

Konstrukční řešení vytlačovacích hlav pro výrobu trubek

Bc. Jakub Zatloukal

Diplomová práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Zatloukal**
Osobní číslo: **T19449**
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Studijní obor: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Konstrukční řešení vytlačovacích hlav pro výrobu trubek**

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Konstrukční porovnání vytlačovacích hlav na trubky (zaměřeno na torpéda, trny a hubice).
3. Návrh vysokorychlostní hlavy na trubky.
4. Zhodnocení navrženého řešení.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. MICHAELI, Walter. Extrusion dies for plastics and rubber. Munich: Carl Hanser Verlag, 2003. 360 s. ISBN 3-44622561-7.
2. MAŇAS, Miroslav a Josef HELŠTÝN. Výrobní stroje a zařízení: Gumárenské a plastikářské stroje II. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 199 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0213-X.
3. Extrusion: The Definite Processing Guide and Handbook.
4. ŠTĚPEK, Jiří, Jiří ZELINGER a Antonín KUTA. Technologie zpracování a vlastnosti plastů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 637 s.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá technologií vytlačování trubek z pohledu vysokých rychlostí výroby. Teoretická část nabízí hlubší pohled do problematiky vytlačování. Nejprve byly představeny tokové vlastnosti, dále byly prezentovány vytlačovací hlavy a v poslední části byly ukázány všechny funkční části vytlačovací linky. V praktické části byly navrženy i porovnány jednotlivé typy vytlačovacích elementů (torpéda, trny a hubice). Polymerní trubička byla řešena pro materiál HDPE (vysoko hustotní polyetylen). Pro návrh vytlačovacích nástrojů včetně výkresové dokumentace bylo použito programu Solid Edge. Tokové analýzy byly řešeny v softwaru Rhino a Virtual Extrusion Laboratory. Dle těchto návrhů byl proveden konstrukční návrh vysokorychlostní hlavy.

Klíčová slova: vytlačování, vysokorychlostní hlava, torpédo, hubice, trn, zpracování plastů, tokové analýzy, Solid Edge, Virtual Extrusion Laboratory

ABSTRACT

This thesis focuses on the aspect of production speed in design of high-speed dies for extrusion of mono-layer smooth thermoplastic pipes. Theoretical chapter introduces flow behavior, provides general overview of extrusion heads and examines in detail the functional parts of the extrusion line. In the practical chapter individual types of extrusion torpedoes, mandrels and output dies were designed and compared, assuming HDPE as base material. The extrusion dies were drawn and modelled in Solid Edge software. Flow analyses were made in Rhino and Virtual Extrusion Laboratory. The results of the flow analyses and the design comparisons are used in construction design of the high-speed extrusion die in final chapters of this work.

Keywords: extrusion, high speed die, torpedo, output die, mandrel, plastics processing, flow analyses, Solid Edge, Virtual Extrusion Laboratory

Největší poděkování patří panu Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D., za skvělé vedení práce, trpělivost i zodpovězení veškerých otázek. Velké díky také patří kolegovi Ing. Václavu Stokláskovi za bezmeznou pomoc v oblasti tokových analýz. Vašek byl konstruktivní oporou v každé analýze, jež byla provedena. Jeho rady byly klíčové pro tvorbu i následnou diskusi. Další nemalé díky patří Ing. Janu Králi za přidělené téma i konzultaci veškerých provedených výsledků, vážím si toho. Rovněž děkuji kolegovi Ing. Mariánu Strakovi za pečlivou kontrolu výrobní dokumentace. Také bych rád vyzdvihl netriviální pomoc ohledně estetických konzultací pana Martina Dekara. V neposlední řadě bych rád zdůraznil stylistickou pomoc a korekturu paní Mgr. et Mgr. Jany Sobotkové. Závěrem bych rád poděkoval celé rodině, hlavně své přítelkyni za podporu a dodání motivace při psaní této práce i celkovém studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 VYTLAČOVÁNÍ POLYMERŮ	11
1.1 REOLOGIE POLYMERŮ	11
1.1.1 Smyková viskozita	14
1.1.2 Elongační viskozita	14
1.1.3 Index toku taveniny	14
1.1.4 Relaxace napětí	15
1.1.5 Normálová napětí	16
2 VYTLAČOVACÍ NÁSTROJE	18
2.1 VYTLAČOVACÍ HLAVY NA TRUBKY	19
2.1.1 Hlava s žebry	20
2.1.2 Ze strany plněná hlava	21
2.1.3 Hlava se spirálovým trnem.....	22
2.1.4 Plochá spirálová hlava.....	23
2.2 PLOCHÁ VYTLAČOVACÍ HLAVA	24
2.3 VYTLAČOVACÍ HLAVA NA PROFILY	25
2.4 VYTLAČOVACÍ HLAVA NA OPLÁŠŤOVÁNÍ	26
2.5 TOKOVÉ NESTABILITY VYTLAČOVACÍCH HLAV	27
2.5.1 Narůstání za hubicí (diedrool).....	28
2.5.2 Žraločí kůže (shark skin).....	28
3 LINKY PRO VYTLAČOVÁNÍ POLYMERŮ	30
3.1 VYTLAČOVACÍ STROJE	30
3.1.1 Šnekové vytlačovací stroje.....	30
3.1.2 Pístové vytlačovací stroje.....	31
3.1.3 Diskové vytlačovací stroje	32
3.2 KALIBRAČNÍ ÚSTROJÍ	35
3.2.1 Podtlaková kalibrace	35
3.2.2 Přetlaková kalibrace	36
3.2.3 Průvlaková kalibrace	36
3.3 ODTAHOVÉ ZAŘÍZENÍ	37
3.4 DĚLÍCÍ A NAVÍJECÍ ÚSTROJÍ	38
4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	41
6 ZADANÝ VYTLAČOVANÝ PRODUKT	42
6.1 MATERIÁL PRODUKTU – HDPE.....	42

7	KONSTRUKČNÍ NÁVRHY PRVKŮ	45
7.1	TORPÉDA A VSTUPNÍ ČÁSTI.....	45
7.2	HUBICE A TRNY	47
8	TOKOVÉ ANALÝZY.....	51
8.1	1. TOKOVÁ ANALÝZA.....	51
8.2	2. TOKOVÁ ANALÝZA.....	56
8.3	3. TOKOVÁ ANALÝZA.....	62
8.4	4. TOKOVÁ ANALÝZA.....	67
9	DISKUZE A POROVNÁNÍ	71
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Technologie vytlačování spolu se vstřikováním či vyfukováním patří k nejdůležitějším i nejčastěji aplikovaným technologiím zpracování polymerů v praxi. Vytlačovací stroje se pyšní nejvyšším počtem zpracovaných kilogramů polymerů za hodinu.

Produkty vzniklé již zmíněnou technologií jsou všude kolem nás. Kuchyňské lišty, okenní profily, pravítka, potahy, hadice, trubičky, to všechno mohou být profily vzniklé vytlačováním.

Vytlačování je vhodné užívat všude, kde je zapotřebí nekonečný neměnný tvar nebo profil nasekaný na libovolnou délku, případně navinutou na volitelnou délku.

Vysokorychlostní vytlačování je důležité pro výrobce, jenž chce vyrábět efektivně i produktivně. Častokrát je vytlačovací linka navržena na univerzální typy výrobku, zatímco vytlačovací nástroj společně s kalibračním ústrojím musí být zhotoveny na konkrétní produkt. Moderní doba napomáhá vývoji vytlačovacích nástrojů, zejména díky tokovým analýzám polymerních tavenin. Tokové analýzy značně urychlují konstrukční vývoj nástroje a zvyšují jeho kvalitu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYTLAČOVÁNÍ POLYMERŮ

Vytlačování je kontinuální způsob tváření, při němž se tuhý materiál nejdříve dopravuje, taví, dopravuje na bázi kapaliny, nástrojem tvaruje, chladí a odtahuje. Tímto technologickým procesem se zpracovávají polymery, převážně termoplasty do konečného tvaru nebo k výrobě polotvaru. Technologií vytlačování je možné zpracovávat také reaktoplasty, gumárenské směsi nebo kovové prášky. Příklady vytlačovaných profilů jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 1) [1].



Obrázek 1. Vytlačované profily [25].

1.1 Reologie polymerů

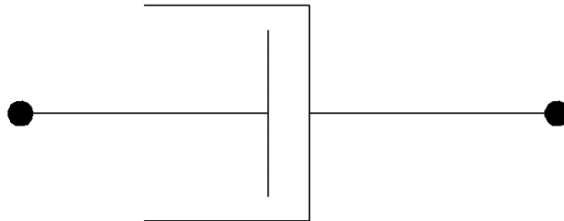
Z hlediska technologie vytlačování polymerů je velmi důležitá jejich reologie, což je nauka o deformaci a toku látek. Každá látka se může jevit jako kapalina nebo tuhá látka, pozorujeme-li ji dostatečně dlouho [7].

Tokové vlastnosti polymerní látky jsou nezbytným poznatkem pro každého výrobce zařízení na zpracování polymerů i pro výrobce počátečních surovin. [7].

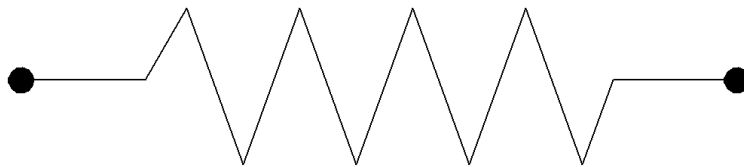
Reologická a termodynamická data jsou důležitým faktorem pro konstrukční návrh vytlačovací hlavy i kalibrační jednotky [1].

Polymerní taveniny se nechovají jako viskózní kapaliny (vykazují také podstatnou pružnost) a popis jejich vlastností se nachází mezi ideálními newtonskými viskózními tekutinami (Obr. 2) a ideálními Hookovými elastickými pevnými látkami (Obr. 3).

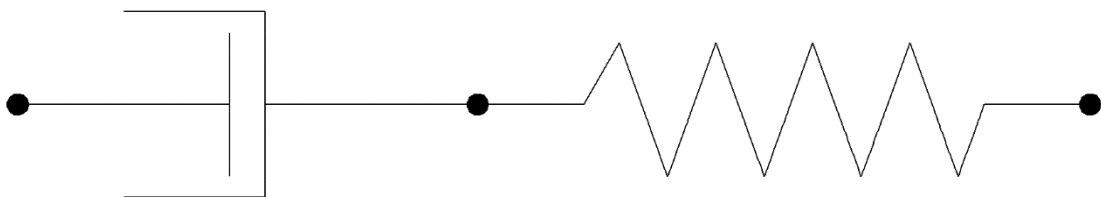
Takové chování označujeme jako viskoelastické nebo také jako viskoelastická. Jedná se o kombinaci viskózního a časově závislého elastického chování. Popis viskoelastického chování znázorňuje Maxwellův model (Obr. 4) a v principu se jedná o kombinaci spojení pružiny a pístu. Většinou se polymerní taveniny popisují viskózními vlastnostmi [7].



Obrázek 2. Viskózní model – píst [7].



Obrázek 3. Elastický model – pružina [7].

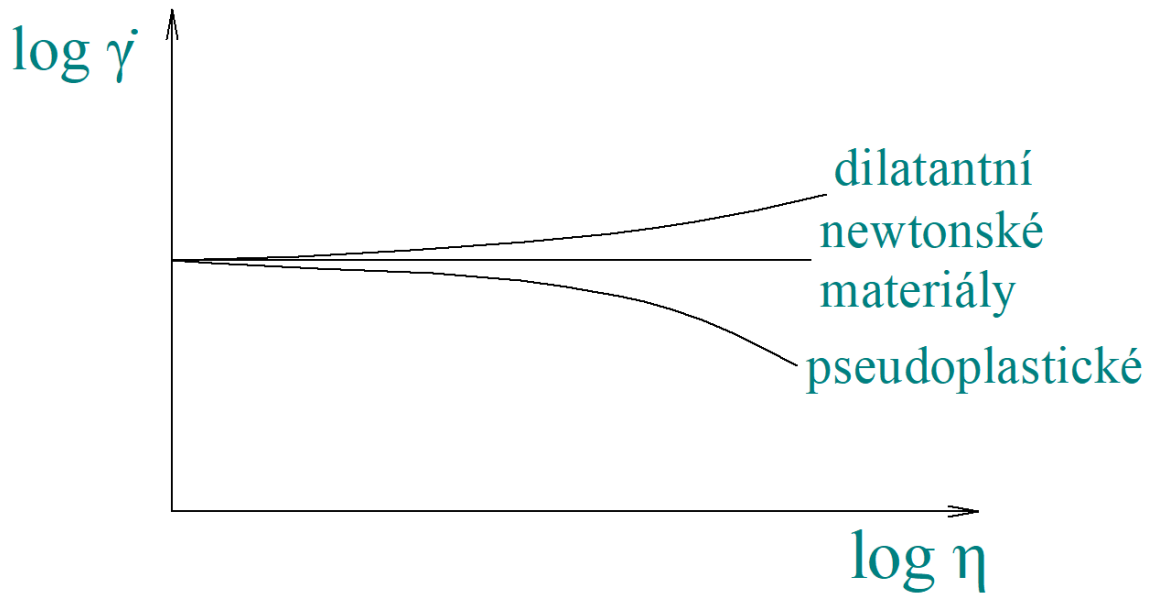


Obrázek 4. Maxwellův model [7].

Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace je znázorněna na následujícím obrázku (Obr. 5). Dle tvaru tokové křivky lze materiály dělit na 3 skupiny:

- Dilatantní – viskozita nabývá vyšších hodnot společně se smykovou deformací (plněné materiály).
- Newtonské – viskozita je neměnná (například voda nebo olej).

- Pseudoplastické – viskozita se snižuje se smykovou deformací (převážná část plastů) [9].



Obrázek 5. Rozdělení materiálů dle tokové křivky [7].

Během ustáleného toku lze smykové napětí určit dle následujícího vztahu [7]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

kde je:

- τ – napětí ve smyku [Pa],
- η – viskozita [Pa.s],
- $\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}].

Hagen-Poiseuilleův výraz pro proudění newtonské kapaliny při vytlačování trubky [7].

$$\Delta P = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4} \cdot Q \quad (2)$$

Kde je:

- ΔP – rozdíl tlaků [Pa]
- η – smyková viskozita [Pa . s]
- L – délka trubky [m]

- R – poloměr trubky [m]
- Q – průtočné množství [m^3/s].

Charakteristiku newtonského chování popisuje mocninový zákon Power-law model [7].

$$\eta_{(\tau\dot{\gamma})} = m \cdot \alpha \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

Kde je:

- m – měřítko konzistence
- α – teplotní funkce
- n – stupeň neneutonského chování (n = 1 pro newtonské látky, n < 1 pro smykově závislé látky).

1.1.1 Smyková viskozita

Viskozita je klíčovou vlastností reologického chování. Producenti surovin využívají této znalosti pro dosažení rovnoměrné kvality při zpracování. Smyková viskozita charakterizuje vnitřní míru odporu vůči toku. Pro newtonské kapaliny (voda nebo olej) je viskozita neměnná. Ke správné tokové funkci je potřeba hnací síla, jejíž velikost je ovlivněna rozměrem makromolekul [18].

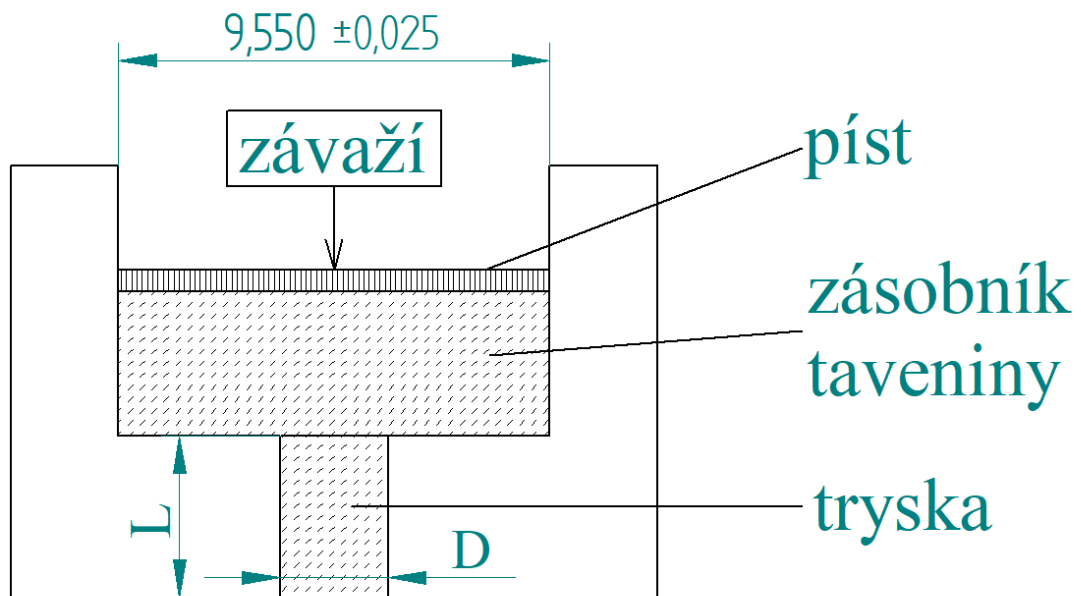
1.1.2 Elongační viskozita

Elongační tahovou viskozitu je možné si představit jako válec kapaliny, který je potřeba natáhnout. Bylo by nesmírně obtížné takto s vodou pracovat. Na druhou stranu roztavený polymer tímto způsobem natahovat lze. Polymer se vyznačuje dobrou pevností, proto může být natahován, aniž by došlo k porušení. Příčina vzniku elongační viskozity nastává na konci vytlačovací hlavy, jež polymer mění svůj tvar, je protahován. Takové protahování polymeru je žádoucí například při výrobě trubiček [12,18].

1.1.3 Index toku taveniny

Index toku taveniny představuje množství vytlačeného polymeru v gramech za 10 minut při jasně definovaných podmínkách. Jednoduché zařízení pro vyhodnocení indexu toku taveniny se nazývá kapilární viskozimetr (Obr. 6), který má předepsanou zátěž a jasně

vymezené rozměry trysky dle normy ASTM. Norma ASTM vymezuje rozměry trysky na $D = 2,095 \text{ mm}$ a $L = 8 \text{ mm}$ [7,18].



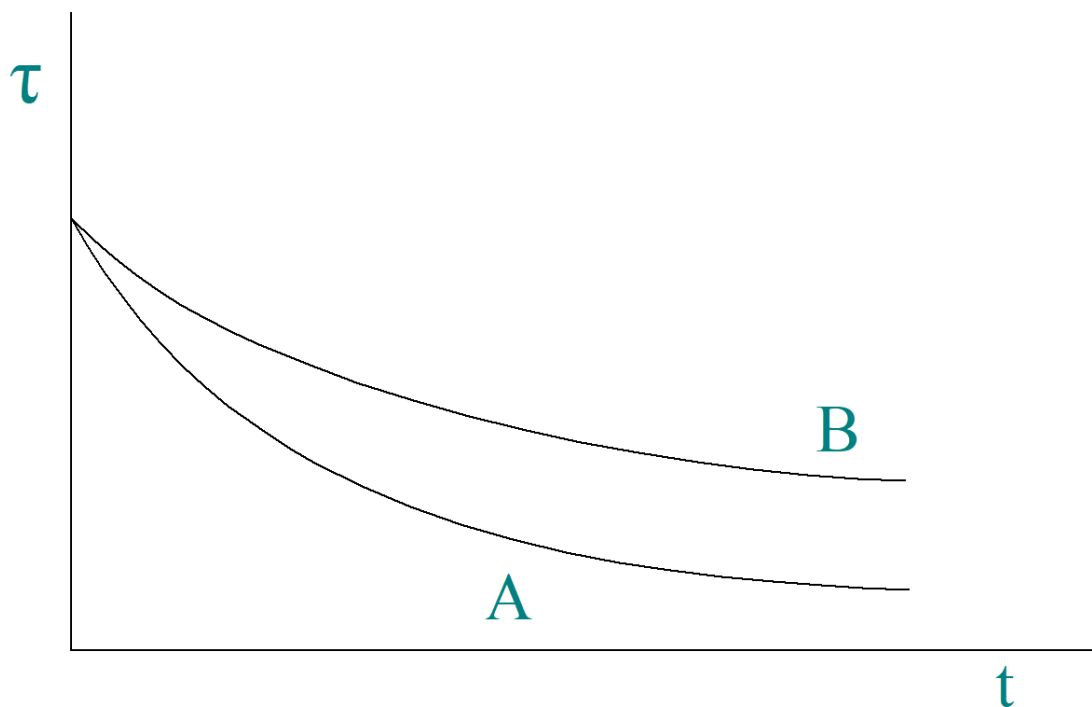
Obrázek 6. Schéma měření tavného indexu [7].

Běžná hodnota indexu toku taveniny se nachází v rozmezí 1 až 25 g/10 min. Malá hodnota indexu toku taveniny značí vysokou viskozitu i molekulovou hmotnost, oproti tomu velká hodnota vypovídá o nízké viskozitě i molekulové hmotnosti [7].

Z výrobního hlediska je nutné, aby si zpracovatel uvědomil, že se jedná pouze o jeden bod na viskozitní křivce. Index toku taveniny poskytuje informace o viskozitě i molekulové hmotnosti, může se ale často jevit jako klamný. Některé polymery nesou stejnou hodnotu tavného indexu, přesto mají rozdílnou viskozitu. Výjimečně se tento index měří při extrémním zatížení 21,6 kg místo klasických 2,16 kg. Jedná se o přidání druhého bodu na viskozitní křivce při vyšší smykové rychlosti [7,29].

1.1.4 Relaxace napětí

Relaxace napětí může být znázorněna mechanickým analogem. Pro mechanický analog znamená, že když nastane náhlé protažení, pružina reaguje ihned. Pokud se napětí uvolňuje pozvolna (exponenciálně), nastává pohyb tlumiče. Jestliže bude čas protahování adekvátní, napětí zůstane nulové.



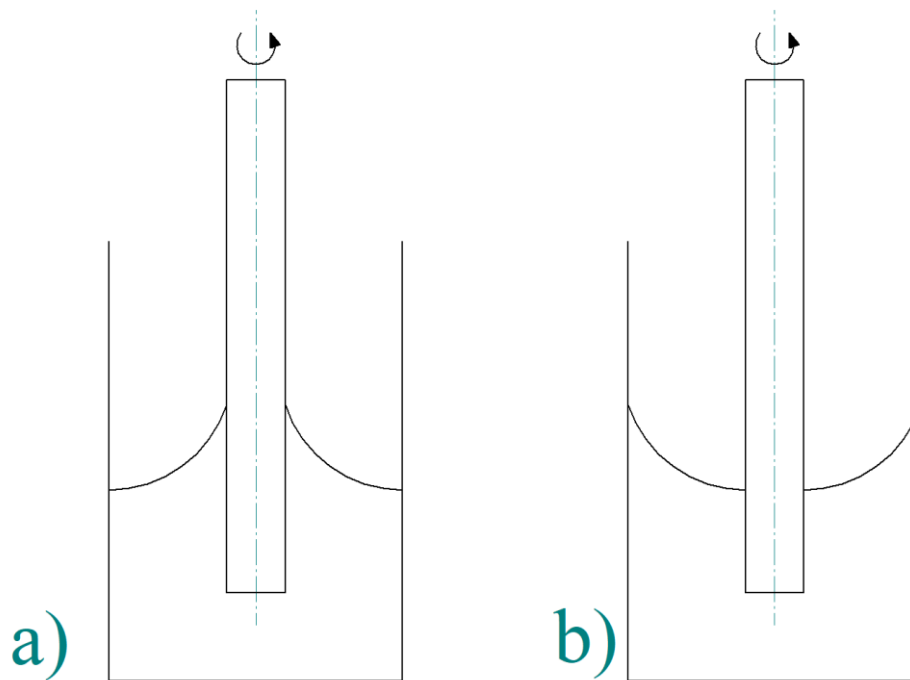
Obrázek 7. Ukázka relaxace napětí [7].

V předchozím obrázku (Obr. 7) jsou znázorněny 2 polymery. Polymer B vykazuje delší relaxaci oproti polymeru A. Dlouhá doba relaxace může materiál ovlivnit tak, že zatuhne ještě před úplným zpracováním. Ve výsledném produktu se objeví zamrznuté napětí. Tato napětí se projevují deformací, smrštěním, vznikem trhlin a stárnutím. Rozmezí typické relaxační doby je 10^{-2} - 10^2 sekund [18].

1.1.5 Normálová napětí

Weissenbergův efekt popisuje jev, při kterém jsou newtonské látky natahovány kolem rotující tyče. Polymery vykazují značnou sílu kontrakce k ose rotace, zatímco newtonské

kapaliny vytvoří prohlubeň vlivem odstředivé síly. Tento jev je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 8).



Obrázek 8. Weissenbergův efekt [7].

a) polymerní tavenina, b) newtonská látka (voda, olej)

Weissenbergův efekt se využívá pro měření rozdílů normálových napětí. Zařízení na měření normálové síly N se nazývá viskozimetr, konkrétně kužel – deska. Síla N se vytváří ve štěrbině mezi kuželem a deskou účinkem rozdílu napětí [23].

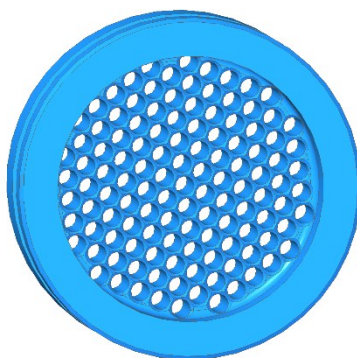
2 VYTLAČOVACÍ NÁSTROJE

Vytlačovací hlava je nedílnou součástí vytlačovací linky. Polymer v ní získává požadovaný tvar, avšak zafixování konečného tvaru nastává až v kalibračním ústrojí. Tokový kanál vytlačovací hlavy musí být navržen tak, aby bylo zaručeno nepřetržité proudění taveniny. Prostory, kde se materiál zdržuje, se nazývají mrtvá místa. Tavenina zde degraduje nebo předčasně vulkanizuje.

