



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Návrh a technologie výroby vtokových trysek

Design and technology of production of inlet nozzles

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Matěj Vrána

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

2019/20

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vrána** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **457273**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a technologie výroby vtokových trysek

Název diplomové práce anglicky:

Design and technology of production of inlet nozzles

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analýza současného stavu a provozních podmínek.
- 2) Návrh konstrukčních úprav.
- 3) Příprava výrobního postupu - stroje, nástroje, upínání, tvorba NC kódu.
- 4) Výroba prototypu.

Seznam doporučené literatury:

- 1) OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
- 2) DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.
- 3) User manual Okuma Genos L200E-M
- 4) Fusion 360 online training tutorials

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

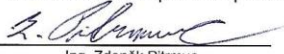
Ing. Zdeněk Pítrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Zdeněk Pítrmuc
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

23.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Návrh a technologie výroby vtokových trysek* vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Zdeňka Pitrmuce s využitím použité literatury uvedené ve zdrojích.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za příkladné vedení práce, ochotu poradit a čas strávený při výrobě součástí.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a optimalizací výroby vtokové trysky pro hydroforming. Nejprve se práce věnuje hydroformingu, NC programování a vhodným materiálům pro danou součást. Dále se práce zabývá analýzou výrobní dokumentace, její úpravou a návrhem nového materiálu, konkrétně maraging oceli, která je blíže popsána. Na závěr je popsána výroba prototypové sady, problémy, které se během výroby objevily a způsoby jejich odstranění.

Klíčová slova

Vtoková tryska, Hydroforming, Maraging Ocel, NC Programování, Soustružení, Vytvrzování.

Annotation

This thesis is focused on design and optimization of production of inlet nozzle for hydroforming. At the beginning the thesis deals with hydroforming, NC programming and suitable materials for the component. After that, the thesis is focused on analysis of production documentation, its adjustments and suggestion of new material, specifically maraging steel, which is closely described. In the end, there is a description of production of the prototype set, problems, which occurred during the production and the ways to remove them.

Key words

Inlet nozzle, Hydroforming, Maraging steel, NC Programming, Turning, Hardening.

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Hydroforming	9
2.1. Formování trubek	10
2.1.1. Nízkotlaké formování	10
2.1.2. Vysokotlaké formování.....	11
2.1.3. Vícetlaké formování	11
2.2. Formování plechů.....	12
2.2.1. Metody	13
2.2.2. Vybavení.....	16
2.2.3. Limitace	17
3. NC programování	19
3.1. Ruční programování.....	19
3.1.1. Stavba programu	20
3.1.2. Postup sestavování programu	22
3.2. Strojní programování	22
3.2.1. Sestavování partprogramu	23
3.2.2. Dílenské programování.....	23
4. Analýza výrobní dokumentace	25
5. Návrh úpravy konstrukce.....	27
6. Návrh možných nástrojových materiálů	31
6.1. Nástrojové oceli	32
6.2. Maraging oceli	34
6.2.1. Mechanické vlastnosti a mikrostruktura	35
6.2.2. Maraging oceli v aditivní technologii.....	37
6.2.3. Volba vhodného materiálu.....	40

7.	Tvorba vytvrzovací křivky.....	42
8.	Ověření pevnostních výpočtů	45
9.	Návrhy postupu.....	47
9.1.	Současný postup.....	47
9.2.	Postup se změnou velikosti díry.....	47
9.3.	Postup se změnou materiálu.....	48
10.	Výběr strojů	49
10.1.	CNC Soustruh OKUMA GENOS L200 E-M	49
10.2.	CNC 5osá FRÉZKA OKUMA MU 400 II.....	50
10.3.	Komorová pec NARBETHERM.....	51
11.	Výroba prototypové sady.....	52
11.1.	Volba polotovaru	52
11.2.	Volba upnutí obrobku.....	52
11.3.	Volba nástrojů pro soustružení.....	54
11.4.	Volba řezných podmínek.....	55
11.5.	Rámcový výrobní postup.....	56
11.5.1.	Ručně psaný program.....	56
11.5.2.	Strojně psaný program	62
11.6.	Vytvrzení trysek	69
11.7.	Testování prototypové sady a ekonomické zhodnocení.....	70
12.	Závěr	71
13.	Zdroje.....	72
14.	Seznam obrázků.....	76
15.	Seznam tabulek	79

1. Úvod

Cílem této práce je optimalizovat užité vlastnosti trysky hydroformingu a racionalizovat způsob její výroby s dopady na časovou náročnost výroby a celkové náklady. Dalším důvodem je zvýšení doby životnosti trysky v procesu. Tato tryska slouží k dopravě média o správném tlaku při procesu formování. Tryska je umístěna v pouzdře a zachycena pomocí šroubení viz obrázek 1. Jako pracovní médium se využívá voda bez aditiv, případně inhibitorů koroze. Absence inhibitorů zvyšuje rychlost vzniku koroze a snižuje životnost nástrojů. Výhodou využití vody bez aditiv je její nezávadnost z hygienického hlediska. Pracovníci přichází do kontaktu s médiem při výměně nástrojů a polotovárů. Problém může nastat nejenom při doteku, ale také při netěsnosti v podobě výparů média či aerosolů. Z tohoto důvodu dojde k zachování původního média a možnost vzniku koroze se zohlední při výběru materiálu.



Obrázek 1: Uchycení trysky

Koroze trysky, pouzdra a držáku trysky nezpůsobuje pouze problém se sníženou životností, ale také problémy při výměně trysek. V nejhorším případě dochází k zareznutí a zalomení trysky, což výrazně komplikuje její vyjmutí z pouzdra. Dále je nutné takovéto pouzdro vyčistit, protože při následné montáži by byl problém s dosednutím čela mezi průměry 12,6/18f9. Výměna dvojice trysek bez komplikací zabírá 30 minut. Při vzniku komplikací se čas výměny zvyšuje v řádu desítek minut, což způsobuje ztráty, protože během výměny je nutné lis úplně odstavit.

Tryska je namáhána vnitřním přetlakem 80 až 100 MPa v závislosti na použitém lisu. Z hlediska pružnosti a pevnosti lze trysku považovat za silnostěnnou otevřenou tlakovou nádobu. Vnitřní přetlak vyvolává ve stěně trysky obvodové tečné napětí, které představuje největší nebezpečí na vstupu a výstupu. Kvůli těmto požadavkům na mechanické vlastnosti je nutné vybírat materiál z vysokopevnostních, nástrojových nebo rychlořezných ocelí s alespoň částečně zvýšenou odolností vůči korozi.

Důležitým faktorem je namáhání tlakem na kulové ploše trysky. Zde dochází k rázům při zavtokování, statickému tlaku na teoretické kontaktní kružnici a otěru. Z těchto důvodů jsou kladeny vysoké nároky na tvrdost a stav povrchu kulové plochy. Nejčastější příčinou selhání dílu je poškození kulové plochy a ztráta těsnosti. Dalším častým poškozením je křehký lom trysky při vstupu do formy i přes to, že se tryška nachází v kyvném pouzdře, které může kompenzovat menší nesouosost trysky a děleného kužele vtokových vložek (viz obrázek 2). Při využití materiálu s vyšší houževnatostí a tažností by bylo možné tento problém eliminovat. Problémem je však již zmíněný požadavek na vysokou tvrdost.



Obrázek 2: Forma pro hydroforming

2. Hydroforming

Tento proces byl vyvinut na konci 40. a začátku 50. let dvacátého století, aby zajistil nákladově efektivní výrobu relativně malého množství tažených součástí, které mají asymetrické a nepravidelné kontury. K jeho prudkému rozmachu však došlo až v 90. letech kvůli zvyšujícím se požadavkům na tvarovou složitost. Prakticky všechny kovy, které jsou schopné tváření za studena, je možné zpracovávat pomocí hydroformingu. Jedná se například o hliník, mosaz, korozivzdornou ocel, měď a vysokopevnostní slitiny. [1; 2]

Jako hlavní a doprovodné tvářecí médium se využívá voda a hydraulické oleje. Hlavní výhodou je rovnoměrnější rozložení přetvoření lisovacího dílce, což umožňuje výrobu tvarově složitějších součástí. Výroba těchto součástí pomocí konvenčních metod by byla velmi obtížná. Díky rovnoměrné deformaci dosahuje díl vyšší pevnosti, což se využívá pro zvýšení tuhosti karoserie. Další výhodou je snížení počtu potřebných operací pro výrobu, většinou na jednu, čímž se výrazně sníží náklady na nástroje. [2]

V současné době existuje spousta metod využívající pro formování kapalinu. Podle aplikace je lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to na metody pro tváření plechů a metody pro tváření trubek. Tyto metody se dále dělí, jejich rozdělení je uvedeno na obrázku 3. [2]



Obrázek 3: Rozdělení metod hydroformingu

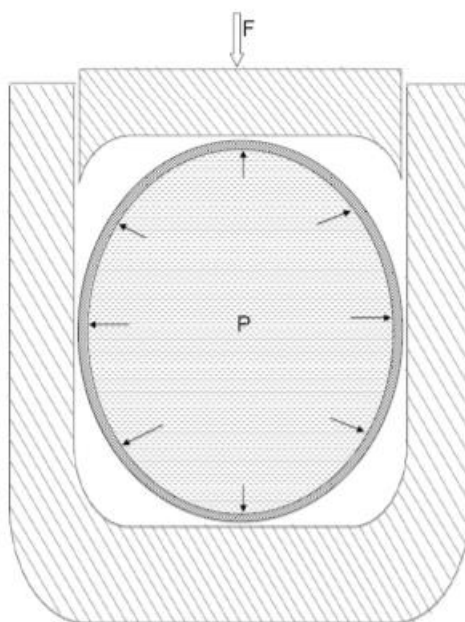
2.1. Formování trubek

Základním principem výroby trubek a dutých polotovarů pomocí hydroformingu je přivedení tvářecího média do dutiny dílu, který tváříme. Následně dojde ke zvýšení tlaku, čímž dojde ke změně tvaru na požadovaný tvar podle dutiny nástroje. Jako polotovar se využívají švové i bezešvé trubky, duté trubky, kuželové díly a také trubky s různou tloušťkou stěny. [2]

Kromě statických nástrojů se také využívají nástroje s přidavným axiálním zatížením. Na základě pracovních tlaků kapaliny byly metody hydroformování trubek rozděleny na nízkotlaké, vysokotlaké a vícetlaké hydroformování. [2]

2.1.1. Nízkotlaké formování

Jak již z názvu vyplývá, jedná se formování, při kterém se pro změnu trubky na požadovaný tvar využívá nízkého tlaku ($p < 83 \text{ MPa}$). V tomto případě je polotovar umístěn mezi horní a dolní zápustku. Dolní zápustka je nepohyblivá, zatímco horní se pohybuje dolů a tvaruje trubku na požadovaný tvar. Schéma nízkotlakého hydroformingu je zobrazeno na obrázku níže. [3; 4]

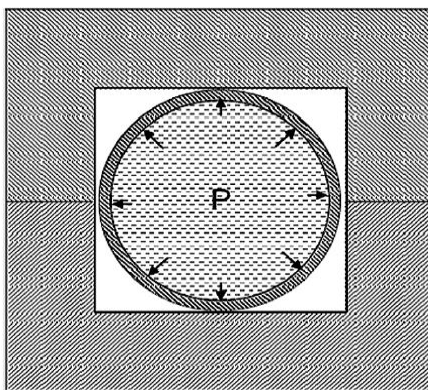


Obrázek 4: Nízkotlaký hydroforming [3]

Vnější obvod nedeformované trubky a přetvořené trubky je přibližně stejný. Pokud je tlak příliš nízký, může docházet k prohýbání, což je považováno za geometrickou odchylku, proto je důležité stanovit minimální tlak, aby došlo k eliminaci tohoto jevu. Za tímto účelem byly vyvinuty analytické modely, pomocí kterých je možné určit správný tlak. [5]

2.1.2. Vysokotlaké formování

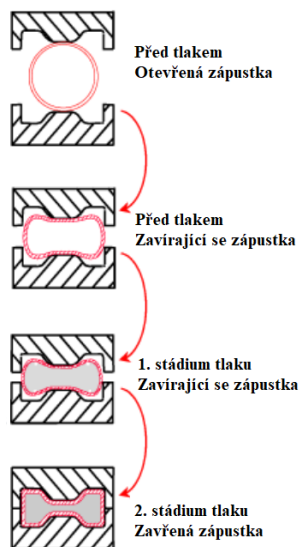
Postup při tomto typu formování je obdobný jako u nízkotlakého. I v tomto případě je trubka umístěna mezi dolní nepohyblivou a horní pohyblivou zápustku. Pro vysokotlaké formování se využívá tlak 83–414 MPa. Na obrázku 5 je zobrazeno schéma procesu. [4]



Obrázek 5: Vysokotlaké formování [4]

2.1.3. Vícetlaké formování

U tohoto typu formování je nejprve trubka předtvarována a následně umístěna do zápustky. Ve chvíli, kdy je zápustka částečně uzavřena, je trubka zatěsněna a naplněna vodou o velmi nízkém tlaku. Poté je zápustka plně uzavřena. Proces je zobrazen na obrázku níže. [6]



Obrázek 6: Vícetlaké formování

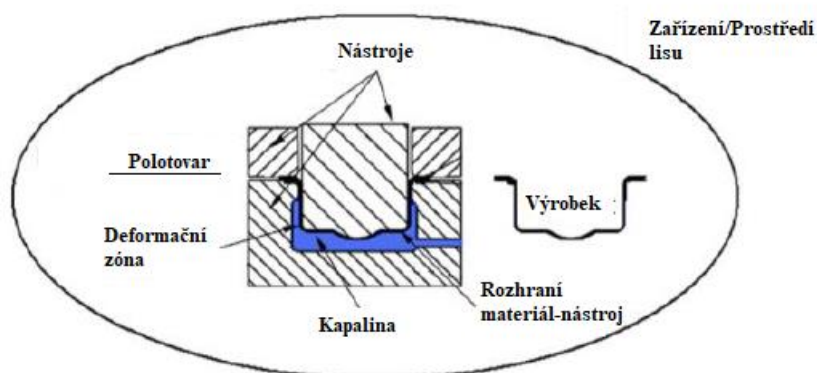
Stlačená voda uvnitř trubky zabráňuje pohybu materiálu dovnitř dílu a zápustka tvaruje trubku do požadovaného stavu. Během procesu nedochází ke ztenčení stěny. Maximální potřebný tlak je relativně konstantní, přestože dochází ke změně meze kluzu a nejostřejšího vnitřního poloměru rohového průřezu. [6]

Proces je ovlivněn rychlostí zavírání zápustek, pozicí zápustky při plnění trubky, opakovatelností ohýbačky a dalšími faktory. Podmínky procesu jsou často ovlivněny konstrukcí součástí. Tyto podmínky mohou také zvýšit náklady a nemohou být eliminovány jinak než změnou konstrukce. [6]

2.2. Formování plechů

Jedná se pravděpodobně o nejrozšířenější využití hydroformingových metod. Pro tuto metodu se používá označení SHF (sheet hydro-forming). V této oblasti lze nalézt spoustu metod pro výrobu plechu požadovaného tvaru. Hlavní využití této metody je v automobilovém průmyslu. Výhodou této metody je možnost dosažení požadovaného tvaru na jednu operaci, přičemž při klasické metodě by bylo potřeba více operací. [2; 7]

Součásti, které se nachází v hydroformingovém systému jsou zobrazeny na obrázku níže. Tyto součásti musejí projít důkladnou analýzou, konkrétně: kvalita plechu v deformačním procesu, tření a mazání mezi povrchy polotovaru a lisu, konstrukce zápustek kvůli efektivnímu využití síly držáku, aby nedocházelo k úniku kapaliny, vztah mezi tlakem vnitřní kapaliny a silou držáku a rozměry a vlastnosti lisované součásti. [7]



Obrázek 7: Prostředí lisu [7]

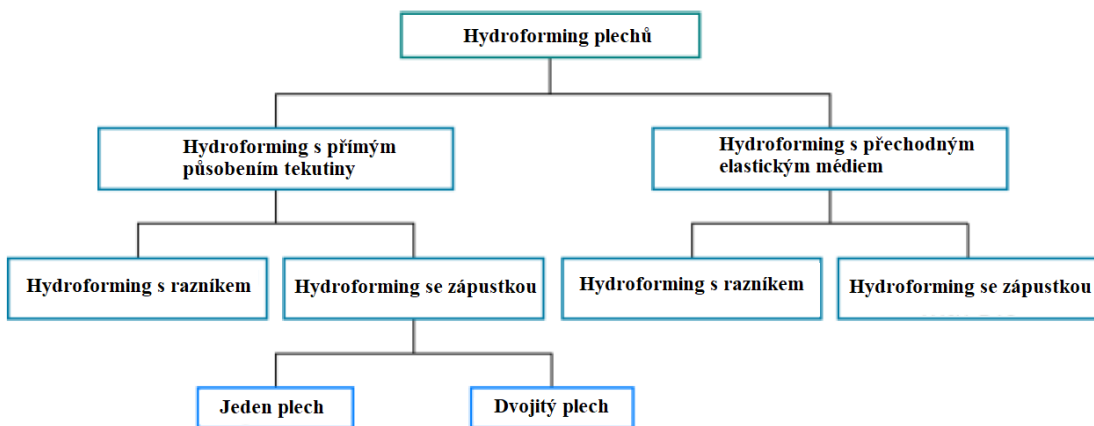
Mezi výhody hydroformingu patří jednoduchost zápustek pro hluboké tažení, možnosti využití různých druhů materiálu pro razník (slitiny hliníku a zinku, plast, tvrdé dřevo), pokud jsou tvářeny neželezné materiály, a vzhledem k tomu, že pouze aktivní prvek je tuhý, není nutné dosahovat přesné vůle hlubokého tažení. Dále je díky působící kapalině vyvíjen jednotný tlak na součást, čímž je dosaženo výhodnějšího stavu napjatosti a je možné získávat kuželové, kulové a komplexní součásti. Díky absenci tření mezi zápustkou a razníkem je možno dosáhnout lepší přesnosti a kvality povrchu ve srovnání s běžně využívanými technologiemi. Z důvodu vyšší ekonomické účinnosti je

technologie hydroformingu zejména vhodná pro složité, komplexní součásti, které by bylo náročné vyrábět běžnými technologiemi. [7]

Nevýhodou tohoto procesu může být menší produktivita, ve většině případů hlavně kvůli zvláštnostem hydraulických systémů, vyšší čas cyklu a vyšší náklady na vybavení, z důvodu nutnosti využití lisů s větší kapacitou ve srovnání s běžným lisováním, a nižší rozměrová přesnost u složitých geometriích. [7]

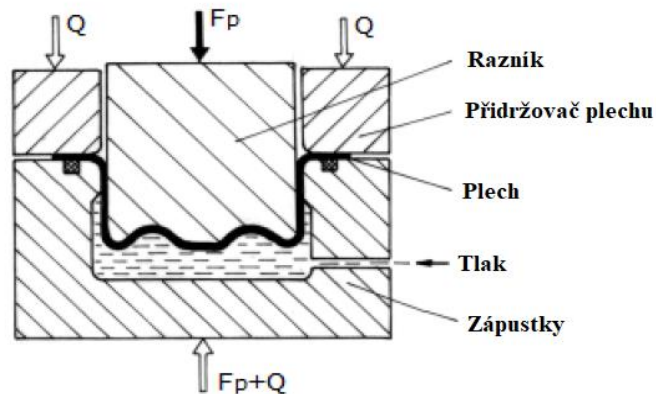
2.2.1. Metody

Základní dělení metod hydroformování plechů je znázorněno na obrázku 8. [7]



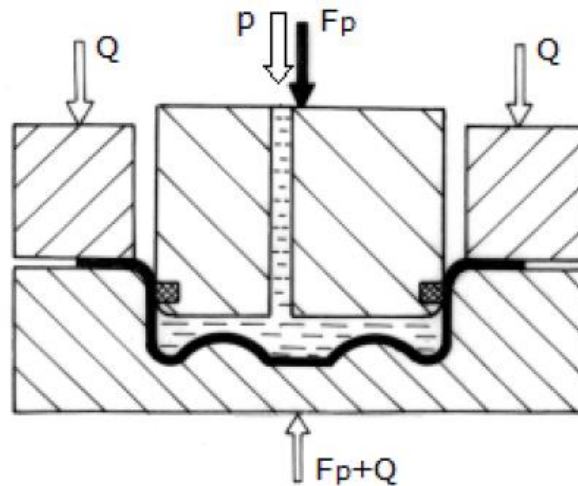
Obrázek 8: Metody hydroformingu plechu [7]

V případě hydroformingu plechů pomocí razníku je zápustka, která je využívána při běžném ražení nahrazena tlakem. Tento tlak je generován stlačenou kapalinou, čímž dochází k tvarování plechu podle tvaru razníku. Kapalina, která ovlivňuje velikost tlaku, může být aktivně natlačována externím čerpadlem nebo pasivně během aktivního zdvihu razníku pomocí kontroly bezpečnostního ventilu. Schéma této metody je možné vidět na obrázku níže. [7]



Obrázek 9: Hydroforming s razníkem [7]

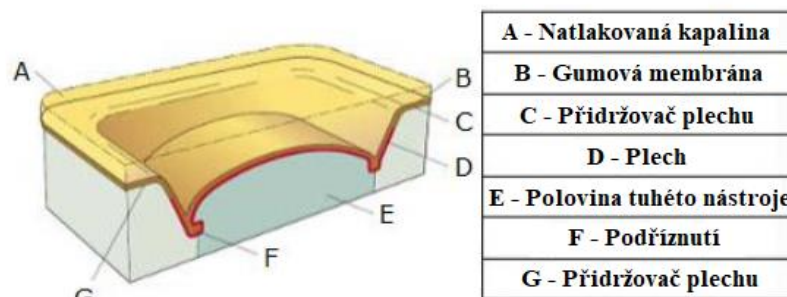
V případě hydroformingu se zápustkou (viz obrázek 10) je plech formován hydraulickým tlakem kapaliny proti zápustce. Během procesu působí mezilehlá deska jako přídržovač plechu, kontroluje pohyb plechu z příruby a utěšňuje pracovní prostor, aby nedocházelo k úniku kapaliny. [7]



Obrázek 10: Hydroforming se zápustkou [7]

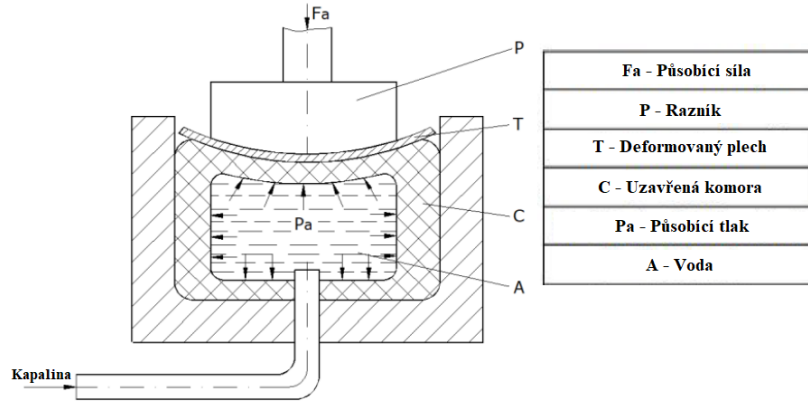
Hydroforming s přímým působením kapaliny je též znám jako hydromechanické hluboké tažení. Deformaci lze provést pomocí příruby nebo blokad jejího pohybu. Touto metodou lze získávat kuželovité součásti, které by se klasickým způsobem musely vyrábět na několik operací. V případě hydroformingu s přechodným elastickým médiem se mezi plechem a kapalinou nachází gumová membrána nebo gumová komora. Použité metody mohou být stejné jako při formování s přímým působením kapaliny, tedy s razníkem nebo se zápustkou. [7]

Při použití gumové membrány může být membrána umístěna přímo na plech nebo může být samostatná a připojená ke komoře s kapalinou. K deformaci dochází pohybující se přírubou nebo blokad jejího pohybu. V tomto případě může docházet ke kroucení materiálu. V závislosti na materiálu mohou tlaky potřebné pro deformaci dosahovat až hodnot 200 MPa. Součásti užívané v tomto procesu jsou vidět na obrázku níže. [7]



Obrázek 11: Schéma hydroformingu s gumovou membránou [7]

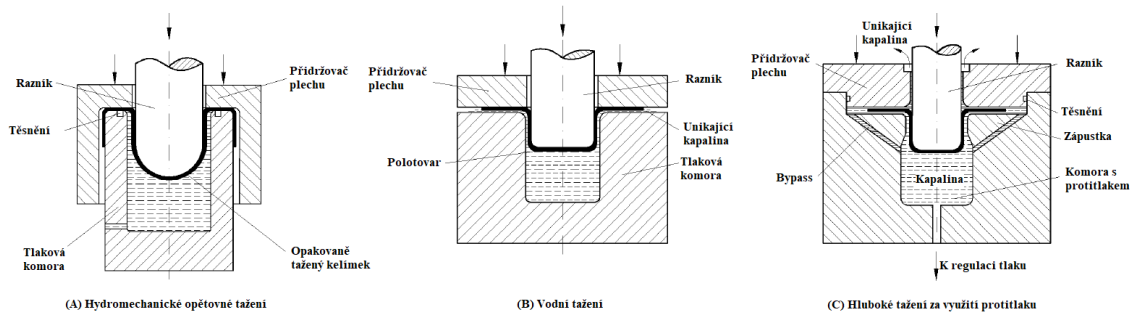
V případě hydroformingu s gumovou komorou (viz obrázek 12) dochází k deformaci plechu díky působení vody stlačené v uzavřené komoře, jejíž stěny jsou tlačeny proti plechu. Působením tlaku dochází k formování plechu podle tvaru razníku. Tlak vyvíjený vodou je přenášen a rovnoměrně roztahuje stěny, čímž zabraňuje tvorbě záhybů. [7]



