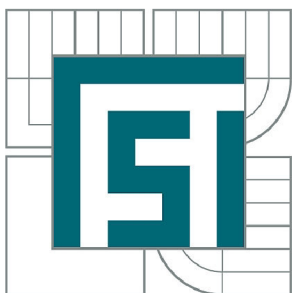




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY TITANOVÉHO VÝFUKU

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING OF TITAN EXHAUST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PATRIK HRUBÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ZOUHAR, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Patrik Hrubý

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

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

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

Technologie výroby titanového výfuku

v anglickém jazyce:

Technology of manufacturing of titan exhaust

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku výroby výfuku pro dvoudobý spalovací motor. Výfukový systém dvoudobých motorů je svou konstrukcí specifický a musí splňovat řadu podmínek pro správný chod a vysoký výkon motoru. Při požadavku minimální váhy a zástavbových rozměrů ve vlhkém prostředí je zvoleným materiálem titan. Práce se bude zabývat návrhem vhodné technologie tváření tvarových dílů výfukového potrubí a kompletací celého systému. Je zde kladen důraz na ekonomičnost, rychlost a dostupnost výroby.

Cíle diplomové práce:

- popis, funkce a použití titanového výfuku, rozbor problematiky,
- analýza technologických možností tvárnosti titanu,
- návrh vybraného technologického postupu výroby,
- provedení výpočtů odpružení, úprava nástrojů dle výpočtů
- návrh tvářecích nástrojů
- ekonomické zhodnocení

Seznam odborné literatury:

Forejt, M Teorie tváření / 1. vyd. Brno : VUT Brno, 1992. 167 s. ISBN 80-214-0415-9

Forejt, M., Píška, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje / Vyd. 1. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9

Dvořák M., Gajdoš, F., Novotný, K. 4. vyd. Technologie tváření plošné a objemové tváření, Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2007. ISBN 978-80-214-3425-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 12.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zameriava na technológiu výroby titánového výfuku pre dvojtaktný spaľovací motor. Obsahuje popis jednotlivých výrobných operácií. Podrobne analyzuje problematiku tvárnenia tenkostenných dielov výfuku za účelom eliminácie vzniku odpruženia a nachádza možné riešenie problému.

Kľúčové slová

výfuk, titán, tvárnenie, ťahanie, ohýbanie, lisovací nástroj, výpočet, odpruženie

ABSTRACT

The Diploma Thesis deals with the technology of manufacturing the titan exhaust for a two-stroke engine. It includes a description of the manufacturing procedure. It analyzes in detail the forming issue of sheet-metal parts in order to eliminate the spring-back effect, and it finds possible solutions to this problem.

Key words

exhaust, titanium, forming, drawing, bending, forming tool, calculation, spring-back

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HRUBÝ, Patrik. *Názov: Technológie výroby titánového výfuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 40 s., 6 příloh. Vedúci diplomovej práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že diplomovú prácu na tému Technológie výroby titánového výfuku som vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum:

.....

Patrik Hrubý

POĎAKOVANIE

Ďakujem zamestnancom FSI VUT Brno, Ing. Janu Zouharovi, Ph.D za cenné pripomienky a rady pri vypracovávaní diplomovej práce. Taktiež sa chcem poďakovať Ing. Petru Krejčířovi za poskytnutie materiálov a cenných rád potrebných na vypracovanie práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
<i>Kľúčové slová</i>	4
ABSTRACT	4
<i>Key words</i>	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA	4
Prehlásenie	5
Poďakovanie	6
Obsah	7
Úvod	10
1. VÝFUK 2-TAKTNÉHO SPAĽOVACIEHO MOTORA	11
1.1 Použitie titánového výfuku	11
1.2 Popis funkcie výfuku dvojtaktného spaľovacieho motora	12
1.3 Kompaktné prevedenie výfuku	13
1.4 Titánový výfuk pre dvojtaktný motor firmy MSR Engines	14
2. TITÁN A JEHO VLASTNOSTI	17
2.1 Objavenie titánu	17
2.2 Výskyt titánu	17
2.3 Vlastnosti titánu	17
2.4 Použitie titánu	18
2.5 Metalurgia titánu	18
2.6 Štruktúra titánu	18
2.7 Titán a jeho zliatiny	19
2.8 CP titán (comercially pure)	19
2.9 CP titán grade 2	19
2.10 Tvárnosť titánu	21
2.11 Obrobiteľnosť titánu	21
2.12 Vplyv tepelného spracovania na štruktúru a vlastnosti titánu	22
2.12.1 Žihanie na zníženie vnútorných napätí	22
2.12.2 Procesné žihanie	23
3. POPIS SÚČASNÉHO VÝROBNEHO POSTUPU TITÁNOVÉHO VÝFUKU	24
3.1 Návlačka	24
3.2 Motorová príruha	25
3.3 Reverzný kužel	26

3.4	Reverzné veko	27
3.5	Príruba tesnenia	29
3.6	Držiak trysky	30
3.7	Vonkajší a vnútorný kužeľ výfuku	31
3.8	Výstupné výfukové kolienko	37
3.9	Uzáver a podpera	37
3.10	Popis skladania titánového výfuku.	38
4.	ROZBOR PROBLEMATIKY	40
4.1	Problematika ohýbania tenkostenných dielov titánového výfuku	40
4.2	Analýza ohýbania	40
4.3	Geometrický model	41
4.4	Matematický model	41
4.4.1	Polomer neutrálnej plochy	41
4.4.2	Odpruženie po ohybe	42
4.5	Výpočet odpruženia po ohybe	45
5.	ANALÝZA TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ TVÁRNENIA TENKOSTENNÝCH DIELOV TITÁNOVÉHO VÝFUKU	47
5.1	Tvárnenie kvapalinou	47
5.1.1	Metóda hydroform	47
5.1.2	Hydromechanické ťahanie HMT	48
5.1.3	Vysoko tlakový hydroforming HPH pre ťahanie dutých profilov	48
5.1.4	Pillow forming	49
5.2	Tvárnenie za vysokých rýchlostí	50
5.3	Tvárnenie s využitím elastomér	51
6.	NÁVRH VYBRANÉHO TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU	52
6.1	Výber vhodnej technológie	52
6.2	Ťahanie	52
6.2.1	Analýza ťahania	52
6.2.2	Ťahanie dielov sférických tvarov	53
6.2.3	Výpočet funkčných rozmerov nástroja a polotovaru	54
6.3	Experimentálne overenie	55
6.3.1	Voľba rozmerov skúšobného vzorku	55
6.3.2	Vytvorenie 3D modelu skúšobného nástroja	55
6.3.3	Spracovanie a úprava modelu softvérom CAM	56
6.3.4	Výroba skúšobného ťažníka a ťažnice	58

6.3.5	Ťahanie skúšobných vzoriek	59
6.3.6	Digitalizácia a porovnanie dát	60
6.3.7	Návrh tvárniacich nástrojov.....	61
7.	EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE.....	64
	ZÁVER.....	65
	Zoznam použitých zdrojov	66
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	68
	Zoznam tabuliek	70
	Zoznam príloh	70

ÚVOD

Značka JetSurf bola založená v roku 2008 Martinom Sulom, s úmyslom posunúť hranice vodných športov. S využitím moderných technológií, za pomoci skúseného tímu z oblasti spaľovacích motorov, hydromechaniky, kompozitných materiálov a elektrotechniky, je na trh uvedený prvý vodný surf poháňaný spaľovacím motorom. Je to jedinečný motorizovaný dopravný prostriedok určený na vodu, ktorý je možné prepravovať ako batožinu v medzinárodnej doprave či už letecky, loďou alebo vlakom. JetSurf je vyrobený z celokarbónovej konštrukcie a jeho hmotnosť sa pohybuje do 15kg. V jeho útrobach je umiestnený dvojtaktný spaľovací motor o objeme 86 cm³, ktorý dodáva doske výkon 15 konských síl. Počas chodu surf spĺňa homologizačné normy hluku a motor s využitím technológie GreenTech je konštruovaný v súlade s emisnými limitami stanovenými pre motorové lode. Pohonná jednotka surfu je certifikovaná a schválená Európskou komisiou, teda nesie označenie CE. Celá výroba JetSurfu je sústredená v jednom výrobnom komplexe firmy MSR Engines v Českej republike. Združená výroba umožňuje dosiahnuť vysokú presnosť pri výrobe a individuálny prístup ku každej doske. Pri výrobe surfu sú používané najvyššie štandardy vo výrobných technológiách. Všetky používané komponenty sú vysokej kvality a vyrobené v EU. JetSurf je vyrobený s maximálnou precíznosťou a starostlivosťou, aby minimalizoval dopad na životné prostredie. Zároveň jeho pohonná jednotka musí spĺňať správny chod, dosahovať vysoké výkony aj vo veľmi vlhkom a agresívnom prostredí, ako je napríklad morská voda. Vysoké nároky sa týkajú všetkých komponentov motora, bez výnimky aj výfukového systému. Pri požiadavkách na vysokú kvalitu materiálu a zároveň extrémne nízku hmotnosť, je zvoleným výrobným materiálom titán. Práca je zameraná na technológiu výroby titánového výfuku. Obsahuje prienik jednotlivými výrobnými postupmi. Podrobne sa zameriava na problematiku tvárnenia a tenkostenných dielov výfuku, nachádza možné riešenie problematiky s ohľadom na ekonomickosť, dostupnosť a rýchlosť výroby [1].

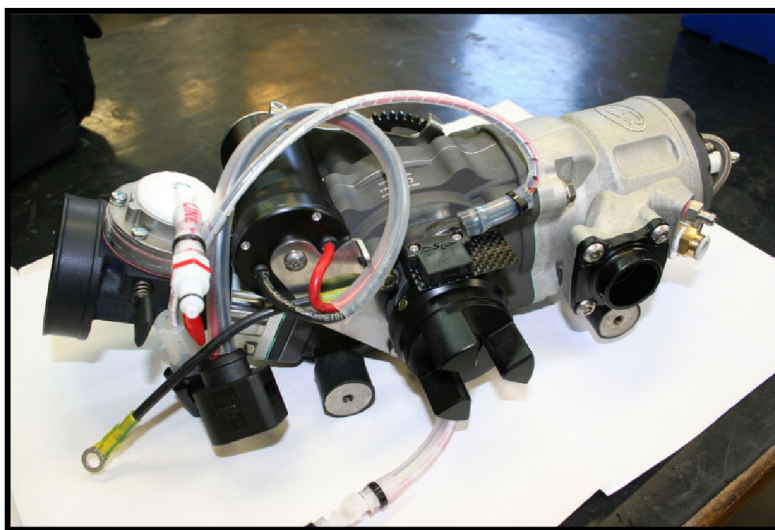


Obr. 1.0 JetSurf rada Factory.

1. VÝFUK 2-TAKTNÉHO SPAĽOVACIEHO MOTORA

1.1 Použitie titánového výfuku

Titánový výfuk je súčasťou dvojtaktného spaľovacieho motora. Motor (obr. 1.1) je špecifický nielen svojimi parametrami, ale aj použitím, k čomu je prispôbená jeho konštrukcia. Motor so zdvihovým objemom valca 86 cm^3 dosahuje výkon 15 konských síl. Svojou konštrukciou je prispôbený na chod v agresívnom a vlhkom prostredí. Štart motora zabezpečuje vlastný elektrický štartér, elektromotor. S cieľom zníženia hmotnosti motor nemá alternátor, a teda za chodu nedobíja späť batériu, tá má životnosť približne 4 hodiny, čo je pri kapacite nádrže na 2 hodiny jazdy dostačujúce [2].



Obr. 1.1 Dvojtaktný spaľovací motor firmy MSR Engines

Celý motorový set je vsadený do dutej konštrukcie surfu z uhlíkového kompozitu (obr. 1.2). Motor poháňa prostredníctvom pevného priameho náhonu turbínu vyrobenú z uhlíkového kompozitu (obr. 1.3). Surf pri plnom výkone dosahuje rýchlosť $57 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Rýchlosť je regulovaná otáčkami motora a tie je možno ovládať pomocou špeciálnej rukoväte, do ktorej je vyvedený bovden s oceľovým lankom na reguláciu plynu [2].



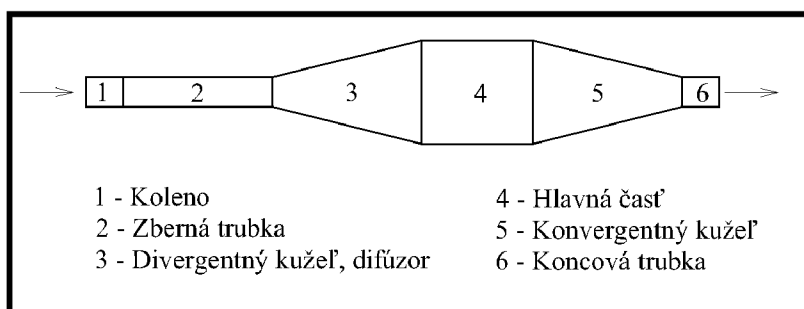
Obr. 1.2 Osadenie motora



Obr. 1.3 Turbína z uhlíkového kompozitu

1.2 Popis funkcie výfuku dvojtaktného spaľovacieho motora

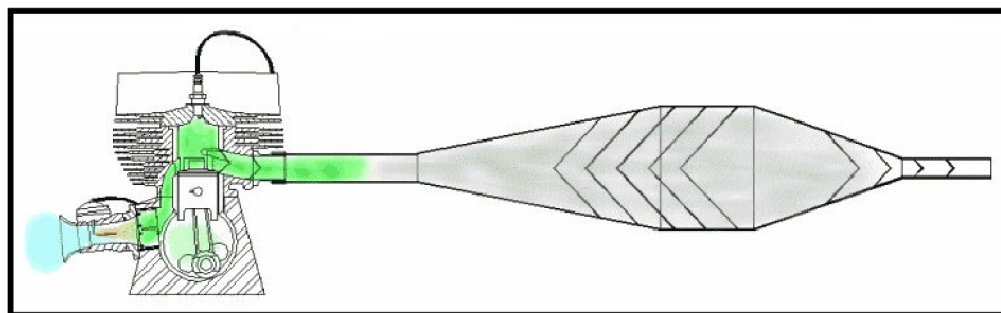
Výfukové systémy dvojtaktných spaľovacích motorov známe ako aj rezonančné výfuky, využívajú rezonancie k zabráneniu úniku čerstvej palivovej zmesi z valca pri výplachu spaľovacieho priestoru. Výfuk má kužeľovitý tvar (viď. obr. 5), ktorého rozmery sa vypočítavajú pre každý typ motora zvlášť. Existujú univerzálne vzťahy, pomocou ktorých sa dajú približne vypočítať základné rozmery. Jemné doladenia prebiehajú experimentálne. Konštrukčne je možné zhotoviť výfuk, pri ktorom bude motor dosahovať vysokého výkonu, buď v nižších, alebo vo vyšších otáčkach. Pre vysoké otáčky je vhodné kratšie potrubie s menším objemom a menším priemerom trubiek, naopak pre dobrý krútiaci moment v nižších otáčkach je ideálny väčší objem výfukovej komory s väčšími jednotlivými priermi. Je konštrukčne nemožné zhotoviť výfuk, ktorý by umožňoval motoru dosiahnuť maximálny výkon v celom rozsahu otáčok [3,4].



Obr. 1.4 Schéma výfuku dvojtaktného motora.

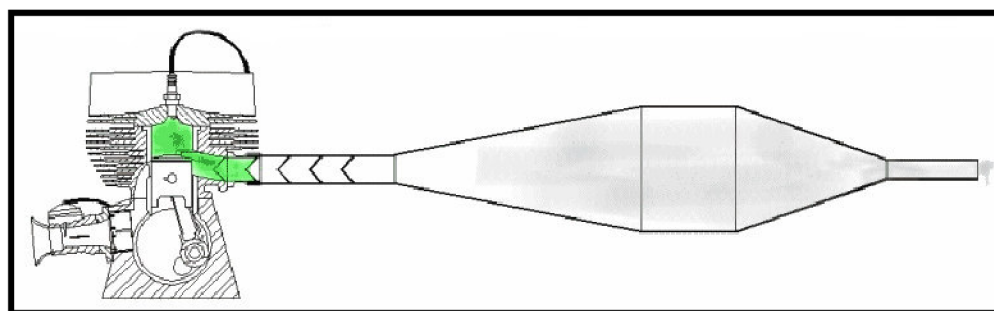
Princíp výfuku spočíva v usmernení spalín vedených do výfukovej komory cez koleno, ktoré je pomocou príruby pripojené k valcu motora. Spaliny sú privedené kolenom a zbernou trubkou do difúzora, čo je divergentná kužeľovitá časť výfuku, kde dôjde pôsobením tlakovej vlny spôsobenej explóziou vo valci k vzniku podtlakovej vlny. Podtlaková vlna sa šíri späť smerom do valca a zabraňuje unikaniu palivovej zmesi. Prvá tlaková vlna pokračuje hlavnou časťou výfuku do konvergentného kužeľa, kde sa odrazí a šíri sa naspäť k valcu. Medzi tým podtlaková vlna prestáva účinkovať a do výfuku začína prenikať palivová zmes. V tom momente začne pôsobiť odrazená tlaková vlna, ktorá sa medzi tým vráti výfukom naspäť a zatlačí palivovú zmes späť do

valca tesne pred tým, ako dôjde k uzavretiu kanálu piestom. Dĺžka potrubia musí byť navrhnutá tak, aby tlaková vlna, pohybujúca sa rýchlosťou zvuku 343 m/s, dorazila do výfukového kanálu presne v okamžiku pred zatvorením kanálu piestom. Medzi tým výfukové plyny pokračujú všetkými komorami výfuku až ku koncovému kolenu. Na dvojici obrázkov (Obr. 1.5) a (Obr. 1.6) je znázornený dej vo výfuku za chodu motora. Na Obr. 1.5 je zachytené šírenie tlakovej vlny, jej smer a prenikanie palivovej zmesi do komory výfuku [3,4,5].



Obr. 1.5 Schéma výfuku dvojtaktného motora [6].

Na Obr. 1.6 tlaková vlna zatláča unikajúcu palivovú zmes naspäť do valca. Ostatné výfukové plyny pokračujú k ústiu výfukovej komory.



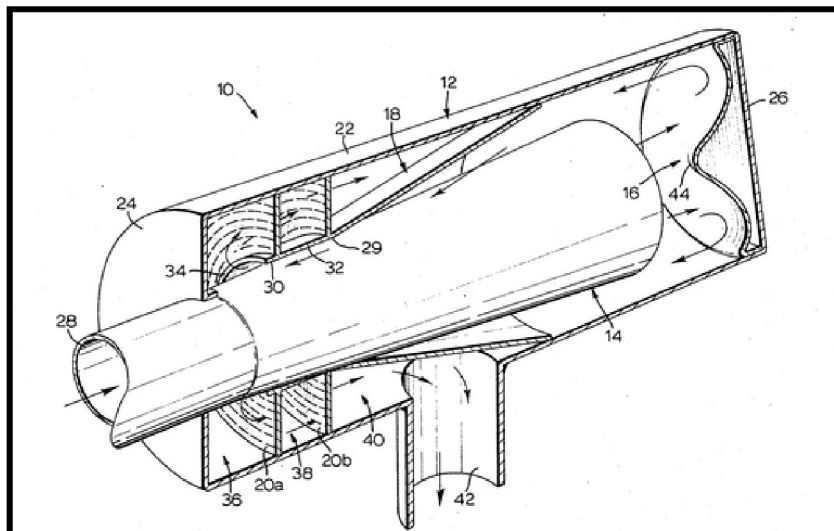
Obr. 1.6 Schéma výfuku dvojtaktného motora [6].

1.3 Kompaktné prevedenie výfuku

Koncepcia kompaktného výfuku vychádza z patentu s číslom US3462947A z roku 1968 podaným vynálezcom K.F. Nowakom. Ide o upravený výfuk pre dvojtaktné spaľovacie motory, ktoré boli v 60. rokoch na vzostupe. Uplatnenie našli nielen medzi malými a strednými motocyklami, ale postupne aj medzi domácim a záhradným príslušenstvom, ako sú motorové pily, kosačky či búracie kladivá. Za veľký pokrok vo vývoji dvojtaktných motorov sa zaslúžili športové podujatia, preteky, kde bolo potrebné dosiahnuť vysokých výkonov v kategóriách rozdelených podľa zdvihových objemov valcov spaľovacích motorov.

Patent s číslom US3462947A uvádza výfuk pre dvojtaktné spaľovacie motory špecifický svojou koncepciou, v ktorej autor využil vzájomné uloženie konvergentného a divergentného kužeľa v jednom puzdre. Puzdro svojou časťou tvorí hlavnú resp. strednú časť výfuku. Výhodou uvedenej koncepcie je zachovanie a v neskorších obmenách aj zvýšenie výkonu pri výraznom zmenšení rozmeru dĺžky takmer o polovicu. Na Obr. 1.7 je zobrazený rez výfukom. Princíp funkcie ostáva nezmenený. Bod 28 znázorňuje vstup spálených plynov zbernou trúbkou do priestoru difúzora, kde dôjde k vzniku podtlakovej vlny bezprostredne po výbuchu. Bod 16, plyny vychádzajú z difúzora do hlavnej časti výfuku, kde sa odrazia v smere šípok o odrazový kužeľ

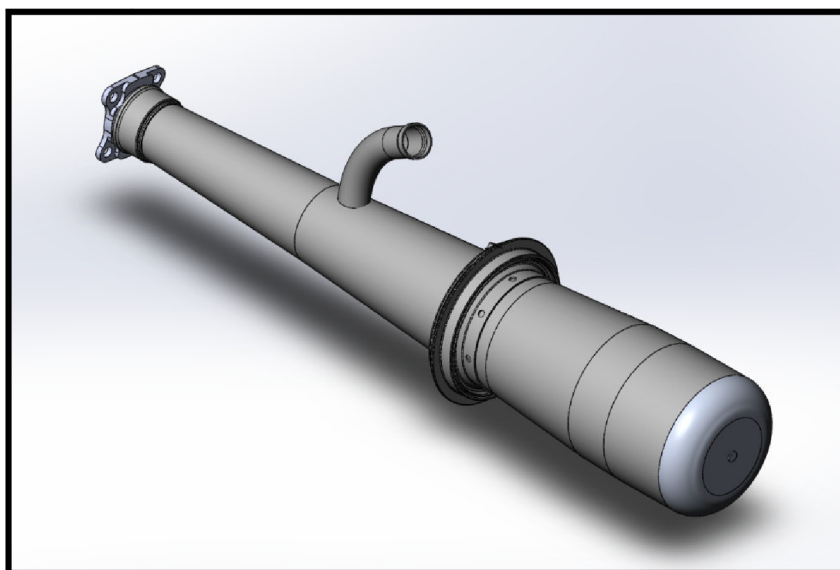
(pozícia 44) a ďalej pokračujú hlavnou časťou popri vonkajšej stene do konvergentného kužeľa (pozícia 18). Výfukový plyn prechádza zúženým ústím (pozícia 30) do ďalšej komory (pozícia 36), kde sa odrážajú od čelnej steny (pozícia 24). Odrazené spaliny prechádzajú v smere šípkov sériou proti hlukovým bariér (pozícia 20a, 20b) do poslednej komory (pozícia 40) a znej do koncovkej trubky (pozícia 42) [7].



Obr. 1.7 Koncepcia výfuku podľa patentu US3462947A [7].

