

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Strojní inženýrství

Výrobní a materiálové inženýrství

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Diplomová práce

Vývoj a výroba součásti hydroformingového lisu

Vypracoval: Bc. Ondřej Vejmělek

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Praha 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....

Datum

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Zdenku Pitrmucovi za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování diplomové práce. Rovněž patří můj dík rodině za podporu při studiu a tvorbu potřebného zázemí. Děkuji také přítelkyni za její podporu.

Vývoj a výroba součásti hydroformingového lisu

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj technologie výroby součásti do hydroformingového lisu. V rešeršní části je stručný popis technologie hydroformingu a použitelných nástrojových ocelí. Praktická část se zabývá návrhy technologie výroby dané součásti, programováním v softwaru Powermill 2019 a následnou výrobou součásti na zařízeních v prostorách ČVUT fakulty strojní.

Klíčová slova

Hydroforming, Hydroforming trubek, Powermill, Maraging, Nástrojová ocel, technologie tváření, NX12, Hypermill

Development and manufacturing of hydroforming press component

Summary

This master thesis deals with the proposal production of the hydroforming press. In the theoretical part there is a brief description of the hydroforming technology and of the usable tool steels. The practical part deals with the technology design of the component, programming using the Powermill 2019 software and the subsequent production of components in the facilities at the Faculty of Mechanical Engineering of ČVUT.

Key words

Hydroforming, hydroforming of the pipes, Powermill, Maraging, tool steel, forming technology, NX12, Hypermill

Použité zkratky, symboly a jednotky

CNC - Computer Numeric Control - počítačové číslicové řízení

HRC – jednotka pro zkoušku tvrdosti podle Rockwella

NX12 – software pro návrh, simulaci a výrobu

PVD - Physical Vapour Deposition - fyzikální nanášení povlaků

Obsah

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE	1
Úvod.....	9
1. Hydroforming	10
1.1. Technologie tváření na hydroformingovém lisu.....	10
1.2. Tváření trubek pomocí hydroformingu	11
1.3. Tváření plechů pomocí hydroformingu.....	14
1.4. Výhody a nevýhody hydroformingu	20
2. Definice provozních požadavků na součást.....	21
2.1. Analýza výkresové dokumentace a modelu	22
3. Moderní nástrojové materiály	24
3.1. Nástrojová ocel 19 573 (1.2379)	24
3.2. Maraging oceli.....	25
4. Návrh a zpracování technologie výroby	27
4.1. Výroba polotovaru pro návrhy	27
4.2. Návrh	29
4.3. Koncept kavity v Powermillu	31
4.4. První verze kavity.....	35
4.5. Druhá verze kavity	39
4.6. Třetí verze kavity.....	42
4.7. Čtvrtá verze kavity.....	46
4.8. Pátá verze kavity.....	50
4.9. Šestá verze kavity	53
4.10. První verze celé součásti s pátou verzí kavity.....	57
4.11. Druhá verze celé součásti s šestou verzí kavity.....	63
5. Výroba dle navržené technologie.....	68
Závěr.....	75
Použitá literatura	77

Úvod

Vývoj je nedílnou součástí našich životů. Doprovází nás již miliony let a je všude okolo nás. Je to proces změny ze stávajícího stavu do stavu nového, lepšího, ekonomičtějšího, produktivnějšího a mnoho dalšího. Při tomto procesu získáváme nové poznatky a dovednosti. V průmyslovém odvětví tyto zkušenosti využijeme pro vývoj nových výrobků, nebo k podstatnému zdokonalení stávajících výrobků či postupů. Při vývoji se často vytváří prototypy v laboratorním prostředí, kde se zjišťuje, jak bude vypadat příslušná technologie.

V mé diplomové práci se zabývám vývojem a výrobou součástí hydroformingového lisu. Věnuji se také technologii tváření stlačenou kapalinou, kde je součást využita. Definuji provozní požadavky součásti, ve kterých pracuje a kterým musí odolávat. Provozní požadavky navazují na nástrojové materiály použitelné pro technologii hydroformingu. Po analýze součásti, získání informací o technologii hydroformingu a nástrojových materiálech navrhuji vhodné varianty technologie výroby pro danou součást. Z těchto různých návrhů použiji jednu variantu s vhodným materiálem, technologií výroby a tepelným zpracováním. Na závěr součást podle navržené technologie vyrobím v prostorách ČVUT fakulty strojní.

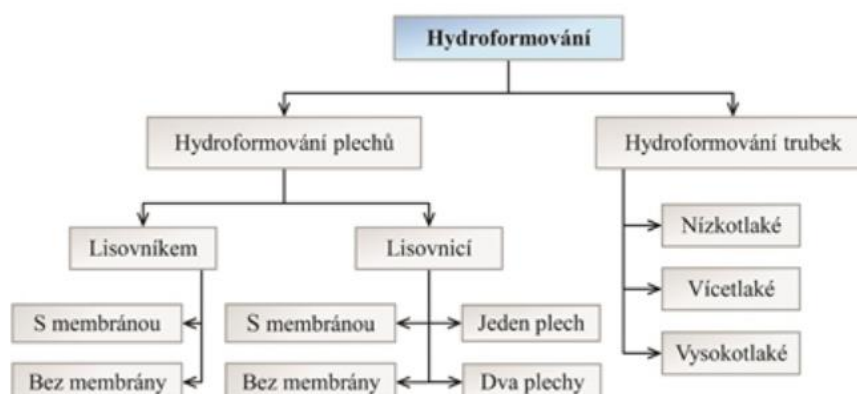
1. Hydroforming

První stroj fungující na principu hydroformingu vznikl v padesátých letech 20. století ve společnosti Cincinnati Milling Machine Company, kterou založil Geiger a Holtz v roce 1889. Tento stroj se používal pro hluboké tažení dílů, jako jsou reflektory osvětlení a kryty převodovek.[1]

1.1. Technologie tváření na hydroformingovém lisu

Hydroforming je metoda plošného tváření, kde dochází k přetvoření polotovaru do požadovaného tvaru s využitím tlaku kapaliny oproti pevnému nástroji jako u hlubokého tažení. Díky kapalině je rovnoměrněji rozložen tlak po celém povrchu tvářené součásti. Tudiž lze touto technikou docílit komplikovanějších tvarů lisovaných součástí s větší pevností a nižšími náklady na výrobu. Vyplývá to z redukce počtu výrobních operací. Jedná se většinou pouze o založení polotovaru do nástroje, uzavření v nástroji a vpuštění tlaku kapaliny, která polotovar zformuje. Je možnost např. vytvořit otvory v jednom kroku s hlavní tvářecí operací, když je polotovar pod tlakem kapaliny.[2],[3],[4]

Čím větší formovací tlak, tím větší přetvoření materiálu. Pro tváření pomocí kapaliny se často používají materiály s vyšší tažností. Také slitiny hliníku, mědi, hořčíku a korozivzdorné chromniklové oceli. Metody hydroformingu se dělí na dvě hlavní části, technologie hydroformování plechů a hydroformování trubek. [2],[3],[4]



Obr. 1: Základní rozdělení hydroformovacích metod[12]

1.2. Tváření trubek pomocí hydroformingu

Na tváření trubek pomocí hydroformingu lze použít mnoho druhů trubkových polotovarů. Mezi nejznámější patří trubky bezešvé a švové, ale lze použít i trubky svařené do různých tvarů a rozměrů z nejrůznějších materiálů. Při hydroformování se používají přídatné součásti, jako jsou axiální lisovníky, nebo boční nástroje. Hydroformování trubek dělíme podle použitého tlaku kapaliny v procesu tváření na nízkotlaké, vícetlaké a vysokotlaké.[5]

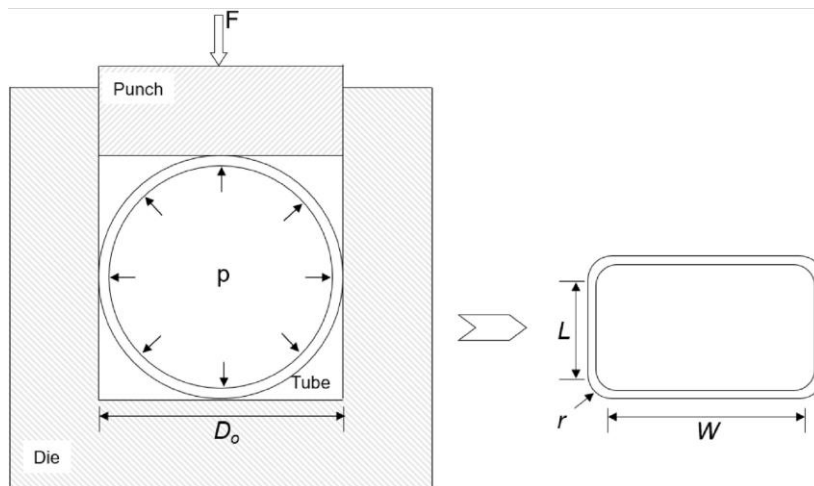


Obr. 2: Tvarované trubky do automobilu pomocí hydroformingu [13]

1.2.1. Nízkotlaké tváření pomocí hydroformingu

Za nízkotlaké tváření pomocí hydroformingu je označován princip, kde kapalina slouží jako doprovodný pomocník při tváření. Rovnoměrně působící kapalina na povrch tvářené součásti zamezuje borcení materiálu při tváření a zaručuje stejnou tloušťku materiálu po celé ploše. Pro tyto schopnosti je potřeba udržet stálý objem kapaliny uvnitř tvářeného polotovaru.

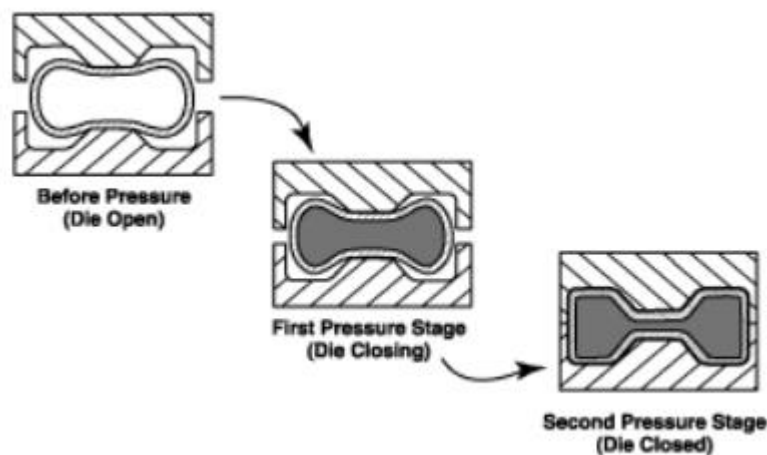
Sevřením nástroje dojde k navýšení tlaku kapaliny, který slouží ke kalibraci rozměrů a zlepšení kvality povrchu.[6]



Obr. 3: Hydroformování nízkotlakých trubek [14]

1.2.2. Vícetlaké tváření pomocí hydroformingu

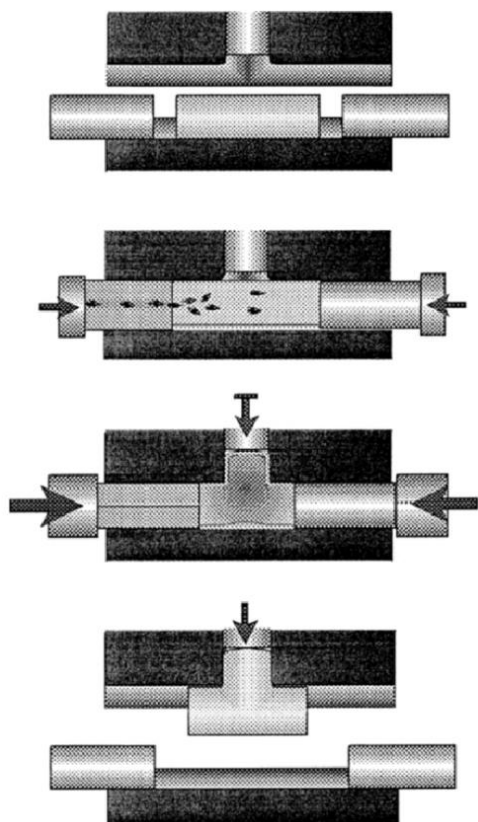
Vícetlaké tváření pomocí hydroformingu je založeno na podobném principu jako tváření nízkotlaké. Hlavní rozdíl je v poslední fázi, kdy je u vícetlakého tváření navýšen tlak na kalibrační až po sevření nástroje. Navýšený tlak může sloužit ke sloučení tvářecích operací. Mezi tvářecí operace patří děrování, stříhání a jiné. Sloučení těchto operací do jedné zaručuje lepší přesnost z hlediska polohy na vyhotovené součásti. Touto metodou se zhotovují složitější součásti, u kterých by následné operace byly zbytečně namáhavé na upínání. Aby přídatné operace mohly být uskutečněny, je zapotřebí mít v lisovnici střížné, nebo jiné nástroje. Pro lisování tenkostěnných a tvarově náročných dílů používáme lisovnici složenou z více částí. U této metody chceme co nejvíce minimalizovat změny tloušťky stěn.[3]



Obr. 4: Kroky hydroformování vícetlakým způsobem tváření [15]

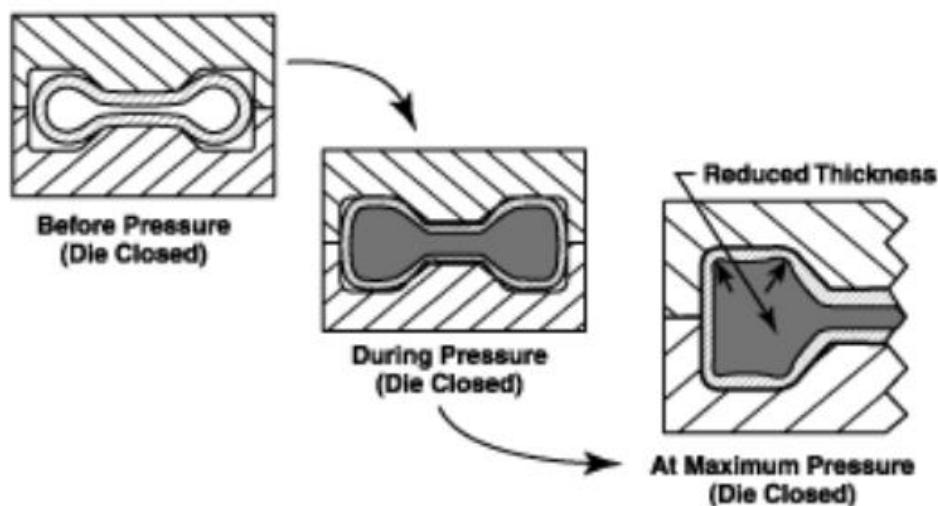
1.2.3. Vysokotlaké tváření pomocí hydroformingu

Vysokotlaké tváření umožňuje díky vysokému tlaku v závislosti na materiálu



přetvářet polotovary do jeho maximálního přetvoření. Při této metodě dochází k výrazně většímu ztenčení stěn. Při vysokém tlaku se zvyšuje pevnost dílců a zmenšuje velikost odpružení. Pro tuto metodu je kvůli vysokému tlaku zapotřebí používat odolnější nástroje. Při tváření jsou konce polotovaru dotlačovány do nástroje pomocí lisovníků poháněných písty. Při tváření a dotlačování je nutné používat maziva pro zmenšení tření. Touto metodou se často vyrábějí různé typy tvarovek.[3]

Obr. 5: Trubkový hydroformovací systém [16]



Obr. 6: Kroky v tradičním vysokotlakém hydroformování [15]

1.3. Tváření plechů pomocí hydroformingu

Pomocí hydroformingu můžeme tvářet plechové součásti z jednoho, nebo ze dvou kusů plechů v jedné formě. Plechy tváříme hydroformováním lisovníkem, nebo lisovnicí. Při tváření lisovníkem hraje kapalina roli pomocnou, nebo může sama vlivem tlaku přetvářet polotovary podle tvaru lisovnice. Vytvarované plechy se pak používají například do automobilového průmyslu na výrobu dílů, na nádrže motocyklů, výfuky a jiné.[4]



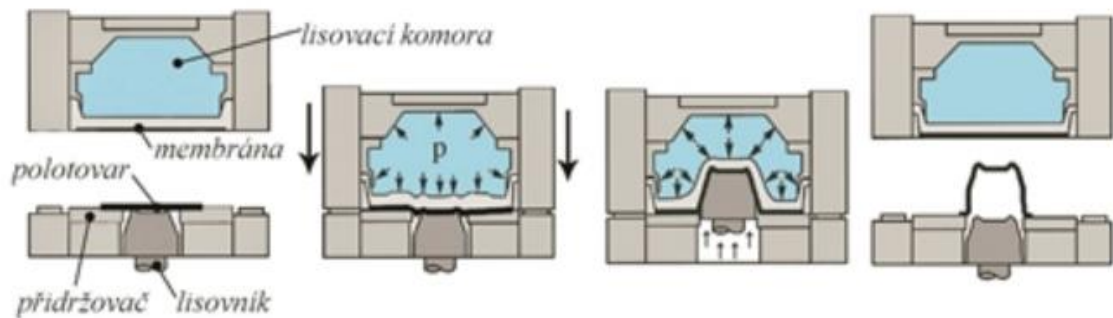
Obr. 7: Příklady tvarových skupin dílců hydroformování plechů [12]

1.3.1. Tváření plechů hydroformováním lisovníkem

Při tomto tváření se používá nástroj nazývaný lisovník. Jeho úkolem je stlačit plech do lisovací komory. Tato komora může být opatřena membránou, která snižuje opotřebení polotovaru. Zvýšením tlaku kapaliny uvnitř lisovací komory dochází k vytvarování plechu podle tvaru lisovníku. Úpravou tlaku kapaliny můžeme tento proces regulovat.[8]

Metoda Hydroform

V této metodě se polotovar z plechového přístřihu vkládá do spodního přidržovače. Vrchní část nástroje s membránou dosedne na polotovar a v lisovací komoře se zvýší tlak kapaliny. Lisovník se pohybuje směrem do lisovací komory, následně se v komoře zvýší tlak kapaliny a dojde k přetvoření polotovaru přesně podle tvaru lisovníku. Vrchní část nástroje a lisovník se vrátí do původní polohy a poté můžeme vyjmout hotový díl. Polotovar a membránu je kvůli tření lepší namazat.[8]



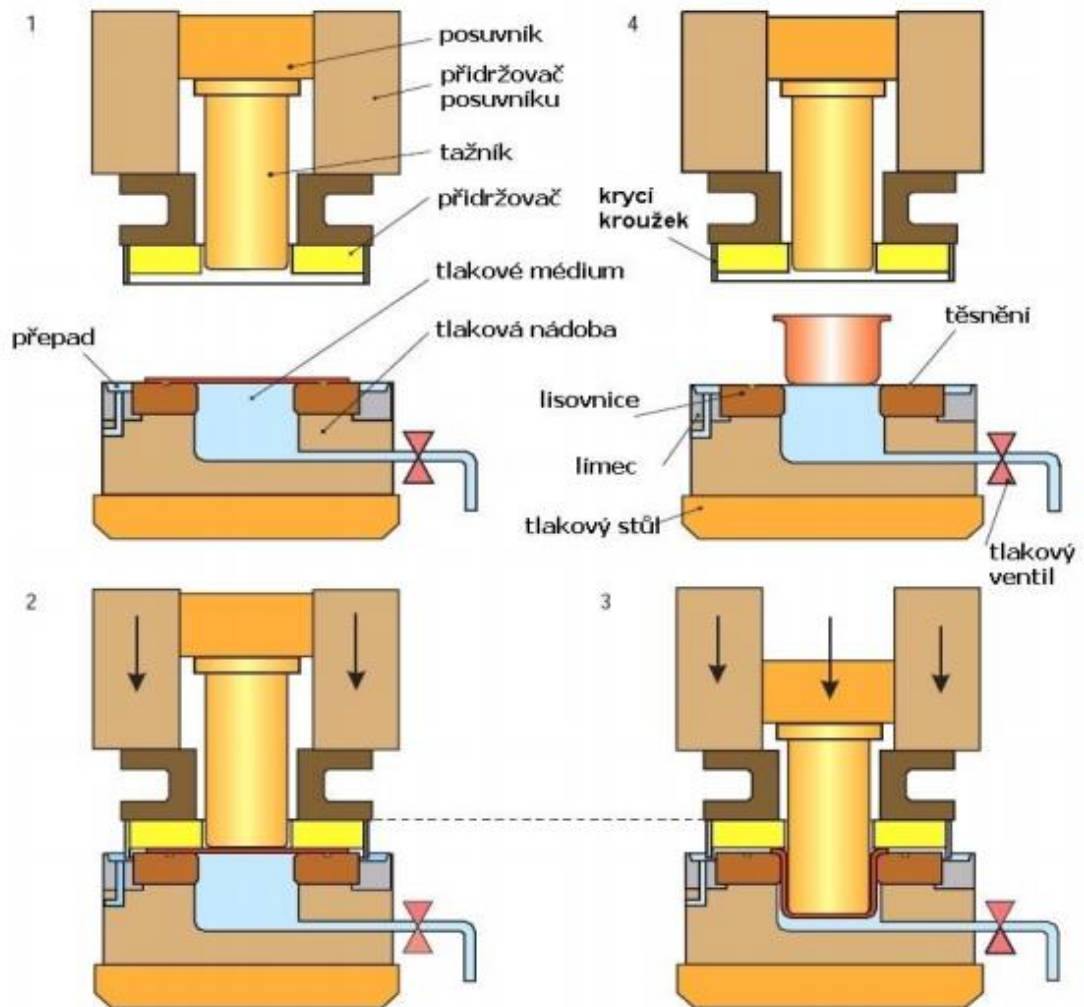
Obr. 8: Princip tváření metodou hydroform [12]

Metoda ASEA

Tato metoda je principem podobná metodě hydroform. Spodní část nástroje obsahuje lisovník, který je zespodu ovládán tlakem kapaliny. Na spodní část rámu se vkládá polotovár, který je při sevření přidržován vrchním rámem. Vrchní rám se skládá z lisovací komory naplněné kapalinou a pístu, který na komoru ze shora tlačí. Lisovací komora je naplněna kapalinou a utěsněna membránou. Touto metodou lze přetvářet polotovary různých tloušťek, ale za delší pracovní čas.[8]

Metoda hydromechanického tváření

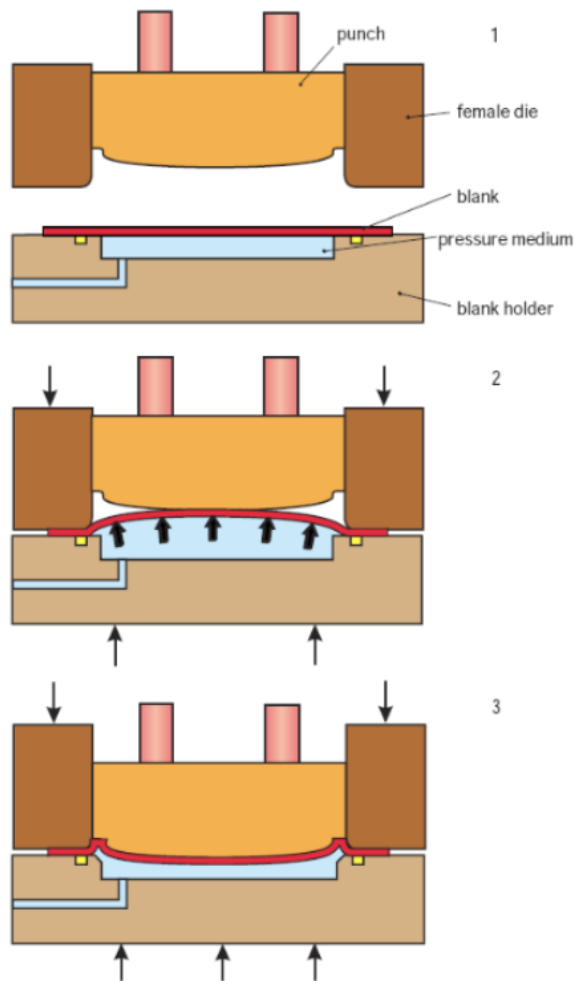
Nástroj používaný pro tuto metodu se skládá z tažníku, přidržovače, nádrže s kapalinou, regulátoru tlaku, pryžových vložek a lisu. Nepoužívá se zde membrána, proto zde musí být drážky pro odvod prosakující kapaliny. Po uzavření nástroje se zvýší tlak v dolní části nástroje. Polotovár zcela dosedne na tažník, který se následně pohybuje směrem dolů. Díky tlakům kapaliny, které působí na tažník, dojde k dokonalému obepnutí polotovaru kolem tažníku. Během tváření se tlak kapaliny reguluje ventilem tak, aby po celou dobu zůstal tlak stejný. Na konci tváření je možné tlak navýšit, aby se vytvarovaly i menší detaily a zpevnil se materiál. Výhodou této metody, díky absenci membrány, je použití protipístu. Protipíst napomáhá při tváření křehkých nebo tenkých materiálů.[8]



Obr. 9: Hydromechanické tažení [17]

Metoda aktivního hydromechanického tažení

Tato metoda funguje na podobném principu jako metoda hydromechanického tváření, jen s tím rozdílem, že při sevření nástroje jako první tlačí na polotovar kapalina zdola a až poté klasickým hydromechanickým tažením působí píst z vrchní části nástroje. K utěsnění slouží přidržovač s těsníci součástmi. Kvůli utěsnění polotovaru je po skončení tváření nutné odštípnout přírubu, která zůstane pod přidržovačem. Takto zhotovené výlisky mají větší tvarovou přesnost a lepší jakost povrchu.[8]



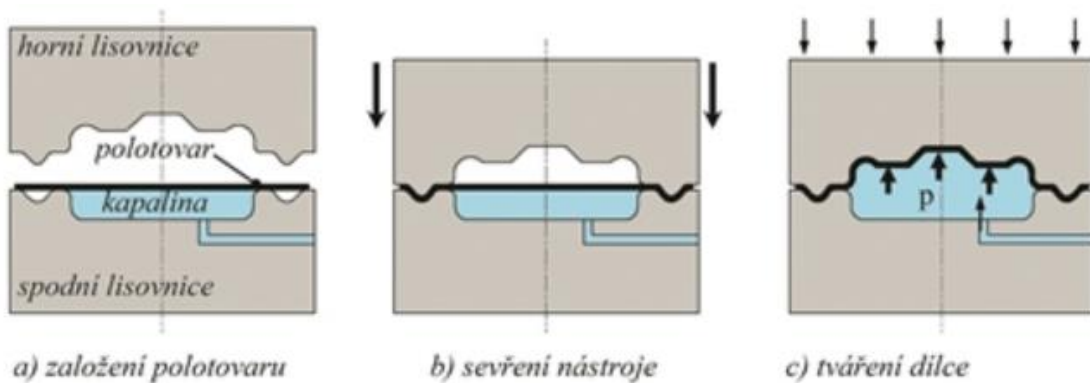
Obr. 10: Proces aktivního hydromechanického tažení [18]

1.3.2. Tváření plechů hydroformováním lisovnicí

Tváření plechů pomocí lisovnice patří mezi nejpoužívanější a cenově dostupnější metody. Hlavními součástmi nástroje je lisovnice, která má tvar budoucího vylisku a tlaková komora. Tlaková komora je naplněna kapalinou, která je jedinou aktivní součástí nástroje.[9],[10],[11]

Metoda tváření tlakem kapaliny

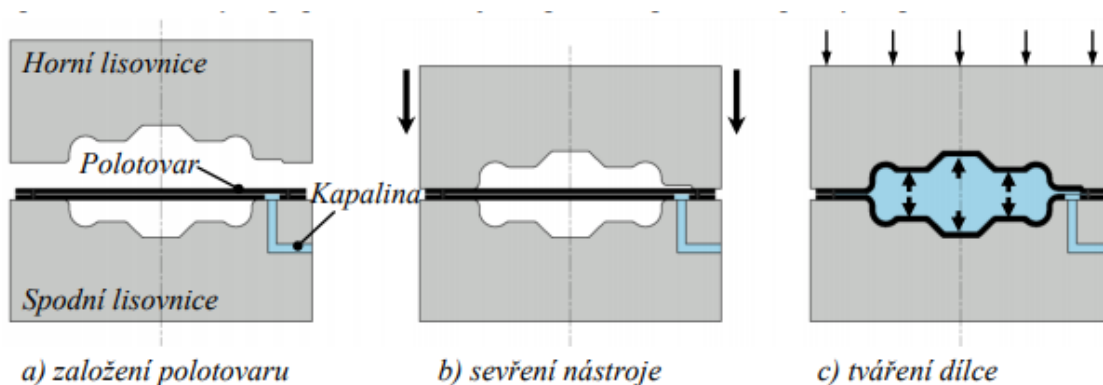
K tváření zde využíváme tlaku kapaliny, která působí na polotovár. Polotovár je založen do dolní části nástroje a horní část nástroje jej sevře. Pod tlakem kapaliny vznikne tvar podle tvaru lisovnice. Vlivem vyšších tlaků kapaliny vzniká mezi vrchní a spodní částí nástroje přidržovací síla. V této metodě je nutné vyvinout tuto sílu dostatečně velkou.[9],[10],[11]



Obr. 11: Princip tváření tlakem kapaliny [12]