Obrázek 12: Schéma hydroformingu s gumovou komorou [7]

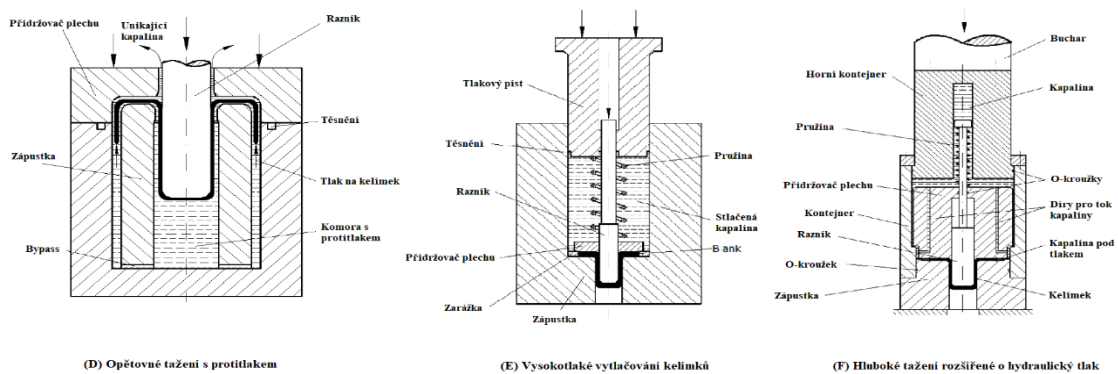
Další metody využívané v hydroformingu jsou: hydromechanické opětovné tažení, vodní tažení, hluboké tažení za využití protitlaku, opětovné tažení s protitlakem, vysokotlaké vytlačování kelímků a technika hlubokého tažení rozšířená využitím hydraulického tlaku. [7]

Hydromechanické opětovné tažení (A) se skládá ze stejných procesních metod, jako klasický hydromechanický deformační proces, ale místo plechu se pro tváření využívá kelímek. Tření mezi razníkem a taženým kovem snižuje tahová napětí v kritických místech. Proces vodního tažení (B) se oproti klasickým metodám liší výrazným únikem vody do tlakové komory kvůli absenci těsnění. Pokud je síla přidržovače plechu velmi vysoká, je možné tomuto problému zabránit. Hluboké tažení za využití protitlaku (C) je též známé jako hluboké tažení radiálním tlakem. Tento proces je podobný vodnímu tažení s rozdílem v horním tlaku a mazání horní strany plechu. Na rozdíl od klasických metod využívá bypass po obvodu a radiální tlak. [7]



Obrázek 13: Nekonenční metody hydroformingu 1 [7]

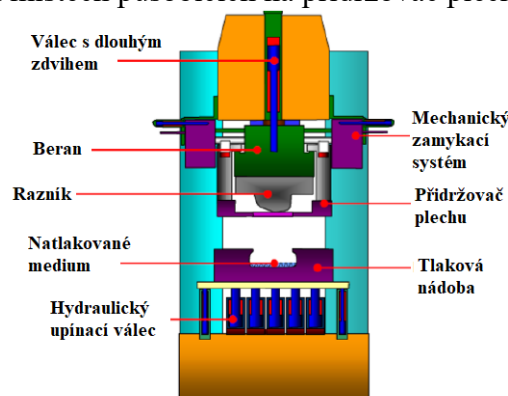
Při opětovném tažení s protitlakem (D) je okraj kelímku tažen hydraulickým tlakem. Tímto procesem je možno dosáhnout větší přesnosti, snížení třecího odporu mezi povrchem zápustky a kelímku, a vyšší mez tváření. Vysokotlaké vytlačování kelímku (E) je možné díky udržování vůle mezi razníkem a zápustkou menší, než je tloušťka plechu. Plech je obklopen kapalinou o vysokém tlaku (až 700 MPa). Aby bylo zabráněno nadměrnému svírání polotovaru, využívá se pozitivní doraz vytvořený kroužkem umístěným mezi razníkem a přídržovačem plechu. Při technice hlubokého tažení rozšířené o hydraulický tlak (F) je tento tlak v procesu generován. Tlak musí být úměrný působící síle razníku a působí na konci příruby kelímku. Tento proces již nevyžaduje tlumení, protože tažení může být snadno provedeno na jednočinném lisu. [7]



Obrázek 14: Nekonvenční metody hydroformingu - 2 [7]

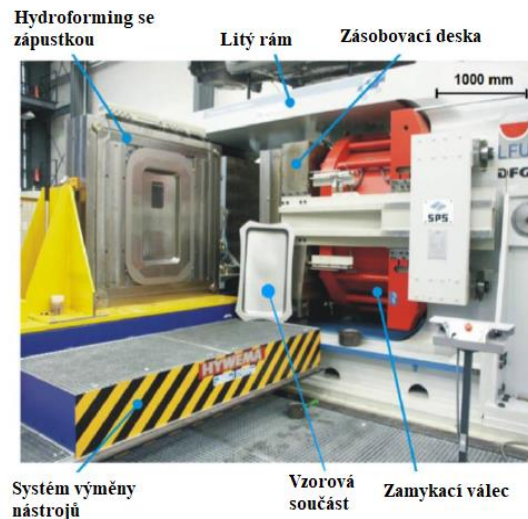
2.2.2. Vybavení

Pro metodu hydroformingu s razníkem se využívají hydraulické lisy s protitlakovou nádobou a vysokými silami beranu. Příkladem takového lisu může být hydraulický lis od firmy Schnupp Hydraulik zobrazený na obrázku 15. Jedná se o koncept lisu s krátkou dráhou válce. Proces formování se skládá ze zajištění přídržovače plechu, spuštěním formovacího procesu, deformací plechu pomocí kapaliny přes razník, kalibrování a otevření lisu. Tento lis má výhodu ve vícebodovém tlumení, díky kterému je možné měnit sílu v různých místech působících na přídržovač plechu. [7]



Obrázek 15: Lis s razníkem [7]

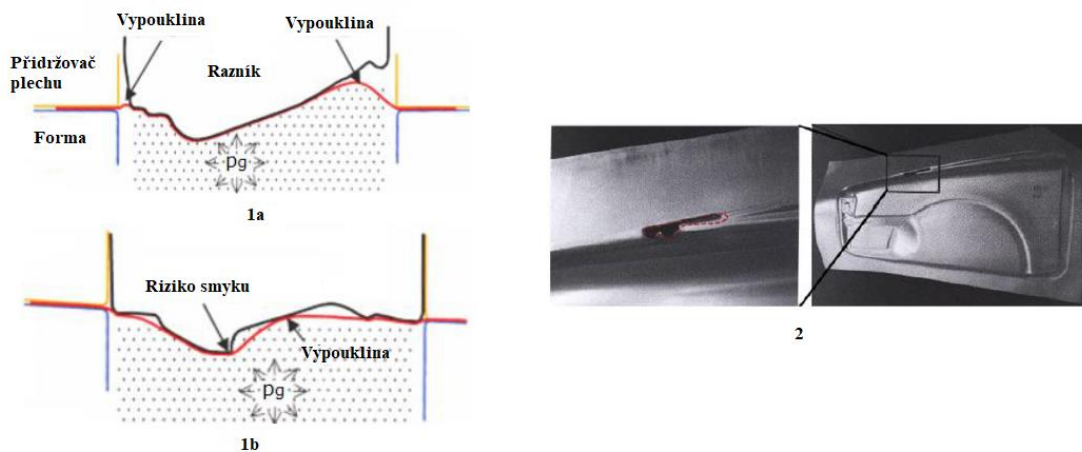
Pro velké součásti využívané v automobilovém průmyslu se využívají hydroformingové lisy se zápusťkou. V Německu byl ve spolupráci Dortmundské univerzity a firmy Siempelkamp Pressen System vyroben lis o síle 100 MN viz obrázek 16. Výhody tohoto lisu jsou levná kompaktní konstrukce, snadná manipulace s díly a krátké zdvihy válců, čímž se snížila doba cyklu výroby. [7]



Obrázek 16: Lis se zápusťkou [7]

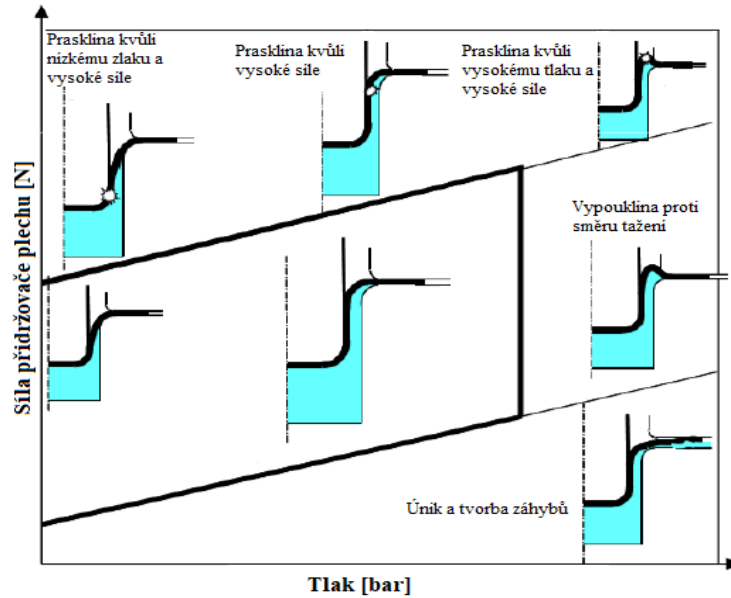
2.2.3. Limitace

Během formování s razníkem může docházet k nadměrnému ztenčování plechu, zvlnění přírby a bočních stěn a nadměrnému vyboulení (viz obrázek 17 1a) a vzniku povrchových stop (viz obrázek 17 1b). Tyto defekty mohou vést ke vzniku prasklina a úniku stlačeného média. Vznik praskliny je možné vidět na obrázku 17 – 2, kde na blatníku automobilu v důsledku nadměrného vyklenutí plechu došlo ke vzniku praskliny. [7]



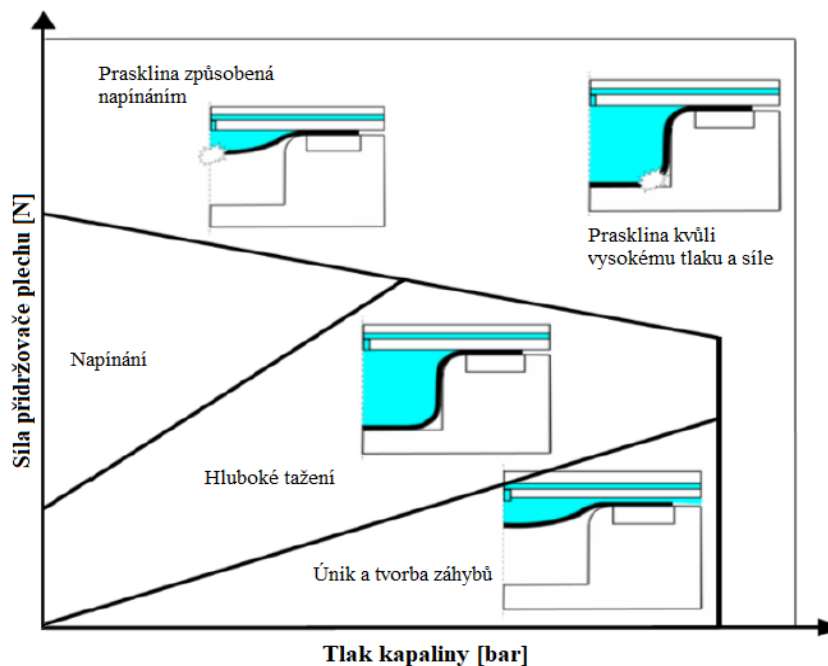
Obrázek 17: Problémy při hydroformingu s razníkem [7]

Kombinace procesních parametrů hydroformingu plechu tvoří tzv. procesní okno. Tento proces zajišťuje, aby byla součást vyrobena bez jakýchkoli defektů. Příklad takového okna je zobrazen na obrázku 18, kde byly jako procesní parametry zvoleny síla přidržovače plechu a tlak v nádobě. [7]



Obrázek 18: Procesní okno formování s razníkem [7]

V případě hydroformingu se zápustkou jsou typické defekty nadměrné ztenčení plechu, zvlnění a únik stlačeného média. Na obrázku 19 je zobrazeno procesní okno, které je definováno tlakem kapaliny a silou přidržovače plechu. [7]



Obrázek 19: Procesní okno formování se zápustkou [7]

3. NC programování

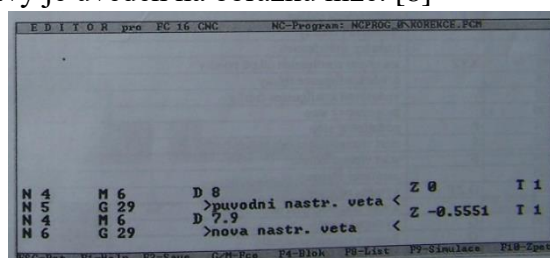
Během padesátých let 20. století došlo díky nástupu NC strojů k výrazné změně strojírenské výroby. Výroba začala být řízena pomocí počítačů. Změnou vstupních dat došlo ke změně požadavku na výrobu a k automatickému přizpůsobení stroje. Automatické řízení konvenčních strojů je zajištěno pomocí mechanických, pneumatických, hydraulických nebo kombinovaných systémů. Výroba součástí je určena například tvarem vaček. [8]

S vývojem NC strojů úzce souvisí rozvoj výpočetní techniky a softwaru. Z toho důvodu již dnes existuje několik generací NC strojů a jejich řídicích systémů. Stejně tak je tomu i s jejich softwarem. Pro číslicově řízené stroje obecně platí, že mají vyšší pořizovací náklady a v důsledku toho i vyšší cenu strojní hodiny. Naproti tomu je však možné na těchto strojích snadněji vyrábět složitější součásti. Při důsledném uplatňování technologičnosti konstrukce a pečlivé technologické přípravě je možné dosáhnout přijatelných výrobních nákladů v kusové i velkosériové výrobě. Důležitým aspektem je program stroje, který by měl být perfektní. Neměly by se v něm vyskytovat zbytečné výměny nástrojů a přejezdy, dráhy by měly být co nejkratší při dodržení požadované kvality povrchu. [8]

3.1. Ruční programování

Při rozvoji prvních NC řízených strojů bylo nutné také vytvořit systém pro jejich programování. Pro tento účel se využívala výpočetní technika, která se v modernější podobě využívá dodnes. Při programování jednodušších tvarů bylo možné rovnou sestavit program po větách, které se následně v příslušném kódu vyděrovaly. Nejčastěji se využívala osmistopá dálkopisná papírová páska. [8]

Programování prvních CNC strojů vychází z programování NC strojů. Zápis probíhal i v tomto případě do tabulky, ve které probíhala editace. Výhodou ovšem byla možnost přepsání věty pomocí vepsání další řádky se stejným číslem, jako opravovaná věta. Příklad takovéto opravy je uveden na obrázku níže. [8]



The screenshot shows a window titled "EDITOR pro PC 16 CNC" with a sub-window "NC-Program: NCPR0G_0XKOREKCE.PCH". The main area contains a table of code lines:

N	M	D	Z	T
N 4	M 6	D 8	Z 0	T 1
N 5	G 29	>puvodni nastr. veta <		
N 4	M 6	D 7.9	Z -0.5551	T 1
N 6	G 29	>nova nastr. veta <		

The bottom status bar includes: ESC-Help F1-Save C-H-Pce F4-Blok F9-List F9-Simulace F10-Zpet

Obrázek 20: Korektura kódu [8]

Dále došlo ke vzniku nových funkcí, podprogramů a prvních pevných cyklů. S rozvojem počítačové techniky začaly vznikat programy pro simulaci drah nástroje podle NC kódu. Díky vývoji v oblasti řídicích a obslužných softwarů, nástrojů, upínačů a řezných materiálů došlo k výraznému rozšíření možností využití CNC obráběcích strojů. Tento vývoj rozšířil také využitelné technologie na těchto typech strojů. [8]

V dnešní době jsou CNC stroje stavěny jako poloautomaty pro kusovou a malosériovou výrobu, nebo jako obráběcí centra obvykle pro velkosériovou výrobu. Obráběcí centra pro rotační součástky jsou schopny obrábět díl z obou stran a využít také další technologie pro jeho úpravu, jako například vrtání, frézování nebo dokonce i kalení pomocí laseru. Obráběcí centra pro nerotační součástky mohou také využívat například soustružení a laser. Pro měření polotovarů, obrobků a nástrojů se na obou typech center využívá měřících sond. Všechny tyto stroje jsou však stále řízeny textem vytvořeným ve vhodném textovém editoru. Kvůli efektivitě tvorby tohoto textu došlo k vytvoření softwaru, který daný text generuje sám. Tento software je dnes znám pod pojmem CAM. [8]

3.1.1. Stavba programu

Celkový program je tvořen tzv. bloky, které se dále dělí na jednotlivé příkazy, které se skládají z adresové části a významové části. Příklady označení popisu struktury bloku a informace o jejich druhu je uvedena v tabulce 1. [9]

Tabulka 1: Značení kódu NC programu [9]

Popis struktury bloku		Druh informace
N	Číslo bloku	Ostatní
G	Přídavné funkce	Geometrické
X, Y, Z	Souřadnice	
F	Rychlost posuvu	Technologické
S	Otáčky vřetena	
T	Volba nástroje	
M	Pomocné funkce	Pomocné

Názorný příklad takového příkazu může být například S 1200, kde S odpovídá adresné části a 1200 významové části. Jako adresy se využívají písmena pro popis struktury bloku a číselná hodnota odpovídá významové části. [9]

Maximální velikost bloku je určena formátem bloku. Rozlišují se dva základní formáty bloků podle délky, a to konkrétně formát s konstantní délkou bloku a s proměnnou délkou bloku. V případě formátu s konstantní délkou je pozice každého slova pevně určena. To platí i v případě, že se některá funkce v předchozím nevyskytuje nebo se opakuje. U formátu s proměnnou délkou lze slova, která se v předchozím bloku nevyskytují nebo opakují, vynechat. [9]

V tabulce 2 jsou zobrazeny významy nejpoužívanějších adres, přičemž toto značení vychází z norem a je známo pod názvem ISO Programování. [9]

Tabulka 2: Význam nejpoužívanějších adres [9]

Písmeno	Význam
N	Číslo bloku (může či nemusí být uvedeno, slouží pro lepší orientaci v programu)
X, Y, Z	Základní osy souřadného systému (souřadnice v osách X, Y, Z)
A, B, C	Rotace kolem základních os
U, V, W	Paralelní pohyb se základními osami
G	Přípravná funkce (geometrická), zadávají se geometrické informace (přímka, kruh)
M	Pomocné funkce (přípravné), spouštějí činnost strojních mechanismů (zapnutí a vypnutí otáček, řezné kapaliny)
F	Rychlost posuvu (udává se v mm na otáčku nebo v mm za minutu nebo v mm na zub)
S	Otáčky vřetena nebo hodnota konstantní řezné rychlosti (záleží na systému)
T	Volba nástroje
R	Hodnota rádiusu nebo polární souřadnice

3.1.2. Postup sestavování programu

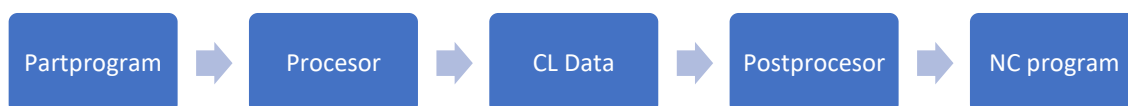
Základním krokem při sestavování programu je analýza výkresu součásti a zvolení vhodné technologie obrábění. Následně dojde k volbě polotovaru, nástrojů a způsobu upnutí. Poté, co byly zvoleny všechny součásti, dojde k založení a pojmenování programu. Následně se zadají rozměry polotovaru, poloha nulového bodu, způsob programování a nástroj s potřebnými řeznými podmínkami. Tyto parametry se označují jako hlavička programu a odpovídají základním informacím o obráběné součásti. [9]

Po vytvoření hlavičky programu následuje jeho tělo, kam se zadávají informace o pohybech nástrojů k vytvoření požadované součásti. Po dokončení těla programu je nutné ukončit celý program pomocí bloku Konec programu. K ukončení programu lze využít řadu funkcí, avšak nejčastěji je využívána funkce M30. [9]

Poté, co byl celý program sestaven, je důležité celý program odsimulovat, aby bylo možné odhalit hrubé chyby. Pomocí simulace je možné předejít výrazným komplikacím během výroby. Posledním krokem je samotné vyrobení zadané součásti. [9]

3.2. Strojní programování

Pro jednoduché součástky lze využívat ruční psaní kódu, avšak u tvarově složitých součástí by tento postup byl velmi náročný, v některých případech i nemožný, proto je vhodné NC kódy pro takovéto součásti generovat pomocí CAMů. V dnešní době existuje velká řada CAM systémů. Liší se zejména v technologických možnostech. Základy použití a ovládání jsou však podobné a postup generování NC kódů lze tedy obecně popsat pomocí schématu na obrázku níže. [8]



Obrázek 21: Členění CAMu [8]

Základní data pro CAM systém je partprogram, který se skládá z geometrické a technologické části. Geometrická část popisuje tvary polotovaru a obrobku, vzájemnou polohu mezi nimi a vztah mezi souřadným systémem obrobku a stroje. Technologická část popisuje polohu výchozího bodu, roviny výměny nástrojů, technologii obrábění a další základní technologická data. Na základě typu technologie volíme procesor, který nám generuje CL data. Tato data je následně nutné transformovat do formátu určeného řídicím systémem obráběcího stroje. Pro tento převod se využívá postprocesor. [8]

3.2.1. Sestavování partprogramu

Pro sestavování partprogramu existuje doporučený postup, který je vhodné dodržovat z důvodu vyvarování se obvyklým chybám, případně je vhodné znát způsoby, jak tyto chyby opravit. Během přenosu dat může vzniknout mnoho problémů. Tvar obrobku většinou přejímáme z CAD modelu, avšak kvůli nedostatečné normalizaci dat přenosových formátů může dojít ke špatnému načtení modelu. Častými chybami jsou nenačtené nebo zdvojené plochy, nepřesné navázání prvků nebo duplicitní prvky. [8]

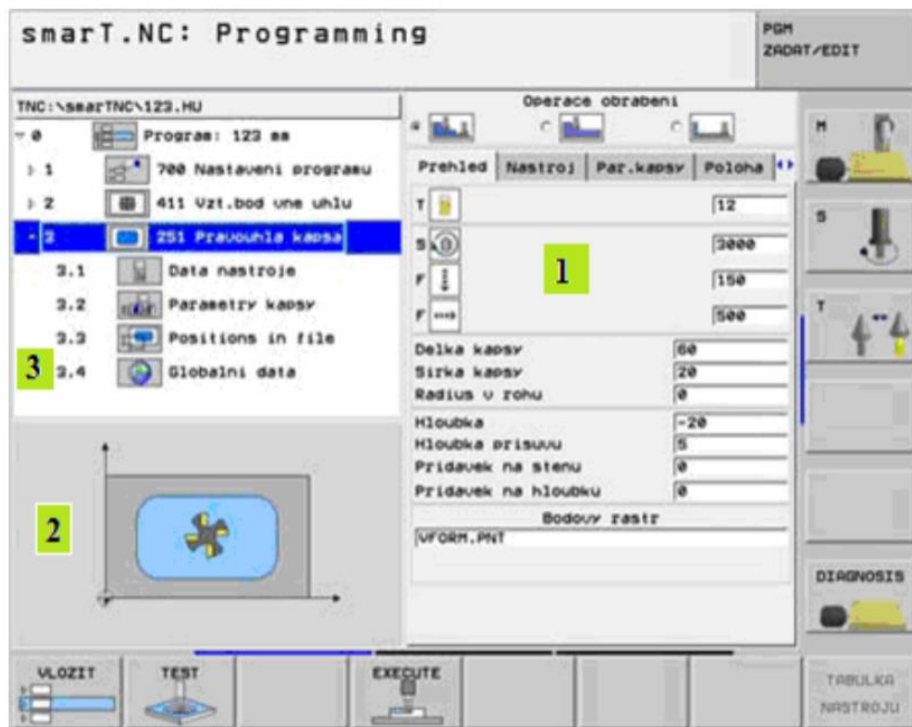
Využití CAMů je také například vhodné pro optimalizaci obráběcích procesů a výběru nejvhodnější strategie. Díky možnosti simulace obrábění podle CL dat je možné kontrolovat kvalitu obrobené plochy a porovnávat rozložení a velikosti chyb obrobené plochy s časem potřebným pro obrábění, aby došlo k výběru nejekonomičtější varianty. Tato optimalizace je výrazně ovlivněna oblastí strategií vedení drah nástroje na čisto a množstvím ovlivnitelných parametrů technologie. [8]

3.2.2. Dílenské programování

Jedná se o programování, které probíhá přímo na NC stroji. Takovýto stroj je vybaven softwarem, který přímo v řídicím systému stroje generuje dráhy. Tento typ programování se využívá zejména pro 2 D a 2,5 D systémy, soustružení a broušení. K výpočtu drah a dalším matematickým operacím dochází díky partprogramu, který je zapsaný dialogovým způsobem na klávesnici stroje nebo pomocí dotykové obrazovky. Jedná se o intuitivní systém, který nabízí postup prací, včetně možných variant. Pracovník pouze vybírá nejvhodnější varianty a doplňuje potřebné parametry, bez kterých nelze program spustit. Jedná se o pevné cykly, které mají stanovené povinné charakteristiky, které musejí být vyplněny. Mezi tyto cykly například patří cyklus pro řezání závitu, cyklus pro hrubování kužele, podélné hrubování průměru a vrtací cykly. V poslední době došlo

k nahrazení textového editoru grafickým rozhraním, čímž bylo dosaženo lepší přehlednosti, snadnějšího zapamatování a tím i větší produktivity. [8]