Pro konstruktéry vytlačovacích hlav je nutné při návrhu zohlednit následující body:

- Je třeba měřit hodnoty smykové viskozity pro stanovení tlakových spádů nebo průtočného množství.
- Pokud jsou potíže s narůstáním za hubicí, je třeba znát první rozdíl normálových napětí $N_1.N_1$ (ty také mohou způsobit vznik vírů a tokových nestabilit, které mohou negativně ovlivnit finální produkt).
- Je zapotřebí počítat s relaxací napětí z důvodu existence zamrznutých napětí, jež mohou zdeformovat hotový výrobek. [aplikovaná reologie]
- Pokud je produkt namáhán tahem, například při tepelném tváření, je dobré být seznámen s parametrem tahové elengační viskozity [7].

Na konec šnekového profilu, před vstupní těleso hlavy, se obvykle vkládá lamač (Obr. 9). Lamač je určen k úplné homogenizaci taveniny vycházející z výstupní části šnekového stroje [10].



Obrázek 9. Lamač [25].

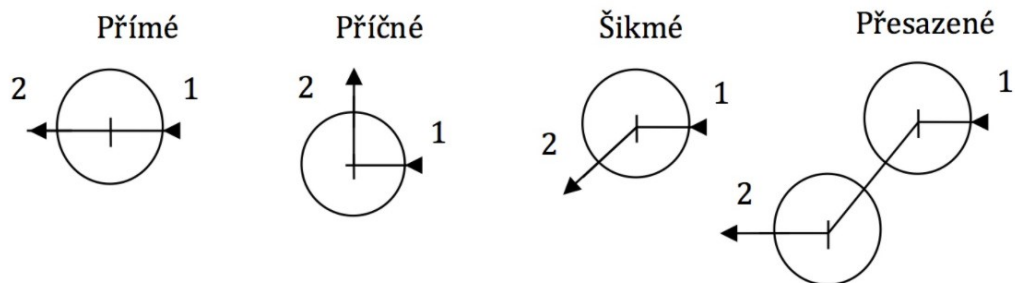
Vytlačovací nástroje se člení dle typu konstrukce na:

- hlavy přímé,
- hlavy nepřímé,

- širokošterbinové hlavy,
- speciální hlavy [10].

Vytlačovací hlavy lze také rozdělit dle polohy osy šneku a osy vytlačovací hlavy (Obr. 10) na:

- přímé,
- příčné (radiální, axiální),
- šikmé,
- přesazené.



Obrázek 10. Rozdělení vytlačovacích hlav dle typu os šneku a hubice [11].

1 – osa šneku, 2 – osa vytlačovací hubice

2.1 Vytlačovací hlavy na trubky

Hlavy přímé jsou navrženy pro vytlačování uzavřených symetrických profilů, jako jsou např. trubky, hadice nebo uzavřené nesymetrické profily, jako jsou např. okenní či podlahové lišty.

Přestože jsou trubky brány spíše k profilům, používá se myšlenka profilu ve více komplikovaných geometriích. Rovněž proto jsou profilové hlavy běžně náročnější na konstrukční práci. Vytlačovací hubice i trn musí být dostatečně dlouhé, aby zprostředkovaly relaxaci v tavenině [7].

Při konstrukčním návrhu hlavy se u výstupních rozměrů hubice nesmí zapomenout na narůstání taveniny za hubicí, smrštění objemové konstrukce při chlazení a na transformaci rozměru protažením vlivem odtahu. U tenkostěnných profilů se hubice zvětšuje o 5 až 10 %, zatímco u tlustostěnných výrobků se o 5 až 10 % zmenšuje [11].

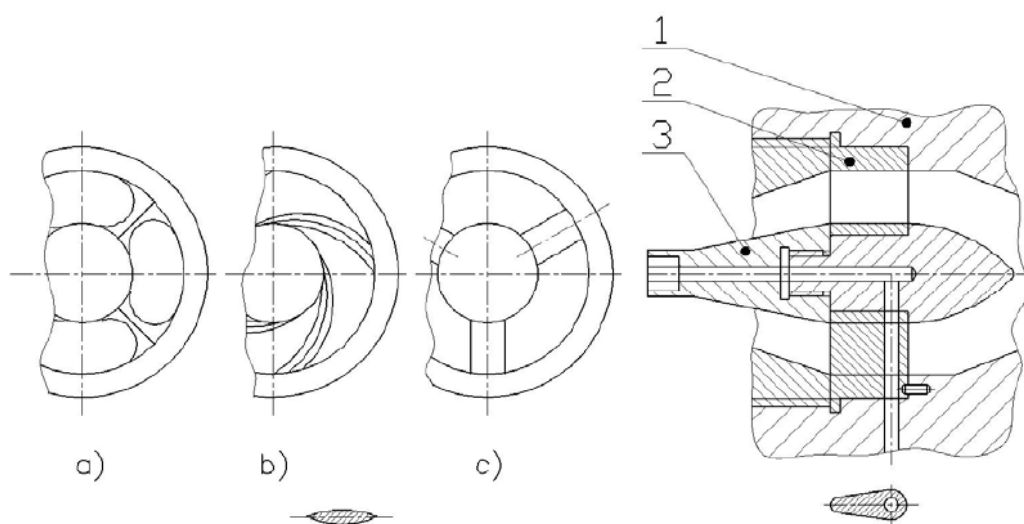
Vytlačovací hlava na trubky je konstrukčně komplikovaná, zejména ve své vnitřní části. Správná konstrukce i volba typu konstrukčního provedení jsou klíčové pro výsledný kruhový profil [10].

Dle konstrukce se vytlačovací hlavy člení na následující typy:

- hlava s žebry,
- ze strany plněná hlava,
- hlava se spirálovým trnem,
- plochá spirálová hlava [10].

2.1.1 Hlava s žebry

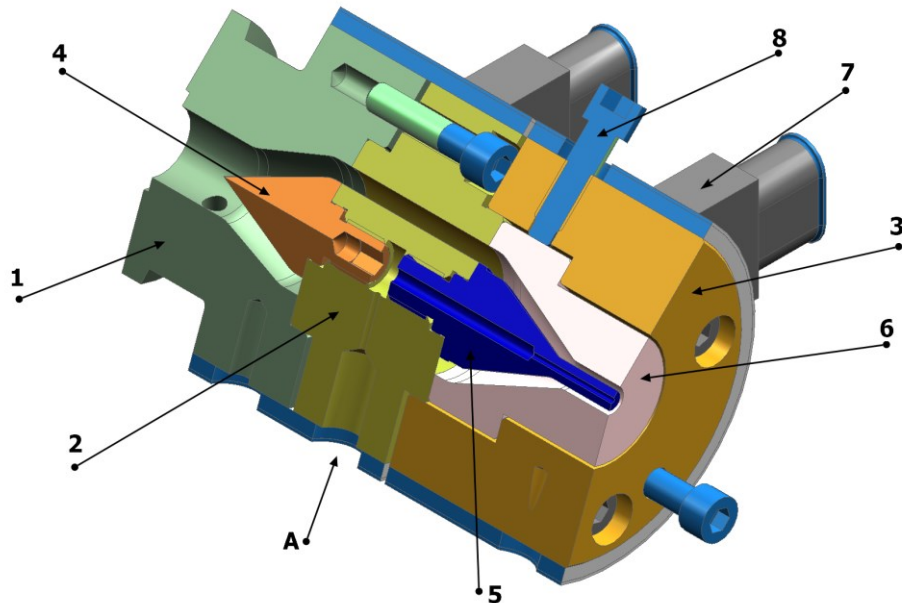
Žebra jsou klíčovým prvkem pro toto konstrukční řešení. Tavenina protéká okolo nich a zároveň slouží jako nosič trnu či držák torpéda. Obtékání žebor se v určitých situacích může jevit jako handicap, a to v případě vzniku stokové čáry. Tyto stokové čáry jsou slabým místem na profilu. Některá místa mohou praskat nebo zůstávají jako vizuální znehodnocení. Pozitivum konstrukce žebor je poměrně jednoduchý mechanický i reologický návrh a nízká spotřeba tlaku. Příklady konstrukčních provedení žebor jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 11) [10].



Obrázek 11. Příklady uspořádání vytlačovacího trnu s rozdělovačem [10].

a, b, c, možnosti řešení rozdělovače, 1 – těleso vytlačovací hlavy, 2 – žebro, 3 – vytlačovací trn

Vytlačovací hlava s žebry na trubičky včetně popisu je znázorněna na následujícím obrázku (Obr. 12).

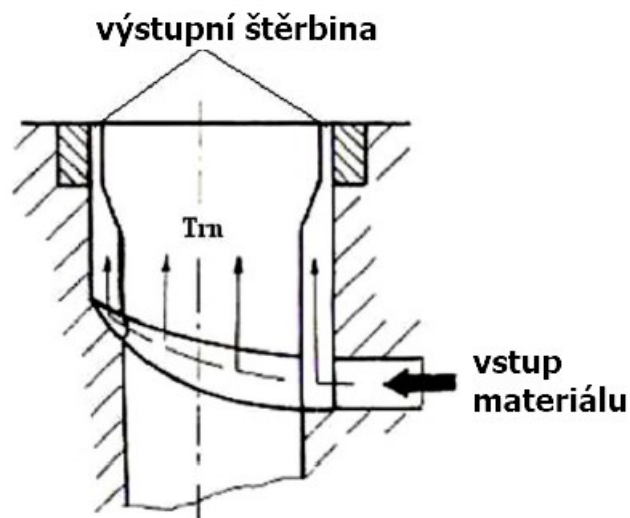


Obrázek 12. Vytlačovací hlava na trubičky [25].

1 – těleso vstupní, 2 – těleso střední, 3 – těleso výstupní, 4 – torpédo, 5 – trn, 6 – hubice, 7 – topení, 8 – stavěcí šrouby, A – přívod vzduchu.

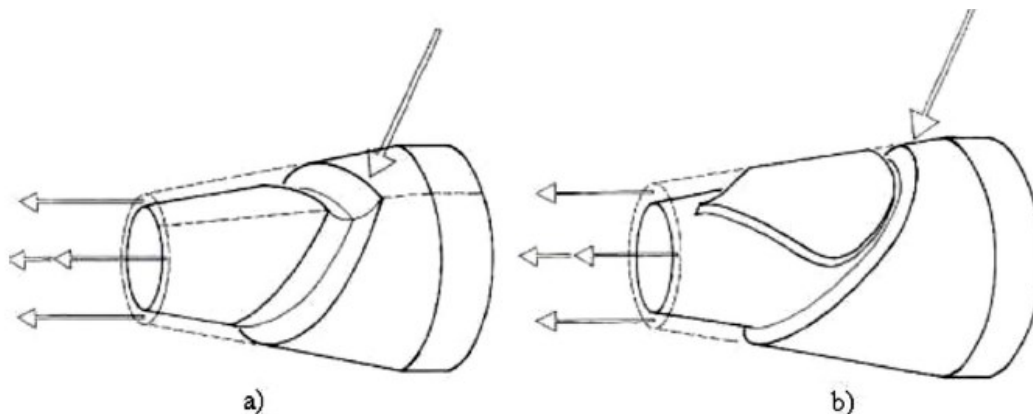
2.1.2 Ze strany plněná hlava

Název tohoto druhu nástroje napovídá, že tavenina vstupuje z boční stěny (Obr. 13) a následně obtéká trn.



Obrázek 13. Ze strany plněná hlava [13].

Vytlačovací trn zpravidla bývá typu ramínka (Obr. 14a) nebo srdce (Obr. 14b). Pro správný chod tohoto typu je nevyhnutelné správné vyvážení toku napříč celou šterbinou. Správné vyvážení toku zapříčiní odpovídající distribuci taveniny [14].

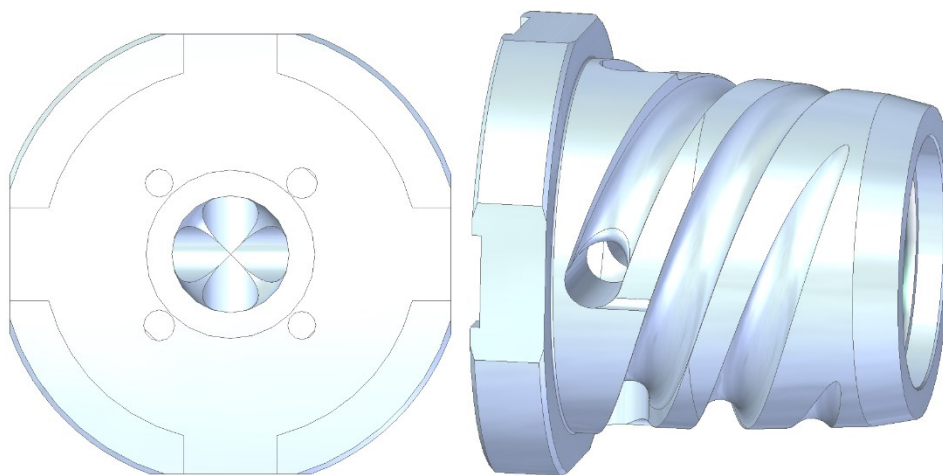


Obrázek 14. Vytlačovací trn pro plnění materiálu ze strany [14].

a) trn s rozvodným kanálem ve tvaru ramínka na šaty, b) trn s rozvodným kanálem ve tvaru srdce

2.1.3 Hlava se spirálovým trnem

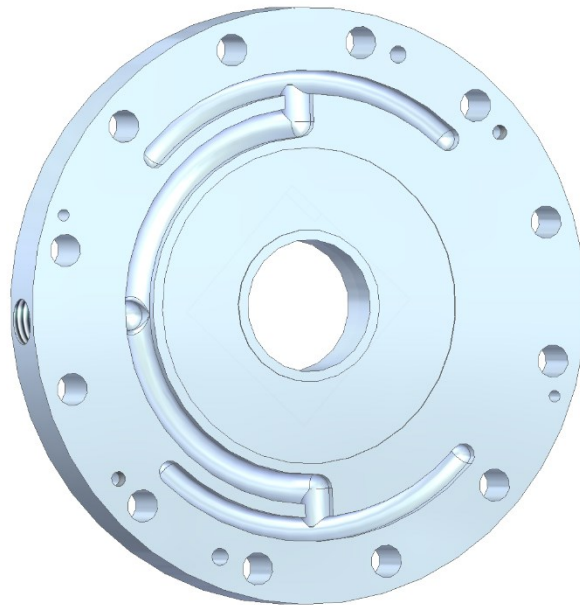
Spirálový trn (Obr. 15) se používá nejen při výrobě trubek, ale i parizonů nebo vyfukovaných fólií. Vstup taveniny do hlavy zajišťují vstupní kanály. Jednotlivé spirály dále vedou taveninu k výstupní šterbině v radiálním směru. Výhody spirálového trnu jsou skvělé míchací schopnosti, vytlačování za vysokých výkonů a výhodná orientace stokových čar. Konstrukční návrh hlavy se spirálovým trnem bývá složitější z důvodu nutnosti rovnoměrného průtoku taveniny. Špatná konstrukce se může projevit pulzováním či nestejnou tloušťkou stěny nebo fólie [14].



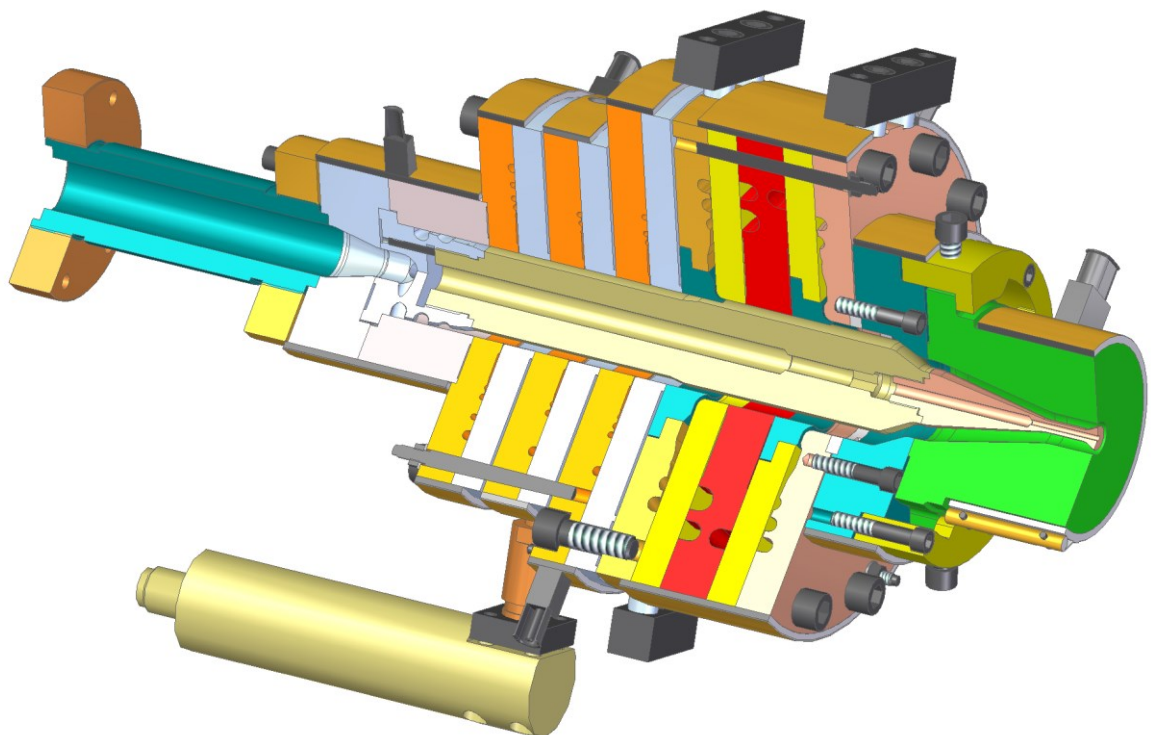
Obrázek 15. Spirálový trn [25].

2.1.4 Plochá spirálová hlava

Plochá spirálová hlava se používá zejména pro výrobu vícevrstevných trubek. Tavenina je vedena plochými deskami (Obr. 16), ve kterých jsou vyfrézovány rozvodové spirály. Toto řešení je velmi složité na konstrukci (Obr. 17), náročné na manipulaci s hlavou, nicméně pozitivum najdeme v uspořádání jednotlivých desek [14].



Obrázek 16. Deska spirálové hlavy [25].



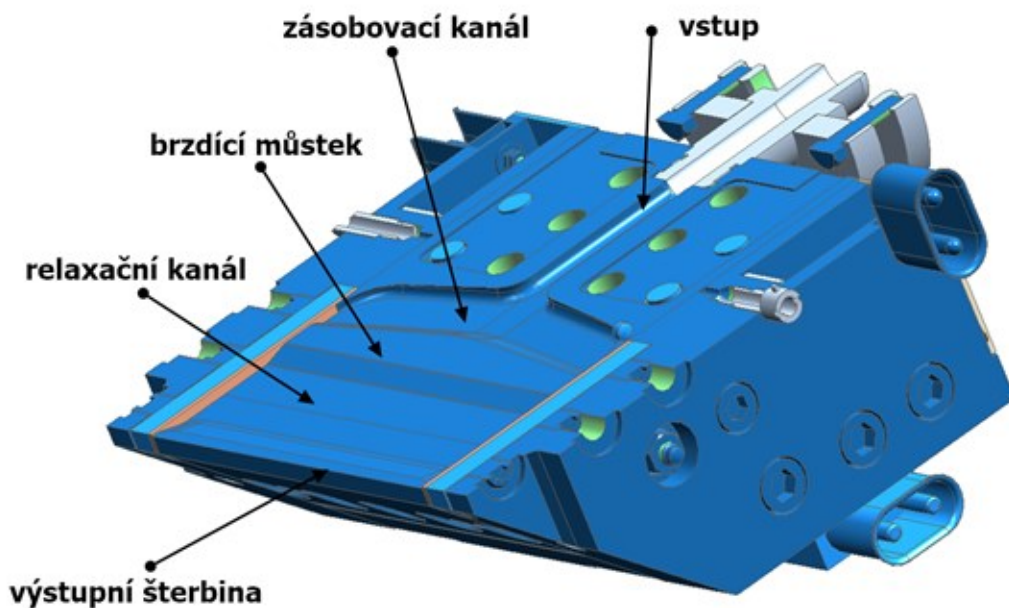
Obrázek 17. Příklad Spirálové hlavy [25].

2.2 Plochá vytlačovací hlava

Širokoštěrbinová hlava se používá zejména při výrobě desek a fólií pro rozmanité uplatnění. Polymerní tavenina je vedena po celé šířce štěrbinový rozvodným kanálem. Aby byla dosaženo optimální tloušťky po celé šíři vytlačovaného produktu, je žádoucí zajistit přibližně stejný odpor v jednotlivých částech hlavy. Širokoštěrbinová hlava je namáhána značnými silami, jež způsobují oddalování spodní a vrchní části. Dochází zde k ohybu výstupní štěrbině. Důsledek tohoto jevu může být poměrně velká viskozita či rozlehlá plocha vytlačovací hlavy. Obecně jsou známy 3 typy širokoštěrbinových hlav: hlava ve tvaru T, hlava ve tvaru ramínka na šaty a hlava ve tvaru rybího [10,11].

Konstrukce ploché vytlačovací hlavy se skládá ze 4 částí (Obr. 18):

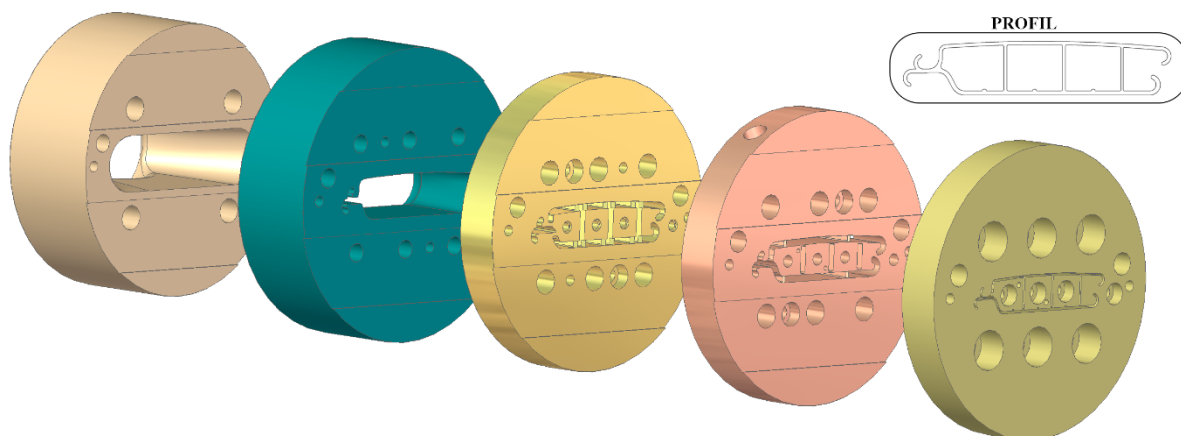
- Zásobovací kanál – Rozvodný vytlačovací kanál je určen k distribuci taveniny do celé šíře vstupní části. Na konci rozvodného kanálu se snižuje objem kvůli požadované výstupní rychlosti z tohoto pásma.
- Brzdový můstek – Nachází se bezprostředně za rozvodným kanálem a jeho účelem je srovnat rychlostní tok napříč celým profilem.
- Relaxační kanál – Účelem této zóny je ustálení toku taveniny natolik, aby se zde stabilizovala veškerá napětí.
- Výstupní štěrbinová hlava – Má úkol tvarovat konečnou sílu fólie nebo desky. Zvykem zůstává možnost regulace výstupního otvoru, aby byly eliminovány obměny v tloušťce vytlačovaného produktu [7,10,13].



Obrázek 18. Oblasti ploché vytlačovací hlavy [25].

2.3 Vytlačovací hlava na profily

Tyto vytlačovací hlavy se používají ve výrobě bazénových profilů, okenních lišt, profilovaných desek, stavebních profilů i mnoha dalších. Nejdůležitějším prvkem profilové vytlačovací hlavy zůstává patřičná a efektivní distribuce taveniny do každého koutu profilu rovnoměrným způsobem. Tento typ vytlačovacích nástrojů bývá konstrukčně obtížný, proto se často využívá moderních 3D programů pro výpočet toku neneutonských kapalin. Zpravidla se tak eliminují dodatečné úpravy. Největším problémem tohoto nástroje zůstává situace, kdy konstrukce profilu vykazuje rozdílnou tloušťku stěn. Je obecně známo, že materiál teče cestou nejmenšího odporu, proto snadněji zatéká do širších skulinek, kdežto ty úzké zůstávají minimálně využité. Konstrukční záměr profilové vytlačovací hlavy je přeměnit kruhovitý tok na požadovaný profil, přičemž rychlost musí být ve všech částech profilu optimální. Běžně se tyto nástroje konstruují jako segmentové (Obr. 19), kde mezi jednotlivými částmi hlavy dochází k pozvolnému tvarování taveniny do patřičné podoby finálního produktu [10,11].