Metoda paralelního hydroformování

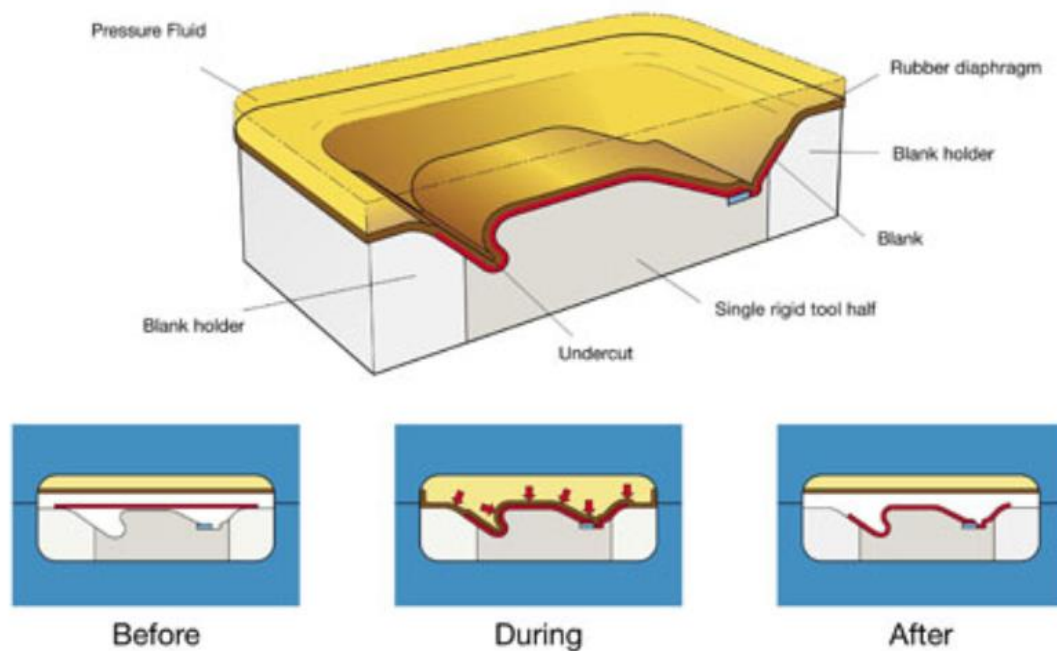
Metoda při které jsou tvářeny dva plechy. Využívá se pro výrobu složitých dutých součástí. Nástroj se skládá ze dvou lisovnic, mezi které vkládáme plechové polotovary. Polotovary mohou být pro správnou těsnost svařeny po obvodu. Po sevření polotovaru lisovnicemi, je do prostoru mezi nimi přivedena pod tlakem kapalina. Oba plechy se vytvarují podle příslušné lisovnice. Kapalínu přivádíme mezi plechy pomocí šroubení, které se po zhotovení výlisku odstraní, nebo ponechá. Ponechané slouží například jako výpustný kohout u nádrže auta. Při tváření touto metodou mohou před finální kalibrací probíhat různé operace, jako je stříhání konců výlisků u přidržovače, nebo svaření obou konců plechů do požadovaného tvaru.[9],[10],[11]



Obr. 12: Princip tváření metodou paralelního hydroformování [19]

Metoda Flexform

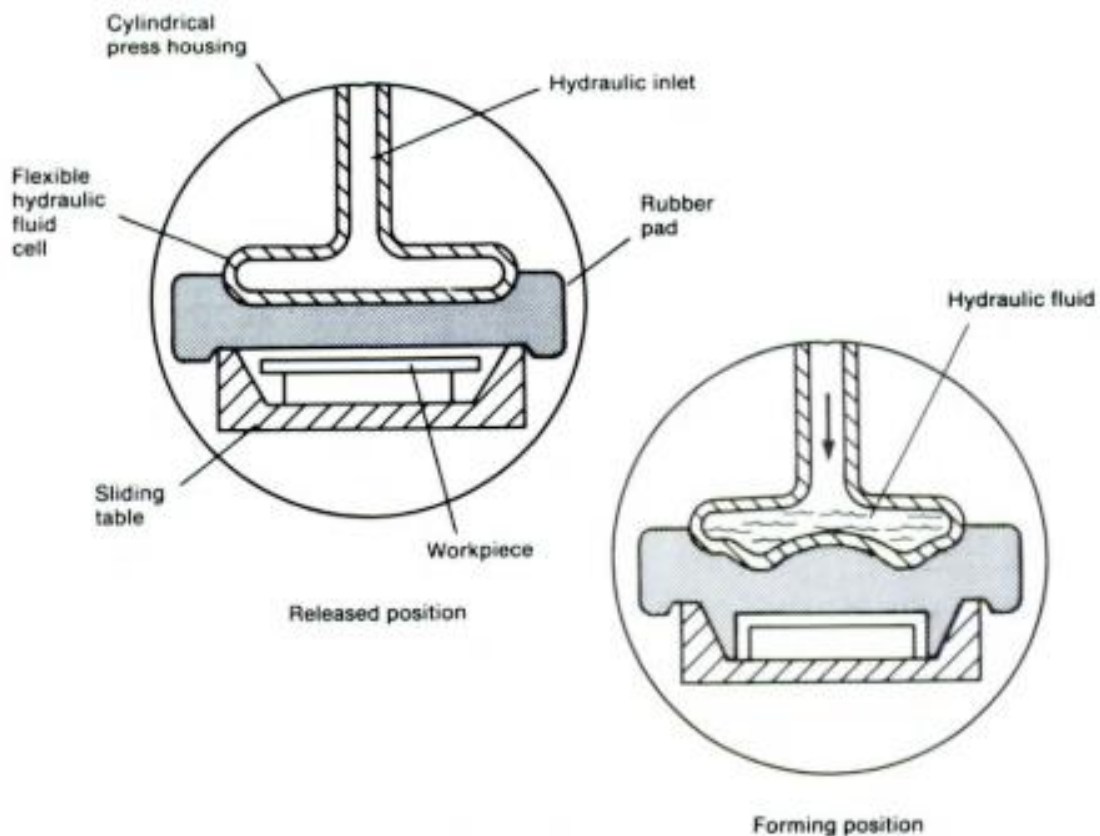
Metoda Flexform využívá pro přetvoření polotovaru tlak kapaliny. Nástroj je složený z pryžové membrány a dělené lisovnice. Lisovnice je dělená, aby se hotový výlisek složitých tvarů dal z formy lehce vyjmout. Pryžová membrána musí být odolná vůči vyšším tlakům, vznikajících vlivem malých rádiusů. Vyrábí se takto především díly, kde je potřeba vytvarovat v jedné operaci složité tvary s malými rádiusy, nebo různými otvory.[9],[10],[11]



Obr. 13: Princip metody Flexform [20]

Metoda Wheelon

V metodě Wheelon je zapotřebí základna, spodní nástroj, polotovar, gumová přepážka, gumová membrána a tlakové médium. Na základnu se položí nástroj a na něj polotovar. Nástroj určuje tvar budoucí součásti. Gumová přepážka slouží k prodloužení životnosti membrány. Na membránu tlačí kapalné médium, tím dojde k vyvinutí tlaku přepážky na polotovar, který se vytvaruje podle nástroje pod ním. Velkou výhodou je krátký výrobní čas, jednoduchá automatizace a možnost vyrábět rozměrově podobné polotovary na jednom stroji.[9],[10],[11]



Obr. 14: Princip metody Wheelon [21]

1.4. Výhody a nevýhody hydroformingu

Hydroforming jako takový má mnoho kladných vlastností. Redukuje počty tvářecích operací i operací následujících po tváření. Jeho jednodušším složením nástrojů klesá cenová náročnost výroby. Technologií hydroformingu můžeme provádět více operací na jedno upnutí, čímž zvyšujeme rozměrovou přesnost. Díky kapalině, která tlačí na povrch tvářeného dílu stejným tlakem po celé ploše, má zhotovený díl kvalitnější povrch. S rostoucím tlakem kapaliny, která stlačuje polotovar, dochází ke zpevnění materiálu. Každá technologie má své pro a proti. U hydroformingu je to nedokonalá těsnost při tváření, hlavně bez membrány a delší výrobní časy. Na nástroje a zařízení musíme používat materiály, které odolávají vyšším silovým podmínkám.

2. Definice provozních požadavků na součást

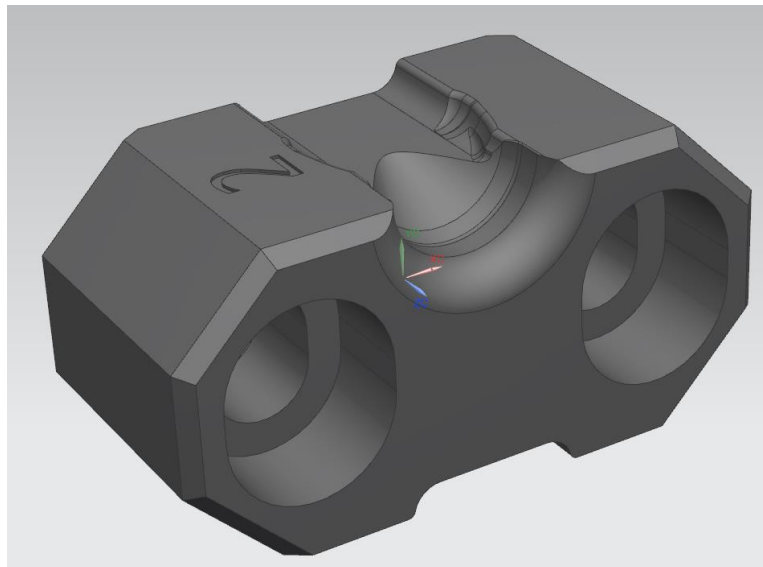
Součásti hydroformingového lisu jsou namáhány jak chemicky, tak mechanicky. Musí vydržet vysoké tlaky kapaliny, být odolné proti korozi. Vtoková vložka je nejspíše vyráběna technologií vysokotlaké tváření trubek. Do vtokové vložky se zasouvá tryska. Tím se utěsní prostor v polotovaru a tryskou může být vpuštěno tlakové médium. Materiál pro výrobu vtokové vložky musí být otěruvzdorný. Dále musí splňovat patřičnou drsnost a rozměrovou přesnost. Tvářená trubka je z nerezové oceli AISI 304L. Při hydroformingu se používá kapalina, se kterou součást nástroje nesmí reagovat. Tvar vzniklý od vtokové vložky, který je znázorněn na obrázku pod textem, je pouze technologický. Po zhotovení se z výrobku odřízne.



Obr. 15: Trubička zhotovena hydroformingem s vtokovou vložkou ve společnosti Trumpf

2.1. Analýza výkresové dokumentace a modelu

Na výrobním výkresu vtokové vložky najdeme razítko, které udává z jakého materiálu je vložka vyrobena. Nad razítkem jsou informace o požadované tvrdosti na zhotovenou součást. Pro výrobek používáme velmi tvrdou ocel, která má rozmezí tvrdosti 60-62 HRC. Dále si můžeme všimnout, že skoro na celé součásti se nachází drsnost Ra 3,2, kterou jsme schopni zhotovit na soustruhu i frézce. Vnější plochy a tvarové plochy mají drsnost Ra 1,6, kterou jsme taktéž schopni zhotovit na již zmíněných obráběcích strojích. Největší stěžení jsou rozměry s tolerancí jedna setina. Tyto rozměry by se obvykle měly brousit. Značení do hloubky 0,2 mm je nejspíše provedeno gravírovací frézou. V geometrii nástroje na Obr.16 vidíme, že model obsahuje mnoho rádiusů napojených tangenciálně na sebe. V součásti dosedá na kužel zakončený rádiusem tryska pro kapalně médium. Tato tryska dosedá na kužel přes materiál polotovaru.



Obr. 16: Model vtokové vložky v programu NX12

Tab. 1: Naměřené hodnoty drsnosti na obou stranách kavity ukázkového dílu

Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax [μm]	R Sm [μm]	R Mr (- 1.00, 5.0) [%]	R Mr (- 2.00, 5.0) [%]	R Mr (- 3.00, 5.0) [%]
1,366	5,945	7,000	141,923	23,85	41,65	58,00
0,767	3,766	4,466	154,540	27,24	59,88	97,99

3. Moderní nástrojové materiály

Materiál, doposud používaný k výrobě součásti, je nástrojová vysokolegovaná ocel pro práci za studena 19 573 dle ČSN 41 9573. Po stavu kaleném a popuštěném může mít tvrdost až 61 HRc. Kvůli rozměrovým přesnostem v tvrdém stavu by se musely tvary v polotovaru obrobit. Abychom předešli potřebnému obrábění, nahrazujeme tento materiál materiály modernějšími s většími možnostmi zpracování. Jako vhodné materiály se nám nabízí Maraging 350 a Maraging 300. Splňují podmínku vysoké tvrdosti, podobnou jako u doposud používané vysokolegované nástrojové oceli, tvarové stálosti a korozivzdornosti. Pro tuto výrobu byl zvolen materiál Maraging grade 300, který byl dostupnější, než původně navrhovaný Maraging grade 350.

Jeho hlavní výhodou je obrábění celé součásti v nevytvrzeném stavu. A po jejím vytvrzení při nízkých teplotách si zachová již zhotovené rozměry. Tím nám ušetří obrábění, broušení ve vytvrzeném stavu a náklady za vakuové kalení.[22],[23],[24]

3.1. Nástrojová ocel 19 573 (1.2379)

Materiál, dnes běžně používaný pro výrobu vtokové vložky, je vysokolegovaná nástrojová ocel. Jak již bylo zmíněno, používá se pro práci za studena. Vyrábějí se z ní například střížné nástroje, které stříhají až do 10 mm tloušťky, do materiálů o vysoké pevnosti, materiálů s keramickým povlakem, rotorových plechů, plechů z korozivzdorné oceli apod. Mezi střížné nástroje řadíme nože tabulových nůžek, kruhové nůžky, nebo nože na stříhání drátů.[22]

Dále se používá k výrobě nástrojů pro tváření za studena jako jsou nástroje k protlačování a tlačení při vysokých tlacích, tvarovací lisovadla, tažidla, průvlaky, nástroje ke tváření závitů, hladké i profilové válce, nebo razidla a kovádla. Díky odolnosti nástrojové oceli vůči velmi vysokým tlakům, lze materiál použít na výrobu forem k tváření plastů, prášků, skla, porcelánu a keramického materiálu. Je možné z ní vyrábět nástroje na obrábění dřeva a nekovových materiálů, ale i nástroje určené k drcení a mletí, jako kladiva drtičů a čelistí.[22]

Vysokolegovaná nástrojová ocel umožňuje při kalení za vyšších teplot a sekundárním vytvrzování nitridací nástrojů, nebo povlakování vrstvami TiN technologií PVD. Tato možnost se však u výroby součásti hydroformingového lisu nevyužívá.[22]

Chemické složení[hm.%]:

Tab. 2: Tabulka chemického složení 19 573 [22]

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
1,4- 1,65	0,2- 0,45	0,2- 0,45	11- 12,5	0,6- 0,95	0,8- 1,2	max. 0,03	max. 0,035

Tepelné zpracování:

Tab. 3: Tabulka s přehledem tepelného zpracování [22]

Způsob	Teplota °C	Postup
Žhání na snížení pnutí	600 až 650	1 až 2 hodiny, pak pomalu ochlazovat v peci
Kalení	980 až 1030	Ochlazovat v oleji, na vzduchu nebo v solné lázni
Popouštění	150 až 300	Ochlazovat na vzduchu (viz popouštěcí diagram).
Kalení na sekundární tvrdost	1040 až 1080	Ochlazovat v oleji, na vzduchu nebo v solné lázni
Popouštění na sek. Tvrdost	500 až 550	Ochlazovat na vzduchu (viz popouštěcí diagram).

3.2. Maraging oceli

3.2.1. Maraging V300 (1.6354)

Ultrapevná martenziticky vytvrditelná ocel, neboli Maraging ocel, se využívá pro práci za tepla i za studena. Jako materiál se velmi dobře osvědčila svým širokým spektrem použití při dlouhodobém tepelném namáhání až do 450 °C. Vyrábí se z ní nástroje pro hydrostatické lisy, nástroje pro lisy k protlačování za studena, nástroje pro pēchování za studena a nástroje razící, vstřikovací formy, formy pro tlakové lití hliníku a slitin zinku, nástroje pro lisování za tepla a volné trny pro tažení za studena.[23],[24]

Maraging ocel, v porovnání s oceli ke zušlechtění, nedosahuje svojí vysoké pevnosti vytvrzenou strukturou s relativně vysokým obsahem uhlíku, ale vylučováním intermetalických fází z výchozího poddajného niklového martenzitu s téměř žádným obsahem uhlíku. Díky tomu je maraging ocel pevná v tahu, má

vysokou mez kluzu a dobrou houževnatost i při velmi nízkých teplotách. Při tepelném zpracování nevykazuje prakticky žádné rozměrové změny. Má vrubovou pevnost v tahu a je odolná proti vzniku trhlinek z přepálení.[23]

Nepodléhá oduhličení a lze vytvrdit i při velkých rozměrech. Po rozpouštěcím žíhání jde dobře obrábět. Třískové obrábění je možné i ve vytvrzelém stavu. Díky jen nepatrné tendenci k precipitačnímu zpevňování má dobrou tvářitelnost za studena, vynikající svařitelnost a lze snadno tepelně zpracovat i za nízkých teplot.[23],[24]

Tab. 4: Chemické složení 1.6354 [23]

C	Si	Mn	Mo	Ni	Co	Ti	Al
<=0,005	<=0,05	<=0,05	5	18,5	8,8	0,7	0,11

3.2.2. Maraging 350 (1.2709)

Nástrojová ocel 1.2709 patří mezi maraging oceli. Požadované mechanické vlastnosti, jako je zvýšení tvrdosti, dosáhneme až po tepelném zpracování. Především díky nízkému obsahu uhlíku vzniká měkký martenzit, který je následně v tepelném zpracování silně vytvrzen precipitáty. Maraging oceli jsou známé díky vysoké pevnosti tahu, mezi kluzu, houževnatosti, dobré svařitelnosti a rozměrové stálosti. Kombinace požadovaných vlastností je skvělou volbou využití maraging ocelí pro vysoce namáhané součásti, nástroje vyžadující vysokou pevnost a tvrdost povrchu, formy pro vstřikování a tlakové lití.[23],[24]

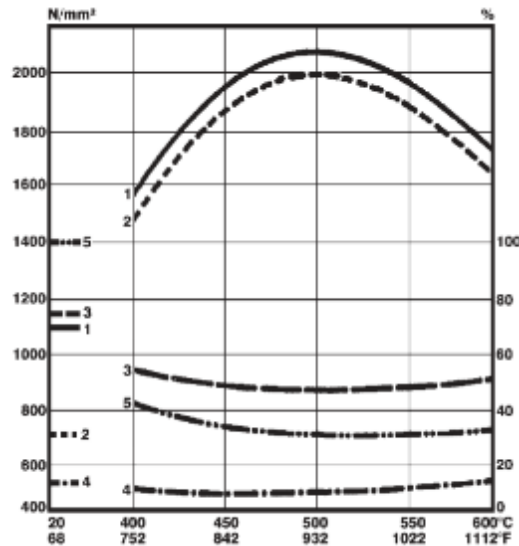
Na obr.18 můžeme vidět vytvrzovací diagram od firmy Böhler a v tabulce chemické složení od téže firmy. Od společnosti Bolzano je uveden přehled tepelného zpracování. V našem případě byl materiál po přijetí vyžíhán.

Tab. 5: Chemické složení oceli 1.2709 [23]

C	Mo	Ni	Co	Ti
<=0,005	4,85	18,	9,25	1

Tab. 6: Přehled tváření za tepla a tepelné zpracování [22]

Způsob	Teplota °C (nebo HRC)	Postup
Kování, válcování	1200-850	vzduch
Žíhání	820	vzduch
Vytvrzování	490, 6 hodin	Ochlazení na klidném vzduchu
Tvrdost	54-56 HRC	Ve vytvrzeném stavu



Obr. 18: Vytvrzovací diagram od společnosti Böhler 1-Pevnost v tahu[MPa], 2-Smluvní mez kluzu[MPa], 3-Změna průřezu[%], 4-Prodloužení[%], 5-Rázová práce [J] [25]

4. Návrh a zpracování technologie výroby

V této kapitole se nachází přehled o tom jak se postupovalo při návrhu technologie a řezných podmínek pro výrobu dané součásti. Přehled obsahuje informace od návrhu po výrobu polotovaru na zkoušky kavity, která představuje tvar geometrie nástroje viz 3D model součásti. Obsahuje také návrh a výrobu polotovaru celkové součásti i s kavitou. U kavity se rozhodovalo jaké strategie a jejich nastavení se zvolí pro její finální výrobu. U celkové součásti se rozhodovalo o volbě technologie výroby pro malosériovou výrobu, volbu strategií i jejich nastavení. Nakonec byly změřeny hodnoty drsnosti na kuželu, kde by povrch měl být nejdrsnější z celé součásti.

4.1. Výroba polotovaru pro návrhy

Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům oceli Maraging V300, musely být polotovary ke zkouškám připraveny z jiného materiálu. Byl použit měkký a nejbližše rozměrově vyhovující ocelový materiál, který byl dostupný na ústavu technologie obrábění. Materiál byl obroben na nástrojářské frézce. Po obrobení byl nařezán na více vzorových kusů, jak je vidět na Obr.22. Použitý materiál pro zkušební vzorky byl velice měkký, po měření tvrdosti dle Rockwella byla naměřená hodnota pod 20 HRC. Na materiálu zůstaly přídavky pro následné broušení vnějších rozměrů součásti dle výkresové dokumentace. Zkušební

vzorky byly kratší o sražení $6 \times 45^\circ$, protože na zkoušky obrábění kavity nám stačily, delší vzorky by zkreslovaly upínací sílu finálních rozměrů na magnetu. Na obrázcích jsou znázorněny stroje, upínání a nástroje použité pro výrobu polotovaru na zkušební vzorky.



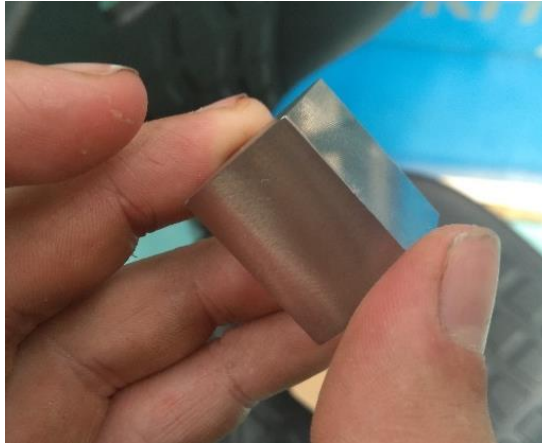
Obr. 19: Nástrojářská frézka



Obr. 20: Nástroj na obrábění zkušebních vzorků



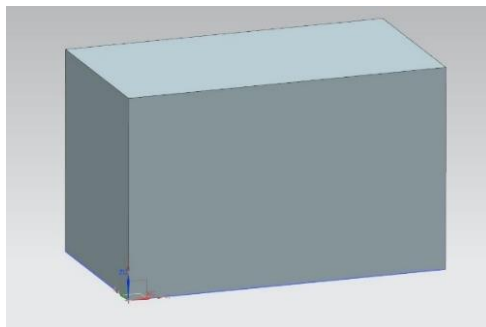
Obr. 21: Broušení zkušebních vzorků na jedno upnutí na magnetu



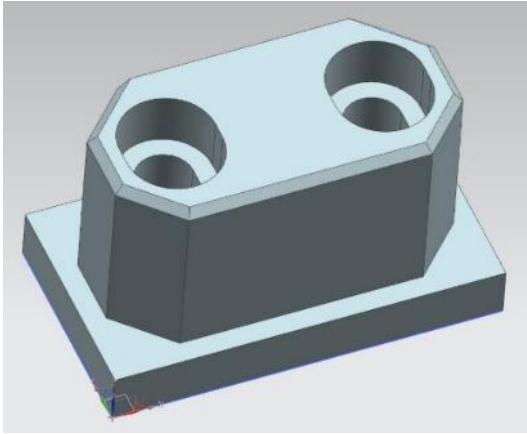
Obr. 22: Zkušební vzorek, připravený na obrábění kavit

4.2. Návrh

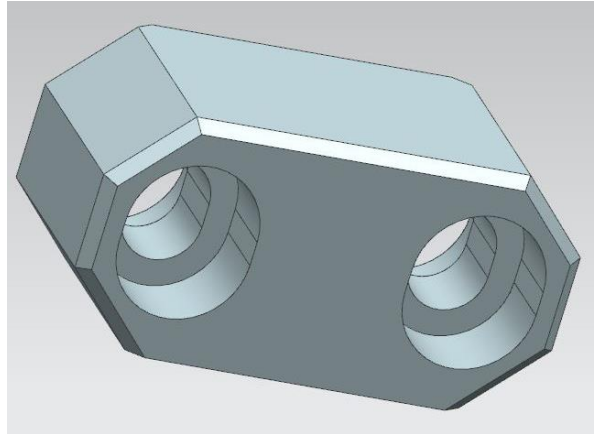
Polotovar s přídávky na obrábění a upnutí do svěráku s tvrdými zoubkovanými čelistmi byl obroben. Po obrobení tvaru na hotové rozměry a po frézování, byla součást otočena z jedné strany na druhou do plochých čelistí a následně se obrobila i druhá strana. Čelisti byly zvoleny ploché, aby nepoškodily povrch a nevytvořily otlaky. Takto navržené obráběné dva kusy s tolerancí na jednu setinu milimetru měly být upnuty do čtyřčelistového sklíčidla. Soustružením se na obouh dílech měl vytvořit kužel s rádiusy viz obr.29. Oba díly měly být zrcadlově přetočeny, aby byl kužel s rádiusy vytvořen i na protějších stranách. Následovala operace s obrobením kavity bez již obrobených rádiusů a kužele. Návrh a vytvoření modelů s programem na soustružení byl vytvořen v softwaru NX12. Pak přišla informace, že na frézku, na které se měla vtoková vložka vyrábět, škola nemá potřebný postprocessor pro správnou tvorbu NC kódu. Proto byly další návrhy vytvářeny v programu Powermill 2019. Výsledný návrh, kvůli možnosti velkých nepřesností při výrobě a úzkých tolerančních polí na výkrese součástí, nebyl přijat a pokračovalo se dále.



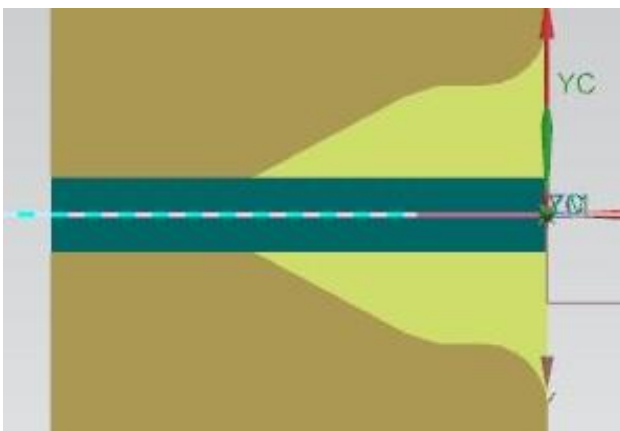
Obr. 23: Vymodelovaný polotovar v NX12



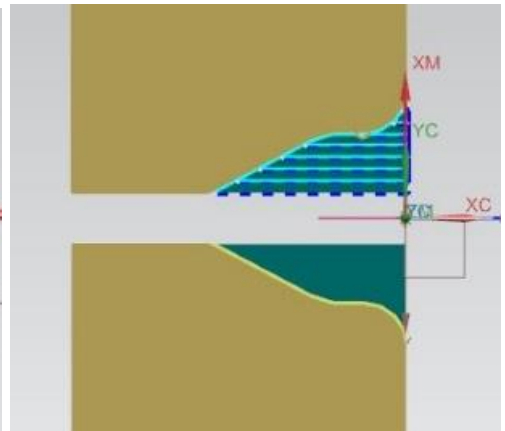
Obr. 24: Model po první operaci frézování v NX12



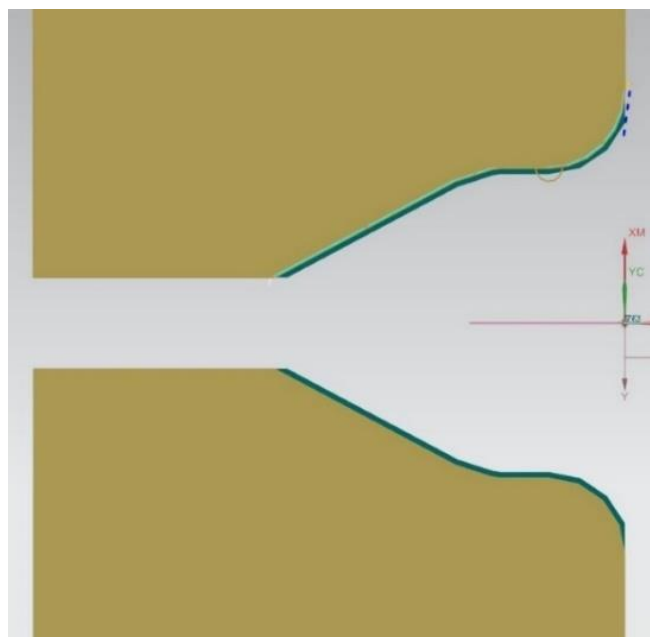
Obr. 25: Model po druhé operaci frézování v NX12



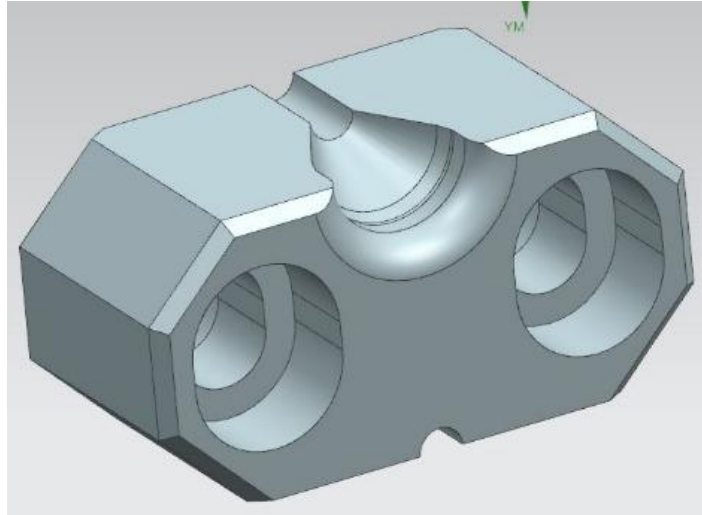
Obr. 26: Model operaci soustružení v NX12



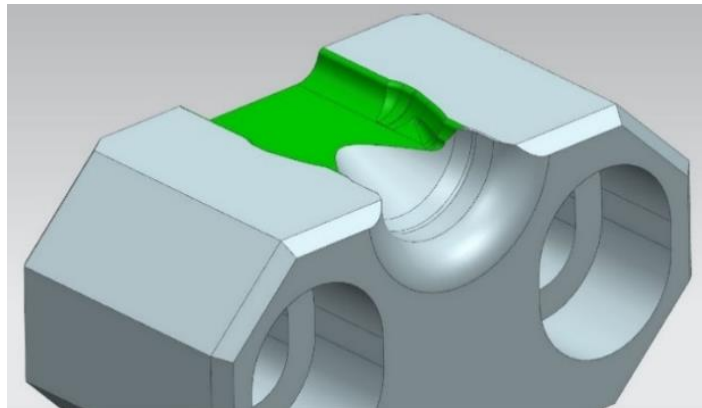
Obr. 27: Model po hrubování kontury v NX12



Obr. 28: Model po soustružení tvaru an čisto v NX12



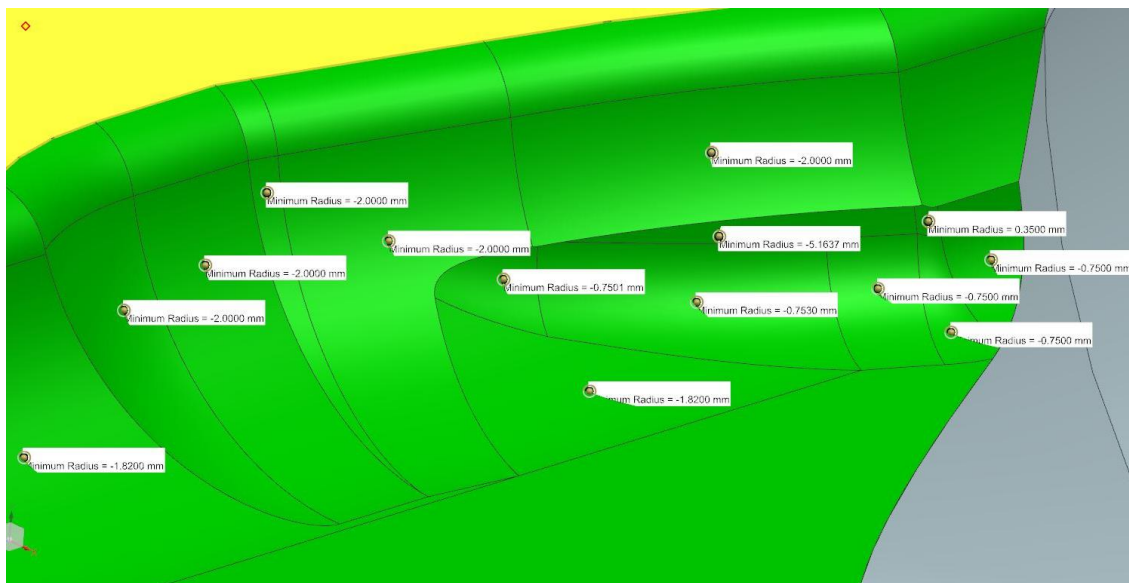
Obr. 29: Model po předchozích operacích v NX12



Obr. 30: Model následného frézování kavity v NX12

4.3. Koncept kavity v Powermillu

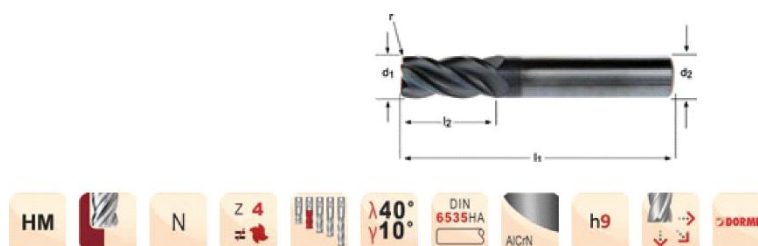
V této a dalších kapitolách jsou popsány strategie a řezné podmínky pro zhotovení kavity na vyráběné součásti. Jakými nástroji je možné tvar obrobít, aby se nástroj dostal do špatně přístupných částí. Jaké strategie obrábění použít a jak je nastavit. Tímto návrhem, kde nebyly důležité hodnoty, ale určení rádiusů a jejich polohy na modelu součásti bylo zjištěno zda jsou kladné, nebo záporné. Ke kladnému rádiusu není problematický přístup nástroje. U rádiusu záporného musíme volit nástroje s menším rádiusem, než je rádius plochy. Nejmenší hodnota ze všech ploch byla nalazena $-0,75\text{mm}$, naopak nejvyšší hodnota $-5,1637\text{mm}$. Podle zobrazených rádiusů jednotlivých ploch v programech NX12 a Hypermill byly zvoleny vhodné nástroje. Analýza v programu Hypermill je názornější. Bylo zde vidět opásání nástroje ve zvoleném místě. Z výsledků analýzy byly pro tento koncept zvoleny čtyři nástroje od firmy Dormer Pramet.