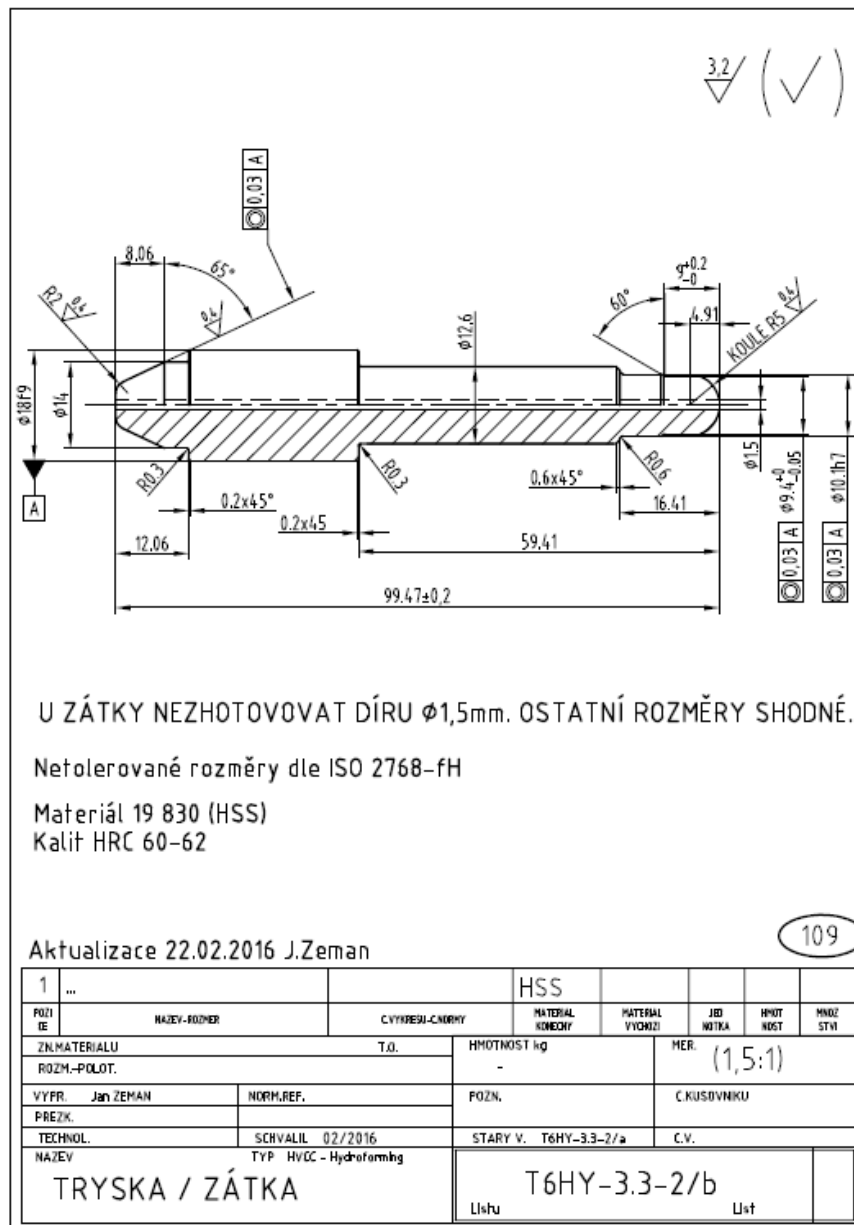
Charakteristické pro dílenské programování je snadné ovládání a zároveň využití výhod, které nabízí využívání CAM systémů. Mezi tyto výhody lze řadit rychlost získávání NC programu, snížení vlivu chyby způsobené člověkem a efektivita práce s informacemi potřebnými pro NC kód. Samozřejmostí je již možnost simulace programu. Tyto systémy se využívají zejména v menších provozech a bývají obsluhovány kvalifikovanějšími zaměstnanci. Řídicí systémy pro tyto typy strojů jsou vyráběny například firmami Siemens a Heidenhain. Příklad vzhledu řídicího systému Heidenhain je zobrazen na obrázku 22. [8; 10]



Obrázek 22: Řídicí systém Heidenhain [10]

4. Analýza výrobní dokumentace

Jako první byla v praktické části provedena analýza výkresu zadané součásti. V této analýze byl kladen důraz na rozměry, které mohou být problematické z hlediska výroby, a proto je nutné jim věnovat větší pozornost. Na obrázku níže je zobrazen výkres součásti.



Obrázek 23: Výkres zadané součásti

Základní charakteristikou ovlivňující náročnost výroby jsou tolerance dle ISO 2768 fH pro netolerované rozměry. Jedná se o nejpřísnější možné požadavky, což výrazně zvyšuje náročnost na výrobu a tím i její cenu. Klíčové rozměry jsou tolerovány explicitně pomocí normy ČSN EN ISO 1101. Toto tolerování je vhodné pro jasné stanovení požadavků. Pro výrobu ostatních ploch by bylo dostačující využít tolerance

třídy ISO 2768 mK. Tato tolerance by se týkala přímosti, kolmosti délek a vybraných průměrů. Hodnoty těchto tolerancí jsou uvedeny v tabulkách 3 až 5.

Tabulka 3: Tolerance délkových rozměrů [35]

Mezní úchytky délkových rozměrů (kromě zkosení a zaoblení hran)
Rozměry v milimetrech

Třída přesnosti	Mezní úchytky pro rozsahy rozměrů							
	přes 0,05 do 3	3 6	6 30	30 120	120 400	400 1000	1000 2000	2000 4000
přesná f	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
střední m	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
hrubá c	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
velmi hrubá v	-	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

Tabulka 4: Tolerance přímosti a rovinnosti [35]

Přímost a rovinnost
Rozměry a tolerance v milimetrech

Třída přesnosti	Tolerance přímosti a rovinnosti pro jmenovité délky					
	přes do 10	10 30	30 100	100 300	300 1000	1000 4000
přesná H	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
střední K	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
hrubá L	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6

Tabulka 5: Tolerance kolmosti [35]

Kolmost
Rozměry v milimetrech

Třída přesnosti	Tolerance kolmosti pro rozsahy jmenovitých délek kratší strany			
	přes do 100	100 300	300 1000	1000 3000
přesná H	0,2	0,3	0,4	0,5
střední K	0,4	0,6	0,8	1
hrubá L	0,6	1	1,5	2

Nejproblematictější rozměrem je vnitřní díra, která má délku přibližně 66D. Tato díra by se velmi těžko vrtala, proto se v současné době vyjiskřuje, což je velmi časově náročné a hrozí nebezpečí vzniku zbytkových napětí. Během vyjiskřování však dochází k uhýbání, kvůli čemuž díra nedosahuje požadované přímosti. Další prvky, které je třeba zvážit při návrhu technologického postupu jsou sousostí, jejichž hodnota je rovna 0,03 mm, což je komplikované kvůli nutnosti výroby součásti na minimálně dvě upnutí. Drsnost 0,4 μm, která je obtížně dosažitelná soustružením Malé rádiusy v rozích dosedacích ploch, konkrétně o hodnotě R 0,3 mm. Průměr 10,1h7, kvůli velmi přísné toleranci, která je také obtížně dosažitelná soustružením na vyložení 59 mm. Posledním faktorem, který je nutný vzít v úvahu, je nebezpečí deformací během tepelného zpracování, což může způsobit nesplnění předepsaných GPS.

5. Návrh úpravy konstrukce

Pro zjednodušení výroby zadané trysky by bylo vhodné upravit některé rozměry, kvůli snazší výrobě. Rozměr, který nejvíce ovlivňuje složitost výroby, je vnitřní díra o průměru 1,5 mm a přibližné délce 66D, která je vyráběna vyjiskřováním. Tento rozměr by bylo možné z jedné strany rozšířit na průměr 3,5 mm. Díky této úpravě by bylo možné vyvrtat díru o průměru 3,5 mm délky přibližně 26D a následně z druhé strany vyvrtat díru o průměru 1,5 mm délky 6D. Změnou technologie z vyjiskřování na vrtání by bylo možné zkrátit dobu výroby a zároveň zlepšit integritu povrchu díry, kvůli nižší drsnosti a absenci přetavené povrchové vrstvy.

Pro tuto operaci byly nalezeny dva vhodné vrtáky od firmy Dormer Pramet. Jedná se o vrtáky pro zhotovování hlubokých děr. První nástroj má označení Dormer A1253.5X160 viz obrázek 24. [11]



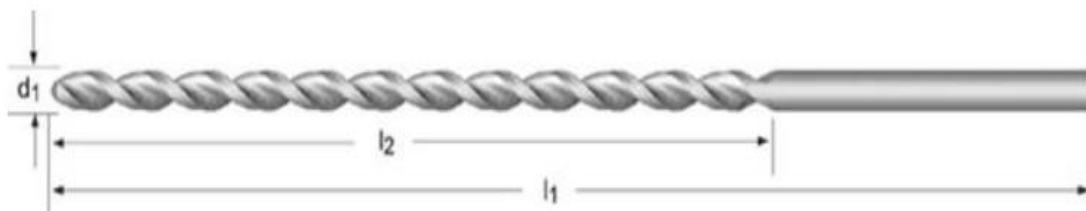
Obrázek 24: Vrták Dormer A125 [11]

Parametry nástroje jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Parametry vrtáku A125 [11]

d_1 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	materiál	Úhel hrotu [°]	Cena [CZK]
3,5	160	100	HSS	118	520

Dalším nástrojem je vrták Dormer A9763.5X165 viz obrázek níže.



Obrázek 25: Vrták A976 [11]

Parametry jsou uvedeny v tabulce níže.

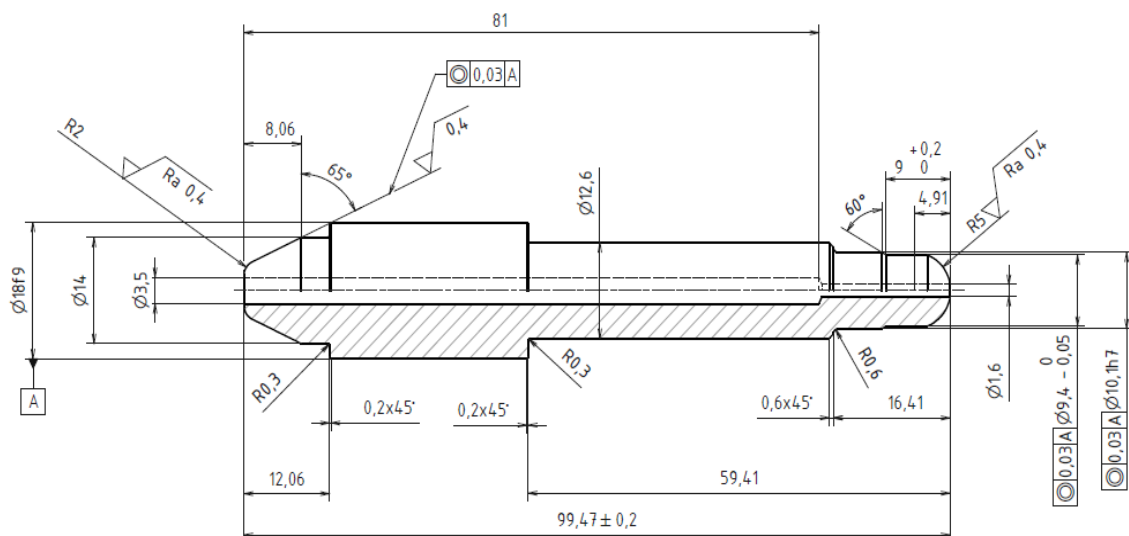
Tabulka 7: Parametry vrtáku A976 [11]

d_1 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	materiál	Úhel hrotu [°]	Cena [CZK]
3,5	165	115	HSS-E	130	666

Z těchto vybraných vrtáků se jako vhodnější jeví Dormer A976, kvůli větší délce, a hlavně kvůli většímu vrcholovému úhlu. Větší úhel hrotu zajistí menší náchylnost na odklonění od směru vrtání.

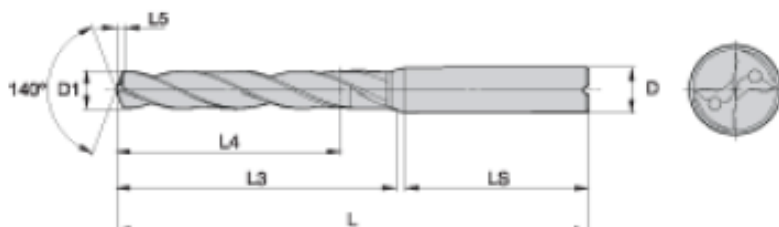
Na základě předchozího výběru byl vyzkoušen vrták Dormer A976. Během testování bylo zjištěno, že tento vrták nebude pro vrtání takto dlouhé díry vhodný. Při vrtání je materiál zahříván, čímž dochází k jeho zpevňování a z tohoto důvodu i k zalamování vrtáku. Z toho vyplývá, že bude nutné vybrat vrták s vnitřním chlazením. Zároveň také došlo k úpravě rozměrů díry. Původně byla navržena díra o průměru 3,5 mm s hloubkou 89 mm. Tato díra se ukázala být nevhodná kvůli koncentraci napětí na vnější kontuře. Z tohoto důvodu byla hloubka díry zmenšena na 81 mm, aby se konec díry nacházel v části trysky s průměrem 12,6 mm.

Kvůli snížení hloubky díry o průměru 3,5 mm došlo k prodloužení délky díry o průměru 1,5 mm. Tato délka odpovídá průměru 12,5D, což výrazně snižuje množství vrtáků ze slinutého karbidu, které by bylo možné využít pro tuto operaci. Z tohoto důvodu došlo ke změně průměru díry na 1,6 mm. Všechny tyto úpravy jsou zobrazeny na obrázku níže



Obrázek 26: Úpravy původního modelu

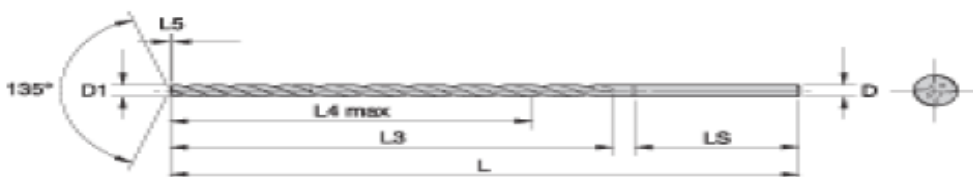
Po konzultaci s firmou Kennametal byl vybrán vrták B273Z03500SGL. Jedná se o karbidový vrták pro hluboké otvory s vnitřním chlazením. Při využití tohoto vrtáku je nutné využít ještě pilotní vrták. Konkrétně se jedná o typ B976A03500. Obrázky a parametry vrtáků jsou uvedeny na obrázcích a v tabulkách níže. [12]



Obrázek 27: Plotní vrták [12]

Tabulka 8: Parametry pilotního vrtáku [12]

d_1 [mm]	L [mm]	l_3 [mm]	materiál	Úhel hrotu [°]
3,5	62	20	SK	140



Obrázek 28: Vrták B273Z03500SGL [12]

Tabulka 9: Parametry vrtáku B273Z03500SGL [12]

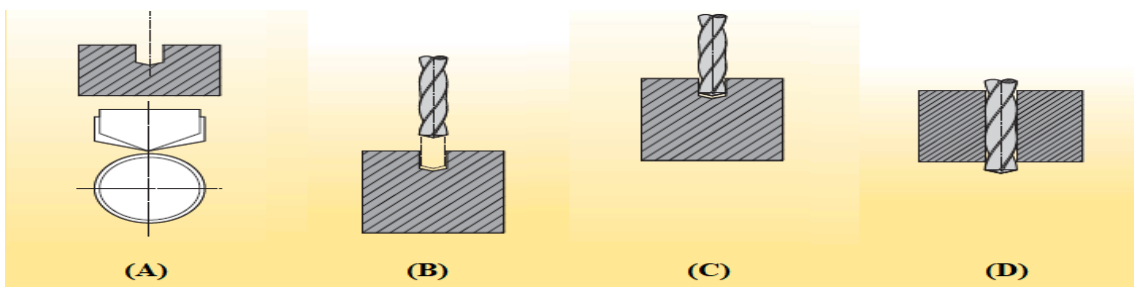
d_1 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	materiál	Úhel hrotu [°]
3,5	145	103	SK	135

Po vybrání těchto vrtáků byl proveden test, zda jsou vrtáky pro aplikaci vhodné. Z testu vyplynulo, že vhodné podmínky pro pilotní vrták jsou: rychlost $v_c = 40$ m/min a posuv na otáčku $f = 0,05$. Pro vrták 25D je vhodná rychlost $v_c = 40$ m/min u posuv na otáčku $f = 0,055$.

Při vrtání dlouhých otvorů je nutné se řídit následujícími pravidly. Úhel špičky pilotního vrtáku musí být větší než úhel špičky vrtáku pro hluboké otvory, kvůli možnosti poškození řezných hran (viz obrázek 29A). Dále musí být průměr pilotního vrtáku větší než průměr vrtáku pro hluboké otvory, pro zajištění ochrany vodících fazetek a snadnému

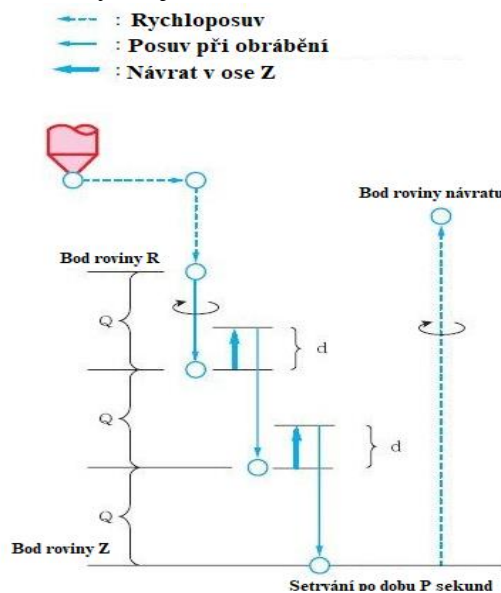
náběhu (viz obrázek 29B). V našem případě je toto zajištěno různými tolerancemi nástrojů. Zároveň musí být hloubka předvrtaného otvoru alespoň 2 D. [13]

Při nájezdu do předvrtané díry je doporučen posuv 0,055 mm na otáčku při 500 otáčkách za minutu do vzdálenosti 1 mm před čelo pilotního otvoru (viz obrázek 29C). Následně je nutné zapnout vnitřní chlazení o tlaku maximálně 25 bar a nastavit požadované otáčky, v našem případě 3638 ot/min. Pro správný výjezd nástroje je nutné znovu snížit otáčky na 500 ot/min a vyjíždět při posuvu 2 m/min (viz obrázek 29D). Pro dosažení nejlepších výsledků je doporučeno využívat hydraulické upínače. [13]



Obrázek 29: Podmínky vrtání [13]

Obrábění bude probíhat na stroji Okuma, který má pro tento typ výroby děr speciální cyklus, konkrétně G73 – High speed deep hole drilling cycle. Cyklus se skládá z: Umístění podél os X a Y rychloposuvem. Nájezdu na bod roviny R rychloposuvem. Vrtání o vzdálenost Q při daném posuvu. Zpětného pohybu nástroje o vzdálenost d. Následně se opakuje vrtání a zpětný pohyb, dokud není dosažena požadovaná vzdálenost. Poté nástroj setrvá P vteřin na bodě roviny Z a následně se rychloposuvem vrátí do bodu roviny návratu. Schéma tohoto cyklu je zobrazeno na obrázku 30. [14]



Obrázek 30: Okuma G73 [14]

6. Návrh možných nástrojových materiálů

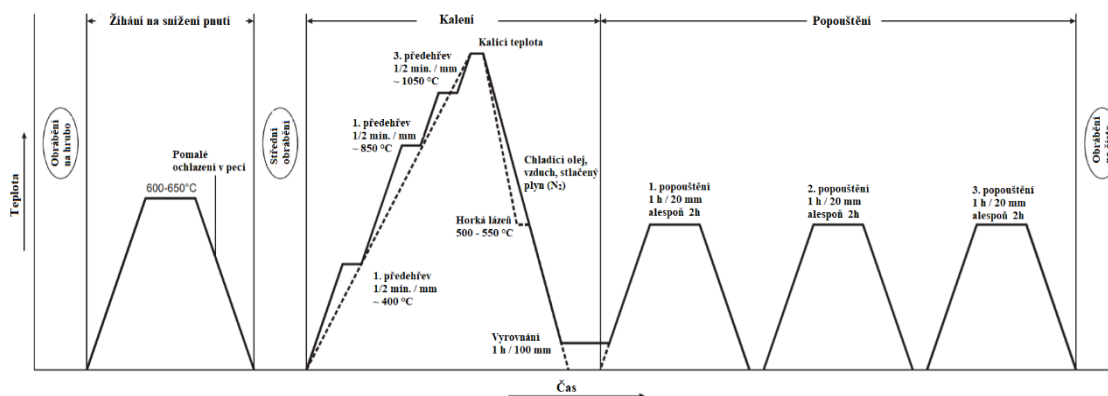
V současné době se tryska vyrábí z rychlořezné oceli 19830, která se kalí na tvrdost HRC 60-62. Jedná se o ocel s vysokou pevností při vysokých teplotách s dobrou houževnatostí a otěruvzdorností. V dodaném stavu naměkko je ocel velmi dobře obrobitelná soustružením i vrtáním. Obvykle se využívá pro nástroje s dobrým poměrem tvrdosti a houževnatosti. Využívá se na frézy, vrtáky, výstružníky, soustružnické nože, tvářecí a stříhací nástroje. Složení je uvedeno v tabulce níže. [15]

Tabulka 10: Složení oceli 19830 [15]

C	Si _{max}	Mn _{max}	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	V	W
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,9	0,45	0,4	0,03	0,03	4,2	4,9	1,9	6,4

Tato ocel se kalí při teplotách 1200 až 1240 °C a následně se popouští při teplotách 540 až 650 °C. Kvůli zvýšení houževnatosti se popouštění provádí vícekrát viz obrázek 31. Tento způsob je časově a ekonomicky náročný, proto budou navrženy jiné materiály, které by byly pro tuto součást vhodné. Cena samotné oceli je přibližně 1100 Kč za kilogram. [15]

(1.3343) Diagram teplotního cyklu



Obrázek 31: Diagram teplotního cyklu [15]

Důvodem pro výrobu trysky z tohoto materiálu je vysoká odolnost vůči otlakům a otěru, vznikajících na kulové ploše. Nevýhodami tohoto materiálu jsou nedostatečná odolnost vůči korozi, minimální tažnost a tendence ke štěpným bezdeformačním lomům při cyklickém ohybovém namáhání.