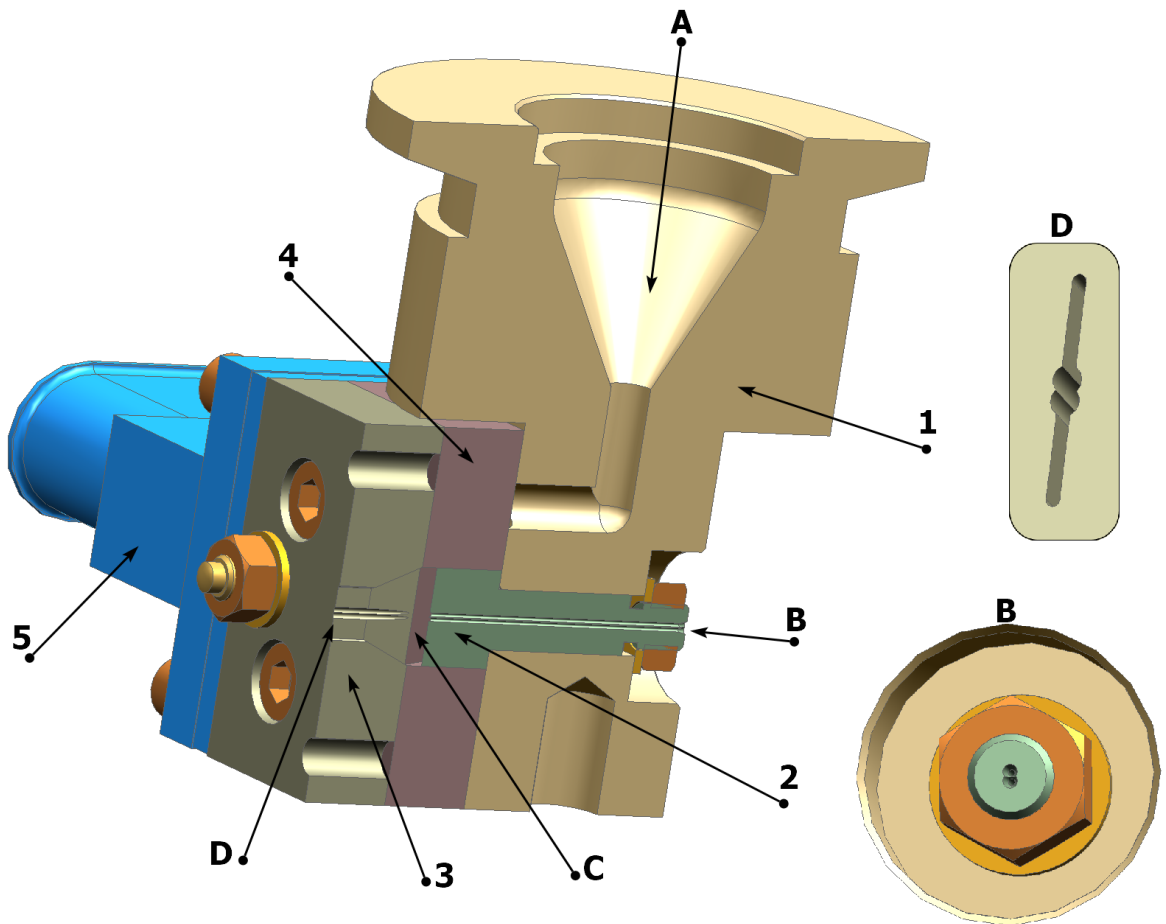


Obrázek 19. Profilová vytlačovací hlava [25].

2.4 Vytlačovací hlava na opláštění

Při opláštění vodičů je nevyhnutelné, aby polymerní vrstva byla celistvá, dá se tak předejít zkratu, pronikání vlhkosti i dalším negativním jevům. Charakteristickým materiálem pro kabely zůstává měď nebo hliník. Jádru kabelu má za úkol přenášet elektrický proud. Vytlačovací linka se musí přizpůsobit typu uspořádání kabelů a konstrukci jádra. Převážně se opláštějí vodiče a kabely, dále i ocelové trubky pro rozvod plynu, v neposlední řadě také kovová i polyamidová lanka. Jednoduchým příkladem může být obyčejná prádelní šňůra [11].

Na začátku výrobní linky na opláštění vodičů termoplastickou izolací je odvíjený drát, jenž putuje přes soustavu vodicích kladek do předehřívacího aparátu. Zahřátý vodič vchází do hlavy. Nově vzniklý plášť se ihned kalibruje, chladí, měří a kontroluje se souosost pláště s vodičem, průměr i jeho izolační vlastnosti. Opláštěvaný vodič je synchronně odtahován skrze vodicí kladky navíjecím ústrojím. Příčná vytlačovací hlava je znázorněna na následujícím obrázku (Obr. 20) [11].



Obrázek 20. Vytlačovací příčná hlava na opláštění [25].

1 – vstupní těleso, 2 – trn, 3 – hubice, 4 – přechod, 5 – topení ploché

A – vstup taveniny, B – vstup dvojitého drátu, C – sloučení drátu s taveninou, D – výstupní štěrbina

2.5 Tokové nestability vytlačovacích hlav

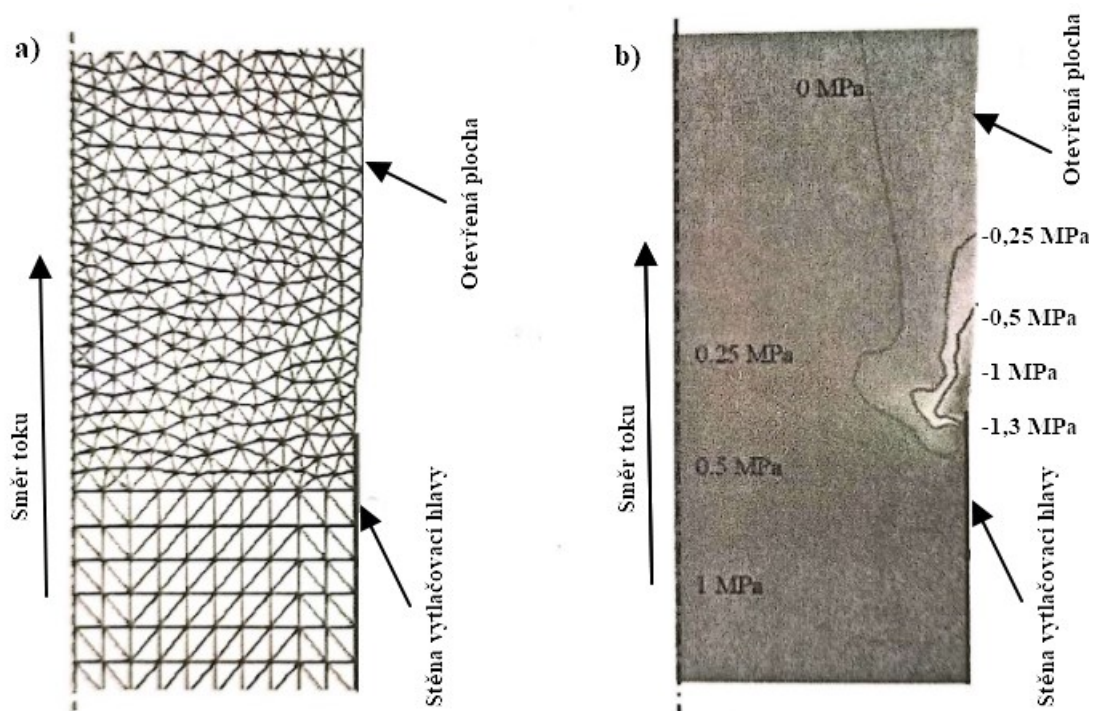
Vytlačované polymery bývají zřídka čisté a zpravidla mají různě dlouhé polymerní makromolekuly. Mnohdy se do směsí přidávají plniva, barviva, stabilizátory, aditiva a spousty dalších příměsí. Tyto prvky do jisté míry ovlivňují tokové chování při zpracování. Komplexnost struktury se nachází mezi viskózní kapalinou a elastickou tuhou látkou. Toto chování se nazývá jako viskoelastické. Při výrobě může nastat problém v široké škále možných nestabilit. Tyto problémy snižují produktivitu výroby [7].

2.5.1 Narůstání za hubicí (diedrool)

Anglický pojem „diedrool“ v překladu znamená „slintání vytlačovací hlavy“, inspirací pro tento jev byly malé slintající děti. Jedná se o úkaz, ve kterém se tavenina začne akumulovat na hraně výstupní šterbiny. Po určitém čase se nahromaděné množství nežádoucí taveniny strhne vlivem tokového proudu a vytvoří se lokální znehodnocení ve výsledném produktu. Interval nahromadění včetně strhnutí může být od několika sekund po mnoho hodin [12,23].

Pro vysvětlení tohoto jevu je nutné svědomitě matematicky namodelovat detail toku polymerní taveniny okolo výstupní šterbiny (Obr. 21). Výsledky prokázaly, že za určitých podmínek se v blízkém okolí výstupní hrany generuje záporný tlak. Záporná hodnota tlaku je velice malá, avšak dostačující pro spontánní akumulování části taveniny na výstupní hraně [12,23].

K odstranění tohoto problému je nejvhodnější upravit hranu výstupní šterbiny. Ostrá hrana se upravuje zkosením (6° – 12°), zaoblením nebo odsazením. [23]



Obrázek 21. FEM analýza polymerní taveniny na výstupu z hlavy [12].

2.5.2 Žraločí kůže (shark skin)

Jedná se o jev, při němž dochází ke vzniku zvrásněného vytlačovaného produktu. Vytlačované polymery při klasických rychlostech, kde je $\tau_w \leq 0,1$ MPa (smykové napětí na

stěně) jsou výsledné produkty rovné a povrch hladký. Zhruba do této hodnoty ($\tau_w \leq 0,1$ MPa) se počítá se standardní mechanikou kapalin nebo tzv. hypotézou žádného klouzáni na stěně [7,12].

Příčina vzniku žraločí kůže je spojena z výstupní části vytlačovací hlavy. Řešením tohoto problému může být snížení smykového napětí na stěně, zvýšení teploty, použití kluzné přísady či keramická výstupní šterbina, která má dvakrát vyšší výkon [7,12].

3 LINKY PRO VYTLAČOVÁNÍ POLYMERŮ

3.1 Vytlačovací stroje

Účelem vytlačovacích strojů je převedení tuhého materiálu, často ve formě granulí, do plastického stavu a vytlačení polymerní taveniny otvorem do otevřeného prostoru. Roztavený polymer se dále tvaruje, případně reguluje dle daných požadavků. Vytlačovací stroj je schopen připravit granulát, kaučukovou směs, opláštění vodičů i kabelů, ale také zásobování válcovacích strojů. Rozdělení vytlačovacích strojů je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 22) [15].



Obrázek 22. Schéma vytlačovacích strojů [10].

3.1.1 Šnekové vytlačovací stroje

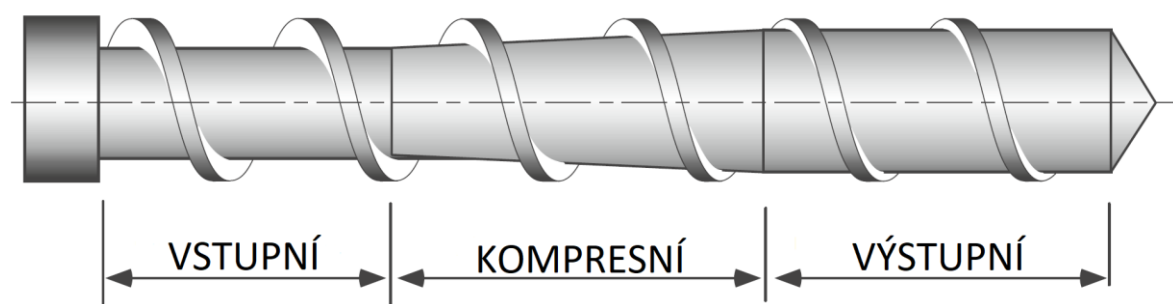
Šnekové vytlačovací stroje patří k nejčastěji používaným strojům v oboru vytlačování, a to díky nepřetržitému způsobu práce i vysoké výkonnosti. Široká škála rozmanitosti se nabízí při výrobě trubek, profilů, plochých i vyfukovaných fólií, desek, opláštěvaných vodičů, kaširovaných materiálů. Často se šnekovými vytlačovacími nástroji zpracovávají polotvary z kaučukových směsí aplikovaných při výrobě pláště pneumatik či klínových řemenů nebo také hadic i speciálních profilů [10,15].

Nejdůležitějším základním funkčním prvkem pro tyto stroje je šnek, jehož důležitým aspektem je takzvaný kompresní poměr. Kompresní poměr vyjadřuje poměr objemů šnekového profilu pro jedno stoupání ve dvou místech šneka. Transformace kompresního poměru se zpravidla provádí změnou hloubky šnekového profilu. Realizace a zakončení šneka je navrženo dle typu zpracovávaného materiálu [11,15].

Šneky jsou namáhány axiálním i radiálním zatížením. Ložiska se dimenzují na základě těchto sil. Vůle mezi pracovním válcem a šnekem musí být dvakrát větší než maximální

průhyb šneka. Délka šneka i průřez ovlivňuje konstrukci, jež je zatížena axiální tlakovou a vzpěrnou silou. Maximální zkroucení šneka by nemělo přesahovat hodnotu 3° [10].

Šnek se otáčí v plastikační komoře vytopené několika elektrickými pásy. Vstupem pro granulát je násypka ve tvaru kužele. Moderní vytlačovací linky zahrnují pneumatické přívody granulí ze zásobníku. Celý proces je více automatizován. Rozměr šneka je poměr jeho délky k jeho průměru. Zpravidla se jedná o délku dvaceti až čtyřicetinasobku průměru. Válec, v němž se šnek otáčí, obsahuje vždy minimálně 3 pásma – vstupní, přechodové a výstupní. Každé pásmo má vlastní topný pás i tepelnou regulaci. Ve vstupní části je materiál zahříván a částečně stlačen. V přechodové sekci je polymer více stlačován, plastikován i homogenizován. V posledním úseku je materiál na bázi plně homogenní taveniny, která je plynule vtlačována do nástroje. Ukázka jednochodého šneka je popsána na následujícím obrázku (Obr. 23) [10,11,16].



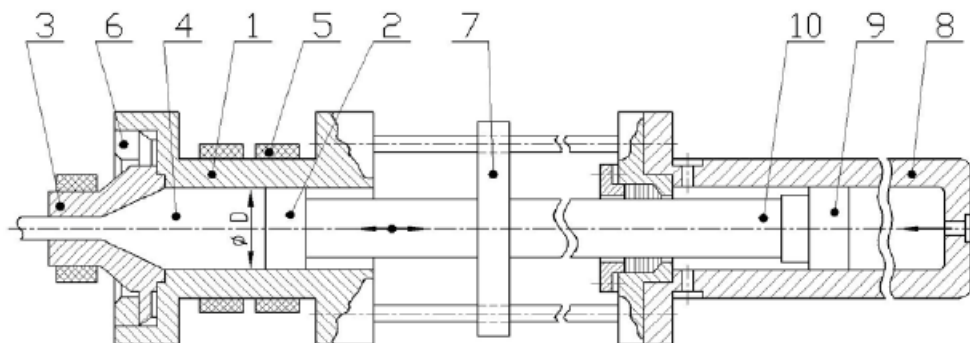
Obrázek 23. Jednochodý šnek [22].

3.1.2 Pístové vytlačovací stroje

Nejdůležitějším pracovním prvkem těchto strojů je vytlačovací píst s hydraulickým či mechanickým pohonem. Systém je tvořen pracovním a pohonným oddílem. Pohonnou část reprezentuje hydraulický válec s pístem. Sjednocení pracovní části s pohonnou zabezpečuje pístnice vedená v příčnicku. Hydraulický válec je tvořen dvojtakovým obvodem, přičemž systém nižších tlaků zajišťuje vedlejší i přípravné posuny válce a systém vyšších tlaků se stará o hlavní pracovní pohyb pístu. Vytlačovací hlava, pracovní válec a materiál s pístem představují pracovní část. Elegantním řešením vytlačovací hlavy s pracovním válcem zůstává bajonetový uzávěr, který skrze něho dostává materiál do pracovního válce. Pracovní válec i vytlačovací hlava jsou vybaveny topnými pásy [10,15].

Vytlačovací síla, průměr a zdvih pracovního pístu určují velikost pístového stroje. Výhodou pístového vytlačovacího stroje je zpracování materiálu, jež nemá dobré tokové vlastnosti.

Nefiguje zde velké smykové namáhání. Cyklický chod činí stroj nevýhodným. Názorná ukázka pístového vytlačovacího stroje je zachycena na následujícím obrázku (Obr. 24) [10,16].

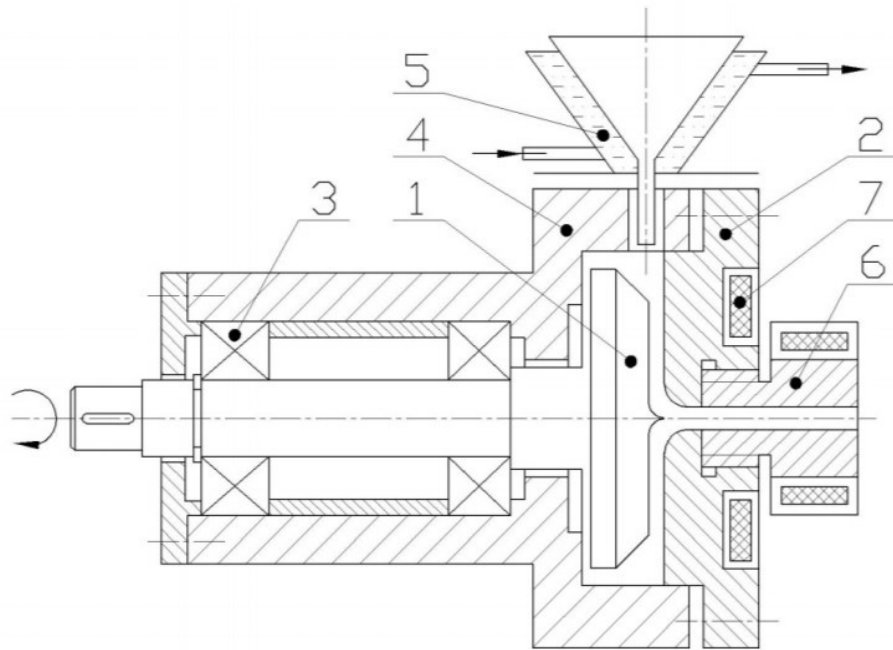


Obrázek 24. Pístový vytlačovací stroj [15].

1 – pracovní válec, 2 – pracovní píst, 3 – vytlačovací hlava, 4 – vytlačovací materiál, 5 – topná tělesa, 6 – bajonetový uzávěr, 7 – vedení pístnice, 8 – hydraulický válec, 9 – píst, 10 – pístnice

3.1.3 Diskové vytlačovací stroje

Diskové vytlačovací stroje (Obr. 25) charakterizuje jev známý jako Weissenbergův efekt. Srdcem zmíněného vytlačovacího stroje je rotující disk uložený v ložiskách. Materiál se sype do chlazené násypky, z níž se dostává úzkou štěrbinou (0,05 – 0,06 průměru disku) k rotujícímu disku, zde se látka taví a dále putuje díky efektu elastických napětí v radiálním směru k vytlačovací hubici. Teplo potřebné k úspěšné plastikaci se generuje v topných tělesech uložených v čelní desce i vytlačovací hubici [10,16].



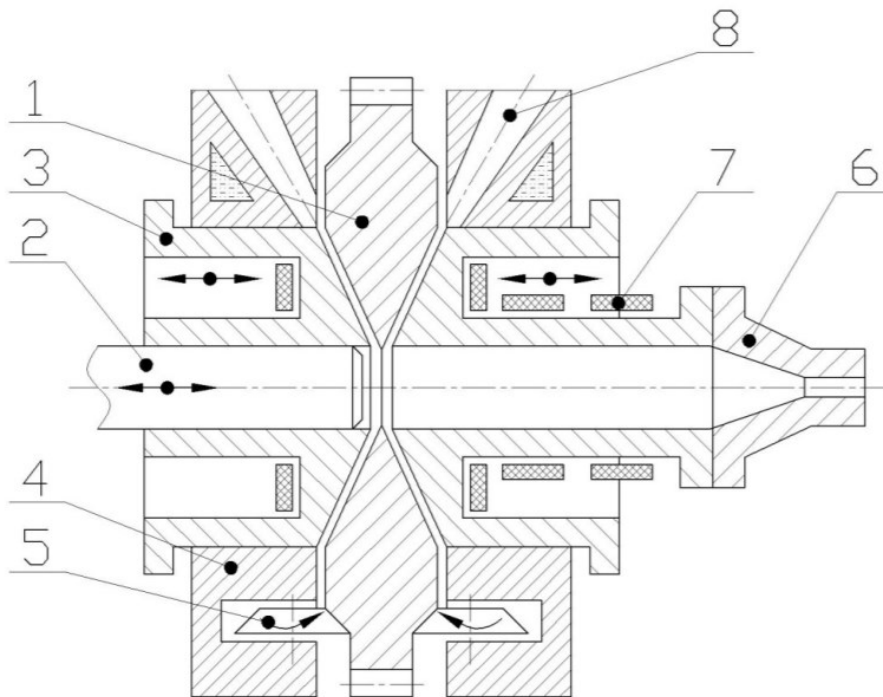
Obrázek 25. Diskový vytlačovací stroj [16].

1 – disk, 2 – čelní deska, 3 – ložiska, 4 – těleso, 5 – chlazená násypka, 6 – vytlačovací hlava, 7 – topná tělesa

Vytlačovací tlaky zde figurují pouze v malých řádech (desetiny MPa). Intenzita tlaků je podřízena normálovému napětí, jež ovlivňuje funkci tzv. gradientu rychlosti. Výkon diskového vytlačovacího stroje je vázán průměrem a tvarem disku, smykovou rychlostí i typem zpracovaného materiálu [10].

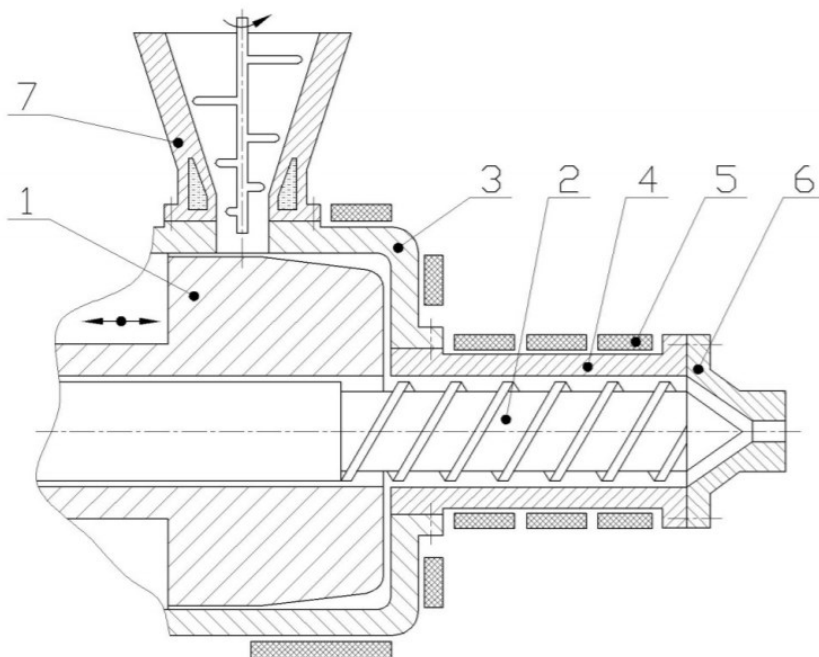
Malým handicapem mohou být právě zmíněné nízké vytlačovací tlaky, avšak výhodou zůstává výkonná homogenizace taveniny a snadná regulace plastikace.

Docílit vyššího vytlačovacího tlaku můžeme pomocí kombinace vytlačovacího pístu a plastikačního diskového ústrojí (Obr. 26). Předností tohoto seřazení je kromě vysokého tlaku také nízký interval doby plastikace [10].



Obrázek 26. Vytlačovací diskový stroj s pístem [10].

1 – plastikační disk, 2 – pracovní píst, 3 – dělené statorové těleso, 4 – vnější těleso, 5 – vodící kladky, 6 – vytlačovací hlava, 7 – topná tělesa, 8 – tangenciální plnicí kanály



Obrázek 27. Vytlačovací diskový stroj se šnekem [10].