Obr. 31: Zobrazení rádiusů u jednotlivých ploch v programu NX12

S763

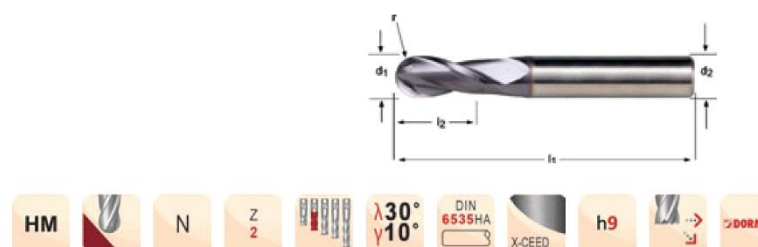
Corner Radius End Mill



Obr. 32: Zvolená rádiusová fréza[26]

S501

Ball-Nosed End Mill



Obr. 33: Zvolená kulová fréza[26]

Tab. 7: Přehled parametrů a označení zvolených nástrojů[26]

kód nástroje	průměr [mm]	rádius [mm]	počet zubů	Název nástroje
S7636.0XR0.5	6	0.5	4	Rádiusová 6R1
S7636.0XR1.0	6	1	4	Rádiusová 6R0.5
S5014.0	4	2	2	Kulová 4
S5012.0	2	1	2	Kulová 2

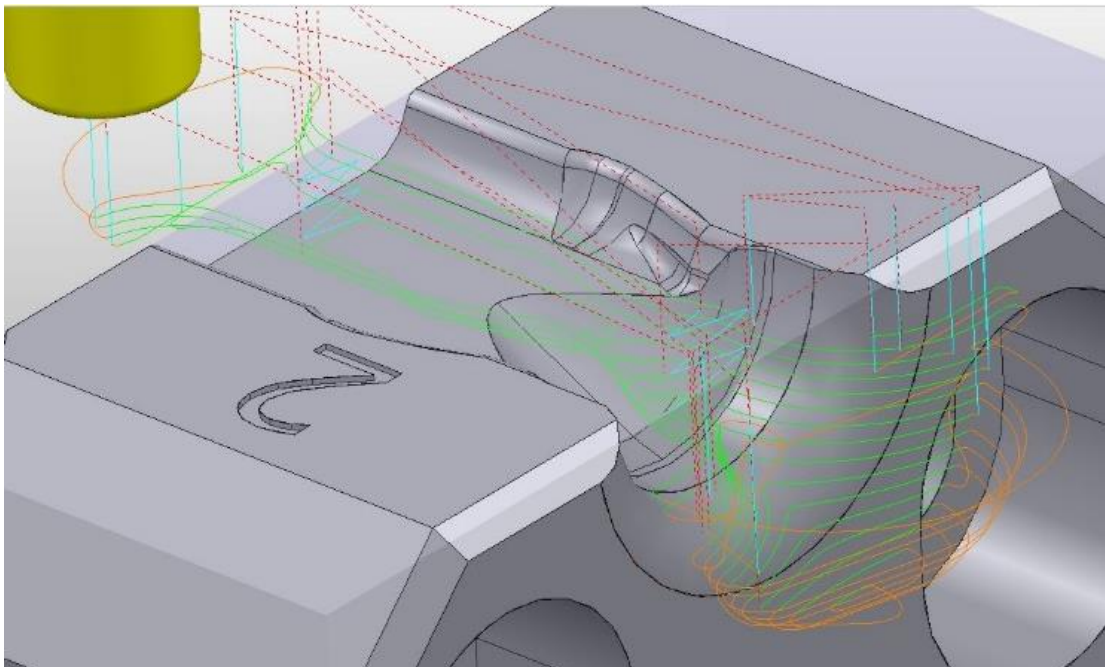
Byly vytvořeny strategie, hranice, zvolena pracovní rovina a namodelované nástroje. Strategie sloužily především pro představu, jak by mohly jejich budoucí dráhy vypadat. Koncept byl využit jako oživení znalostí v Powermillu.

Tab. 8: Přehled nástrojů a strategií použitých v dráze

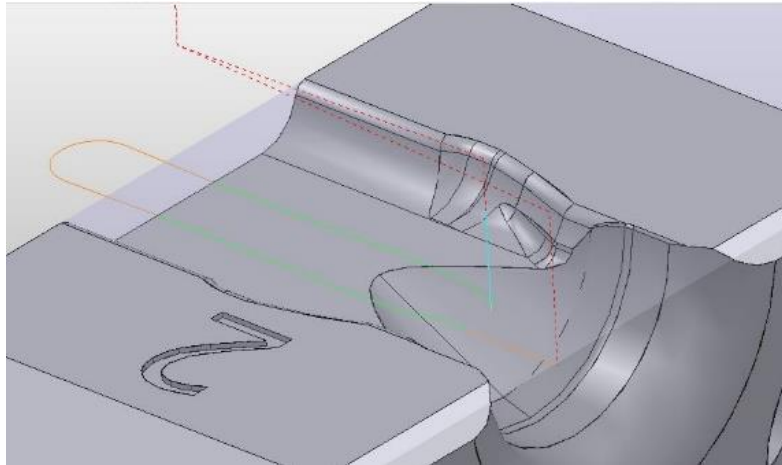
KONCEPT:	hrub celek	na čisto plocha	na čisto sedlo	na čisto boky	zbytek po všem
Typ strategie	Hrubování modelu	Dokončení rovin konturováním	Dokončení 3D konturováním	Dokončení v hladině Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z
Nástroj	Rádiusová 6R1	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4	Kulová 4	Kulová 2

Tabulka uvádí, jaké nástroje byly použity u strategií, jejichž dráhy jsou zobrazeny na obrázcích níže. Dráhy nejsou úplně optimalizované, jelikož se jedná o prototypy. Optimalizovat dráhy se vyplácí až po volbě správných strategií a kvalit povrchu.

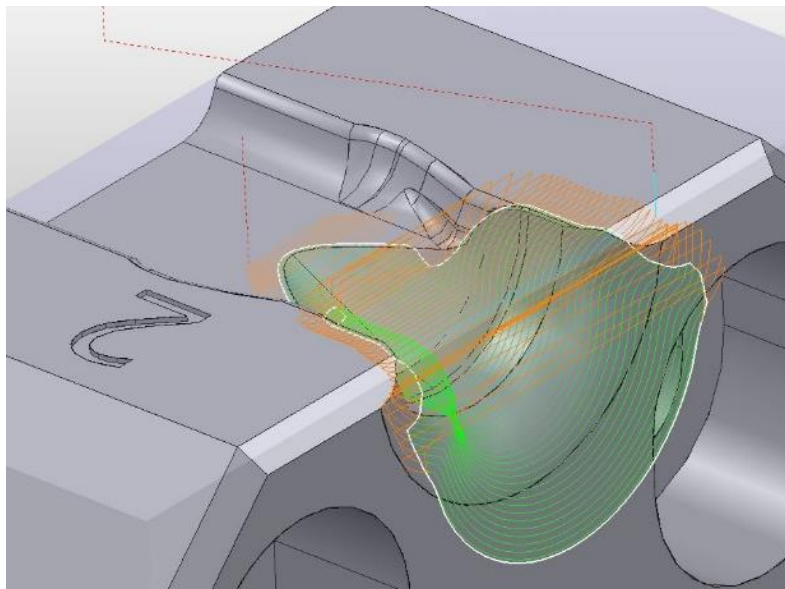
Ve všech drahách je použit sousledný směr. Řezné podmínky byly určeny z doporučených hodnot výrobce nástrojů Dormer Pramet. Podle typu nástroje a podle obráběného materiálu.



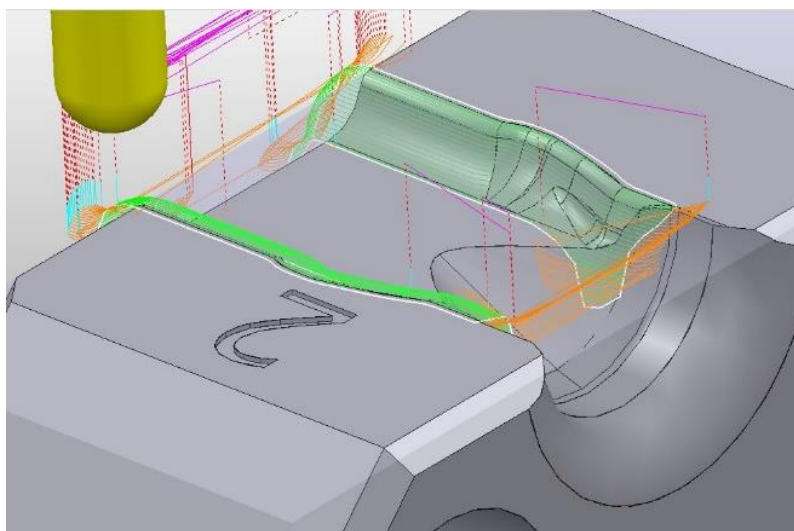
Obr. 34: Koncept:Hrub celek



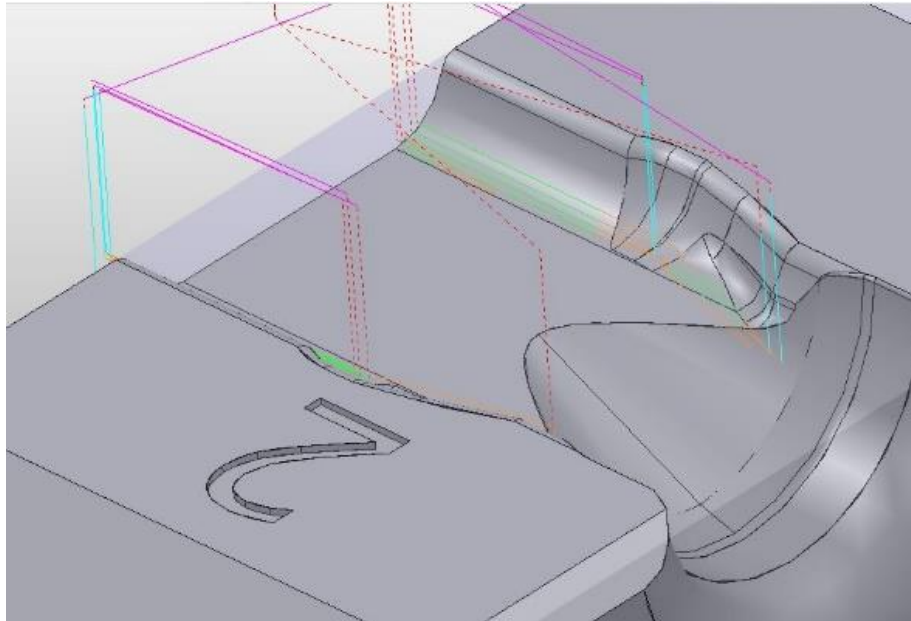
Obr. 35: Koncept: Na čisto plocha



Obr. 36: Koncept: Na čisto sedlo



Obr. 37: Koncept: Na čisto boky



Obr. 38: Koncept: Zbytek po všem

4.4. První verze kavity

V první verzi kavity byly zvoleny možné počáteční hodnoty pro výrobu. Po vyrobení kavity byla součást analyzována a počáteční hodnoty se dále upravovaly pro získání dalších dat ze zkušebních vzorků.

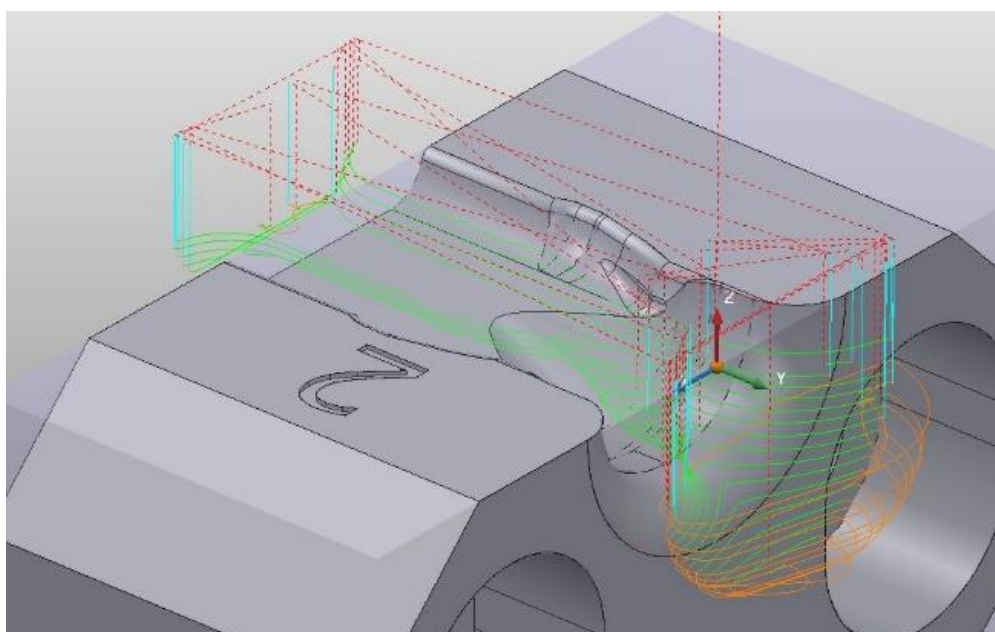
Hlavní změnou oproti konceptu bylo vyjmutí nástroje Kulová 2. Tento nástroj, který měl obrábět nejmenší analyzované rádiusy, byl nahrazen Rádiusovou frézou s rádiusem 0,5mm. Díky menšímu rádiusu bylo možné obrobit plochy, kde bylo potřeba. Rádiusová fréza má o 2 zuby navíc, tudíž obrábění probíhalo rychleji. Nástroj byl použit také na obrobení „Na čisto plocha“, tím bylo minimalizováno riziko vzniku schodu mezi napojením dvou nástrojů mezi dvěma plochami.

Po analýze vyrobené součásti a naměření dat bylo usouzeno, že tato varianta je pro výrobu možná, ale je třeba dalších úprav.

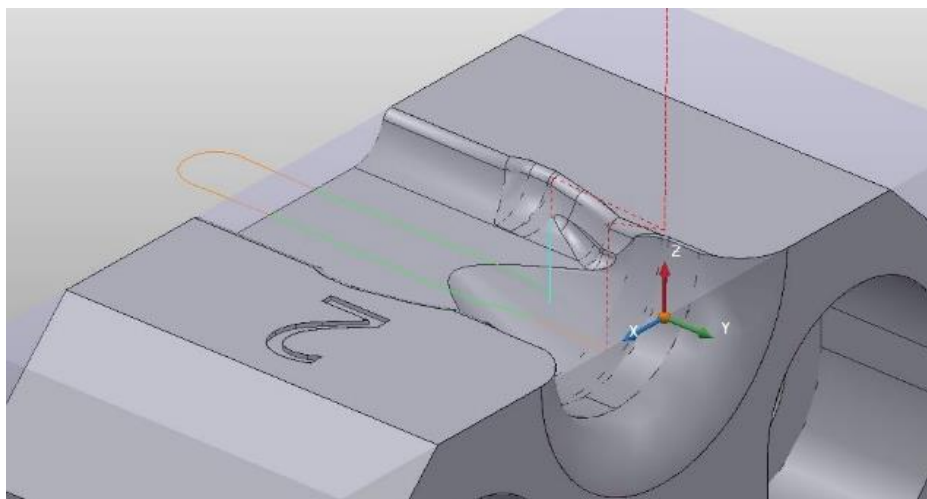
Při měření bylo zjištěno, že plocha obráběná strategií „Na čisto plocha“, je posunuta o 0,2mm mimo polohu, kde se měla nacházet. Chybné posunutí bylo způsobeno nesprávnou délkovou korekcí sondy, která naměřovala polohu polotovaru v pracovním prostoru stroje.

Tab. 9: První verze, přehled nastavení použitých strategií

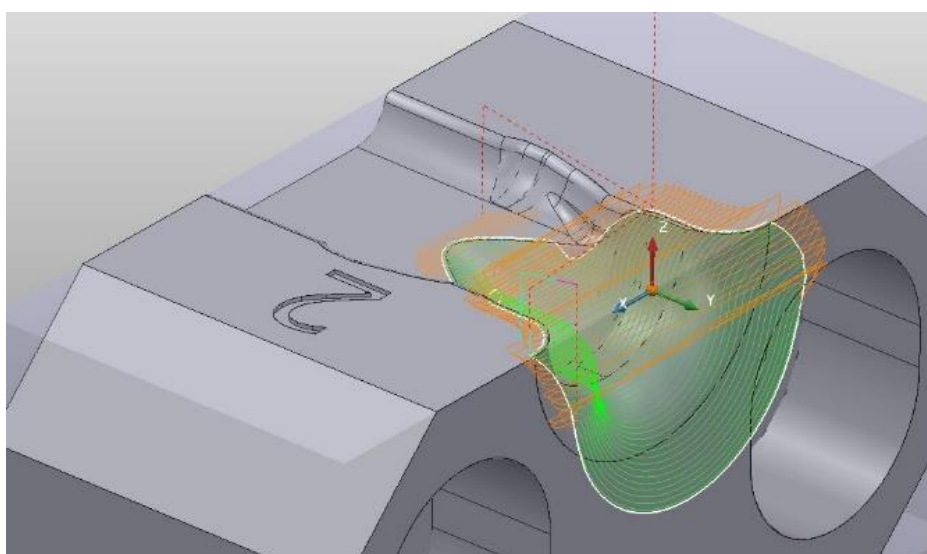
Strategie	hrub celek	na čisto plocha	na čisto sedlo	na čisto boky	zbytek po všem
Nástroj	Rádiusová 6R1	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4	Kulová 4	Rádiusová 6R0.5
Název strategie	Hrubování modelu	Dokončení rovin konturováním	Dokončení 3D konturováním	Dokončení v hladině Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z
Směr řezu	Sousledné	Sousledné	Sousledné	Sousledné	Sousledné
Tolerance dráhy	0,01	0,01	0,01	0,001	0,01
Přídavek	0,1	0	0	0	0
Scallop	-	-	0,01	0,005 (C.tol.: 0,0009)	0,006
Detekovaný materiál	-	-	0,002	0,002	0,008
Krok dolů/do boku	2 / 2	2 / -	-	-	-
Nájezd	Horiz.oblouk	Protažení	Vert. oblouk	Ne	Ne
Výjezd	Ne	Protažení	Vert. oblouk	Ne	Ne
Propojení	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Přímý	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk
Řezná rychlost [m/min]	100	100	100	100	100
Posuv na zub [mm]	0,025	0,02	0,015	0,015	0,02



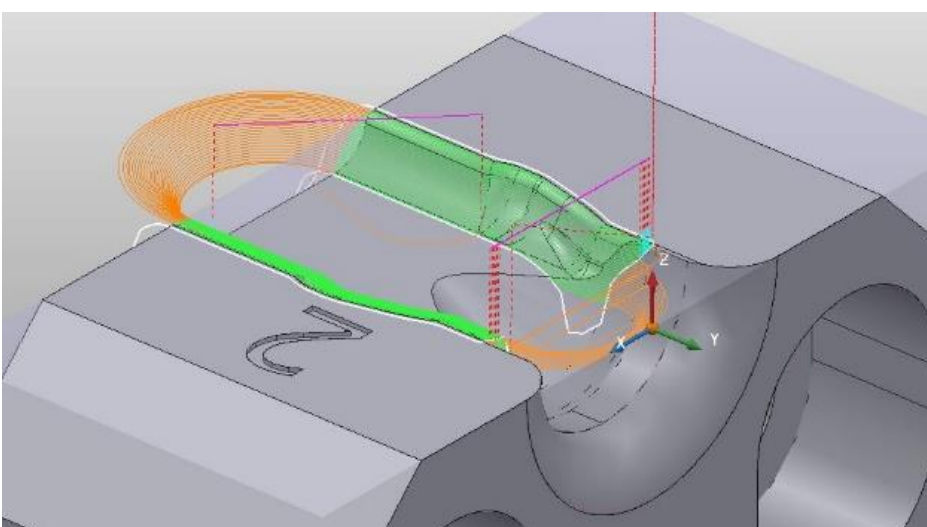
Obr. 39: První verze, hrub celek



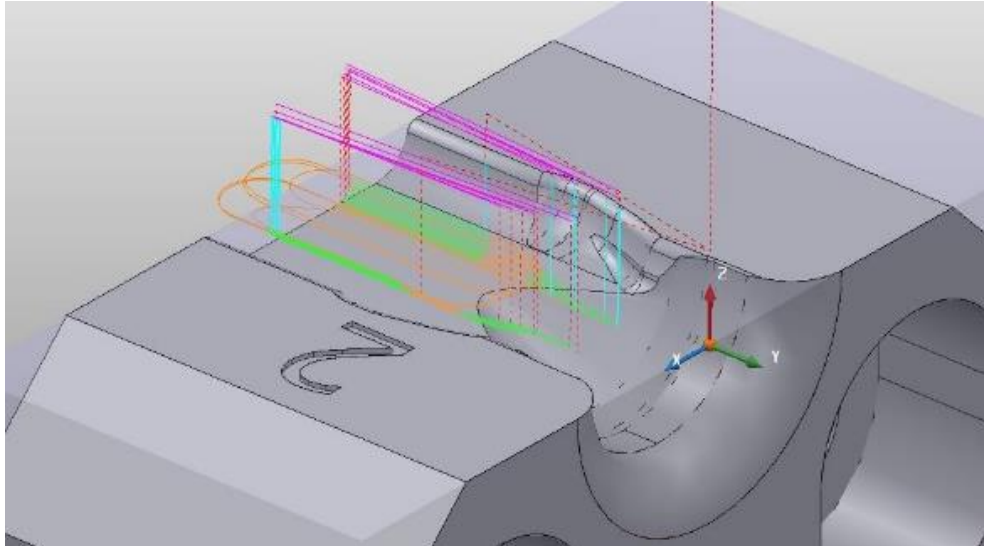
Obr. 40: První verze, na čisto plocha



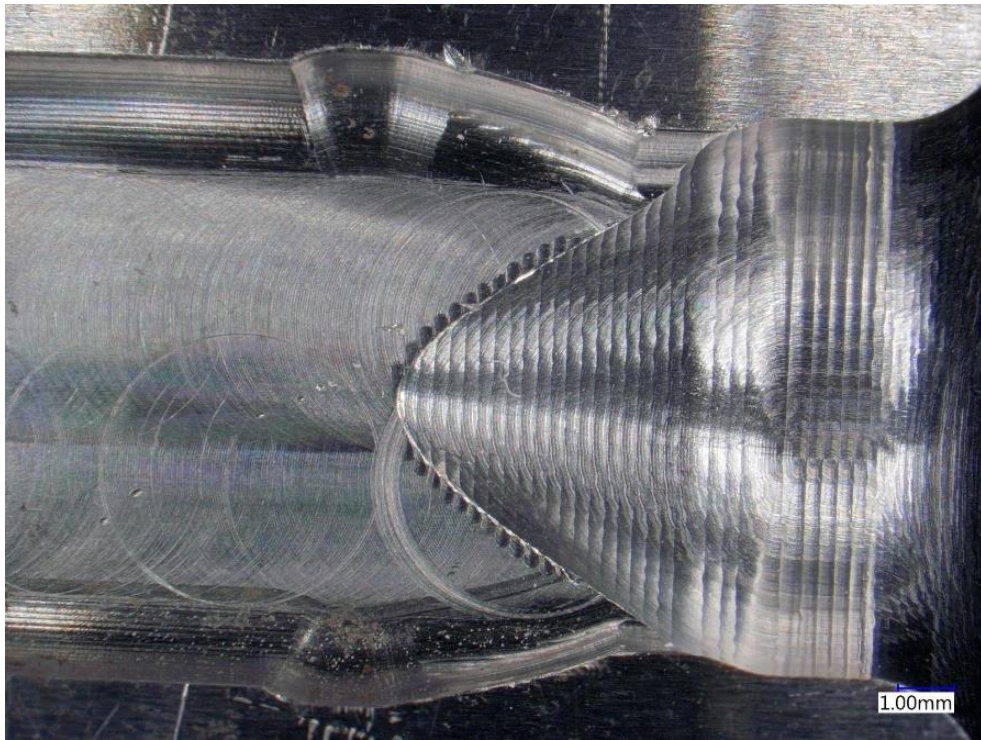
Obr. 41: První verze, na čisto sedlo



Obr. 42: První verze, na čisto boky



Obr. 43: První verze, zbytek po všem



Obr. 44: První verze, obrobený povrch

Tab. 10: První verze, výrobní časy a počet nástrojů

Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů
9:20	8:20	17:40	3

Tab. 11: První verze, naměřené hodnoty drsnosti

Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax [μm]	R Sm [μm]	R Mr (-1.00, 5.0) [%]	R Mr (-2.00, 5.0) [%]	R Mr (-3.00, 5.0) [%]
1,411	6,107	6,427	297,154	14,96	27,27	41,1

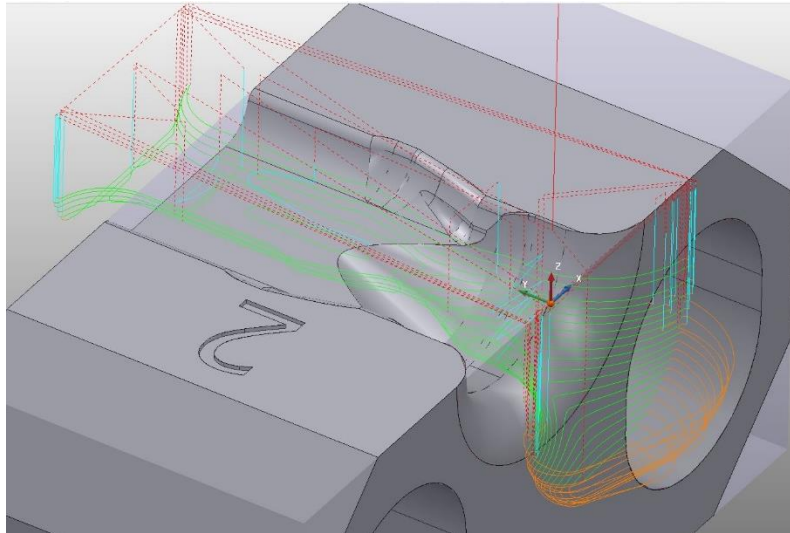
4.5. Druhá verze kavity

U druhé verze byla sonda pro naměřování polotovaru opravena a mohlo se dále pokračovat. Vyznačené hodnoty v tabulce ukazují změny oproti první verzi. Byly zmenšeny tolerance dráh a hodnoty scallop. Tolerance dráhy nám zmenšily možné vychýlení výpočtu dráh a hodnoty scallop navýšily jejich počet. Dále se při hrubování celku snížil krok dolů a posuv na zub, aby nedocházelo k nadměrnému namáhání nástroje. Změna proběhla i u nájezdu, protože Powermill spočítal dráhy tak, že nájezd byl ze shora polotovaru.