1.4 Titánový výfuk pre dvojtaktný motor firmy MSR Engines

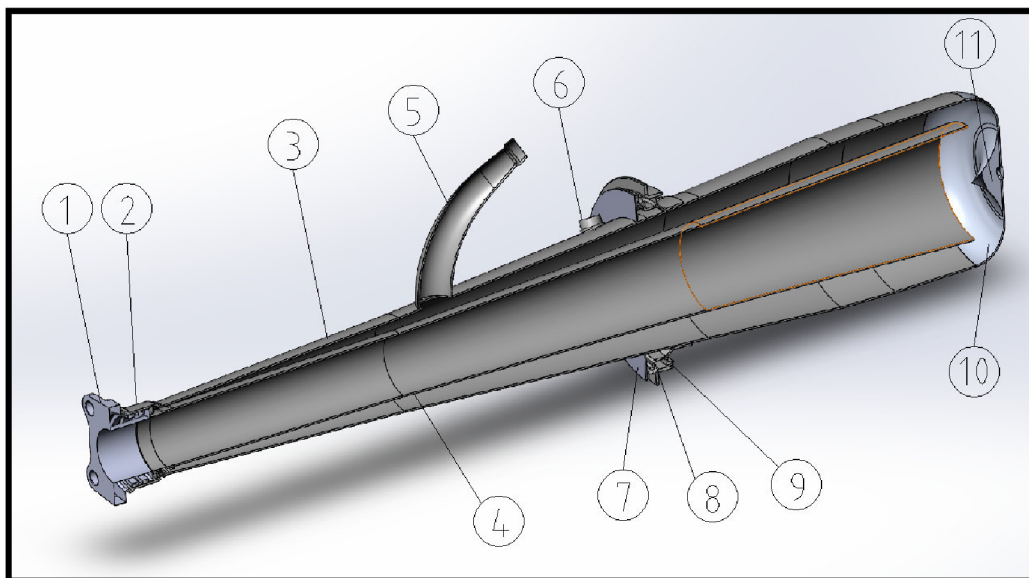
Titánový výfuk firmy MSR Engines (Obr. 1.8) je špeciálne navrhnutý na chod v agresívnom prostredí, pričom musí byť braný ohľad na relatívne malý prevádzkový priestor v podobe 20 litrov vo vnútri surfu, kde je umiestnená celá pohonná jednotka. V prípade iných dopravných prostriedkov, ako sú napríklad motocykle poháňané či už dvojtaktným, alebo štvortaktným spaľovacím motorom, výfuk je umiestnený mimo rámu stroja, čo umožňuje lepšie chladenie výfuku. Táto problematika je u titánového výfuku vyriešená umiestnením trysky s prívodom chladiacej kvapaliny do komory výfuku.



Obr. 1.8 Model titánového výfuku firmy MSR Engines.

Princíp funkcie výfuku vychádza z kompaktného prevedenia výfuku podľa patentu US3462947A, pričom svojou konštrukciou je jednoduchší a prispôsobený k vodnému chladeniu. Na rozdiel od výfuku podľa patentu US3462947A, kde výfukový plyn mení smer pohybu trikrát, má titánový výfuk o jednu výfukovú komoru menej. Spálená zmes mení smer len dvakrát. Divergentný kužeľ plní zároveň funkciu vonkajšej steny. Výfuk neobsahuje tlmiace bariéry na zníženie hlučnosti. Na zníženie hladiny hluku sa podieľa tlmič umiestnený mimo výfuk z dôvodu zachovania hmotnostnej vyváženosti surfu.

Na Obr. 1.9 je znázornený rez titánovým výfukom a pozíciami sú označené jednotlivé komponenty, z ktorých sa výfuk skladá. Okrem pozície 1, 8 a 9 sú všetky diely vyrobené z komerčne čistého titanu grade 2. Príruba tesnenia (poz.8) je vyrobená z hliníku triedy EN AW 2030. Na telo výfuku je len nalisovaná s miernym presahom na kužeľovej ploche a zaistená proti vysunutiu titánovým uzáverom (poz. 7), ktorý je v 3 miestach privarený k telu výfuku. V blízkosti príruby tesnenia je umiestnený držiak trysky (poz 6). Držiak trysky je valcová matica s vnútorným závitom M5. Do závitov sa inštaluje tryska z nerezovej ocele, tá vstrekuje do komory výfuku vodu za účelom zníženia teplôt výfukových plynov a stien výfuku. Návlačka (poz. 2) je dutá valcová súčiastka umožňujúca zvarové spojenie divergentného a konvergentného kužeľa (poz. 3 a 4) s rozdielnymi priermi. Motorová príruha (poz. 1) umožňuje pripojenie výfukovej zostavy k valcu motora prostredníctvom 4 dier o priemere 6,3mm pre skrutky M6. Druhý koniec výfuku tvorí Reverzné veko (poz. 10) a reverzný kužeľ (poz. 11), ktorý usmerňuje, odráža, výfukové plyny vychádzajúce z difúzora do vonkajšieho kužeľa.



Obr. 1.9 Rez titánovým výfukom.

1. Motorová príruha
2. Návlačka
3. Vonkajší konvergentný kužeľ
4. Vnútorý divergentný kužeľ
5. Výstupné výfukové koleno
6. Držiak trysky
7. Uzáver
8. Príruba tesnenia
9. Tesnenie

10. Reverzné veko
11. Reverzný kužel

2. TITÁN A JEHO VLASTNOSTI

2.1 Objavenie titánu

Titán bol objavený v magnetickom minerále ilmenit (FeTiO_3 oxid železnato-titaničitý) anglickým chemikom a geológom Williamom Grogorom v roku 1791. Pomenoval ho nemecký chemik Martin Heinrich Klaproth v roku 1795. Samostatný prvok sa podarilo prvýkrát izolovať v roku 1910 materiálóvemu inžinierovi Matthewovi Huntrovi. Kov pripravil redukciou chloridu titaničitého so sodíkom pri teplote cca 750 stupňov o čistote 99,9%. Tento proces bol neefektívny a vyprodukované množstvo titánu bolo využívané len na laboratórne účely. K priemyselnej výrobe titanu došlo až po roku 1932, kedy metalurg William Kroll nahradil sodík horčíkom a vápnikom. Krollov proces výroby titanu sa využíva dodnes [8, 9].

2.2 Výskyt titánu

Titán je siedmy najrozšírenejší prvok v zemskej kôre. Nevyskytuje sa v čistom stave, ale v malých množstvách je obsiahnutý v rudách ilmenit (FeTiO_3 oxid železnato-titaničitý) a rutil (TiO_2 oxid titaničitý). Významné zásoby rúd sa nachádzajú v Austrálii, Škandinávií a severnej Amerike. Vesmírna misia Apolla 17 potvrdila výskyt titánu v horninách na mesačnom povrchu, ktoré obsahujú 12% oxidu titaničitého[8, 9].



Obr. 2.1 Ruda rutilu [11].

2.3 Vlastnosti titánu

Titán je strieborne biely, tvrdý, ľahký kov. Má jedinečnú kombináciu fyzikálnych, chemických a mechanických vlastností. Prednosťou titánu je jeho pomer hmotnosti a pevnosti a nízka hustota medzi kovovými materiálmi. Vďaka pasivácii povrchu je odolný voči korózií, odoláva aj slanej vode a je nerozpustný vo väčšine riedených roztokov kyselín. Pevnosť titánu je možné porovnať s obvykle používanými konštrukčnými oceľami, ale má nižší modul pružnosti. Podstatné prednosti titánu pozostávajú z koróziivzdornosti, biokompatibility a stálosti za pôsobenia extrémne vysokých a nízkych teplôt. Na výrobu ľahkých a pevných zliatin je možné titán zlievať s legujúcimi prvkami ako je zinok, nikel, chrom, palladium alebo s ďalšími [8, 9, 10].

2.4 Použitie titánu

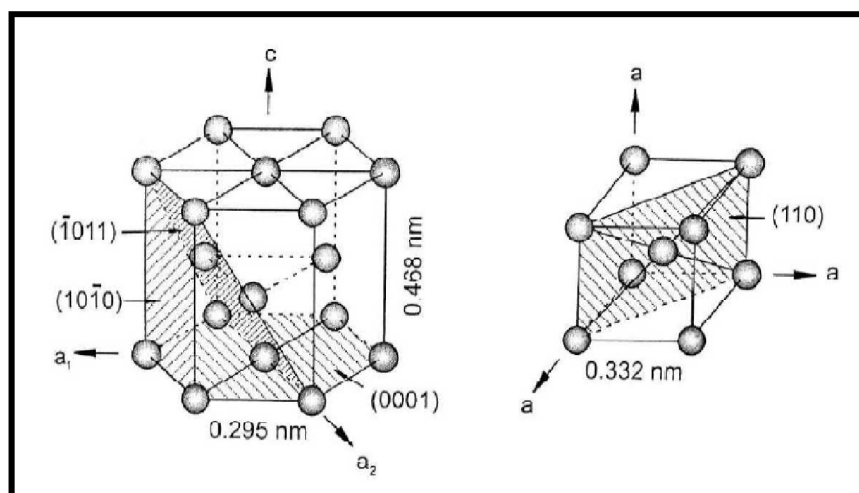
Titán a jeho zliatiny majú kvôli svojim vlastnostiam široké využitie v mnohých odvetviach priemyslu. Ako konštrukčný materiál je požívaný vo vojenskom priemysle v letectve na výrobu namáhaných súčastí stíhacích lietadiel. Často je titán aplikovaný v odvetví námorníctva, kde dochádza ku styku zariadení s prostredím s vysokou salinitou, ako súčasť lodí a ponoriek (lodná skrutka). Uplatnenie nachádza aj v kozme, kde titánové zliatiny tvoria základný konštrukčný prvok pri výrobe kozmických objektov ako sú vesmírne stanice, sondy a družice. Vďaka dobrej znášanlivosti tkanív ľudského tela sa titan používa v lekárstve a slúži ako implantát za kostné tkanivo. V chemickom priemysle je obľúbeným materiálom na výrobu výstelky chemických reaktorov, ktoré pracujú v extrémnych podmienkach. Výroba titánu je finančne náročná, preto je použitie titánových komponentov účelné, keď nie je možné aplikovať lacnejšiu alternatívu ako napríklad zliatiny hliníka alebo horčíka [8, 9, 10].

2.5 Metalurgia titánu

Aj napriek veľkého rozšírenia titánu v zemskej kôre sa dlho nedarilo túto rudu účinne spracovať. Po náročných pokusoch o získanie titánu chemickými metódami začal byť po roku 1948 vyrábaný pretavovaním v oblúkových a indukčných peciach. Bežné metódy boli neúčinné z dôvodu vysokej afinity titánu ku kyslíku, dusíku, vodíku a uhlíku. V súčasnosti je najpoužívanejšou metódou výroby titánu Krollov proces. Pyrolýzou rudy s obsahom titánu s uhlíkom a chlóróm sa získava chlorid titaničitý. Jeho pary sa po prečistení redukujú horčíkom a v inertnej argónovej atmosfére pri teplote 800 °C. Vzniknutý titán je pevná pórovitá látka nazývaná titánová huba. Po odobratí chloridu horečnatého a zbytkového horčíku je potrebný ďalší proces čistenia. Posledných rokoch sa vo výrobnom procese používajú moderné metalurgické technológie, hlavne plazmové a elektrónové pece. Najlepšia akosť zliatin sa zaisťuje tavením pomocou zväzku elektrónov s vysokou kinetickou energiou vo vákuu [8, 9, 10].

2.6 Štruktúra titánu

Jedná sa o polymorfný kov, ktorý sa v závislosti na tlaku a teplote vyskytuje v dvoch alotropických modifikáciách, je teda polymorfný kov. Pri nízkych je titán tvorený kryštalickou mriežkou HCP nazývanou α -titan. Pri teplote 882 °C dochádza k transformácii α -titanu na fázu β -titan, ktorá kryštalizuje na kubicky priestorovo strednú mriežku. V tejto fáze je stabilný do teploty tavenia 1688 °C [9, 10].

Obr. 2.2 Kryštalické mriežky fázy α a β s rovinami sklzu [9].

2.7 Titán a jeho zliatiny

V súčasnej dobe je známych viac než 100 rôznych zliatin titánu, z nich je komerčne využívaných 20 až 30 typov. Čistý titán tvorí približne 25% celkovej produkcie. Najčastejším delením zliatin je podľa štruktúry základných fáz v rovnovážnom stave, prípadne podľa percentuálneho zastúpenia legujúcich prvkov [12, 13].

Zjednodušené rozdelenie zliatin titánu pre medzinárodnú štandardizáciu zaviedla organizácia American Society for Testing and Materials ASTM. Jedná sa o rozdelenie do tried 1 až 38, kde pre čistý titán odpovedá skupina 1 až 4. Delenie je prevedené na základe percentuálnej čistoty [12, 13].

2.8 CP titán (commercially pure)

Jedná sa o titán o čistote 99,0 až 99,5%. Delí sa do štyroch tried (Grade). Najsilnejšími prednosťami CP titánu sú korózna odolnosť, dobrá tvarovateľnosť a zvariteľnosť. Využitie nachádza v námorníctve, letectve alebo v zdravotníctve. Životnosť produktov z CP titánu je oveľa vyššia než z produktov vyrobených z ocele, obstarávacia cena materiálu však vyššia. Nevýhodou je možnosť využitia len pre aplikáciu vyžadujúcu nižšiu pevnosť [9].

2.9 CP titán grade 2

Titan Grade 2 je najčastejšie používaným druhom titánu na priemyslové aplikácie vo všetkých formách polotovarov. Ponúka optimálne vyváženú kombináciu pevnosti a ťažnosti a vynikajúcu koróznou odolnosť. Má široké využitie v chemickom priemysle, zdravotníctve a strojníctve. Mechanické a fyzikálne vlastnosti titánu grade 2 sú popísané v Tab. 2.1 až Tab. 2.4 [9,14].

Tab. 2.1 Mechanické vlastnosti pri teplote 20°C [14]

Vlastnosti	Minimálne hodnoty	Typické hodnoty
Medza klzu	275 Mpa	350-450 Mpa
Medza pevnosti v ťahu	345 Mpa	485 Mpa
Redukcia na plochu	30%	55%

Tvrdosť	-	160-200 HV
Modul pružnosti	-	103 Gpa

Tab. 2.2 Únavové vlastnosti titanu pri izbovej teplote [14]

Ohyb za rotácie		
Hladký	Kt=1	230 Mpa
Vrubový	Kt=3	155 MPa

Tab. 2.3 Tepelné úpravy [14]

Tepelná úprava	Spôsob chladenia	Teplota	Čas
Žíhanie	vzduchom	650-760 °C	6 minút - 2 hodiny
Odstránenie vnútorného pnutia	vzduchom	480-595°C	15 minút – 4 hodiny

Tab. 2.4 Fyzikálne vlastnosti [14]

Vlastnosti	Hodnoty
Bod tavenia	1660 °C
Hustota	4,51 g/cm ³
Beta fáza	910 °C
Teplotná rozťažnosť, 20 - 100 °C	8,6 * 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Teplotná rozťažnosť, 0 - 300 °C	9,7 * 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Teplotná vodivosť pri teplote 20°C	20,8 W/mK
Teplotná vodivosť pri 400 °C	15,0 W/mK
Špecifické teplo, pri teplote 20°C	0,52 J/gK
Špecifické teplo, 400 °C	0,60 J/gK
Elektrický odpor	56 μW*cm
Poissonova konštanta	0.34 - 0,40

2.10 Tvárnosť titánu

Titán je ľahko tvárny aj za studena pomocou technológií a zariadení vhodných pre oceľ. Tvárnosť za studena je nižšia než u bežných konštrukčných materiálov. Povrch titánu pre tvárnenie je prijateľný. Pri ťahaní je nutné polotovar očistiť a okraje vyhladiť. Vzhľadom k veľkému odpruženiu titánu je v niektorých prípadoch nutné upraviť tvar ťažníka. Odporúča sa pomalé ťahanie materiálu. Pri prvých ťahoch je možné zvoliť počiatočnú redukciu 40% a redukcia pre ďalšie ťahy približne 20%. Pri tvárnení titánu za studena dochádza k spevňovaniu, a preto je nutné po každej ťažnej operácii vykonať žihanie pri teplote 650-700 °C. Žihanie vráti kovu pôvodnú schopnosť tvárnenia. Doba žihania závisí od hrúbky materiálu. Tvárnosť titánu sa zvyšuje s narastajúcou teplotou a niektoré operácie je možné vykonať len za zvýšenej teploty. Ohrev materiálu pri tvárnení sa zabezpečuje pomocou pece alebo priameho oxidačného plameňa [15].

Pri ťahaní môže mať titán väčšiu tendenciu zadierať sa než chróm-niklové austenitické ocele. Čiastočky titánu sa zachytávajú na povrchu ťažnice a pridržavača. Tým sa povrch pracovnej plochy ťažníka postupne zhoršuje a po niekoľkých ťahoch sa výlisky zadierajú a kov sa trhá. Pri akejkoľvek tvárniacej operácii je nutné materiály v kontakte s kovovou maticou premazávať. Zadieraníu je možné zabrániť pomocou vysoko leštených činných častí, elektrolytickým nanosením niektorých kovov na povrch výlisku napr. medi alebo fosfátovaním výťážkov pred na nesením maziva [15].

Modul pružnosti titánu je polovicu menší než modul pružnosti oceli, čo po tvárnení spôsobuje odpruženie 15° až 25°. Čím je vyššia pevnosť zliatiny, tým je vyššia hodnota odpruženia. Ohýbanie by malo prebiehať pomaly a matrica a jadro formy by mali byť hladké a mazané, aby dochádzalo k minimalizácii tendencie odierania povrchov [15].

2.11 Obrobiteľnosť titánu

Jedná sa o technologickú vlastnosť materiálu, ktorá charakterizuje mieru schopnosti spracovateľnosti metódou obrábania. Jej funkčnou veličinou je spojitosť medzi nástrojom a obrobkom, teda vplyv chemického zloženia a fyzikálnych vlastností materiálu na proces obrábania.

V praxi slúžia porovnávacie testy pre kategorizáciu stupňa obrobiteľnosti. Pri zachovaní konštantných parametrov sa obrába etalónový materiál. Následne sa zistené

hodnoty porovnajú s hodnotami nameranými pri obrábaní vzorky. Stupeň obrobitel'nosti sa mení na základe typu obrábania [16].

Porovnávané charakteristické veličiny [16]:

- Veľkosť reznej sily
- Veľkosť energie potrebnej na odobratie danej vrstvy materiálu obrodku
- Veľkosť energie potrebnej na oddelenie triesky
- Teplota rezania
- Opotrebenie nástroja

2.12 Vplyv tepelného spracovania na štruktúru a vlastnosti titánu

Tepelné spracovanie zohráva u zliatin titánu významnú rolu. Jednotlivé zliatiny majú rôznu odozvu na tepelné spracovanie. Všetky procesy tepelného spracovania nie sú vhodné pre všetky titánové zliatiny, pretože rôzne zliatiny sú využívané na rôzne aplikácie s rôznymi nárokmi. Pri ohreve je nutné dbať na vysokú chemickú afinitu titánu ku kyslíku, vodíku a dusíku. Na ohrev sú najčastejšie využívané odporové a indukčné zariadenia. V prípade indukčných zariadení však existuje nebezpečenstvo vzniku oxidickej vrstvy (až niekoľko mm) v dôsledku prehriatia povrchovej vrstvy [17, 18].

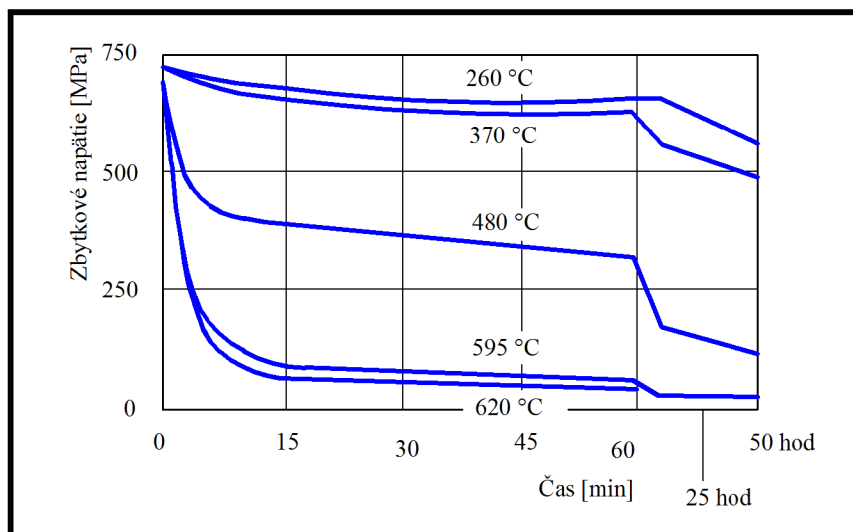
2.12.1 Žihanie na zníženie vnútorných napätí

Žihanie je proces tepelného spracovania na zníženie vnútorných napätí v materiáli, ktoré vznikajú v dôsledku nerovnomerných deformácií pri tvárnení za tepla, za studena či zvaraní. V Tab. 2.5 sú uvedené príklady žihacích teplôt a času pre vybrané zliatiny. Hodnoty sa pohybujú v širokých intervaloch a je možné aplikovať rôzne kombinácie teploty a času [17, 18].

Tab. 2.5 Žihacie teploty rôznych druhov titánu [17]

Typ	Teplota [°C]	Čas
CP Titán	480-595	15' - 4h
α -zliatiny	540 - 650	15' - 4h
pseudo- α	595 - 705	15' - 4h
($\alpha+\beta$) zliatiny	480-730	15' - 4h
β -zliatiny	705-760	5' - 2h

Pri žíhaní je nutné zvoliť optimálnu kombináciu teploty času pre dokonalé odstránenie zbytkových napätí a aby zároveň nedošlo k prestarnutiu či rekryštalizácií. Na Obr. 2.3 je znázornená závislosť zbytkových napätí na čase pre rôzne teploty. Súčasti sú chladené na vzduchu alebo v peci. Chladienie v kvapalinách by mohlo spôsobiť vznik ďalších pnutí [17].



Obr. 2.3 Závislosť zbytkového napätia na teplote a čase žihania [17].

2.12.2 Procesné žihanie

Žihacie procesy k optimalizácii ťažnosti, obrobiteľnosti, štruktúrnej a rozmerovej stability sa označujú ako procesné žihanie. Vzhľadom k tomu, že zlepšenie jednej vlastnosti spravidla vedie k zhoršeniu inej vlastnosti, volí sa žihací proces vzhľadom podľa konkrétnych požiadaviek na výstupné parametre. Chladenie prebieha v peci alebo na vzduchu, ale aj tieto metódy sa líšia v dosiahnutých pevnostných charakteristikách. Typy žihania sú:

Rekryštalizačné žihanie – zlepšuje húževnatosť. Materiál sa ohreje hornú hranicu ($\alpha+\beta$), nasleduje výdrž a veľmi pomalé chladenie. Toto spracovanie má najväčší význam u CP titánu.

β -žihanie – dochádza k zlepšeniu húževnatosti. Žihanie sa uskutočňuje tesne nad teplotou β -prechodu. Doba ohrevu musí byť dostatočne dlhá, aby β -fáza bola transformovaná v celom objeme. Objemné kusy sú chladené vzduchom alebo kladené do vody.

Stabilizačné žihanie – behom ochladzovania môže dôjsť k transformácii β -fázy. Stabilizačné žihanie stabilizuje β -fázu, čím zabráni ďalšej transformácii počas ohrevného procesu. Tento proces má dve varianty. Žihanie izotermické, kde sa materiál ohrieva na 850 až 950 °C a na vzduchu chladí na 650 až 500 °C a dvojité žihanie, ktoré je podobné ako izotermické, ale medzi jednotlivými krokmi dochádza k medzi ochladeniu na teplotu okolia [17, 18].