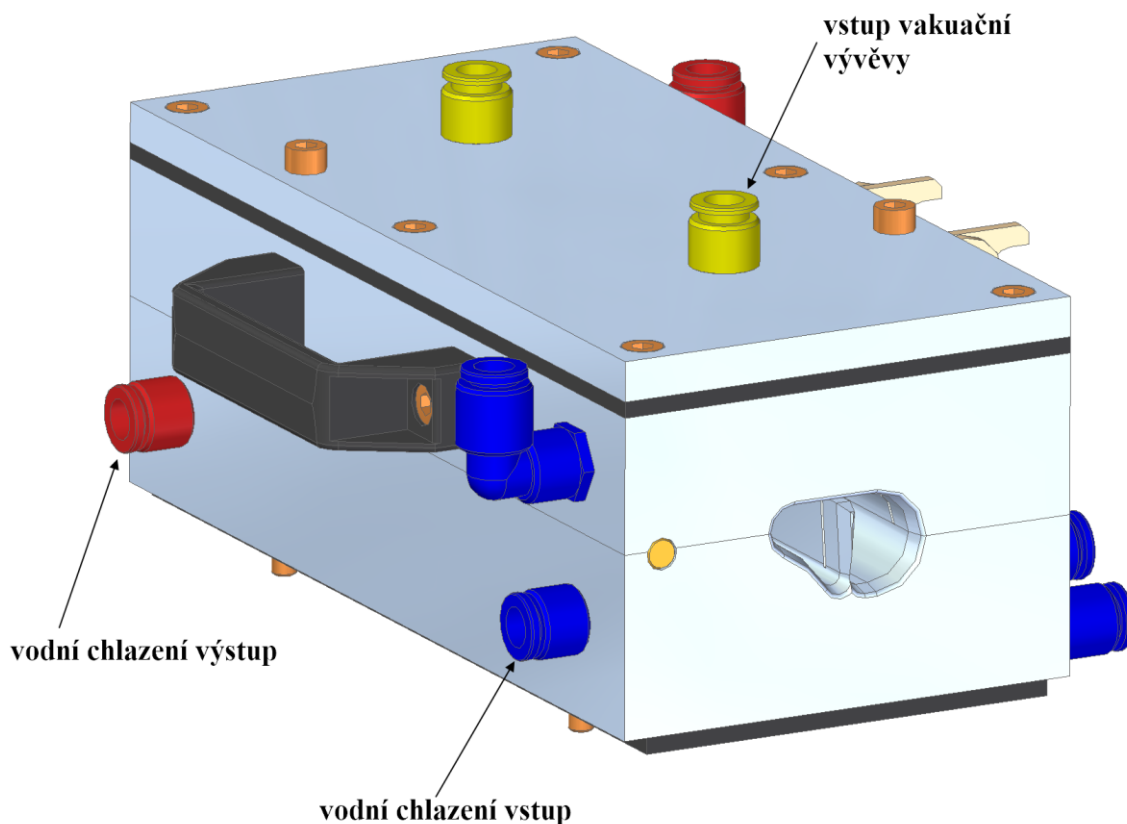
1 – plastikační disk, 2 – pracovní šnek, 3 – těleso, 4 – pracovní válec, 5 – topná tělesa, 6 – vytlačovací hlava, 7 – chlazená násypka

3.2 Kalibrační ústrojí

Kalibrační ústrojí je určeno pro konečné zafixování tvaru a rozměru vytlačovaného produktu. Kalibrační zařízení se volí dle geometrických i rozměrových požadavků. Kalibrační ústrojí může být průvlakové, podtlakové nebo přetlakové. Kalibrační zařízení bývá často spojeno s chladicí vanou [1].

3.2.1 Podtlaková kalibrace

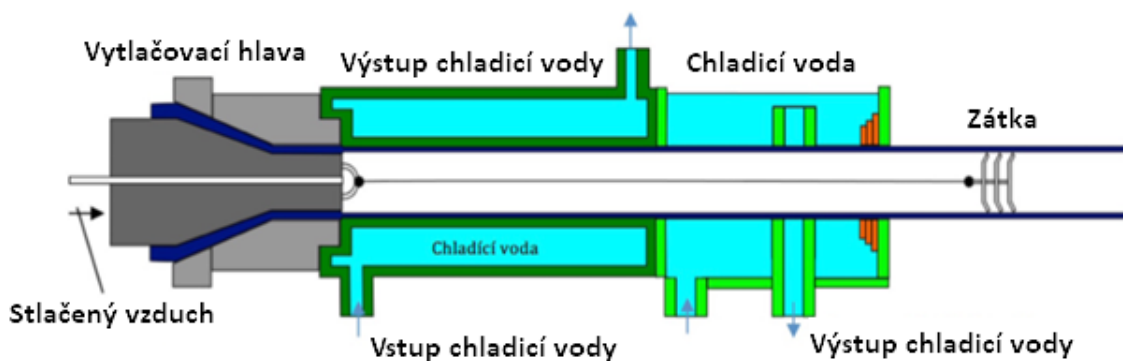
Kalibrační zařízení podtlakové (Obr. 28) je nepřetržitě chlazeno vodou, která protéká napříč celým pouzdem. Chladicí komory pro vodu musí být navrženy tak, aby nedošlo k narušení profilu proudem vody, ale zároveň zajišťovaly nejlepší účinnost chlazení. Pouzdro je napojeno na vývěvu, která vytváří vakuum. Vakuum se dostává skrze drážky v kalibračním pouzdru k materiálu. Přisává tak daný profil ke stěně kalibru a uchovává jeho tvar. Tato forma kalibrace je vhodná pro tvarově složitější profily, oproti tomu nebývá podtlaková kalibrace nejlepším řešením pro tlustostěnné či malé trubky [11].



Obrázek 28. Podtlaková kalibrační jednotka [25].

3.2.2 Přetlaková kalibrace

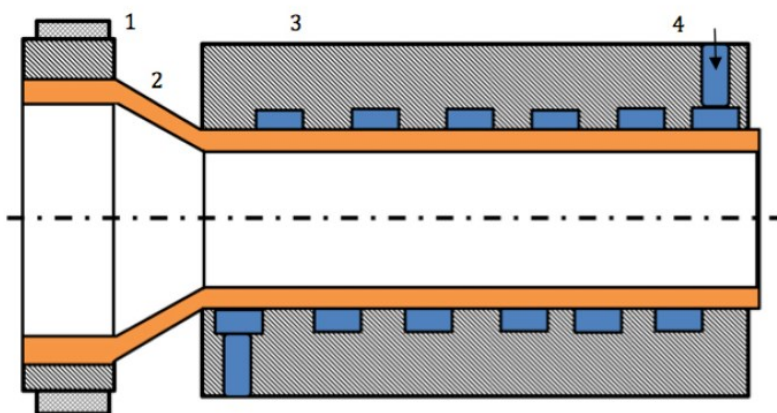
Pro přetlakové kalibrační zařízení je nezbytné, aby bylo umístěno bezprostředně za vytlačovací hlavou, často se mezi vytlačovací hlavu a kalibrační pouzdro vkládá tepelná izolace, jež kontaktem oba tyto prvky spojuje. Tento typ kalibru využívá princip přetlaku vzduchu uvnitř vytlačovaného dutého profilu. Přívod vzduchu vstupuje do středního tělesa hlavy, proudí přes vytlačovací trn a vytváří přetlak uvnitř trubky. Stěny trubičky jsou natlačeny na kalibrační pouzdro, jež je chlazené vodou. Uvnitř vytlačovaného profilu se nachází zátka, která je zavěšená na lanku a umožňuje drobný průnik vzduchu. Tímto způsobem se trubička uvnitř chladí. Přetlakové kalibrační schéma je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 29) [10,11].



Obrázek 29. Přetlaková kalibrace [11].

3.2.3 Průvlaková kalibrace

Princip průvlakového kalibračního pouzdra tkví ve šroubovicové drážce (Obr. 30).

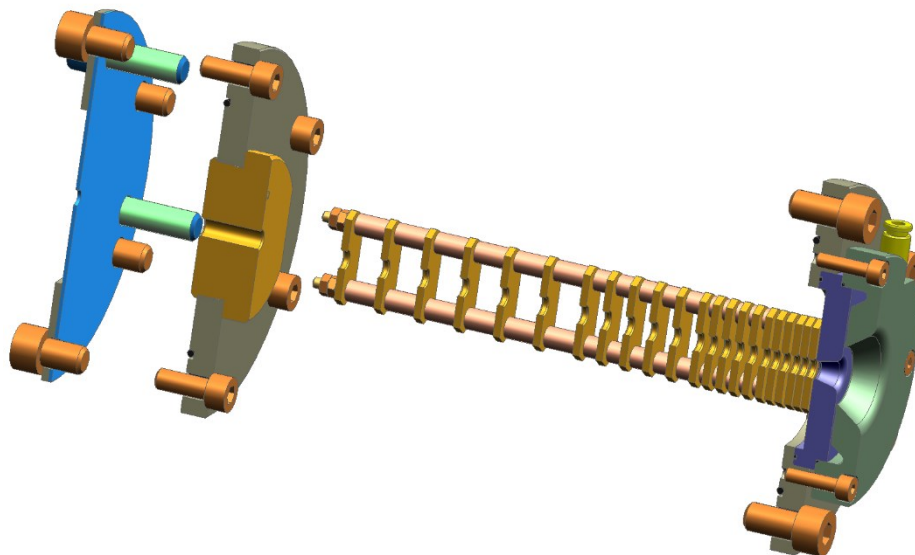


Obrázek 30. Průvlaková kalibrace [11].

1 – vytlačovací hlava, 2 – tavenina formovaná do kruhovitěho tvaru, 3 – kalibrační pouzdro, 4 – vstup chladicí vody

Tato drážka je zhotovena po celém vnitřním objemu. Šroubovicová drážka zajišťuje intenzivní chlazení trubky. Vstup vody začíná na konci kalibračního pouzdra, voda tak proudí do protipohybu směru vytlačování. Tento druh kalibru není vhodný pro tenkostěnné trubky [11].

Zvláštním druhem průvlastkové kalibrace může být lamelové zařízení (Obr. 31). Jednotlivé lamely vytvářející kruhovitý tvar jsou uloženy na vodicích tyčích. U vstupní části jsou lamely více nahuštěné, zatímco ve střední a konečné části tolik ne. Rozměry veškerých lamel jsou shodné. Je tedy možné zaměnit první lamelu za poslední a výsledný produkt bude nadále akceptovatelný.



Obrázek 31. Řez lamelovým kalibračním ústrojím [25].

3.3 Odtahové zařízení

Odtahové zařízení je součástí vytlačovací linky, bez které by vytlačovací proces nikdy nemohl fungovat. Zpravidla je umístěno mezi chladicí vanu a sekací či navíjecí zařízení. Odtahem je korigována rychlost vytlačování celé linky. Odtahové elementy mohou být pásy, ale i řetězy nebo kotouče vybavené pryžovým kontaktem. Konstrukce odtahových elementů je volena podle tvaru profilu. Některým tenkostěnným profilům může vadit typický dvoupásový odtah, proto se volí odtah se třemi pásy. Správné umístění odtahového stroje je takové, aby vždy bylo souměrné s osou vytlačovací linky.

Před odtah se často usazuje měřicí ústrojí. Například pro trubičky je měření prováděno na dvou měřidlech. První měření zachycuje průměr, klidně z několika stran kvůli kontrole

ovalnosti. Druhé měření vyhodnocuje tloušťku stěny trubičky. Oba tyto výsledky jsou zobrazeny dohromady a vyjadřují rozměr i kvalitu výsledného produktu [10].

3.4 Dělicí a navíjecí ústrojí

Dělicí zařízení je určeno pro přesné dělení výsledního produktu. Sekací stroj bývá zpravidla zapojen za odtahové zařízení. Sekací zařízení je možné vyřešit několika alternativami:

- dělení pomocí nože, který vykonává zpětný pohyb,
- dělení pomocí nože, jenž se otáčí kolem své osy o 360°,
- dělení pomocí pily, která vykonává zpětný pohyb,
- dělení pomocí pily, jež vykonává planetární způsob řezání.

Při konstrukci takového stroje je nadmíru důležité zamezit kontaktu člověka s rotujícím nástrojem nebo nožem.

Navíjecí zařízení se využívá pro profily, jimž nevádí mírné ohýbání na rotační element (cívka či buben). Typickým příkladem pro navíjení na cívku je struna aplikovaná do 3D tiskárny.

Navíjecí zařízení bývá jednostanicové nebo i vícestanicové. Dvoustanicové navíjecí zařízení zrychluje výrobu a zlepšuje její produktivitu. Umožňuje nepřetržitý chod linky.

V mnoha případech místo vícestanicové navíječky plní kontinuální funkci akumulátor, který při výměně navinuté cívky akumuluje vyrobený produkt [14].

4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část nabízí hlubší pohled do technologie vytlačování. V první kapitole dává důraz na klasické materiály a jejich tokové vlastnosti úzce spojené s aplikovanou reologií. V následující kapitole byly detailně rozebrány vytlačovací nástroje a jejich typické problémy. Byly popsány všechny obvyklé druhy vytlačovacích hlav, zejména hlavy na trubky, také hlava na desky nebo profilová hlava a hlava na opláštění. Poslední kapitola objasňuje další nezbytně nutné komponenty pro tuto technologii. V neposlední řadě jsou zde rozebrány jednotlivé principy vytlačovacích strojů, osvědčené skupiny kalibračních ústrojí i odtahové, dělicí nebo navíjecí zařízení.

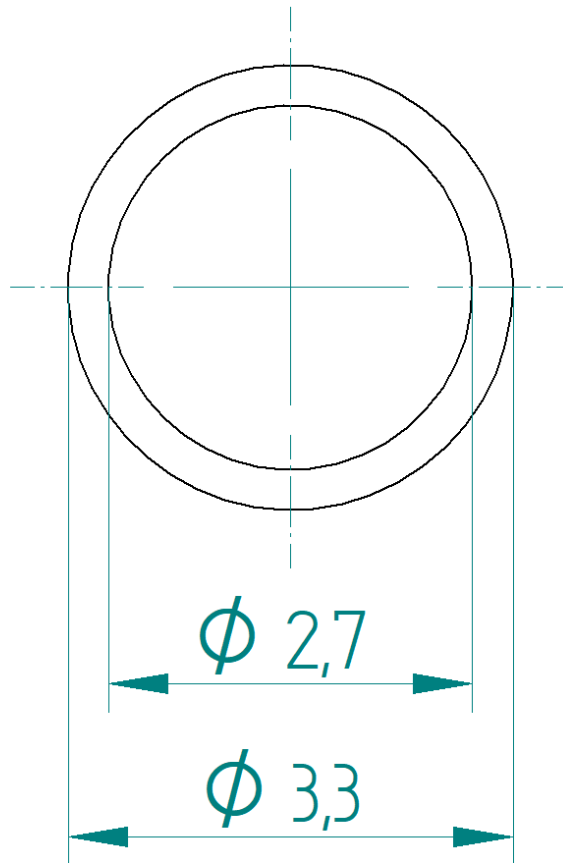
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Hlavním cílem diplomové práce bylo provést konstrukční návrh vytlačovací hlavy. Základním parametrem byla vytlačovací rychlost, která měla být 100 m/min. Další cíl praktické části bylo představit produkt i materiál, ze kterého bude vyroben, prezentovat konstrukční elementy pro produktivnější výrobu trubiček a ukázat jejich výhody i nedostatky, rozčlenit tyto funkční prvky do několika sestav, ze sestav udělat fungující modely. V rámci návrhu byly provedeny 4 tokové analýzy. Výsledky následně porovnat a posoudit, které byly nejlepší. Dále z diskuse vyvodit závěr a na jeho základě vytvořit vytlačovací nástroj.

6 ZADANÝ VYTLAČOVANÝ PRODUKT

Zadaný produkt, pro něhož bude proveden konstrukční návrh vytlačovací hlavy, je trubička s požadovanými rozměry uvedenými na následujícím obrázku (Obr. 32). Vnější průměr trubičky bude 3,3 mm a vnitřní průměr bude 2,7 mm. Z průměrů je možné vyčíst, že ideální tloušťka stěny bude 0,3 mm.



Obrázek 32. Zadaný produkt.

6.1 Materiál produktu – HDPE

Jako materiál byl zvolen vysokohustotní polyethylen (HDPE), rovněž se k tomuto materiálu budou vázat všechny tokové analýzy.

Polyetylen

Základním pilířem tohoto polymeru je uhlovodíkový řetězec. Polyetylen je tuhá látka, která je téměř průhledná či mléčně zakalená. Také se vyznačuje vysokou houževnatostí. PE značí vysokou houževnatost, tažnost, odolnost vůči kyselinám i zásadám, nepropouští vodní páru

a je mrazuvzdorný. Teplota tání fluktuuje mezi hodnotami 105 a 136 °C. PE chvályhodně vzdoruje velmi nízkým teplotám, křehne až při teplotě -120 °C.

Mezi výhody polyetylenů patří:

- nízká cena,
- snadná zpracovatelnost,
- vynikající elektroizolační vlastnosti i chemická odolnost,
- tuhost,
- průhlednost tenkých fólií,
- zdravotní nezávadnost.

Tyto polyolefinové polymery s různým stupněm krystalinity se rozlišují hustotou. Již zmíněná hustota dohromady s charakterizací tvaru řetězce se stala klíčem pro základní rozdělení polyetylenů.

Charakteristické typy jsou tyto:

- HDPE – vysokohustotní polyetylen (high density polyethylen)
- LDPE – nízkohustotní polyetylen (low density polyethylen)
- LLDPE – lineární nízkohustotní polyetylen (linear low density polyethylen)

Tabulka 1 Srovnání vybraných vlastností základních druhů polyetylenů

Vlastnost	LDPE	LLDPE	HDPE
Hustota, g/cm³	0,915 – 0,935	0,910 – 0,925	0,941 – 0,967
Teplota tání, °C	106 – 112	125	130 – 133
Pevnost v tahu, MPa	7 – 17	14 – 21	18 – 30
Prodloužení při přetržení, %	100 – 700	200 – 1200	100 – 1000
Modul pružnosti, MPa	415 – 795	248 – 365	689 – 1654
Tvrдость, Shore D	45 – 60	41 – 53	60 – 70

Lineární polyetylen HDPE se vyznačuje lepší stálostí vůči organickým rozpouštědlům. Jeho zpracovatelnost sahá od vstřikování po výrobu dutých předmětů, fólií, ale hlavně trubek. [3, 4, 24]

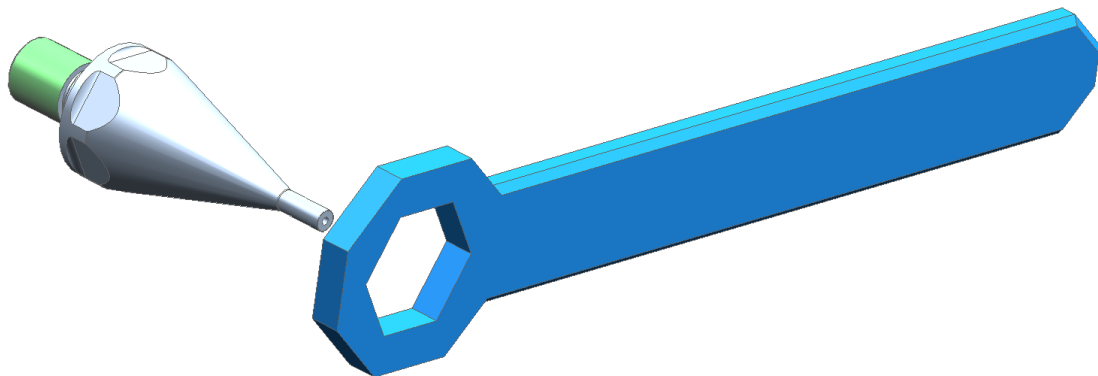
7 KONSTRUKČNÍ NÁVRHY PRVKŮ

V této kapitole jsou představeny konstrukční návrhy jednotlivých prvků, ale správnost či funkčnost ověří teprve následující kapitola tokových analýz.

Popis jednotlivých konstrukčních prvků vytlačovacího nástroje na trubičky je uveden v kapitole 2.1.2. (Obr. 12).

Postup sestavení vytlačovací hlavy je následující:

1. Rozdělovač se přichytí ke střednímu tělesu a dotáhne se vnitřním šestihranným klíčem.
2. Střední těleso se přichytí k vstupnímu elementu a přichytí šrouby.
3. Trn se zašroubuje do středního tělesa a pevně se utáhne klíčem (Obr. 33).
4. Hubice společně s tělesem výstupním se vystředí a připojí se ke střednímu tělesu pomocí šroubů. S citem se zašroubují i stavěcí šrouby.
5. Připojí se topení, tlaková a teplotní čidlo.
6. Před spojení vytlačovací hlavy s extruderem je nutné vložit lamač.



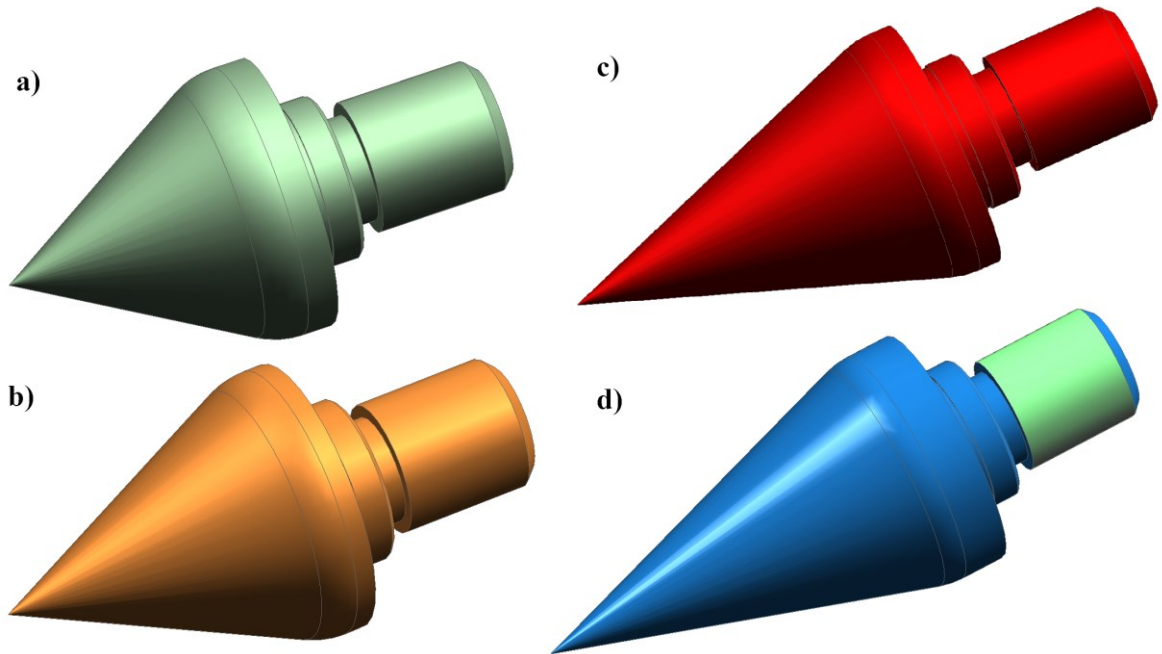
Obrázek 33. Montáž vytlačovacího trnu.

Než začne výroba, je žádoucí vystředit hubici vůči trnu pomocí stavěcích šroubů. Tuto operaci je nutné provést až je vytlačovací nástroj plně vytopený i zaplněný polymerním materiálem. Nesouměrný tok materiálu naznačuje nesprávné vystředění hubice.

7.1 Torpéda a vstupní části

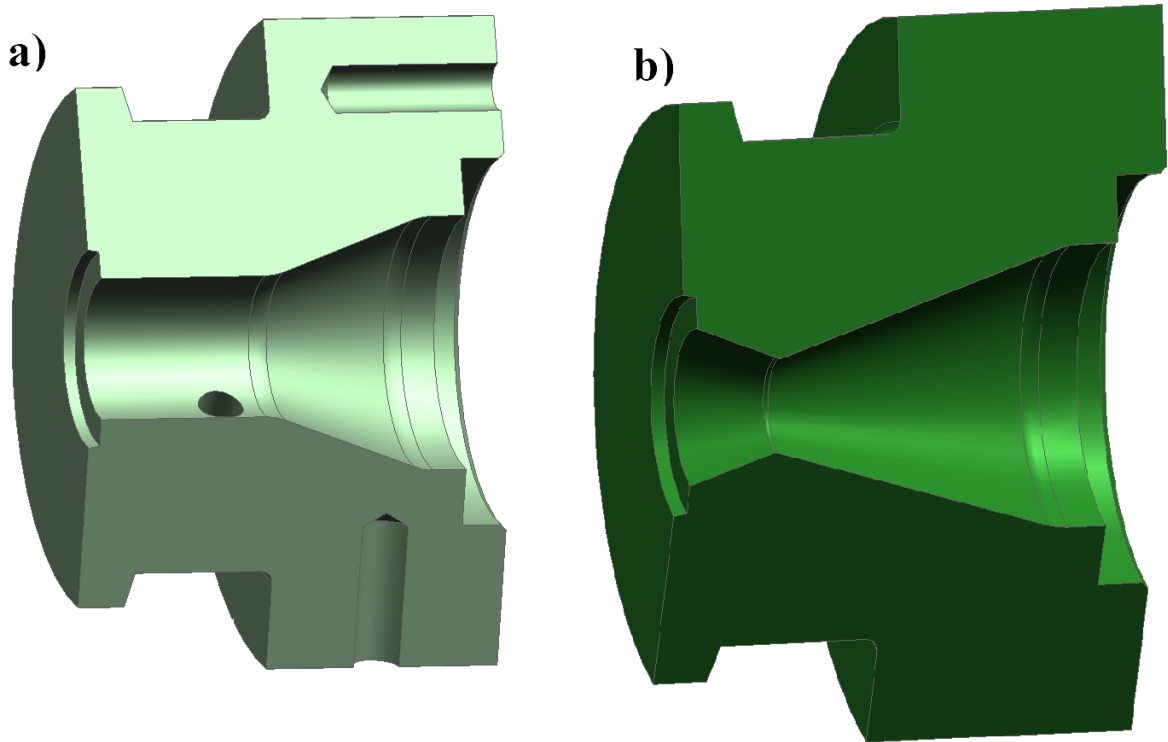
Torpéda či špice byly navrženy ve čtyřech variantách dle rozdělovacího vstupního úhlu (Obrázek 34). Jednotlivé rozdělovače se odlišují délkou a vstupním úhlem. Torpéda jsou členěna dle vstupního úhlu od nejmenší špice (Obr. 34 a) po největší (Obr. 34 d). Vstupní

úhly rozdělovačů jsou 60° (Obr. 34a), 50° (Obr. 34b), 40° (Obr. 34c) a 35° (Obr. 34d). Každá zhotovená špice má středící průměr, metrický závit na přichycení ke střednímu tělesu i vnitřní šestihranné vybrání pro imbusový klíč.



Obrázek 34 Torpéda

Vstupní části byly navrženy ve dvou variantách (Obr. 35). První navržená varianta (Obr. 35a) předkládá klasický tokový kanál. Tato vstupní část je v praxi nesčetněkrát užívaná, proto je brána jako výchozí.