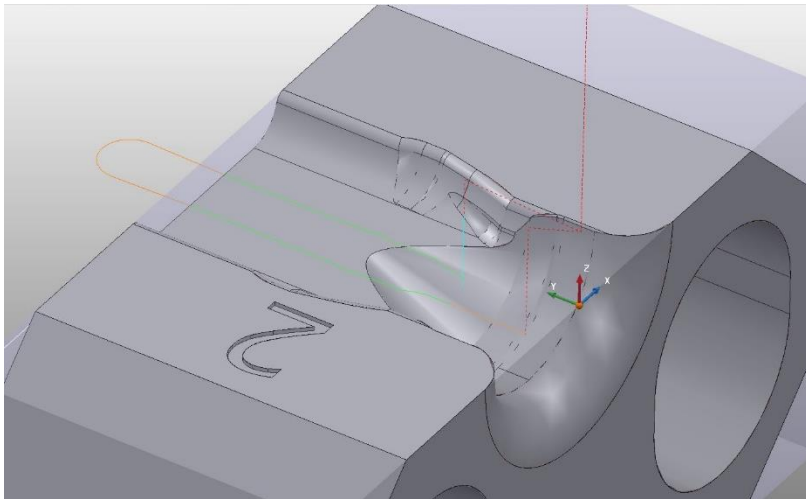
Po analýze vyrobené součásti a naměření dat bylo usouzeno, že tato varianta je pro výrobu možná, ale je třeba dalších úprav. Rozměry vyhovovaly, drsnost také, ale pro sériovou výrobu je výroba příliš dlouhá. Touto variantou byla ukázána výroba plochy v příliš vysoké kvalitě. Touto kvalitou je hodnota drsnosti Ra 0,399 μ m oproti 1,6 μ m předepsané na výkresu.

Tab. 12: Druhá verze, přehled nastavení použitých strategií

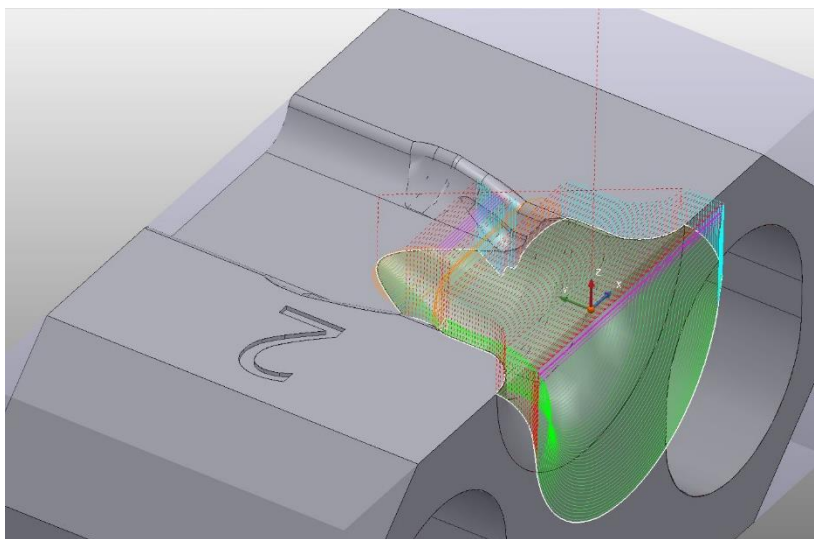
Strategie	hrub celek	na čisto plocha	na čisto sedlo	na čisto boky	zbytek po všem
Nástroj	Rádiusová 6R1	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4	Kulová 4	Rádiusová 6R0.5
Název strategie	Hrubování modelu	Dokončení rovin konturováním	Dokončení 3D konturováním	Dokončení v hladině Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z
Směr řezu	Sousledné	Sousledné	Sousledné	Sousledné	Sousledné
Tolerance dráhy	0,01	0,001	0,001	0,001	0,01
Přídavek	0,1	0	0	0	0
Scallop	-	-	0,003	0,003 (C.tol.: 0,001)	0,003
Detekovaný materiál	-	-	0,002	0,002	0,008
Krok dolů/do boku	1,5/ 2	2 / -	-	-	-
Nájezd	Pod úhlem	Protažení	Vert. oblouk	Ne	Ne
Výjezd	Ne	Protažení	Vert. oblouk	Ne	Ne
Propojení	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Přímý	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk
Řzná rychlost [m/min]	100	100	100	100	100
Posuv na zub [mm]	0,02	0,02	0,015	0,015	0,015



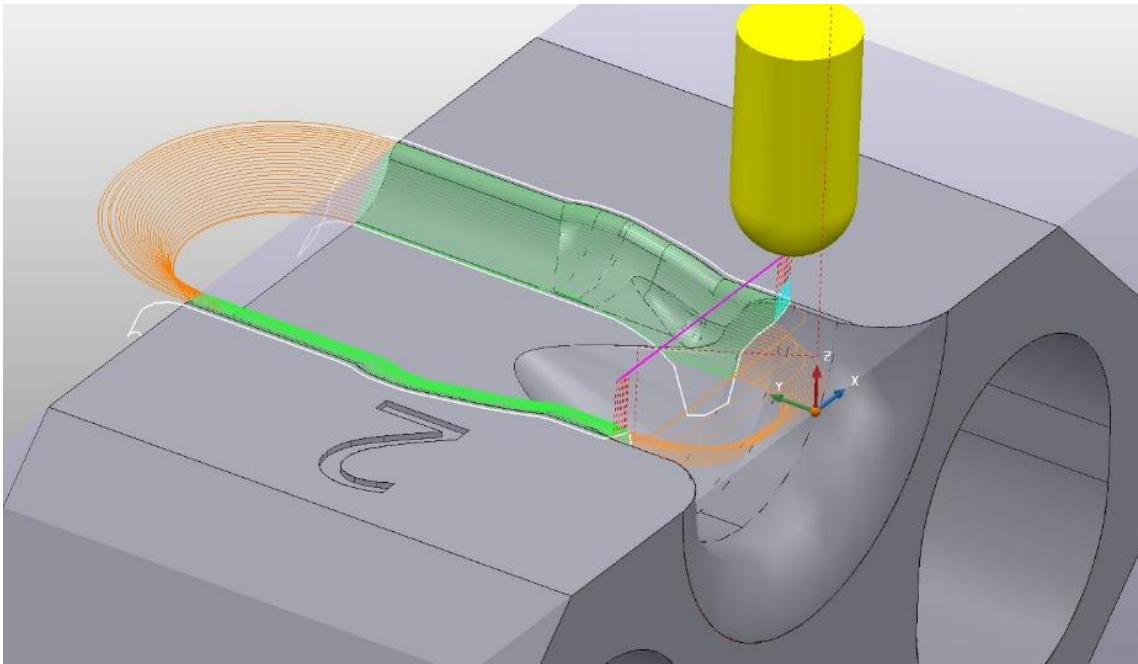
Obr. 45: Druhá verze, hrub celek



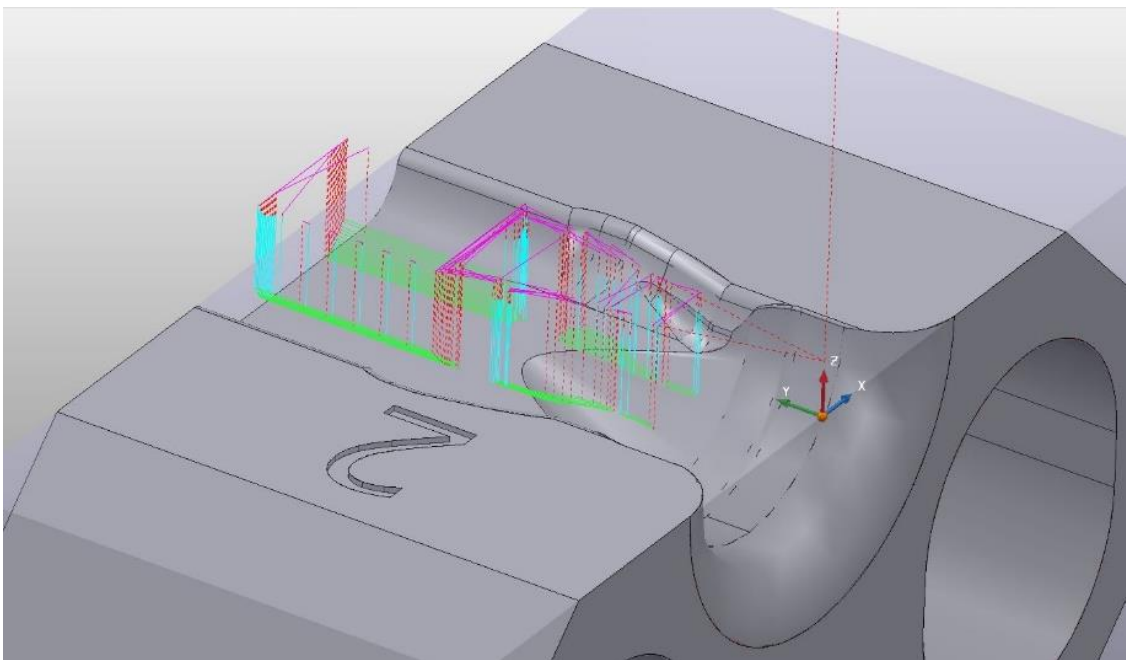
Obr. 46: Druhá verze, na čisto plocha



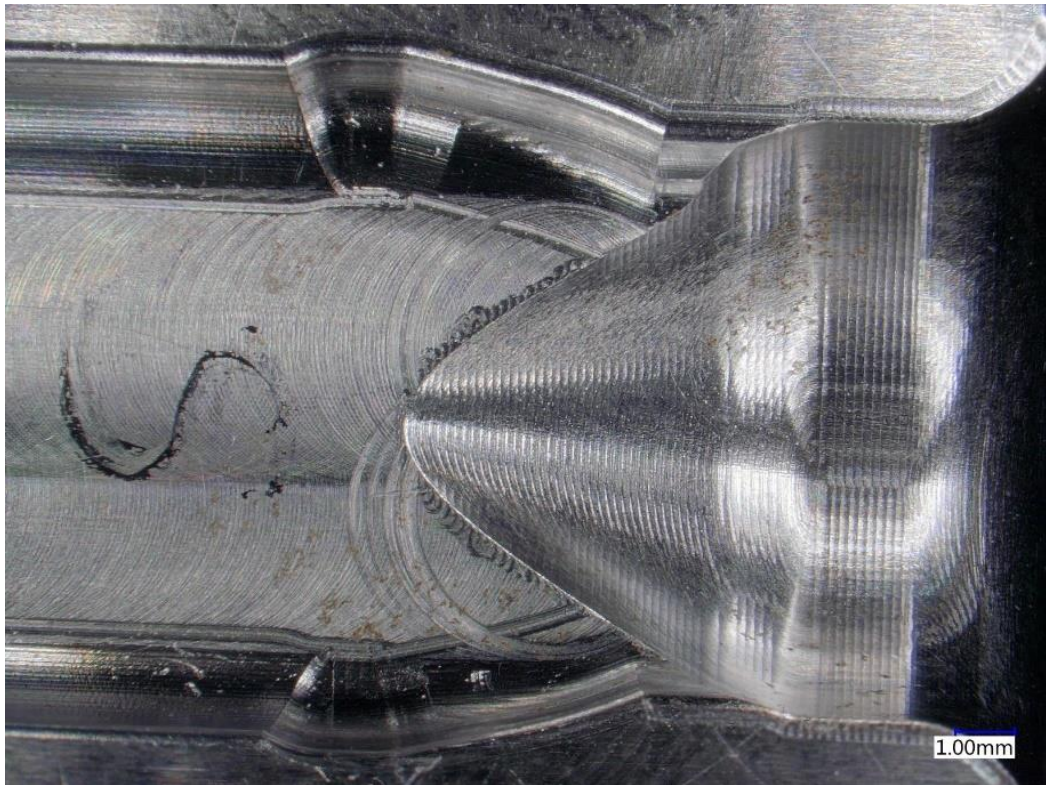
Obr. 47: Druhá verze, na čisto sedlo



Obr. 48: Druhá verze, na čisto boky



Obr. 49: Druhá verze, zbytek po všem



Obr. 50: Druhá verze, obrobený povrch

Tab. 13: Druhá verze, výrobní časy a počet nástrojů

Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů
22.24	11:52	34:17	3

Tab. 14: Druhá verze, naměřené hodnoty drsnosti

Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax [μm]	R Sm [μm]	R Mr (- 1.00, 5.0) [%]	R Mr (- 2.00, 5.0) [%]	R Mr (- 3.00, 5.0) [%]
0,399	2,380	2,645	160,250	38,42	99,36	100,00

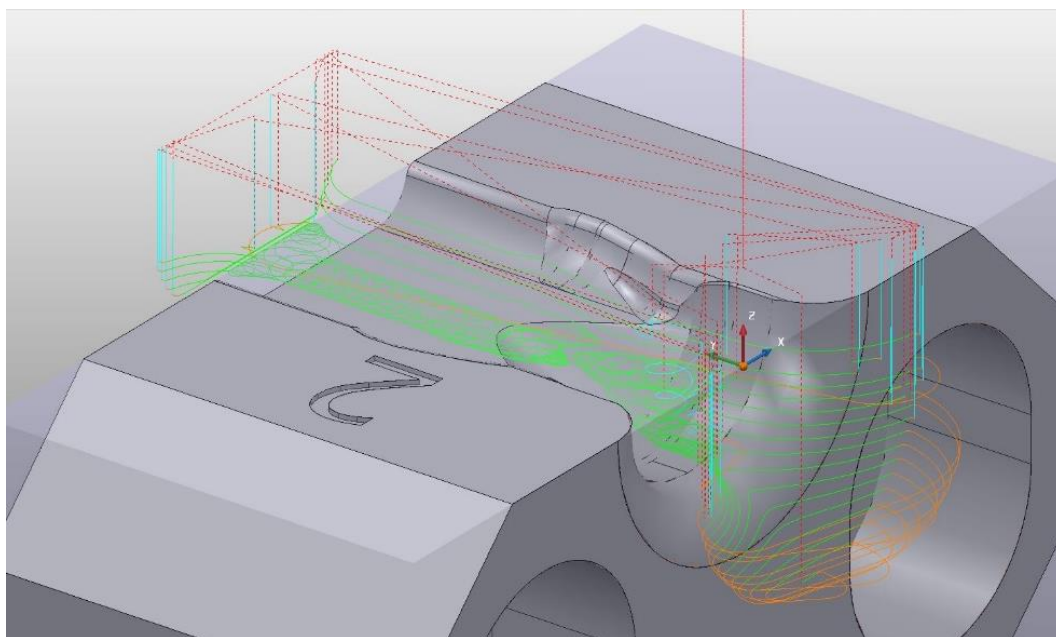
4.6. Třetí verze kavity

U této verze byly ponechány nastavené hodnoty u strategií a změnil se směr řezu u dokončovacích strategií tvarových ploch. Změna ze sousledné na oba směry přinesla úsporu z hlediska času přejezdů. Nástroje byly více namáhány, ale uspořený čas je výrazný. Hodnota Ra se mírně zhoršila, ale povrch byl stále vyhovující.

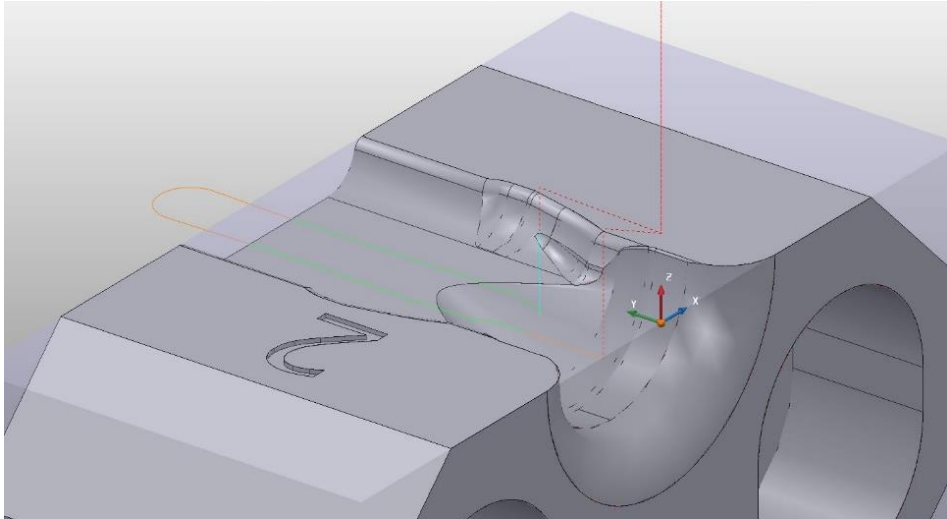
Po analýze vyrobené součásti a naměření dat bylo usouzeno, jako u předešlé varianty, že tato je pro výrobu možná, ale je třeba dalších úprav. Rozměry vyhovovaly, drnost také, ale pro sériovou výrobu je příliš dlouhá.

Tab. 15: Třetí verze, přehled nastavení použitých strategií

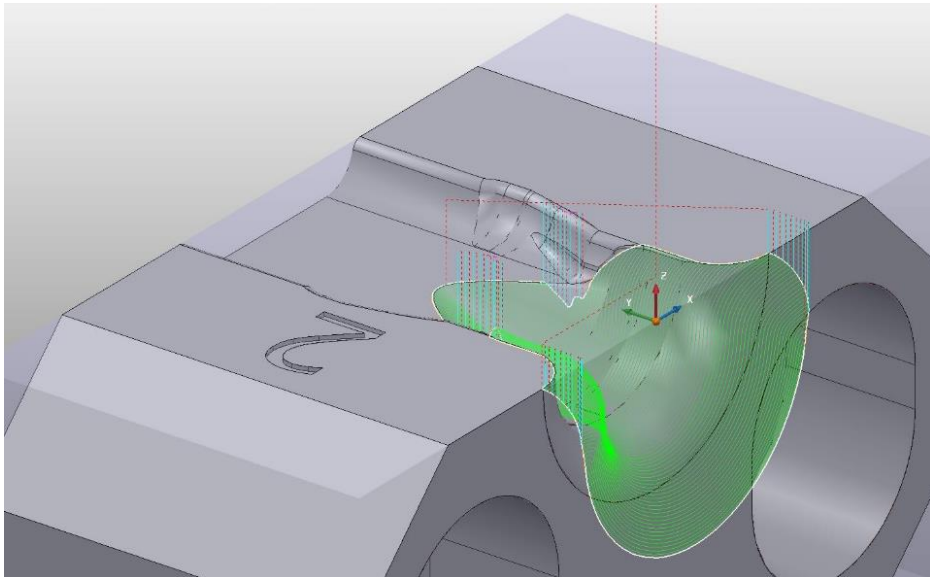
Strategie	hrub celek	na čisto plocha	na čisto sedlo	na čisto boky	zbytek po všem
Nástroj	Rádiusová 6R1	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4	Kulová 4	Rádiusová 6R0.5
Název strategie	Hrubování modelu	Dokončení rovin konturováním	Dokončení 3D konturováním	Dokončení v hladině Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z
Směr řezu	Sousledné	Sousledné	Oba	Oba	Oba
Tolerance dráhy	0,01	0,001	0,001	0,001	0,01
Přídavek	0,1	0	0	0	0
Scallop	-	-	0,003	0,003 (C.tol.: 0,001)	0,003
Detekovaný materiál	-	-	0,002	0,002	0,008
Krok dolů/do boku	2 / 2	2 / -	-	-	-
Nájezd	Pod úhlem	Protažení	Ne	Ne	Ne
Výjezd	Ne	Protažení	Ne	Ne	Ne
Propojení	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Přímý
Řezná rychlost [m/min]	100	100	100	100	100
Posuv na zub [mm]	0,02	0,02	0,015	0,015	0,015



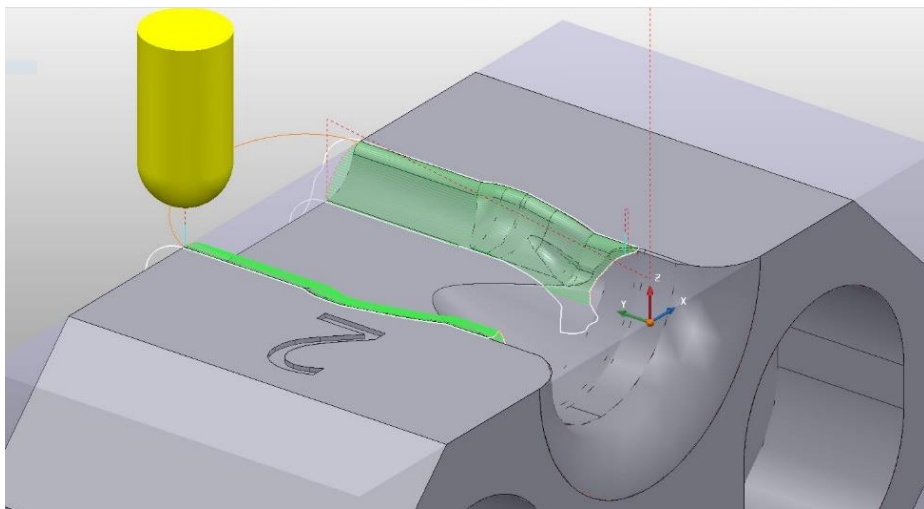
Obr. 51: Třetí verze, hrub celek



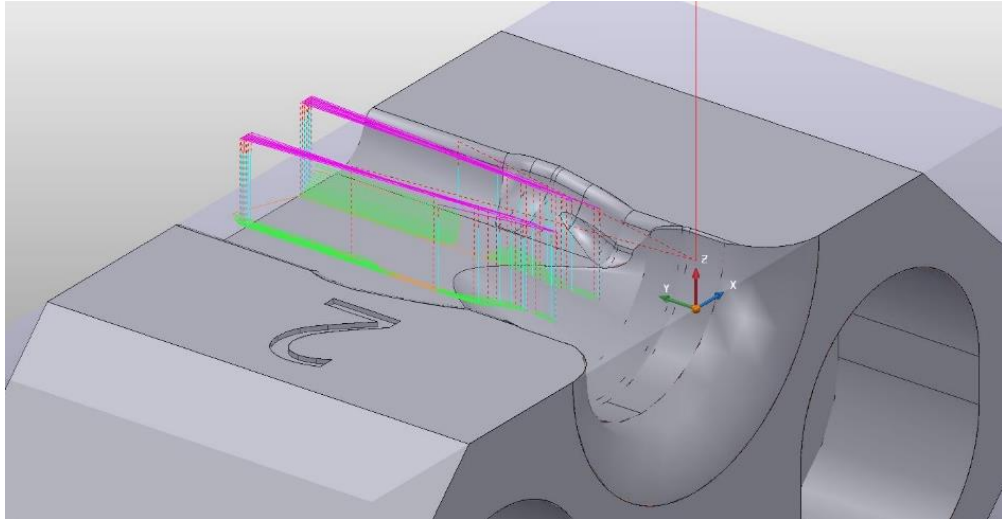
Obr. 52: Třetí verze, na čisto plocha



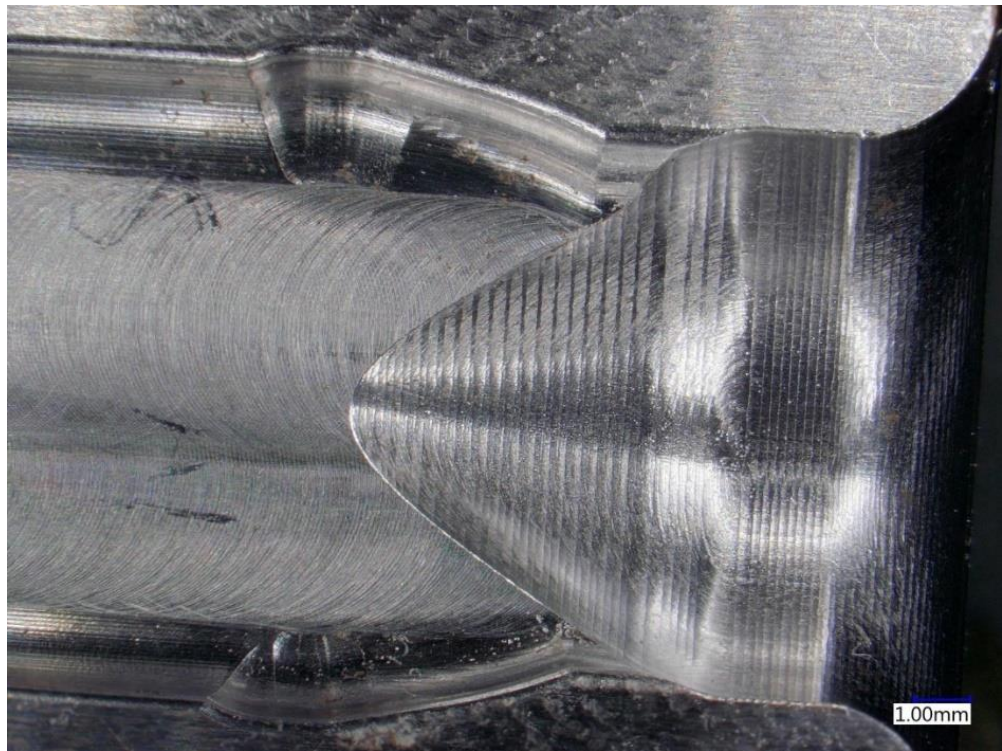
Obr. 53: Třetí verze, na čisto sedlo



Obr. 54: Třetí verze, na čisto boky



Obr. 55: Třetí verze, zbytek po všem



Obr. 56: Třetí verze, obrobený povrch

Tab. 16: Třetí verze, výrobní časy a počet nástrojů

Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů
10:33	12:20	22:53	3

Tab. 17: Třetí verze, naměřené hodnoty drsnosti

Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax [μm]	R Sm [μm]	R Mr (- 1.00, 5.0) [%]	R Mr (- 2.00, 5.0) [%]	R Mr (- 3.00, 5.0) [%]
0,465	3,066	3,679	181,857	39,25	95,24	99,94

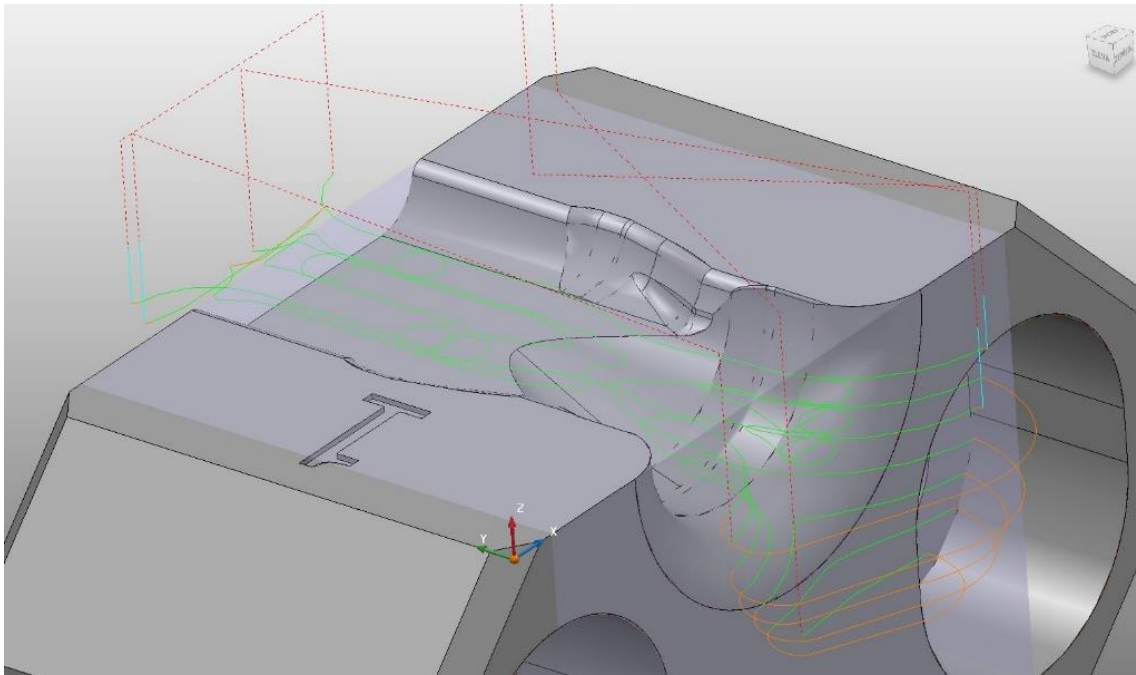
4.7. Čtvrtá verze kavity

Čtvrtá verze byla navrhovaná paralelně s předchozími verzemi. Byl použit větší počet nástrojů. Oproti předešlým verzím byla použita rádiusová fréza s rádiusem 1mm na hrubování celku a další „Na čisto boky“ i „Na čisto plocha“. Tam, kam se tato fréza nedostala, byla použita největší možná kulová 4, která se v programu pro vygenerování drah musela zmenšit na průměru o 0,001mm. Ta obrobila zbytek materiálu na plochách s poloměrem 2mm, kde se rádiusová fréza s poloměrem 1mm nedostala. Tam, kam se nedostala ani kulová fréza s poloměrem 2mm, doobrobila materiál rádiusová fréza s poloměrem R0,5mm.