3. POPIS SÚČASNÉHO VÝROBNEHO POSTUPU TITÁNOVÉHO VÝFUKU

Titánový výfuk sa do Jetsurfu inštaluje len niekoľko mesiacov. Výroba prvej série je prakticky prototypová a k tomu je prispôsobený aj súčasný výrobný postup jednotlivých dielov výfuku. Celá výroba výfuku je samozrejme prispôsobená strojovému vybaveniu firmy MSR Engines.

3.1 Návlačka

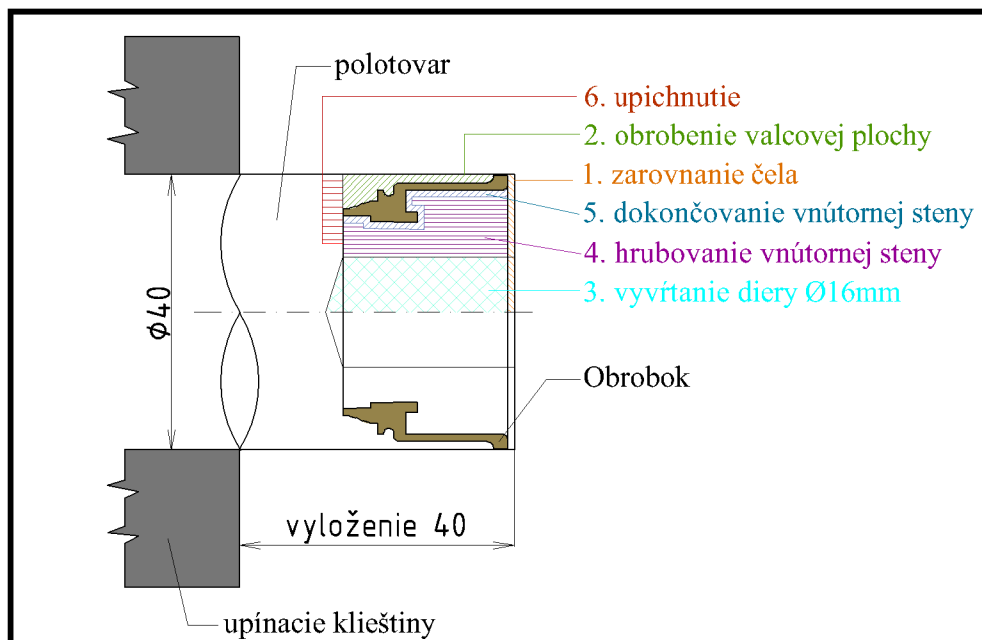
Návlačka (obr. 3.1) je valcový dutý diel spájajúci vonkajší a vnútorný kužeľ. Vytvára prechod medzi telom výfuku a montážnou prírubou. Je vyrábaná sústružením tyčového polotovaru na revolverovom CNC sústruhu značky Haas ST20. Výrobný postup návlačky pozostáva zo šiestich, po sebe idúcich operáciách. Pred zahájením výroby niekoľko desiatok kusov, je nevyhnutná technická príprava stroja, ktorú zabezpečuje obsluha. Príprava pozostáva z upnutia potrebných nástrojov do revolverovej hlavy a upnutia polotovaru do vretena. Príprava nástrojov je časovo náročná a priemerne trvá okolo 45min. Obsluha na základe výrobného postupu vyberie predpísané nástroje, ktoré musí v správnom poradí umiestniť do revolverového zásobníka na jednotlivé pozície. Polotovar je valcová titánová tyč o priemere 40mm a dĺžke 1 meter. Do vretena sa upína s vyložením 40mm. Poslednou časťou prípravy je kalibrácia zariadenia a s tým spojené určenie počiatku súradnicového systému stroja.



Obr. 3.1 Návlačka.

Celý výrobný proces sústruženia návlačky prebieha pod intenzívnym chladením emulziou kvôli zlej tepelnej vodivosti materiálu. Prvým bodom obrábacieho procesu je zarovnanie čelnej plochy polotovaru odobratím 1 mm materiálu. Nasleduje zmena nástroja. V druhom bode je obrobená valcová plocha návlačky. Vzhľadom k malému množstvu odoberaného materiálu je zvolený dokončovací nástroj a výsledný tvar je dosiahnutý jedným finálnym rezom. Treťou operáciou je vyvrtanie priechodnej diery $\phi d=16\text{mm}$. V štvrtej a piatej operácii je zväčšený priemer priechodnej diery z $\phi d=16\text{mm}$ na $\phi d=25\text{mm}$ hrubovacím a následne dokončovacím nožom na diery. V poslednej šiestej operácii je na valcovej ploche návlačky vytvorený zápich upichovacím nožom a následne upichnutie hotového dielu. Výrobný proces sa zastaví, dôjde k vyloženiu ďalších 40mm tyčového polotovaru a cyklus sa opakuje. Celkový strojný čas na vysústruženie jednej návlačky je približne 6 minút spolu s vyložením a upnutím polotovaru, ktoré činí približne pól minúty. Na obr. 3.2 je schematicky zobrazená

návlačka. Farebne a číselne sú vyznačené jednotlivé obrábacie operácie tak, ako nasledujú za sebou. Presná špecifikácia nástrojov a rezných podmienok je umiestnená v prílohe č. 1.



Obr. 3.2 Zobrazenie jednotlivých operácií obrábania návlačky.

3.2 Motorová príruha

Motorová príruha (Obr. 3.3) je diel výfuku umožňujúci spojenie výfuku s blokom motora. Vyrába sa sústružením valcového hliníkového polotovaru EN AW 2030 o priemere $\phi d=70\text{mm}$ na revolverovom CNC sústruhu z Haas ST20. Obdĺžnikový tvar a montážne diery sú frézované.



Obr. 3.3 Motorová príruha.

Postup pri sústružení je podobný ako pri výrobe návlačky. Používajú sa určené na obrábanie hliníkových zliatin. Prvá operácia je zarovnanie čela a obrobenie valcovej plochy s jedným nástrojom. V tretej operácii sa dokončovacím nástrojom vyhladí povrch vyhrubovanej valcovej plochy. Štvrtá operácia obsahuje vrtanie priechodnej

diery. Piata a šiesta operácia pozostáva z orubovania a dokončovania vyvrtanej diery. Frézovanie prebieha na trojosom frézovacom centre Haas VF2 SSYT. Vysústružený polotovár sa upne pomocou sklúčovadiel na uhlový otočný stôl. Dotykovou 3D sondou FH-3D TASTER značky Haimer (Obr. 3.4) sa zameria poloha dielu a určí sa počiatok súradnicového systému. Frézovanie prebieha na jedno upnutie. Obdĺžnikový tvar príruby vytvorí valcová monolitická fréza. Upínacie otvory pre skrutky M6 sú vyhlbené vrtákom. Po dokončení obrábacích operácií je motorová príruha zbavená nečistôt a pripravená na povrchovú úpravu. Povrchovou úpravou anodickej oxidácie získa príruha tvrdší, odolnejší povrch sfarbený do čierneho.

Anodická oxidácia hliníku: Princíp anodickej oxidácie spočíva vo vylučovaní umelo pripraveného oxidu hlinitého na povrch hliníkového dielu. Proces prebieha v kyseline sírovej pomocou jednosmerného prúdu. Súčiastka určená k povrchovej úprave je zapojená ako anóda. Rozkladom prostredia sa uvoľní iont OH. Reakciou iontu OH s hliníkom vzniká hydroxid, ktorý má vysoký elektrický odpor. Priechodom elektrického prúdu dochádza k ohrevu hydroxidu, čo spôsobuje dehydratáciu, vylúčenie molekúl vody z hydroxidu a na povrchu súčiastky sa usadí vytvorený oxid hlinitý. Podľa rôznych prímiesí je možné elektrochemickou anodickou oxidáciou dosiahnuť rôzne farebné odtiene povrchu dielu [19].



Obr. 3.4 Dotyková sonda FH-3D TASTER, Haimer.

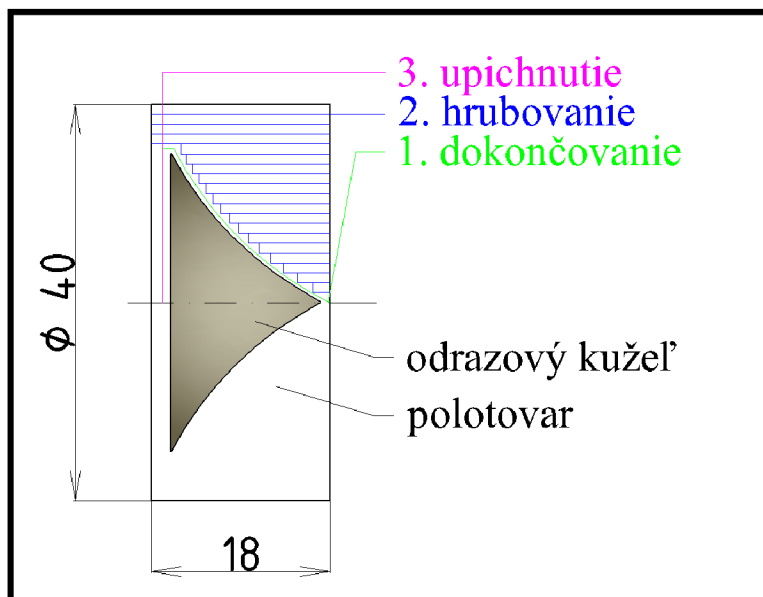
3.3 Reverzný kužel

Reverzný kužel je súčasťou reverzného viečka. Jeho význam spočíva v usmernení výfukových plynov smerujúcich z divergentného kužela do konvergentného kužela. Vyrába sa sústružením z valcového polotovaru o priemere $\phi d=40\text{mm}$ na revolverovom CNC sústruhu z Haas ST20. Po príprave nástrojov a upnutí polotovaru s vyložením 20mm je po zahájení obrábania prvou operáciou sústruženie kuželovej plochy. Ako prvé prebieha hrubovanie. Druhou operáciou je dokončovanie kuželovej plochy. V tretej operácii je obrobok upichnutý upichovacím nožom od zvyšku polotovaru. Stroj sa zastaví. Obsluha vykoná vyloženie a upnutie polotovaru. Cyklus sa opakuje.

Na Obr. 3.5 je zobrazený reverzný kužeľ navarený na odrazovom veku. Znázornený obrábací proces reverzného kužeľa s farebným a číselným rozlíšením jednotlivých sústružníckych operácií je na Obr. 3.6.



Obr. 3.5 Reverzný kužeľ navarený v reverznom veku.



Obr. 3.6 Operácie výrobného procesu.

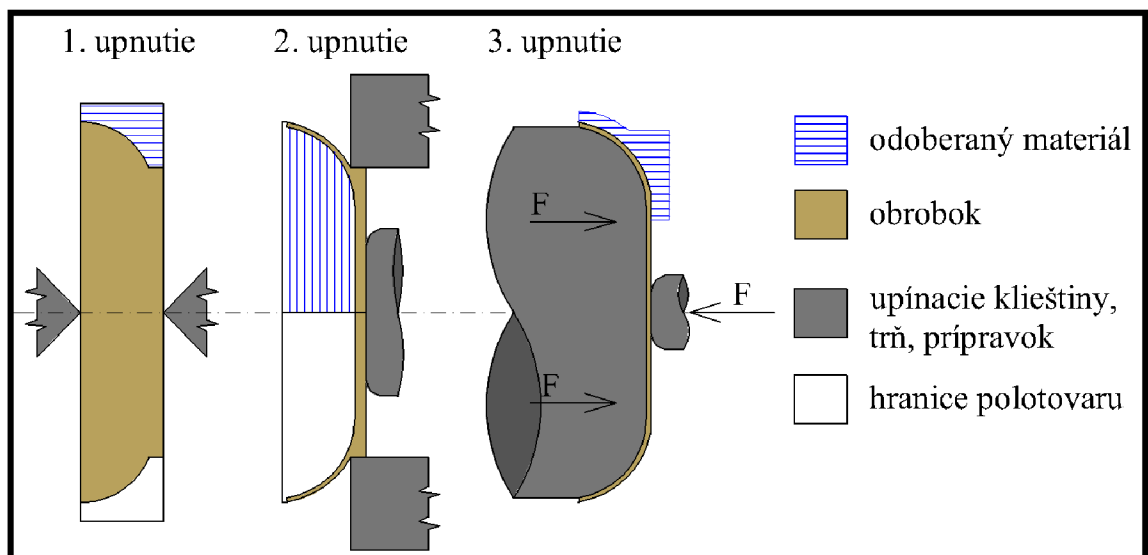
3.4 Reverzné veko

Reverzne veko (Obr. 3.7) je tenkostenný diel výfuku. Spolu s reverzným kužeľom tvorí koncovú časť výfuku. Z dôvodu časovej tiesne a technologickej dostupnosti boli reverzné veká vyrábané sústružením z valcového polotovaru o priemere $\phi d=90\text{mm}$ a výške 18mm. Ide o pomerne zložitý proces výroby, ktorý si vyžaduje až tri rôzne upnutia počas sústruženia jedného dielu. Na Obr. 3.8 je ilustračne znázornený proces výroby viečka. V prvej operácii je polotovár upnutý medzi upínacie trne. Hrubovacím nožom je na valcovej ploche vytvorené zaoblenie. Časť valcovej plochy je obrobená bez zaoblenia a bude slúžiť na upnutie obrobku do klieštin. V druhej operácii je obrobená vnútorná časť viečka. Kvôli vzniku tenkostenného profilu súčiastky počas sústruženia vnútornej steny musí byť obrobok podopretý, aby nedošlo k deformácii 0,8mm hrubej steny. Po vyhrubovaní vnútornej strany viečka nasleduje dokončovanie, ktorého súčasťou je vytvorenie diery o priemere $\phi d=6\text{mm}$ v ose symetrie súčiastky. V ďalšom

kroku je obrobok upnutý pomocou špeciálneho prípravku (Obr. 3.9) cez dieru $\phi d=6\text{mm}$. V poslednom kroku je dokončovacím procesom odstránený schodovitý profil slúžiaci na upnutie obrobku do klieštín počas druhej operácie a zjednotenie povrchu vonkajšej strany veka.



Obr. 3.7 Reverzné veko.



Obr. 3.8 Operácie výrobného procesu odrazového veka.



Obr. 3.9 Upínací prípravok na sústruženie odrazového veka.

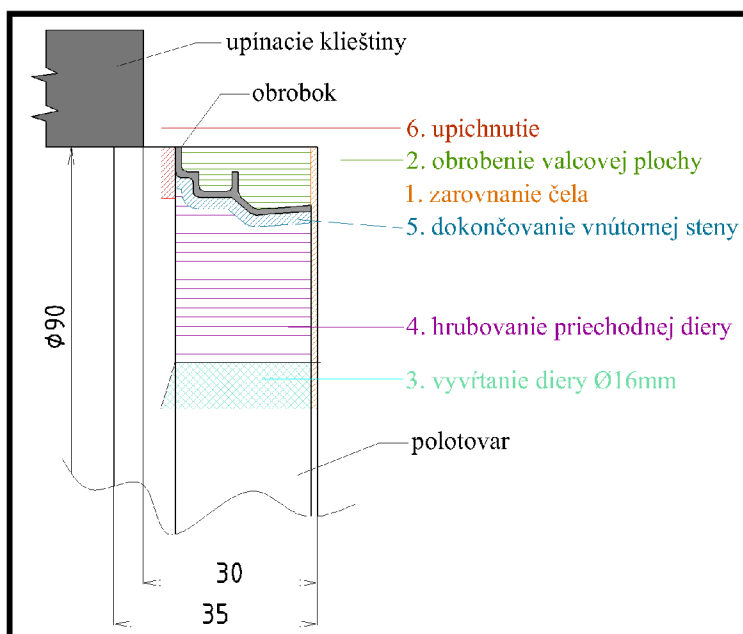
3.5 Príruba tesnenia

Príruba tesnenia je hliníková obruč, ktorou je titánový výfuk pevne upnutý v motorovej dutine surfu. Umiestnením gumového tesnenia na prírubu vznikne vodotesné, pevné a zároveň pružné uchytenie výfuku, čo má za následok pohlcovanie vibrácií spôsobených motorom. Presné vymedzenie polohy príruby na výfuku zabezpečuje kužeľová plocha vnútornej steny príruby, ktorá dosadá s miernym presahom na vonkajšiu stenu výfuku. Príruba je vyrobená sústružením valcového hliníkového polotovaru triedy EN AW 2030 o rozmeroch $\phi d=90\text{mm}$ a výške 35mm. Po obrábaní je príruha tesnenia rovnako ako motorová príruha povrchovo upravená anodickou oxidáciou, čo predĺži životnosť príruby v agresívnom prostredí. Na Obr. 3.10 je vidieť zafarbenie hliníkovej príruby do čierna.



Obr. 3.10 Príruba tesnenia.

Jednotlivé kroky obrábania príruby tesnenia sú znázornené na Obr. 3.11, kde je číselne a farebne rozlíšené poradie operácií. Ako prvé je zarovnané čelo, po ňom je v druhom kroku obrobena vonkajšia valcová plocha polotovaru na finálny tvar. V tretej operácii je do čelnej plochy obrobku vyvrtaná diera $\phi d=16\text{mm}$, ktorá je v štvrtom kroku zväčšená hrubovaním. V piatom kroku je dokončovacím nástrojom obrobena vnútorná stena príruby. V šiestom kroku je dokončený diel upichnutý.



Obr. 3.11 Operácie sústruženia príruby tesnenia.

3.6 Držiak trysky

Držiak trysky (Obr. 3.12) je valcový diel s priechodným vnútorným metrickým závitom M5 navarený na plášti výfuku. Závit slúži na umiestnenie trysky z chróm niklovej austenitickej ocele triedy 1.4301, ktorá vstrekuje do komory výfuku vodný aerosól za účelom schladenia výfukových plynov a výfuku samotného.



Obr. 3.12 Držiak trysky.

Držiak trysky je vyrobený sústružením titánovej valcovej tyče ASTM grade 2 o priemere $\phi d=15\text{mm}$. V prvom kroku sa sústruží čelná a valcová plocha univerzálnym nožom s VBD na konečný tvar. V druhom kroku je do čelnej plochy vyvrtaná diera o priemere $\phi d=4,2\text{mm}$, do ktorej je v kroku štvrtom vyrezaný metrický závit M5x0,8 nožom na závit. Na záver v piatom kroku je dokončený diel upichnutý a cyklus sa opakuje. V Tab. 3.1 sú vypísané hodnoty jednotlivých sústružníckych operácií a použité rezné nástroje.

Tab. 3.1 Parametre jednotlivých operácií sústruženia držiaka trysky.

1	typ operácie	Hrubovanie + dokončovanie		
	nástroj	nosič	DWLNL 2515 M08	
		VBD	WNMG 080408 MP TT5080	
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	1500	
		posuv na otáčku f [mm/ot]	0,1	
hrúbka odoberanej vrstvy h_D [mm]		1		
2	typ operácie	vrtanie		
	nástroj	vrták	DIN1897, d4,2x22, HSS-E-WT	
	rezné podmienky	posuv na otáčku f [mm/ot]	0,05	
		rezná rýchlosť v_c [m/min]	10	
3	typ operácie	rezanie závitů		
	nástroj	závitník	DIN13	
	rezné podmienky	posuv na otáčku f [mm/ot]	0,8	
		rezná rýchlosť v_c [m/min]	5	
4	typ operácie	upichnutie		
	nástroj	nosič	687.0016-D	
		upichovací nôž	70364600	
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	800	
		posuv na otáčku f_1, f_2 [mm/ot]	0,02 ; 0,04	

3.7 Vonkajší a vnútorný kužeľ výfuku

Vonkajší konvergentný a vnútorný divergentný kužeľ sú diely tvoriace telo výfuku. Geometricky sú rozdielne, postup výroby však majú úplne rovnaký. Vyrábajú sa zložitou technológiou tvárnenia 0,8mm hrubých plechov. Materiálom je komerčne čistý titán ASTM grade 2. Každý z kužeľov výfuku sa skladá z dvoch symetrických polovic v tvare písmena U. Plechové Polotovary v tvare lichobežníka sú rezané laserom a dodáva ich kooperačná firma. Lisovanie prebieha v hliníkových formách (Obr. 3.13) za studena. Proces upnutia polotovaru do formy a samotného lisovania trvá priemerne 20min. Lisovací nástroj sa skladá z troch hlavných častí: horný nástroj, pridržiavač a dolný nástroj (matrica). Aby nástroje do seba správne zapadli počas lisovania, sú opatrené vodiacimi kolíkmi. Pevné upnutie polotovaru medzi matricou a pridržiavačom zabezpečuje osem upínacích skrutiek. Pred každým lisovaním musí byť nástroj a polotovar dôkladne namazaný za účelom zníženia koeficientu trenia medzi povrchom nástroja a lisovaného polotovaru.



Obr. 3.13 Lisovací nástroj pre vonkajší kužeľ

Titán pri tvárnení za studena dosahuje vysoké miery odpruženia, čo sa prejaví na spätnej deformácii výlisok po vybratí z formy. Takto zdeformovaný výlisok v tvare postupne sa zužujúceho U profilu (Obr. 3.14) je potom umiestnený a upnutý do masívneho oceľového prípravku (Obr. 3.15) určeného na tepelné spracovanie. Pre každý z kužeľov sa používa rozdielny samostatný prípravok. Teda jedná sa o dva typy prípravkov s rozdielnou veľkosťou a tvarom geometrie. V prípravku je výlisok upnutý tak aby v napnutom stave dosiahol požadovaný pól kruhový tvar.



Obr. 3.14 Titánový výlisok vonkajšieho kužeľa.



Obr. 3.15 Napínací prípravok pre tepelné spracovanie na vonkajší kužeľ.

Nepoddajnosť titánu pri upínaní do prípravku sa prejaví na čase upínania, ktorý sa pohybuje medzi 15 až 20 minútami. Prípravok s upnutým výlisokom je umiestnený do žihacej pece (Obr. 3.16) vyhriatej na teplotu 650°C na dobu 30 min. Pri danej teplote sa odstráni vnútorné pnutie v materiáli a eliminuje sa odpruženie. Je dôležité zvoliť vhodnú kombináciu času a teploty tak, aby boli v uvedenom čase odstránené vnútorné pnutia a zároveň aby nedošlo k nežiaducemu prestarnutiu či nežiaducej rekryštalizácii. Po tepelnom spracovaní sa necháva diel s prípravkom voľne chladnúť na vzduchu. Nerovnomerné a prudké schladenie napríklad vo vode by mohlo spôsobiť opätovný vznik vnútorného pnutia [17, 18].



Obr. 3.16 Žihacia pec.

Po vychladnutí je výlisok vyňatý z prípravku a pripravený na odstránenie prebytočných okrajov. Okraje sa odstraňujú frézovaním. Frézovanie prebieha na 3-osom frézovacom centre Haas VF2 SSYT. Použitým nástrojom je rýchlo-rezná fréza HSS-E Co10, DIN844, o priemere $\phi d=12\text{mm}$ s vyložením 38mm upnutá do upínača AD40ER16A70 (Obr. 3.17). Na frézovací stôl je upnutý špeciálne vyrobený prípravok, ktorý je vidieť na Obr. 3.18. Poloha prípravku sa zameria pomocou už spomínanej

dotykovej 3D sondy FH-3D TASTER. Na základe zmeraných polôh jednotlivých rohov prípravku sa pomocou autokorekcie nastaví súradnicový systém stroja.



Obr. 3.17 HSS fréza s upínačom.



Obr. 3.18 Frézovací prípravok pre vnútorný kužeľ (hore) a vonkajší kužeľ (dole).