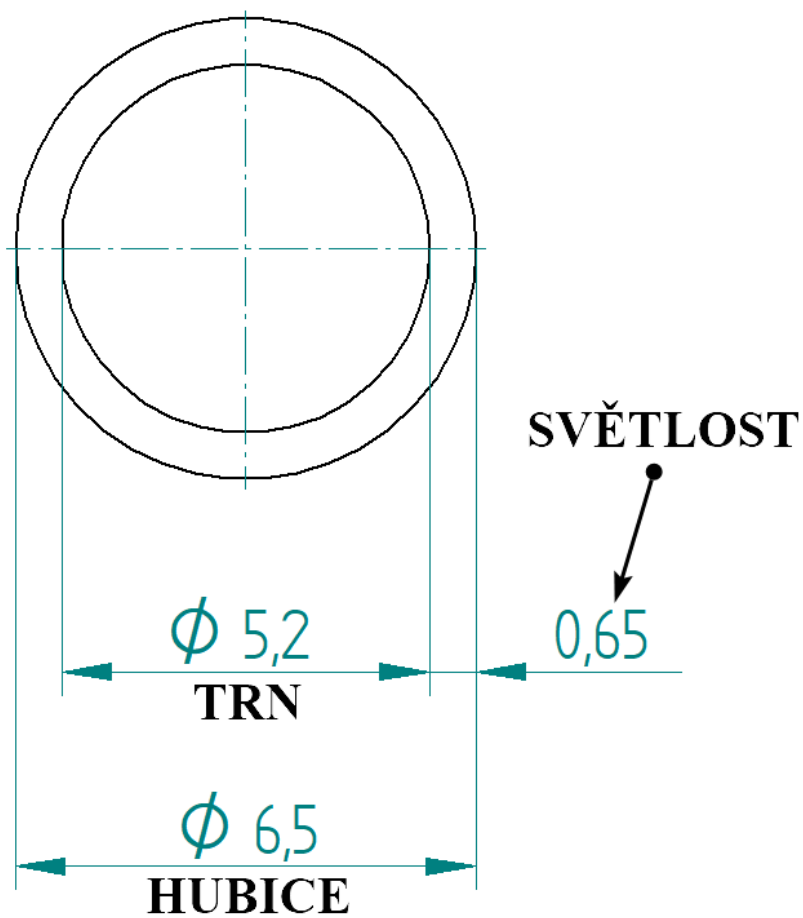
Obrázek 35. Vstupní elementy.

a) vstupní část základní, b) vstupní část redukováná

Druhý model části (Obr. 35b) poskytuje zajímavější pohled z hlediska zdržné doby. Zdržná doba je čas, který stráví tavenina v hlavě. Jinými slovy, jak dlouho trvá materiálu, než projde hlavou, od vstupu po výstup.

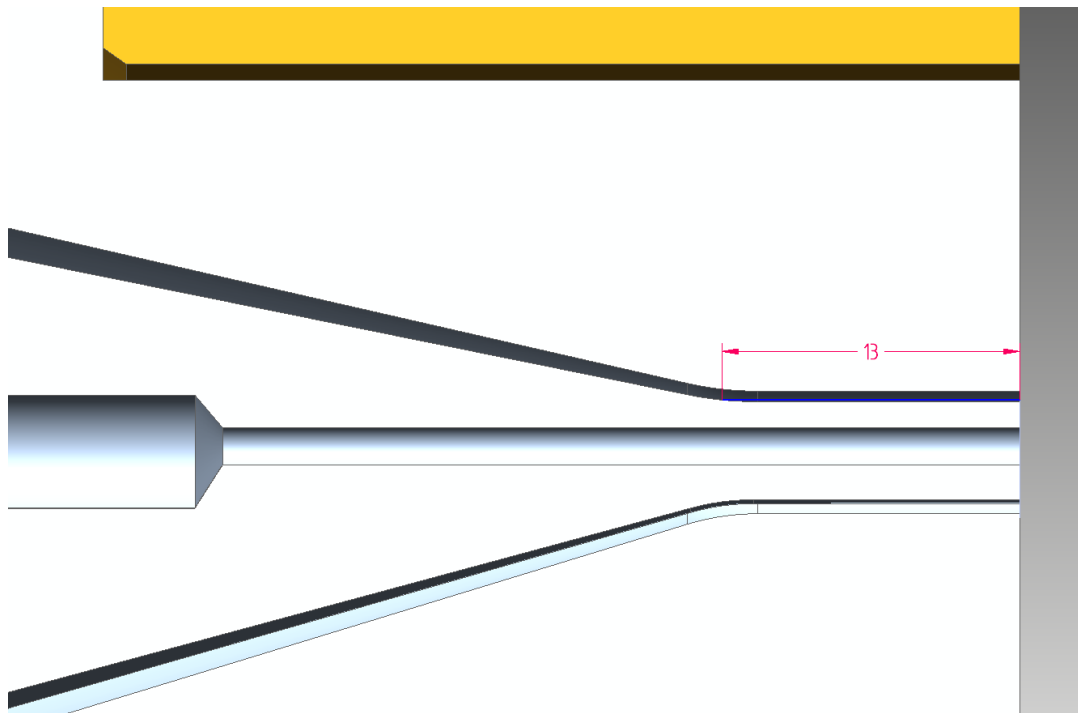
7.2 Hubice a trny

Všechny konstrukční návrhy byly navrženy na výstupní šterbinu hubice 6,5 mm. Rozměr vytlačovacího trnu byl zvolen 5,2 mm. Důležitým aspektem byla zvolená délka paralelní části. Tento parametr je navrženy jako dvacetinásobek světlosti, která je vyznačena na následujícím obrázku (Obr. 36) a kterou lze definovat jako polovinu rozdílu průměrů výstupní části hubice a trnu. V tomto případě vychází světlost 0,65 mm.



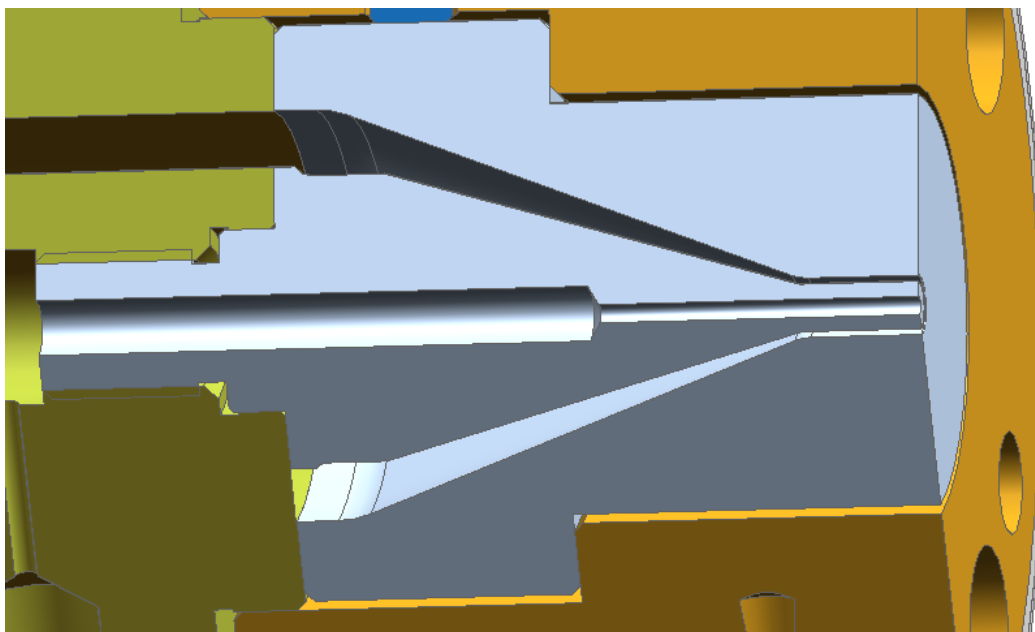
Obrázek 36. Světlost.

Jak již bylo zmíněno výše délka paralelní části je dvacetinásobek světlosti, pro tento případ je to tedy 13 mm (Obr. 37).

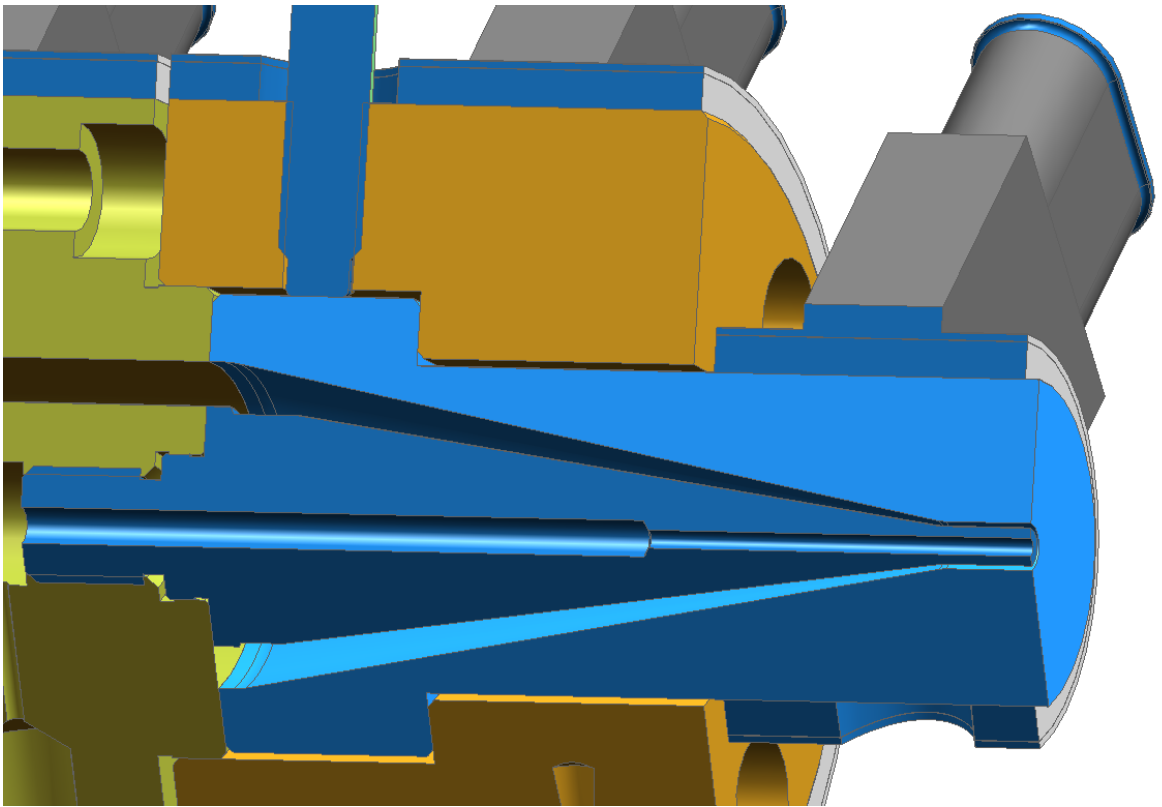


Obrázek 37. Délka paralelní části.

V rámci řešení byly navrženy dvě kombinace hubice a trn. První varianta (Obr. 38) je ve výrobě mnohokrát odzkoušená, ale zajímavější řešení představuje varianta 2, u které byla použita kombinace hubice s trnem v prodloužené verzi (Obr. 39). Pro toto řešení je použito jedno topení navíc (na hubici), což by mělo poskytnout lepší teplotní přehled, z důvodu připojení vlastního teplotní čidla i pozvolnější přechod taveniny.



Obrázek 38. Kombinace hubice a trn základní.



Obrázek 39. Kombinace hubice a trn prodloužená verze.

8 TOKOVÉ ANALÝZY

Po konstrukčním návrhu jednotlivých komponentů vytlačovací hlavy byly provedeny tokové analýzy. Postup byl následující:

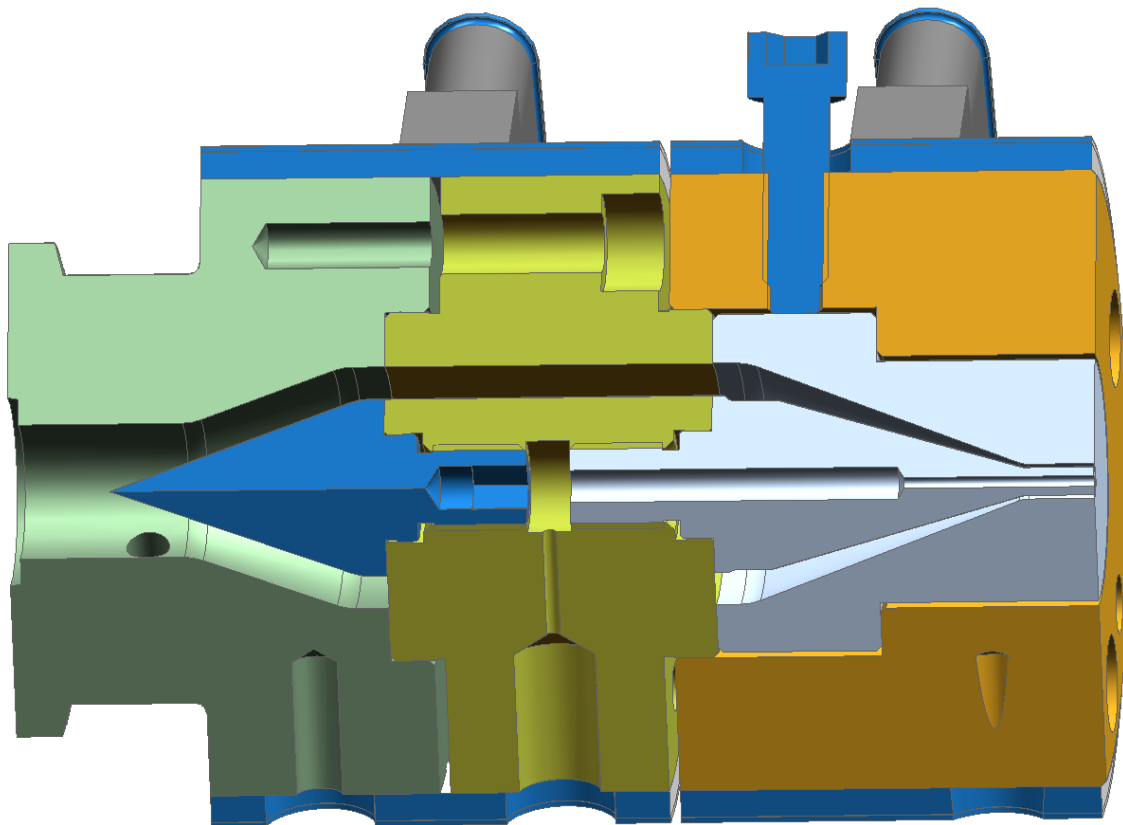
1. Navrhnout konstrukční prvky pro otestování v programu Solid Edge.
2. Konstrukční elementy spojit do jedné hlavy či sestavy.
3. Z této sestavy vytvořit naprosto přesnou kopii prostoru, jež vyplňuje polymer, tzv. negativ.
4. Dále již pracovat pouze s negativem dutiny, tento negativ transformovat do modulu RHINO ve formátu *stp a vysít'ován metodou konečných prvků.
5. Zadat vstupní parametry pro výpočet:
 - teplota: pro každou analýzu byla nastavena teplota 210 °C,
 - materiál: HDPE,
 - vstupní množství: bylo vypočteno, že pro řešenou trubičku, při rychlosti 100 m/min (Obr. 32), je vstupní množství 16 kg/hod.
6. Vyhodnotit výsledky.

Roztavený polymer vycházející z extrudéru skrz lamač proudí do vstupní části. Přes střední část tavenina prochází skrz 4 žebra. Poté se valí mezi hubicí a trnem. Dále vstupuje do kalibračního pouzdra, kde získává konečný tvar, následně se ochlazuje a za odtahem se seká na patřičnou délku.

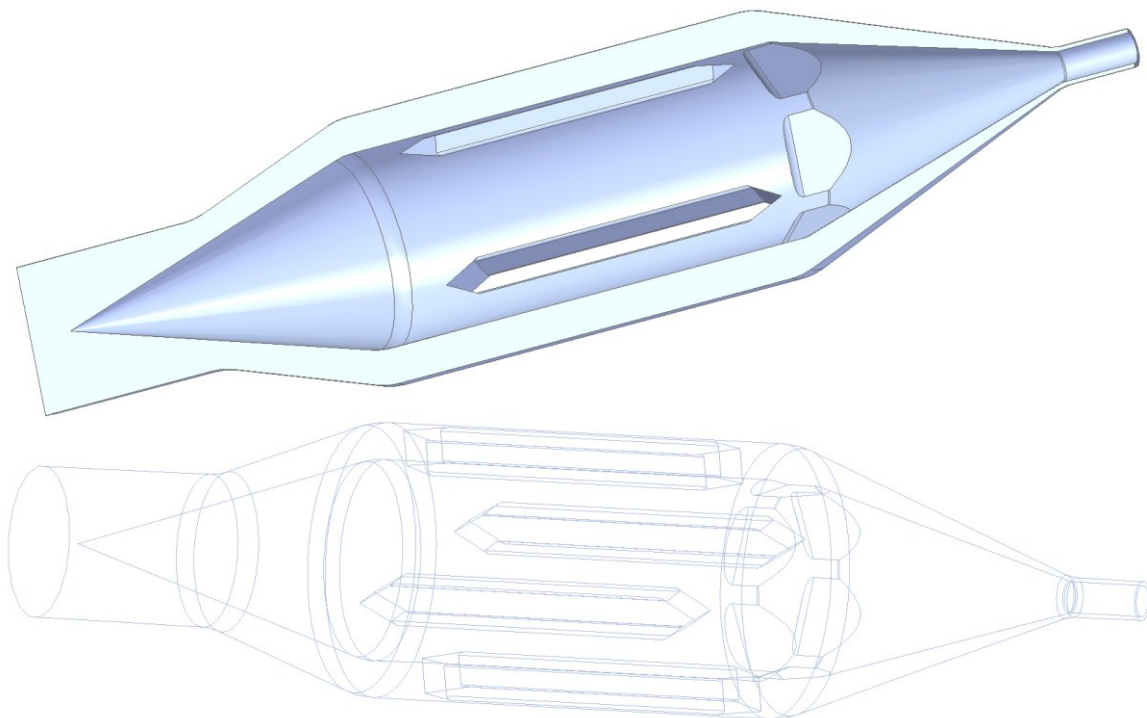
8.1 1. toková analýza

První toková analýza nabízí kombinaci nejdelšího torpéda se základní vstupní částí (Obr. 35a). V této variantě bylo použito největší torpédo (Obr. 34d) a krátká verze trnu společně s hubicí (Obr. 38). Ze všech výše zmíněných komponentů byla sestavena 1. varianta hlavy (Obr. 40).

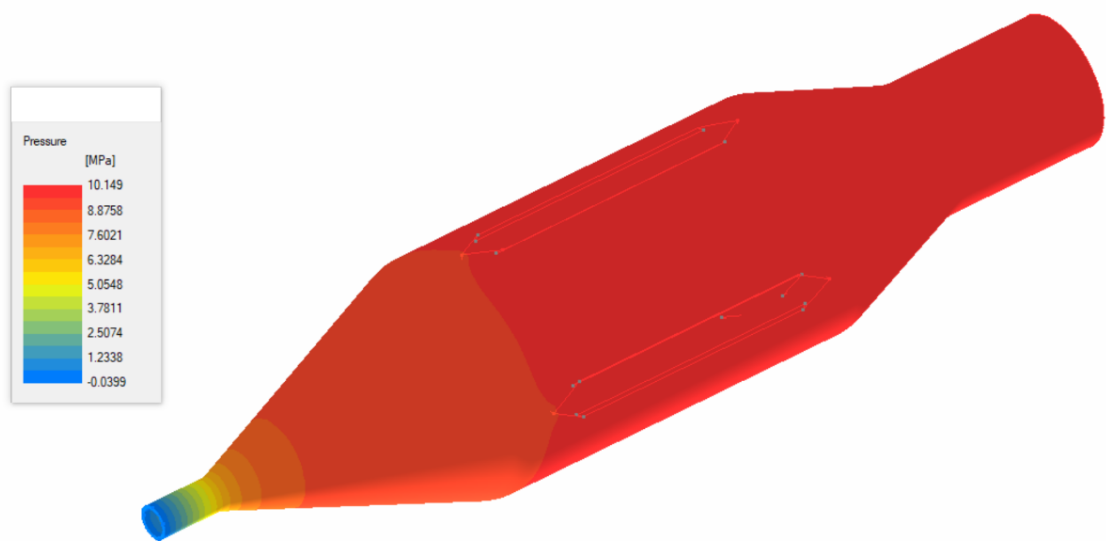
Průběh tlaků, který je znázorněn na Obr. 42, je nerovnoměrně rozložený, a proto se musí zvolit jiný typ konstrukce. Ve větší části průtočného prostoru je polymer na maximální hodnotě, hodnota tlaku se začíná měnit až těsně před začátkem výstupní paralelní části.



Obrázek 40. Sestava hlavy pro 1. tokovou analýzu.

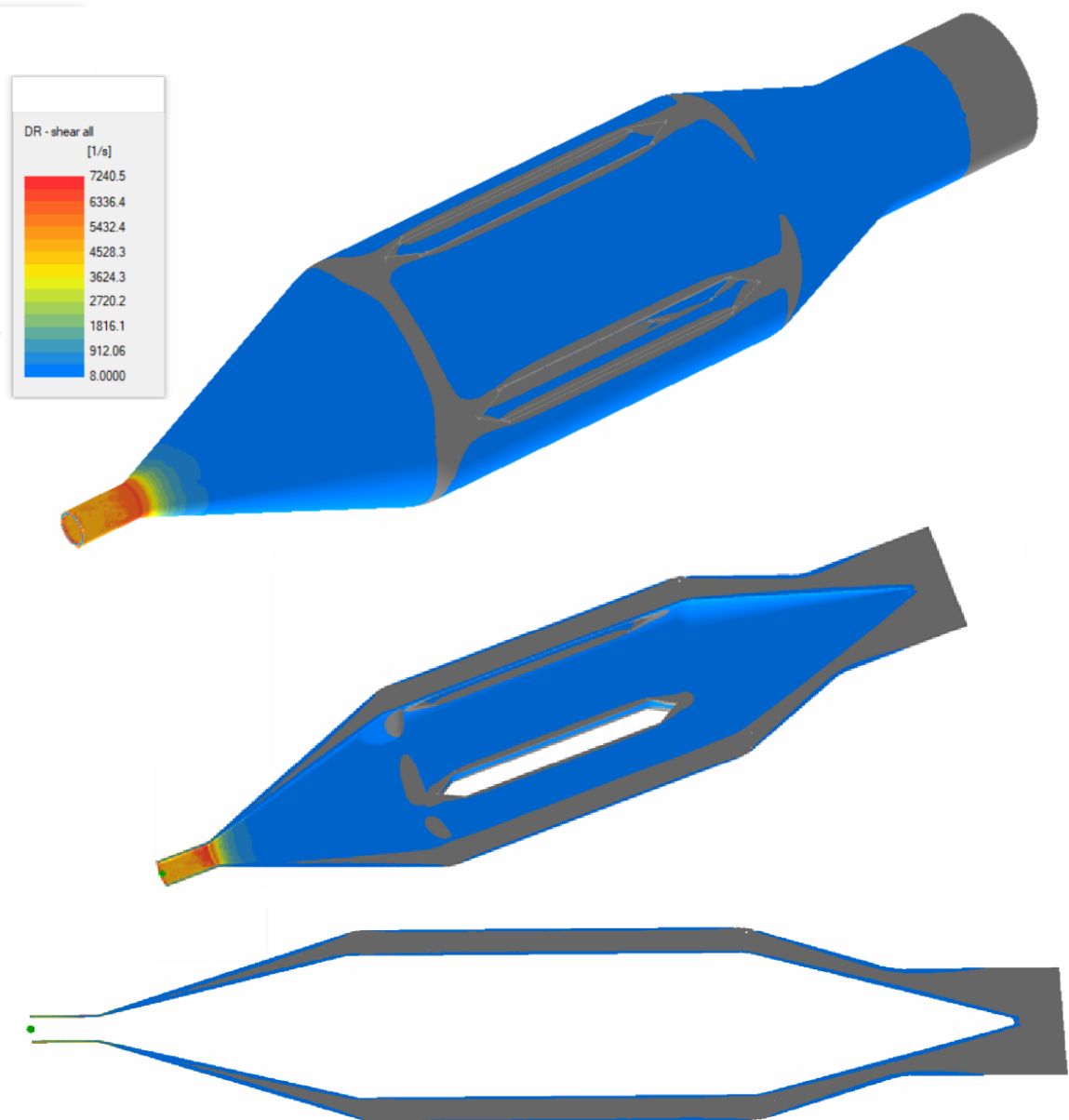


Obrázek 41. Negativ 1. tokové analýzy.