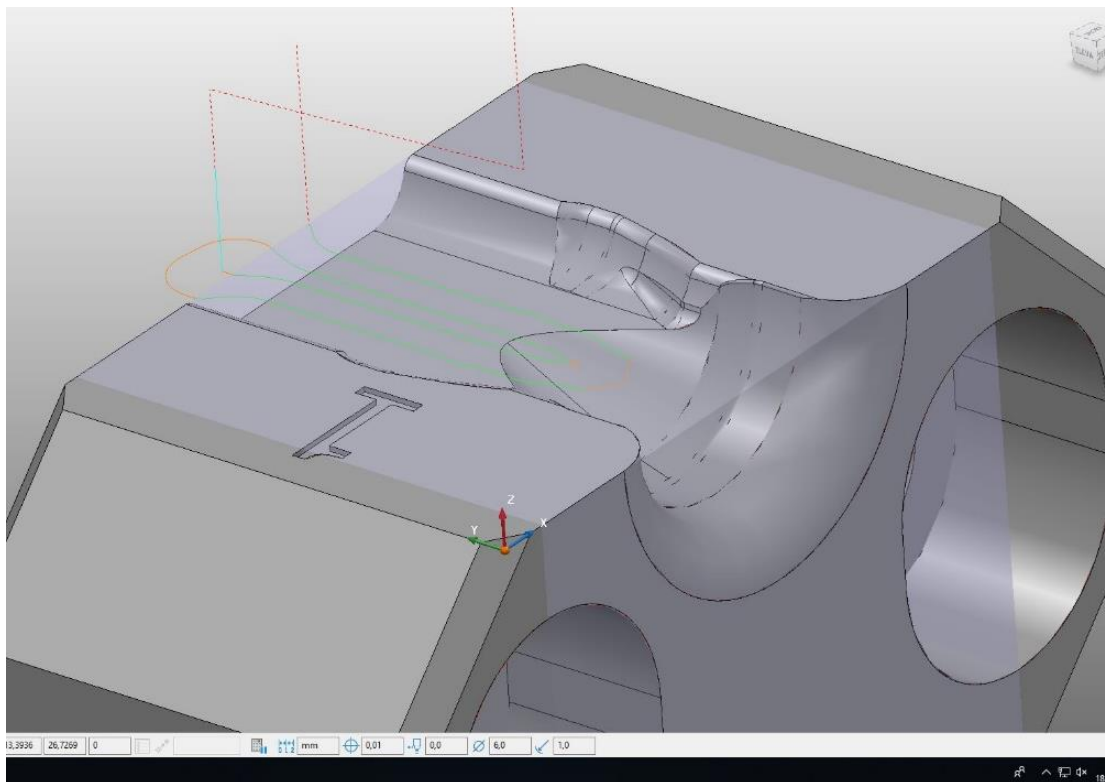
Takto zvolené strategie ušetřily čas na obrábění boků, protože nástroj má více zubů a má kratší přejezdy mezi levou a pravou stranou. Byly zvoleny vyšší hodnoty scallop, aby povrch vyhovoval dle výkresové dokumentace a nebyl tak časově náročný na výrobu. Zvýšením počtu nástrojů se navýšilo riziko vytváření schodů mezi plochami.

Tab. 18: Čtvrtá verze, přehled nastavení použitých strategií

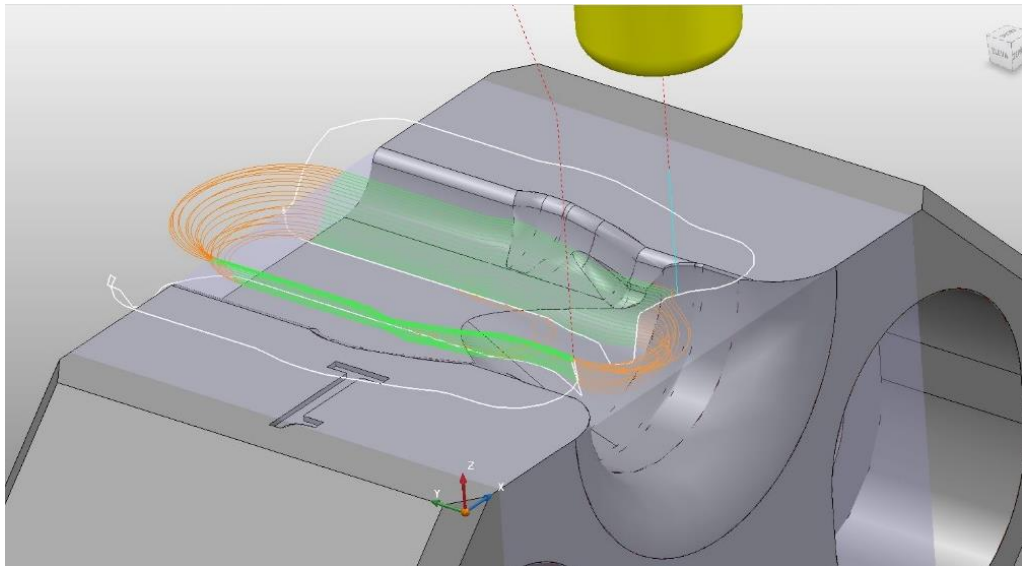
Strategie	hrub celek	na čisto plocha	na čisto sedlo	na čisto boky	zbytek po všem	zbytek po na čisto boky
Nástroj	Rádiusová 6R1 HRUB	Rádiusová 6R1 CISTE	Kulová 4	Rádiusová 6R1 CISTE	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4
Název strategie	Hrubování modelu	Dokončení rovin konturováním	Dokončení 3D konturováním	Dokončení optimalizovanou hladinou Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z
Směr řezu	Sousledné	Sousledné	Sousledné	Sousledné	Sousledné	Sousledné
Tolerance dráhy	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001
Přídavek	0,1	0	0	0	0	0
Scallop	-	-	0,005	0,005	0,005	0,005
Detekovaný materiál	-	-	0,02	0,02	0,01	0,005
Krok dolů/do boku	5 / 1	2 / -	-	-	-	-
Nájezd	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Výjezd	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Propojení	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Nejkratší	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk
Řezná rychlost [m/min]	100	120	110	120	100	100
Posuv na zub [mm]	0,024	0,02	0,02	0,02	0,015	0,011



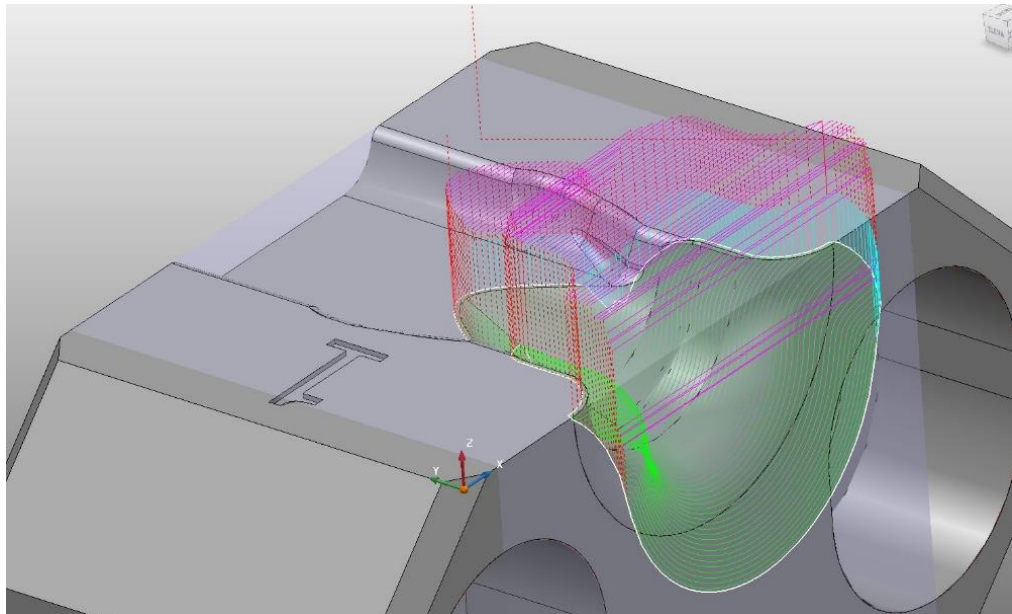
Obr. 57: Čtvrtá verze, hrub celek



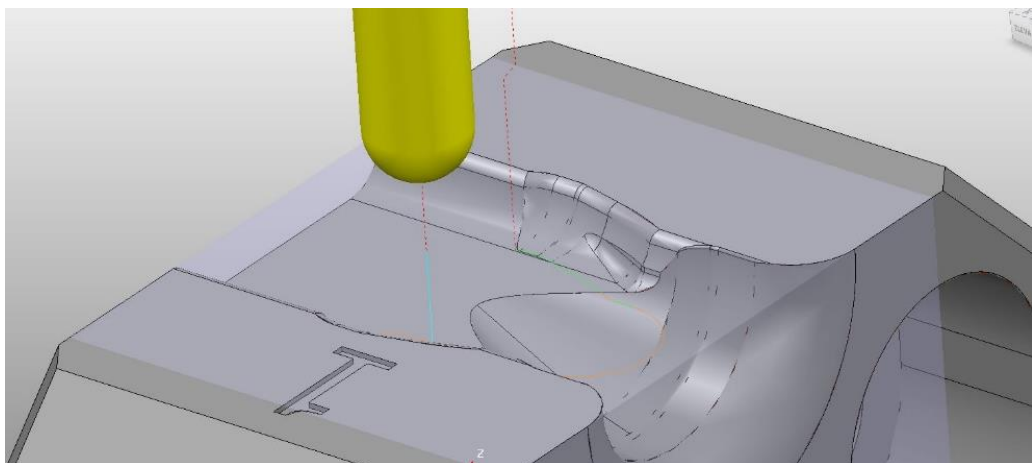
Obr. 58: Čtvrtá verze, na čisto plocha



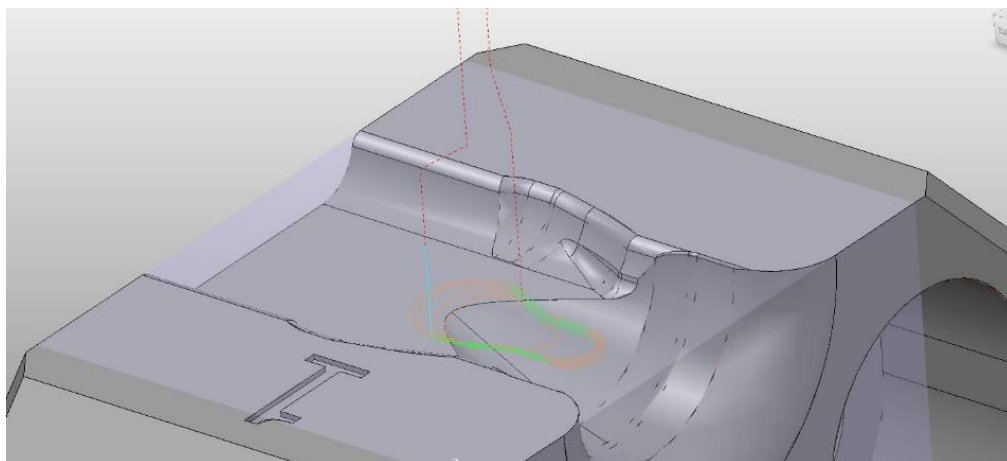
Obr. 59: Čtvrtá verze, na čisto boky



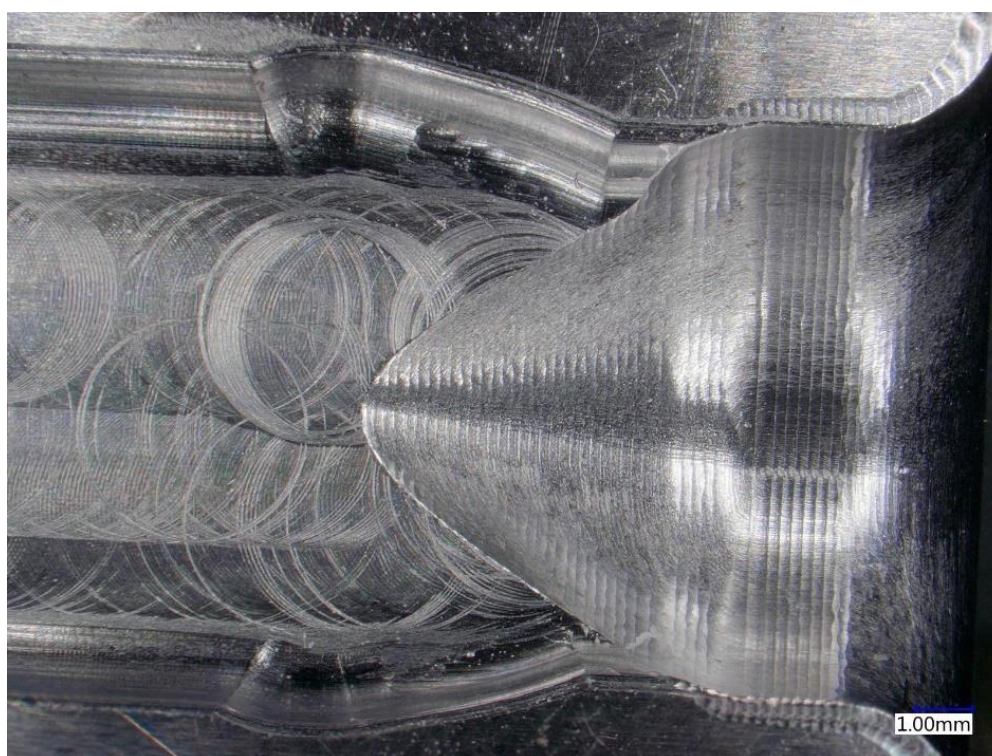
Obr. 60: Čtvrtá verze, na čisto sedlo



Obr. 61: Čtvrtá verze, zbytek po na čisto boky



Obr. 62: Čtvrtá verze, zbytek po všem



Obr. 63: Čtvrtá verze, obrobený povrch

Tab. 19: Čtvrtá verze, výrobní časy a počet nástrojů

Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů
3:14	5:14	8:28	4

Tab. 20: Čtvrtá verze, naměřené hodnoty drsnosti

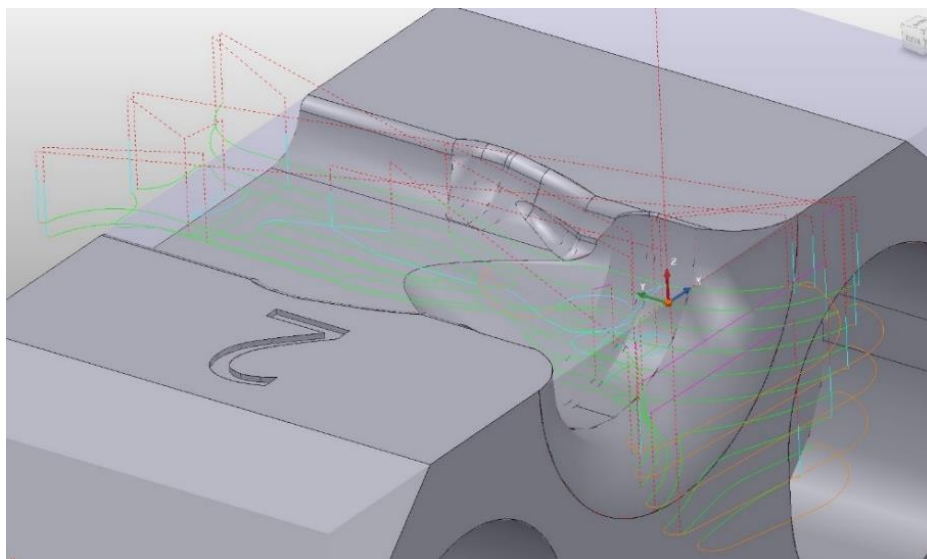
Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax [μm]	R Sm [μm]	R Mr (- 1.00, 5.0) [%]	R Mr (- 2.00, 5.0) [%]	R Mr (- 3.00, 5.0) [%]
0,726	3,586	3,925	232,313	25,86	61,27	98,39

4.8. Pátá verze kavity

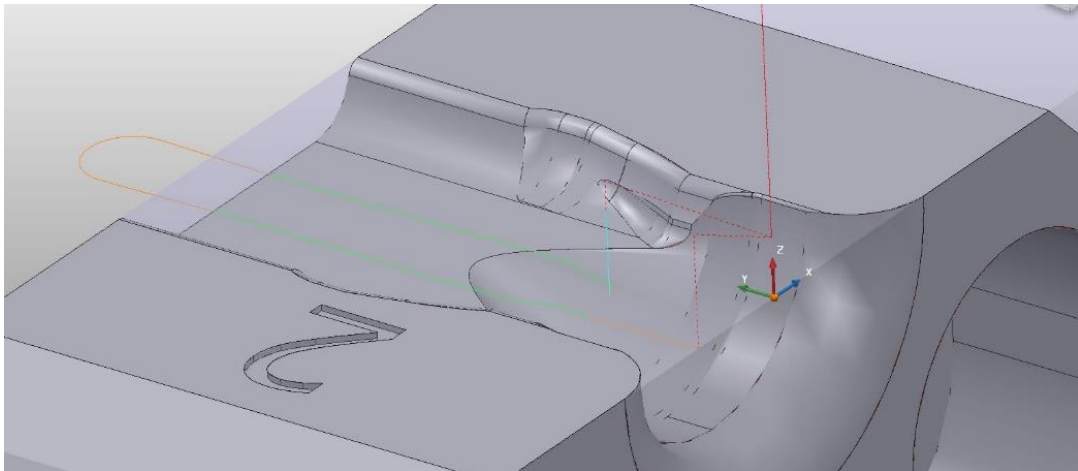
Pátá verze je kombinací druhé a třetí verze. Oba směry řezu byly použity pouze u „Na čisto sedlo“, kvůli úspoře času. Hodnoty scallop byly navýšeny, protože hodnoty Ra stále vyhovovaly a byl snížen počet drah i čas obrábění.

Tab. 21: Pátá verze, přehled nastavení použitých strategií

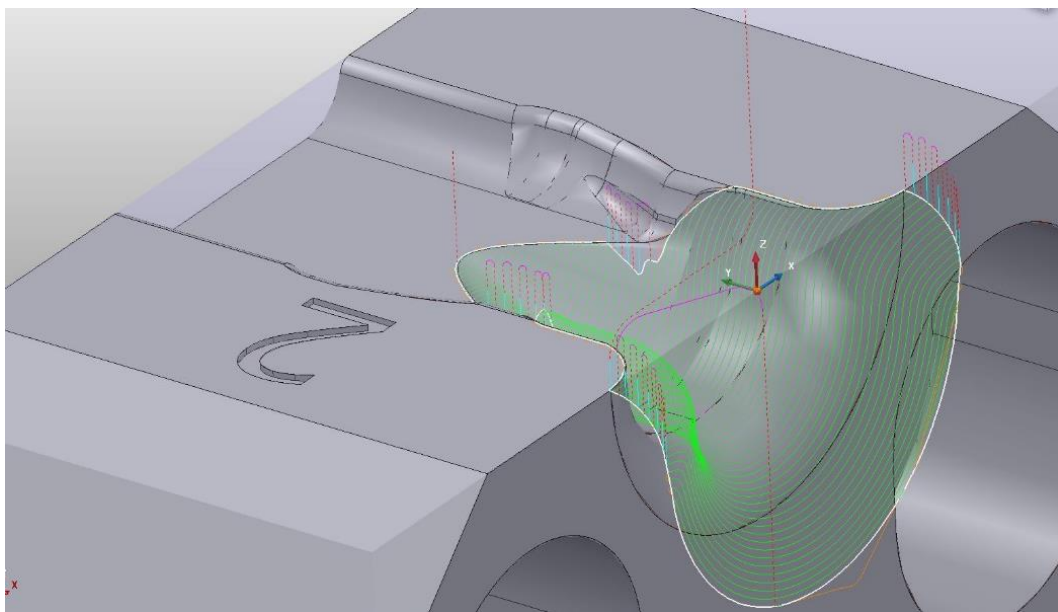
Strategie	hrub celek	na čisto plocha	na čisto sedlo	na čisto boky	zbytek po všem
Nástroj	Rádiusová 6R1	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4	Kulová 4	Rádiusová 6R0.5
Název strategie	Hrubování modelu	Dokončení rovin konturováním	Dokončení 3D konturováním	Dokončení v hladině Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z
Směr řezu	Sousledné	Sousledné	Oba	Sousledné	Sousledné
Tolerance dráhy	0,01	0,01	0,001	0,001	0,001
Přídavek	0,1	0	0	0	0
Scallop	-	-	0,008	0,008 (C.tol.:0,001)	0,008
Detekovaný materiál	-	-	0,002	0,002	0,01
Krok dolů/do boku	1,5 / 1,5	2 / -	-	-	-
Nájezd	Pod úhlem	Protažení	Ne	Ne	Ne
Výjezd	Ne	Protažení	Ne	Ne	Ne
Propojení	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk
Řezná rychlost [m/min]	110	110	100	110	110
Posuv na zub [mm]	0,02	0,02	0,015	0,015	0,015



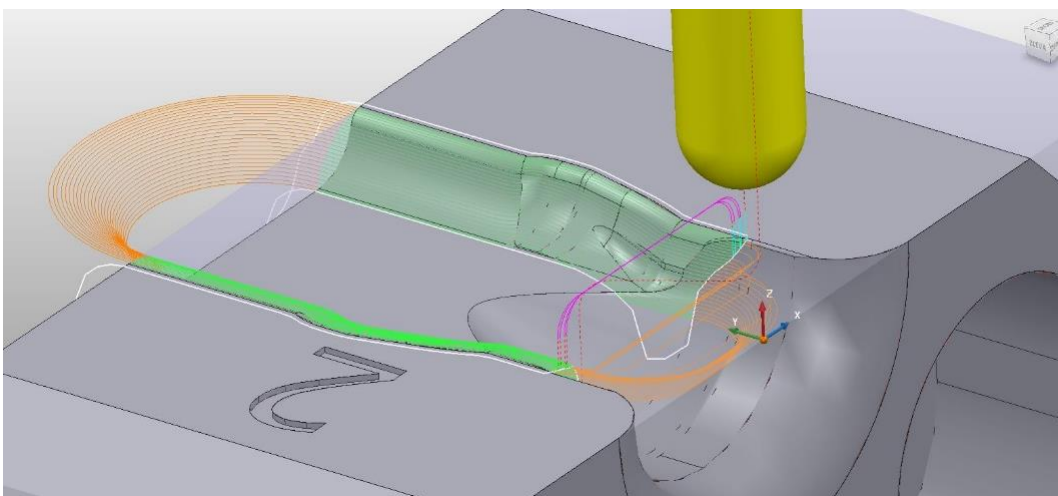
Obr. 64: Pátá verze, hrub celek



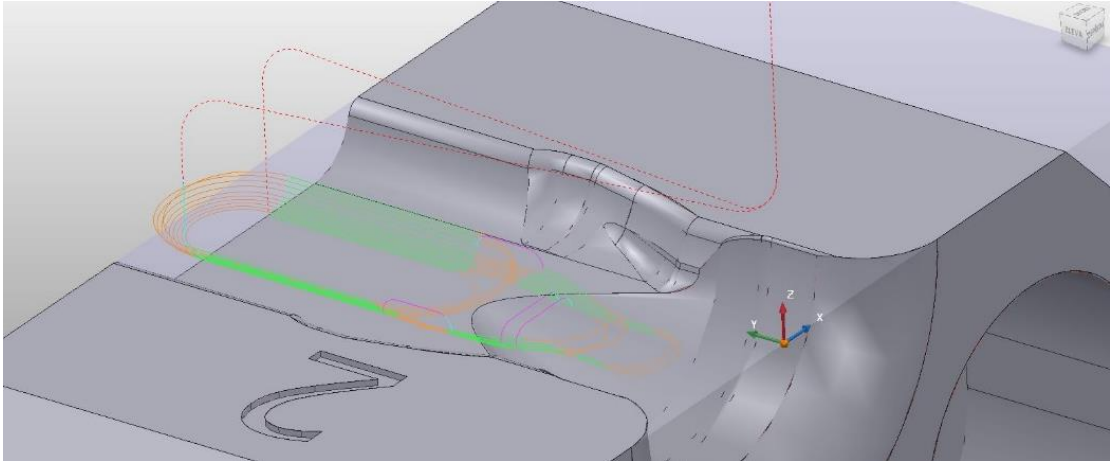
Obr. 65: Pátá verze, na čisto plocha



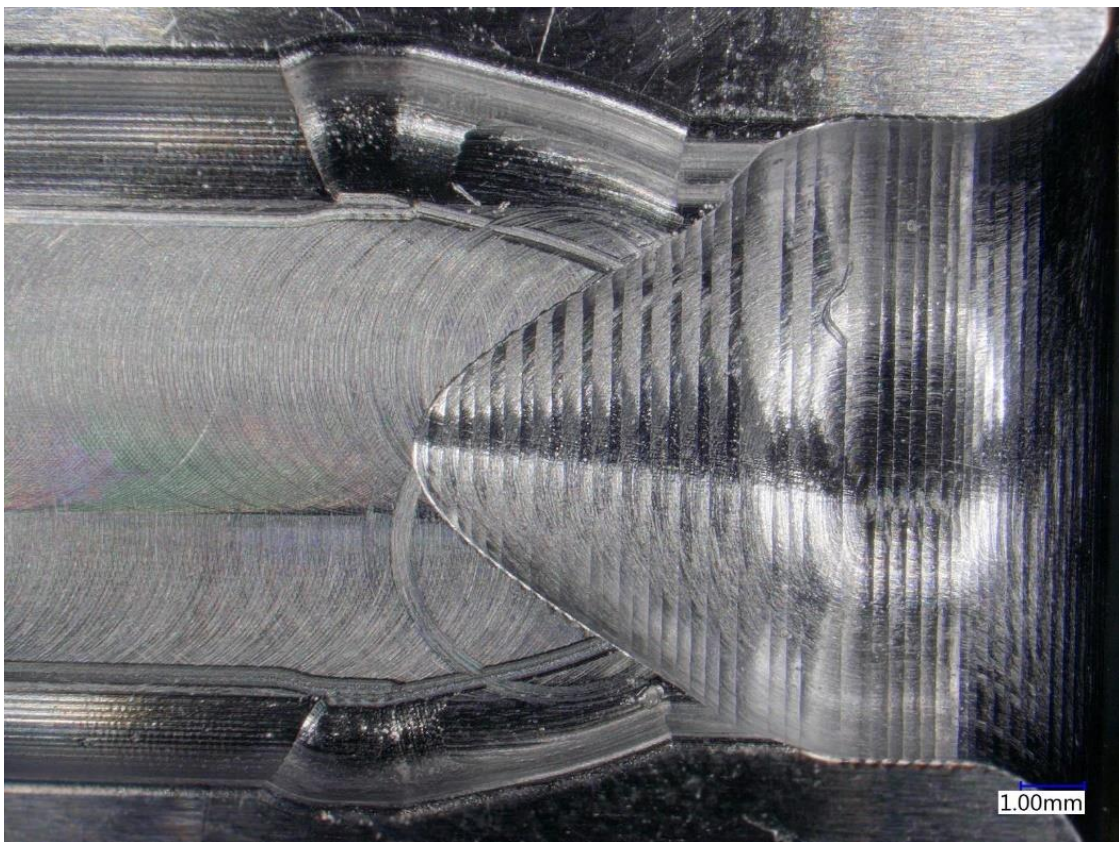
Obr. 66: Pátá verze, na čisto sedlo



Obr. 67: Pátá verze, na čisto boky



Obr. 68: Pátá verze, zbytek po všem



Obr. 69: Pátá verze, obroběný povrch

Tab. 22: Pátá verze, výrobní časy a počet nástrojů

Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů
4:16	7:44	12:00	3

Tab. 23: Pátá verze, naměřené hodnoty drsnosti

Ra[μ m]	Rz[μ m]	Rmax [μ m]	R Sm [μ m]	R Mr (-1.00, 5.0) [%]	R Mr (-2.00, 5.0) [%]	R Mr (-3.00, 5.0) [%]
1,126	5,461	5,764	264,536	17,97	34,01	57,27

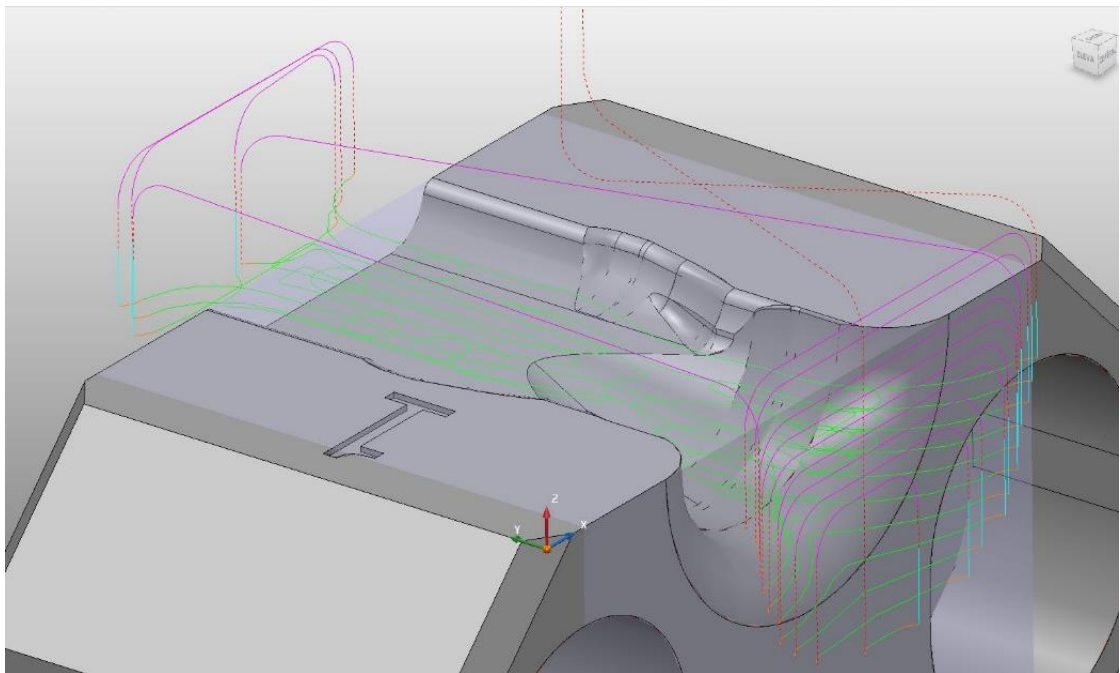
4.9. Šestá verze kavity

Verze navazuje technologií na čtvrtou verzi s poznatky z verzí ostatních. U „Na čisto plocha“ byl zvolen nástroj Rádiusová fréza s rádiusem 0,5mm, u které vychází oproti čtvrté verzi menší počet drah. Oproti čtvrté verzi byl zvolen směr řezu obousměrný stejně jako v předešlé paté verzi. Díky úspoře času byla zvolena u zbytku po bocích a zbytku po všem hodnota scallopu o 0,003mm nižší než v předchozí verzi. Krok dolů a do boku při hrubování byl upraven, protože do boku nezabírá celým průměrem nástroje a snížen krok dolů, protože v dalších obráběních tato verze byla upnuta na magnetu. Vyznačené změny jsou zvýrazněny jiným odstínem než u verze 5, protože verze 4 a 6 běžely paralelně s ostatními. Bylo to způsobeno vyčerpáním stroje nejen pro tuto práci.