Výlisok sa upne do frézovacieho prípravku. Frézovanie tenkostennej súčiastky je náročný proces vyžadujúci prítomnosť obsluhy počas procesu, ktorá v prípade potreby musí vedieť zakročiť. Počas frézovania obvodu súčiastky hrozí vplyvom prenosu vibrácií z nástroja rozochvenie obrobku, čo môže spôsobiť neopraviteľné poškodenie súčiastky v podobe vytrhnutia alebo trvalej deformácie materiálu. Strojný čas frézovania je 5 min. Rezná rýchlosť nástroja je $15\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvom $f_z=0,084\text{mm}$. Na Obr. 3.19 je zobrazený diel kužeľa pred frézovaním okrajov (vpravo) a po frézovaní (vľavo).



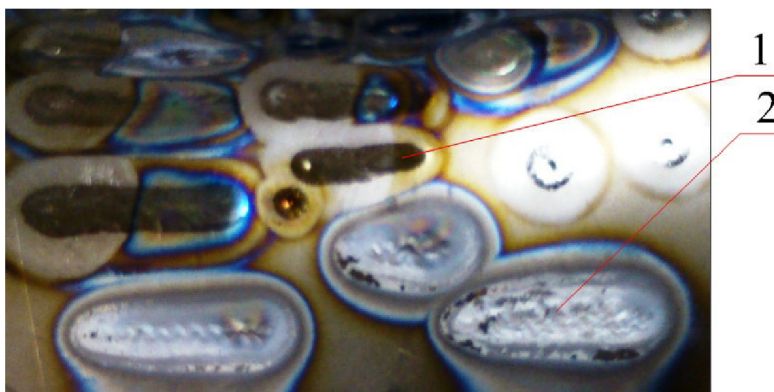
Obr. 3.19 Obrobený titánový diel vnútorného kužeľa.

Po frézovaní postupujú diely vonkajšieho a vnútorného kužeľa na zváranie. Zváranie kužeľov výfuku prebieha ručne technológiou TIG. Vzhľadom k tomu, že ide o zváranie tenkostenných titánových dielov, kvalita a prevedenie zvaru závisí na zručnosti a schopnostiach zvárača. Zvar zabezpečuje zvárací aparát TIG200P značky Jasic (obr. 3.20).



Obr. 3.20 Zvárací aparát Jasic, TIG200P [22].

Aparát má prednastavenú funkciu pre-flow. Prúd nastavuje zvárač podľa prevedenia skúšobných zvarov na vzorku pred zváraním samotných kužeľov. Na Obr. 3.21 je vidieť prevedenie skúšobných zvarov. Zváranie Titánu je náročná činnosť vzhľadom k vysokej tendencii reagovať so vzdušným kyslíkom pri zvýšenej teplote prostredia. Ak dôjde takzvanému prepáleniu zvaru, na čo je titán veľmi náchylný, na zvare sa objaví bielo-šedý povlak, ktorý je výsledkom prudkej oxidácie. Takto vzniknutý zvar má minimálnu až žiadnu životnosť, je neestetický a je nemožné naň aplikovať akúkoľvek povrchovú úpravu. Korektný zvar musí mať kovovú farbu pôvodného materiálu s prípadným zlatistým odleskom. Vzhľadom k tomu, že sa nejedná o pevnostné namáhané zvary je tolerovaný aj tenký cca 1 až 1,5 mm modro-dúhový pás po obvodě zvaru.



Obr. 3.21 Skúšobné zvary: poz.1 - vyhovujúci zvar, poz.2 – nevyhovujúci zvar.

Nastavenie prúdu je rôzne a pohybuje sa medzi $I=14-15A$. Zváranie prebieha v ochrannej atmosfére, ktorú tvorí zmes plynov s prevažným obsahom argónu, viac ako 90%. Dva symetrické diely sú k sebe priložené hranou na hranu (Obr. 3.22) . Priložením dielov k sebe frézovanými kontaktnými plochami vzniká minimálna medzera max 0,1mm. Zváranie prebieha bez prídavného materiálu, ten sa používa len v prípade jeho potreby a je to zvárací drôt VBC0073(6AL-4V)TI. Aby nedochádzalo k oxidácii zváraného povrchu z vnútornej strany kužeľa je kužeľ utesnený hliníkovými zátkami

(Obr. 3.28), pričom jednou zátkou (Obr. 3.29) je do kužela zavedený prívod ochranného plynu, argónu.



Obr. 3.22 Kuželové polotovary pred zvarením

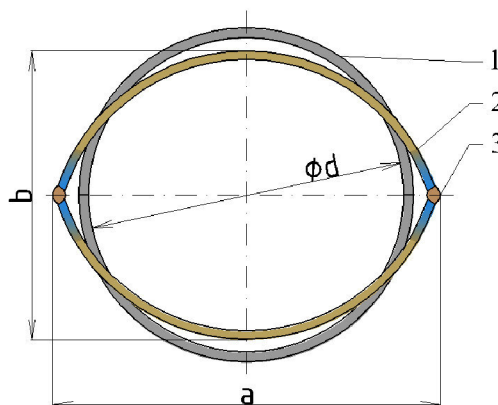


Obr. 3.28 Zátka s prívodom inertného plynu.



Obr. 3.29 Hliníkové zátky.

Tepelným zaťažením zvaraného materiálu dochádza opäť k vzniku vnútorných pnutí. Vnútorné pnutia spôsobujú deformáciu zvaraného kužela, ktorá sa prejaví zmenou tvaru prierezu kužela z pôvodného kruhového na slzavo-oválny (Obr. 3.30).



Obr. 3.30 Schéma deformácie zvaraného dielu.

- poz. 1 – profil pôvodného tvaru kužela pred zvarením
- poz. 2 – profil zdeformovaného kužela po zvaraní
- poz. 3 – zvar

Vznikajúca deformácia sa eliminuje už počas zvárania osádzaním masívnych oceľových obručí (Obr. 3.31) na zváraný kužeľ. Obruč drží požadovaný tvar kužeľa a ponecháva sa na zvarenci aj počas ďalšej tepelnej úpravy, ktorá nasleduje po ukončení zvárania. Čas tepelného spracovania je opäť 30 min. Po vyžíhaní a vychladnutí na vzduchu sa na oboch kužeľoch skrátia konce s presahom na požadovaný rozmer pásovou pílou. Do vonkajšieho kužeľa sa vyvrtávajú montážne otvory pre umiestnenie držiaka trysky a podpier vnútorného kužeľa.



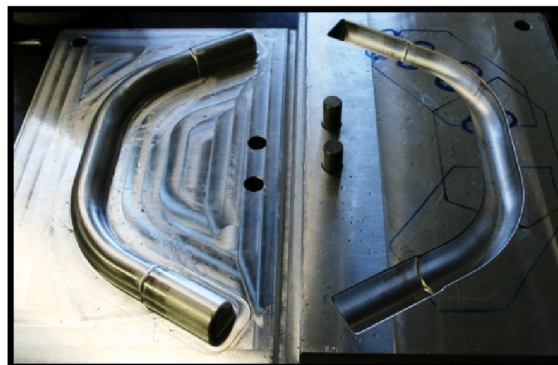
Obr. 3.31 Tvarová oceľová obruč.

3.8 Výstupné výfukové kolienko

Výfukové kolienko umožňuje odvod výfukových plynov von z výfuku. Výrobný postup výfukového kolienka (Obr. 3.32) je identický s výrobným postupom kužeľa. Vzhľadom na výrazne menšie rozmery súčiastky je výrobný proces jednoduchší, časovo menej náročnejší a nevyžaduje tepelné spracovanie. Tvarovo pripravené plechové polotovary sú dodávané kooperačnou firmou. Lisovací nástroj na Obr. 3.33 je prispôsobená k lisovaniu dvoch dielov kolienka súčasne. Materiálom výfukového kolienka je titánový plech ASTM grade 2 hrúbky 0,8mm.



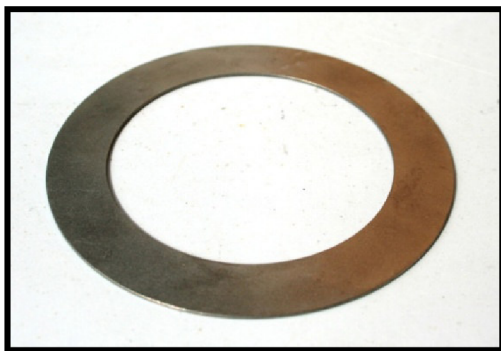
Obr. 3.32 Výfukové kolienko.



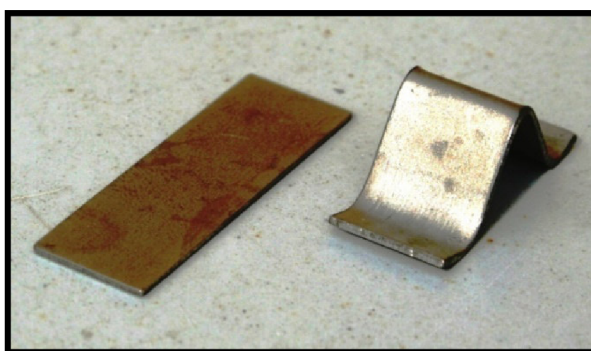
Obr. 3.33 Lisovací nástroj výfukového kolienka.

3.9 Uzáver a podpera

Diely uzáver a podpera sú tenkostenné diely výfuku z titánového plechu ASTM grade 2. Oba komponenty dodáva kooperačná firma v podobe laserových výpalkov. Uzáver slúži k zaisteniu hliníkovej príruby tesnenia proti uvoľneniu. Ide o plechové medzikružie (Obr. 3.34), ktoré umožňuje použitie ekonomicky úspornejšej hliníkovej príruby. Uzáver sa priloží k nalisovanej príruby tesnenia z užšej strany, odkiaľ by hrozilo možné uvoľnenie. Uzáver sa privarí k plášťu výfuku na šiestich miestach po obvode vonkajšieho kužeľa.



Obr. 3.34 Uzáver.



Obr. 3.35 Podpera.

Podpera v tvare písmena A je dodávaná v podobe obdĺžnikových výpalkov rozmeroch 50x15 mm. Požadovaný tvar sa dosiahne lisovaním do malej hliníkovej formy pomocou stolového hydraulického lisu. Podpery sa navárajú po vnútornom obvode vonkajšieho kužela tak, že podopierajú vnútorný kužel. Takýmto spôsobom podopierania je vnútorný kužel voči vonkajšiemu kuželu vždy osovo centrovany a pôsobením teplotného namáhania môže voľne dilatovať.

3.10 Popis skladania titánového výfuku.

Krok 1: Vnútorný kužel sa nasadí na návlačku a po obvode sa vzduchotesne privarí za použitia prídavného materiálu. Počas zvarovania je komora kužela utesnená a vyplnená zväracím plynom.

Krok 2: Reverzný kužel je privarený k reverznému veku (Obr. 3.5).

Krok 3: Na návlačku s vnútorným kuželom je privarený vonkajší kužel, tiež za použitia prídavného materiálu.

Krok 4: Na rozšírenom konci výfuku sa medzi vonkajší a vnútorný kužel vloží trojica A- podpier v rozmiestnení 120° od seba tak aby sa podpery svojou základňou opierali a prekryvali predvrtané otvory na vnútornej stene vonkajšieho kužela. Cez predvrtané diery sa podpery z vonkajšej strany privaria o vonkajší kužel.

Krok 5: Na rozšírený koniec výfuku sa po celom obvode vzduchotesne navarí reverzné veko. Počas zvarovania je výfuk vyplnený ochranným plynom.

Krok 6: Na vonkajší plášť výfuku sa nasadí príruha tesnenia spolu s tesnením. Nalisuje sa do požadovanej vzdialenosti od konca výfuku.

Krok 7: K nalisovanej príruhe tesnenia sa nasadí uzáver a privarí sa v šiestich miestach každých 60° po obvode.

Krok 8: Na vonkajší plášť výfuku sa na predvrtané diery privarí držiak trysky a výfukové kolienko.

Poskladaný a zvarovaný výfuk (Obr. 3.36) je pripravený na umiestnenie do surfu. Motorová príruha sa na návlačku výfuku len nasádza bez zvarovania počas finálnej montáže surfu.



Obr. 3.36 Titánový výfuk.



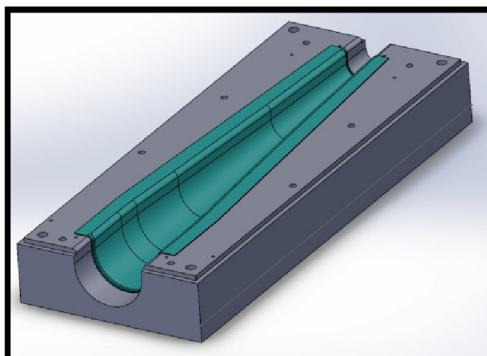
4. ROZBOR PROBLEMATIKY

4.1 Problematika ohýbania tenkostenných dielov titánového výfuku

V kapitole 3 bol rozobraný súčasný postup výroby titánového výfuku. Zvláštna pozornosť bola venovaná výrobe lisovaných tenkostenných dielov výfuku a to vonkajšiemu a vnútornému kužeľu. Oba uvedené diely sú tvárnené za studena. Tvárnenie za studena so sebou nesie známy nežiaduci jav a to je odpruženie. Pri tvárnení dielov dochádza k pomerne veľkému odpruženiu, približne 20-25%. Riešením vzniknutého odpruženia je použitie tvarovacieho prípravku a následné tepelné spracovanie. Upínanie do prípravku je časovo náročné a vyžaduje si pomerne vysokú zručnosť pracovníka. Použitie prípravku k získaniu požadovaného tvaru bolo perspektívne len pri prototypovej výrobe, keď sa vyrobilo len niekoľko testovacích výfukov. Pre zefektívnenie výroby by bolo potrebné vyrobiť minimálne 6 – 10 kusov upínacích prípravkov. Výroba upínacích prípravkov by bola finančne a časovo náročná. Hodnota jedného prípravku je približne 30 000,- Kč. Upínací prípravok je svoju robustnou konštrukciou a rozmermi náročný na manipuláciu či skladovanie. Zaradením viacerých prípravkov do výroby vzniká ďalší problém a tým je objemová kapacita žihacej pece. Ohrevom prípravkov na žihaciu teplotu sa zbytočne predlžuje doba žihania, čo má za následok väčšiu spotrebu energie. Manipulácia ťažkých prípravkov zahriatych na vysokú teplotu zvyšuje riziko pracovného úrazu. Vyradenie žihacieho prípravku z procesu výroby si vyžaduje úpravu ostatných operácií do takej miery, aby nahradili jeho význam. V tomto smere je potrebné upraviť proces tvárnenia tak, aby bolo vznikajúce odpruženie eliminované. Najčastejšie sa problematika nežiaduceho odpruženia rieši úpravou geometrie nástroja. Aby bolo možné určiť zmenu tvaru nástroja je potrebné vykonať analýzu tvárniaceho procesu, previesť výpočty teoretických hodnôt odpruženia a porovnať hodnoty teoretické so skutočnými.

4.2 Analýza ohýbania

Z technologického hľadiska možno definovať súčasný proces tvárnenia za kombináciu ohýbania a ťahania plechu. Kvôli kužeľovitému tvaru dielu má nástroj (Obr. 4.1) zložitejší tvar ako klasická U lišta. Nástroj je opatrený pridržiavačom, ktorého funkcia je v tomto prípade usmerniť polotovar počas ohýbania a nie ho pridržiavať, resp. fixovať pôsobiacou prítlačnou silou, ako pri bežnom ťahaní. Takýto spôsob tvárnenia má výhodu nulového zoslabenia hrúbky steny výlisku. Ťahová zložka tvárnenia sa prejaví na miestach zmeny sklonu kužeľa, kde vzniknú malé prelisy a na zaoblených hranách ťažnice, kde pôsobením pridržiavača dochádza v istej miere ťahaniu materiálu po zaoblenej hrane nástroja. Z toho vyplýva že hlavnou zložkou procesu zmienenej tvárnenia tvorí ohyb.

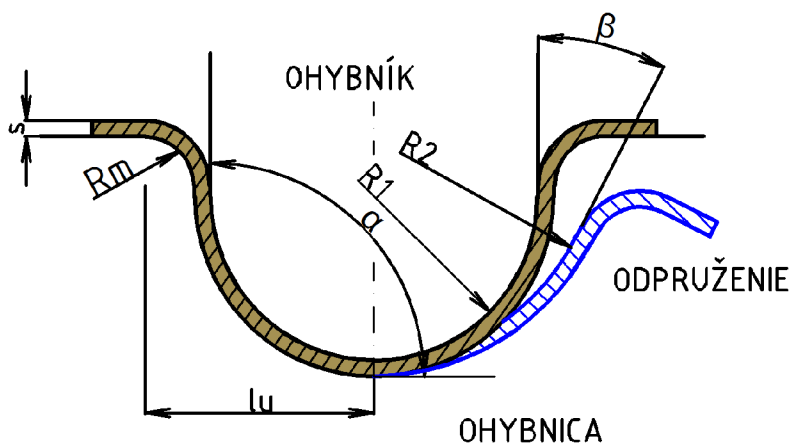


Obr. 4.1 3D model súčasného spodného nástroja.

Ohýbanie je trvalé deformovanie materiálu, pri ktorom sa pôsobením lokálnych síl alebo momentov trvalo mení tvar súčiastky z plechu. Ohýbanie sa vykonáva štandardne za studena. Kritické hodnoty ťahových napätí pri ohýbaní sú menšie než je pevnosť materiálu v ťahu. Elementárny rozbor procesu ohýbania možno posúdiť zo zjednodušeného prípadu ohýbania širokého pásu plechu. Riešenie pre široké pásy možno aplikovať za podmienky podstatne väčšej šírky než hrúbky materiálu $b \gg s$, ktorá je v tomto prípade splnená. Táto podmienka umožňuje prevedenie zjednodušenia, keď sa šírka pásu nemení. Deformácia v smere šírky pásu je nulová a materiál pásu je ideálne tuho-plastický, tzn. $\varepsilon_{el} = 0$, $\sigma_k = \text{konšt}$ [16, 20].

4.3 Geometrický model

Za uvedených podmienok je možné zostaviť zjednodušený geometrický model, ktorý vychádza z prierezu ohýbaného polotovaru. Vzhľadom na postupne sa meniacu geometriu U profilu ohýbanej súčiastky je uvažovaný segment nulovej šírky.



Obr. 4.2 Geometrický model ohybu.

- l_U [mm] - Vzdialenosť medzi stredmi opierok ohybnice
- R_1 [mm] - polomer ohybu pred odpružením
- R_2 [mm] - polomer ohybu po odpružení
- s [mm] - hrúbka materiálu
- β [°] - uhol odpruženia
- α [°] - uhol otvorenia
- R_m [mm] - polomer zaoblenia ohybnice

4.4 Matematický model

Podľa uvedeného geometrického modelu je aplikovaný štandardný výpočtový model zameraný na problematiku a analýzu ohýbania.

4.4.1 Polomer neutrálnej plochy

Znalosť polohy neutrálnej plochy je dôležitá k stanoveniu rozmeru počiatočného polotovaru. Neutrálna plocha je hranica medzi vrstvou materiálu, v ktorej dochádza počas ohýbania k predlžovaniu a vrstvou materiálu, v ktorej dochádza počas ohýbania k stláčaniu, teda skrúteniu materiálu (Obr. 4.3).

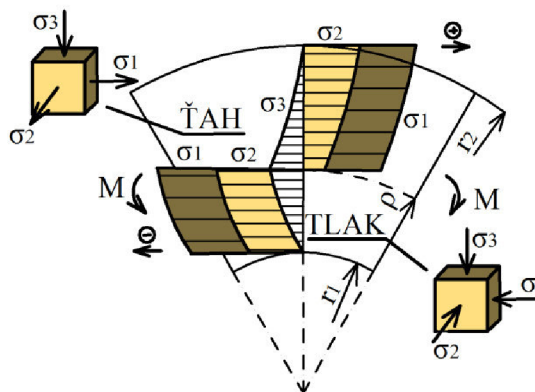
Polomer neutrálnej plochy pre ohýbanie s veľkým polomerom je možno vypočítať zo vzťahu (4.1). Pre ohýbanie s veľkým polomerom musí platiť vzťah $R_0 / s \geq 12$, kde R_0 je polomer ohybu a s hrúbka materiálu [16, 20].

$$\rho = \sqrt{r_1 \cdot r_2} \quad [mm] \quad (4.1)$$

ρ [mm] - polomer neutrálnej plochy

r_1 [mm] - vnútorný polomer ohybu

r_2 [mm] - vonkajší polomer ohybu



Obr. 4.3 Priebeh napätí pri ohýbaní [16].

Podľa vzťahu (4.1) vyplýva, že polomer neutrálnej plochy je geometrickým priemerom vnútorného a vonkajšieho polomeru ohýbaného pásu. Rastúcim zakrivením sa neutrálna plocha presúva smerom k vnútornému povrchu ohýbaného pásu. Geometrický priemer je vždy menší než aritmetický stred. Veľkosť polomeru neutrálnej plochy sa mení v závislosti na veľkosti priemeru kužeľa v danom mieste [21].

Pružne plastický ohyb je možné uskutočniť len ak sa polomer ohýbacieho nástroja pohybuje v rozmedzí stanoveného minimálneho (R_{\min}) a maximálneho (R_{\max}) polomeru ohybu. Polomery R_{\min} a R_{\max} sa získavajú výpočtovým vzťahom. Vzhľadom na mnohonásobne väčší polomer ohýbania voči hrúbke materiálu je výpočet R_{\min} nepodstatný. Výpočtový vzorec maximálneho polomeru ohybu R_{\max} je uvedený vo vzťahu (4.2) [16, 20].

$$R_{\max} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \quad [mm] \quad (4.2)$$

R_e [Mpa] - medza sklzu

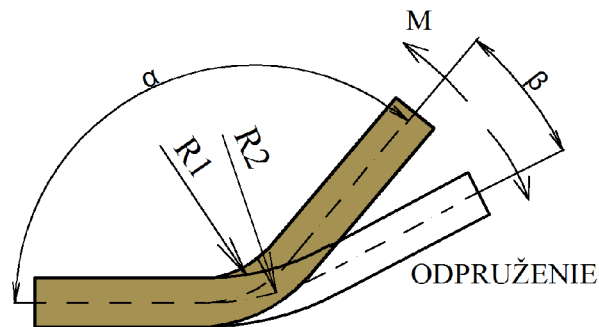
E [Gpa] - modul pružnosti

R_{\max} [mm] - maximálny polomer ohybu

s [mm] - hrúbka materiálu

4.4.2 Odpruženie po ohybe

Výrazný vplyv na ohýbanie má pružná deformácia. Pružná deformácia sa po ohýbaní nepriaznivo prejaví odpružením. Odpruženie možno definovať ako snahu ohýbaného materiálu vrátiť sa do pôvodného stavu po skončení pôsobenia ohýbajúcich síl. Odľahčenie sa prejaví zväčšením uhlu otvorenia α_1 o uhol odpruženia β , pričom dôjde k zmene krivosti polomerov pred a po odpružení R_1 a R_2 . Rozdiel týchto krivostí je práve tá krivosť, ktorá je vratná. Vratná krivosť bola vyvolaná podľa teórie pružnosti ohybovým momentom M za danej ohybovej tuhosti EJ . Schéma odpruženia po ohybe je zachytená na Obr. 4.4 [16].