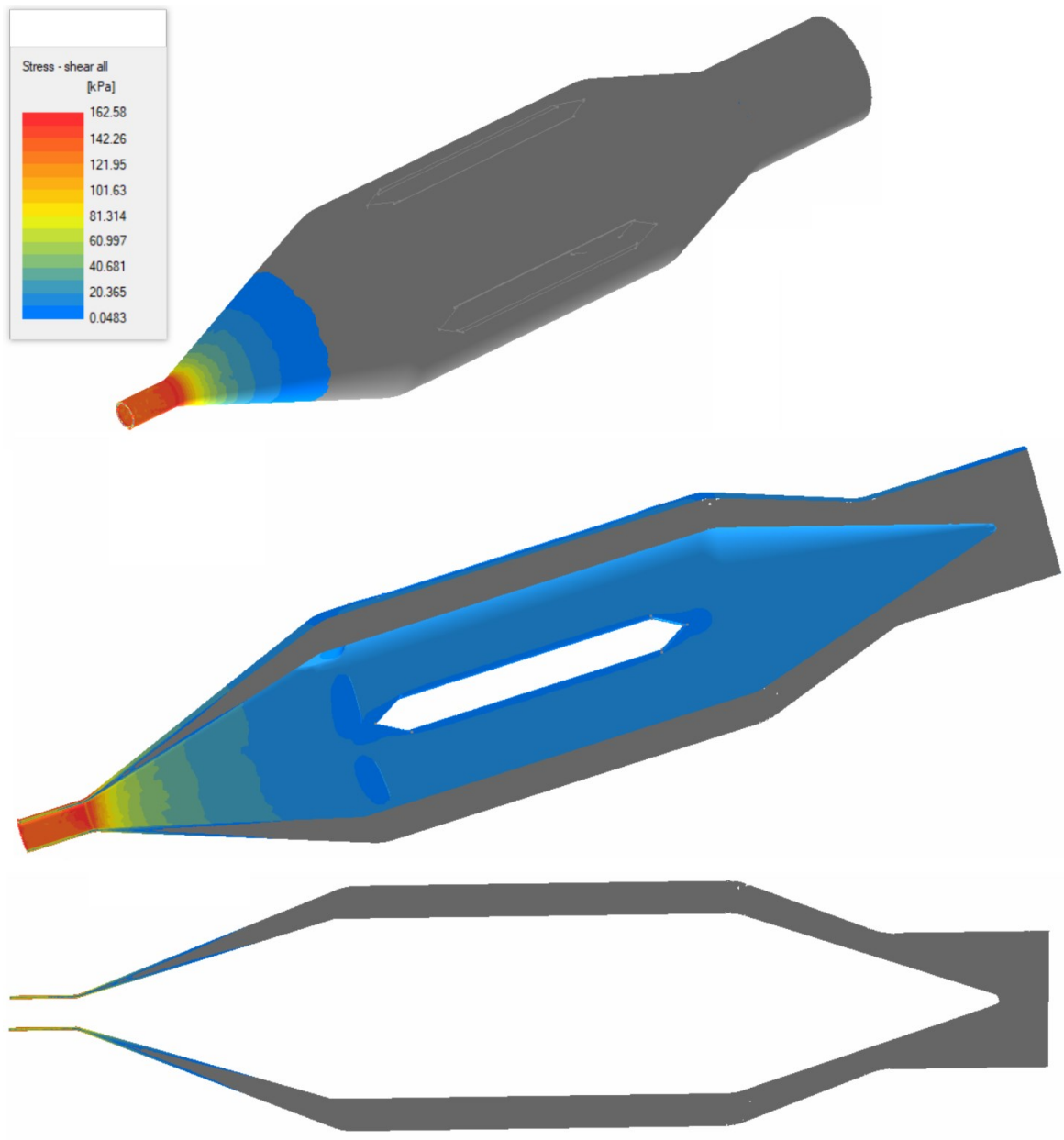


Obrázek 42. Průběh tlaků pro 1. analýzu.

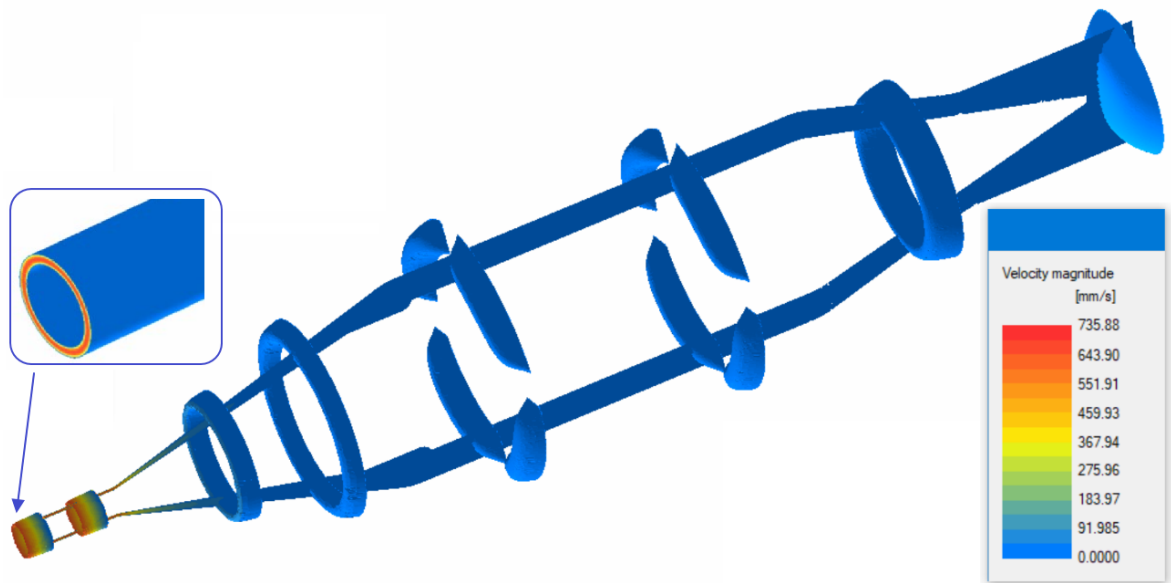
Průběhy smykových rychlostí (Obr. 43) i smykového napětí (Obr. 44) ukazují na místa, kde se materiál nadměrně zdržuje až degraduje. Nebezpečné oblasti se vyskytují okolo žeber, která spojují vnitřní a vnější části, mezi kterými tavenina protéká. Seskupení frézovaných míst na vytlačovacím trnu s prostory za žebry vzniká velice nebezpečné místo. V této zóně může materiál degradovat. Další nebezpečná část se nachází hned na vstupu, materiál se zde nemůže zdržovat tak dlouhou dobu.



Obrázek 43. Průběh smykové rychlosti pro 1. analýzu.



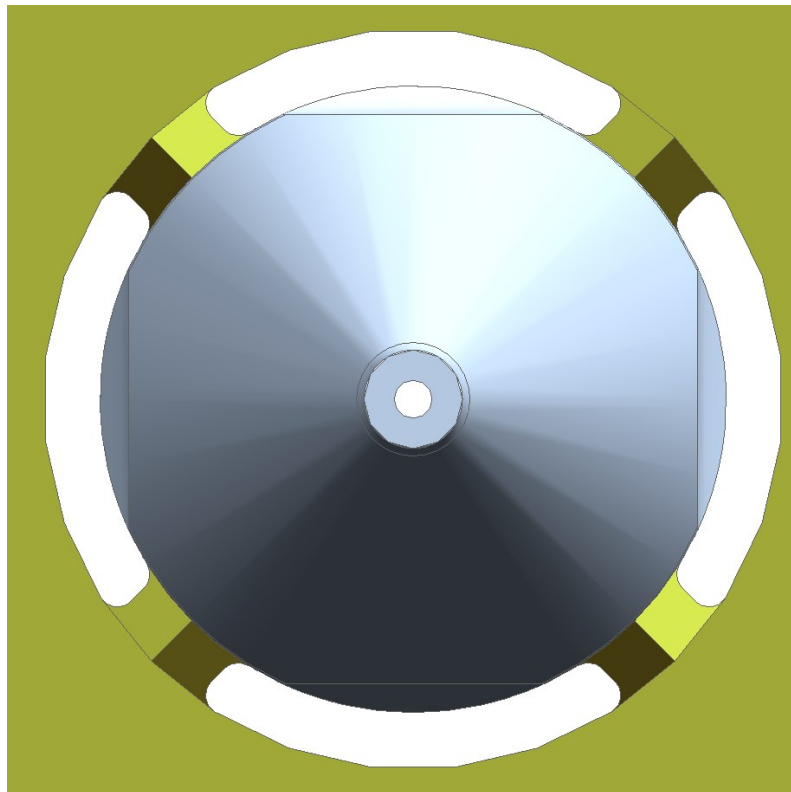
Obrázek 44. Průběh smykového napětí pro 1. analýzu.



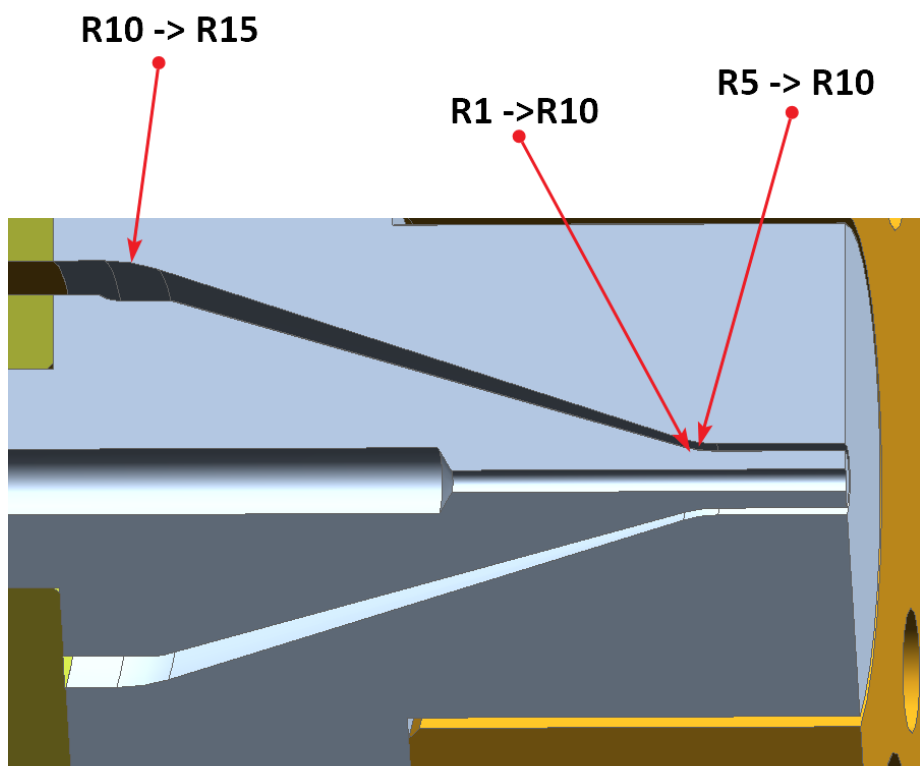
Obrázek 45. Průběh rychlosti pro 1. analýzu.

8.2 2. toková analýza

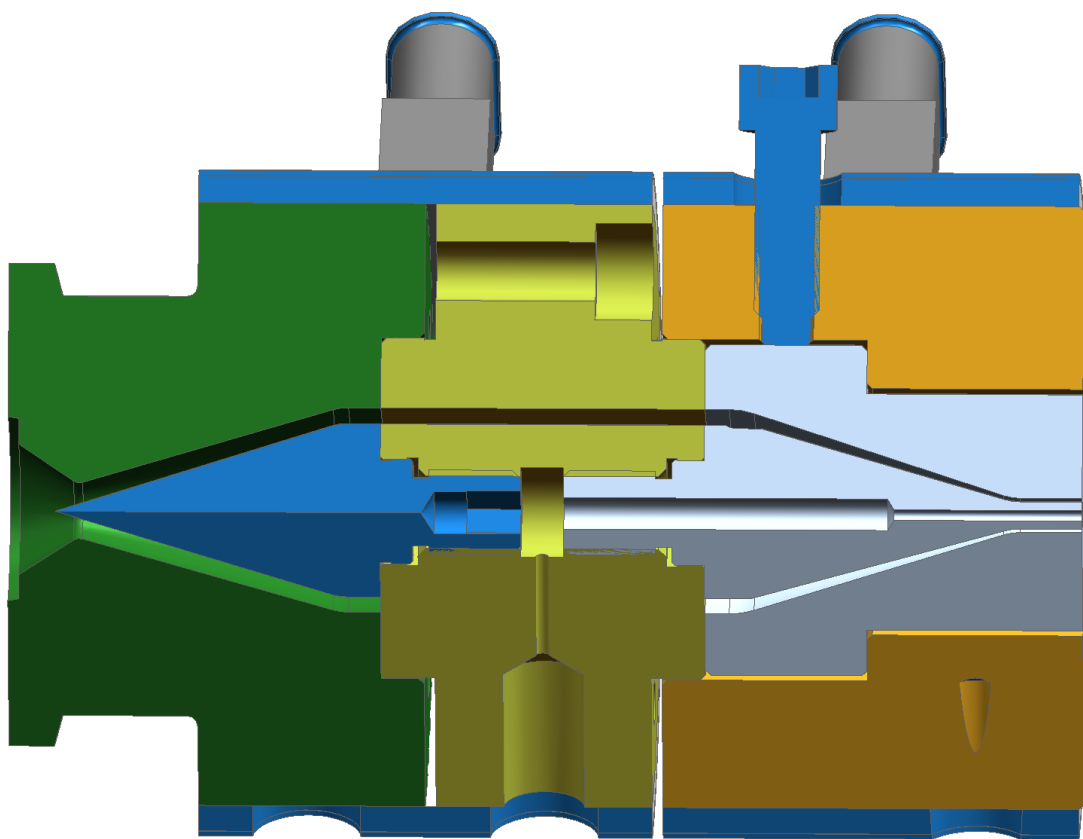
U varianty č. 2 (Obr. 48) byla zaměněna základní vstupní část za redukovanou vstupní část. Materiál, který hlavou prochází, se nebude kulminovat stejně dlouhou dobu jako v první analýze. Dále byla snížena tloušťka mezi žebry, kdy v první variantě byla 6 mm, v tomto řešení bude síla mezi žebry pouhé 3 mm. Také zde proběhla konstrukční úpravu trnu. Trn již nebude mít tvar šestihranu, jak znázorňuje Obr. 33, ale bude frézován do tvaru čtyřhranného. Tento čtyřhran bude natočen vůči poloze žebra (Obr. 46). Dále byly editovány zaoblené plochy, po kterých tavenina proudí. Provedené změny jsou viditelné na následujícím obrázku (Obr. 47). Je předpoklad, že zvětšení zaoblených povrchů způsobí plynulejší přechod mezi plochami.



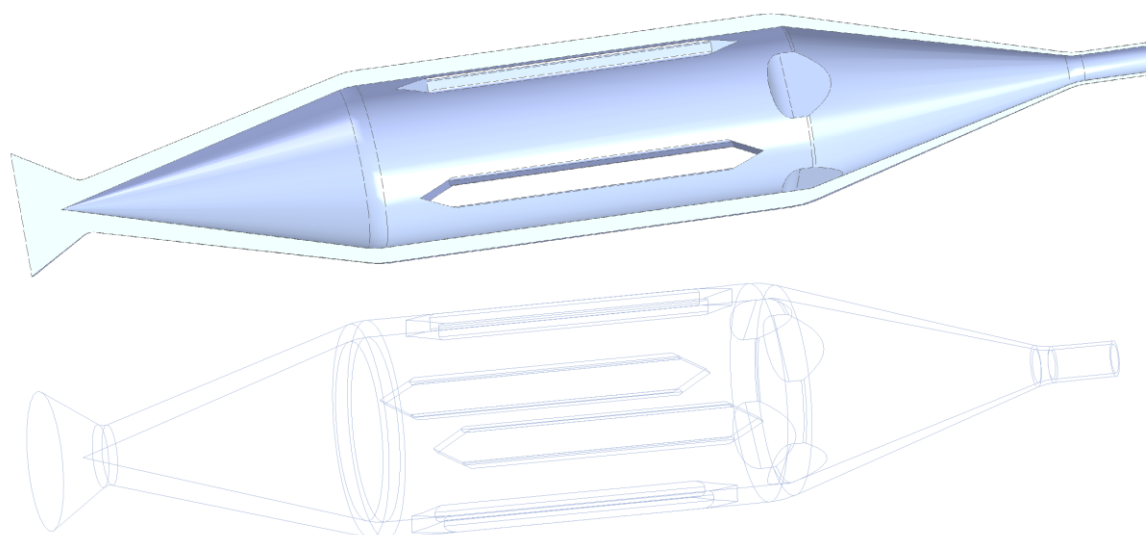
Obrázek 46. Správné natočení trnu vůči žebřům.



Obrázek 47. Konstrukční změny zaoblených ploch.

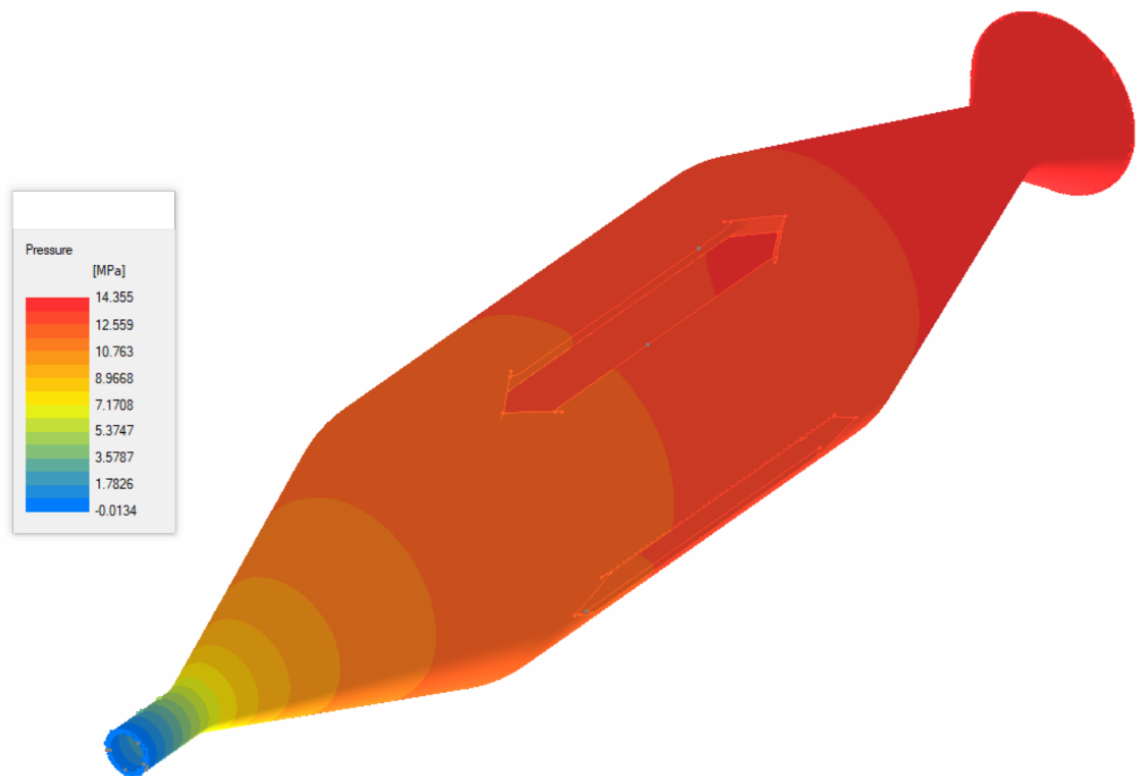


Obrázek 48. Sestava hlavy pro 2. tokovou analýzu.



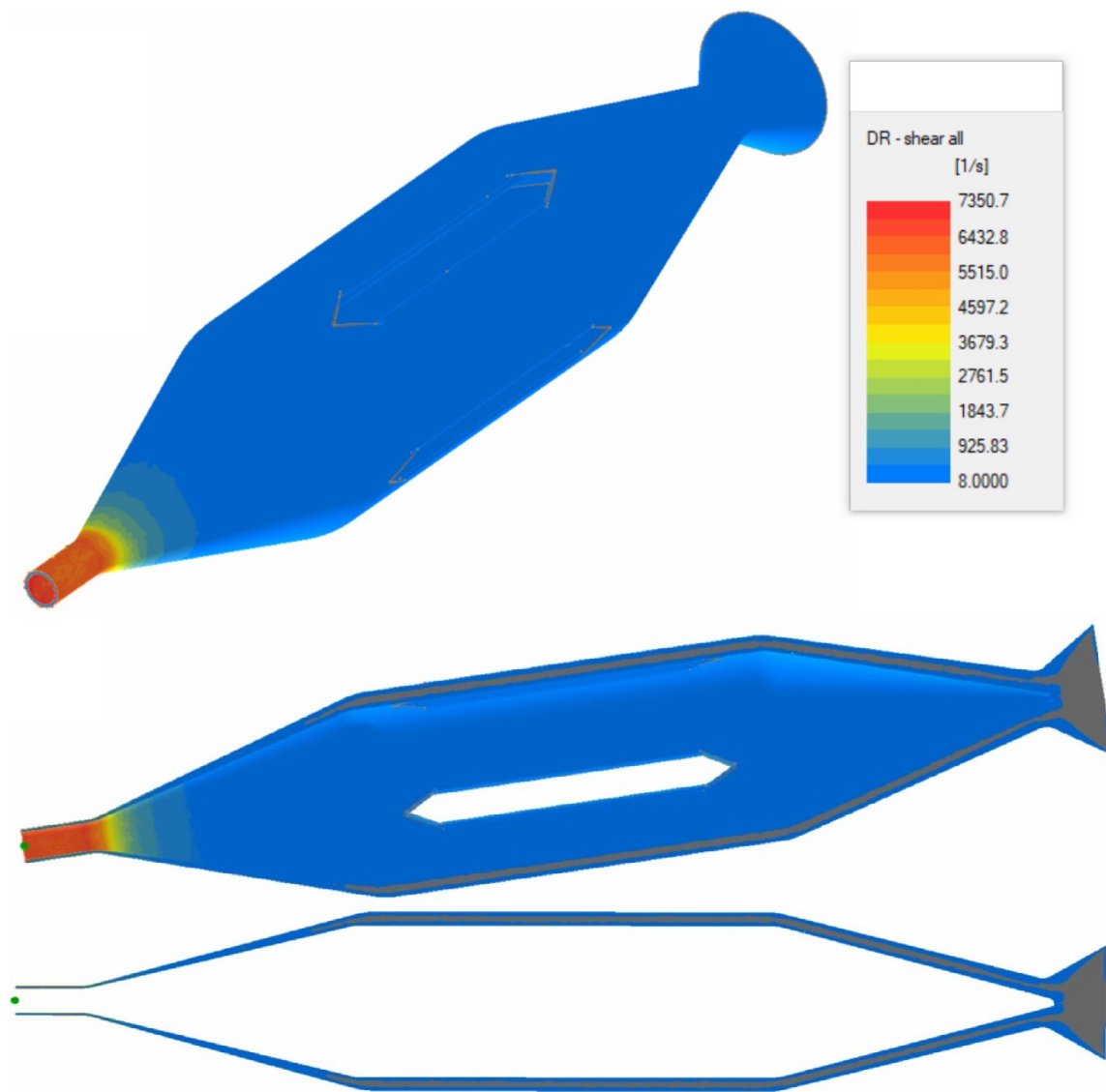
Obrázek 49. Negativ 2. tokové analýzy.

Analýza 2. varianty ukázala nemalé zlepšení ve všech sledovaných parametrech. Průběh tlaků (Obr. 50) ukazuje na lepší rozložení, avšak stále lze vidět, že v první půlce jsou tlakové výsledky na maximálních hodnotách.

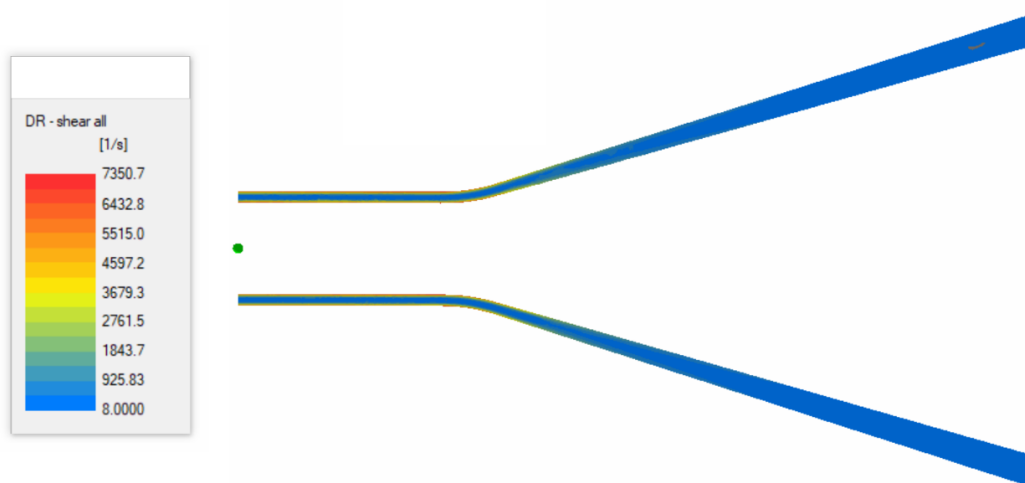


Obrázek 50. Průběh tlaků pro 2. analýzu.