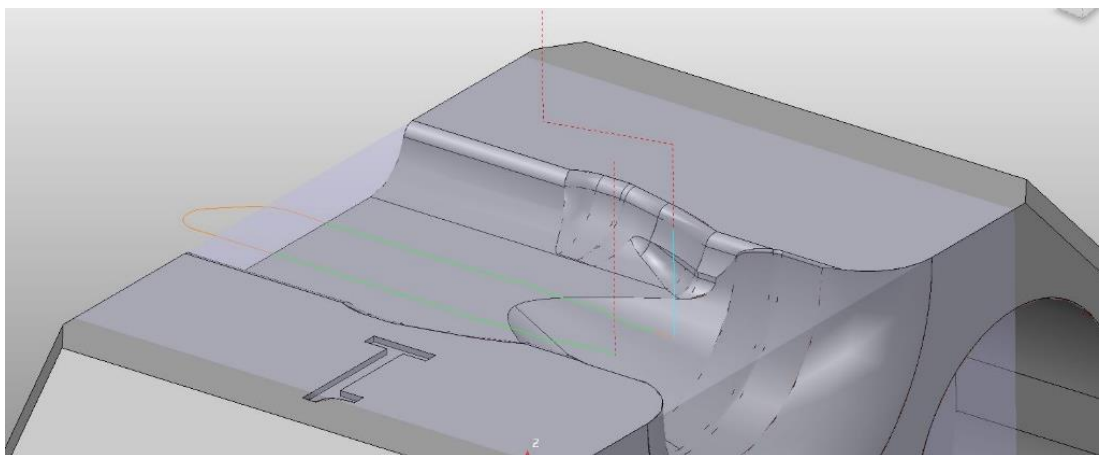
V této verzi, která byla pro kavitu poslední, byly optimalizovány dráhy nástroje a jeho přejezdy a napojení mezi drahami.

Tab. 24: Šestá verze, přehled nastavení použitých strategií

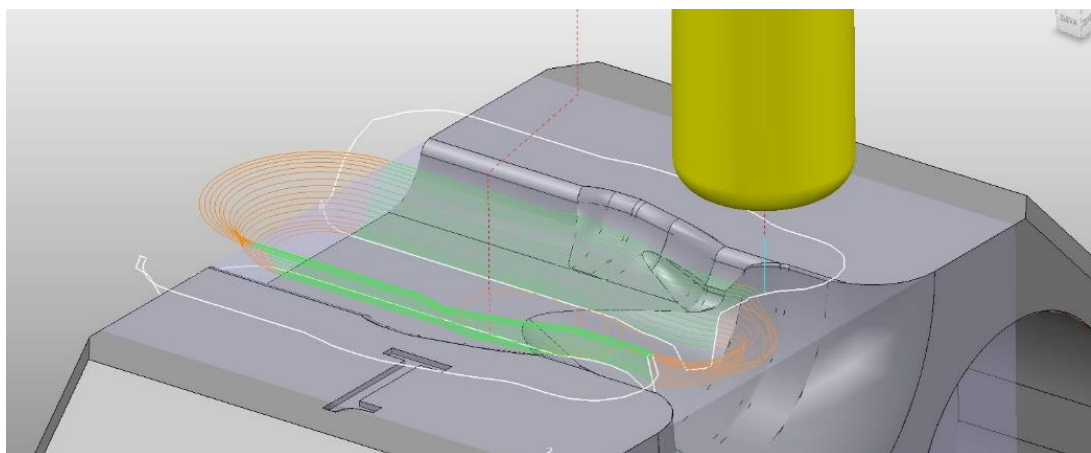
Strategie	hrub celek	na čisto plocha	na čisto sedlo	na čisto boky	zbytek po všem	zbytek po na čisto boky
Nástroj	Rádiusová 6R1 HRUB	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4	Rádiusová 6R1 CISTE	Rádiusová 6R0.5	Kulová 4
Název strategie	Hrubování modelu	Dokončení rovin konturováním	Dokončení 3D konturováním	Dokončení optimalizovanou hladinou Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z	Dokončení optimalizovanou hladinou Z
Směr řezu	Sousledné	Sousledné	Oba	Sousledné	Sousledné	Sousledné
Tolerance dráhy	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001
Přídavek	0,1	0	0	0	0	0
Scallop	-	-	0,008	0,008	0,005	0,005
Detekovaný materiál	-	-	0,02	0,02	0,01	0,005
Krok dolů/do boku	5 / 0,7	2 / -	-	-	-	-
Nájezd	Horiz.oblouk	Ne	Vert. oblouk	Ne	Horiz. Oblouk	Oblouk norm. ploch
Výjezd	Horiz.oblouk	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Propojení	Nejkratší	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk	Kruhový oblouk
Řezná rychlost [m/min]	100	120	110	120	100	100
Posuv na zub [mm]	0,024	0,02	0,02	0,02	0,015	0,011



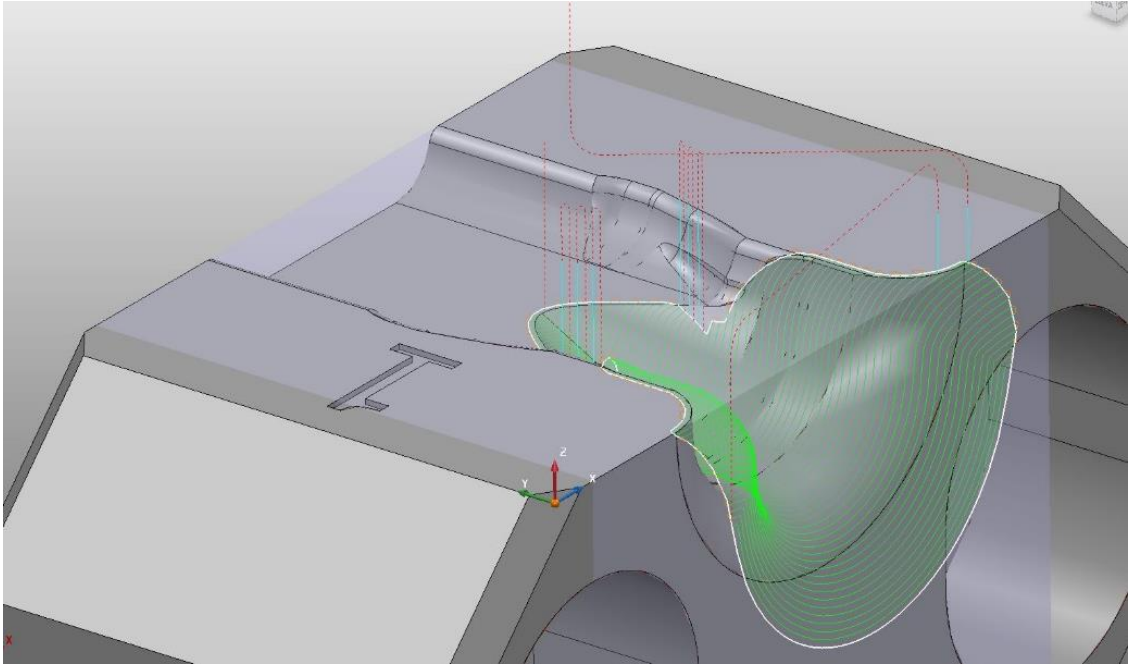
Obr. 70: Šestá verze, hrub celek



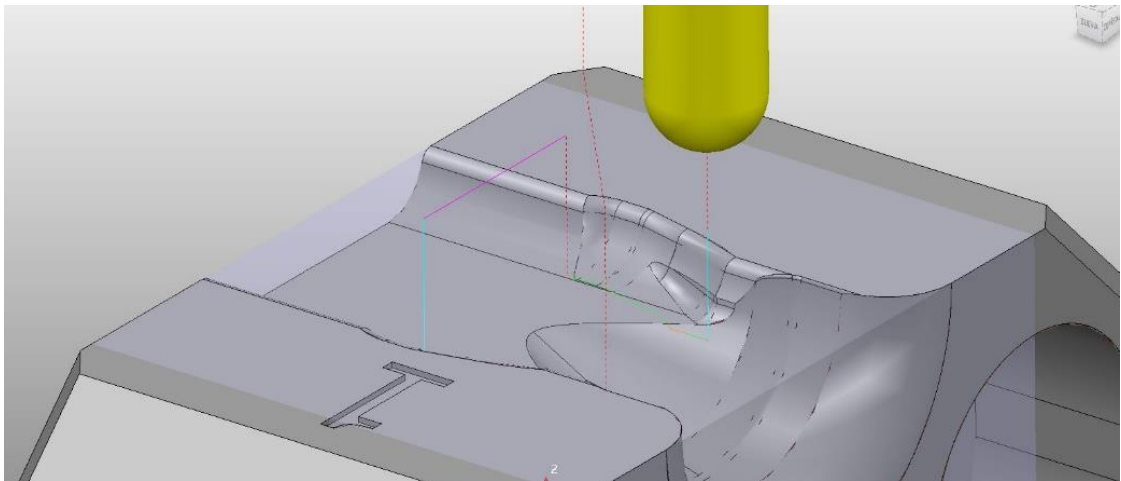
Obr. 71: Šestá verze, na čisto plocha



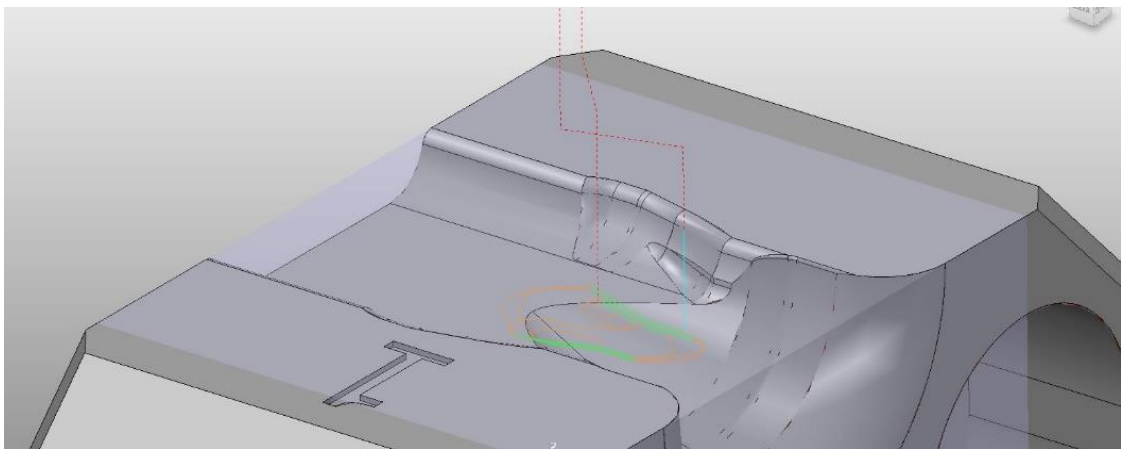
Obr. 72: Šestá verze, na čisto boky



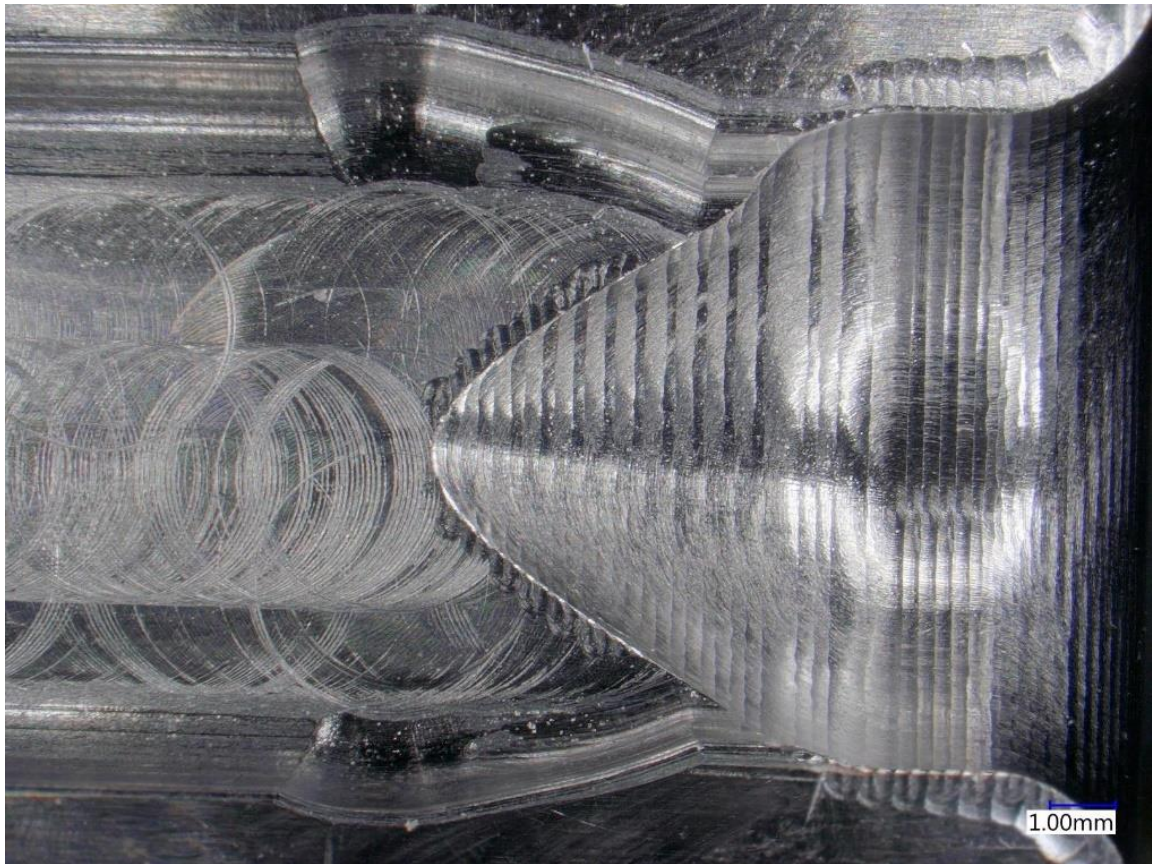
Obr. 73: Šestá verze, na čisto sedlo



Obr. 74: Šestá verze, zbytek po na čisto boky



Obr. 75: Šestá verze, zbytek po všem



Obr. 76: Šestá verze, obrobený povrch

Tab. 25: Šestá verze, výrobní časy a počet nástrojů

Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů
1:58	4:30	6:29	4

Tab. 26: Šestá verze, naměřené hodnoty drsnosti

Ra[μ m]	Rz[μ m]	Rmax [μ m]	R Sm [μ m]	R Mr (- 1.00, 5.0) [%]	R Mr (- 2.00, 5.0) [%]	R Mr (- 3.00, 5.0) [%]
1,212	5,864	6,323	287,346	17,95	34,41	57,15

4.10. První verze celé součásti s pátou verzí kavity

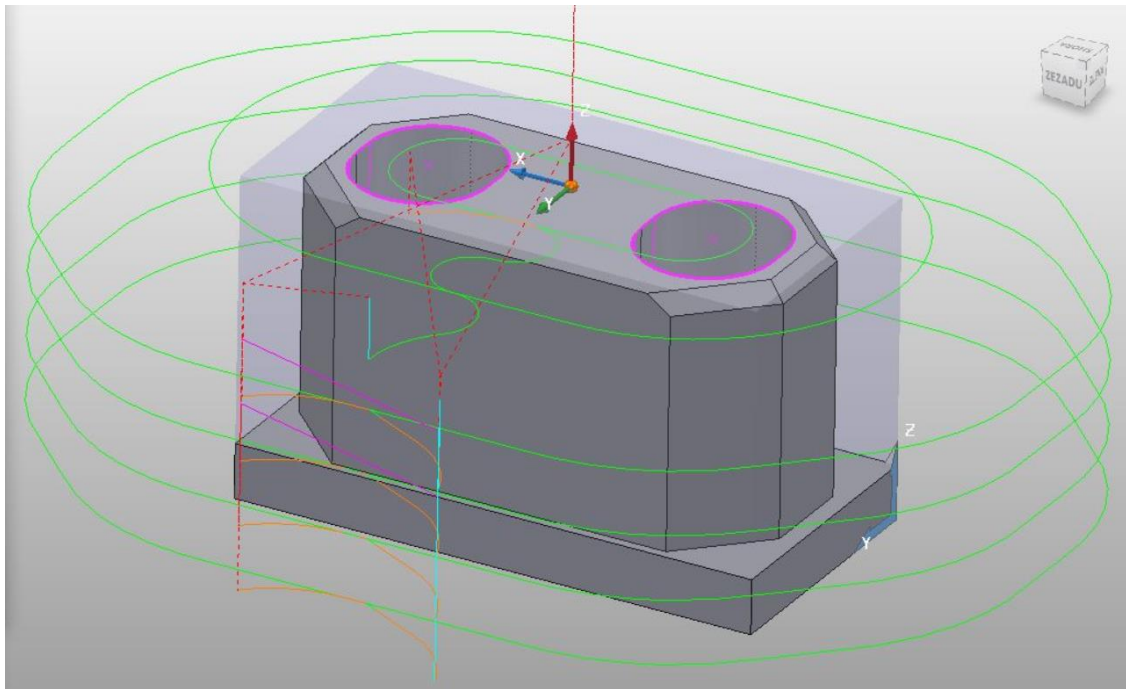
Po zkušebních vzorcích na kavitu se přešlo k výrobě celé součásti stále ještě z měkkého materiálu. Hlavním cílem bylo ověření, zda je CNC frézka schopna vyrobit součást navrženou technologií v setinových tolerancích. U hrubování byla použita plátková fréza, která se ukázala jako nevhodná, kvůli plátkům, kterými byla osazena. U „Boky na čisto“ byla jedna dráha na celou hloubku součásti. Rozměry získané z tohoto obrábění byly od sebe v jedné setině. Jelikož tato hodnota je nepředstavitelná pro sériovou výrobu, bylo nutno obrábět boky na více drah. Při dalším obrábění byla válcová 40 fréza nahrazena frézou válcovou 16.

Strategie u zahloubení a díry byly zvoleny totožné a vyhovovaly. Sražení bylo použito stejné jak vnější, tak vnitřní. Rozdíl byl pouze v jejich velikostech.

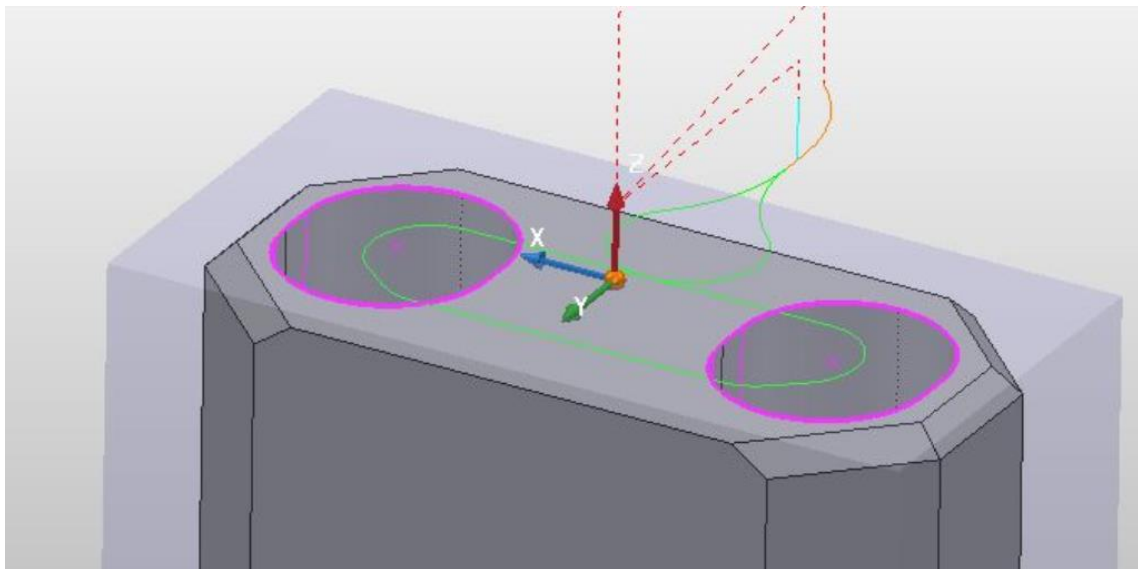
Tab. 27: Přehled použitých strategií

Op.	Název strategie	Nástroj	Strategie	Přídavek [mm]	Krok do boku/dolů [mm]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm]
1	Na hrubo vršek, boky	Válcová 40	Hrubování modelu	0,2	13/6	110	0,05
1	Na čisto vršek	Válcová 16	Dokončování rovin konturováním	0	14/-	110	0,03
1	Na čisto boky	Válcová 16	Dokončení profilu	0	-	110	0,03
1	Zahloubení	Válcová 8	Hrubování modelu	0	3/0,8	110	0,02
1	Díry	Válcová 5	Hrubování modelu	0	3/0,5	110	0,02
1	Sražení	Srážeč 45°	Frézování sražení	0	-	110	0,01
2	Na hrubo vršek	Valcová 16	Hrubování modelu	0,2	14/1	150	0,1
2	Na čisto vršek	Válcová 16	Dokončování rovin konturováním	0	15/-	110	0,03
2	Zahloubení	Válcová 8	Hrubování modelu	0	3/0,8	110	0,02
2	Sražení	Srážeč 45°	Frézování sražení	0	-	150	0,02

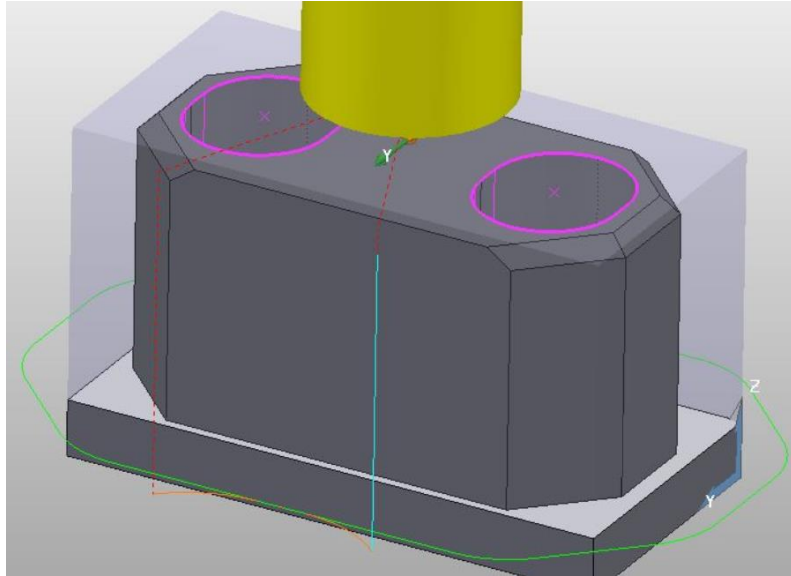
První frézovací operace:



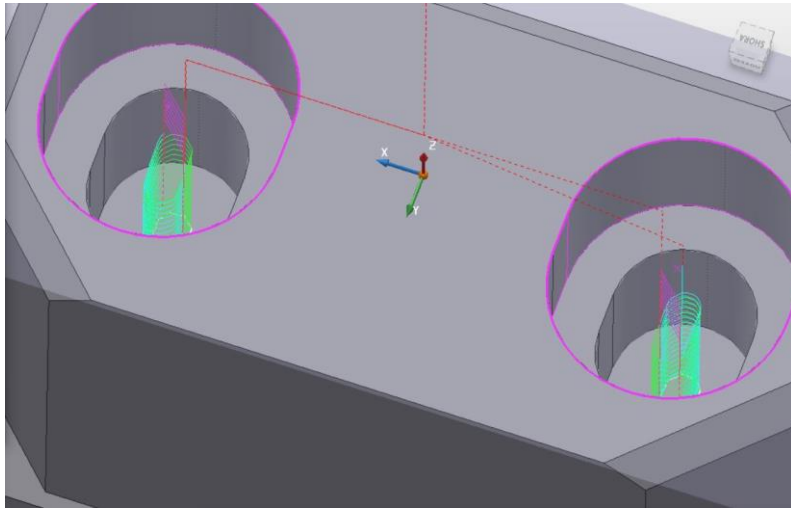
Obr. 77: Na hrubo vršek, boky



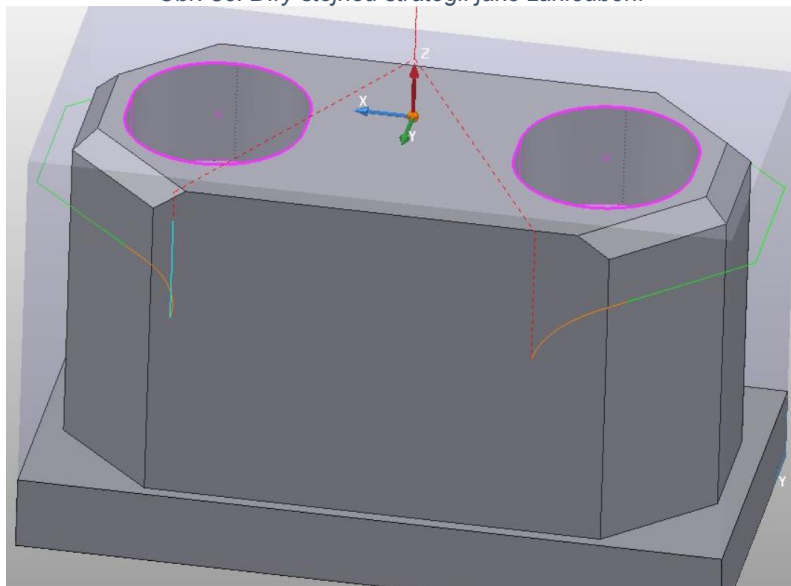
Obr. 78: Na čisto vršek



Obr. 79: Na čisto boky

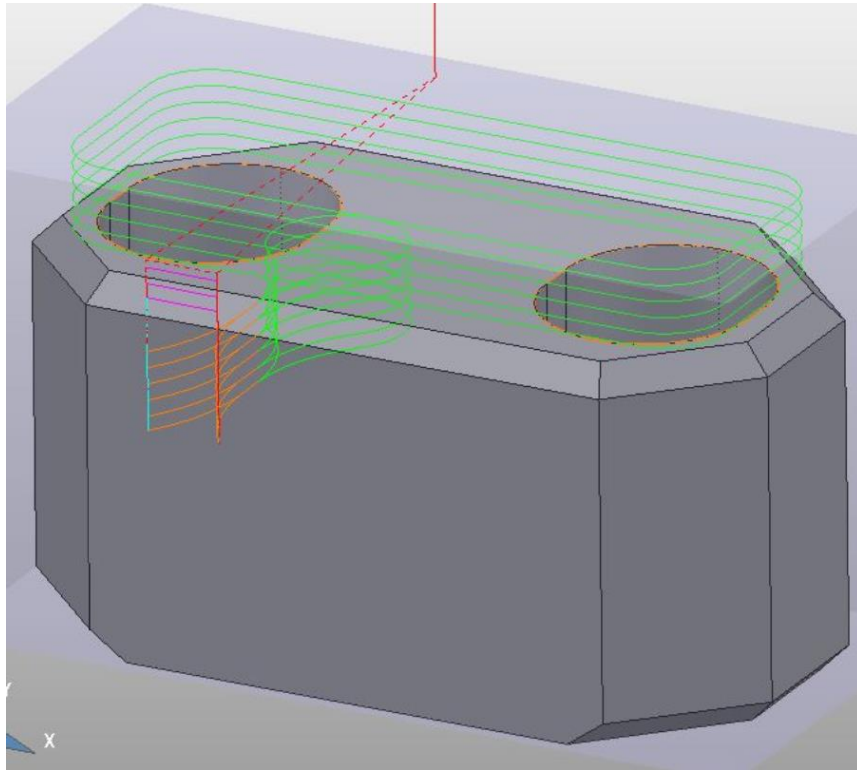


Obr. 80: Díry stejnou strategií jako zahloubení

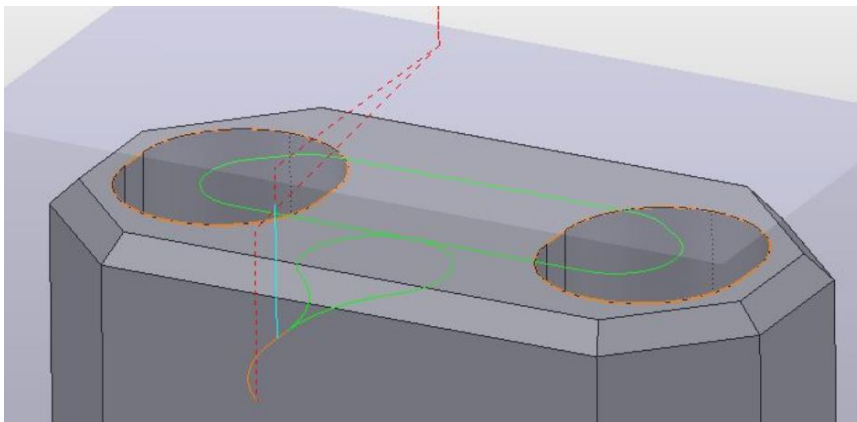


Obr. 81: Sražení

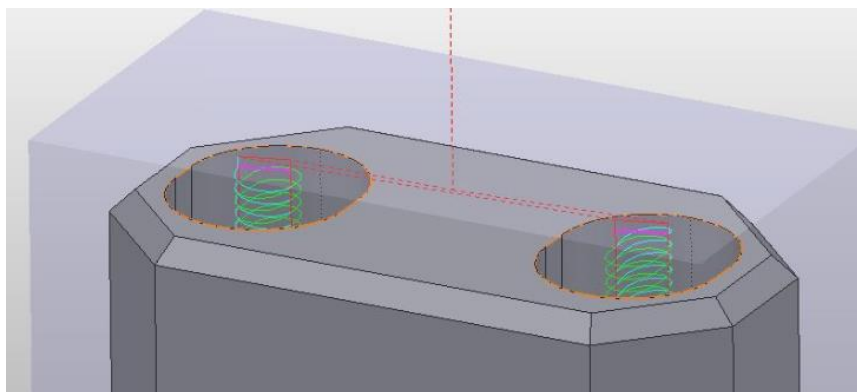
Druhá frézovací operace:



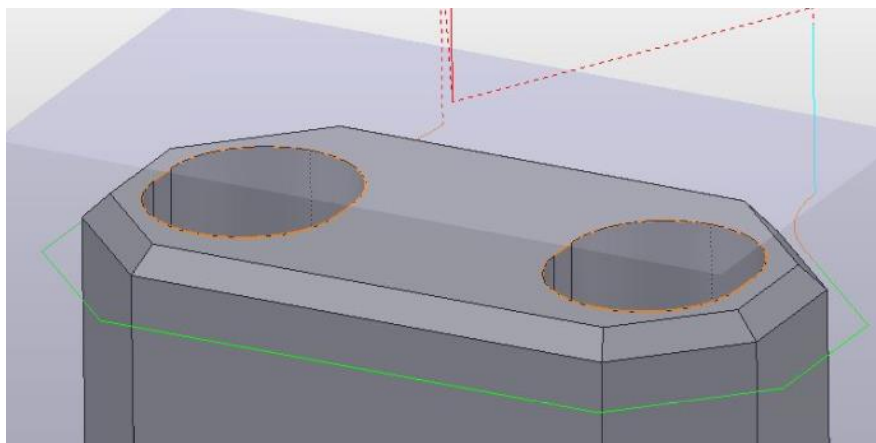
Obr. 82: Na hrubo vršek



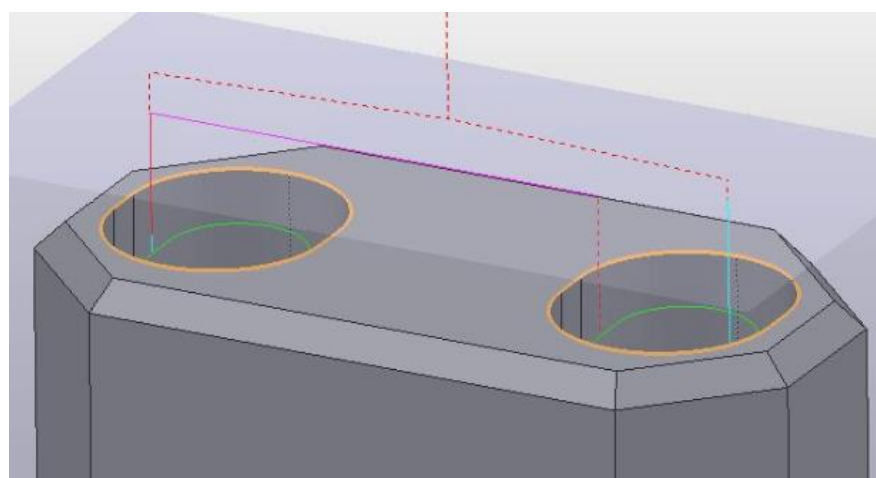
Obr. 83: Na čisto vršek



Obr. 84: Zahloubení



Obr. 85: Sražení



Obr. 86: Sražení

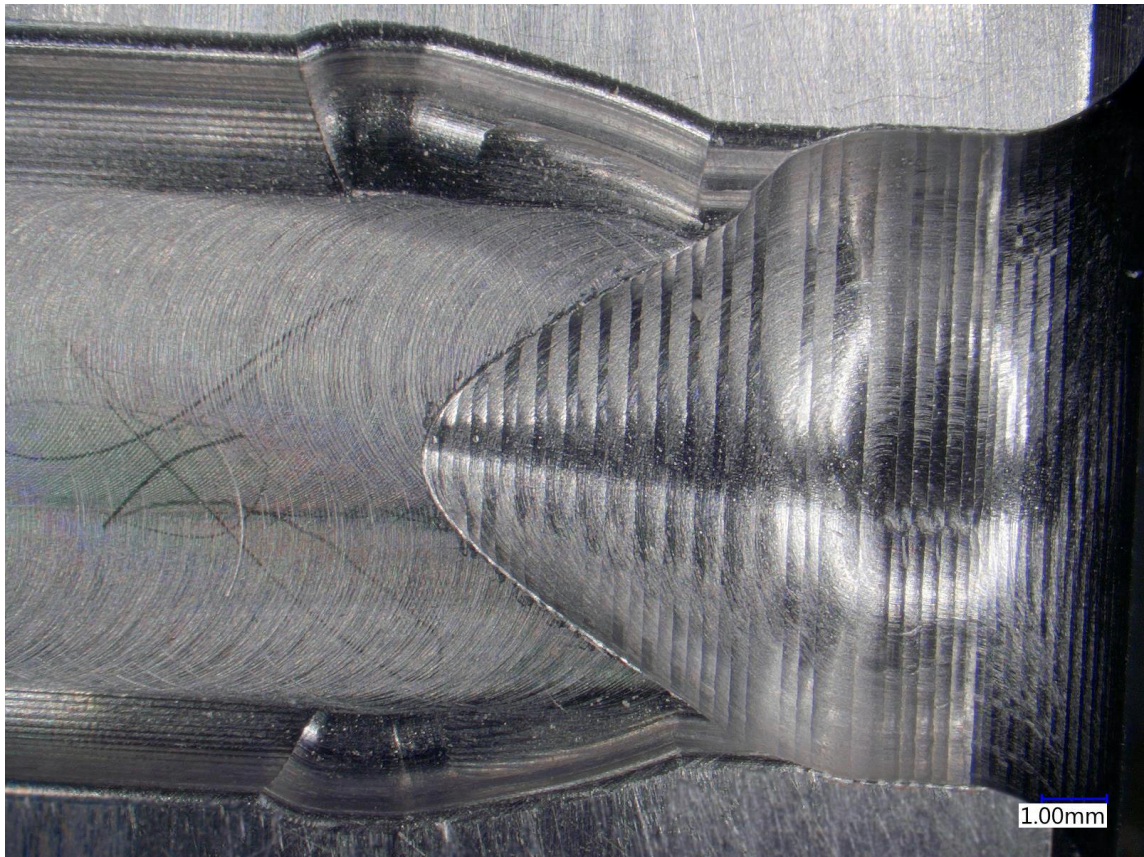
Po obrobení celé součásti se na obou stranách vytvořily kavity, na kterých byla vyzkoušena opakovatelnost výroby páte verze. Na snímcích jsou vidět obě obrobené kavity stejné verze. Na obr.88. jsou vidět větší stopy po nástroji na kuželové ploše. Je to způsobeno setinovým rozdílem u boků součásti.

Tab. 28: Tabulka časů a počtů nástrojů

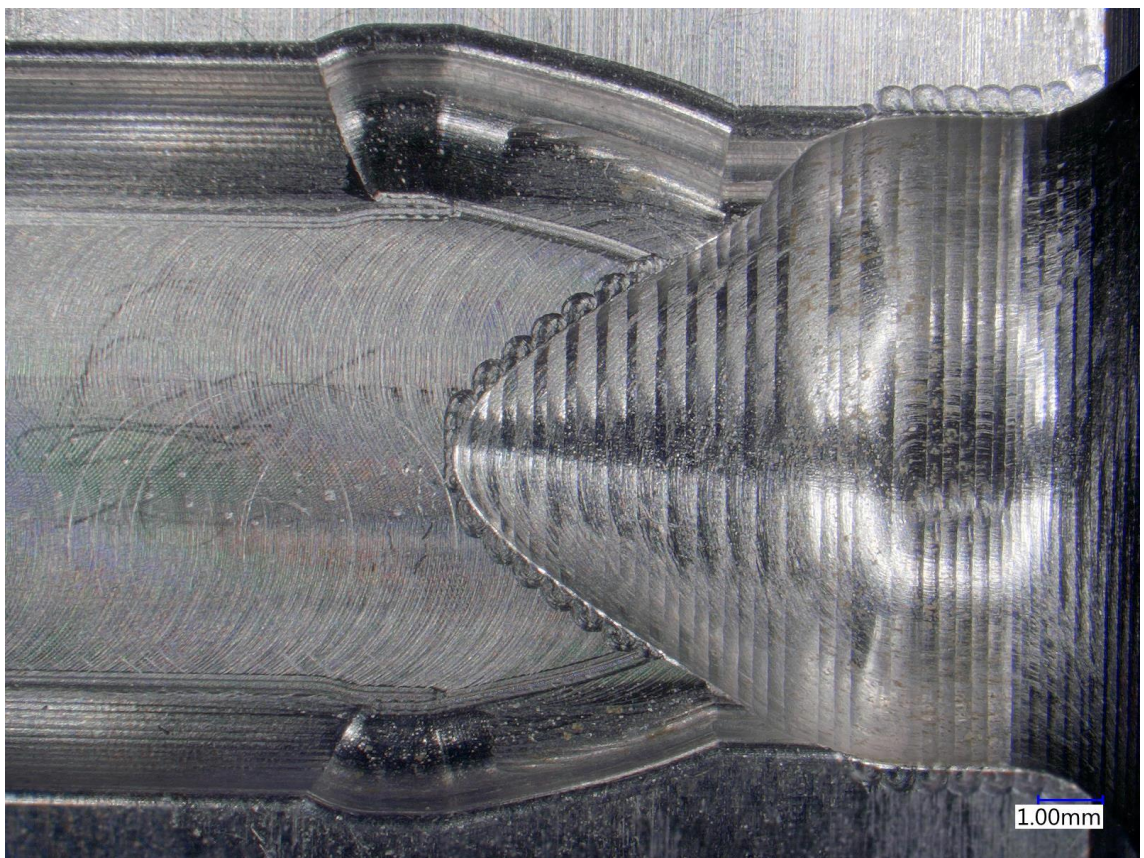
Op.	Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů	Celkový čas/verzi
1	4:55	11:37	16:32	5	22:49
2	2:19	3:58	6:17	4	

Tab. 29: Naměřené hodnoty drsnosti

	Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax [μm]	R Sm [μm]	R Mr (- 1.00, 5.0) [%]	R Mr (- 2.00, 5.0) [%]	R Mr (- 3.00, 5.0) [%]
1 strana V5celek1	1,267	6,102	7,030	370,100	16,33	31,42	56,84
2 strana V5celek2	1,185	5,606	5,907	264,393	16,76	32,53	55,64



Obr. 87: Kavita V5celek1



Obr. 88: Kavita V5celek2

4.11. Druhá verze celé součásti s šestou verzí kavity

Druhá verze celé součásti je stále z měkkého materiálu. Jak bylo zmíněno, válcová fréza s průměrem 40 mm byla nahrazena válcovou 16. Hrubování, kvůli nastavení omezení, bylo rozděleno do dvou strategií. Dokončovací strategie byla použita jako hrubovací s použitými přídávky, protože vygenerované dráhy lépe odpovídaly, než ve strategii hrubovací.

U předchozí verze se na stroji snižoval posuv při obrábění hrubování boků. Proto se upravil krok dolů i do boku. Při strategii „Na čisto boky“ byla použita strategie hrubování, protože bylo zapotřebí obrábět boky po více částech. Tato varianta se povedla a tolerance oproti předchozí verzi se nacházela v rozmezí tří tisícín milimetru. Tím se ukázalo, že obrábění boků lze provádět sériově na CNC frézce.

Horší byl rozměr mezi obráběnými vršky z každé strany součásti, kde je tolerance také v jedné setině milimetru. Kvůli upínání tato tolerance nemohla být dodržena. Bylo usouzeno, že se vršky ponechají po obrábění na CNC frézce s přídávkem a následným broušením bude docíleno požadované tolerance.

V druhé frézovací operaci byla upravena hrubovací strategie, aby řezné síly směřovaly do svěráku, kde je součást upnuta.

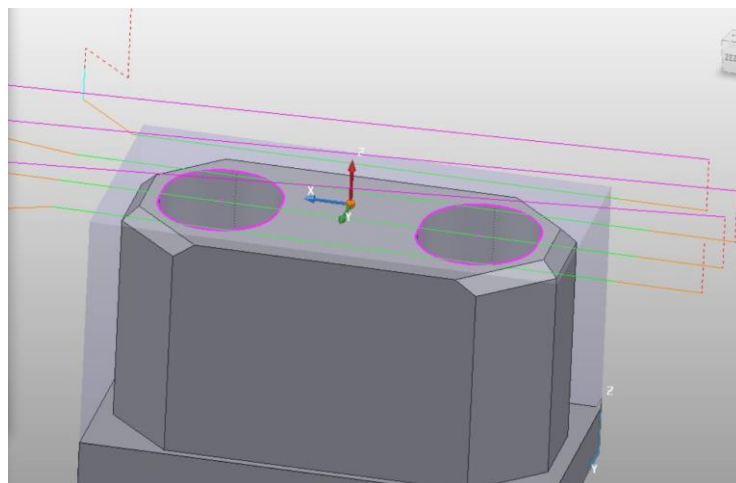
Zahloubení, díry a sražení byly ponechány na stejných hodnotách.

Na obou snímcích šesté verze je vidět, že je napojení na polotovar s nástrojem oproti předešlé verzi lepší, díky správně vyrobeným rozměrům po bocích součásti. Do vyrobené celé součásti byly kvůli opakovatelnosti kvality a rozměrů vyhotoveny kavity z šesté verze. I díky optimalizaci přejezdů a nájezdů s kroky nástrojů bylo dosaženo zkrácení času o více jak 2 minuty.

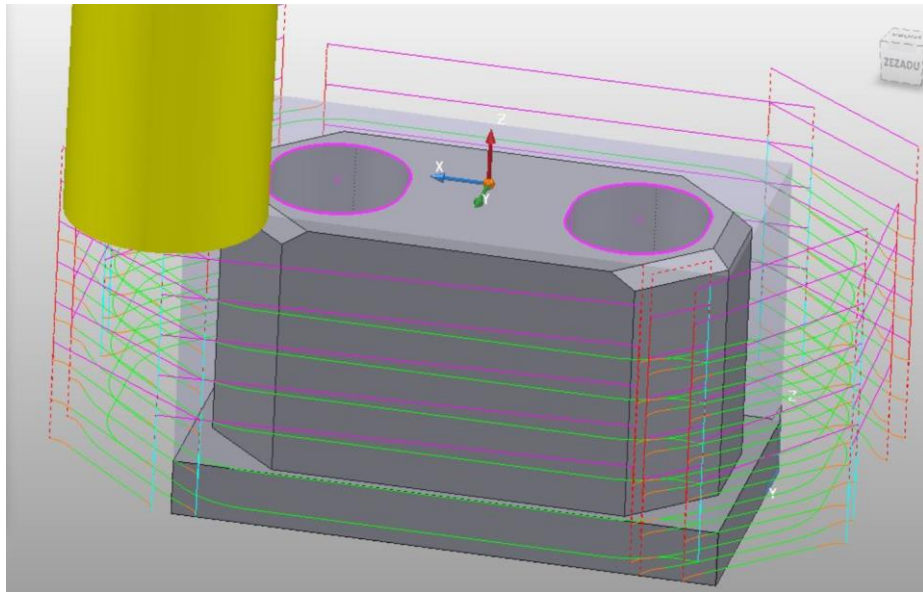
Tab. 30: Přehled použitých strategií

Op.	Název strategie	Nástroj	Strategie	Přídavek [mm]	Krok do boku/dolů [mm]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm]
1	Na hrubo vršek	Válcová 16	Dokončení rovin řádkováním	0,2	6/-	120	0,05
1	Na hrubo boky	Válcová 16	Hrubování modelu	0,2	2/4	120	0,05
1	Na čisto vršek	Válcová 16	Dokončení rovin řádkováním	0	14/-	150	0,03
1	Na čisto boky	Válcová 16	Hrubování modelu	0	15/5,2	150	0,03
1	Zahloubení	Válcová 8	Hrubování modelu	0	3/0,8	110	0,02
1	Díry	Válcová 5	Hrubování modelu	0	3/0,5	110	0,02
1	Sražení	Srážeč 45°	Frézování sražení	0	-	150	0,02
2	Na hrubo vršek	Válcová 16	Hrubování modelu	0,2	6,1/2	110	0,05
2	Na čisto vršek	Válcová 16	Dokončení rovin řádkováním	0	12/-	150	0,03
2	Zahloubení	Válcová 8	Hrubování modelu	0	3/0,8	110	0,02
2	Sražení	Srážeč 45°	Frézování sražení	0	-	150	0,02

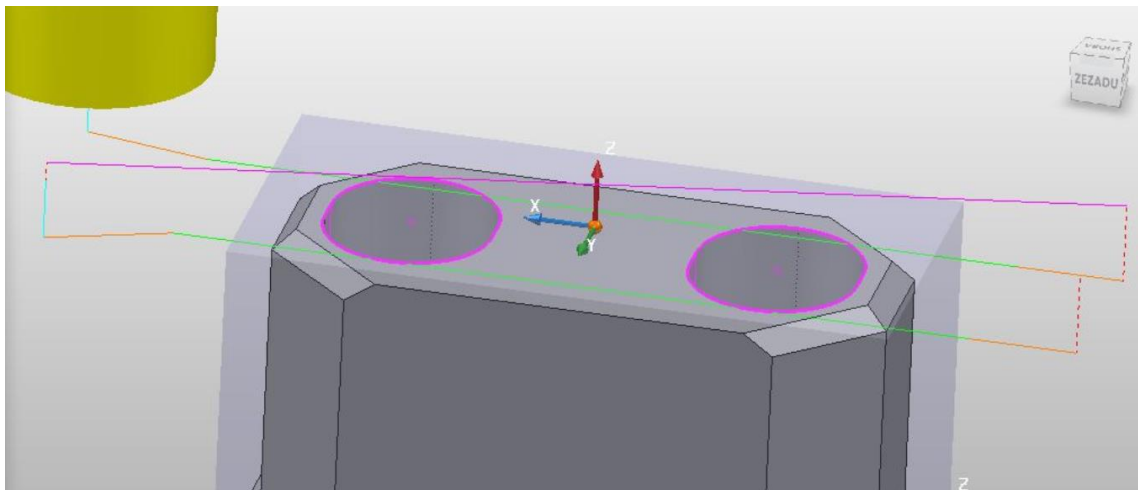
První frézovací operace:



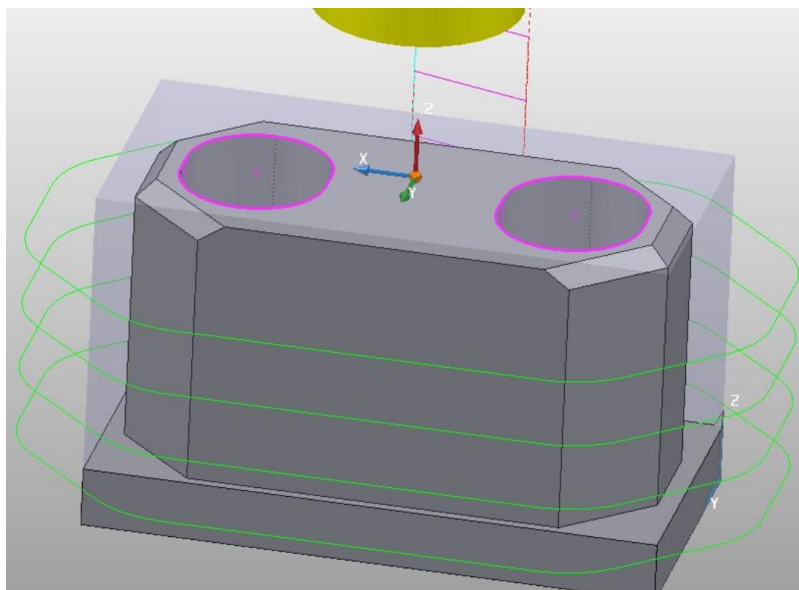
Obr. 89: Na hrubo vršek



Obr. 90: Na hrubo boky

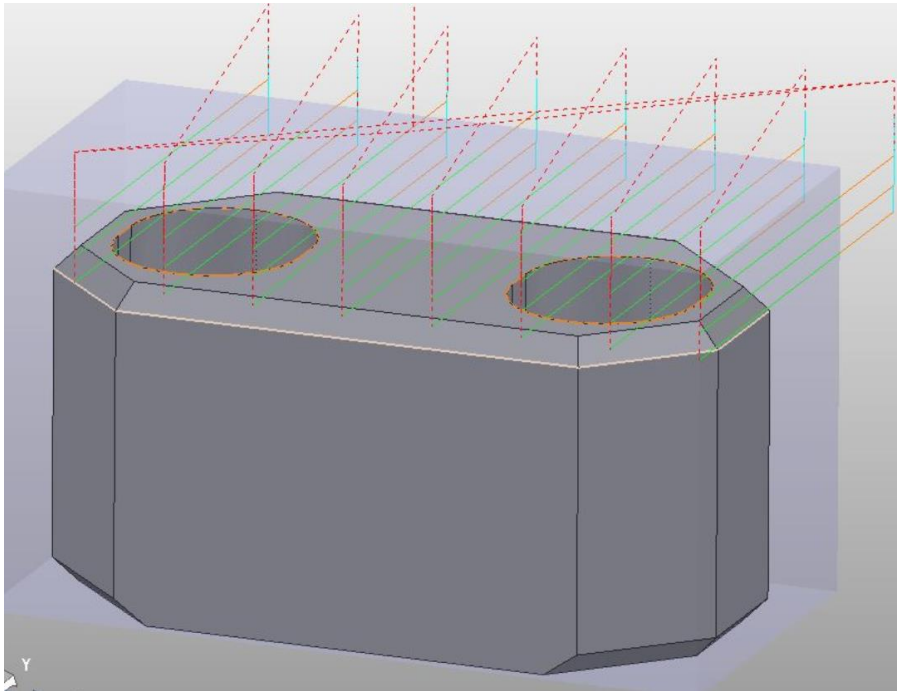


Obr. 91: Na čisto vršek

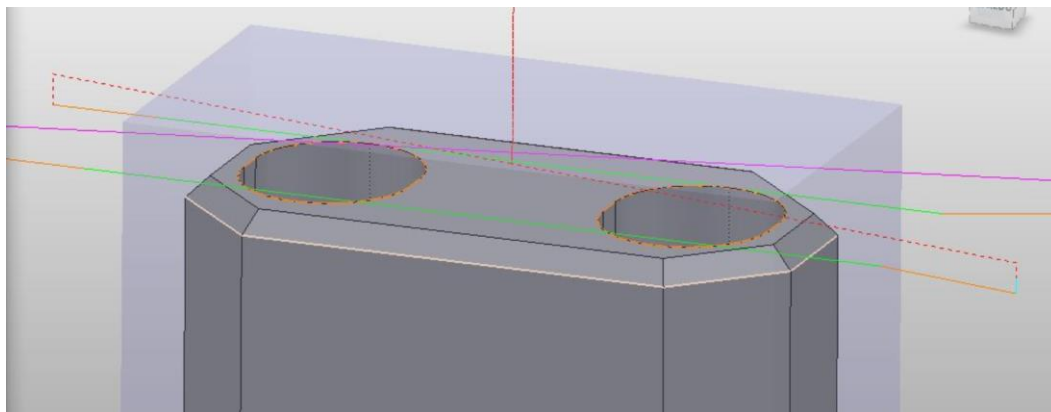


Obr. 92: Na čisto boky

Druhá frézovací operace:



Obr. 93: Na hrubo vršek



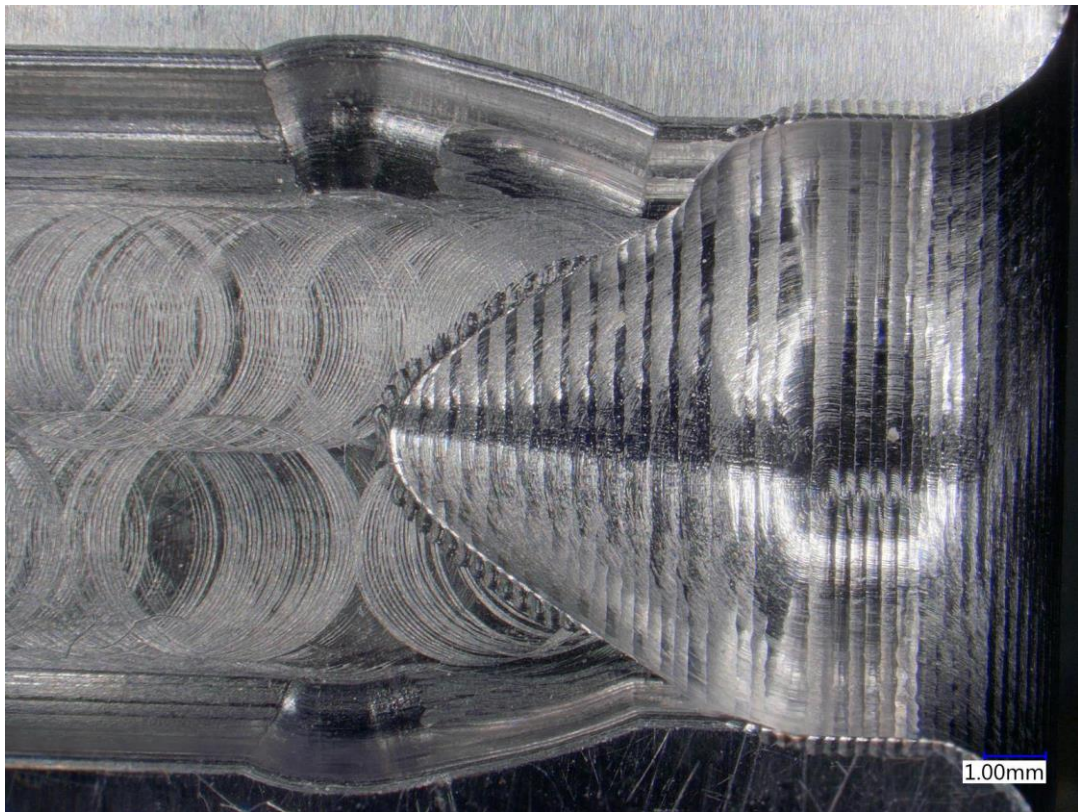
Obr. 94: Na čisto vršek

Tab. 31: Tabulka časů a počtů nástrojů

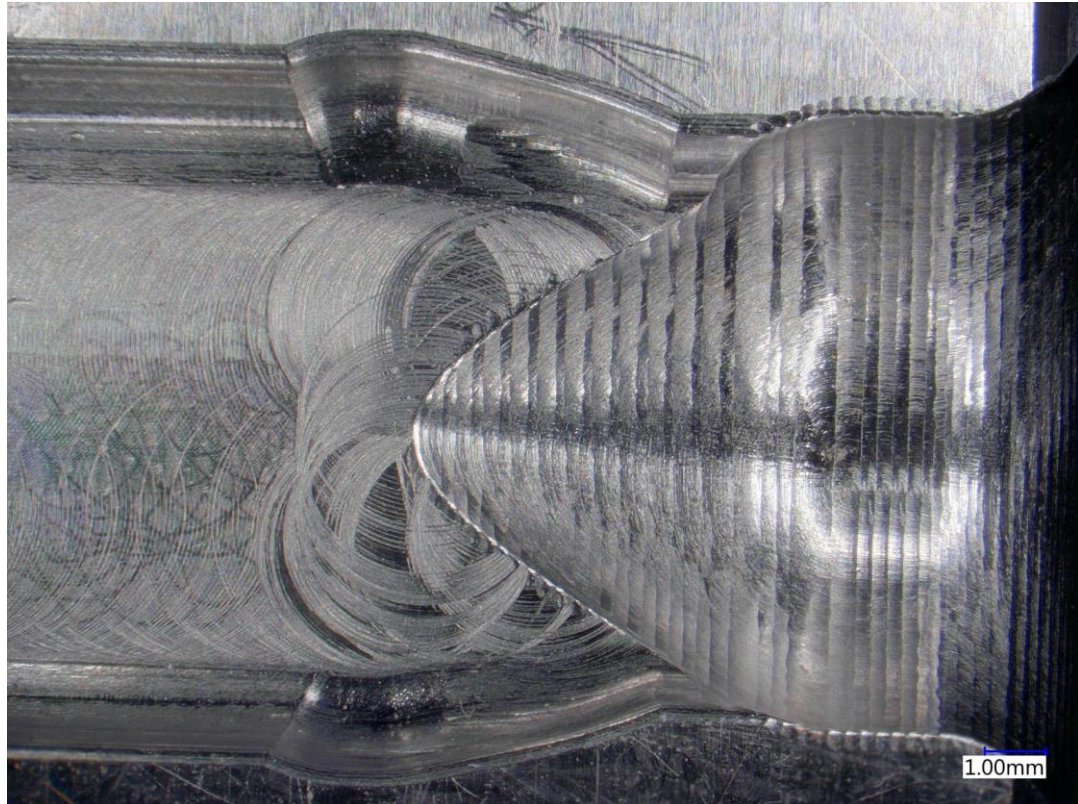
Op.	Čas přejezdů [min]	Čas nástroje [min]	Celkový čas [min]	Počet nástrojů	Celkový čas/verzi
1	5:42	8:08	13:50	5	20:12
2	2:57	3:25	6:22	4	

Tab. 32: Naměřené hodnoty drsnosti

	Ra[μm]	Rz[μm]	Rmax [μm]	R Sm [μm]	R Mr (-1.00, 5.0) [%]	R Mr (-2.00, 5.0) [%]	R Mr (-3.00, 5.0) [%]
1 strana V6celek1	1,192	5,489	6,154	395,556	18,51	37,86	62,54
2 strana V6celek2	1,130	5,511	5,999	296,375	17,89	34,90	62,63



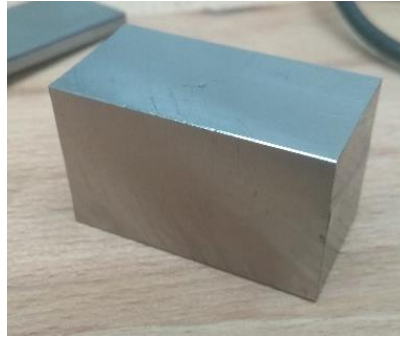
Obr. 95: Kavita V6celek1



Obr. 96: Kavita V6celek2

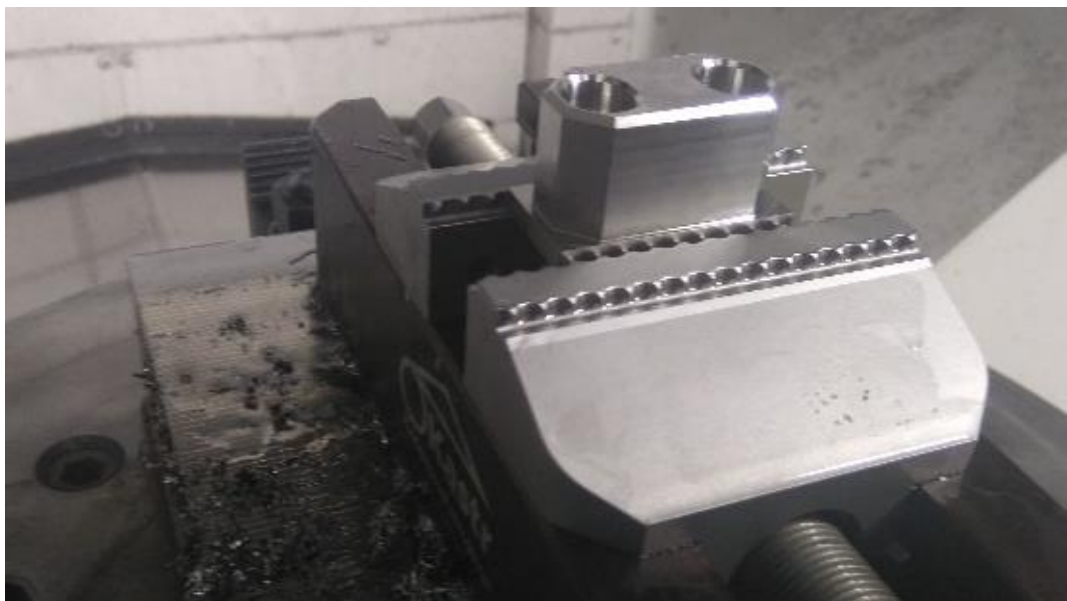
5. Výroba dle navržené technologie

Výroba z finálního materiálu Maraging V300 probíhala dle navržených technologií. Byla použita druhá verze pro výrobu celkové součásti s šestou verzí kavity.