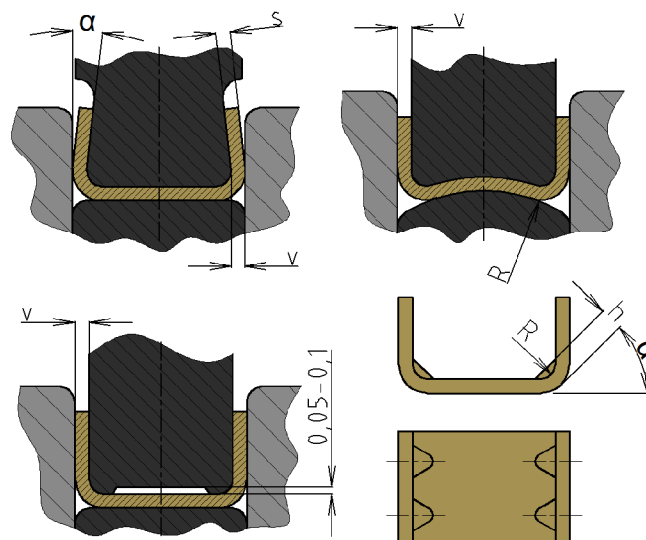


Obr. 4.4 Schéma odpruženia po ohybe [16]

Na veľkosť odpruženia majú vplyv: [16]

- mechanické vlastnosti ohýbaného materiálu
- pomer polomeru ohybu k hrúbke materiálu $\frac{R_0}{s}$ čím menší pomer tým menšie odpruženie
- veľkosť uhlu otvorenia α_1
- veľkosť merného tlaku pri kalibrácii
- zoradenie lisu
- vôľou medzi činnými časťami ohýbadla
- konštrukčným riešením ohýbadla a pod.
- prevedenie uhlu , V alebo U ohyb.

Možností zabráneniu odpruženia materiálu po ohybe je mnoho. Pri ohýbaní U ohybu možno zabrániť odpruženiu po ohybe niekoľkými spôsobmi. Na Obr. 4.5 sú zobrazené štyri základné spôsoby. [16]



Obr. 4.5 Spôsoby odstránenia výrazného odpruženia po U ohybe [16]

- podbrúsením ohybníku o uhol α a vytvorením tzv. zápornej vôľe $v=(0,8 \text{ až } 0,9)s$
- zaoblením dolnej časti uhybnice či vyhadzovača
- Spevnením materiálu v rohoch kalibráciou oblasti ohybu.
- vytvorením výstužných rebier, prelisov.

Pre výpočet približného odpruženia vzniknutého pri ohýbaní možno použiť výpočtový vzťah (4.3). [20]

$$\tan \beta = 0,75 \cdot \frac{l_U}{k \cdot s} \cdot \left(\frac{R_e}{E} - 1 \right) \quad (4.3)$$

R_e [Mpa]	- medza sklzu
E [Gpa]	- modul pružnosti
s [mm]	- hrúbka materiálu
l_U [mm]	- vzdialenosť medzi stredmi opierok ohybnice
k	- súčiniteľ určenia polohy neutrálnej plochy
β [°]	- uhol odpruženia

Vzťah pre výpočet vzdialenosti stredu opierky ohybnice a ohybníka l_U (4.4) [20]

$$l_U = R_m + R_O + 1,2 \cdot s \quad [mm] \quad (4.4)$$

R_m [mm]	- polomer zaoblenia funkčnej hrany ohybnice
R_O [mm]	- polomer ohybu ohybníka
s [mm]	- hrúbka materiálu

Vzťah pre výpočet súčiniteľa polohy neutrálnej osi k (4.5) [20]

$$k = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{R_1 + 0,5s}{R_2 + 0,5s} \quad (4.5)$$

R_1 [mm]	- polomer ohybu pred odpružením
R_2 [mm]	- polomer ohybu po odpružení
s [mm]	- hrúbka materiálu

U ohýbaných dielov s polomerom ohybu ,ktorého podiel voči hrúbke materiálu $\frac{R_O}{s}$ je väčší než 20, je vhodnejšie použiť vzorec (4.6) [23]

$$\beta = (180 - \alpha) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) \quad [^\circ] \quad (4.6)$$

β [°]	- uhol odpruženia
α [°]	- uhol otvorenia
R_1 [mm]	- polomer ohybu pred odpružením
R_2 [mm]	- polomer ohybu po odpružení

Pre výpočet vzťahu (4.5) a (4.6) je potrebné poznať polomer dielu po odpružení. Na lisovanom diele vnútorného kužeľa (Obr 4.6) bol nepriamou metódou zmeraný polomer po odpružení na štyroch miestach rovnomerne vzdialených od seba.



Obr. 4.6 Diel vnútorného kužeľa po ohybe.

4.5 Výpočet odpruženia po ohybe

Výpočet maximálneho polomeru ohybu R_{max} zo vzťahu (4.2)

$$R_{max} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left(\frac{103 \cdot 10^9}{350 \cdot 10^6} - 1 \right) = 117,3 \text{ mm}$$

Najväčší polomer ohybu pri ohýbaní vonkajšieho kužeľa je $R_O=40\text{mm}$, z toho vyplýva splnenie podmienky $R_O < R_{max}$, pre vznik plastickej deformácie v ohybe.

Výpočet odpruženia ohybu zo vzťahu (4.3)

$$\tan \beta = 0,75 \cdot \frac{l_U}{k \cdot s} \cdot \left(\frac{R_e}{E} - 1 \right) = 0,75 \cdot \frac{0,0334}{0,76 \cdot 0,8} \cdot \left(\frac{350 \cdot 10^6}{103 \cdot 10^9} - 1 \right) = -0,04$$

$$\rightarrow \beta \cong 12^\circ$$

Výpočet vzdialenosti stredu opierky ohybnice a ohybníku l_U podľa vzťahu (4.4)

$$l_U = R_m + R_O + 1,2 \cdot s = 6 + 26,45 + 1,2 \cdot 0,8 = 33,41 \text{ mm}$$

Výpočet súčiniteľa polohy neutrálnej osi k podľa vzťahu (4.5)

$$k = \frac{R_1 + 0,5s}{R_2 + 0,5s} = \frac{26,45 + 0,5 \cdot 0,8}{35 + 0,5 \cdot 0,8} = 0,76$$

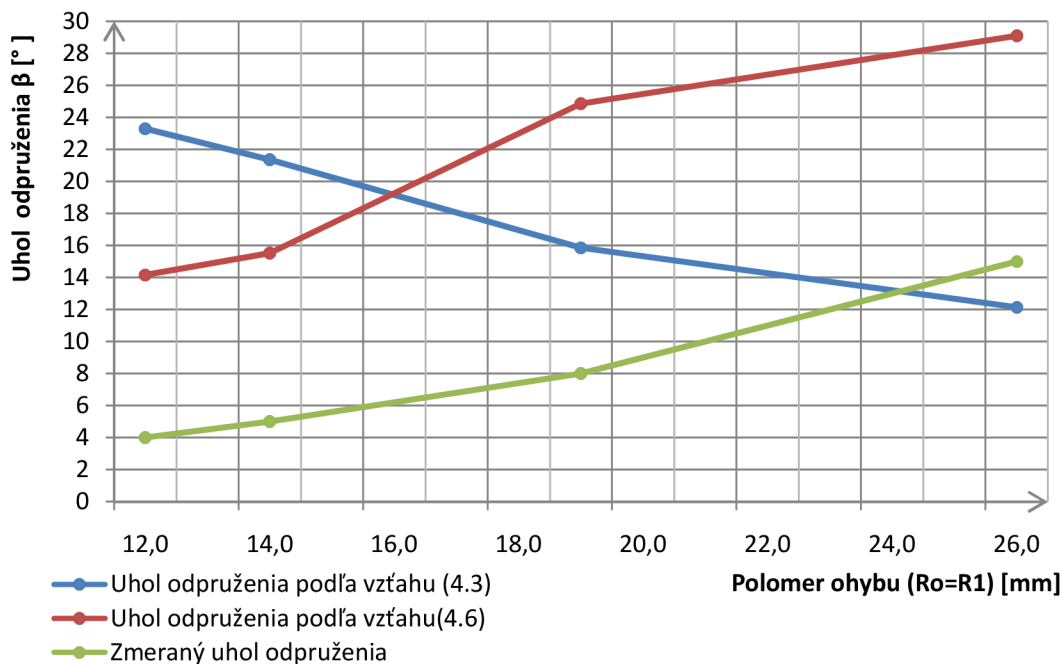
Výpočet odpruženia ohybu podľa vzťahu (4.6)

$$\beta = (180 - \alpha) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) = (180 - 90) \cdot \left(\frac{35}{26,45} - 1 \right) = 29^\circ$$

Výpočet odpruženia bol prevedený v štyroch miestach lisovaného diela rovnomerne vzdialených od seba. Výsledky vypočítaných hodnôt sú zaznamenané v Tab. 4.1. Na Obr. 4.7 je vykreslený graf odpruženia v závislosti od polomeru ohýbacieho nástroja.

Tab. 4.1 Hodnoty odpruženia získané výpočtom a meraním.

č.	uhol odbruženia β [°]			polomer				koef.	vzdial.
	výpočet (4.3)	výpočet (4.6)	meranie	R1 [mm]	R2 [mm]	Rm [mm]	Rmax [mm]	k	lu [mm]
1	23,3	14,2	4,0	12,96	15,00	6,00	117,31	0,86	19,92
2	21,4	15,5	5,0	14,50	17,00	6,00	117,31	0,85	21,46
3	15,9	24,9	8,0	19,59	25,00	6,00	117,31	0,78	26,55
4	12,1	29,1	15,0	26,45	35,00	6,00	117,31	0,75	33,41



Obr. 4.6 Graf nameraných a vypočítaných hodnôt odpruženia.

Pri porovnaní vypočítaných hodnôt odpruženia so skutočnými hodnotami je zrejme, že vypočítané hodnoty sa líšia od tých skutočných. Rozdiel medzi skutočnými a teoretickými hodnotami je zrejme zapríčinený príliš jednoduchým matematickým modelom, ktorý vychádza z ohýbania U profilu s konštantným polomerom neurčitej šírky. Pri výpočte síce boli brané v úvahu všetky vlastnosti ohýbaného materiálu, ale takýto matematický model nezohľadňuje postupne sa meniaci polomer ohybu.

Podľa zmeraných hodnôt je na grafickom znázornení možné pozorovať zmenu veľkosti odpruženia závislú na veľkosti polomeru ohybu. Z toho vyplýva väčšia plastická deformácia v mieste s menším polomerom nástroja pri danej hrúbke materiálu.

Vypočítané hodnoty odpruženia podľa vzťahu (4.3) sú vo veľkej miere ovplyvnené hodnotou funkčného zaoblenia hrany dolného nástroja R_m , ktorého hodnota je súčasťou výpočtového postupu. Na rozdiel od polomeru ohybu R_o sa polomer R_m nemení a je po celej dĺžke rovnaký. Rastúcim polomerom ohybu, okolo hodnôt 22 až 24mm, už nie je vplyv R_m tak výrazný a vypočítané hodnoty sa približujú k skutočným hodnotám odpruženia.

Hodnoty vypočítané zo vzťahu (4.6) nie sú ovplyvnené vedľajšími geometrickými prvkami ohýbacieho nástroja. Uvedený výpočtový vzťah vychádza len z veľkosti polomeru ohybu pred a po odpružení, neberie v úvahu mechanické vlastnosti materiálu, z čoho možno usúdiť, že výpočtový vzťah (4.6) len premieňa pomer hodnôt R_2/R_1 na uhol odpruženia. Podľa sklonu krivky vypočítaných hodnôt je závislosť odpruženia na polomere ohybu podobná s nameranými hodnotami, ale číselne sa odlišuje približne o 10° .

5. ANALÝZA TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ TVÁRNEŇA TENKOSTENNÝCH DIELOV TITÁNOVÉHO VÝFUKU

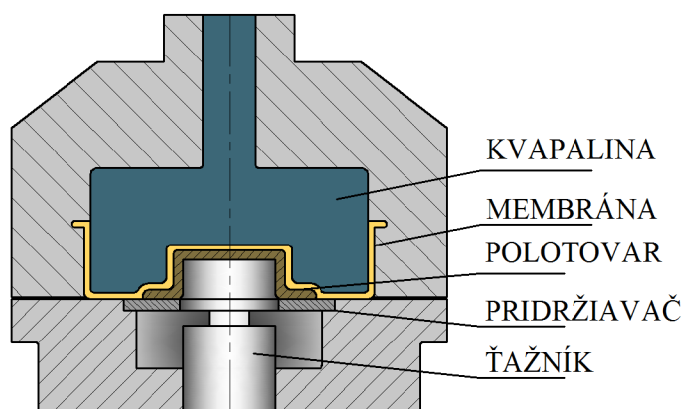
Tvárnenie titánu sa všeobecne odporúča vykonávať za zvýšenej teploty. Vtedy je potrebná celkovo nižšia tvárniaca sila, ťažnosť materiálu je vyššia a odpruženie po tvárnení výrazne nižšie. Zadané požiadavky firmy MSR engines na tvárnenie jednotlivých dielov výfuku sú, aby proces tvárnenia prebiehal za studena, na jeden ťah. K tomu je prispôbená analýza možností tvárnenia. Komerčne čistý titán grade 2 má z technologického hľadiska dobrú tvárnosť a je možné ho tvárniť za nezvýšenej teploty. Analýza technologickej tvárnosti sa zaoberá možnosťami tvárnenia titánových dielov za studena. Obsahuje popis jednotlivých technológií, ich výhody a nevýhody pri danom konkrétnom použití.

5.1 Tvárnenie kvapalinou

Tvárnenie kvapalinou je technológiou, ktorá sa v súčasnosti veľmi rozšírená a využíva sa vo výrobní sfére rôznych priemyselných odvetví, napr. automotive, výroba motocyklov, bicyklov atď. Tvárnenie kvapalinou patrí medzi nekonvenčné metódy tvárnenia. Kvapalina sa využíva ako nepevný tvárniaci nástroj, ktorý tvorí tvárniace prostredie. Kvapalina nahradzuje ťažnicu alebo ťažník, prípadne iný nástroj, ktorých výroba býva často finančne náročná. Zariadenia pre tvárnenie kvapalinou sú väčšinou samostatné stroje, prípadne môžu tvoriť prídavné zariadenie na hydraulických lisoch. Obstarávacie náklady takýchto zariadení sú vysoké, preto je nutné aby sa využívali pri tvárnení v sériovej výrobe. Pomocou tvárnenia kvapalinou je možné vyrobiť presné a tvarovo veľmi náročné diely. Kvapalinou možno použiť samozrejme aj pri tvárnení a ohýbaní dutých profilov a trubiek. Pri ohýbaní sa kvapalina využíva k stabilizácii ohybu. Tvárnenie kvapalinou je samozrejme veľmi obšírny pojem a preto je potrebné ho rozdeliť na niekoľko metód [15,20].

5.1.1 Metóda hydroform

Prvou uvedenou metódou je metóda hydroform. V uvedenej metóde je ťažnica nahradená kvapalinou. Kvapalina uzavretá v kontajneri (tlaková nádoba s gumovou membránou) tvorí tvárniace prostredie. Oproti konvenčným metódam ťahania je metóda konštrukčne otočená naopak (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Schéma metódy hydroform [15].

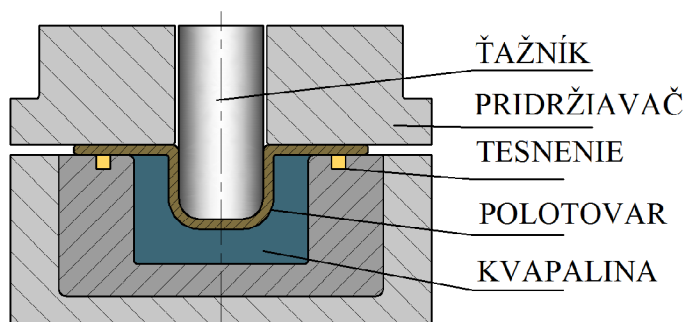
Kontajner s membránou je umiestnený v hornej časti stroja a ťažník s pridržiavačom je umiestnený v dolnej časti strojného zariadenia. Polotovar sa voľne položí na pridržiavač. Kontajner vykoná pohyb smerom nadol a membránou pritlačí polotovar k pridržiavaču, čím vznikne vhodný pridržiavací tlak. Ťažník vykoná pohyb

smerom nahor a zatlačí polotovár do membrány. Pohybom ťažníka je vzбудený v kvapaline protitlak, ktorý je regulovaný prepúšťacím ventilom. Metódu hydroform je vhodné použiť na hlbšie ťahanie a zložitejšie tvary, ako sú polgulovité, stupňovité a kužeľové tvary, pretože kvapalina tvaruje a zároveň pritláča polotovár o ťažník, čím je možnosť zvlnenia polotovaru prakticky nulová. [15,24]

Z hľadiska konštrukcie sa jedná o zložité zariadenie s vysokým nárokom na tesnosť v hydraulickom systéme, čo sa odráža na obstarávacej cene. Vzhľadom na fakt že zariadenie je stavané na veľkosériovú výrobu a produkcia spoločnosti MSR sa zameriava na iné odvetvie, investícia sa javí ako nerentabilná z dôvodu nenaplnenia výrobnnej kapacity uvažovaného zariadenia.

5.1.2 Hydromechanické ťahanie HMT

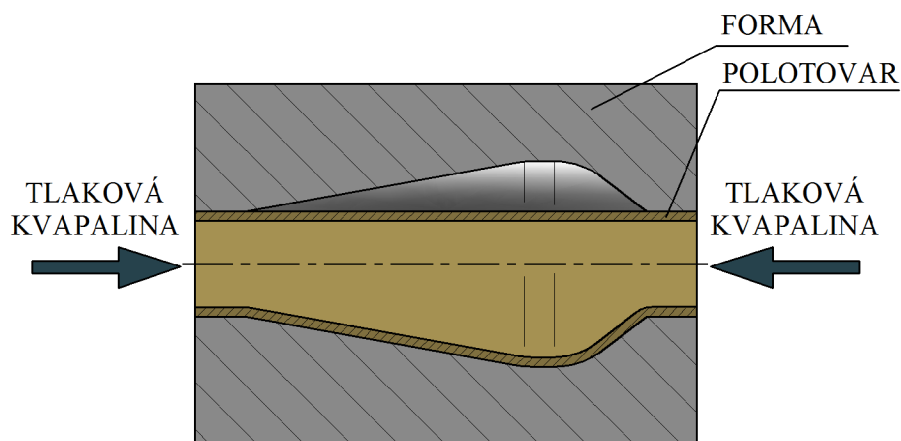
Metóda vychádza z princípu metódy hydroform, pričom polotovár od tvárniacej kvapaliny nie je oddelený membránou, teda samotný polotovár dochádza do styku s kvapalinou (Obr. 5.2). Zvýšením tlaku hydraulickým čerpadlom v uzavretej sústave dôjde k procesu tvárnenia. Výhodou metódy je minimálne zoslabenie hrúbky steny v ohybe na dne výťažku (2-3%) a žiadne poškodenie povrchu výťažku vplyvom trenia s kvapalinou. Nevýhodou uvedenej metódy je nižšia produktivita a nutnosť príruby ťahaného dielu, ktorá tlakom pridržiavača dosadá na gumové tesnenie, čo má za následok väčšiu spotrebu materiálu [15, 20].



Obr. 5.2 Schéma HMT [15].

5.1.3 Vysoko tlakový hydroforming HPH pre ťahanie dutých profilov

Z anglického slova high pressure hydroforming (HPH) je ďalšou metódou, ktorou možno tvárniť prostredníctvom kvapaliny. Podľa názvu metóda využíva vysokého tlaku kvapaliny na tvárnenie dutých profilov a rúr.



Obr. 5.3 Schéma HPH [25].

Na Obr. 5.3 je znázornený dutý profil alebo trubka vložený do dvojdielnej formy s dutinou požadovaného tvaru. Na oboch koncoch je trubka napojená na hydraulický obvod tvárniacej kvapaliny. Forma sa uzavrie a do profilu sa vpustí kvapalina. Zvýšením tlaku sa začne diel deformovať a svojou zväčšujúcou sa stenou začne kopírovať tvar dutiny formy.

Pri úvahe použitia metódy HPH na výrobu dielov výfuku je vhodné matematicky overiť realizovateľnosť daného procesu. K tomu ideálne poslúži zákon zachovania objemu (5.1), ktorý tvrdí že objem materiálu pred plastickou deformáciou sa rovná objemu materiálu po plastickej deformácii [20, 25].

$$V_1 = V_2 \quad (5.1)$$

V_1 - Objem materiálu pred lisovaním [m^3]

V_2 - Objem materiálu po lisovaním [m^3]

Úpravou vzťahu (4.6) a jeho aplikáciou na plochu prierezu trubky pred a po tvárnení je možné vyvodiť vzťah

$$S_1 = S_2 \quad (5.2)$$

S_1 - plocha prierezu profilu pred lisovaním [m^2]

S_2 - plocha prierezu profilu po lisovaním [m^2]

Dosadením do vzťahu (5.2) vznikne rovnica z nej možno vyvodiť rovnicu (5.3) a z nej odvodiť vzťah pre hrúbku materiálu po zoslabení steny (5.4)

$$\pi R_1^2 - \pi(R_1 - t_1)^2 = \pi R_2^2 - \pi(R_2 - t_x)^2 \quad (5.3)$$

$$t_x = - \frac{\sqrt{R_1^2 - (R_1 - 2t_1)^2 + R_2^2} - R_2}{2} \quad (5.3)$$

R_1 - vonkajší polomer trubky pred lisovaním [mm]

R_2 - vonkajší polomer trubky po lisovaním [mm]

t_1 - hrúbka steny pred lisovaním [mm]

t_x - hrúbka steny po lisovaním [mm]

Dosadením vstupných dát sa získa hrúbka zoslabenej steny. Pre hodnoty :

R_1 14mm

R_2 28mm

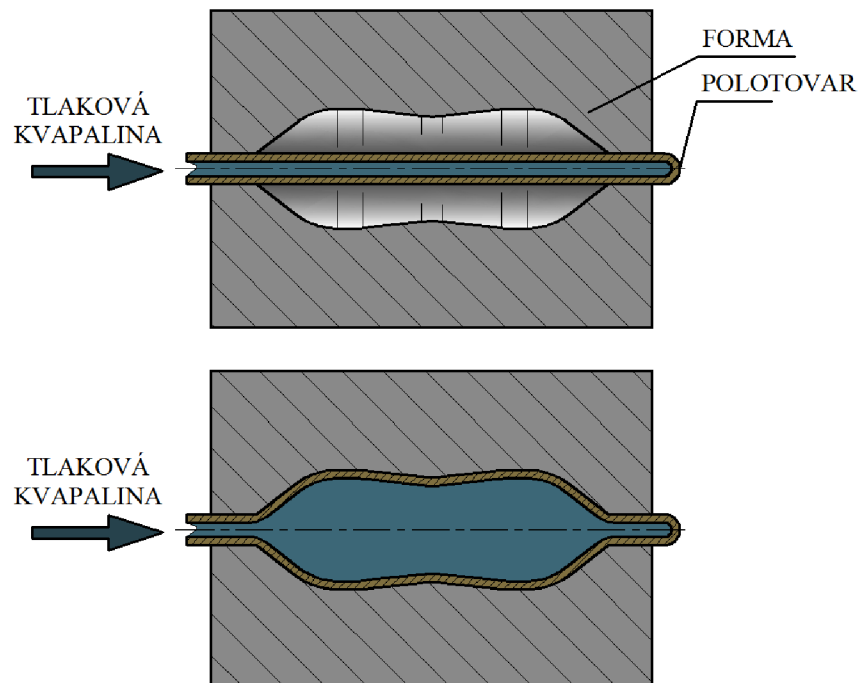
t_1 1 mm

je vypočítanou hrúbkou materiálu po zoslabení steny $t_x = 0,47$ mm, z toho dôvodu nemožno technológiu považovať za vhodnú na tvárnenie dielov výfuku.