6.1. Nástrojové oceli

Nástrojové oceli jsou materiály vhodné pro výrobu různých druhů nástrojů. Podle použití je dělíme na oceli pro práci za studena a nízkých teplot, pro práci za tepla, pro obrábění kovů, pro hromadnou výrobu a oceli pro tváření a zpracovávání plastů a skla. Další dělení nástrojových ocelí je na základě výchozí struktury, stupně legování a nároků na tepelné zpracování na nástrojové oceli: uhlíkové (nelegované), nízkolegované, subledeburitické, chromové ledeburitické a rychlořezné oceli. [16]

Nelegované oceli se vyrábějí s různým množstvím uhlíku, přičemž jeho množství výrazně ovlivňuje vlastnosti oceli. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku dochází ke zvyšování pevnosti a tvrdosti až do eutektoidního složení, poté dochází ke zvyšování ořezuvzdornosti. Současně dochází ke snižování tažnosti a houževnatosti. [16]

Nízkolegované oceli mají hlavní nevýhodu v nízké prokalitelnosti a teplotní stabilitě. Z toho důvodu není možné tento materiál využívat pro výrobu větších a tvarově náročnějších nástrojů. Obvykle bývají tyto oceli legovány chromem, wolframem, molybdenem a vanadem. Jejich celkový obsah nepřesahuje 5 %. Primárně se využívají pro práci za studena. [16]

Subledeburitické oceli bývají legovány zejména karbidotvornými prvky. Jejich obsah bývá mezi 5 až 10 %. Jsou charakteristické výbornou prokalitelností, velmi dobrou houževnatostí a odolností proti popuštění. [16]

Chromové ledeburitické oceli mívají většinou obsah legujících prvků více než 10 %. Tyto materiály se používají pro nástroje, které bývají velmi namáhané a je u nich potřeba zajistit vysokou stabilitu výroby. Využívají se zejména pro nástroje na obrábění za studena, lisování a protlačování. [16]

Rychlořezné oceli patří mezi vysokolegované oceli, celkový obsah legur se pohybuje mezi 15 až 30 %. Obsah uhlíku se pohybuje mezi 0,75 až 2 %. Jako hlavní legury se využívají wolfram, chrom molybden a vanad. Pro zlepšení odolnosti proti přehřátí se do ocelí pro nejvyšší výkon přidává kobalt. Jeho množství bývá do 10 %. [16]

Jedna z možných alternativ by mohla být ocel 1.2358. Jedná se o chrom-molybden-vanadovou ocel s vysokou houževnatostí a dobrou odolností proti opotřebení. Výhody této oceli jsou dobrá prokalitelnost a rozměrová stálost po tepelném zpracování. Tato ocel je také dobře svařitelná a lešitelná. Z důvodu vynikající kombinace houževnatosti

a odolnosti proti opotřebení je možné tuto ocel využít pro různé lisovací a vstřikovací aplikace při zpracování plastů. Nevýhodou je však nižší pevnost, která se pohybuje mezi 850 až 1000 MPa. Složení této oceli je uvedeno v tabulce níže. [17] [18]

Tabulka 11: Složení oceli 1.2358 [17]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
0,6	0,8	0,35	4,5	0,5	0,2

Tuto ocel je možné dobře svařovat a leštit. Díky své vysoké houževnatosti a odolnosti vůči opotřebení se často využívá pro technologie lisování a vstřikování plastů. Tento materiál je vhodný jak pro práci za studena, tak pro formy na vstřikování plastů. Nejčastější využití je pro součásti na stříhání, ražení, hluboké tažení a pro komplikovanější nástroje pro práci za studena. [17]

Zušlechtním je možné dosáhnout tvrdosti až HRC 64, což je přibližně stejné, jako u dosud používané oceli. Kalení probíhá při teplotách 950 až 970 °C s předehřevem při teplotách 600 až 750 °C. Popouštění probíhá po dobu minimálně 2 hodiny na teplotě 180 °C a provádí se dvakrát. [17]

Nevýhodou materiálů uvedených výše je náročný způsob obrábění, proto bude hledání vhodného materiálu zaměřeno na jinou skupinu ocelí, konkrétně na maraging oceli. Tyto oceli se tepelně zpracovávají při zhruba 450 až 550 °C, z tohoto důvodu budou menší náklady na tepelné zpracování. Další výhodou je stálost rozměrů při vytvrzování, což zjednoduší způsob výroby. [19]

Další alternativou by mohla být vysoce legovaná chromová ocel 1.2080. Jedná se o ocel s vysokou tvrdostí dosaženou kalením v oleji a na vzduchu. Vyniká vysokou odolností vůči opotřebení kovovými i minerálními látkami. Dále má dobrou řezivost, velmi vysokou pevnost v tlaku a nízkou houževnatost zejména v příčném směru. Ocel je citlivá na rychlý a nestejněměrný ohřev, je vhodná pro kalení na sekundární tvrdost. Broušení této oceli je obtížné, stejně tak je tomu při tváření za tepla a také má sníženou obrobiteľnosť v žíhaném stavu. Po tepelném zpracování je možné získat tvrdosti 60 až 61 HRC. Složení této oceli je uvedeno v tabulce 12. [20]

Tabulka 12: Složení oceli 1.2080 [20]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	P max [%]	S max [%]
1,9 – 2,2	0,15 – 0,45	0,1 – 0,4	11–12	0,030	0,03

6.2. Maraging oceli

Maraging oceli jsou speciálním druhem vysokopevnostní oceli, který se od ostatních ocelí liší tím, že ke zpevňování nedochází pomocí uhlíku. Uhlík je naopak nečistota a při výrobě je požadován co nejmenší obsah. Ke zpevňování dochází pomocí precipitace intermetalických sloučenin. Díky menšímu obsahu uhlíku jsou tyto oceli snáze vytvrditelné, mají lepší tvařitelnost a lepší kombinaci pevnosti a houževnatosti. [21]

Základní dělení maraging ocelí je podle jejich meze kluzu. Složení obvyklých druhů maraging ocelí, vyvinutých firmou Inco, je uvedeno v tabulce níže. [21]

Tabulka 13: Dělení a složení maraging ocelí [21]

Označení	Ni [%]	Mo [%]	Co [%]	Ti [%]	Al [%]	Re [MPa]
Grade 200	18	3,3	8,5	0,2	0,1	1400
Grade 250	18	5,0	8,5	0,4	0,1	1700
Grade 300	18	5,0	9,0	0,7	0,1	2000
Grade 350	18	4,2	12,5	1,6	0,1	2400
Odlévaná	17	4,6	10,0	0,3	0,1	1650

Název maraging byl odvozen ze slov martenzit a ageing (stárnutí). Díky vysokému obsahu niklu se snadno dosáhne martenzitické struktury v těchto ocelích. Jediná transformace, která se objeví při nízkých chladících rychlostech, je martenzit. Zpevňování se provádí pomocí ohřevu na přibližně 480-510 °C při výdrži několik hodin. Během precipitace také dochází k rozpadu metastabilního martenzitu. K precipitaci dochází mnohem rychleji než k opačnému jevu, proto může dojít k značnému vytvrzení předtím, než dojde k rozpadu. Zabránění opětovnému formování austenitu je ve většině případů důležitá část při stárnutí, neboť při pokojové teplotě je austenit stabilní fází maraging ocelí a také snižuje hodnoty tvrdosti. [21; 22]

Tyto oceli mají dobrou obrobiteľnosť a využívajú sa pre komerčné a vojenské účely. Jejich hlavné využitie je v leteckom a vesmírnom priemysle a pre nástroje. Grade 350 sa hlavne využíva pre vojenské účely a není běžně dostupný. Dělíme dva základní druhy maraging ocelí, a to oceli s kobaltem a bez kobaltu. Oceli obsahující kobalt jsou ve vyšším stádiu využití a vývoje, avšak jejich hlavní nevýhodou je vyšší cena. Z tohoto důvodu dochází k většímu rozvoji maraging ocelí bez kobaltu. [21]

Na trhu se tento typ ocelí vyskytuje poměrně krátkou dobu. Původně spadaly pouze do specifikace MIL-STD military standard. Směrné složení není přesně definováno, proto si ho výrobci upravují a prodávají pod svými označeními. Napříč výrobci se liší informace o maximální dosažitelné tvrdosti, postupu tepelného zpracování i fyzikálních vlastnostech. Dokonce existují tři čísla materiálu v rámci jedné normy W.Nr.: 1.2709, 1.6358, 1.6354. [19]

6.2.1. Mechanické vlastnosti a mikrostruktura

Mechanické vlastnosti se liší podle složení a způsobu tepelného zpracování, proto bude pro lepší znázornění dějů použita ocel grade 300 bez kobaltu. Složení popisované oceli je uvedeno v tabulce 14. [21]

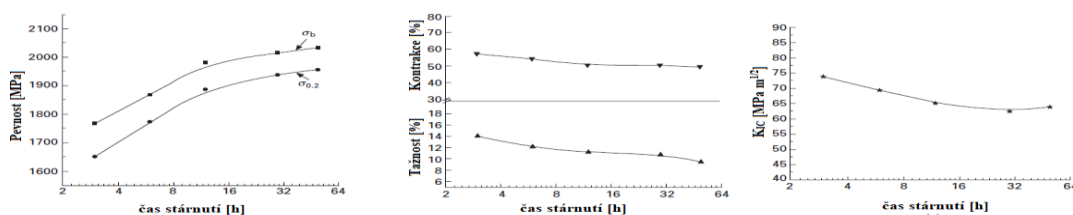
Tabulka 14: složení oceli Grade 300 [21]

Ni [%]	Mo [%]	Ti [%]	Co [%]	Al [%]	C [%]	S [%]	P [%]	Si [%]	Mn [%]	O [%]	N [%]
18,9	4,1	1,9	0,22	0,047	0,0037	0,002	0,0007	0,02	0,01	0,0036	0,0016

6.2.1.1. Stárnutí při 440 °C

Po třech hodinách stárnutí již nejsou difrakční body martenzitu ostré, nýbrž kulové jako tomu bylo před stárnutím. Ačkoli je difrakce slabá, je možné již sledovat precipitáty Ni_3Ti o průměru přibližně 2 nm. Dále se v matici nachází neidentifikovatelné precipitáty sférického tvaru o průměru 3 až 4 nm. Po šesti hodinách zůstávají precipitáty Ni_3Ti hustě distribuovány v matici, jejich průměr zůstává přibližně stejný, avšak délka roste. Neidentifikovatelné precipitáty zůstávají stejně rozložené s přibližně stejným průměrem. Po dvanácti hodinách má Ni_3Ti tvar tyče nebo jehly o průměrné délce 15 nm a průměru 3 nm. Tento tvar zůstává zachován i po přibližně 30 hodinách. Množství neidentifikovatelných precipitátů se postupně zmenšuje. Důležitým poznatkem je, že během stárnutí nedošlo k opětovnému formování austenitu. [21]

Při stárnutí na této teplotě dojde k dosažení požadované meze pevnosti po dvanácti hodinách. Poté však stále dochází k mírnému nárůstu jak meze kluzu, tak meze pevnosti. Kontrakce a tažnost se naopak s postupným časem snižují. Stejně tak je tomu u lomové houževnatosti. Grafy závislosti pevnosti na čase (a), tažnosti a kontrakce na čase (b) a lomové houževnatosti na čase (c) jsou zobrazeny na obrázku níže. [21]

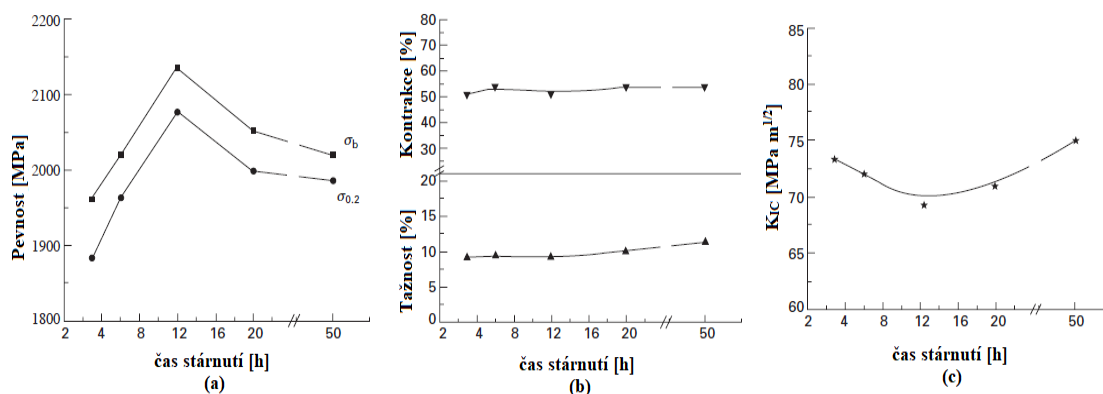


Obrázek 32: Mechanické vlastnosti při teplotě stárnutí 440 °C [21]

6.2.1.2. Stárnutí při teplotě 480 °C

Při této teplotě zpracování oceli jsou precipitáty po třech hodinách již viditelné a mají tvar jehly. Jejich průměrná délka je přibližně 15 nm a průměr 5 nm. Také v tomto případě se zde nachází sférické precipitáty o průměru 7 nm. Po dvanácti hodinách dosahuje ocel maximální tvrdosti. Také došlo k nárůstu délky a průměru Ni_3Ti na 10 respektive 35 nm. Po 50 hodinách precipitáty Ni_3Ti rostou, ale nehrubnou ani se nerozpouští v matici. Průměr precipitátů je 17 nm a délka 40 nm, rozložení je přibližně stejné jako při maximální tvrdosti. Při stárnutí na této teplotě nedochází k opětovnému formování austenitu do 20 hodin. Po 50 hodinách bylo možné austenit pozorovat a jeho množství bylo přibližně 9 %. [21]

Průběh tvrdosti je konsistentní s průběhem pevnosti v čase. Při maximální pevnosti si ocel zachovává dobré tahové vlastnosti. Maximálních hodnot pevnosti je dosaženo přibližně při době stárnutí 12 hodin. Hodnota lomové houževnatosti se s postupem času snižuje až po 12 hodinách dosáhne svého minima, následně dochází ke zvyšování. Grafy závislosti pevnosti na čase (a), tažnosti a kontrakce na čase (b) a lomové houževnatosti na čase (c) jsou zobrazeny na obrázku 33. [21]



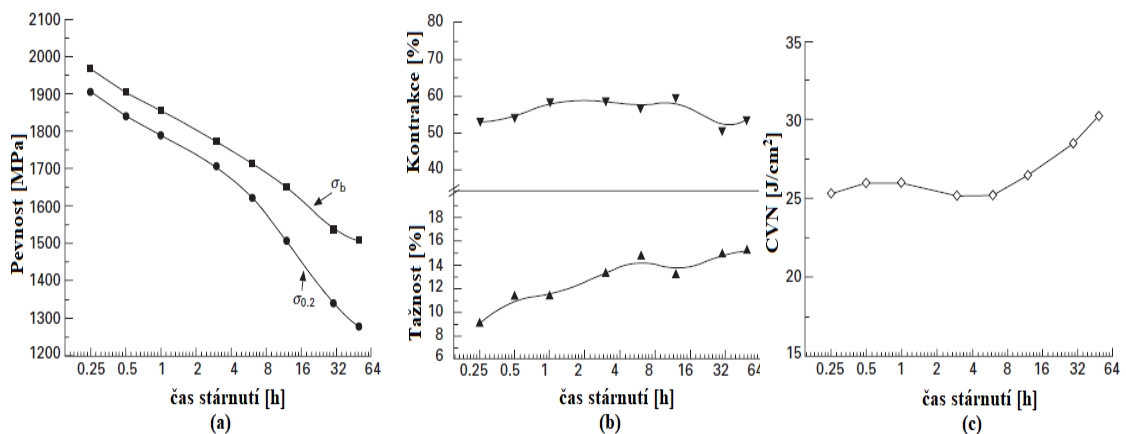
Obrázek 33: Mechanické vlastnosti při teplotě stárnutí 480 °C [21]

6.2.1.3. Stárnutí při 540 °C

Ke vzniku velkého množství precipitátů Ni_3Ti , které mají tvar jehly, dochází již po 15 minutách. Jejich průměr se velmi liší s velikostí od 2 do 9 nm a délkou 60 nm. Navíc došlo ke spojení některých precipitátů. Stejně jako v předešlých případech se i zde vyskytují sférické precipitáty o velikosti přibližně 4 nm. Dále se v matici vyskytuje znovu zformovaný austenit. Po hodině jsou precipitáty Ni_3Ti rozmístěny homogenně a mají jednotnou velikost. Jejich průměr je 9 nm a délka 38 nm. Sférické precipitáty se již v matici nevyskytují. Dále dochází k výskytu většího množství austenitu.

S postupujícím časem stále dochází k růstu precipitátů Ni_3Ti . Stejně tak je tomu u austenitu, kterého je po 50 hodinách stárnutí přibližně 25 %. [21]

V průběhu času dochází k výraznému zmenšování pevnostních charakteristik, zatímco tažnost postupně narůstá. Kontrakce zůstává na vysoké úrovni. Při vysokoteplotním stárnutí nedosahuje lomová houževnatost ostatních maraging ocelí o srovnatelné pevnosti. Vrubová houževnatost v tomto případě s časem roste. Grafy závislosti pevnosti na čase (a), tažnosti a kontrakce na čase (b) a vrubové houževnatosti na čase (c) jsou zobrazeny na obrázku níže. [21]



Obrázek 34: Mechanické vlastnosti při teplotě stárnutí 540 °C [21]

6.2.2. Maraging oceli v aditivní technologii

Maraging oceli mají díky malému množství uhlíku a legujících prvků dobrou svařitelnost, což umožňuje jejich využití v aditivních technologiích. Zejména se využívají pro metody Laser Metal Deposition (LMD) a Selective Laser Melting (SLM). Obě technologie jsou založeny na tvorbě malé tavné lázně, vytvořené pomocí laseru, a přetvoření vstupního prášku na tuhý materiál. Mají určité podobnosti s procesem mikro-svařování. [22]

Jednou z hlavních výhod aditivní výroby je možnost vytvořit velmi komplexní součásti, které by konvenčními způsoby byly velmi těžko vyrobitelné nebo by se vůbec nedaly vyrobit. Toho se často využívá pro tvorbu forem, díky možnosti vyrábět chladicí kanály velmi blízko povrchu. Klasicky se chladicí kanály vrtají a mohou být pouze rovné, z toho důvodu nemohou dosáhnou do všech míst. [22]

Pro porovnání vlastností maraging oceli při zpracování pomocí konvenčních metod a aditivních metody byla vytvořena studie, kde se porovnávaly vzorky vyrobené z oceli Grade 300 od firmy Böhler vyrobené oběma metodami. Konvenčně zpracovaný materiál byl dodán již v hotovém stavu se složením uvedeném v tabulce níže. [22]

Tabulka 15: Složení konvenčně zpracované oceli [22]

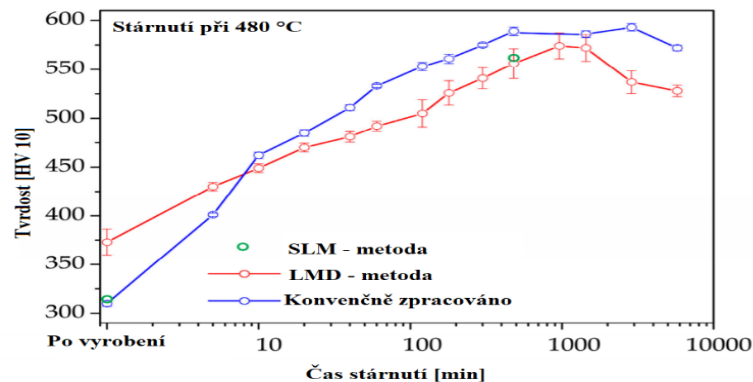
C	Si	Mn	Mo	Ni	Al	Co	Ti	Fe
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,0018	0,025	0,011	5,03	18,3	0,077	8,74	0,68	Bal.

Parametry vzorků zpracovaných aditivně jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16: Parametry aditivně zpracovaných vzorků [22]

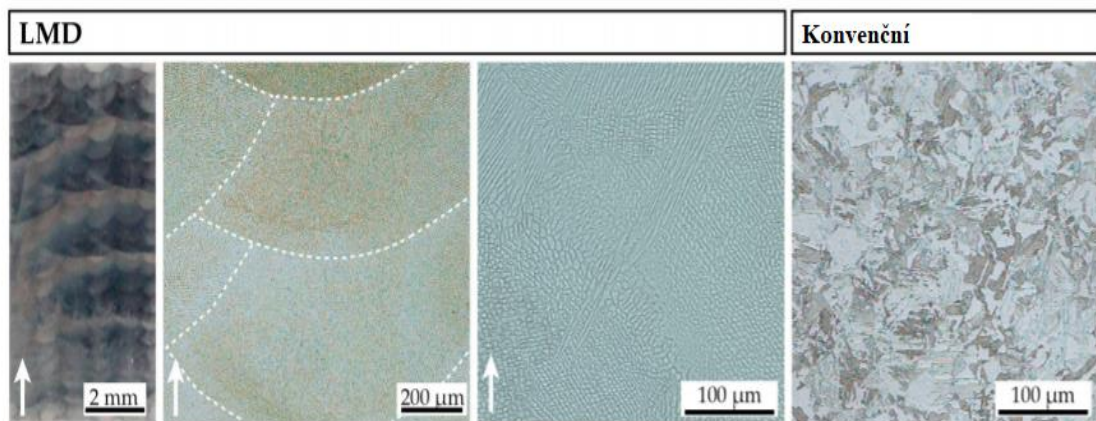
Proces	Výkon laseru [W]	Skenovací rychlost [mm/s]	Průměr paprsku [μm]	Tloušťka vrstvy [μm]	Šrafování [μm]	Hustota energie [J/mm ³]	Inertní atmosféra
LMD	800	10	1700	420	900	112,0	Ar
SLM	100	150	180	30	112	123,5	N ₂

Ve studii byla porovnána závislost mikro-tvrdomosti na době stárnutí při 480 °C a mikrostruktura vzorků. Z výsledků vyplývá, že v počátečním stavu mají vzorky vyrobené metodou LMD zhruba o 50 HV vyšší tvrdost než vzorky vyrobené konvenčně a metodou SLM. Po 5 až 10 minutách však rozdíl mezi konvenčně zpracovaným a LMD vzorkem mizí a od tohoto bodu je hodnota tvrdosti konvenčního vzorku vyšší. Maximální tvrdosti bylo dosaženo v oblasti 500 až 1000 minut. V tomto rozmezí má vzorek vyrobený metodou SLM podobné vlastnosti jako vzorek LMD. Hodnoty získané pro SLM metodu byly získány ze studie vytvořené o dva roky dříve. Všechna data jsou zobrazena na obrázku níže. [22]



Obrázek 35: Porovnání tvrdostí u aditivních a konvenčních metod [22]

U LMD vzorku je patrná vrstvená struktura při menším zvětšení. Je také možné pozorovat kontrast po každé čtvrté až páté vrstvě, což bylo způsobeno leptáním. Při větším zvětšení jsou také vidět konkrétní tavné lázně se ztuhými dendrity uvnitř. Tyto dendrity jsou lépe znázorněny při maximálním zvětšení viz obrázek 36. U konvenčního vzorku není možné pozorovat žádnou tuhnoucí strukturu, kvůli termomechanickému zpracování. Leptání odhalilo martenzitickou strukturu bez preferované orientace bloků. Naopak u LMD vzorku nejsou viditelné bloky typické pro martenzitickou strukturu. [22]



Obrázek 36: Metalografické výbrusy vzorků [22]

Během stárnutí dochází u LMD vzorku k opětovnému formování austenitu, který se naopak u konvenčně vyrobeného vzorku vůbec nevyskytuje. Stejně tak je tomu u vzorku vytvořeného metodou SML. [22]

Ze studie vyplývá, že ve stavu dodání dosahuje nejvyšších tvrdostí vzorek vyrobený metodou LMD, avšak po tepleném zpracování dosahuje nejlepších výsledků konvenčně zpracovaný vzorek, protože se v něm nevyskytuje zbytkový ani znovu zformovaný austenit. Důvodem vzniku austenitu je chemická nehomogenita způsobená segregací při tuhnutí. Pro lepší porozumění mikro a nano-struktuře bude nutné provést další studie. [22]

6.2.3. Volba vhodného materiálu

Na základě rešerše maraging ocelí byla zvolena ocel Grade 300, které je známa pod různými obchodními označeními: Bolzano Vaco 180, Böhler WL 722 VMR, WL 720, V720, Schmolz a Bickenbach Cryodur 2709, Thyrodur 2709, Abrams 1.2709 ESR, Vascomax C300. Firma Böhler vyrábí tuto ocel metodou vakuového přetavování VAR, naproti tomu ji firma Abrams vyrábí metodou elektrostruskového přetavování ESR. Po poptání byla jako dodavatel zvolena firma Böhler. V jejím případě je tato ocel značena jako 1.2709. Vyskytuje se však v různých dalších označeních, konkrétně V720 VMR, W720 VMR a W722 VMR. Parametry těchto ocelí jsou velmi podobné a budou dále popsány blíže. Jejich složení je uvedeno v tabulce 17. [19; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29]

Tabulka 17: Složení ocelí Böhler [19; 23; 24]

Ocel	C _{max} [%]	Si _{max} [%]	Mn _{max} [%]	Mo [%]	Ni [%]	Co [%]	Ti [%]	Al [%]
V720	0,005	0,05	0,05	5,0	18,5	8,8	0,7	0,11
W720	0,005	0,05	0,10	5,0	18,5	9,0	0,7	0,1
W722	0,005	-	-	4,85	18	9,25	1	-

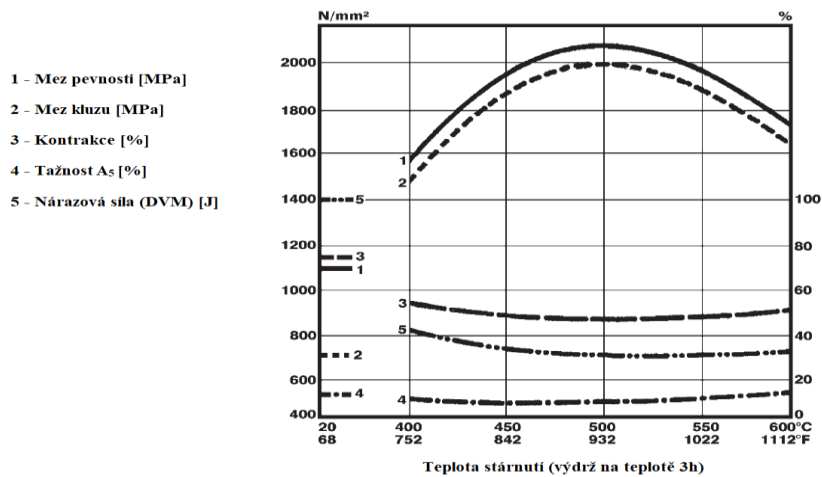
Z tabulky je patrné, že složení všech ocelí je velmi podobné a liší se pouze v desetinách hmotnostních procent. Stejně je tak tomu u způsobu zpracování a mechanických a fyzikálních vlastností, jejichž hodnoty jsou velmi podobné viz tabulka níže. Konkrétně typy V720 a W720 dosahují stejných výsledků. W722 dosahuje menších pevností a vyžaduje delší dobu stárnutí pro dosažení stejné tvrdosti. Hodnoty pevností, tažnosti a tvrdosti jsou uvedeny pro vytvrzený stav. [19; 23; 24]

Tabulka 18: Mechanické a fyzikální vlastnosti ocelí Böhler [19; 23; 24]

Ocel	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost A ₅ [%]	Tvrdost [HRC]	Hustota [kg/dm ³]	Tepelná vodivost [W/m·K]	Tepelná roztažnost [m/m·K]
V720	1860- 2260	1815	6	55	8,20	14	10,2·10 ⁻⁶
W720	1860- 2260	1815	6	55	8,20	14	10,2·10 ⁻⁶
W722	1900- 2100	1800	9	55	8,10	21	10,3·10 ⁻⁶

Na základě zjištěných výsledků a následné komunikace s dodavatelem byla zvolena ocel W720. Tato ocel má výborné pevnostní charakteristiky, dobrou houževnatost i za nízkých teplot a stálost rozměrů při tepelném zpracování. Tato ocel je vhodná pro použití do nízkých i vysokých teplot, až přibližně 450 °C. Její výhodou je vysoký obsah niklu, díky němuž je zajištěna korozivzdornost této slitiny. [19]

Pro zvýšení tvrdosti je možné ocel dále vytvrzovat, nebo nitridovat až na tvrdost 800 HV. Proces vytvrzení probíhá za teploty 480 °C po dobu 3 hodin. Při této teplotě dojde k vytvrzení až na 55 HRC. V závislosti na teplotě vytvrzování se také mění meze kluzu a pevnosti viz obrázek 37. Nitridace probíhá v plynném prostředí při teplotě 500 °C, do hloubky přibližně 0,2 mm a nahrazuje proces vytvrzení. [19]



Obrázek 37: Graf závislosti meze pevnosti na teplotě stárnutí [19]

Tuto ocel je možné obrábět pomocí slinutých karbidů typu P, K nebo M, případně pomocí nástrojů z rychlořezné oceli. Rychlosti při soustružení karbidovým nástrojem se v závislosti na hloubce řezu pohybují od 210 do 35 m/min. Pro vrtání jsou doporučené rychlosti 50 až 35 m/min. Je možné obrábět ocel jak ve vytvrzeném stavu, tak v žíhaném stavu. Během obrábění je důležité sledovat ostrost řezné hrany, protože zvýšené napětí způsobuje zvýšené opotřebení a vede k poškození. [19]

Na základně základních technologických zkoušek obrábění bylo zjištěno, že tento materiál lze snadno obrábět pomocí frézování a rovinného broušení. Při soustružení byla tendence ke vzniku souvislé třísky, proto je obrobiteľnosť komplikovaná. Nejhorší obrobiteľnosť byla během vrtání, které lze provádět pouze karbidovými vrtáky s vnitřním chlazením. Při použití vrtáku bez vnitřního chlazení dochází zejména u děr s hloubkou větší než 5D k iniciaci procesu vytvrzování před hlavním hřbetem.