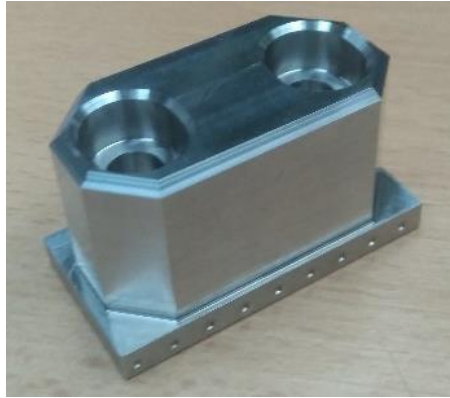


Obr. 97: Polotovár z maraging oceli

Po první frézovací operaci „Na čisto boky“ byla změřena šířka obrobenej součásti. Šířka u obrábění do tvrdého materiálu vyšla mimo toleranční pole. Proto byla znovu použita strategie „Na čisto boky“, kterou se doobrobil zbytek materiálu. U druhého kusu z maraging oceli byl zvolen menší přídavek 0,05mm na obrábění na čisto a problém byl vyřešen. Oproti obrábění do zkušebních vzorků byla tvrdost materiálu 32HRc značně poznat na rozměrech obrobku. Tam, kde bylo obrobění konstrukční oceli ve třech tisícinách milimetru, bylo u maraging oceli v osmi tisícinách. Do tolerančního pole se obrobenej rozměry vešly.



Obr. 98: Upnutí do zoubkovaných čelistí ve svěráku



Obr. 99: Součást po první frézovací operaci

Ukázalo se, že lze boky součásti vyrobit na CNC frézce, ale nebylo by vhodné použít toto řešení na velkosériovou výrobu. Z důvodu náročnosti hlídání rozměrů ve velice úzkém tolerančním poli pro tuto operaci.

U druhé frézovací operace vše probíhalo stejně jako u zkušebních vzorků.

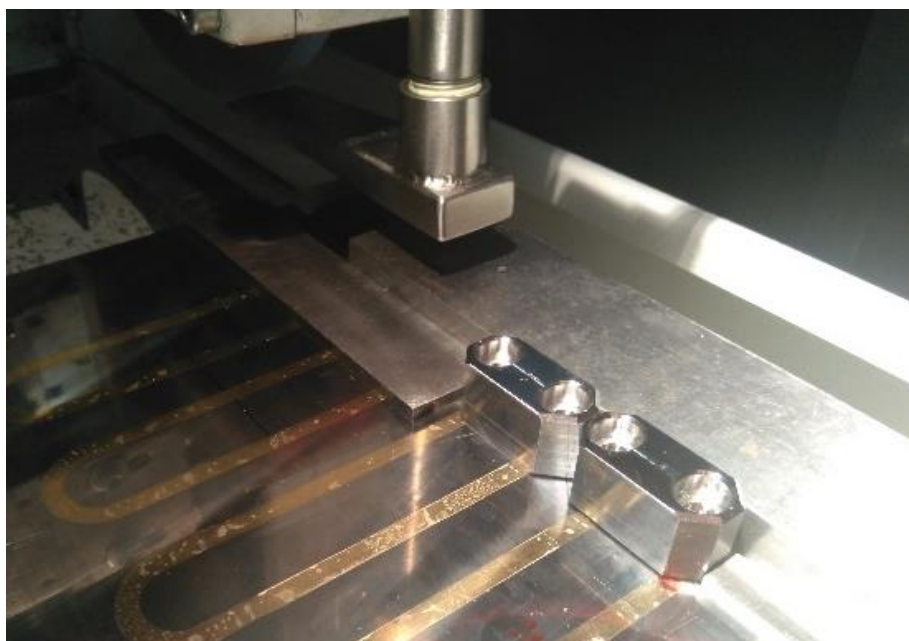


Obr. 100: Upnutí součásti ve druhé frézovací operaci



Obr. 101: Součást po druhé frézovací operaci

Po broušení vršků a zhotovení celku součásti nastala výroba kavit na CNC frézce, kde byla součást upnuta pomocí magnetické desky a přiložených podložek. U jednoho kusu došlo k posunutí upnutého obrobku při hrubování kavity až obrobek opustil magnetický upínač. Naštěstí se obrobku ani nástroji nic nestalo. Nastalo snížení kroku dolů z 0,7mm na 0,4mm a posuvů z 0,024mm/zub na 0,015mm/zub, aby byly sníženy řezné síly. U druhého kusu se tato chyba neopakovala. U běžné konstrukční oceli ke stejnému problému nedošlo, nicméně u oceli maraging s vyšší pevností v základním stavu ano.



Obr. 102: Upínání součásti pro proušení vršků

Po obrobení kavit se vyrobené kusy změřily a všechny rozměry, až na drsnost, souhlasily dle výkresové dokumentace. Do hodnoty drsnosti Ra 1,6 μ m se vešla pouze jedna strana s první kavitou M1_A. Další hodnoty viz tab.32 se nevešly. Problém může být vyřešen menší hodnotou scallop v sedle součásti, nebo menším přídatkem pro obrábění na čisto. Z profilu naměřené drsnosti bylo vyčteno, že u směru řezu nesousledném byl nástroj více vychýlen z dráhy.

Tab. 33: Naměřené hodnoty na povrchu součásti po tepelném zpracování

	Ra[μ m]	Rz[μ m]	Rmax [μ m]	R Sm [μ m]	R Mr (-1.00, 5.0) [%]	R Mr (-2.00, 5.0) [%]	R Mr (-3.00, 5.0) [%]
M1_A	1,537	5,909	6,213	505,429	26,96	46,08	60,62
M1_B	1,673	6,124	7,021	511,357	23,36	43,32	56,17
M2_A	1,665	6,152	6,757	477,643	25,09	41,73	56,72
M2_B	1,910	6,492	7,219	478,571	24,52	40,63	50,82

Před tepelným zpracováním se díly natřely Cndursalem Z110 a byly vloženy do pece na vytvrzení. Po tepelném zpracování byly vyjmuty z pece a vyčištěny, okartáčovány a doleštěny rounem. Na snímcích jsou vidět tmavé skvrny, které byly způsobeny nevhodným lakem na tepelné zpracování. Skvrny jsou kosmetická vada, kterou lze odstranit vhodným nátěrem. Po vyjmutí z pece měly díly stabilně tvrdost 54 až 55 HRc.

Teplotní režim byl nastaven na ohřev 480°C rychlostí 120°C/hodinu. Následné setrvání 4,5 hodiny na teplotě, vypnutí pece a volné chlazení v peci.



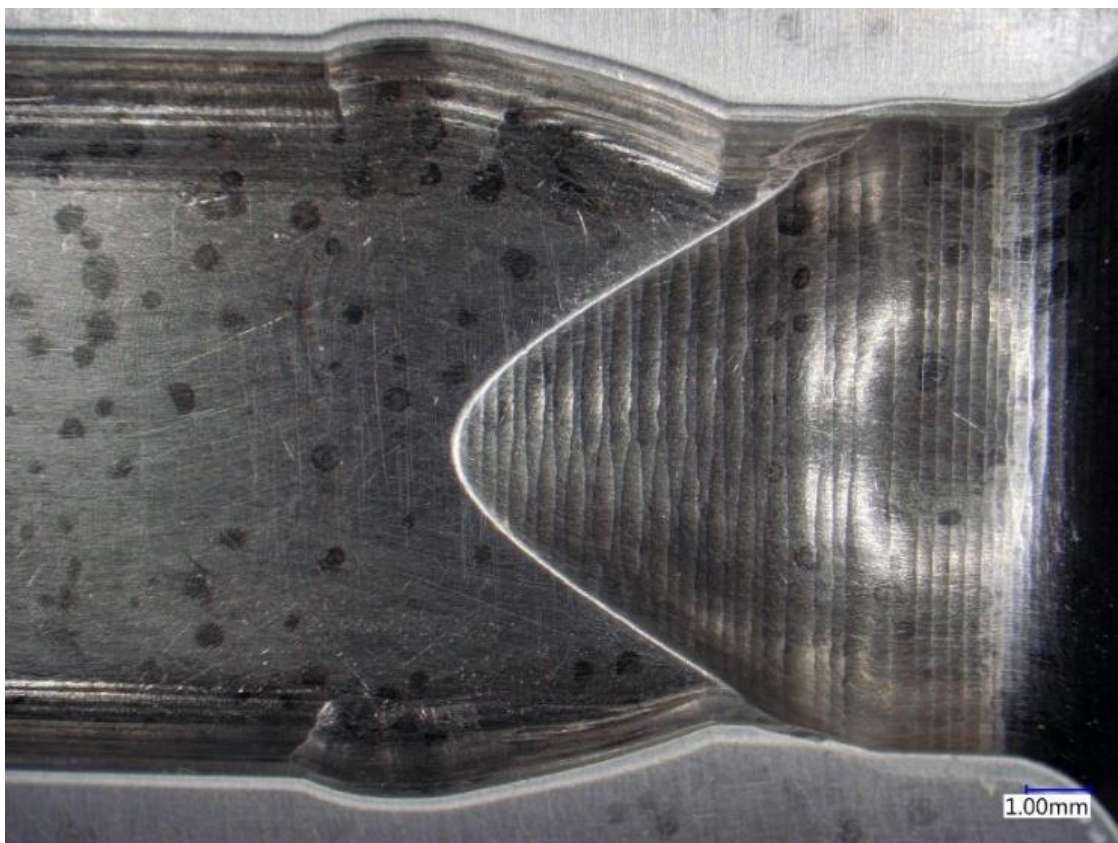
Obr. 103: Finální součásti před tepelným zpracováním



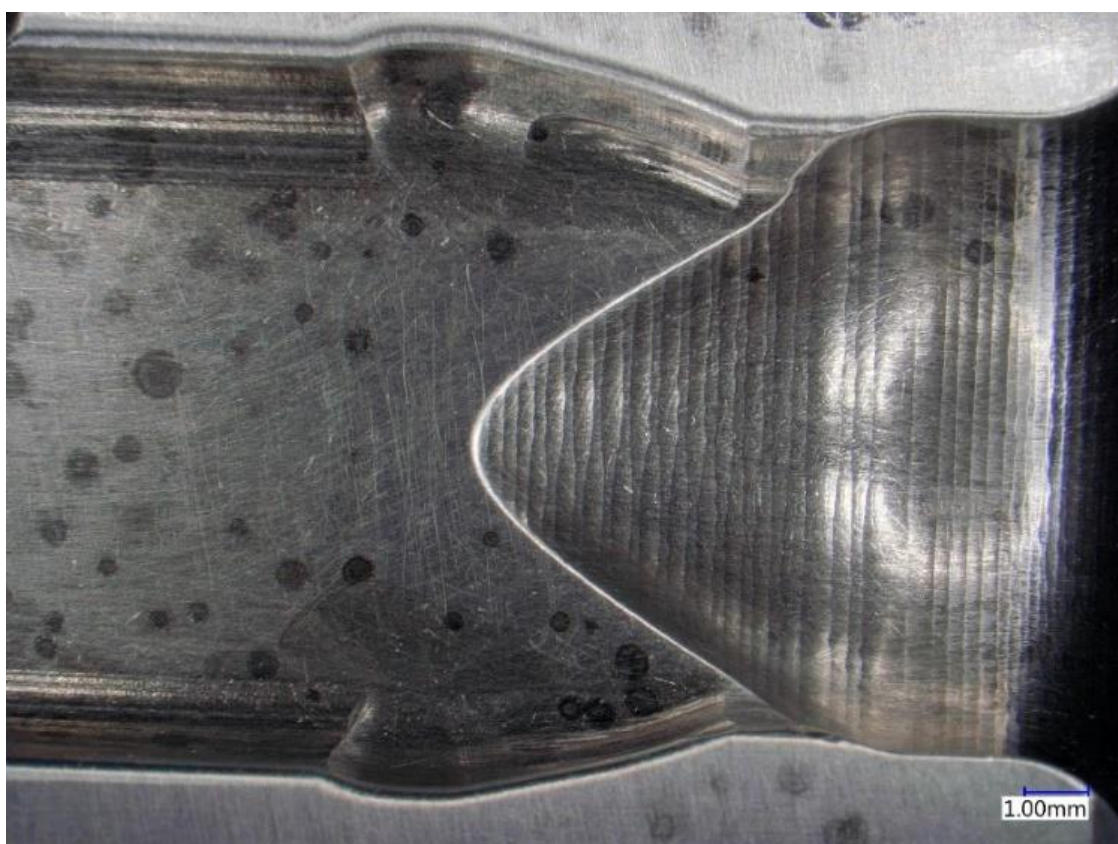
Obr. 104: Součásti s kavítami verze 6 po tepelném zpracování



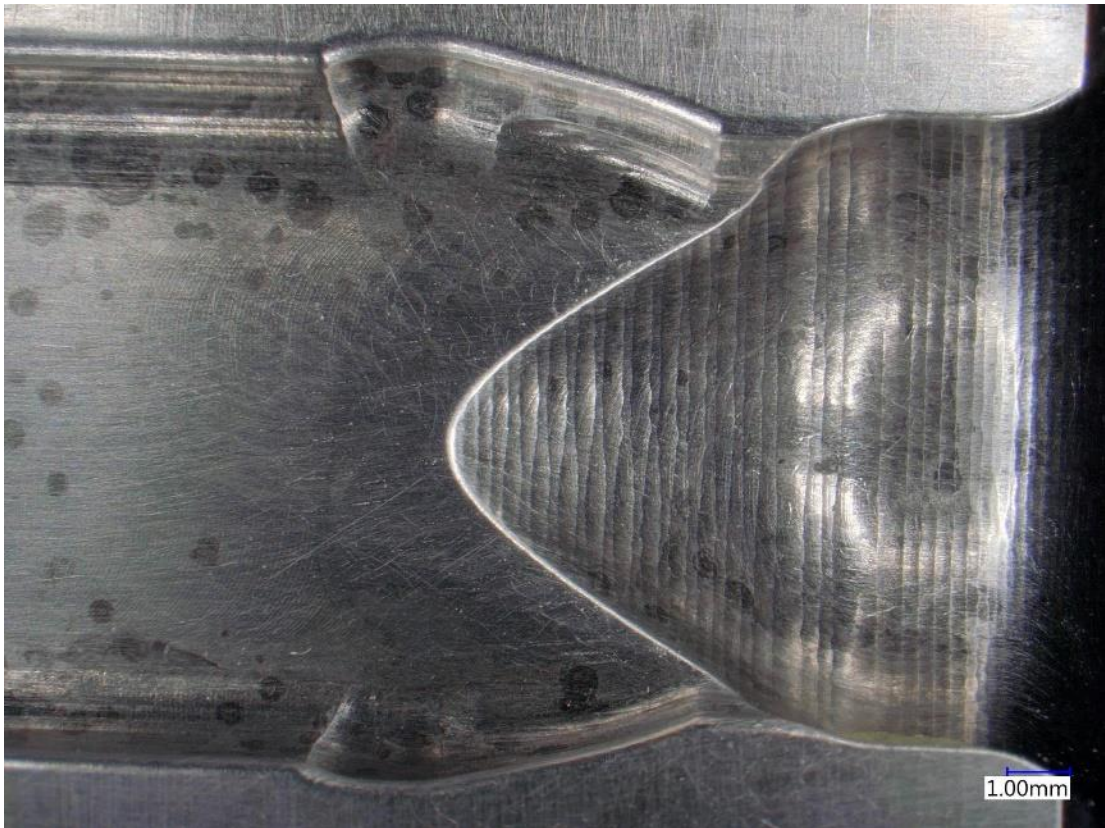
Obr. 105: Součásti s kavítami verze 6 po tepelném zpracování



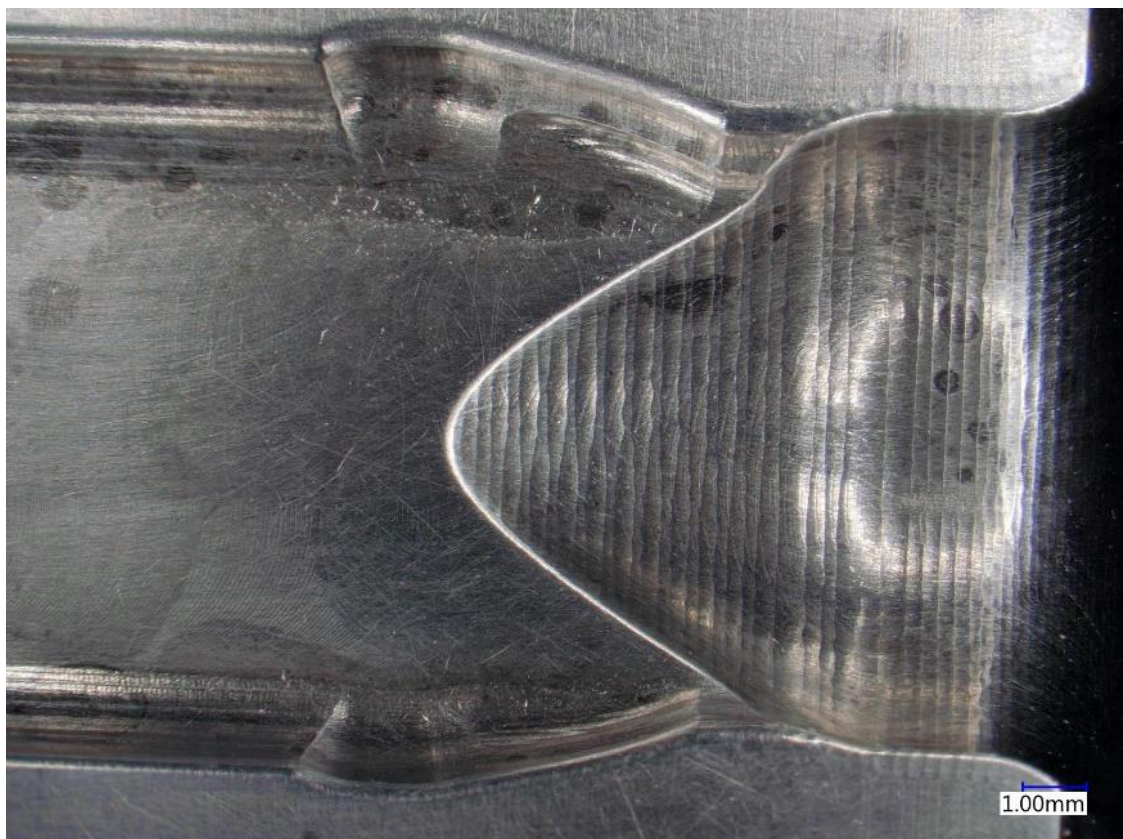
Obr. 106: Snímek M1_A



Obr. 107: Snímek M1_B



Obr. 108: Snímek M2_A



Obr. 109: Snímek M2_B

Závěr

Prezentovaná práce pojednává o vývoji technologie výroby vtokové vložky hydroformingového lisu pro progresivní tváření nerezových trubíček do automobilového průmyslu. Vzhledem ke zpřísňujícím se emisním normám jsou trubičky nasazovány především do provozně velmi náročných podmínek EGR výměníků (spaliny – chladící kapalina).

V teoretické části je proveden rozbor nejrůznějších podob technologie hydroformingu. Rozbor materiálu, jaký je doposud používán a jaký byl použit pro praktickou část. Jejich rozdíly při zpracování obráběním, tepelném zpracování a užité vlastnosti pro aplikaci v provozu. Poznatky získané v teoretické části práce byly následně využity při optimalizaci technologie a materiálu.

Praktická část je věnována vývoji technologie výroby vtokové vložky. Lze ji chápat ve dvou základních rovinách.

První rovina je koncepční a věnuje se potřebnému strojnímu a nástrojovému vybavení, které je nutné a postačující k úspěšné a opakovatelné výrobě dané součásti. Základní snahou zde bylo eliminovat kooperační tepelné zpracování a následně tvrdé obrábění. Z důvodu eliminace těchto činností byla použita ocel maraging, kterou je zároveň potřeba dát i na trysku. Nízkoteplotní vytvrzení rovněž snižuje nebezpečí rozměrových změn a distorzí obrobku. Řešení je také výhodné z pohledu množstevního tepelného zpracování. Kooperační tepelné zpracování se povedlo eliminovat s tím, že je třeba doladit krytí lakem. Další snahou bylo vyloučení broušení ploch, které se z velké části podařilo. Brousí se jen dvě plochy, které by se také brousit nemusely. Stačilo by jen přesnější upínání a pečlivá obsluha stroje.

Druhá rovina praktické části má těžiště v programování drah CNC frézky ve vazbě na rozměrovou přesnost a dosahované parametry drsnosti. Bylo vypracováno několik variant, u kterých byl sledován čas obrábění, přejezdů, parametry drsnosti a rozměrová přesnost. Práce obsahuje celou řadu poznatků, které nebylo možno na začátku předvídat a získat je bylo možné pouze technologickými zkouškami.

V rámci této diplomové práce byl proveden komplexní vývoj technologie výroby dílu „Vtoková vložka_16“. Provedené vývojové a technologické zkoušky umožnily realizovat prototypovou výrobu prvních kusů z vytvrditelné maraging

oceli V300, které budou dále podrobeny zkušebnímu provozu. Všechny body zadání diplomové práce byly splněny.

Diplomová práce podrobně popisuje vliv jednotlivých změn řezných podmínek a technologií na drsnosti a přesnosti výsledné součásti.

Použitá literatura

- [1] *History of Hydroforming: HYDROFORMING EQUIPMENT [online].* Ohio: Jones Metal Products, 2012 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://www.jmpforming.com/>
- [2] HEIN, P. a F. VOLLERTSEN. *Hydroforming of sheet metal pairs.* *Journal of Materials Processing Tech [online].* 1999, 87(1), 154-164 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00347-1. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013698003471>
- [3] SCHMOECKEL, D., C. HIELSCHER, R. HUBER a M. GEIGER. *Metal Forming of Tubes and Sheets with Liquid and Other Flexible Media.* *CIRP Annals - Manufacturing Technology [online].* 1999, 48(2), 497-513 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63230-2. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S000785060763232>
- [4] SIEGERT, Klaus, Markus HÄUSSERMANN, Bruno LÖSCH a Ralf RIEGER. *Recent developments in hydroforming technology.* *Journal of Materials Processing Tech [online].* 2000, 98(2), 251-258 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00206 X. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S092401369900206X>
- [5] ASNAFI, Nader. *Analytical modelling of tube hydroforming.* *Thin-Walled Structures [online].* Elsevier, 1999, 34(4), 295-330 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S0263-8231(99)00018-X. ISSN 02638231. Dostupné z: http://ac.elscdn.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S026382319900018X/1-s2.0-S026382319900018Xmain.pdf?_tid=edc2dc1c-e9fc-11e6-b82a00000aab0f02&acdnat=1486118501_b0d70624a0186f143147d5a697a5314f
- [6] NIKHARE, C., M. WEISS a P.D. HODGSON. *FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel.* *Computational Materials Science [online].* Elsevier B.V, 2009, 47(1), 146-152 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.06.024. ISSN 09270256. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0927025609002808?np=y&npKey=f877bfed37931a182bf3eb953f8ccfc6ae4623bf05a0e1ccbc0a95d822d02031>
- [7] MORPHY, Gary. *Resure-sequence and high-pressure hydroforming: Knowing the processes can mean boosting profits.* *The Tube & Pipe Journal [online].* 1998 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z:

<http://www.thefabricator.com/article/hydroforming/pressuresequence-and-high-pressure-hydroforming--knowing-the-processes-can-mean-boostingprofits>

[8] JONES METAL PRODUCTS COMPANY. *The Hydroforming Process* [online]. 2004 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://www.jmpforming.com/hydroforming/about-hydroformingprocess.htm>

[9] NOVOTNY, S. a P. HEIN. *Hydroforming of sheet metal pairs from aluminium alloys*. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 2001, 115(1), 65-69 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00766-X. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S092401360100766X>

[10] *Sheet Metal Forming*. Quintus technologies [online]. 2016 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://quintustechnologies.com/metal-forming/>

[11] KALPAKJIAN, Serope. *Sheet-metal forming*. AccessScience [online]. 2014 [cit. 2019-07-23]. DOI: 1097-8542.619200. Dostupné z: <http://www.accessscience.com//content/sheet-metal-forming/619200>

[12] *Kapalina jako tvářecí medium*. In: *Www.mmspektrum.com* [online]. MM : 2019 / 1: MM, 2019 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kapalina-jako-tvareci-medium.html>

[13] Rout, Dinesh & Langerak, Nico & Verma, Rahul & Haldar, A & Ganapathy, Manikandan. (2011). *Tube hydroforming in automotive applications*.

[14] C. Nikhare, M. Weiss, P.D. Hodgson, *Buckling in low pressure tube hydroforming*, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 28, Part 1, 2017, Pages 1-10, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.015>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517301263>)

[15] *The Tube & pipe quarterly: TPQ*. Rockford, IL: Croydon Group, 1990. ISSN 1051-4120.

[16] Alaswad, A & Benyounis, K & Olabi, Abdul Ghani. (2012). *Tube hydroforming process: A reference guide*. *Materials & Design*. 33. 328-339. 10.1016/j.matdes.2011.07.052.

[17] *Technologie II: Technologie tváření kovů – nekonvenční metody*. Technická Univerzita Liberec. *Katedry strojírenské technologie* [online]. Liberec [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/11.htm#111#111

- [18] *METODY TVÁŘENÍ KOVŮ A PLASTŮ* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10033896-Tvareni-kovu-cil-tvareni-dat-polotovaru-pozadovany-tvar-a-rozmary.html>. Technická univerzita v Liberci.
- [19] SINGH, Harjinder. *Fundamentals of hydroforming*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2003. ISBN 0872636623.
- [20] *Tekuté lisy Flexform*. In: Hasmak [online]. Bati Atasehir Kadikoy Istanbul [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: http://www.hasmak.com.tr/yeni/EN/avure-hydroform.html?_sm_au_=iDVbSs0c9SQDH4Ks
- [21] Orville D. Lascoe. *Handbook of Fabrication Processes* [online]. ASM International, 1988 [cit. 2019-07-28]. ISBN 1615031855, 9781615031856. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=4PZxakNhjT0C&pg=PA53&lpg=PA53&dq=whe+elon+hydroforming&source=bl&ots=kWbCq-4c-d&sig=ACfU3U1I4o2B1AGiO_4K8OONVYeLzffiAA&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwj_rqiNlrrjAhWblAKHeK9BAEQ6AEwE3oECAgQAQ#v=onepage&q&f=false
- [22] MAREK, Vlastimil. *Něco v síti: fejetony, které vycházely od roku 1997 na internetu na adrese http://svet.namodro.cz*. Praha: Dharma Gaia, 1999. ISBN 80-86013-57-X. ISSN http://www.bolzano.cz/assets/files/no/1.2379_cesky.pdf?_sm_au_=idvbss0c9sqdh4ks.
- [23] BÖHLER V300 VMR [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: https://www.bohler.cz/cs/V300VMR.php?_sm_au_=iDVbSs0c9SQDH4Ks
- [24] EOS - *Materials for metal*. [online], [cit. 2019-07-23]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.eos.info/en/products/materials/materials-for-metal-systems.html>
- [25] BÖHLER W720 VMR [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: <https://www.bohler.cz/cs/W720VMR.php>
- [26] *Katalog nástrojů firmy Dormer Pramet* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: https://www.dormerpramet.com/downloads/dormer%20catalogue%202018_updated_set%204_cz-ru-pl-sk.pdf?_sm_au_=iDVbSs0c9SQDH4Ks