5.1.4 Pillow forming

Metóda pracuje na základe delenej formy. Tá je zložená z vrchnej a spodnej časti. Tieto časti sú k sebe pritlačené a zvierajú polotovar. Polotovar najčastejšie pozostáva z dvoch rovnakých plechových dielov rovnakej hrúbky priložených k sebe a následne zvarovaných po celom obvode (najčastejšie laserom). Polotovarom je teda niečo ako prázdny vak alebo vankúš (anglicky pillow) s umiestneným prívodom kvapaliny prostredníctvom privarenej prívodovej trubičky. Po zovretí foriem k sebe dôjde k plneniu dutiny medzi dvoma plechovými stenami polotovaru tvárniacou kvapalinou. Prúdenie kvapaliny do polotovaru prebieha do vtedy, kým postupne sa zväčšujúci polotovar nevyplní celý priestor formy. Po ukončení procesu sa kvapalina z hotového produktu vypustí. Veľkou výhodou uvedenej metódy je, že umožňuje tvárnenie telesa až

po zvarení, čím sa eliminuje vplyv vnútorného pnutia a tým spojených deformácií spôsobených pri zváraní dvoch oddelených samostatných výliskov. Ďalšou výhodou je rozloženie ťahových napätí po celej ploche výťažku a zníženie odpruženia materiálu. [26]



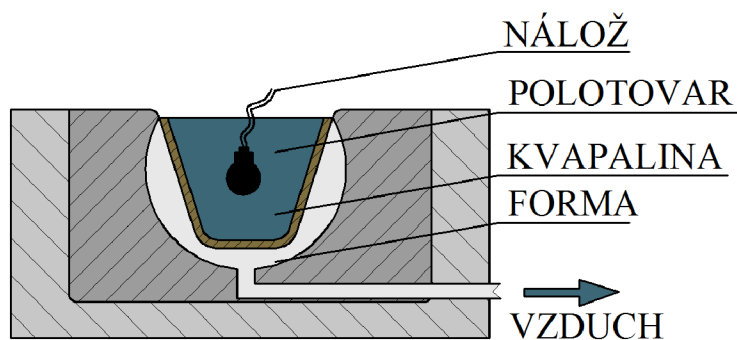
Obr. 5.4 Schéma pillow forming [26].

Metódou Pillow forming sa okrem rôznych uzavretých nádob vyrábajú aj špeciálne tvarované výfuky závodných motokrosových špeciálov. Vzhľadom na kompaktný typ prevedenia titánového výfuku, keď je divergentný kužeľ vložený v konvergentnom, je z montážnych dôvodov nemožné vyhotoviť uzavretú a zvarnú výfukovú komoru pred osadením vnútorných dielov.

5.2 Tvárnenie za vysokých rýchlostí

Technológia využíva rýchlosť deformácie, ktorá je základnou podmienkou daného procesu. Z konvenčného tvárnenia je známe, že rastúcou rýchlosťou deformácie klesá tvárnosť a zväčšuje sa odpor proti deformácii. Pokiaľ rýchlosť deformácie vzrastie mnohonásobne, rádovo až na stovky metrov za sekundu, zvýši sa teplota počas adiabatického procesu tvárnenia. Zvýšená teplota spôsobí odpevnenie materiálu. Od určitej rýchlosti deformácie sa so stúpajúcim deformačným odporom objavuje dynamická medza sklzu. Tvárnené diely sú zaťažované dynamicky, výraznou kinetickou energiou. Hlavnou deformačnou zložkou v plastickej deformácii v technológii vysokorýchlostného tvárnenia nie je prostý sklz ale dvojitátenie [27].

K tak vysokej rýchlosti deformácie sa najčastejšie dosahuje vplyvom tlakovej vlny vyvolanej explóziou. Tlaková vlna môže pôsobiť priamo a to umiestnením výbušniny priamo na polotovar alebo nepriamo pomocou prostredia. Najčastejšími prostrediami sú voda, vzduch, piesok alebo hlina. Veľkosť účinku je závislá od množstva výbušniny a od veľkosti hustoty prostredia, ktoré tlakovú vlnu prenáša. Rýchlosti zaťažovania sa pohybujú až okolo $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tlak okolo 10000 MPa a teploty okolo 1000 K . Na Obr. 5.5 je znázornená schéma detonačnej komory s vodným prostredím [28,29].

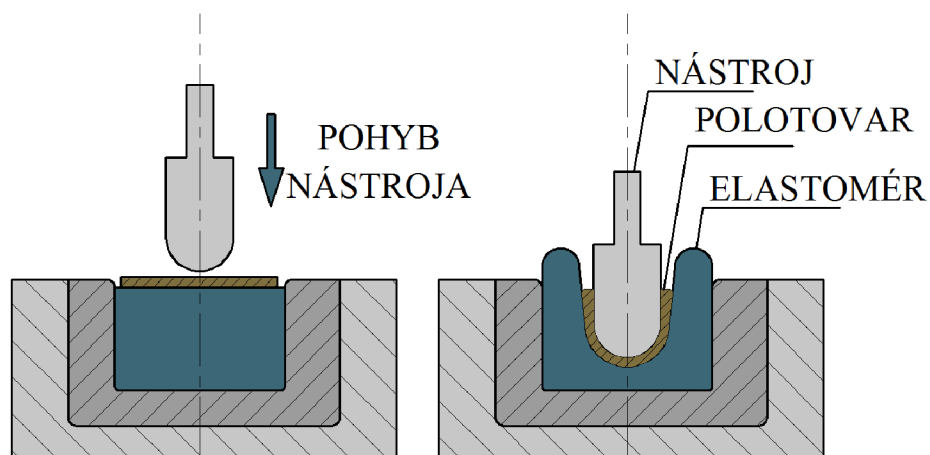


Obr. 5.5 Schéma detonačnej komory [28].

Technológia má široké uplatnenie v mnohých priemyselných odvetviach. Lisované diely disponujú vysokou tvarovou a rozmerovou presnosťou. Metódou je možné tvárniť veľkoplošné diely, sférických, kužeľových a iných tvarov. Využíva sa napríklad aj na tvárnenie rozmerných titánových dielov leteckých motorov. Moderné detonačné komory sú automatické zariadenia masívnej konštrukcie schopné pohltiť a rozptýliť rázovú vlnu a teplo spôsobené výbuchom do svojho plášťa. Kvalita prevedenia s vysokým dôrazom na bezpečnosť spolu s vysokou hmotnosťou (niekoľko desiatok ton) tvoria základ vysokej obstarávacej ceny [27].

5.3 Tvárnenie s využitím elastomér

Technológia využívajúca tzv. nepevný nástroj. Od konvenčného pevného nástroja sa líši nahradením jednej časti pevného nástroja gumou alebo polyuretanom. Technológia sa využíva predovšetkým v malosériovej alebo kusovej výrobe. Výhodou je nízka cena elastoméru a jeho univerzálna geometria. Pri tvárnení pomocou elastoméru definuje tvar ohybu horný nástroj (Obr. 5.6). Tvárnenie cez elastomér nezanecháva na vonkajšej strane výlisku stopu, nástroja. Ohýbanie cez elastomér je sprevádzané výrazne vyšším odpružením než aké vzniká pri bežnom ohýbaní do U alebo do V lišty. Pre elimináciu odpruženia je potrebné zanoriť nástroj hlbšie. Pokiaľ je potrebné výrazne väčšie zanorenie nástroja, používajú sa elastoméry s dutinou. Nízka cena elastoméru je spojená s nízkou životnosťou. Najčastejšie používané materiály sú guma, prírodného pôvodu, vyrobená vulkanizáciou. Gumu možno použiť do tlaku 45 Mpa. Ďalším používaným materiálom je polyuretan. Radí sa medzi polymery. Znesie vyšší tlak pri tvárnení, až do 200 Mpa v teplotnom rozmedzí -40 až 100°C. Vzhľadom na výrazne vyššiu medzu sklzu titánu, $R_e = 350\text{Mpa}$, je uvedená technológia pre výrobu titánových dielov výfuku využiteľná [30,31].



Obr. 5.6 Schéma priebehu tvárnenia [28].

6. NÁVRH VYBRANÉHO TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU

6.1 Výber vhodnej technológie

Tenkostenné diely titánového výfuku vyrobené súčasťou technológiou tvárnenia sa vplyvom pružnej deformácie vyznačujú výrazným odpružením. Podľa analýzy súčasného ohýbacieho procesu z kapitoly 4 nie je odpruženie vznikajúce na dieloch konštantné. Jeho zistenie je náročné a výpočet nepresný. Uváži sa zložitý tvar nástroja, je nerealizovateľné riešiť vzniknutý problém úpravou geometrie ohýbacieho nástroja, ktorá by odpruženie eliminovala. Z toho dôvodu je potrebné zvoliť technológiu ktorá by daný problém riešila. Pri výbere vhodnej výrobnéj technológie je potrebné vziať do úvahy nasledujúce body:

- bezpečnosť
- ekonomickosť - obstarávacia cena, výdaje za údržbu, návratnosť investície atď.
- dostupnosť vybranej technológie - čas na zaradenie novej technológie do výroby
- dopad na životné prostredie - ekologická nezávadnosť
- požiadavky na spôsob výroby – tvárnenie na 1 ťah, za studena

Možností spôsobov tvárnenia dielov je hneď niekoľko. Pri zohľadnení vyššie uvedených bodov je vybranou vhodnou technológiou ťahanie presným ťažníkom do ťažnice s použitím pridržiavača.

Výber uvedenej technológie má svoje opodstatnenie. Použitím technológie ťahania vznikne dutý výťažok, ktorého uzavretý obvod a vplyv napätí v ňom vzniknutých pri tvárnení zabráni možnému vzniku odpruženia. Ďalším dôvodom je možnosť využitia súčasného strojného vybavenia (hydraulického lisu), čo má veľký vplyv na obstarávacie náklady. Zmena technológie bude spočívať len vo výmene nástroja. V prípade výmeny stroja bude možné nástroj preniesť a použiť na inom lise. Vďaka dobrému strojnému vybaveniu je firma MSR Engines schopná vyrobiť nástroje vo vlastnej réžii, čo výrazne skracuje čakaciu dobu na zaradenie novej technológie do procesu výroby.

6.2 Ťahanie

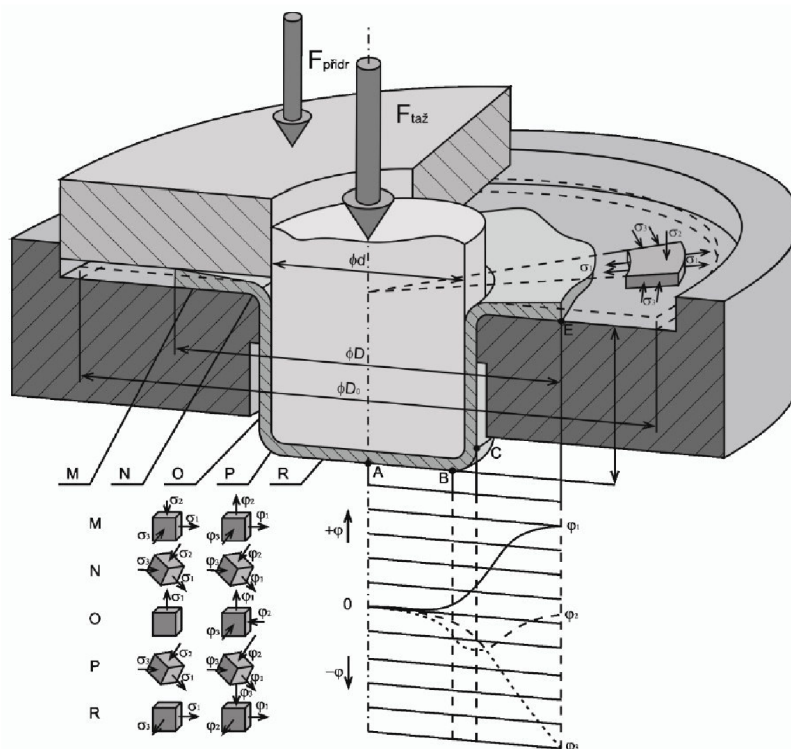
Ťahanie plechu je technologický proces tvárnenia, v ktorom sa z rovinného polotovaru zhotoví v jednej alebo viac operáciách duté teleso jednoduchého rotačného tvaru alebo tvarovo zložitejšie teleso. Vytvorené duté teleso už nie je možné spätne rozvinúť. Technológiou ťahania sa vyrába široký sortiment plytkých alebo hlbokých nádob. V neposlednej rade má ťahanie široké zastúpenie v automobilovom priemysle pri výrobe karosérii [16,21].

Vo všeobecnosti možno ťahanie rozdeliť na ťahanie so zoslabením steny a bez zoslabenia steny. Zoslabenie steny plášťa pri výrobe výfuku by bol nežiaduci proces, preto je potrebné zamerať sa na ťahanie bez zoslabenia steny.

6.2.1 Analýza ťahania

Pri ťahaní bez zoslabenia steny je medzi ťažníkom a ťažnicou dostatočná vôľa $z = 1,2 s_0$. Počas ťahania v oblasti príruby dochádza k výraznému pechovaniu materiálu v smere dotyčnicového napätia. Vznikajúcemu zvlnenie v dôsledku pechovania zabráni prítomný pridržiavač. Pri ťahaní dochádza k presunu značného objemu kovu v príрубе, ktorý je vytláčaný v smere výšky nádoby. Rozbor napätia a logaritmického pretvorenia je zobrazený na Obr. 6.1. Z obrázku vyplýva, že σ a φ sa menia v rôznych častiach valcového výťažku. V oblasti N vzniká zložitá priestorová napätosť a pretvorenie

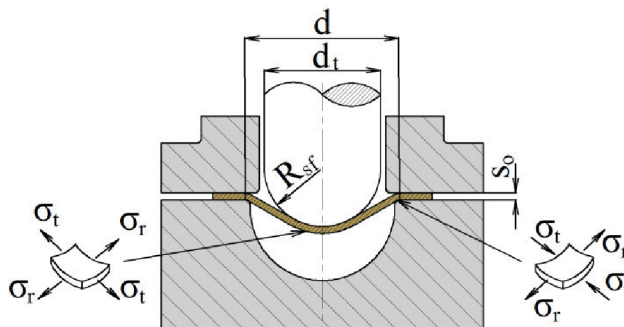
spôsobené ohybom za pôsobenia najväčšieho radiálneho napätia σ_1 . Tangenciálne napätie je výrazne menšie. Vo valcovej časti O existuje iba jednoosá ťahová napätosť ($\sigma_1 = \sigma_3 = 0$) a priestorový stav deformácie, keď $\varphi_2 \doteq \varphi_3$ a $\varphi_1 \rightarrow 0$. V mieste prechodu valcovej časti telesa na dno P dochádza k značnému zoslabeniu steny. V tomto mieste hrozí najväčšie riziko odtrhnutia dna. Na dne R je rovinný stav napätosti ($\sigma_2 = 0$) a priestorový stav pretvorenia. V prípade ďalších operácií môže dôjsť k výraznému zoslabeniu dna výtlačku [16,20].



Obr. 6.1 Ťahanie valcového výtlačku [20].

6.2.2 Ťahanie dielov sférických tvarov

Výroba výtlačku, ktorý má vypuklý, parabolický alebo polguľovitý tvar je náročnejšia na zhotovenie než výtlačky valcových tvarov. V počiatočnej polohe je kontakt ťažníka s polotovarom len v jednom bode (Obr. 6.2). Vzniká tak veľká nepridržiavaná plocha. V priebehu ťahanie, než polotovar prilne na plochu ťažníka, hrozí zvlnenie plochy sférického tvaru. Strata stability a vznik zvlnenia na sférickej ploche výtlačku závisí na pomernej hrúbke prestrihu s_0/D_0 , ak je $(s_0/D_0) \cdot 100 > 3,0$, je možné ťahať bez pridržiavača. Pre zaistenie stabilného procesu ťahanie titánových dielov musí byť pridržiavač prítomný [20].



Obr. 6.1 Schéma ťahania a napätosti u sférických tvarov [20].

6.2.3 Výpočet funkčných rozmerov nástroja a polotovaru [16,20]

Pri ťahaní bez zoslabenia steny sa volí ťažná medzera z zo vzťahu (6.1)

$$z = \frac{(D_0 - d\pi)}{2} \quad [mm] \quad (6.1)$$

V Praxi sa pre zjednodušenie používa vzťah (6.2)

$$z = 1,2 \cdot s_0 = 1,2 \cdot 0,8 = 0,96mm \quad (6.2)$$

$s_0 = 0,8mm$ -hrúbka steny polotovaru

Polomer zaoblenia ťažnice R_{te} sa vypočíta zo vzťahu (6.3)

$$R_{te} = 0,8 \sqrt{(D_0 - d) \cdot s_0} \quad (6.4)$$

D_0 -priemer prestrihu polotovaru [mm]

d - vnútorný priemer výťažku [mm]

V Praxi sa pre zjednodušenie používa (6.5)

$$R_{te} = (6 \text{ až } 10) \cdot s_0 = 7,5 \cdot 0,8 = 6mm \quad (6.5)$$

$s_0 = 0,8mm$ -hrúbka steny polotovaru

Pre výpočet prestrihu materiálu je uvedený vzťah (6.6) a (6.7)

Určenie rozmeru ťahanej steny L

$$L = h \cdot 0,57 \cdot R_d = 41,15 + 0,57 + 25,75 = 55,83mm \quad (6.6)$$

h -výška steny [mm]

R_d -polomer zaoblenia steny a dna výťažku [mm]

Určenie redukovaného polomeru v rohoch R_o

$$R_o = \sqrt{2 \cdot R_b \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 25,75 \cdot 41,15} = 46,03mm \quad (6.7)$$

h -výška steny [mm]

R_d -polomer zaoblenia steny a dna výťažku [mm]

Tab. 6.1 Rozmery prestrihu materiálu.

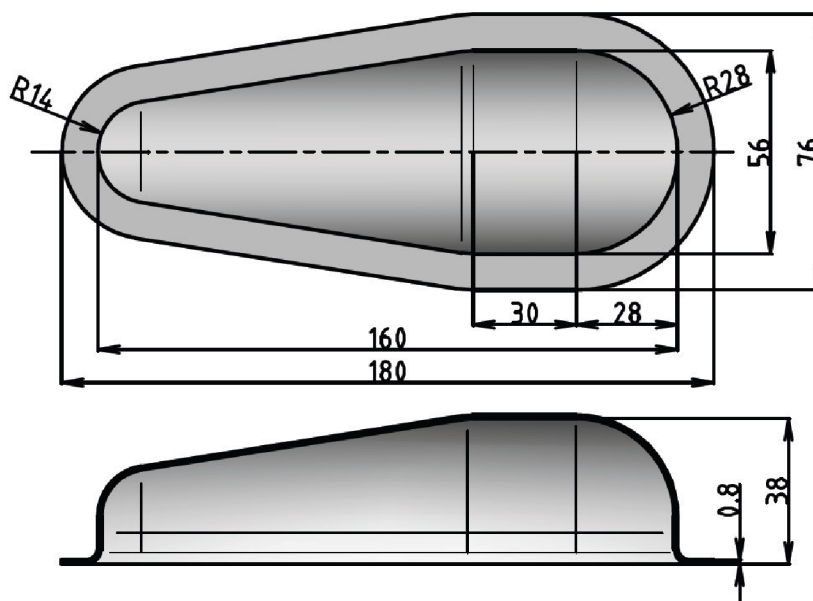
výška steny	polomer zaoblenia dna	redukovaný polomer	dĺžka ťahanej steny
h [mm]	R_d [mm]	R_o [mm]	L [mm]
41,15	25,75	46,03	55,82
34,29	18,89		45,05
29,20	13,80		37,06
27,66	12,26		34,64
28,61	13,21	27,49	36,13

V Tab. 6.1 sú uvedené rozmery prestrihu polotovaru na základe tvaru ťažnej dutiny. Vzhľadom k pól- kuželovitému tvaru výťažku sa bude šírka prestrihu v závislosti na mieniacom sa polomere ohybu meniť.

6.3 Experimentálne overenie

6.3.1 Voľba rozmerov skúšobného vzorku

Vzhľadom na špecifický druh tvárneného materiálu a zložitý tvar výťažku je využitá možnosť experimentálneho overenia ťahania titanu v podobe ťahania skúšobnej vzorky. Cieľom experimentálneho overenia praktickou skúškou je získať alebo overovať poznatky v praxi. Uplatňuje pri pozorovaní dejov, ktoré sú svojím špecifickým priebehom a vlastnosťami náročné na výpočet. Prvým krokom v experimentálnom overení je voľba vhodných rozmerov skúšobného výťažku. Pre overenie sú zvolené skutočné rozmery priemerov kužeľových častí výfuku prenesené na skrátenej model. Skutočné rozmery na polomeroch na koncoch výfuku umožnia získať reálny obraz ťahania sférických častí výfuku. Použitím skráteneho modelu bude sklon stúpania kužeľa strmší, čím v samotnom experimente bude pozorovaný priebeh tvárnenia za náročnejších podmienok, než za akých by bol skutočný výťažok lisovaný. Výhodou skráteneho modelu výťažku sú kratšie výrobné časy a úspora materiálu prenesené na celkové výrobné náklady skúšobnej formy. Na Obr. 6.3 sú zachytené rozmery a tvar skúšobného výťažku.



Obr. 6.3 Rozmery skúšobného výťažku.

6.3.2 Vytvorenie 3D modelu skúšobného nástroja

Podľa rozmerov geometrického modelu výťažku je zhotovený 3D model nástroja. Model lisovacích nástrojov je vytvorený v parametrickom adaptívnom softvéri Autodesk Inventor 2012. Pre prácu je použitá 64 bitová študentská výuková verzia. Softvér umožňuje adaptívne a parametrické 3D modelovanie. Inventor je užívateľsky príjemný a svojím pracovným prostredím sa veľmi nelíši od ostatných 3D softvérov, ako napríklad Solidworks alebo Catia. Pracovne je možné modelovanie skúšobnej formy rozdeliť na tri postupové fázy:

- tvorba modelov jednotlivých dielov
- vytvorenie zostavy skladaním samostatných modelov
- spätná úprava samostatných modelov v prípade kolízie v prostredí zostavy

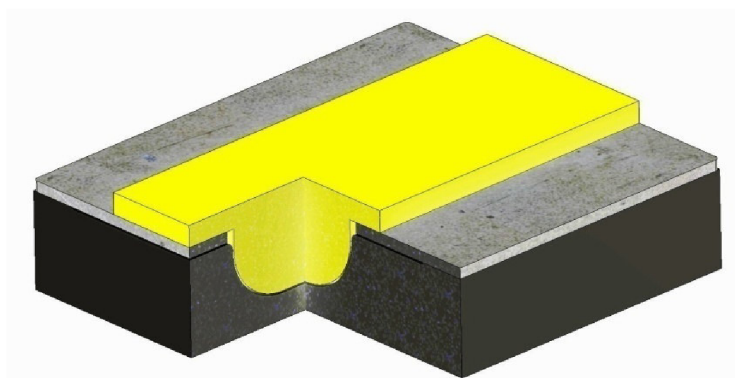
Ako prvý je vytvorený model spodného nástroja, ťažnice . V 2D náčrte je vytvorený obdĺžnikový tvar, ktorý je vysunutý do kvádra. Na vrchnej ploche kvádra je vytvorený náčrt profilu výlisku. Rotáciou náčrtu cez osu symetrie sa odobratím materiálu získa dutina pre ťahanie materiálu. Vzniknutá dutina sa prehĺbi vysunutím zvyšného profilu plochy kvádra do priestoru. Ďalším vysunutím vznikne plocha dosadania pridržiavača. Následne sa pridajú otvory pre vodiace kolíky a zaoblí sa funkčná hrana ťažnice. Na Obr.6.4 je zobrazený model ťažnice.