7. Tvorba vytvrzovací křivky

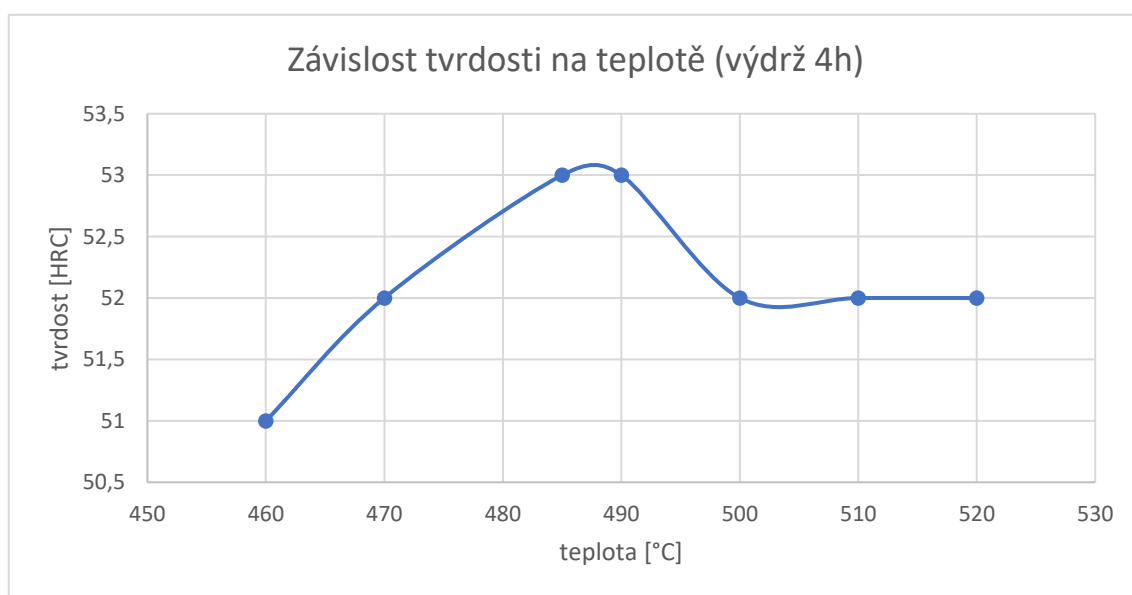
Pro správné nastavení pece při vytvrzování byla vytvořena vlastní vytvrzovací křivka. Tato křivka byla vytvořena pro ověření parametrů udávaných v listu parametrů dodané oceli. Podle tohoto listu má docházet k největšímu vytvrzení při době ohřevu 3 hodiny na teplotě 480 °C. [19]

Před samotným ohřevem byly vytvořeny vzorky. Nejprve byl z dodané tyče uříznut válec o přibližné délce 70 mm pomocí pásové pily. Z tohoto válce byly následně vytvořeny vzorky o tloušťce zhruba 7 mm, které byly dále rozděleny napůl. K dělení vzorků docházelo na rozbrušovací pile. Nakonec byly vzorky zbrušeny, aby bylo možné měřit tvrdost pomocí Rockwella i Vickerse s minimální chybou a aby se na vzorcích nevyskytovaly otřepy.

Po vytvoření byly vzorky postupně umísťovány do pece. Na základě známých parametrů byly určeny teploty, při kterých bude měření probíhat. Konkrétně se jedná o rozmezí teplot 460 až 520 °C, při době ohřevu 4 hodiny (1 hodina pro ustálení teploty a 3 hodiny výdrž). Následně byly změřeny tvrdosti uvedené v tabulce 19 a vynesena závislost tvrdosti na čase zobrazena v grafu níže.

Tabulka 19: Hodnoty tvrdosti

Teplota [°C]	460	470	480	490	500	510	520
Tvrdost [HRC]	51	52	53	53	52	52	52

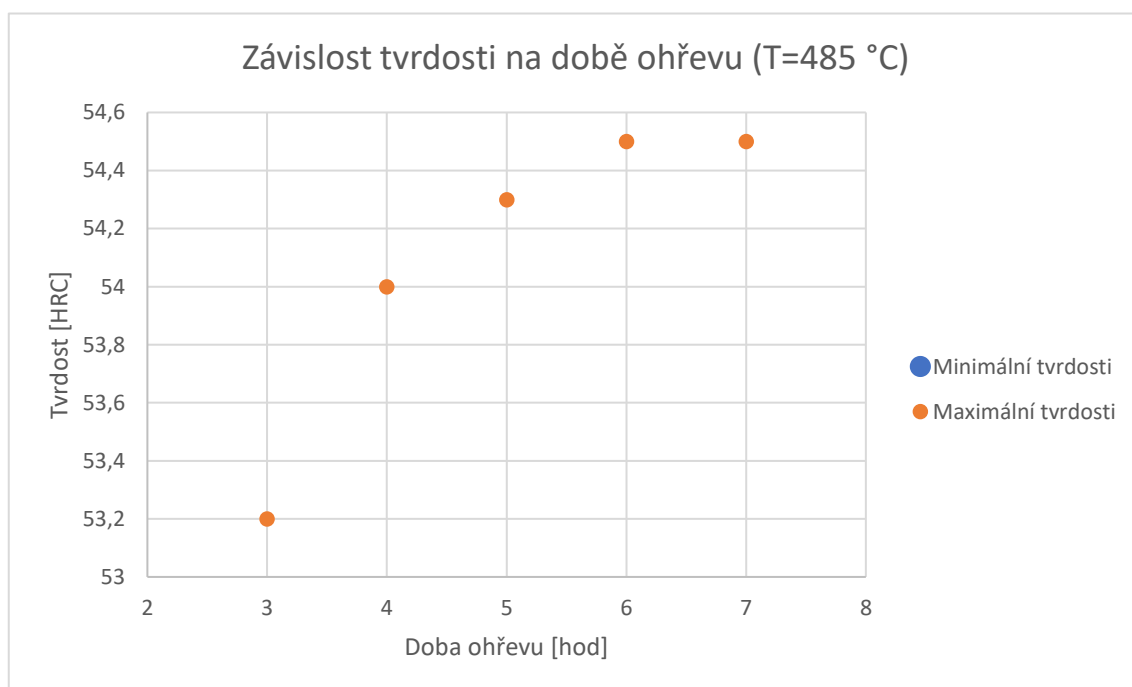


Obrázek 38: Graf závislosti tvrdosti na teplotě

Z grafu je patrné, že nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo v oblasti 485 až 490 °C. Pro další měření byla určena teplota 485 °C, při které se vytvořila závislost tvrdosti na době výdrže. Doba výdrže byla od 3 do 7 hodin, kdy při první hodině došlo k ustálení teplot a následně začala doba výdrže. Po dokončení ohřevu byly změřeny tvrdosti a jsou zobrazeny v tabulce 20, z nichž byl vytvořen graf zobrazený níže.

Tabulka 20: Tvrdost při teplotě 485 °C

Čas [hod]	3	4	5	6	7
Min. tvrdost [HRC]	53,2	53,5	53,8	54	54
Max. tvrdost [HRC]	53,2	54	54,3	54,5	54,5



Obrázek 39: Graf závislosti tvrdosti na době ohřevu

Z grafu vyplývá, že se zvyšující se dobou ohřevu dochází ke zvyšování tvrdosti, což neodpovídá parametrům udávaným v listě parametrů. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při výdrži 6 hodin. Při této výdrži byly naměřené tvrdosti stálé a nedocházelo ke vzniku koroze, na rozdíl od doby výdrže 7 hodin. Pro vytvrzení trysky byla tedy určena teplota ohřevu 485 °C při výdrži 6 hodin.

Během experimentu byla zjištěna optimální doba pro dosažení maximální tvrdosti. Tato tvrdost však nedosahuje hodnot maxima (56 HRC) udávaného výrobcem. Při vytvrzování trysek bylo zjištěno, že doba ohřevu 6 hodin je nevhodná a musela být

následně zkrácena. Na povrchu oceli během vytvrzování v komorové peci bez ochranné atmosféry docházelo ke vzniku vrstvy oxidů o submikronové tloušťce, která nemá vliv na funkčnost součásti. Oxid se projevuje modrofialovým zbarvením povrchu. Při delší době vytvrzení dochází k růstu oxidu, který přechází v matný šedý povlak, který vede ke zhoršení parametrů drsnosti povrchu. Tento problém by bylo možné řešit použitím tepleného zpracování s využitím inertního plynu (argon), případně vakuovou pecí. Při použití obou těchto variant dojde k navýšení nákladů a technologické komplikaci, která není pravděpodobně nutná.

Při testování tepleného zpracování byl také zjišťován vliv fázové transformace nízkouhlíkového austenitu na martenzit. Byla vytvořena sada vzorků, která byla nabroušena na přesný rozměr 20 mm. Po tepleném zpracování došlo k opětovnému změření rozměrů vzorku. V závislosti na směru bylo zjištěno smrštění materiálu o 0,060 až 0,065 %. Tento parametr je důležité vzít v potaz u tolerovaných rozměrů IT8 a přesnějších. U těchto rozměrů je nutné zvýšit přírůstek o hodnotu smrštění. V případě trysky je důležité věnovat pozornost funkčním rozměrům 10,1h7 a 18f9

8. Ověření pevnostních výpočtů

Změnu návrhu konstrukce je nutné ověřit pevnostními výpočty, zda nedošlo k výrazným změnám pevností. Tryska je namáhána vnitřním přetlakem v důsledku proudící kapaliny o tlaku 100 MPa. Pro výpočet je tryska považována za otevřenou silnostěnnou nádobu s vnitřním přetlakem a platí pro ni pevnostní podmínka: [30]

$$(p_1 - p_2) \leq \frac{\sigma_D}{2} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Pro původní konstrukci platí, že v celé délce má vnitřní díra průměr 1,5 mm a nejužší místo trysky má průměr 9,4 mm, ale může dosahovat hodnoty 9,35 mm. Pro výpočet byly využity parametry uvedené v tabulce 21.

Tabulka 21: Hodnoty původní konstrukce

Vnitřní přetlak: p_1	Vnější atmosférický tlak: p_2	Vnitřní poloměr: r_1	Vnější poloměr: r_2
100 MPa	0,101325 MPa	0,75 mm	4,675 mm

Po úpravě vzorce platí:

$$\sigma_D \geq \frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]} \Rightarrow \sigma_{D1} \geq \frac{2 \cdot (100 - 0,101325)}{\left[1 - \left(\frac{0,75}{4,675} \right)^2 \right]} = 205,075 \text{ MPa} \quad (2)$$

Při změně konstrukce bude v délce 90 mm průměr díry 3,5 mm. V této vzdálenosti je vnější průměr 10,1 mm s tolerancí h7. Minimální průměr trysky tedy může být 10,082 mm. Pro výpočet byly využity hodnoty uvedené v tabulce níže.

Tabulka 22: Hodnoty upravené konstrukce

Vnitřní přetlak: p_1	Vnější atmosférický tlak: p_2	Vnitřní poloměr: r_1	Vnější poloměr: r_2
100 MPa	0,101325 MPa	1,75 mm	5,041 mm

$$\sigma_D \geq \frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]} \Rightarrow \sigma_{D1} \geq \frac{2 \cdot (100 - 0,101325)}{\left[1 - \left(\frac{1,75}{5,041} \right)^2 \right]} = 227,176 \text{ MPa} \quad (3)$$

Dovolené napětí udává poměr meze kluzu vůči zvolené míře bezpečnosti návrhu a je definováno vztahem: $\sigma_D = \frac{\sigma_K}{k}$ (4)

Díky vypočteným dovoleným napětím je možné určit míru bezpečnosti pro vybraný materiál a typ konstrukce. Pro původní materiál (rychlořeznou ocel 19 830) je mez kluzu $\sigma_K = 3250$ MPa. Pro maraging ocel grade 300 je hodnota meze kluzu $\sigma_K = 1800$ MPa.

Hodnoty míry bezpečnosti vychází:

$$k_1 = \frac{\sigma_{K \text{ Marag.}}}{\sigma_{D1}} = \frac{1800}{205,075} = 8,78 \text{ pro původní konstrukci} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{\sigma_{K \text{ Marag.}}}{\sigma_{D2}} = \frac{1800}{227,176} = 7,92 \text{ pro upravenou konstrukci} \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{\sigma_{K \text{ HSS}}}{\sigma_{D1}} = \frac{3250}{205,075} = 15,85 \text{ pro původní konstrukci} \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{\sigma_{K \text{ HSS}}}{\sigma_{D2}} = \frac{3250}{227,176} = 14,31 \text{ pro upravenou konstrukci} \quad (8)$$

Z vypočtených hodnot vyplývá, že při využití nového materiálu a nové konstrukce se hodnoty míry bezpečnosti sníží, avšak stále dosahují dostatečných hodnot, proto je možné provést tyto změny konstrukce a materiálu.

9. Návrhy postupu

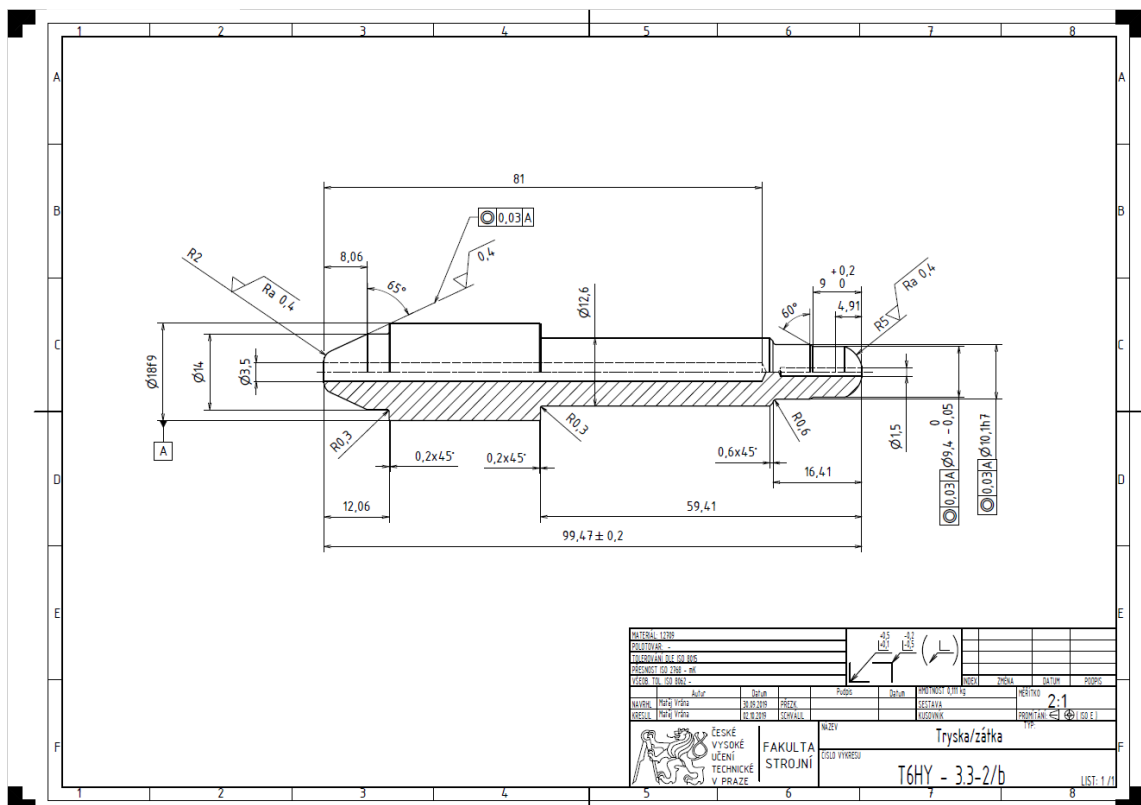
Po upravení výkresu a návržení materiálu vhodného pro výrobu zadané trysky byla práce zaměřena na způsoby možné výroby součásti. Zde bude navržen rámcový postup pro nejlepší způsob výroby trysky.

9.1. Současný postup

V současné době se tryska vyrábí tak, že se nejprve z polotovaru ohrubuje přibližný tvar. Následně se takto obrobená součást zakalí pomocí vakuového kalení. Tento proces je časově a ekonomicky náročný. Poté se zakalená součást obrobí na požadované rozměry. Posledním krokem je vyjiskřování díry o průměru 1,5 mm. I tento proces je časově náročný, proto by bylo vhodné ho nahradit jiným procesem.

9.2. Postup se změnou velikosti díry

Na základě analýzy výkresové dokumentace a následném návržení úpravy byl vytvořen výkres viz obrázek níže.



Obrázek 40: Výkres upravené součásti

V tomto případě je díra zvětšena na průměr 3,5 mm. Znovu by zde došlo k hrubování přibližného tvaru součásti, vakuovému zakalení a následnému obrobení všech ploch. Dále by došlo k vrtání děr o průměru 3,5 a 1,6 mm. Zde by však bylo velmi náročné zvolit vhodné materiály, protože se stále jedná o díru s délkou přibližně 25,5D. Z tohoto důvodu by bylo vhodné použít jiný materiál.

9.3. Postup se změnou materiálu

Další variantou je změna materiálu. Jako nejvhodnější materiál byla zvolena ocel 1.2709. Stejně jako v předchozím případě se použije upravená součást kvůli snazší výrobě. Při použití této oceli se celá součást obrobí najednou. Díra o průměru 3,5 mm bude vyrobena pomocí vrtáku vybraného v předchozích kapitolách. Nejprve však dojde k vytvoření naváděcí části pomocí karbidového vrtáku. Poté dojde k vytvoření díry o průměru 1,5 mm, která bude vyrobena pomocí navrtávu a vrtáku ze slinutého karbidu. Následně se obrobená součást zahřeje na přibližně 480 °C pro zvýšení tvrdosti. Tento způsob je ekonomicky výhodnější, protože proces je možné provést v obyčejné peci a není pro něj potřeba speciálních zařízení. V posledním kroku dojde k zaleštění funkčních ploch.

Z těchto variant nejlépe vychází metoda se změnou materiálu. Hlavní výhodou je snížení celkových nákladů. Ačkoli se zvětší náklady za materiál, sníží se náklady za tepelné zpracování a složitý a časově náročný postup při výrobě díry.

10. Výběr strojů

K výrobě prototypové sady trysek došlo pomocí technologií CNC soustružení, hloubkového vrtání a tepelného zpracování v komorové peci bez ochranné atmosféry z důvodu zjednodušení výroby. V stávajícím případě bylo nutné využití externích firem pro tepelné zpracování. K výrobě byly využity následující výrobní zařízení

10.1. CNC Soustruh OKUMA GENOS L200 E-M

Jedná se o univerzální CNC soustruh se šikmým ložem se čtyřmi řízenými osami (X, Y, Z a C), s poháněnými nástroji a koníkem. Součástí stroje je vodorovná revolverová hlava s 12 pozicemi. Stroj využívá řídicího systému OSP-P200LA-R. Upínání je možné pomocí hydraulického sklíčidla, případně pomocí hydraulicky ovládaného kleštinového upínače. Upínání do revolverové hlavy je zajištěno pomocí rozhraní VDI30. Stroj je vybaven střednětlakým chladicím systémem s vnějším i vnitřním výstupem pro každou pozici. Odměrování nástrojů je zajištěno pomocí nástrojového oka Renishaw. Průřez nožových držáků může být maximálně 20x20 mm. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 23. [31]

Tabulka 23: Parametry OKUMA L200E-M [31]

Max. otáčky vřetene:	4500 ot/min
Max. obráběný průměr:	205 mm
Pojezdy X, Y, Z:	165 x 80 x 400 mm
Počet nástrojů:	12
Max. otáčky hnaného nástroje:	6000 ot/min
Výkon vřetene:	11 kW
Výkon revolverové hlavy:	4 kW

Fotka použitého soustruhu je zobrazena níže.



Obrázek 41: OKUMA L200E-M

10.2. CNC 5osá FRÉZKA OKUMA MU 400 II

Jedná se o 5osou vertikální frézku, která byla do procesu zařazena z důvodu potřeby realizace hloubkového vrtání, které by bylo na soustruhu velmi komplikované a mohlo by vést ke zničení speciálních nástrojů. Stroj je osazen řetězovým zásobníkem nástrojů ATC. Na vřetení, s maximálním počtem otáček 15 000 ot/min, se nachází rozhraní HSK 63 A. K zaměření dílu dochází pomocí Dotykové sondy Renishaw OMP60. Frézka je vybavena vysokotlakým chlazením s dvojitou filtrací a maximálním tlakem 30 bar. Použitím vhodných upínačů je možné využít chlazení nástroje středem vřetene TSC. Řízení stroje je zajištěno pomocí systému OSP P-300MA-H. Jak již bylo zmíněno, tento stroj bude využit pro hloubkové vrtání. Z tohoto důvodu jsou výkonové charakteristiky vedlejší. Toto vrtání by bylo možné realizovat na jakémkoliv zařízení s vnitřním chlazením a dostatečně vysokými otáčkami. [32]



Obrázek 42: OKUMA MU-400V II

10.3. Komorová pec NARBETHERM

Jedná se o komorovou pec s řízeným, plně programovatelným ohřevem. Chlazení pece není možné naprogramovat, a proto je rychlost chladnutí závislá na pecní setrvačnosti. Pokud by bylo potřeba provádět vysokoteplotní zpracování, je možné do pece umístit přetlakovou kovovou retortu s přívodem argonu. Pro vytvrzování trysek bylo nutné pec opatřit přípravkem, aby ohřev neprobíhal v těsné blízkosti vynutí a aby součásti nebyly v kontaktu s šamotovou vyzdívkou pece. [33]



Obrázek 43: Komorová pec NARBETHERM

11. Výroba prototypové sady

Po úpravě výkresu a výběru nového materiálu došlo k vyrobení prototypové sady, která se vyráběla na strojích uvedených v kapitole 10.

11.1. Volba polotovaru

Při volbě polotovaru bylo nutné vzít v úvahu způsob upínání. V tomto případě bylo možné upnout trysku do sklíčidla nebo do kleštiny. Trysku je nutné soustružit ze dvou stran, proto není nutné k délce polotovaru přidávat přídavky na upínání.

Vhodným polotovarem je přířez o průměru 20 mm a délce 103 mm. Maraging ocel je možné získat pouze ve stavu tažení za studena s následným vakuovým rozpouštěcím žiháním. Kvůli tomuto zpracování nelze pořídit tyč delší než 2000 mm. Z tohoto důvodu je nutné s tím počítat při výpočtu polotovaru. Tolerance prodávané maraging oceli jsou IT 11 a IT 12. Při upnutí do kleštiny je vhodné zbavit polotovar otřepů.

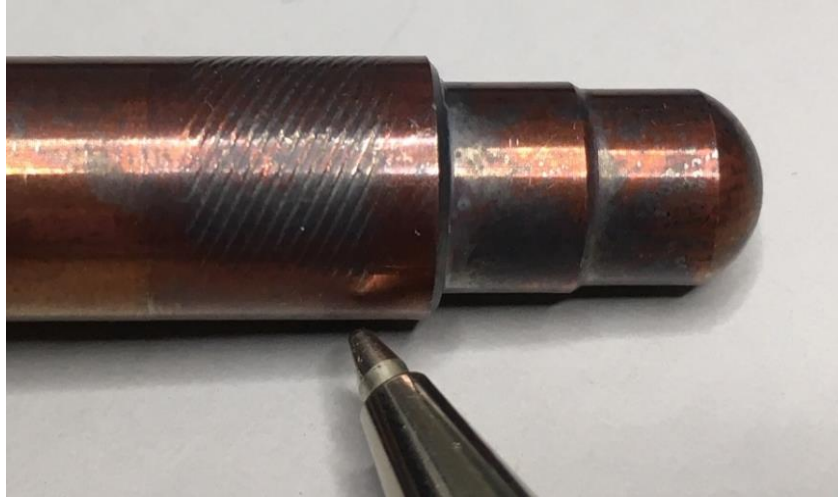
11.2. Volba upnutí obrobku

Volba upnutí obrobku výrazně ovlivňuje proces obrábění a velkou měrou rozhoduje o úspěšnosti obrábění. Hlavní parametry, které ovlivňuje, jsou přesnost a geometrické specifikace dílu. Při použití stejných řezných podmínek a nástrojů je možné sledovat rozdílné trvanlivosti nástrojů a různé vlastnosti povrchu obráběné součásti. V případě upnutí do sklíčidla a obrábění s přeupnutím by bylo nemožné dosáhnout požadovaných drsností povrchu a sousostí, proto bylo nutné tuto variantu vyloučit. Následně byly vytvořeny dvě kombinace možného upnutí.