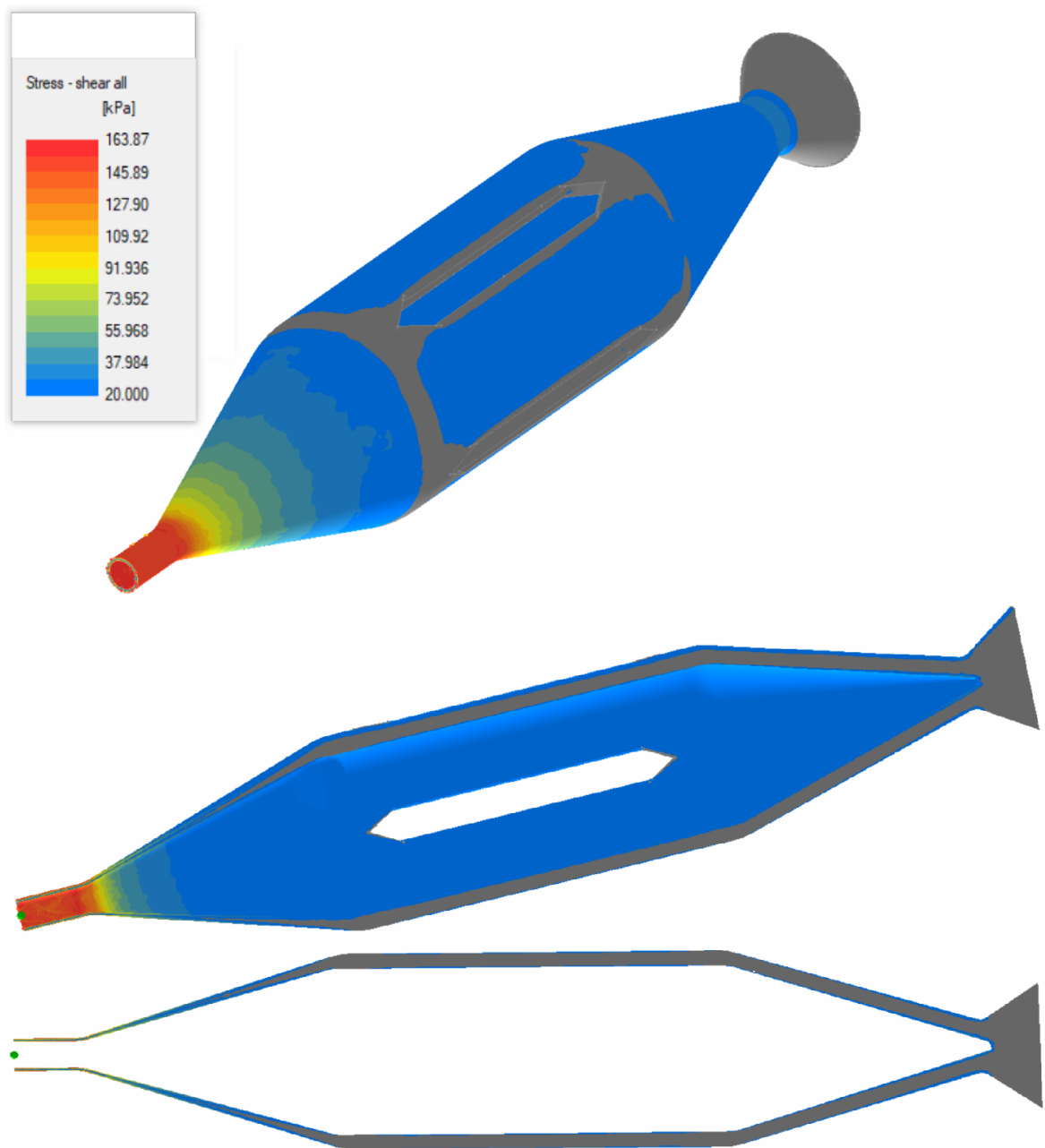
Také výsledky smykové rychlosti (Obr. 51) i smykového napětí (Obr. 53) představují lepší zhodnocení, avšak šedých míst na obrázcích je stále dost. Z těchto výsledků vyplývá, že změna tloušťky mezi žebry z 6 mm na 3 mm byl správný krok. Detail výstupní zóny (Obr. 52) znázorňuje skutečnost, že zvětšení zaoblených ploch představuje plynulejší chod.



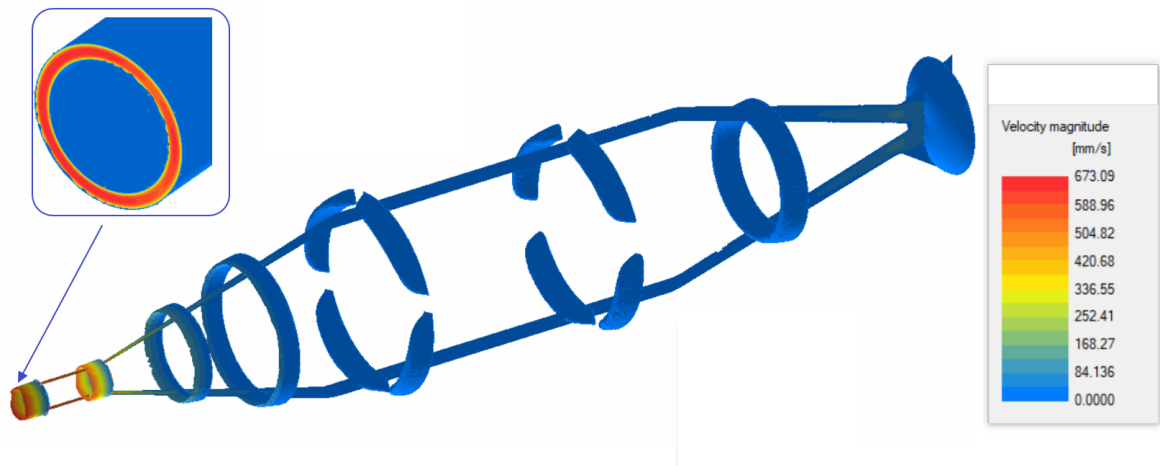
Obrázek 51. Průběh smykové rychlosti pro 2. analýzu.



Obrázek 52. Detail výstupní zóny smykové rychlosti pro 2. analýzu.



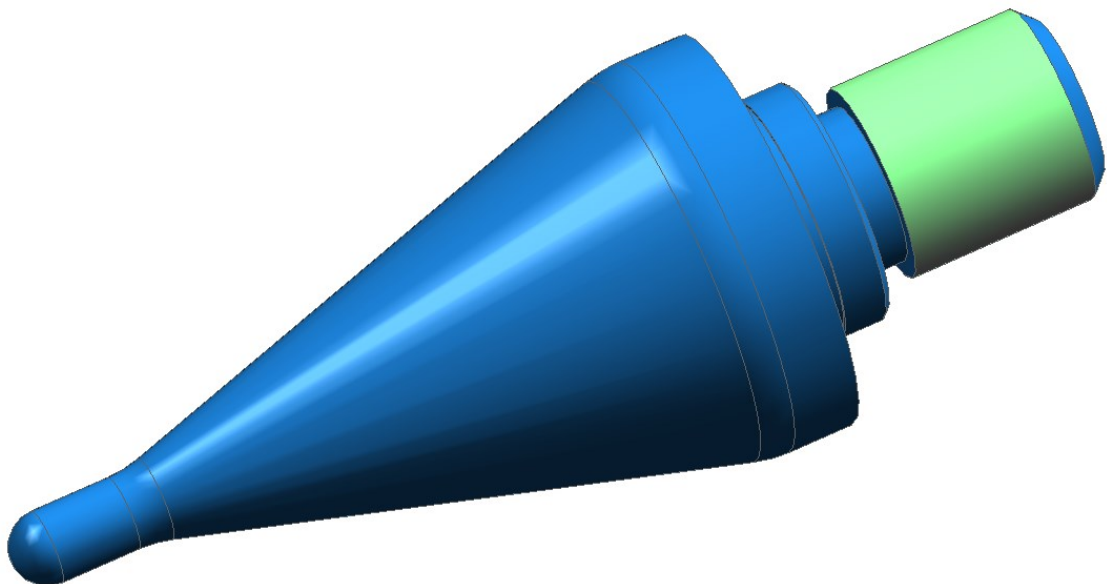
Obrázek 53. Průběh smykového napětí pro 2. analýzu.



Obrázek 54. Průběh rychlosti pro 2. analýzu.

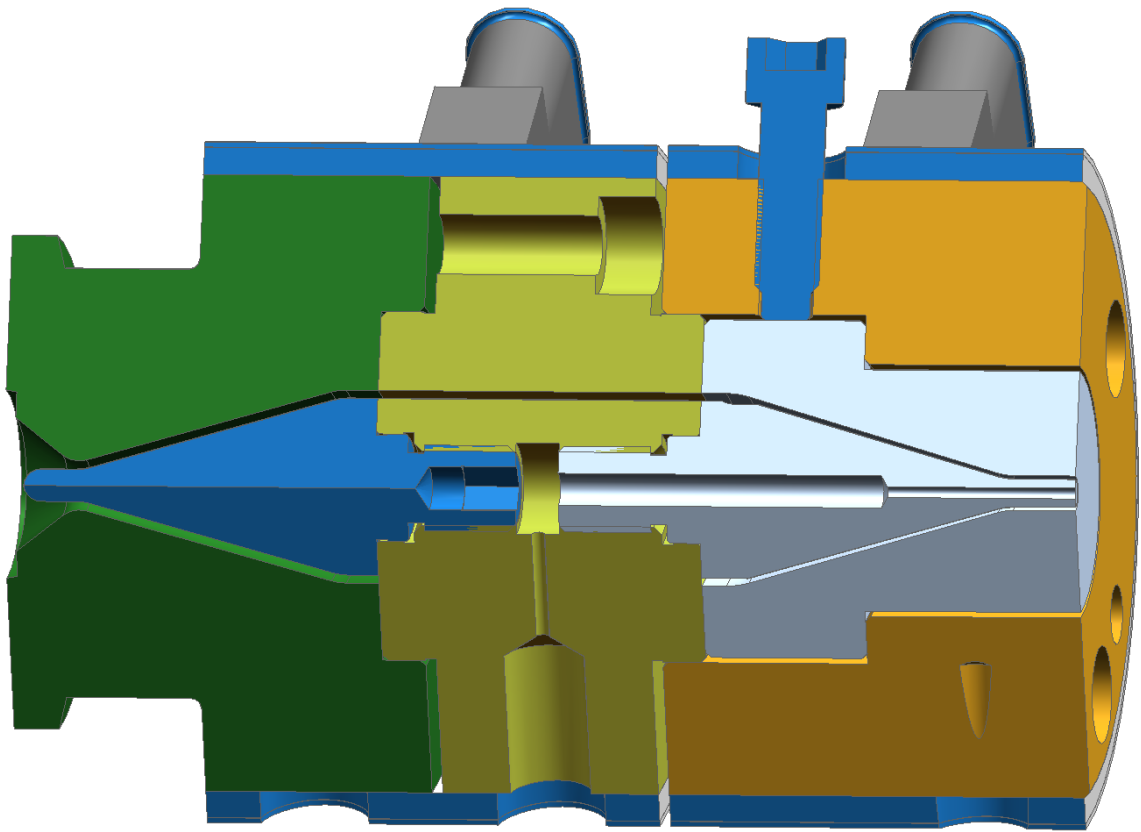
8.3 3. toková analýza

Na základě prvních 2 analýz se ukázalo, že navržená torpéda (Obr. 34) jsou nevyhovující z důvodu zbytečného akumulování materiálu před rozdělovačem. Z tohoto důvodu byl navržen ještě jeden typ – torpédo s nosem (Obr. 55). Od tohoto konstrukčního řešení se očekává lepší proudění polymeru.

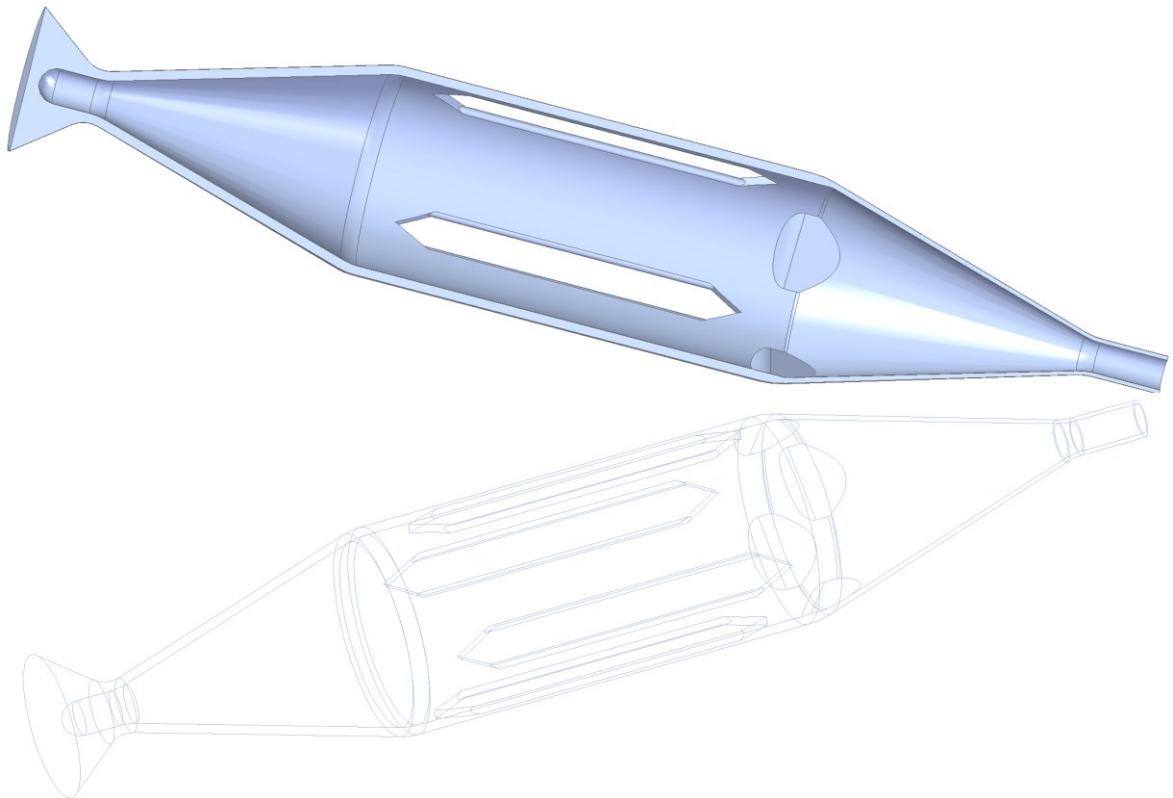


Obrázek 55, Torpédo s nosem.

Další významnou změnou oproti druhé analýze je redukce průtočné štěrby. Tloušťka mezi žebry je nyní 1,5 mm (oproti 3 mm ve 2. analýze). Negativ zobrazený na Obr. 57 má již velmi tenkou stěnu.

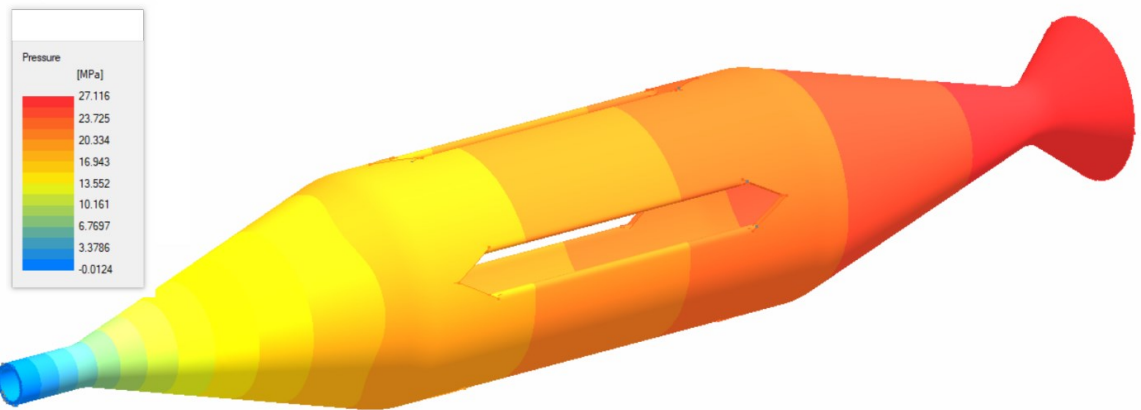


Obrázek 56, Sestava hlavy pro 3. tokovou analýzu,



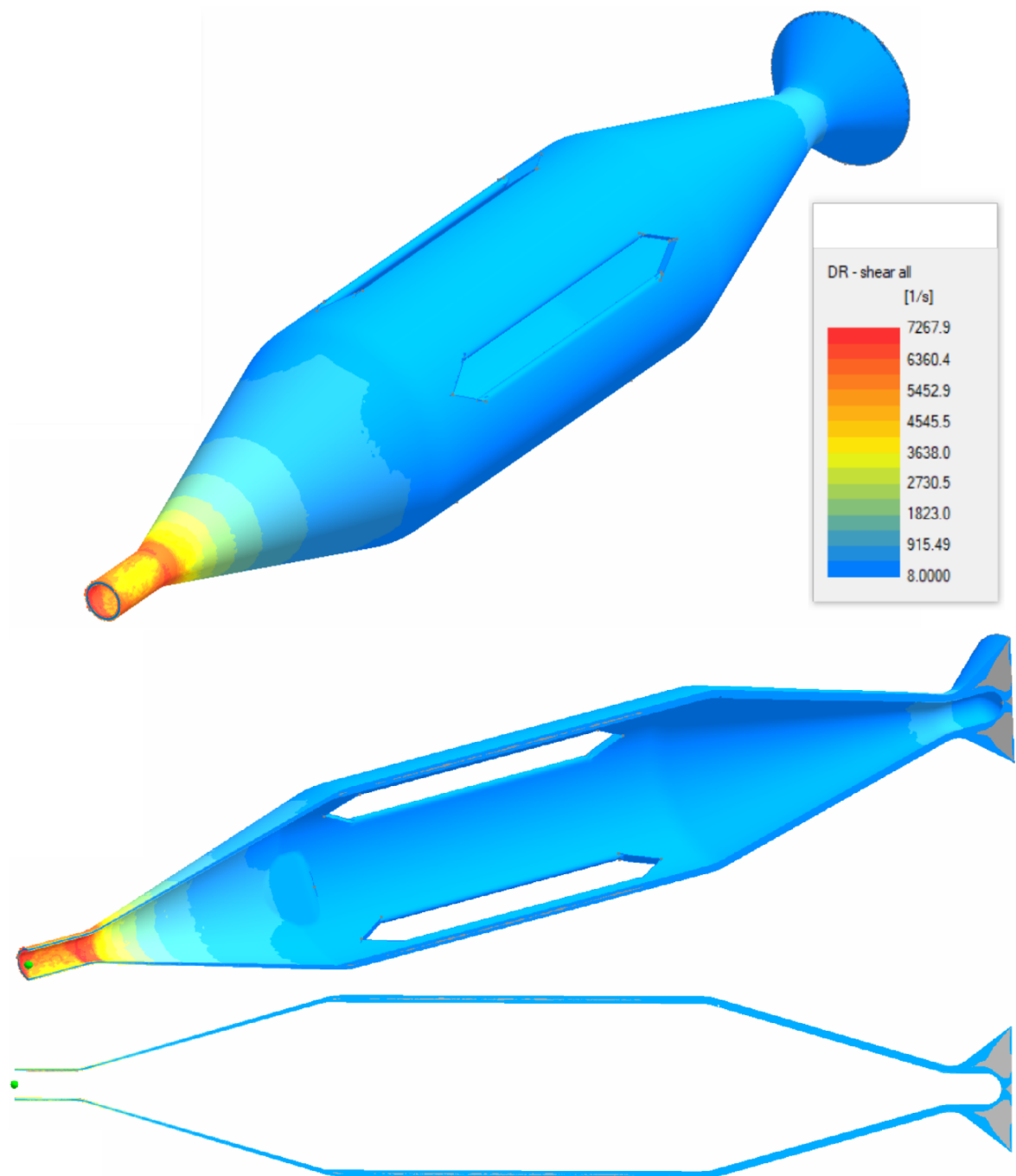
Obrázek 57, Negativ 3. tokové analýzy.

Maximální výsledky tlaku (Obr. 58) se pohybují ve vyšších hodnotách, avšak tlak ve vytlačovacím nástroji, který má hodnoty pod 30 MPa, je stále vyhovující. Tímto konstrukčním řešením bylo tedy docíleno lepšího tlakového spádu.

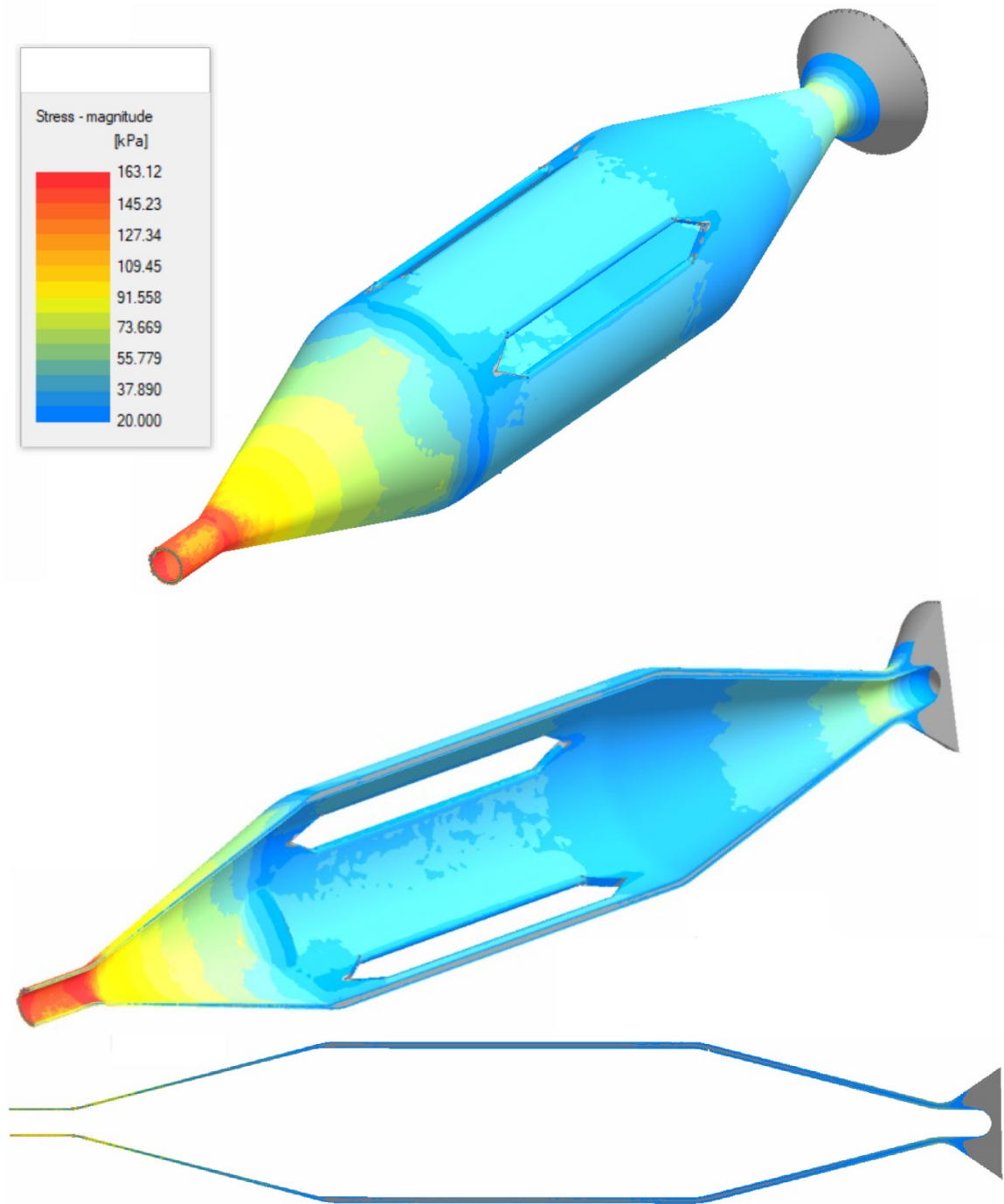


Obrázek 58. Průběh tlaků pro 3. analýzu.

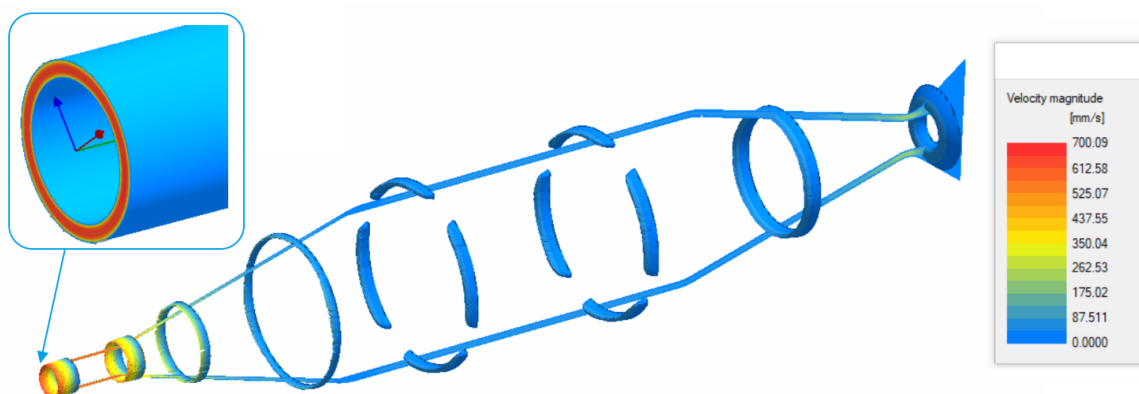
Smykové rychlosti (Obr. 59) spolu se smykovým napětím (Obr. 60) rovněž představují lepší výsledky. Šedá místa se téměř odstranila, polymerní tok je optimalizován do akceptovatelných hodnot.



Obrázek 59. Průběh smykové rychlosti pro 3. analýzu.