Obr. 6.4 Model ťažnice.

Pomocou funkcie odčítania objemov sa dosiahne vytvorenie horného nástroja. Za účelom úspory materiálov sa horný nástroj skladá z dvoch častí, z nosiča a samotného ťažníka. Vymodelovanie pridržiavača je jednokroková operácia vytiahnutia telesa podľa vytvoreného 2D náčrtu.

Vymodelované diely sú poskladané do zostavy. V zostave sa upravujú funkčné geometrické prvky. Zohľadní sa ťažná medzera, bez ktorej by proces ťahania nebol možný. Doplnia sa otvory pre uchytienie pridržiavača. Štvrtinový rez ešte nedokončeného modelu zostavy je zobrazený na Obr. 6.5.



Obr. 6.5 Model zostavy ťažných nástrojov v procese úprav.

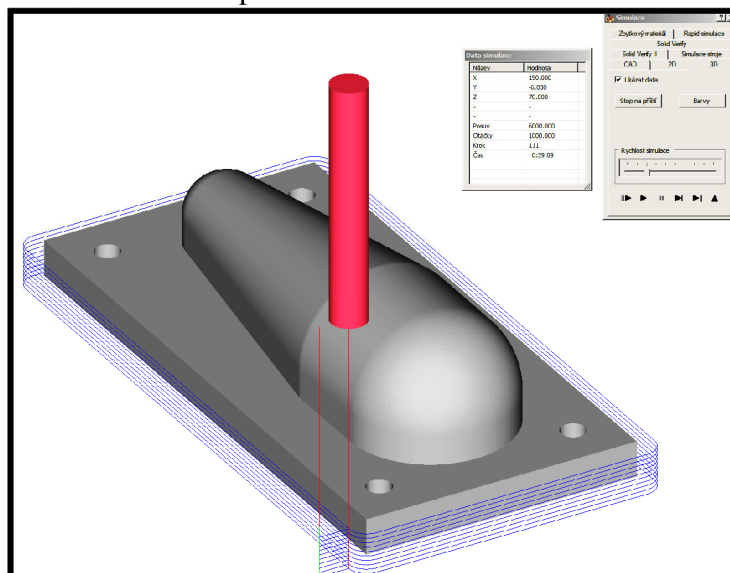
6.3.3 Spracovanie a úprava modelu softvérom CAM

Jednotlivé 3D modely dielov sú spracované softvérom Solidcam. Solidcam pracuje na princípe nadstavby pre používaný CAD softvér, v tomto prípade Inventor. Solidcam je určený na výpočet a tvorbu G-kódu, ktorým je CNC obrábací stroj riadený.

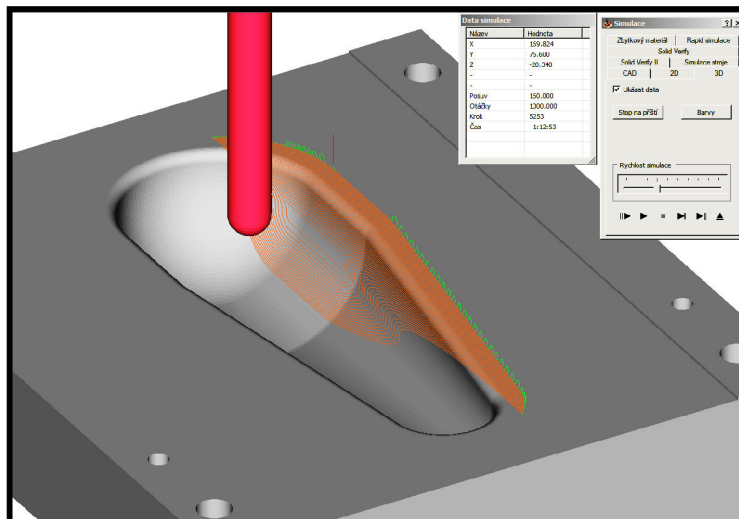
Databáza Solidcam ponúka široký výber. Umožňuje generovanie G-kódu a následnú simuláciu obrábacieho procesu pre rôzne typy frézovacích či sústružníckych

obrábacích centier. Po zadaní vstupných parametrov ako sú rezné podmienky, geometria nástroja, počiatok súradnicového systému a pod. softvér vygeneruje G-kód. Na vygenerovaný

G-kód je možné predviesť vizuálnu video simuláciu, na ktorej sa zobrazí trajektória rezného nástroja, samotný rezný nástroj a postupne odoberaný materiál. Simuláciu je možné spomaliť, zrýchliť alebo v prípade potreby pozastaviť. Na Obr. 6.6 a Obr.6.7 je zobrazená simulácia obrábacieho procesu frézovania ťažníka a ťažnice.



Obr. 6.6 Model zostavy ťažných nástrojov v procese úprav.



Obr. 6.7 Model zostavy ťažných nástrojov v procese úprav.

G-kód je generovaný v podobe textového dokumentu s príponou *.txt* alebo *.log*. Je možné ho otvoriť a prepisovať. Vzorová ukážka G-kódu je zobrazená na Obr. 6.8, Celý G-kód pre jednu z operácií obrábania ťažnice možno nájsť v prílohe číslo 2.

```

004_KAPSA_FORMA_FIN - Poznámka...
Súbor Úpravy Formát Zobrazit' Pomocník
G0 Z20
X159.512 Y56.5 Z10.
Z0.2
G1 X159.487 Z-0.023 F33
X159.413 Z-0.234
X159.293 Z-0.423
X159.135 Z-0.582
X158.946 Z-0.701
X158.734 Z-0.775
X158.512 Z-0.8
X128.292 F160
X128.07 Z-0.775 F320
X127.858 Z-0.701
X127.669 Z-0.582
X127.511 Z-0.423
X127.391 Z-0.234

```

Obr. 6.8 Ukážka generovaného G-kódu

6.3.4 Výroba skúšobného ťažníka a ťažnice

Po príprave G-kódu je možné prejsť k samotnej výrobe lisovacej formy. Prvým krokom je príprava polotovaru. Zvoleným polotovarom je hliníková doska EN AW 5083 o rozmeroch 220x180mm a hrúbke 40mm v počte dvoch kusov, ktoré budú použité na výrobu ťažnice a nosiča ťažníka. Na výrobu ťažníka je použitá hliníková tyč rovnakej akosti o rozmeroch 90x60mm a dĺžke 180mm. Polotovarom o rozmeroch 220x180mm je na kratších stranách po celej šírke vyfrézovaná drážka o šírke 5mm a hĺbke 30mm na konvenčnej univerzálnej frézke FN25 TOS. Obrábacím nástrojom pre túto operáciu je stopková valcová fréza HSS-E Co8, DIN 844, s priemerom $\phi d = 25\text{mm}$ a vyložením 65mm. Vyfrézované drážky slúžia na upnutie na obrábací stôl CNC frézky. Takto pripravené polotovary sú upnuté na obrábací stôl CNC frézky VF1 Haas. Celý obrábací proces je vykonaný na jedno upnutie polotovaru. Použité nástroje a rezné podmienky pre obrábací proces výroby formy sú zobrazené v Tab. 6.2.

Tab. 6.2 Parametre obrábacieho procesu.

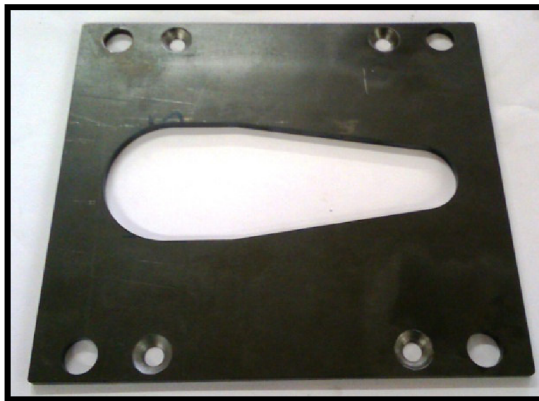
operácia	rezna rýchlosť	priemer nástroja	počet zubov nástroja	posuv na zub	rýchlosť posuvu	otáčky
operácia	vc [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	d [mm]	z	fz [mm]	v_f [mm/min]	n [min ⁻¹]
hrubovanie	250	12	4	0,07	1857	6634,82
dokončovanie	250	12	4	0,05	1326	6634,82

Hrubovací nástroj: TK valcová stopková fréza $\phi d 12 \times 26 \text{ mm}$

Dokončovací nástroj: TK pól guľová fréza $\phi d 12 \times 26 \text{ mm}$ DIN6527

Upínač: AD40ER16A70

Dokončené jednotlivé diely ťažných nástrojov, ťažník, nosič ťažníka, ťažnica sú očistené od zvyšných nečistôt z obrábacieho procesu. Navrhnutý pridržiavač (Obr. 6.9) bol vyrobený kooperačnou firmou, technológiou rezania laserom.



Obr. 6.9 Pridržiavač.



Obr. 6.10 Vyhotované skúšobné nástroje.

Ťažník je vsadený do nosiča s miernym presahom a zaistený 4 zápusťnými skrutkami M10 s vnútorným 6 hranom. Na nosič sú umiestnené vodiace trne. Dokončené ťažné nástroje sú zobrazené na Obr. 6.10.

6.3.5 Ťahanie skúšobných vzoriek

Do ťažnice je pomocou pridržiavača upnutá testovacia vzorka plechu o hrúbke 0,8mm. Všetky styčné plochy nástroja s polotovarom sú dôkladne namazané. Celá zostava oboch nástrojov a upnutého polotovaru je umiestnená pod baran lisu. Lisovacím zariadením je hydraulický lis CDM 80 (Obr. 6.11) s menovitou tvárniacou silou 80 ton.



Obr. 6.11 Hydraulický lis CDM 80.

Samotný proces tvárnenia nenaznačuje žiadne problémy. Po zatlačení ťažníka do maximálnej hĺbky, na kontakt s pridržovačom je proces zastavený a nástroj je odľahčený od ťažnej sily. Následne je z formy odňatý ťažník a demontovaný pridržovač.

Podľa vzoriek skúšobných výťažkov (Obr. 6.12) je zrejmé, že proces ťahania bol sprevádzaný nežiaducim javom a to zvlnením materiálu pod pridržovačom. Zaoblená funkčná hrana spodného nástroja čiastočne eliminovala prenikanie zvlnenia materiálu do dutiny výťažku.



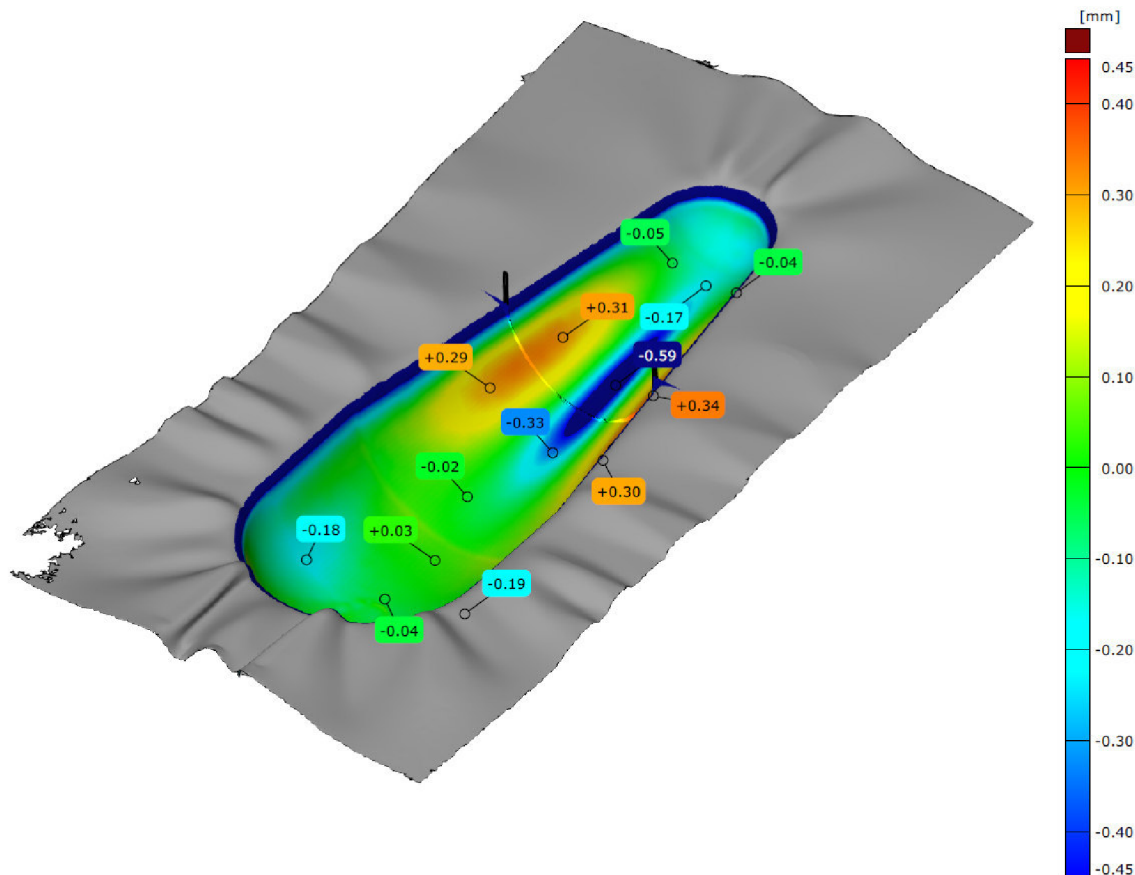
Obr. 6.12 skúšobné výťažky.

Zvlnenie materiálu dosiahlo najväčšej hodnoty v miestach sférických tvarov a v prechodoch z valcovej časti na kužeľovú. Je nutné zmieniť, že použitím polotovaru optimálneho tvaru určeného výpočtom by bolo možné dosiahnuť výrazne menšieho zvlnenia príruby výťažku. Zvlnenie materiálu na príрубе nespôsobilo deformačné poškodenie samotného výťažku a tak je možné označiť skúšku ťahaním za úspešnú.

6.3.6 Digitalizácia a porovnanie dát

Digitalizácia ako súčasť reverzného inžinierstva je proces, pri ktorom sa zo skutočného predmetu získava digitálny obraz. V tomto prípade je digitalizácia využitá na porovnanie tvaru skutočného výlisku a jeho modelu.

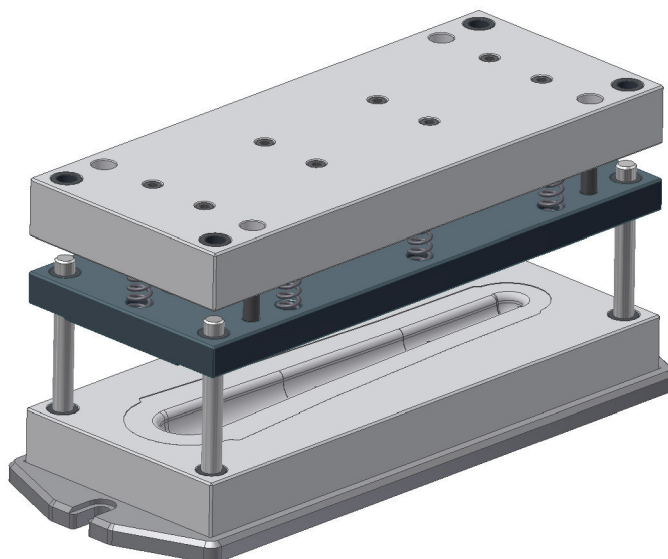
Jeden zo skúšobných výliskov podstúpi proces optického 3D skenovania. 3D skenovanie pozostáva z povrchovej prípravy (zmatnenie povrchu) skenovaného dielu, nanosenia referenčných bodov, kalibrácie prístroja a zo samotného skenovania. Princíp optického skenovania využíva aktívnu trianguláciu. Snímaním povrchu objektu dvoma CCD kamerami a osvetlením povrchu aktívnym svetlom vzniká rastrový obraz. Skenovanie prebieha z viacerých pohľadov. Softvér 3D skenera automaticky rozpoznáva a spája jednotlivé snímky podľa rozmiestnených referenčných značiek. Výsledkom digitalizácie je mrak bodov, ktorý je potrebné spracovať v následnom post processingu. Pospájaním jednotlivých bodov v priestore krivkami vznikne drôtený model. Ten sa prekladá plošnými krivkami a ďalej upravuje. Výsledkom je 3D model skutočného dielu, ktorý je možné ďalej spracovať alebo použiť na kontrolu dát. Preložením 3D modelu z CAD aplikácie s 3D skenom umožňuje získať ucelený obraz možných nežiaducich deformácií, defektov a po. Porovnanie 3D skenu výťažku s modelom nástroja (Obr. 6.13) umožňuje pozorovať minimálne rozdiely tvarov a rozmerov.



Obr. 6.13 Porovnanie 3D modelu a skenu ťahaného dielu.

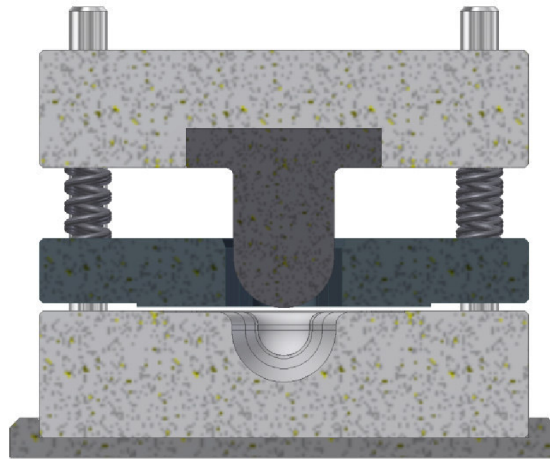
6.3.7 Návrh tvárniacich nástrojov

V podkapitole 6.2 bol znázornený prienik výpočtovými vzťahmi potrebnými k návrhu geometrie funkčného nástroja. Pre overenie vypočítaných funkčných rozmerov bolo vykonané experimentálne overenie. Na základe Výpočtov a praktického overenia tvárnosti titánu do konkrétneho tvaru je možné zhotoviť 3D model tvárniaceho nástroja (Obr. 6.14).



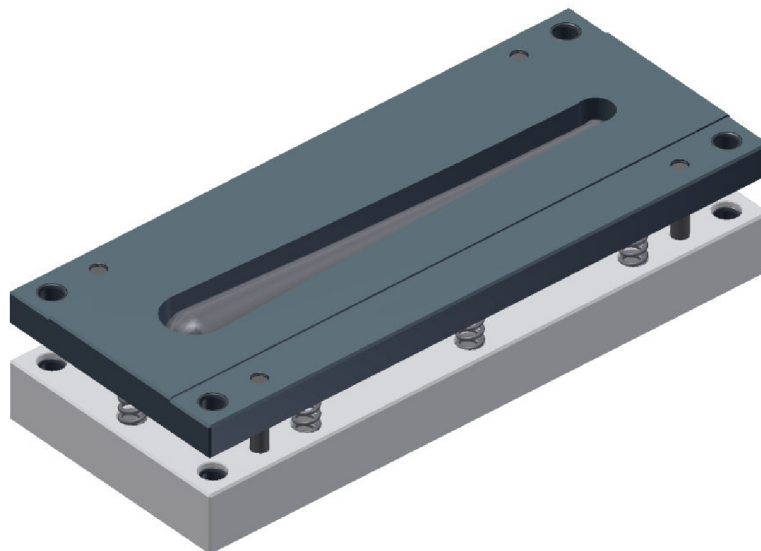
Obr. 6.14 Nástroj pre ťahanie kuželových častí vyfuku.

Postup modelovania a práca v prostredí softvéru Autodesk Inventor je už známa z podkapitoly 6.3.2. Tvorba modelu vychádza z predlohy pôvodného ohýbacieho nástroja. Vzniknutý model je prepracovanejší. Na Obr. 6.15 je zobrazený rez 3D modelu tvárniaceho nástroja.

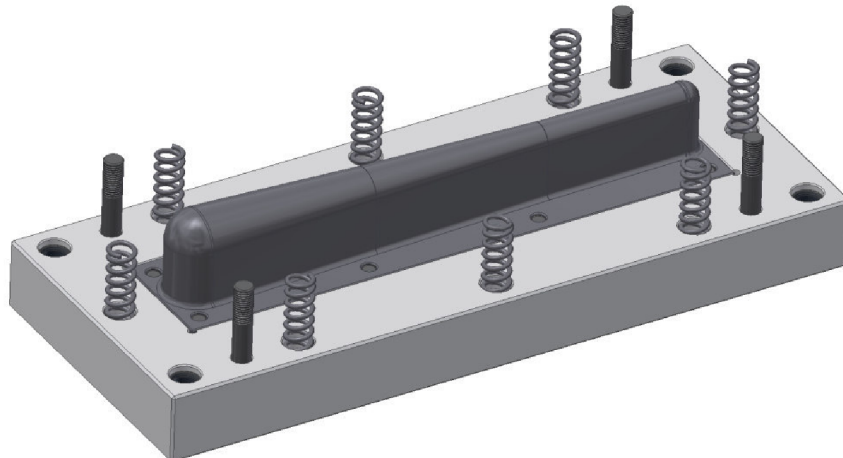


Obr. 6.15 3D model nástroja v reze.

Nový nástroj v porovnaní s predošlým má flexibilný pridržiavač, ktorý umožňuje počas jednotlivých ťahových cyklov rýchlu výmenu polotovaru a výtlačku. Pridržiavač je zavesený na sérii vertikálne pohyblivých skrutiek. Prítlačnú silu zabezpečuje 8 vinutých pružín rozmiestnených podľa najväčšieho prejavu zvlnenia príruby. Náhľad na horný nástroj s pridržiavačom a bez pridržiavača je vidieť na Obr. 6.16 a Obr. 6.17



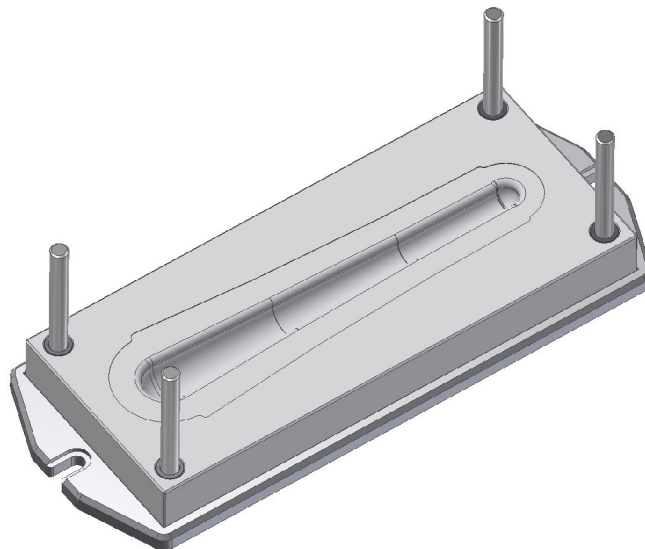
Obr. 6.16 Ťažník s pridržiavačom.



Obr. 6.17 Ťažník, náhľad bez pridržovača.

Na Obr. 6.17 je vidieť prevedenie horného nástroja. Konštrukčne sa skladá z dvoch častí, z nástroja a jeho nosiča. Takéto dvoj segmentové prevedenie je ekonomickejšie na výrobu a v prípade kolízie je možné ho vymeniť.

Na Obr. 6.18 je zobrazený model ťažnice s vodiacimi trňmi umiestnený v montážnom prípravku.