- 1. operace – strana koule upnuta ve sklíčidle s tvrdými čelistmi
- 2. operace – strana kužele upnuta v měkkých osazených čelistech

- 1. operace – strana koule upnuta v kleštině \varnothing 20–21 mm
- 2. operace – strana kužele upnuta v kleštině \varnothing 12-13 mm

Během obrábění docházelo ke vzniku vibrací, z tohoto důvodu bylo vhodnější provádět první operaci v kleštině. Při upnutí ve sklíčidle docházelo k problémům s udržením přesnosti na větším vyložení obrobku na průměru 12,6 mm. Vliv vibrací na kvalitu povrchu je možné vidět na obrázku 44.



Obrázek 44: Vliv vibrací na kvalitu povrchu součásti

Dalším důvodem pro výběr upnutí do kleštiny je její schopnost rovnoměrného upnutí po obvodu a nutnost využití kleštiny v druhé operaci. Důležitým korpem bylo vyrovnání kleštinového upínače viz obrázek 45.



Obrázek 45: Centrování kleštinového upínače

Po vycentrování došlo k vložení kleštiny do upínače a následnému zajištění pomocí jisticího kroužku viz obrázek 46.



Obrázek 46: Sestavení a zajištění kleštiny v upínači

11.3. Volba nástrojů pro soustružení

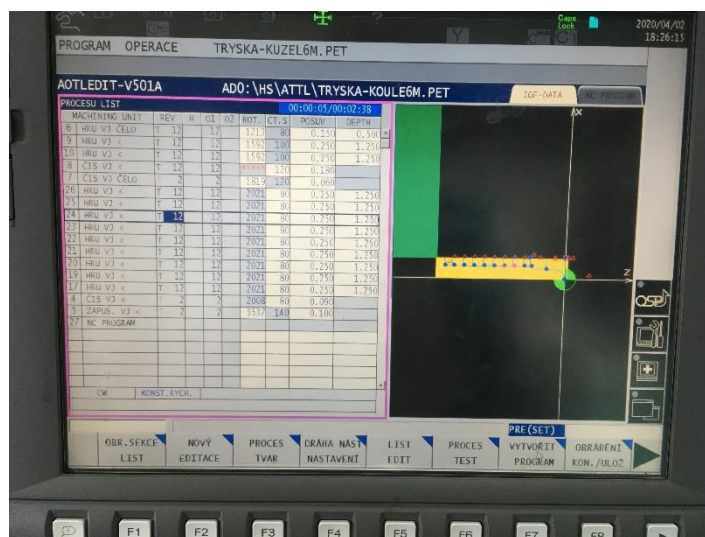
Pro soustružení trysky byly použity dva nástroje. Jeden na hrubování a druhý na dokončení. Pro hrubování byl použit nůž typu W: SECO MWLNR2020K08 – N s destičkou WNMG080408 – utvařec MF4, Sorta karbidu TM4000. Pro dokončení byl použit nůž typu V: PRAMET SVJBL2020-K16 s destičkou VBMT160404 – utvařec FM, sorta karbidu T8330.

Největším problémem při obrábění maraging oceli bylo utváření souvislé zpevněné třísky. Z tohoto důvodu bylo nutné opatřit nástroje přidavnými měděnými trubičkami (viz obrázek 47), které kromě chlazení čela nástroje pomáhaly také k usměrnění odcházející třísky. Bez tohoto opatření by mohlo dojít k obtočení třísky kolem nože a případně ke křehkému lomu destičky kvůli nárazu třísky do destičky.



Obrázek 47: Dokončovací nůž opatřen přidavnou měděnou trubičkou

Díků tomuto opatření došlo k odbourání tohoto problému při dokončování. Při hrubování tento problém stále přetrvával. Při soustružení za využití dílenského režimu programování se podařilo problém vyřešit rozdělením kontury do přibližně 20 segmentů (drah) viz obrázky níže. Po každém dokončení dráhy došlo k zastavení posuvu, čímž došlo k oddělení třísky. Při využití programování pomocí CAM softwarů je možné u podélných hrubovacích cyklů využít funkce zvané „pecking“. Pro tuto aplikaci je ideální volit „peck inkrement“ po 1 až 2 mm.



Obrázek 48: Příklad programu vytvořeného dílenským programováním

11.4. Volba řezných podmínek

Z důvodu nízké teplotní vodivosti ($20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) bylo nutné snížit řezné rychlosti. I u ostatních řezných podmínek došlo k redukci hodnot doporučených výrobcem. Ačkoliv došlo k redukci řezných podmínek, je nutné počítat s výraznou redukcí trvanlivosti nástrojů. Ve srovnání s obráběním HSS trysek je z objemového hlediska trvanlivost 40%. Hodnoty uvedené v tabulce 24 platí pro neopotřebovanou destičku s intenzivním chlazením. Tyto hodnoty nejsou plně přenositelné, protože jsou závislé na tuhosti dané soustavy.

Tabulka 24: Řezné podmínky soustružení

	v_c [m/min]	a_p [mm]	f [mm/ot]
Hrubování podélné	100	1,25	0,250
Na čisto podélné	120	0,25	0,060
Hrubování čelo	80	0,50	0,150
Na čisto čelo	100	0,20	0,050

11.5. Rámcový výrobní postup

Pro výrobu prototypové sady byla tryska programována dílenským dialogovým rozhraním řídicího systému OKUMA OSP. Pro lepší možnost vizualizace a zjištění možností CAM softwaru byl vytvořen program také v softwaru Fusion 360. V první operaci vždy dochází nejprve k obrobení stany koule, protože po přeupnutí je axiální poloha obrobku určena vzniklým čelem na přechodu průměrů 12,6/18f9.

Sekvence operačních úseků 1. operace – strana koule:

1. Upnutí do kleštiny \varnothing 20-21 s vysunutím 65 mm
2. Zarovnání čela
3. Hrubování průměru 9,4 mm, 10,1 mm a kulové plochy podélnými hrubovacími cykly do vzdálenosti 18 mm od čela
4. Obrobení hrubované kontury na čisto
5. Hrubování průměru 12,6 mm, čela a sražení
6. Obrobení průměru 12,6 mm, čela a sražení na čisto, vyjetí pod úhlem
7. Vyjmutí součásti a osušení stlačeným vzduchem

Sekvence operačních úseků 2. operace – strana kuželu:

1. Upnutí do kleštiny \varnothing 12-13, opření o obrobené čelo
2. Obrobení čela na čisto
3. Hrubování kontury do vzdálenosti 41 mm podélnými hrubovacími cykly (dle možností kleštiny, osazení čelistí).
4. Soustružení kontury do vzdálenosti 41 mm na čisto
5. Vyjmutí součásti a osušení stlačeným vzduchem

11.5.1. Ručně psaný program

Pro porovnání ručně psaného programu a jeho možností byl napsán NC kód, který byl následně ověřen v programu Mikronex. Průběh simulace je zobrazen na obrázcích 49 až 59.

Výhodou ručně psaného programu je jeho jednoduchost. Ve srovnání s CAM softwarem však schází možnost tzv peckingu, která je pro tuto aplikaci velmi potřebná. Pecking je řízené dělení třísky při podélném cyklu. Stroj provede jednu otáčku bez

posuvu, čímž dojde k rozdělení třísky. Z tohoto důvodu je výhodnější využít pro tvorbu NC programu CAM software.

Pro výrobu trysky byly použity následující cykly:

G0 – Rychlé polohování. Jedná se o pohyb po přímce maximální rychlostí stroje. K pohybu může docházet v jedné nebo dvou osách. Při absolutním zápisu se zadávají konečné souřadnice pohybu. V případě přírůstkového zadávání se zapisují vzdálenosti, o které se má nástroj v ose posunout. [34]

G1 – Lineární interpolace. Jedná se o základní pohybovou funkci, která je určena pro obrábění. Nástroj se pohybuje po přímce jako v případě rychlého polohování. V tomto případě je však rychlost volitelná a je zadána adresou posuvu F. K pohybu může docházet v obou osách zároveň. [34]

G2 – Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček. Jedná se o funkci, kdy dochází k pohybu nástroje v obou souřadných osách zároveň. Výsledná dráha tohoto pohybu leží na kružnici. I tuto funkci je možné zapisovat absolutně nebo přírůstkově. Pro úplný zápis je potřeba kromě souřadnic X a Y zapsat také adresu R, která udává poloměr kružnice. [34]

G3 – Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček. Jedná se v podstatě o stejnou funkci jako G2. Jediným rozdílem je směr pohybu nástroje, který je v tomto případě proti směru hodinových ručiček. [34]

G61 – Hrubování kuželové plochy. Jedná se o funkci sloužící k hrubování kuželové plochy po stupních, které jsou rovnoběžné s osou rotace. Rozměry kužele jsou dány malým průměrem kužele zadaným adresou X a velkým průměrem zadaným polohou nástroje při spuštění cyklu. Tloušťka třísky je určena adresou U. [34]

G63 – Hrubování radiusu vypuklého. Jedná se o funkci k hrubování vnějšího čtvrtkruhu. Tuto funkci lze použít pouze pro kompletní čtvrtkruh. Cyklus je určen adresami X a Z, které definují polohu čtvrtkruhu s osou v místě výchozí polohy nástroje. V případě špatného zápisu adres, systém vypíše chybové hlášení. [34]

G64 – Podélný hrubovací cyklus. Tato funkce slouží k rychlému programování úběru většího přídavku materiálu na válcové ploše. Cyklus je určen adresami X a Z, kam se zapisuje nejvzdálenější poloha vybrání. Tloušťka třísky jednoho průchodu je určena adresou U. [34]

G68 – Čelní hrubovací cyklus. Tato funkce slouží k odebrání přídatku na čele součásti po jednotlivých třískách. Tloušťka třísky je určena adresou W. [34]

G95 – Posuv na otáčku. Jedná se o funkci, která přepíná řídicí systém do zadávání posuvů v milimetrech na otáčku. Tento posuv se vypočítává podle skutečných otáček vřetene. [34]

G98 – Najetí do referenčního bodu. Tato funkce slouží k ztotožnění zobrazovaných souřadnic se skutečnou polohou vzhledem k souřadnému systému stroje. Pokud dojde ke ztrátě souřadnic, je nutné toto referování provést. [34]

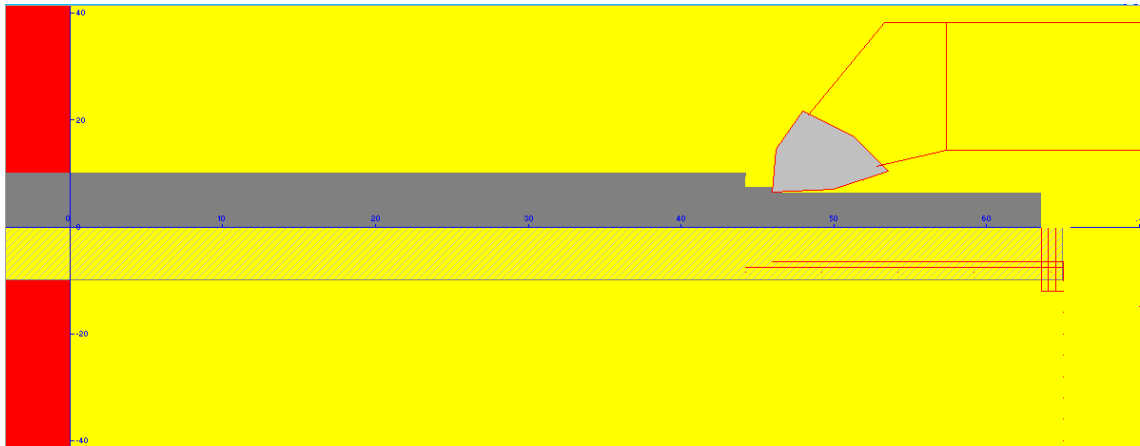
M4 – Start vřetena doleva. Tato funkce slouží ke spuštění otáčení vřetena. Rychlost otáčení vřetena je určeno otáčkami zadanými v adrese S. Platnost této funkce je do zastavení vřetena některou z funkcí nebo do ukončení programu. [34]

M6 – Výměna nástroje. Jedná se o funkci sloužící k výměně nástroje za jiný označený adresou T. Výměna nástroje může probíhat ručně nebo automaticky pomocí otočné revolverové hlavy. [34]

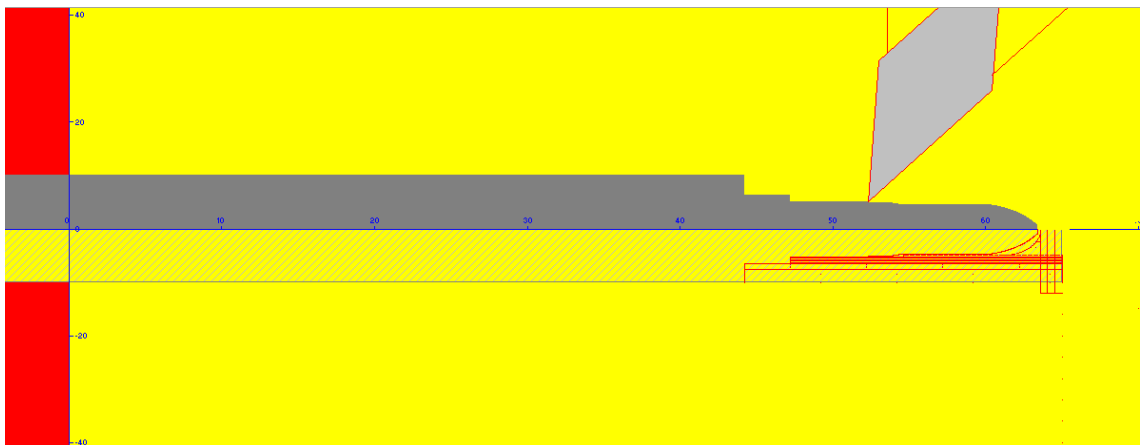
M30 – Konec informace. Jedná se o funkci, která ukončuje hlavní program a vrací řídicí systém na začátek programu a zastavuje pohyb vřetene. [34]



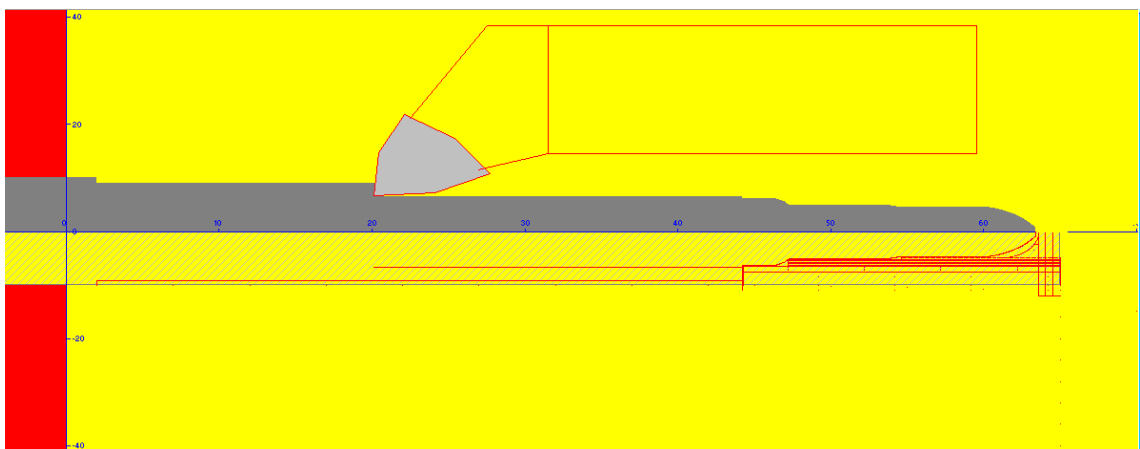
Obrázek 49: Zarovnání čela strany koule



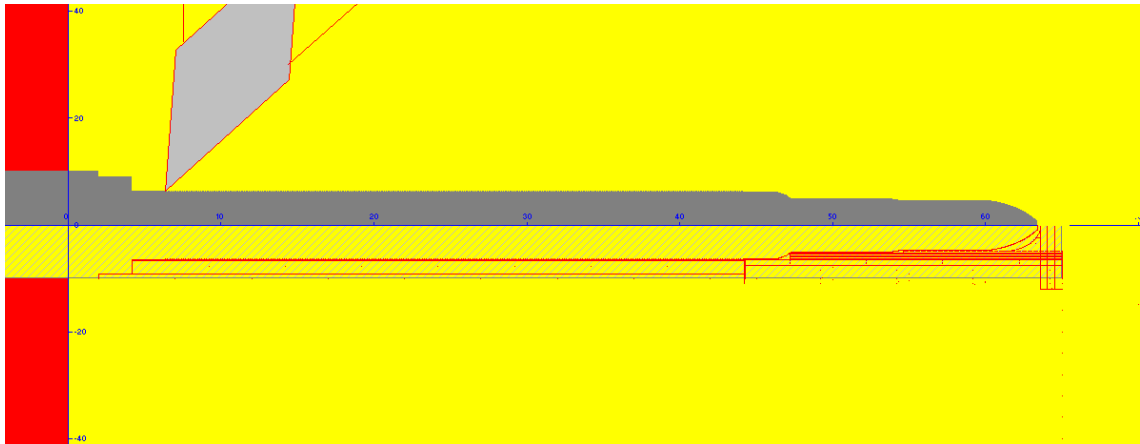
Obrázek 50: Hrubování průměru 10,1 h7



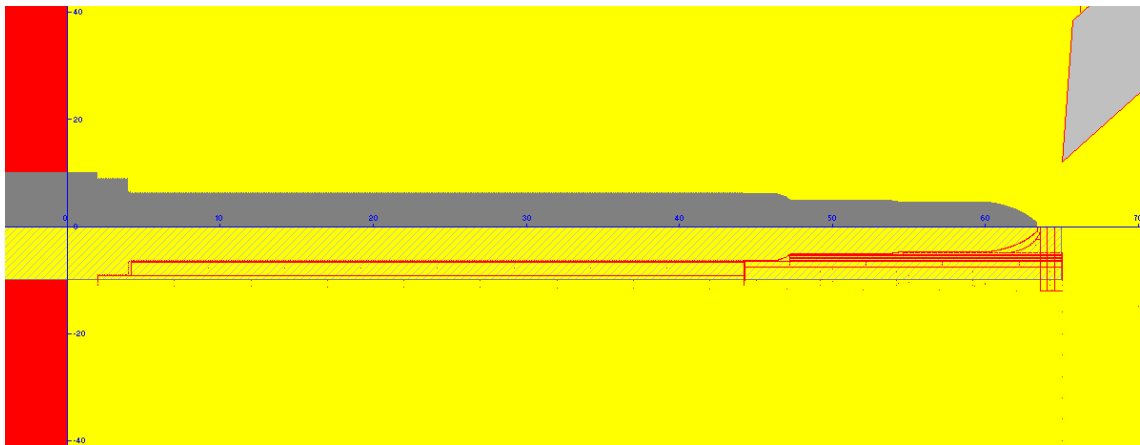
Obrázek 51: Soustružení na čisto kontura 1. část



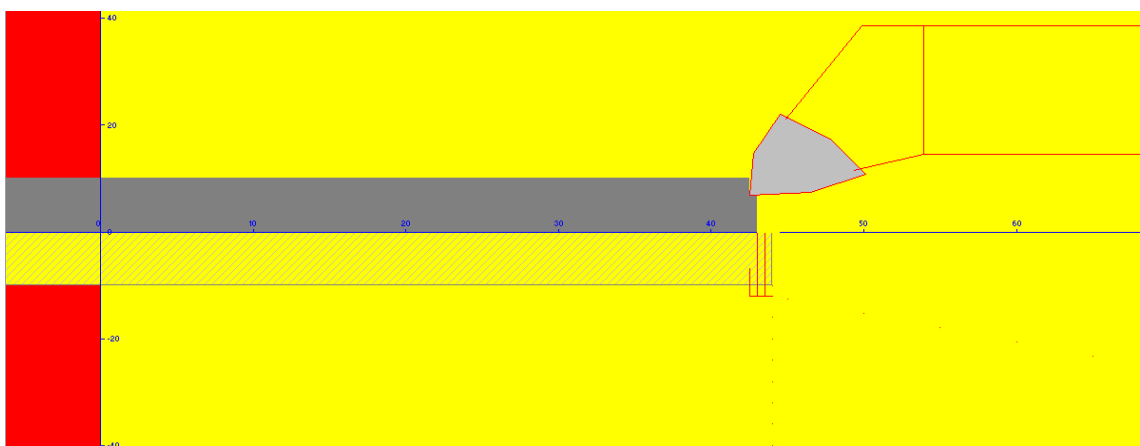
Obrázek 52: Hrubování průměru 12,6 mm



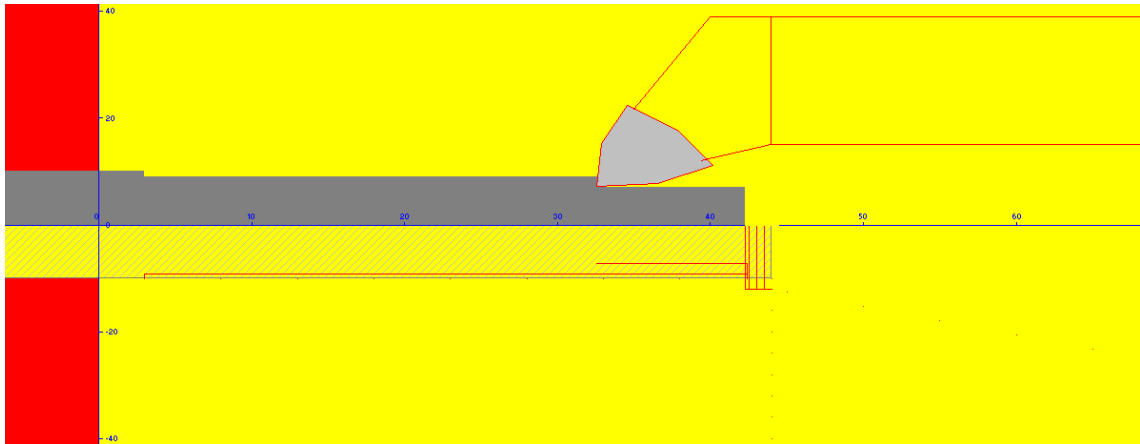
Obrázek 53: Soustružení kontury na čisto 2. část



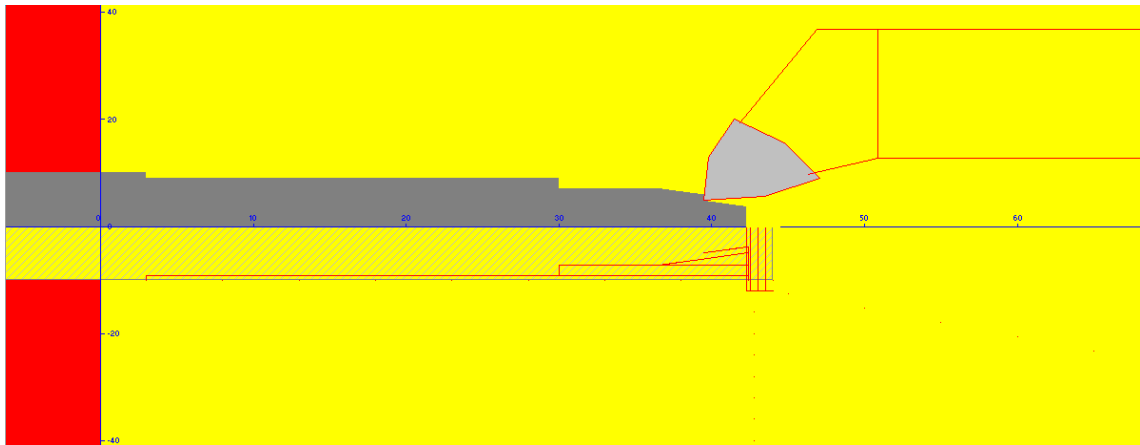
Obrázek 54: Dokončená výroba strany koule



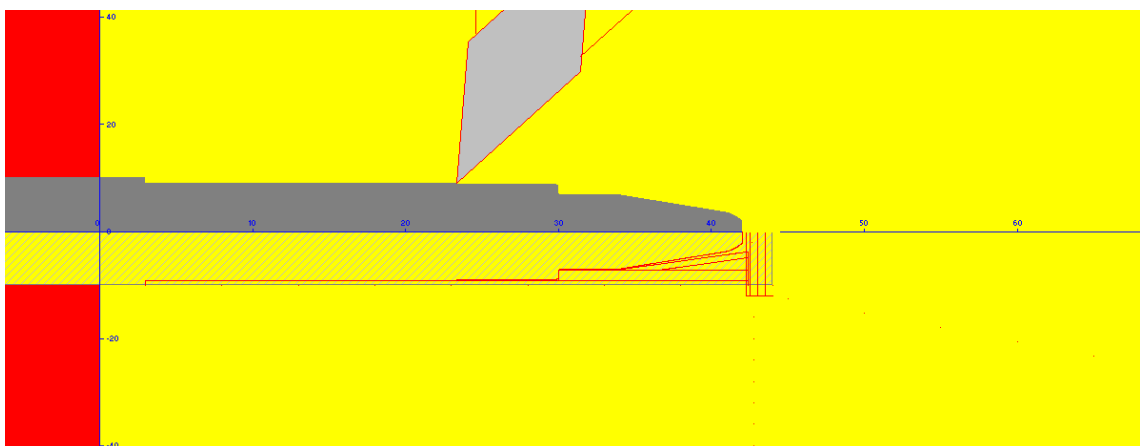
Obrázek 55: Zarovnání čela strany kužele



