm]	ae [mm]	Q [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]	n [min <sup>-1</sup> ]	vc [m.min <sup>-1</sup> ]	Def [mm]	veef [m.min <sup>-1</sup> ]	vf [mm.min <sup>-1</sup> ]	t [h:m:s]
Zarovnanie čelnej plochy	toroidná	12	4	10	0,84	32,05	8162	307,70			3816	0:29:54
Hrubovanie dutiny	toroidná	12	4	10	0,84	32,05	8162	307,70			3816	1:00:38
Hrubovanie otvoru pre trysku	toroidná	12	4	10	0,84	32,05	8162	307,70			3816	0:03:15
Zrazenie hrany na obvode	toroidná	12	4	10	0,84	32,05	8162	307,70			3816	0:02:45
Hrubovanie otvoru pre vtok (po profile)	toroidná	12	4	zanáranie 1°		-	8162	307,70			3816	0:01:12
Dohrubovanie tvarových plôch	guľová	8	4	0,3	3,2	1,44	5000	125,66	3,04	47,75	1500	0:51:34
Vrtanie dier pre závitové tyče	vrták	8					1200	30,16			50	0:03:51
Vrtanie dier pre imbusové skrutky	vrták	8					1200	30,16			50	0:03:13
Dokončenie horizontálnych plôch	toroidná	12	4	0,3	0,84	0,96	8162	307,70			3816	0:04:57
Dokončenie otvoru pre trysku	toroidná	12	4	0,1	0,1	0,04	8162	307,70			3816	0:07:15
Preddokončenie tvarových plôch	toroidná	12	4	0,4	3	4,58	8162	307,70			3816	0:21:42
Dokončenie hrany na obvode	guľová	8	4	-	0,32	-	5400	135,72	-	-	1780	0:15:51
Preddokončenie tvarových plôch	guľová	8	4	0,2	0,2	0,07	5400	135,72	2,50	42,38	1780	0:23:29
Dokončenie tvarových plôch	guľová	8	4	0,2	0,2	0,20	5400	135,72	2,50	42,38	1780	1:35:33
Dokončenie rohu R3,5	guľová	6	2	0,2	0,2	0,06	6800	128,18	2,15	46,02	1600	0:04:29

Σ t = 5:29:38

## Pohľadová strana tvarovej vložky

Operácia	Nástroj	D [mm]	z	ap [mm]	ae [mm]	Q [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]	n [min <sup>-1</sup> ]	vc [m.min <sup>-1</sup> ]	Def [mm]	veef [m.min <sup>-1</sup> ]	vf [mm.min <sup>-1</sup> ]	t [h:m:s]
Zarovnanie čelnej plochy	toroidná	12	4	10	0,84	32,05	8162	307,70			3816	0:29:54
Hrubovanie dutiny	toroidná	12	4	10	0,84	32,05	8162	307,70			3816	1:06:15
Zrazenie hrany na obvode	toroidná	12	4	10	0,84	32,05	8162	307,70			3816	0:01:06
Dohrubovanie dutiny	guľová	8	4	0,3	3,2	1,49	5000	125,66	3,04	47,75	1550	1:16:25
Hrubovanie vtokovej drážky	guľová	6	2	0,2	0,2	0,06	6900	130,06	2,15	46,69	1550	0:04:55
Preddokončenie dutiny	guľová	6	2	0,2	2,4	0,77	6900	130,06	2,15	46,69	1600	1:27:21
Dokončenie tvármiacich plôch	guľová	6	2	0,2	0,2	0,05	6800	128,18	2,15	46,02	1200	2:41:56
Dokonč. centrovacích, nefunkčných a deliacich plôch	guľová	6	2	0,2	0,14	0,04	6800	128,18	2,15	46,02	1600	2:25:07
Dokončenie zrazennej hrany	guľová	8	4	-	0,3	-	5000	125,66	-	-	1600	0:02:20
Dokončenie drážky	guľová	6	2	0,2	0,14	0,05	6800	128,18	2,15	46,02	1650	0:10:58
Čistenie rohu R2	guľová	4	2	0,1	0,1	0,01	9100	114,35	1,25	35,71	1200	0:24:27

Σ t = 10:10:44