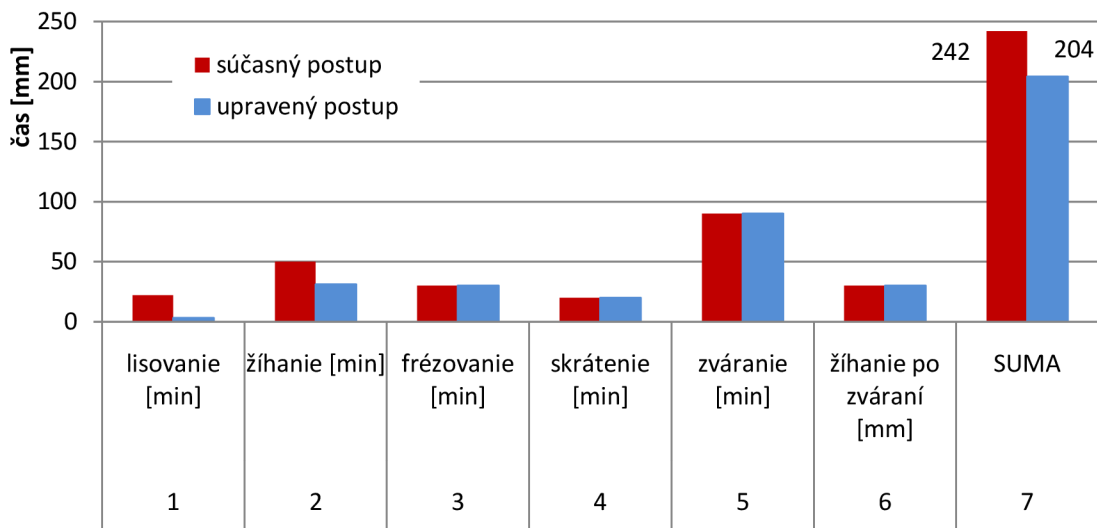
Obr. 6.18 Ťažnica.

7. EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE

Úpravou technológie a použitím navrhnutého nástroja je možné tvárniť výlisok, ktoré nepodliehajú pružnej deformácii v takej miere aby sa na nich prejavilo odpruženie. Takýto výlisok nie je potrebné upínať do žihacieho prípravku, pretože aj po skončení tvárniaceho procesu a odľahčení od tvárniacej sily si drží dosiahnutý tvar. Výtlačok je možné priamo tepelne upraviť. Bez napínacích prípravkov pre žihanie je možné v jednej peci žihať väčšie množstvo výlisokov. Navrhnutý nástroj má pohyblivý pridržiavač ktorý sa hýbe spolu s ťažníkom. Takéto prevedenie nástroja umožňuje rýchlejšiu výmenu polotovaru medzi jednotlivými cyklami. Pôvodný pridržiavač bol upínaný k ťažnici prostredníctvom ôsmich skrutiek, ktoré bolo potrebné vždy pri výmene polotovaru s výlisokom uvoľniť a vyskrutkovať. V Tab. 7.1 je názorný prehľad výrobných časov jednotlivých operácií a príprav s nimi spojenými pre pôvodný výrobný postup a pre postup s použitím zvolenej technológie.

Tab. 7.1 Výrobné časy.

číslo operácie	1	2	3	4	5	6	7
operácia	lisovanie [min]	žihanie [min]	frézovanie [min]	skrátene [min]	zváranie [min]	žihanie po zváraní [min]	SUMA [min]
súčasný postup	22	50	30	20	90	30	242
upravený postup	3	31	30	20	90	30	204



Obr. 7.1 Výrobné časy.

Na Obr. 7.1 sú graficky znázornené časy jednotlivých operácií spracovania lisovaných dielov. Najväčšej úspore času dochádza v prvej operácii, pri lisovaní. Pri uvážení prevádzkových nákladov lisu 500,- Kč/hod vrátane obsluhy, činia výrobné náklady na jeden výlisok pôvodnou technológiou 183,3,-Kč. Použitím upraveného nástroja s pohyblivým pridržiavačom možno dosiahnuť produkciu až 20 ks/hodinu, čo pri prepočte činí výrobné náklady na jeden kus 25,-Kč. Ďalšia úspora je dosiahnutá vyradením napínacieho prípravku pre žihanie z výrobného procesu. Pri časovej náročnosti 20 minút možno operáciu vyčíslieť vyčíslieť 55,-Kč.

ZÁVER

Plošné tvárnenie je v súčasnosti najrozšírenejšou a najrýchlejšie sa rozvíjajúcou metódou spracovania plechov. Tenkostenné lisované diely sú charakteristické nízkou hmotnosťou pri zachovaní veľmi dobrej tuhosti. Podstatnú úlohu na tom tvorí fakt, že touto výrobnou metódou je možné dosiahnuť vysokú produktivitu a veľkú úspornosť materiálu zároveň, čo je v súčasnosti pri cenách vybraných materiálov nevyhnutné.

Technológia plošného tvárnenia prináša problematiku týkajúcu sa presnosti lisovaných dielov, tvárnosti, nežiaducich deformácií a pod. Diplomová práca sa zamerala na rozbor problematiky plošného tvárnenia tenkostenných titánových dielov. Analyzovala vzniknutý problém s pružnou deformáciou v materiály, ktorá spôsobovala vysokú mieru odpruženia po ohybe. V analýze boli porovnané skutočné hodnoty odpruženia po ohybe s teoretickými hodnotami, ktoré boli získané výpočtovými vzťahmi. Na základe dát získaných rozborom bolo zistené, že tvárnenie uvedených titánových dielov nie je možné vykonávať ohýbaním. Dôvodom je tvar požadovaného dielu ktorého geometria spôsobuje nerovnomerný ohyb pri mechanických vlastnostiach daného materiálu. Výsledkom je celkovo nedostatočná plastická deformácia daného dielu pri ohybe.

V ďalšom kroku sa práca zamerala na technologickú tvárnosť titanu pri požadovaných podmienkach tvárnenia. Analyzovala možnosti tvárnenia rôznymi metódami, na základe ktorých vypracovala návrh vhodnej technológie s ohľadom na vstupné požiadavky. Podľa stanovených podmienok bola navrhnutá technológia konvenčného ťahania ťažníkom do ťažnice. Vybranou technológiou bola vykonaná praktická skúška. Digitalizáciou a porovnaním výtlačku s požadovaným 3D modelom boli zistené minimálne rozdiely. Rozmery 3D modelu a výtlačku sa len v niektorých okrajových miestach rozchádzali v desatinách milimetra. Experimentálnym overením bola potvrdená vhodnosť použitia zvolenej technológie pre daný diel. Podľa vypočítaných rozmerov zo vstupných parametrov požadovaného výtlačku bol vyhotovený 3D model tvárniaceho nástroja prostredníctvom CAD aplikácie Autodesk Inventor .

Výberom vhodnej technológie a jej zaradením do procesu výroby možno dosiahnuť skrátenie výrobných časov, čo sa odrazí na celkovom znížení výrobných nákladov. V ekonomickom zhodnotení bolo prevedené porovnanie výrobných časov pôvodnej technológie a technológie navrhutej. Navrhovaná technológia zníži celkový výrobný čas o 40 minút čo činí približne 16% celkového výrobného času.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. JETSURF, Česká republika. *Historie* [online]. 2014 [vid'. 3. mája 2015]. Dostupné z: <http://www.jet-surf.com/en/history.php>
2. JETSURF, Česká republika. *Provedení* [online]. 2014 [vid'. 3. mája 2015]. Dostupné z: <http://www.jet-surf.com/en/performance.php>
3. Jawa-50, Česká republika. *Princíp rezonančního výfukuu dvoudobého motoru* [online]. 2014 [vid'. 1. máj 2015]. Dostupné z: <http://www.jawa-50.cz/clanek/teorie-princip-rezonancniho-vyfuku-ladeneho-expanzni-komora.html>
4. BELL, A. G. *Two-stroke performance tuning*, Haynes Publishing, 272 s. ISBN 1-85960-619-3.
5. BLAIR, Gordon P. *Desing and simulation of two-stroke engines*, Society of Automotive Engineers, 1996. 623 s. ISBN 1-56091-685-0.
6. Wikipedia. *Two-stroke engine* [online]. 2004, poslední revize 20.5.2015 [cit.2010-04-23] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Two-stroke_engine
7. Google, Spojené Štáty. *Exhaust system for two-stroke engines , US3462947A*[online]. 1969[vid. 1. mája 2015]. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US3462947>
8. COTTON F.A., WILKINSON J., *Anorganická chemie, souborné zpracování pro pokročilé*. ACADEMIA, Praha 1973.
9. LEYENS Ch., PETERS M., *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applicastions*. Willet-VCH. Koln, Germany, 2nd ed., 2005, ISBN 3-527-30534-3
10. WELSCH G., BOYER R., CILLINGS E.V., *Titanium Alloys, Material Properties Handbook*. ASM International, 1994, ISBN-13:978-0-87170-481-8.
11. MINERALIUM, Nemecko, <http://www.mineralium.com/index.php?cat=RUH&product=RUH-011&sid1=b7cd2cd083e0c9629e8cfafc3403ede6>
12. FÜRBAACHER I. a kolektiv, *Lexikon technických materiálů*. Praha: Verlag Dashofer, [1998], 1. vyd, ISBN 80-86229-02-5.
13. ASTM INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE: *ASTM B265-09 Standard Specialification for Titatnium ant Titanium Alloy Strip, Sheet and Plate* [online]. 1996-2012 [cit 2015-18-05]. Dostupné z <http://www.astm.org/Standards/B265.htm>
14. BIBUS SK S.R.O. *Titanium Grade 2*. Dostupné z <http://www.bibusmetals.cz/cs/materialy/titan-slitiny-titanu/titan-grade-2/>
15. PETRUŽELKA J., BŘEZINA R., *Úvod do tváření II: Plošné tváření*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2002, ISBN 80-248-0068-3.
16. FOREJT M., PÍŠKA M., *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
17. DONACHIE M.J., *Titanium: a technical guide*. 2nd edit. Material Park: ASM International, 2004, ISBN 08-717-0686-5.

18. KRAUS V., *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, ISBN 80-708-2582-0.
19. MICHNA Š. a kol., *Encyklopedie hliníku*, 1. vyd. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, ISBN 80-890-4188-4.
20. DVOŘÁK M., GAJDOŠ F., NOVOTNÝ K., *Technologie tváření (Plošné a objemové tváření)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, ISBN 987-80-214-3425-7.
21. FOREJT M., *Teorie tváření*, 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1992, ISBN 80-214-0415-9.
22. ZVARACKA, Slovensko, <http://www.zvaracka.eu/kategoria/zvaracky-tig-wig/zvaracky-tig-ac-dc/zvaraci-stroj-jasic-tig-200-ac-dc-p-horak/sk/>
23. ČSN 22 7340, *Ohýbadla-Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet*, Praha: Český normalizační institut, 1990.
24. *Technologie II: Speciální způsoby tažení* [online]. 2005 [cit. 2015-20-05]. Dostupné z http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm#095.
25. *Pressure-sequence and high-pressure hydroforming: Knowing the processes can mean boosting profits* [online]. 2001 [cit. 2015-20-05]. Pressure-sequence and high-pressure hydroforming: Knowing the processes can mean boosting profits. Dostupné z <http://www.thefabricator.com/article/hydroforming/pressure-sequence-and-high-pressure-hydroforming--knowing-the-processes-can-mean-boosting-profits>.
26. Singh H., *Fundamentals of hydroforming*. Society of Manufacturing Engineers, 2003, USA, ISBN 0-87263-662-3.
27. BUCHAR J., BÍLEK Z., *Chování kovových materiálů při vysokých rychlostech deformace*. 1.vyd Praha: Academia, 1984.
28. *Katedra tváření kovů a plastů – skriptum* [online]. 2005 [cit 2015-20-05]. Dostupné z http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/11.htm#111#111
29. *Výbuchové komory* [online]. 2011 [cit. 2015-21-05]. Dostupné z <http://www.ozm.cz/cs/vybuchove-komory/>
30. SAMEK R., *Technologické problémy při tváření elastomery*. In sborník VA v Brne. 1. vyd. Brno: VA, [1990?] .
31. GROOVER M. P., *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 3rd edit. Lehigh University: Hamilton Printing Company, 2007, ISBN-13987-0-471-74485-6, ISBN- 100-471—74485-9.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

EU	- Európska únia	
CE	- European commission	
EN	- European standard	
DIN	- Deutsches Institut Fur Normung]	
AW	- alluminium wrought	
HCP	- hexagonal close packed	
ASTM	- American Society for Testing and Materials	
CP	- commercially pure	
3D	-trojrozmerný obraz	
2D	- dvojrozmerný obraz	
CAD	- počítačom podporované kreslenie (computer-aided drafting)	
CAM	-počítačom podporovaná výroba (computer-aided manufacturing)	
CNC	-počítačové riadenie (computer numerical control)	
CCD	- charge coupled device	
VBD	- vymeniteľná rezná doštička	
TIG	- tungsten inert gas	
HMT	- hydromechanické ťahanie	
HPH	- high-pressure hydroforming	
I	- elektrický prúd	[A]
d	- priemer diery	[mm]
v_c	- rezná rýchlosť	[m.min ⁻¹]
f_z	- posuv na zub	[mm]
v_f	-rýchlosť posuvu	[mm.min ⁻¹]
n	-otáčky	[min ⁻¹]
s	- hrúbka materiálu	[mm]
E	- modul pružnosti	[Gpa]
R_e	- medza sklzu	[Mpa]
R_m	- medza pevnosti	[Mpa]
ρ	- polomer neutrálne plochy	[mm]
R_{min}	-minimálny polomer ohybu	[mm]
R_{max}	- maximálny polomer ohybu	[mm]
R_m	-polomer zaoblenia funkčnej hrany ohybnice	[mm]
R_O	- polomer ohybu	[mm]

b	- šírka materiálu	[mm]
V	- Objem	[m ³]
t_1	- hrúbka steny pred lisovaním	[mm]
t_x	- hrúbka steny po lisovaním	[mm]
R_1	- polomer pred odpružením	[mm]
R_2	- polomer po odpružení	[mm]
β	- uhol doprużenia	[°]
α	- uhol ohybu	[°]
l_0	- vzdialenosť medzi stredmi opierok ohybnice	[mm]
r_1	- vnútorný polomer ohybu	[°]
r_2	- vonkajší polomer ohybu	[°]
ε_{el}	-deformácia v smere šírky materiálu	[mm]
k	-súčiniteľ určenia polohy neutrálnej plochy	
S	- plocha	[m ²]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	- Hlavné napätie	[Mpa]
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	- Hlavné logaritmické deformácie	[m]
z	- ťažná medzera	[mm]
R_{te}	- polomer zaoblenia ťažnice	[mm]
s_0	- hrúbka steny polotovaru	[mm]
d	- vnútorný priemer výťažku	[mm]
L	- určenie rozmeru ťahanej steny	[mm]
h	- výška steny	[mm]
R_d	- polomer zaoblenia steny a dna výťažku	[mm]
R_o	- redukovaný polomer	[mm]

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2.1	Mechanické vlastnosti titánu pri teplote 20°C
Tab. 2.2	Únavové vlastnosti titánu teplote 20°C
Tab. 2.3	Tepelné úpravy
Tab. 2.4	Fyzikálne Vlastnosti
Tab. 2.5	Žihacie teploty rôznych druhov titánu
Tab. 3.1	Parametre jednotlivých operácii sústruženia držiaka trysky
Tab. 4.1	Hodnoty odpruženia získané výpočtom a meraním
Tab. 6.1	Rozmery prestrihu materiálu
Tab. 6.2	Parametre obrábacieho procesu
Tab. 7.1	Výrobné časy

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1	Nástroje a rezné podmienky použité pri výrobe titánovej návlačky
Príloha 2	Vzor programu pre obrábanie lisovacieho nástroja
Príloha 3	Protokol z 3D merania
Príloha 4	Obrázková dokumentácia 3D modelu Nástroja

Príloha č. 1 Nástroje a rezné podmienky použité pri výrobe titánovej návlačky

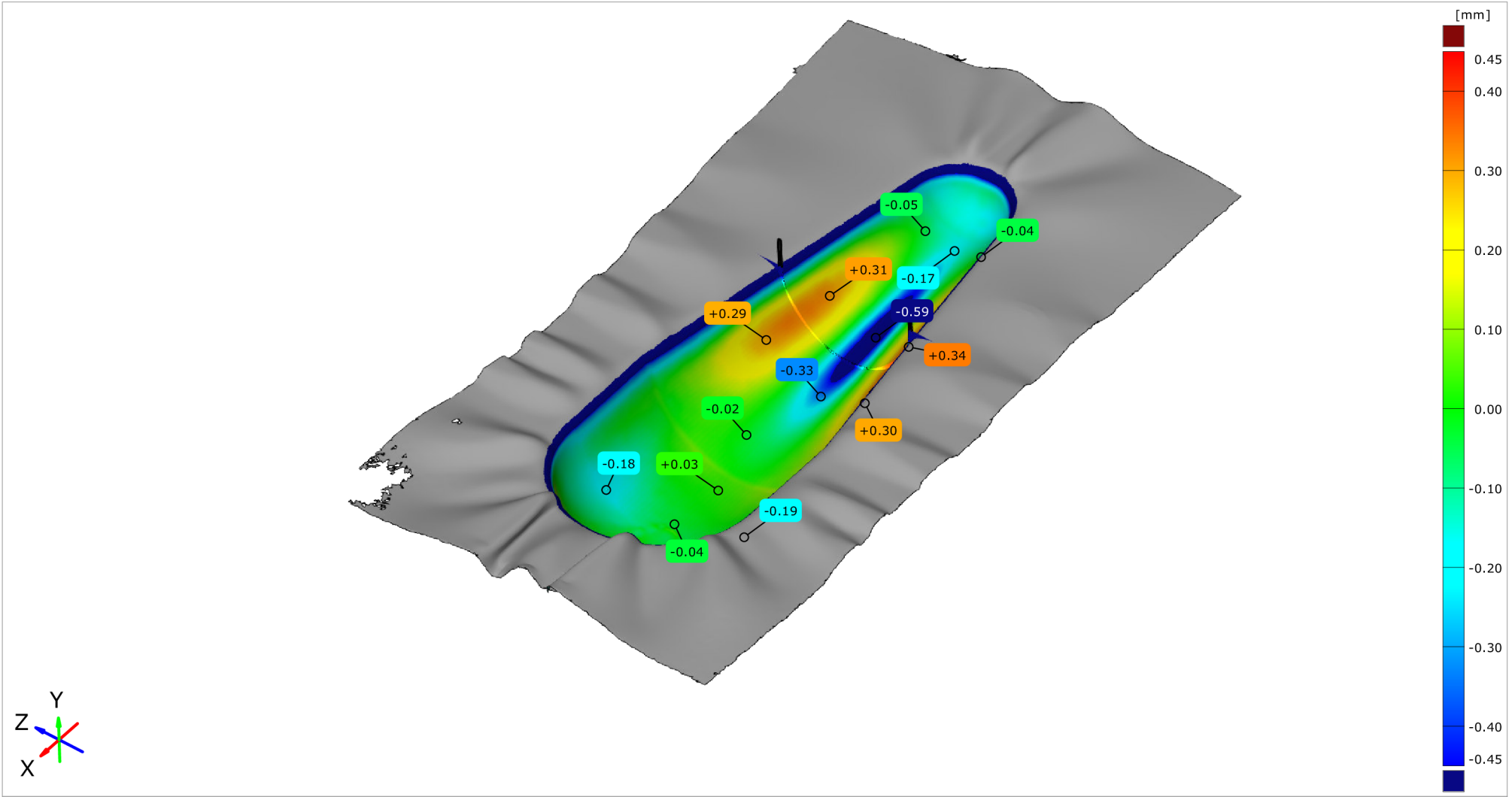
Parametre jednotlivých krokov sústruženia dielu			
názov:		NÁVLAČKA	
1	názov operácie	zarovnanie čela	
	druh operácie	hrubovanie	
	nástroj	držiak	DWLNL 2515 M08
		VBD	WNMG 080408 MP TT5080
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	1500
		posuv na otáčku f [mm/ot]	0,1
šírka záberu ostria a_p [mm]		1	
2	názov operácie	obrobenie vonkajšej valcovej časti	
	druh operácie	dokončovanie	
	nástroj	držiak	PDJNL 2525 M11
		VBD	DNMU 110402-M3, TP2500
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	1200
		posuv na otáčku f [mm/ot]	0,05
šírka záberu ostria a_p [mm]		(1 rez)	
3	názov operácie	čelné vyvrtávanie $d16\text{mm}$	
	druh operácie	vrtanie	
	nástroj	Vrták s výmennými reznými dosičkami	3D.210.L.03
		VBD	WCTG 030204 SN-29 CWN
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	1000
		posuv na otáčku f [mm/ot]	0,05
Šírka záberu ostria a_p [mm]			
4	názov operácie	hrubovanie diery	
	druh operácie	hrubovanie	
	nástroj	držiak	S16R-SCLCL 09
		VBD	CCMT 09T308EN-F43 CWN
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	1500
		posuv na otáčku f [mm/ot]	0,15
Šírka záberu ostria a_p [mm]		1	
5	názov operácie	dokončovanie diery	
	druh operácie	dokončovanie	
	nástroj	držiak	A16Q-SCLCL06
		VBD	CCGT 060201FN-F23 CCN
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	1500
		posuv na otáčku f [mm/ot]	0,05
Šírka záberu ostria a_p [mm]			
6	názov operácie	zápich na vonkajšej stene a upichnutie dokončenej súčiastky	
	druh operácie	dokončovanie	
	nástroj	držiak	687.0016-D
		upichovací nôž	70364600
	rezné podmienky	otáčky n [min^{-1}]	800
		Posuv na otáčku f_1, f_2 [mm/ot]	0,02 ; 0,04
Šírka záberu ostria a_p [mm]		2	

```
G0 Z20
X0. Y-6. Z20.
Z2.
G1 Z-1.5 F33
X210. F160
G3 X216. Y0. R6.
G1 Y185.
G3 X210. Y191. R6.
G1 X0.
G3 X-6. Y185. R6.
G1 Y0.
G3 X0. Y-6. R6.
G1 Z-3. F33
X210. F160
G3 X216. Y0. R6.
G1 Y185.
G3 X210. Y191. R6.
G1 X0.
G3 X-6. Y185. R6.
G1 Y0.
G3 X0. Y-6. R6.
G1 Z-4.5 F33
X210. F160
G3 X216. Y0. R6.
G1 Y185.
G3 X210. Y191. R6.
G1 X0.
G3 X-6. Y185. R6.
G1 Y0.
G3 X0. Y-6. R6.
G1 Z-6. F33
X210. F160
G3 X216. Y0. R6.
G1 Y185.
G3 X210. Y191. R6.
G1 X0.
G3 X-6. Y185. R6.
G1 Y0.

G3 X0. Y-6. R6.
G1 Z-7.5 F33
X210. F160
G3 X216. Y0. R6.
G1 Y185.
G3 X210. Y191. R6.
G1 X0.
G3 X-6. Y185. R6.
G1 Y0.
G3 X0. Y-6. R6.
G1 Z-9. F33
X210. F160
G3 X216. Y0. R6.
G1 Y185.
G3 X210. Y191. R6.
G1 X0.
G3 X-6. Y185. R6.
G1 Y0.
G3 X0. Y-6. R6.
G1 Z-10. F33
X210. F160
G3 X216. Y0. R6.
G1 Y185.
G3 X210. Y191. R6.
G1 X0.
G3 X-6. Y185. R6.
G1 Y0.
G3 X0. Y-6. R6.

G0 Z20.
G0 X0. Y0.
M30
%
```


Untitled



Alignment 1

Length unit: mm