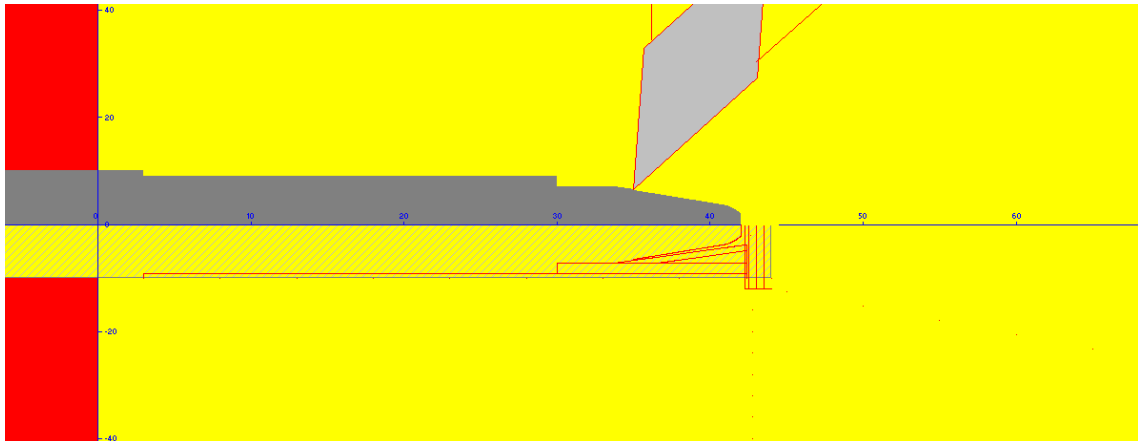
Obrázek 56: Hrubování kontury strany kužele



Obrázek 57: Hrubování kužele



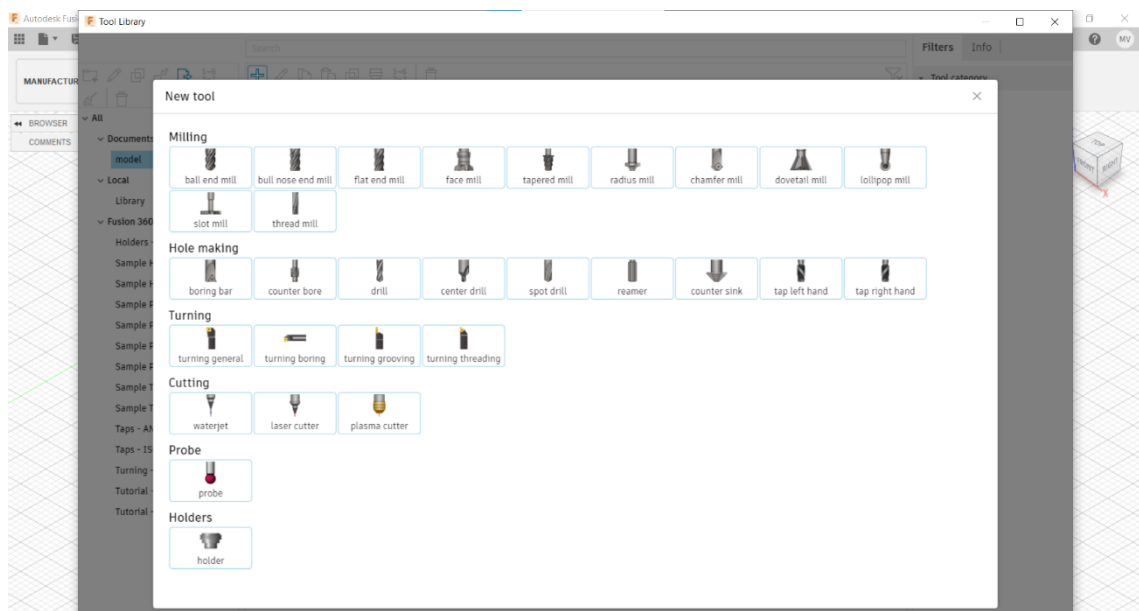
Obrázek 58: Dokončení strany kužele



Obrázek 59: Soustružení kužele na čisto

11.5.2. Strojně psaný program

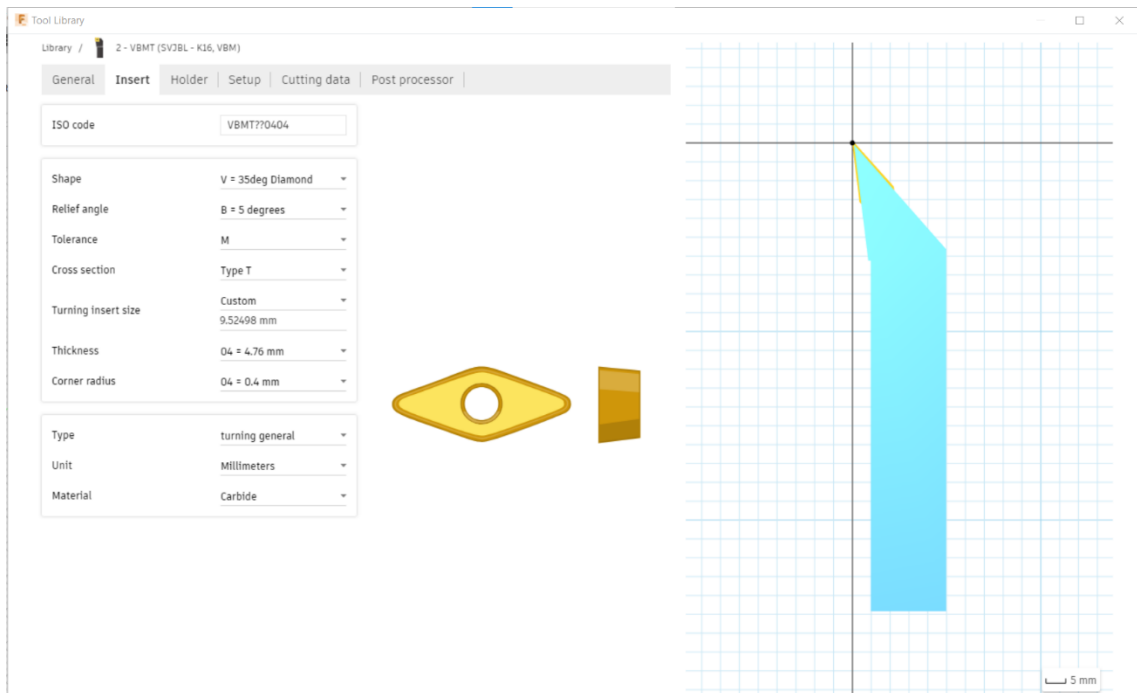
Tvorba NC kódu probíhala v CAM softwaru Fusion 360. Model bylo možné vytvořit v CAD programu nebo ve Fusionu 360. V tomto případě byla zvolena varianta s tvorbou modelu v programu Inventor. Poté, co byl model vytvořen, došlo k nahrání tohoto souboru do programu. Dalším krokem byla tvorba obráběcích nástrojů. Tato možnost se nachází v položce Manage – Tool Library. Zde je možné si vytvořit nový nástroj pomocí tlačítka +. Nejprve dojde k výběru nástroje podle použité technologie viz obrázky níže.



Obrázek 60: Výběr nového nástroje

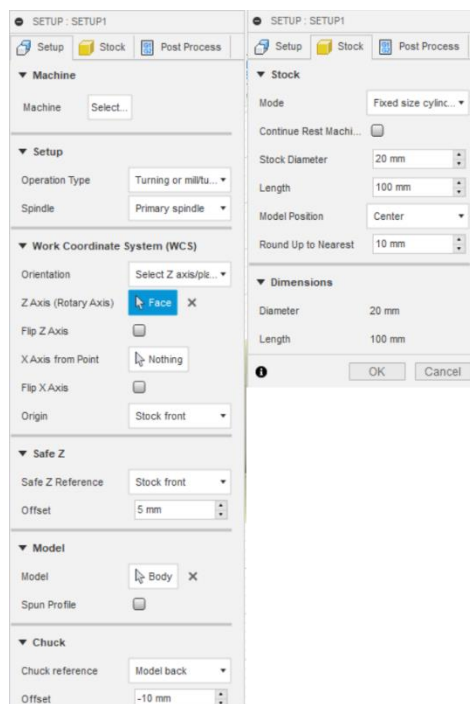
Poté, co byl vybrán nástroj vhodný pro danou operaci, dojde k jeho definování. V této části dojde k přesnému popisu nástroje počínaje jeho popisem, přes definování břitové

destičky a držáku až po výběr postprocesoru. Příklad nastavení břitové destičky je uveden na obrázku 61.



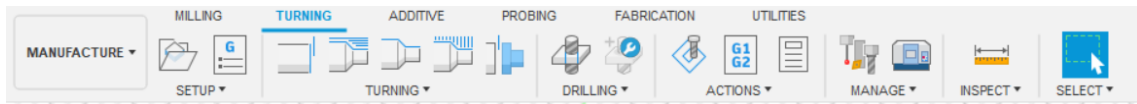
Obrázek 61: Definování parametrů nástroje

Dalším krokem je definování technologie obrábění a volba polotovaru v položce Setup. V části setup se volí technologie obrábění, souřadný systém a bezpečná vzdálenost v ose Z. V části polotovar se volí jeho tvar a velikost. Následně se zde volí i postprocesor. Příklady nastavení jsou zobrazeny níže.



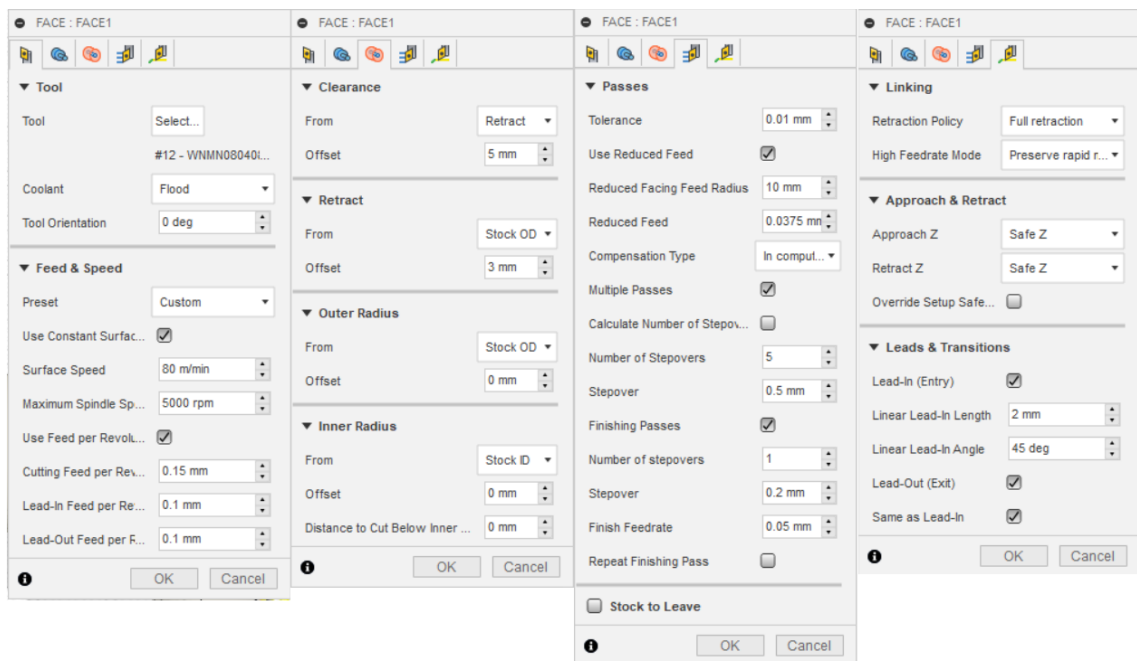
Obrázek 62: Nastavení základních parametrů

Poté, co byly nastaveny základní parametry, může dojít k definování způsobů obrábění. Nejprve dojde k výběru technologie obrábění, v tomto případě soustružení. Následně se vybírá operace, kterou je nutno provést, například hrubování čela, hrubování kontury nebo obrábění kontury na čisto viz obrázek 63.



Obrázek 63: Výběr prováděné operace

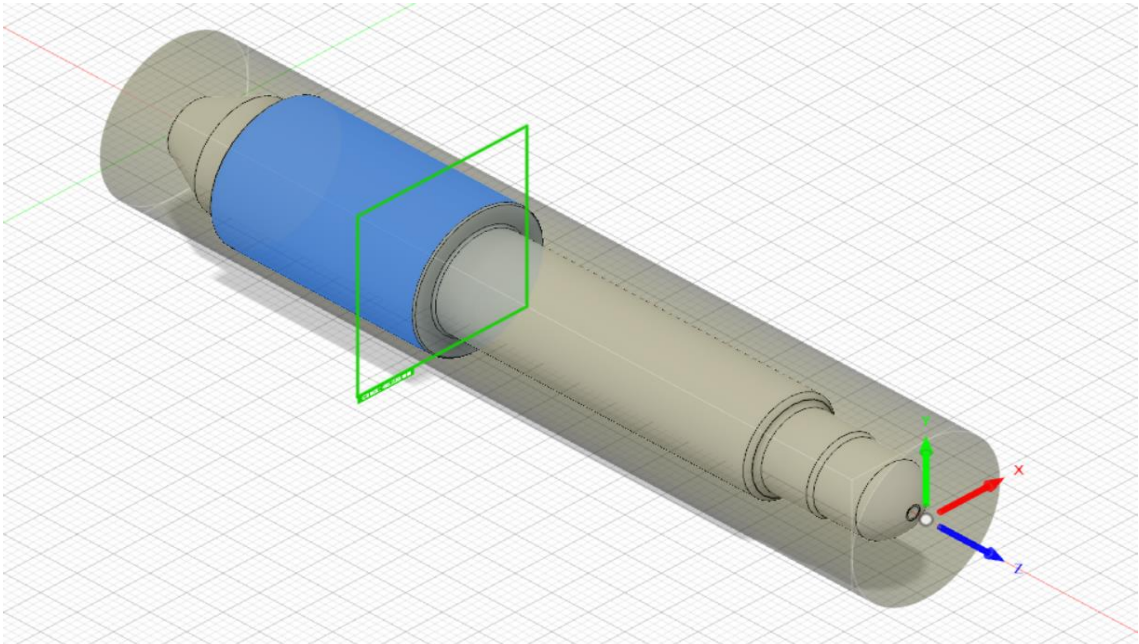
Dalším krokem je nastavení parametrů této operace. Konkrétně zde dochází k výběru nástroje, rezných podmínek, bezpečných zón, velikost přídávku na obrábění, přejetí a pojíždění drah. Příklad tohoto nastavení je možné vidět níže.



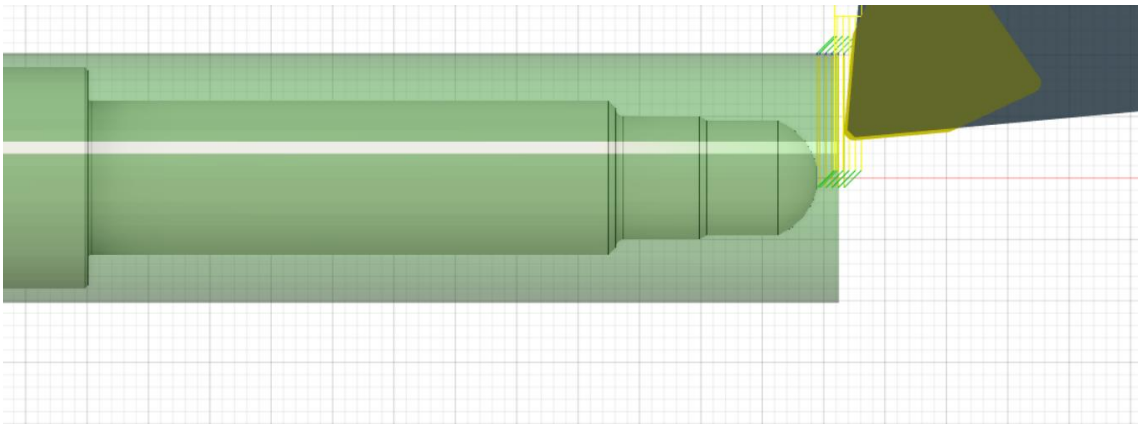
Obrázek 64: Příklad nastavení obrábění

Posledním krokem je simulace a ověření drah nástroje a správného nastavení všech daných parametrů.

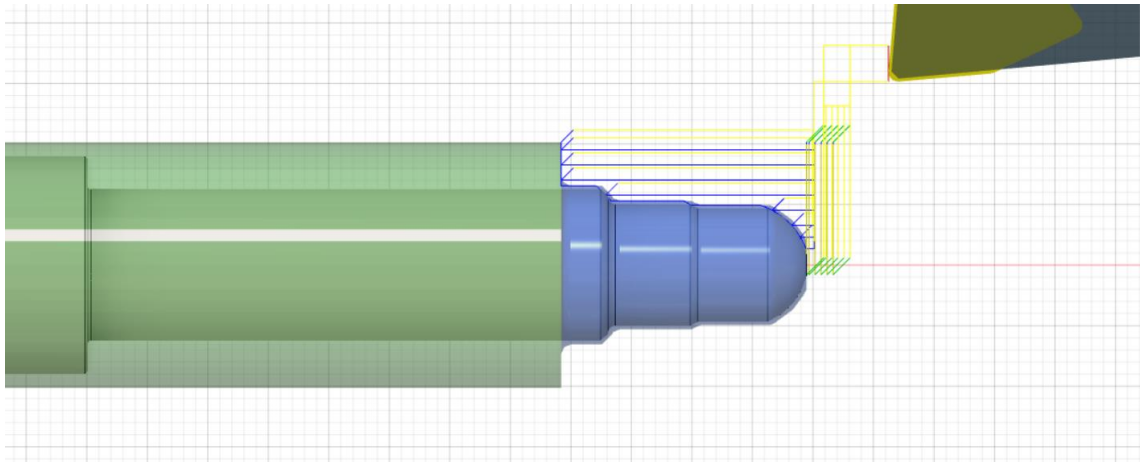
Simulace průběhu obrábění je zobrazena na obrázcích níže. Prvky jsou odlišeny různými barvami, kde polotovár má zelenou a dráhy modrou, žlutou nebo zelenou barvu v závislosti na typu pohybu. Postup obrábění je znázorněn na obrázcích 65 až 74.



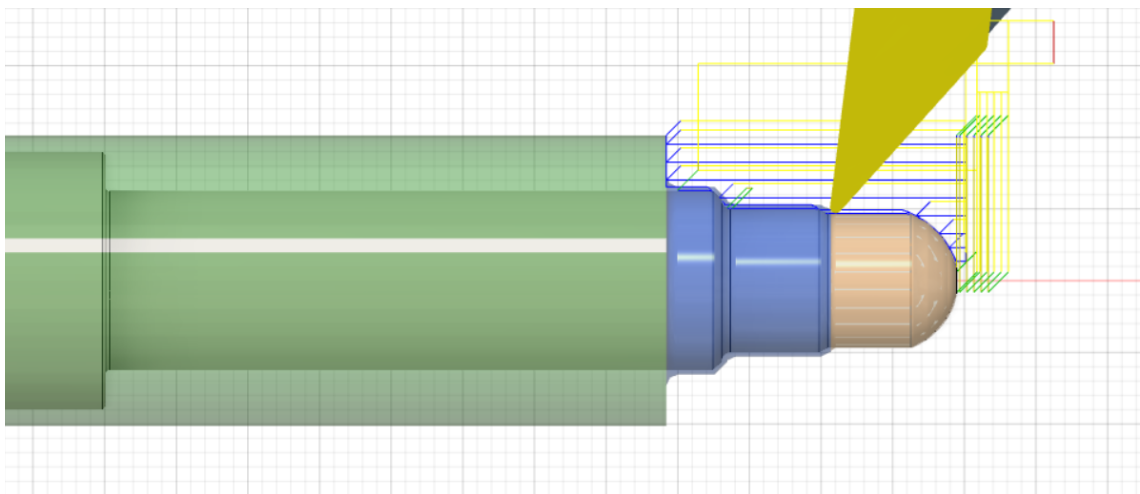
Obrázek 65: Ustavení polotovaru – strana koule



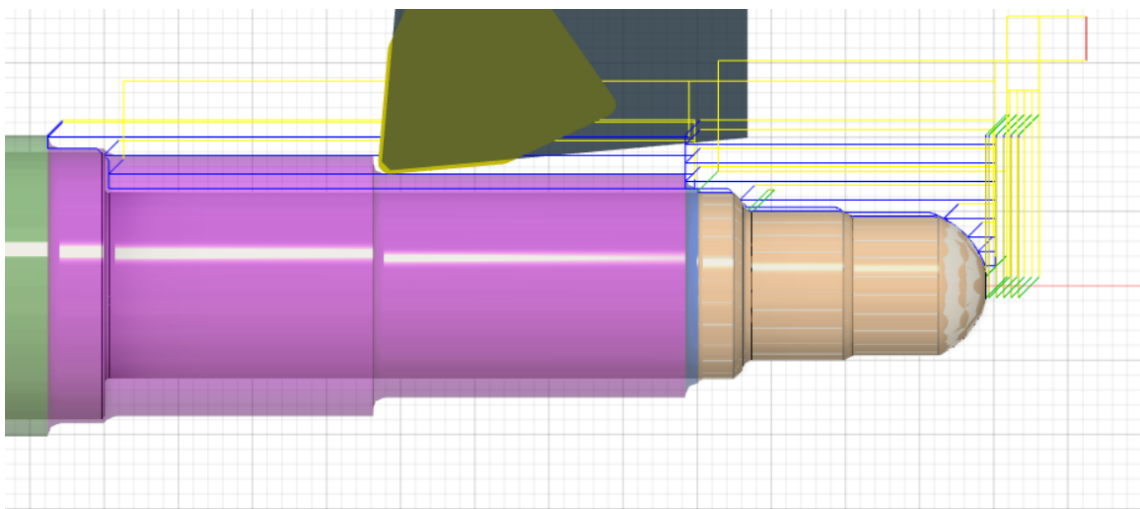
Obrázek 66: Hrubování čela – strana koule



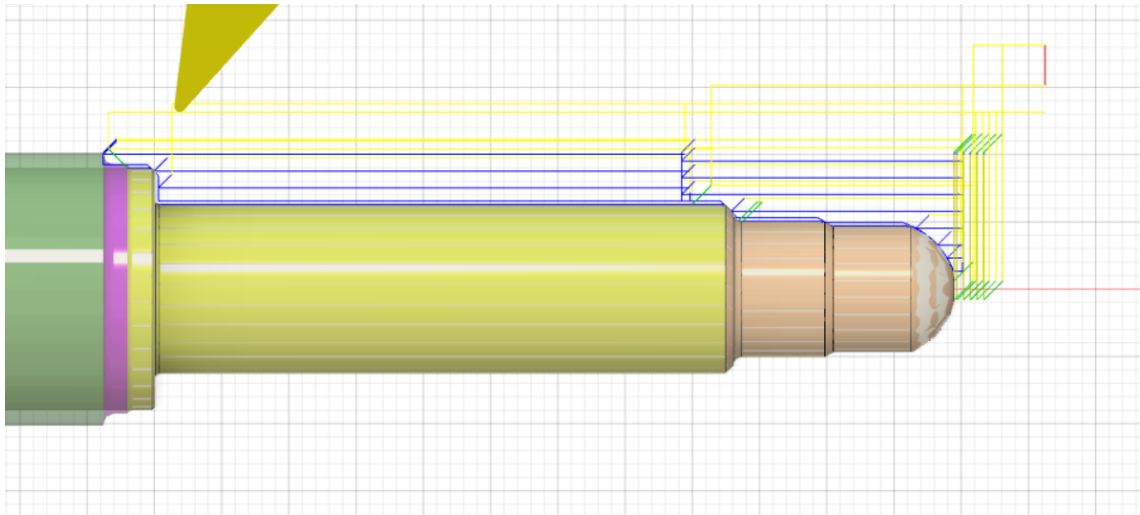
Obrázek 67: Hrubování průměru 10,1h7



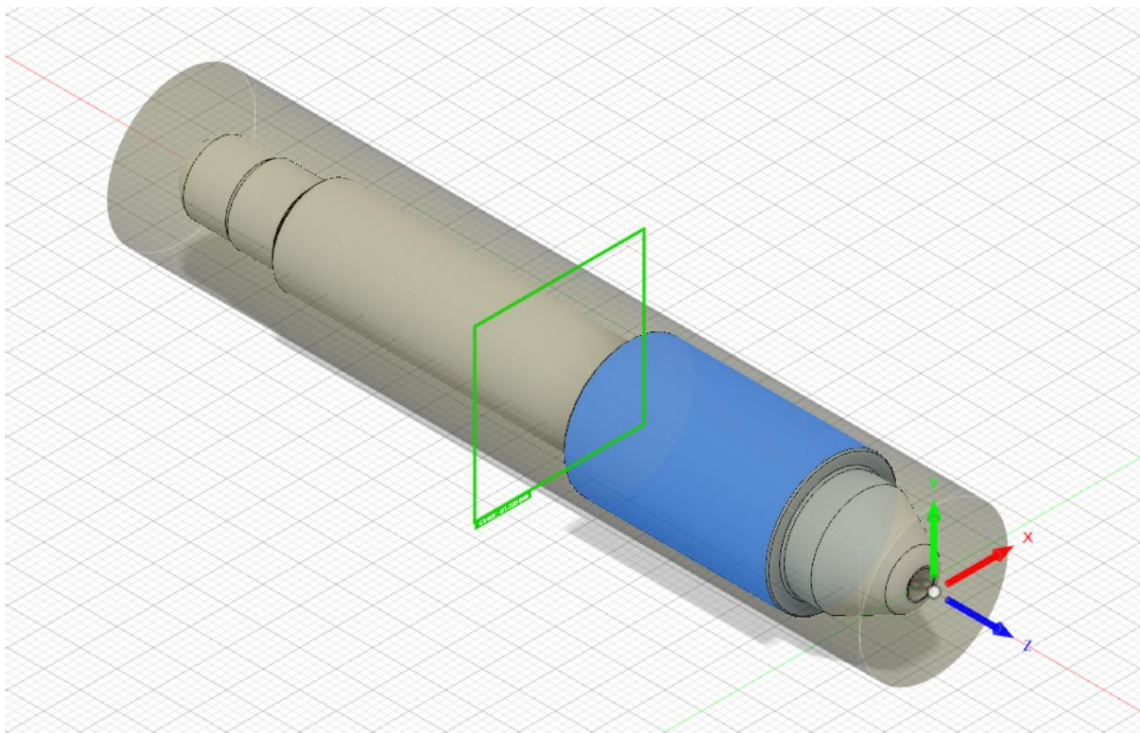
Obrázek 68: Soustružení kontury na čisto – 1. strana koule



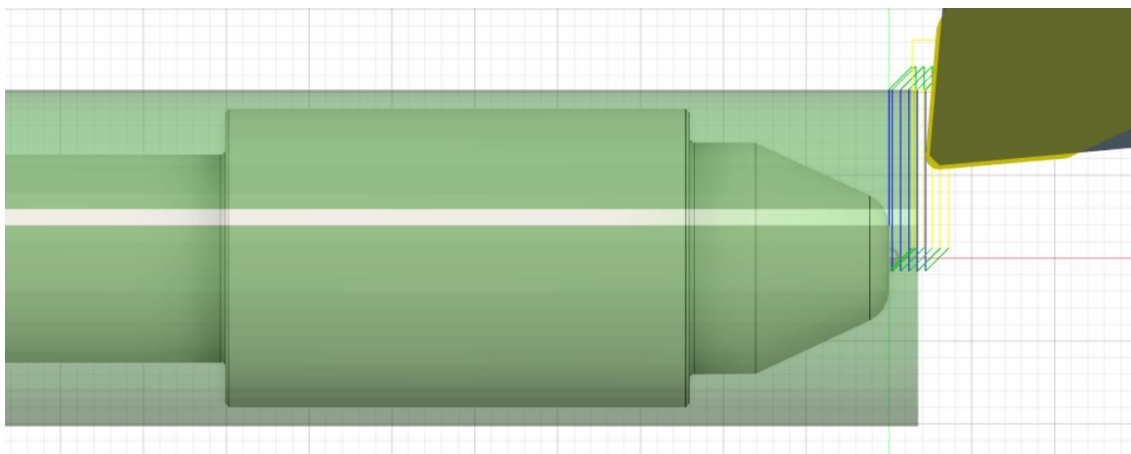
Obrázek 69: Hrubování průměru 12,6 mm



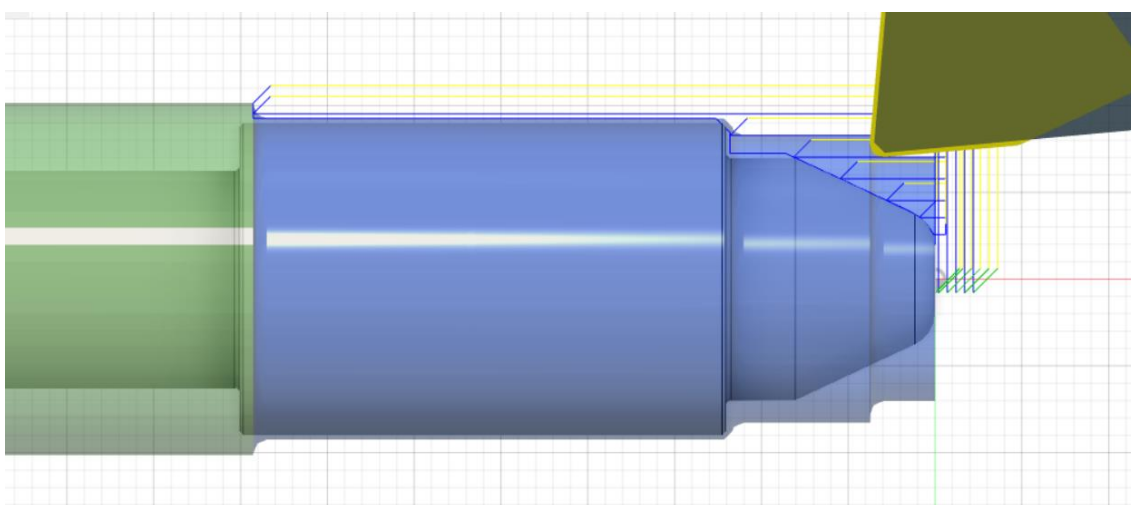
Obrázek 70: Soustružení kontury na čisto – 2. část strana koule



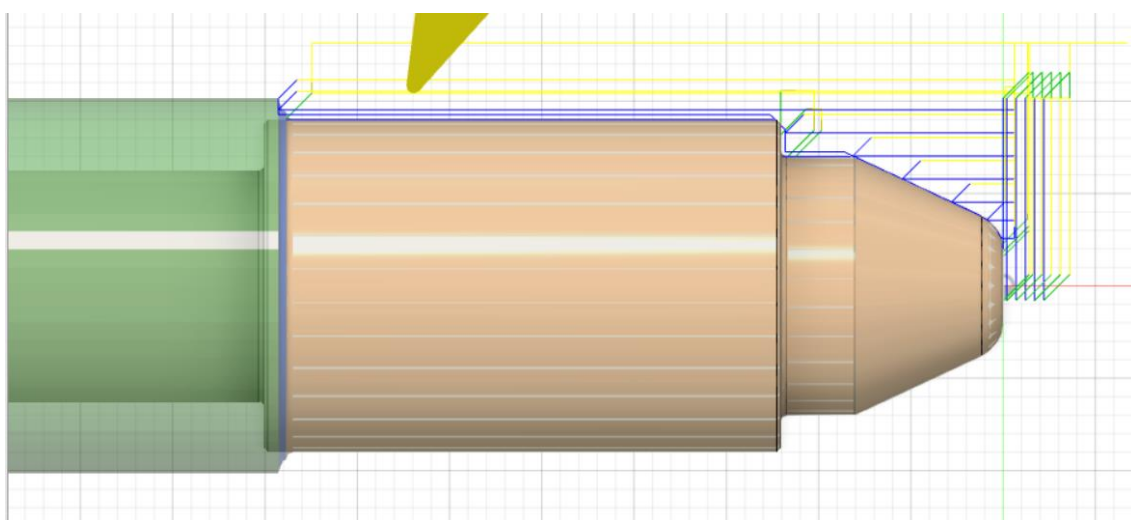
Obrázek 71: Ustavení polotovaru – strana kužele



Obrázek 72: Zarovnání čela – strana kužele



Obrázek 73: Hrubování strany kužele



Obrázek 74: Soustružení kontury na čisto – strana kužele

11.6. Vytvrzení trysek

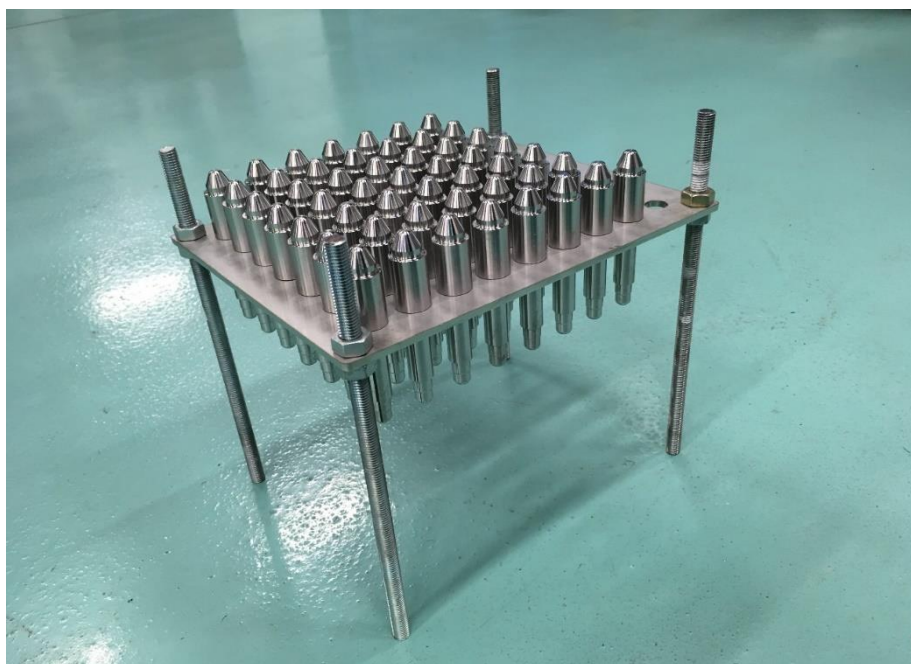
K vytvrzování trysek byla použita pec Narbertherm. Režim vytvrzování probíhal dle následujícího postupu:

1. Ohřev na 485 °C – 90 minut – atmosféra
2. Výdrž na $T = 485$ °C – 270 minut – atmosféra
3. Vyjmutí z pece a chlazení na vzduchu do pokojové teploty

Aby bylo dosaženo celistvého vzhledu, je nutné součásti důkladně dvoustupňově vyprat v rozpouštědle (např. Loctite 7063). Kvůli vysoké citlivosti povrchu na otisky prstů je nutné během manipulace používat rukavice. Po otiscích prstů zůstávají na místech residua potu, které obsahují chlór, což vede k výrazné oxidaci za vysokých teplot.

Jakmile dojde k ukončení výdrže v peci, je nutné díly z pece vyndat, protože pomalý pokles teploty by mohl vést k dalšímu odpevnění.

Během tepelného zpracování nemohou trysky ležet v pecních koších nebo na dně pece, proto bylo nutné zhotovit přípravek pro vertikální polohování trysek, který zamezuje jejich vzájemnému kontaktu. Tento přípravek je zobrazen na obrázku 75.



Obrázek 75: Přípravek pro vytvrzování trysek

11.7. Testování prototypové sady a ekonomické zhodnocení

Během testování bylo zjištěno, že změna průměru trysky na 3,5 mm nesnižuje životnost trysky. U žádné trysky nedošlo k roztržení na dosedacích plochách, ani nedošlo k zalomení na přechodu průměru 12,6 a 18f9, což býval častý problém u původního typu. Zároveň došlo ke snížení hydraulických odporů a snížení potřebných tlaků lisu. K opotřebenosti docházelo pouze na kulové ploše vlivem otlaků a ztrátám těsnosti.

Díky změně výrobní dokumentace a výrobního postupu došlo ke snížení závislosti na velkých výrobních podnicích, které disponují potřebným vybavením pro původní výrobu trysek. Zároveň se snížila průběžná doba výroby, čímž je možné snížit potřebné zásoby. Hlavním faktorem ovlivňujícím průběžnou dobu výroby je nyní dodání materiálu, které může trvat až 3 týdny.

Změnou materiálu dojde ke zvýšení nákladů na výrobu jednoho kusu, avšak také dojde ke zlepšení v oblasti techniky, logistiky a sníží se doba potřebná pro montáž a demontáž trysky, čímž se výrazně sníží spotřeba vedlejšího času obsluhy lisu.

12. Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo optimalizovat způsob výroby trysky pro hydroforming a zvýšit její životnost. Pro správné pochopení procesů, ve kterých se tryska nachází, byl nejprve popsán hydroforming. Dále se práce zabývá NC programováním.

Nejprve proběhla analýza výkresové dokumentace, na jejímž základě byly navrženy konstrukční změny. Největší změnou bylo zvětšení průměru díry z 1,5 mm na 3,5 mm a 1,6 mm. Pro zjednodušení výrobního postupu byl navržen také nový materiál, konkrétně maraging ocel Grade 300. Poté, co byl navržen nový materiál a výrobní postup, došlo k volbě vhodných nástrojů a následné výrobě prototypové sady. Díky změně výroby došlo ke snížení závislosti na výrobních podnicích, které disponují potřebným zařízením pro původní výrobu. Zároveň se snížil čas potřebný pro dodání trysek. Nejproblematictější úsekem je nyní dodání materiálu, které může trvat až 3 týdny.

Změnou konstrukce nedošlo ke snížení životnosti. Během následného testování prototypové sady nedošlo u žádné z trysek k roztržení na dosedacích plochách. Zároveň došlo díky zvětšení průměru díry ke snížení hydraulických odporů a potřebě nižších tlaků lisů. U nového typu trysky nikdy nedošlo k zalomení na přechodu mezi průměry 12,6 a 18,9 mm. K opotřebení docházelo pouze na kulové ploše vlivem otlaků a ztráty těsnosti.

Změnou materiálu dojde ke zvýšení nákladů na výrobu jednoho kusu, avšak dojde ke zlepšení v oblasti techniky, logistiky a snížení množství potřebných zásob a také se zjednoduší montáž a demontáž trysky, čímž se sníží spotřeba vedlejšího času obsluhy linky.

13. Zdroje

- [1] Hydroforming Company Jones Metal Products [online]. Ohio: Jones Metal, 2018 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <http://www.jmpforming.com/>
- [2] Kapalina jako tvářecí medium. MM Spektrum. 2019, 2019(1), 34.
- [3] NIKHARE, Chetan. Pressurization System in Low Pressure Tube Hydroforming. Modeling and Numerical Simulation of Material Science [online]. 2013, 03(03), 71-78 [cit. 2019-11-12]. DOI: 10.4236/mnsms.2013.33009. ISSN 2164-5345. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/mnsms.2013.33009>
- [4] NIKHARE, C., M. WEISS a P.D. HODGSON. FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. Computational Materials Science [online]. 2009, 47(1), 146-152 [cit. 2020-03-08]. DOI: 10.1016/j.commat.2009.06.024. ISSN 09270256. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927025609002808>
- [5] NIKHARE, C., M. WEISS a P.D. HODGSON. Buckling in low pressure tube hydroforming. Journal of Manufacturing Processes [online]. 2017, 28, 1-10 [cit. 2019-11-12]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.05.015. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612517301263>
- [6] Tube Hydroforming Design Flexibility—Part IX:. The tube and pipe journal [online]. Elgin: FMA Communications, Inc, 2020 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/hydroforming/tube-hydroforming-design-flexibility-part-ix>
- [7] COSTIN, Georgiana-Alexandra, Cezarina AFTENI, Ionel IACOB, Viorel PĂUNOIU a Nicușor BAROIU. AN OVERVIEW ON SHEET METAL HYDROFORMING TECHNOLOGIES. THE ANNALS OF “DUNĂREA DE JOS” UNIVERSITY OF GALAȚI FASCICLE V, TECHNOLOGIES IN MACHINE BUILDING, [online]. 2018, , 55-62 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335110722_AN_OVERVIEW_ON_SHEET_METAL_HYDROFORMING_TECHNOLOGIES
- [8] VRABEC, Martin a Jan MÁDL. NC programování v obrábění. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03045-8.

- [9] Obecný úvod do problematiky CNC programování. <https://www.sosbites.cz/> [online]. Velká Bíteš: SOŠ Jana Tiraye Velká Bíteš, 2020 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: https://www.sosbites.cz/images/stories/Pro-studenty/studijni-materialy/VUKOV_TEXT_-_1.ST.pdf
- [10] BRYCHTA, Josef. Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.
- [11] Product Selector 2.0 [online]. Chesterfield: Dormer Tools, c2001-2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <http://selector.dormertools.com/web/eng/en-gb/mm>
- [12] Vrtání D3,5 - délka 92 mm. 2020.
- [13] Master Catalogue 2018. Kennametal [online]. Pittsburgh: Kennametal Inc, 2020 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Kennametal/Master%20Catalog%202018%20Vol.%202%20Rotating%20Tools%20English%20Metricpdf>
- [14] Okuma G73 High Speed Deep Hole Drilling Cycle. HelmanCNC [online]. Helman CNC, © 2012-2016 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <http://www.helmancnc.com/okuma-g73-high-speed-deep-hole-drilling-cycle/>
- [15] 1.3343 / 19 830 / HS6-5-2C / S6-5-2 / M2 / MAX SPECIAL MO 5. Toolsteel [online]. Kladno: ToolSteel.cz, 2019 [cit. 2019-10-02]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-3343-19830-hs6-5-2c-s6-5-2-m2-max-special-mo-5/>
- [16] MACEK, Karel. Kovové materiály. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [17] W. NR. 1.2358. JKZ Bučovice [online]. Bučovice: JKZ Bučovice, a.s. [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobuforem/w-nr-12358/>
- [18] 1.2358. Bolzano [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, s.r.o, 2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/1.2358.pdf
- [19] Böhler W720VMR. Böhler [online]. Linz: Voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o., 2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://www.boehler.cz/media/productdb/downloads/W720DE.pdf>

- [20] W. NR. 1.2080. JKZ Bučovice [online]. Bučovice [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/en/produkty/nastrojove-oceli/pro-prace-za-studena/w-nr-12080/>
- [21] SHA, Wei a Zhanli GUO. Maraging Steels: Modelling of Microstructure, Properties and Applications [online]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009 [cit. 2019-10-26]. ISBN 978-1-84569-693-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9781845696863/maraging-steels>
- [22] JÄGLE, Eric, Zhendong SHENG, Philipp KÜRNSTEINER, Sörn OCYLOK, Andreas WEISHEIT a Dierk RAABE. Comparison of Maraging Steel Micro- and Nanostructure Produced Conventionally and by Laser Additive Manufacturing. Materials [online]. 2017, 10(1) [cit. 2019-10-28]. DOI: 10.3390/ma10010008. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/1/8>
- [23] Böhler V720VMR. Kapfenberg, 2007.
- [24] Böhler W722VMR. Böhler [online]. Linz: Voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o., 2019 [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: <http://bohler.cz/media/productdb/downloads/W722DE.pdf>
- [25] NÁSTROJOVÁ OCEL VACO 180. Bolzano [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, s.r.o., 2020 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/Vaco%20180\(1\).pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/Vaco%20180(1).pdf)
- [26] Cryodur 2709. SCHMOLZ+BICKENBACH s.r.o. [online]. SCHMOLZ+BICKENBACH s.r.o., © 2004-2020 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.schmolz-bickenbach.cz/pdf/GB_Cryodur2709.pdf
- [27] THYRODUR® 2709. <https://www.schmolz-bickenbach.cz/> [online]. SCHMOLZ+BICKENBACH s.r.o., © 2004-2020 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.schmolz-bickenbach.cz/pdf/thyrodur_2709_cz.pdf
- [28] PREMIUM 1.2709 ESU. ABRAMS PREMIUM STEEL [online]. Osnabrueck: Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <http://www.premium-steel.co.uk/images/filedownloads/datasheets/1.2709ESR.pdf>
- [29] Maraging 300 Alloy Steels Material (Vascomax® 300). Magellan Metals [online]. South Norwalk: Magellan Industrial Trading Co., Inc, 2020 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.magellanmetals.com/maraging-c300-vascomax-300>

- [30] Rotačně symetrické úlohy. Tom Mares's webpage [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: http://drone.fsid.cvut.cz/pp2/Rotacne_symetricke.pdf
- [31] GENOS series: GENOS L250/L200-M GENOS L400/L300-M. Bulmak Metal [online]. Sofia: BULMAKMETAL rp. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <http://bulmakmetal.com/wp-content/uploads/2016/10/GENOS-L-E-7a-300Mar2015.pdf>
- [32] Okuma MU-400V II. Misan [online]. Lysá nad Labem: Copyright Misan s.r.o., 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-400v-ii-okuma-mu-400v-ii/?viewpart=1>
- [33] Hardening furnace Nabertherm N 61/H with B400. Artik Studio [online]. Ústí nad Labem: ARTIK STUDIO sro., 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.keramickepece.cz/en/laboratory-chamber-furnaces/993-kalici-pec-nabertherm-n-61-h-s-reg-b400.html>
- [34] Návod SOUSTRUH DOS: Část speciální – MIKROPROG S. Praha. Dostupné také z: <http://www.mikronex.cz/page9.html>
- [35] DRASTÍK, František. Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu. 2. dopl. vyd. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-85780-95-x.

14. Seznam obrázků

Obrázek 1: Uchycení trysky	7
Obrázek 2: Forma pro hydroforming	8
Obrázek 3: Rozdělení metod hydroformingu	9
Obrázek 4: Nízkotlaký hydroforming [3]	10
Obrázek 5: Vysokotlaké formování [4]	11
Obrázek 6: Vícetlaké formování [6]	11
Obrázek 7: Prostředí lisu [7]	12
Obrázek 8: Metody hydroformingu plechu [7]	13
Obrázek 9: Hydroforming s razníkem [7]	13
Obrázek 10: Hydroforming se zápustkou [7]	14
Obrázek 11: Schéma hydroformingu s gumovou membránou [7]	14
Obrázek 12: Schéma hydroformingu s gumovou komorou [7]	15
Obrázek 13: Nekonvenční metody hydroformingu 1 [7]	15
Obrázek 14: Nekonvenční metody hydroformingu - 2 [7]	16
Obrázek 15: Lis s razníkem [7]	16
Obrázek 16: Lis se zápustkou [7]	17
Obrázek 17: Problémy při hydroformingu s razníkem [7]	17
Obrázek 18: Procesní okno formování s razníkem [7]	18
Obrázek 19: Procesní okno formování se zápustkou [7]	18
Obrázek 20: Korektura kódu [8]	19
Obrázek 21: Členění CAMu [8]	22
Obrázek 22: Řídicí systém Heidenhain [10]	24
Obrázek 23: Výkres zadané součásti	25
Obrázek 24: Vrták Dormer A125 [11]	27
Obrázek 25: Vrták A976 [11]	27
Obrázek 26: Úpravy původního modelu	28
Obrázek 27: Plotní vrták [12]	29
Obrázek 28: Vrták B273Z03500SGL [12]	29
Obrázek 29: Podmínky vrtání [13]	30
Obrázek 30: Okuma G73 [14]	30
Obrázek 31: Diagram teplotního cyklu [15]	31
Obrázek 32: Mechanické vlastnosti při teplotě stárnutí 440 °C [21]	35

Obrázek 33: Mechanické vlastnosti při teplotě stárnutí 480 °C [21].....	36
Obrázek 34: Mechanické vlastnosti při teplotě stárnutí 540 °C [21].....	37
Obrázek 35: Porovnání tvrdostí u aditivních a konvenčních metod [22]	38
Obrázek 36: Metalografické výbrusy vzorků [22].....	39
Obrázek 37: Graf závislosti meze pevnosti na teplotě stárnutí [19].....	41
Obrázek 38: Graf závislosti tvrdosti na teplotě	42
Obrázek 39: Graf závislosti tvrdosti na době ohřevu	43
Obrázek 40: Výkres upravené součásti.....	47
Obrázek 41: OKUMA L200E-M	50
Obrázek 42: OKUMA MU-400V II	50
Obrázek 43: Komorová pec NARBETHERM.....	51
Obrázek 44: Vliv vibrací na kvalitu povrchu součásti.....	53
Obrázek 45: Centrování kleštinového upínače	53
Obrázek 46: Sestavení a zajištění kleštiny v upínači	54
Obrázek 47: Dokončovací nůž opatřen přídatnou měděnou trubičkou	54
Obrázek 48: Příklad programu vytvořeného dílenským programováním	55
Obrázek 49: Zarovnání čela strany koule	58
Obrázek 50: Hrubování průměru 10,1 h7	59
Obrázek 51: Soustružení na čisto kontura 1. část	59
Obrázek 52: Hrubování průměru 12,6 mm.....	59
Obrázek 53: Soustružení kontury na čisto 2. část.....	60
Obrázek 54: Dokončená výroba strany koule.....	60
Obrázek 55: Zarovnání čela strany kužele.....	60
Obrázek 56: Hrubování kontury strany kužele	61
Obrázek 57: Hrubování kužele	61
Obrázek 58: Dokončení strany kužele	61
Obrázek 59: Soustružení kužele na čisto	62
Obrázek 60: Výběr nového nástroje	62
Obrázek 61: Definování parametrů nástroje	63
Obrázek 62: Nastavení základních parametrů	63
Obrázek 63: Výběr prováděné operace.....	64
Obrázek 64: Příklad nastavení obrábění	64
Obrázek 65: Ustavení polotovaru – strana koule.....	65
Obrázek 66: Hrubování čela – strana koule.....	65

Obrázek 67: Hrubování průměru 10,1h7	66
Obrázek 68: Soustružení kontury na čisto – 1. strana koule.....	66
Obrázek 69: Hrubování průměru 12,6 mm	66
Obrázek 70: Soustružení kontury na čisto – 2. část strana koule	67
Obrázek 71: Ustavení polotovaru – strana kužele	67
Obrázek 72: Zarovnání čela – strana kužele	68
Obrázek 73: Hrubování strany kužele	68
Obrázek 74: Soustružení kontury na čisto – strana kužele	68
Obrázek 75: Přípravek pro vytvrzování trysek	69

15. Seznam tabulek

Tabulka 1: Značení kódu NC programu [9].....	20
Tabulka 2: Význam nejpoužívanějších adres [9].....	21
Tabulka 3: Tolerance délkových rozměrů [35].....	26
Tabulka 4: Tolerance přímosti a rovinnosti [35]	26
Tabulka 5: Tolerance kolmosti [35].....	26
Tabulka 6: Parametry vrtáku A125 [11]	27
Tabulka 7: Parametry vrtáku A976 [11]	27
Tabulka 8: Parametry pilotního vrtáku [12]	29
Tabulka 9: Parametry vrtáku B273Z03500SGL [12]	29
Tabulka 10: Složení oceli 19830 [15].....	31
Tabulka 11: Složení oceli 1.2358 [17].....	33
Tabulka 12: Složení oceli 1.2080 [20].....	33
Tabulka 13: Dělení a složení maraging ocelí [21].....	34
Tabulka 14: složení oceli Grade 300 [21].....	35
Tabulka 15: Složení konvenčně zpracované oceli [22]	38
Tabulka 16: Parametry aditivně zpracovaných vzorků [22].....	38
Tabulka 17: Složení ocelí Böhler [19; 23; 24].....	40
Tabulka 18: Mechanické a fyzikální vlastnosti ocelí Böhler [19; 23; 24].....	40
Tabulka 19: Hodnoty tvrdosti	42
Tabulka 20: Tvrdost při teplotě 485 °C	43
Tabulka 21: Hodnoty původní konstrukce.....	45
Tabulka 22: Hodnoty upravené konstrukce	45
Tabulka 23: Parametry OKUMA L200E-M [31]	49
Tabulka 24: Řezné podmínky soustružení.....	55