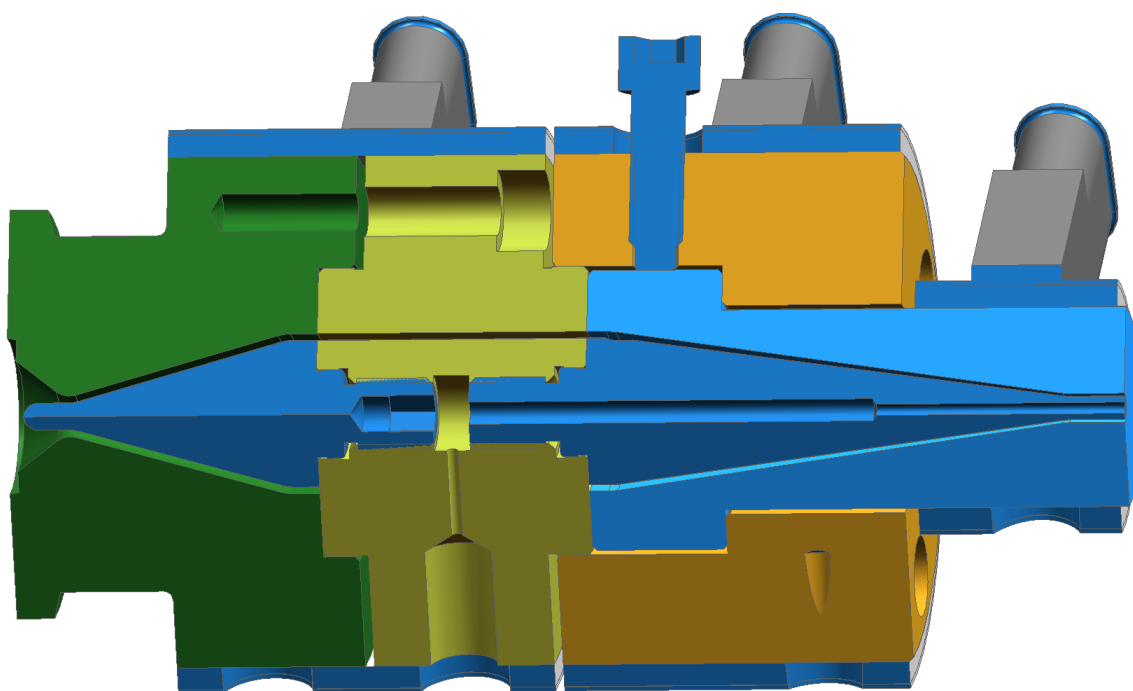
Obrázek 60. Průběh smykového napětí pro 3. tokovou analýzu.



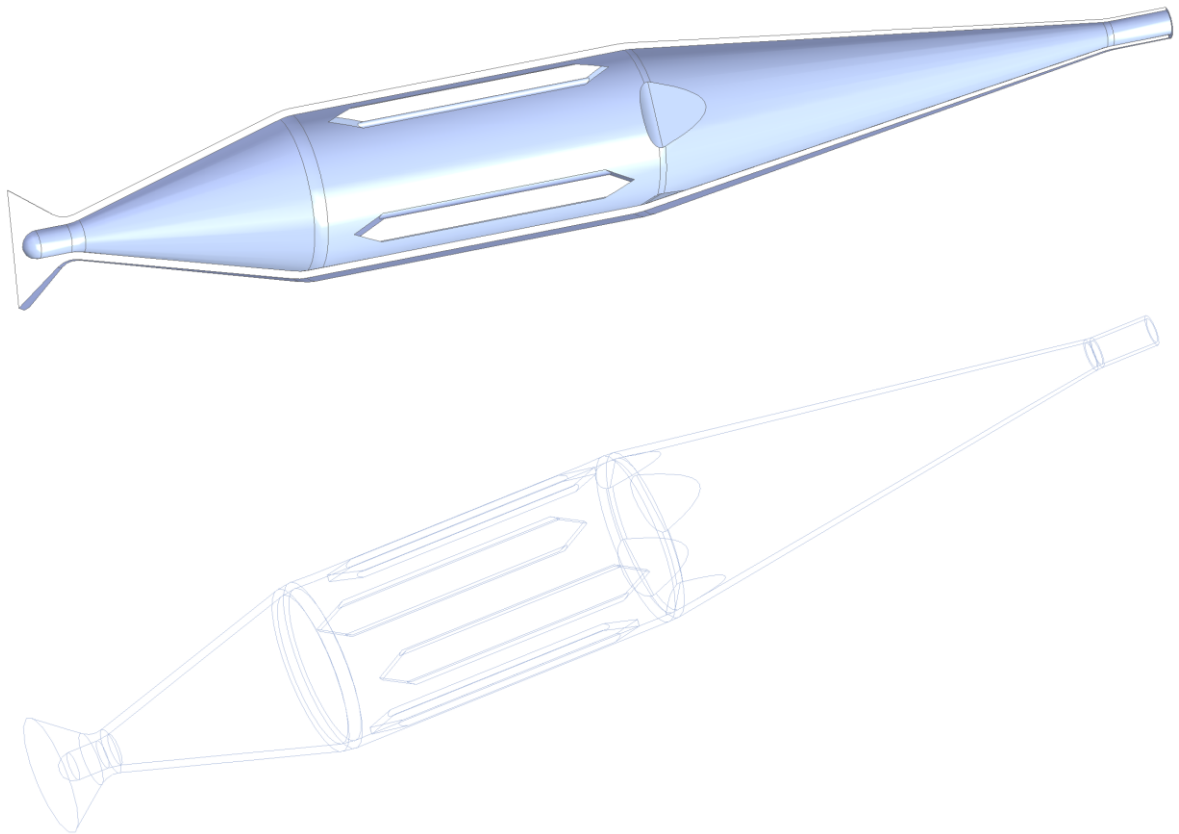
Obrázek 61. Průběh rychlosti pro 3. analýzu.

8.4 4. toková analýza

Poslední řešení nabízí kombinaci dlouhé hubice společně s dlouhým trnem. Další konstrukční prvky byly užity stejně jako v analýze 3, jelikož znázorňovaly nejlepší výstupy.

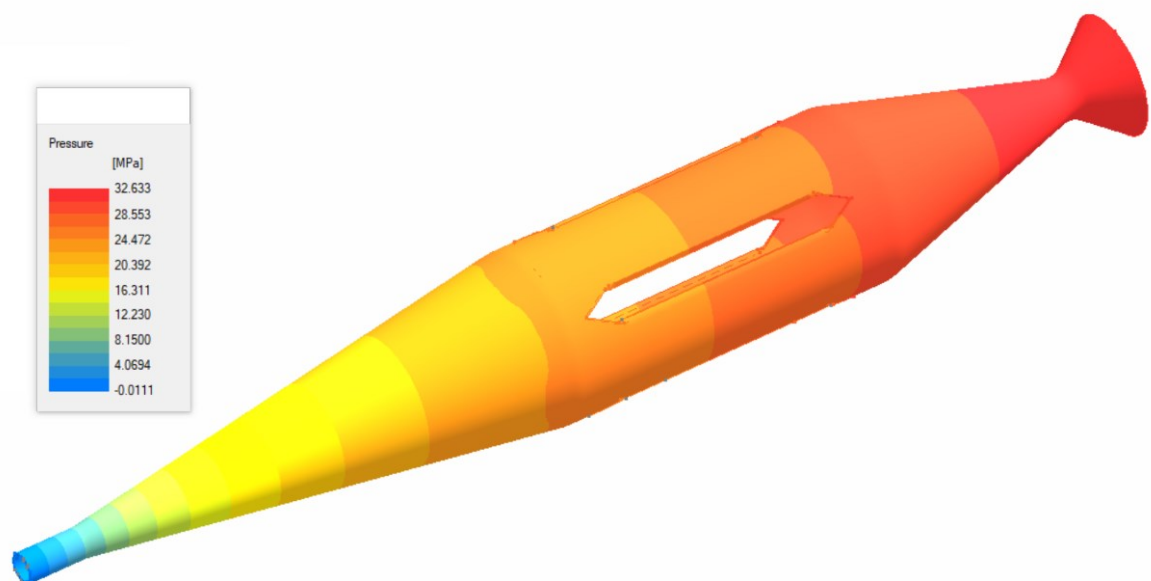


Obrázek 62. Sestava hlavy pro 4. tokovou analýzu.



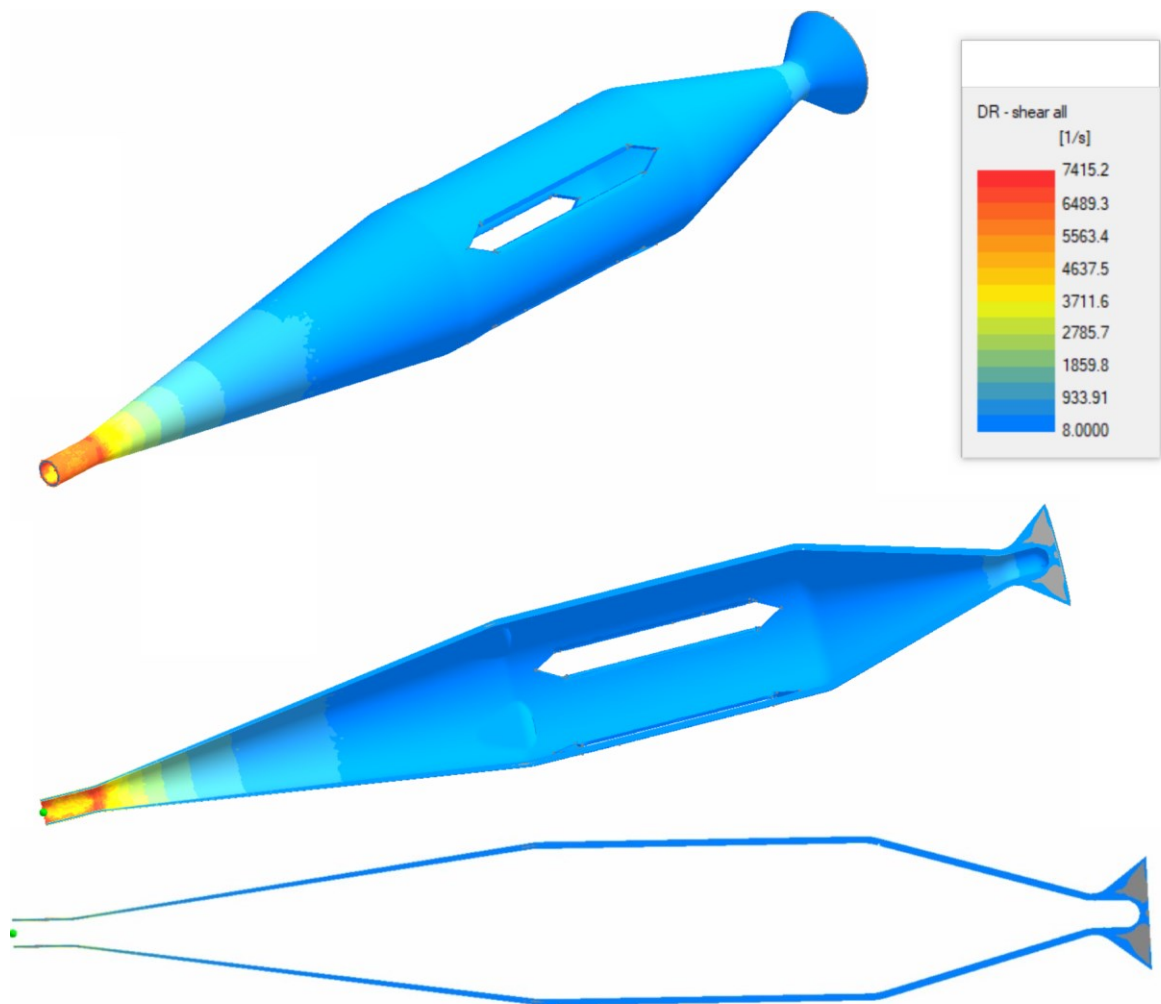
Obrázek 63. Negativ 4. tokové analýzy.

Výsledek tlaků, jež jsou znázorněny na následujícím obrázku (Obr. 64), vykazují vysoké hodnoty. Lokální tlak, který je vyšší než 30 MPa, je nevyhovující (např. mnoho tlakových čidel má funkční pracovní rozmezí do 30 MPa).

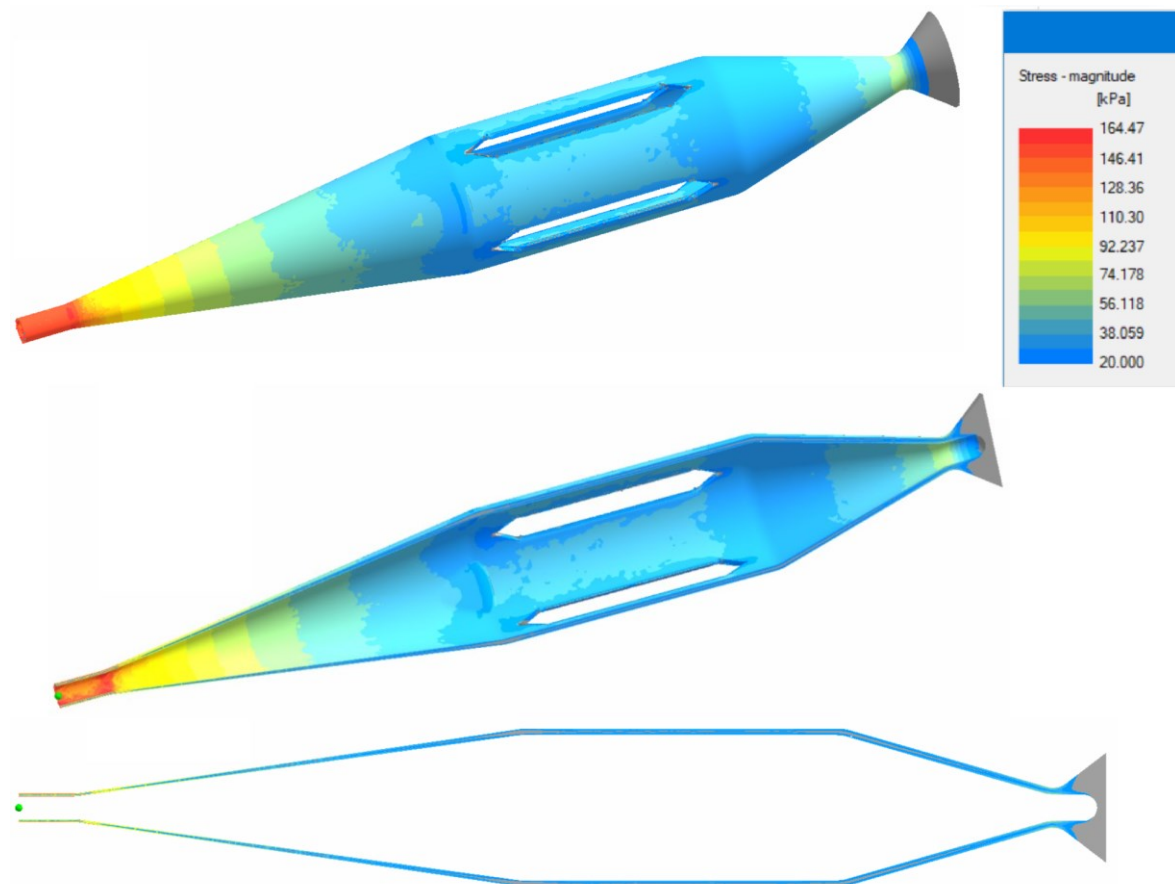


Obrázek 64. Průběh tlaků pro 4. analýzu.

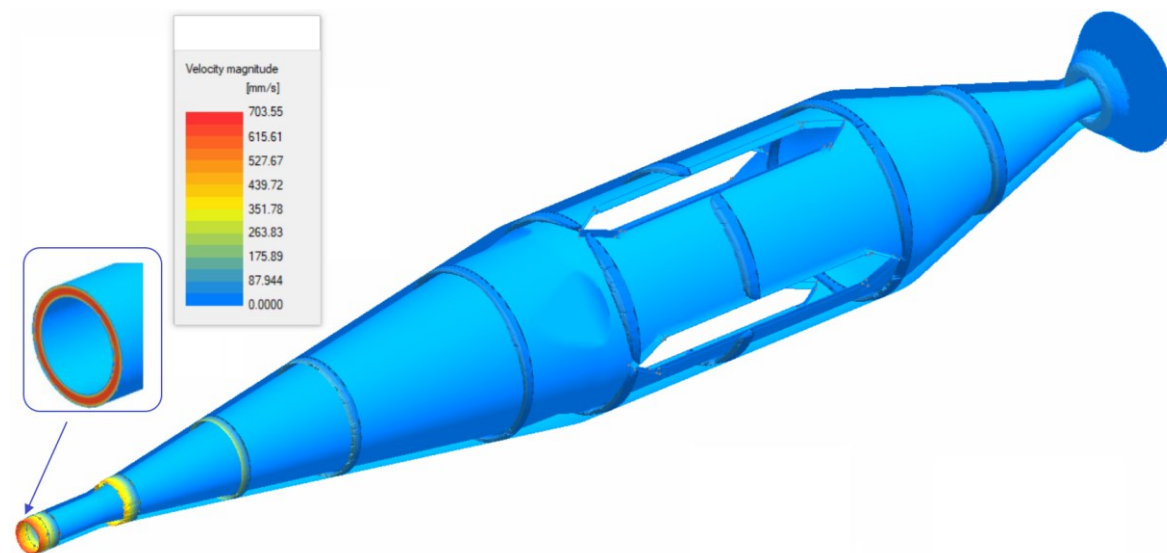
Průběhy smykových rychlostí (Obr. 65) i smykového napětí (Obr. 66) vycházejí obdobně jako u analýzy 3.



Obrázek 65. Průběh smykové rychlosti pro 4. analýzu.



Obrázek 66. Průběh smykového napětí pro 4. analýzu.



Obrázek 67. Průběh rychlostí pro 4. analýzu.

9 DISKUZE A POROVNÁNÍ

Celkově byly provedeny 4 analýzy. Všechny typy analýz byly navrženy na stejný výrobek, ale lišily se konstrukčními elementy.

Tlak polymerní taveniny se nesmí rovnat nule, nicméně maximální akceptovatelný tlak je 30 MPa. Hodnoty smykových rychlostí i smykového napětí vycházely všude přibližně stejně. Nejdůležitější poznatek z těchto smykových vlastností je ukázka šedých míst. Tyto šedé prostory jsou pro výsledný produkt nebezpečné.

První analýza představila nevyhovující výsledky, ale umožnila další konstrukční vývoj. Síla mezi žebry, nedokonale natočený trn a také málo zaoblené plochy byly cenné příspěvky pro tokovou analýzu 2.

Druhá analýza vykazovala výrazné zlepšení oproti první analýze. Šedá místa se zredukovala, rovněž se potvrdily správné kroky vyvozené z první analýzy.

Do třetí analýzy byly převedeny poznatky z analýzy 2. Vymodelovaná torpéda se ukázala jako nedostačující. Z tohoto důvodu bylo ztvárněno nové torpédo s nosem, které lépe vyplní prostor za lamačem. Dále byla ještě více snížena tloušťka mezi žebry. Tato analýza předurčila optimálními výsledky konstrukci nástroje.

Čtvrtá analýza nabídla zajímavé výsledky. Tlakový spád se dostal nad povolenou hranici, z analýz vyplývá, že plynulejší přechod drobným způsobem zefektivňuje polymerní tok.

Důležitým aspektem pro srovnání těchto výsledků je parametr zdržné doby (Tab. 2). Z hlediska vysokých rychlostí je dlouhá zdržná doba problém. Nejlepším řešením se z tohoto porovnání jeví třetí analýza, která má tuto hodnotu nejnižší.

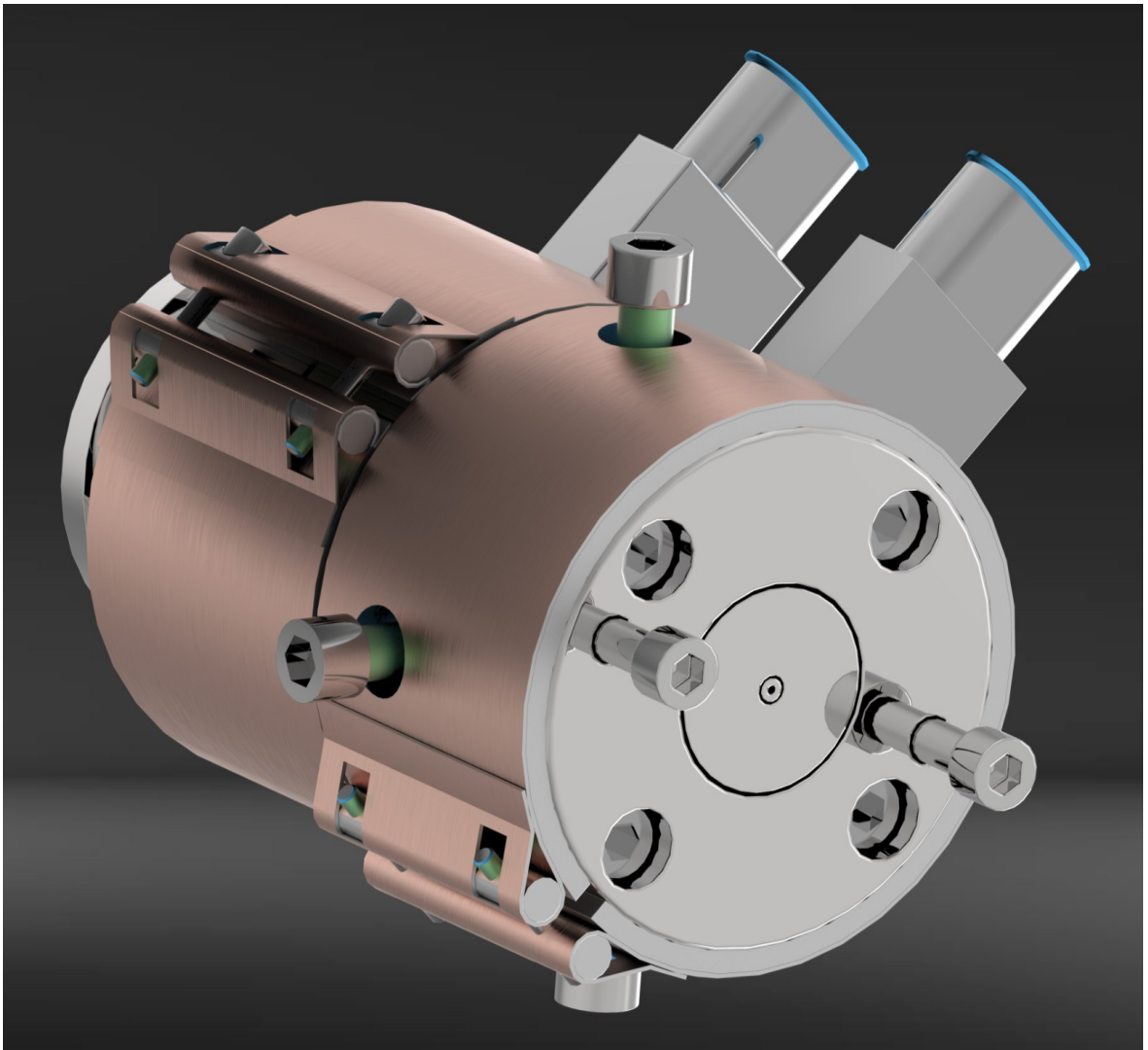
Tabulka 2. Výsledky zdržné doby.

Tokové analýzy	Čas [s]
1. toková analýza	12,1
2. toková analýza	5,2
3. toková analýza	2,4
4. toková analýza	2,9

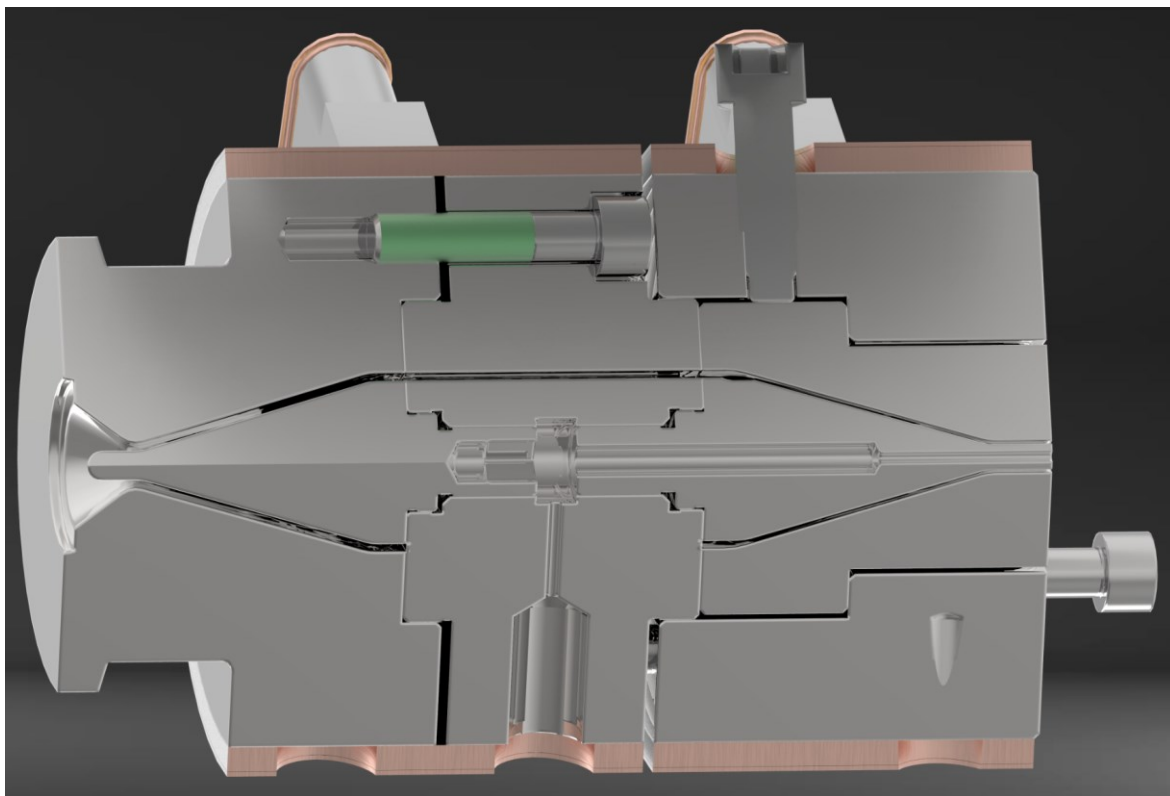
Z uvedených dat plyne, že nejlepší výsledky poskytla konstrukce použitá pro třetí tokovou analýzu.

10 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VYSOKORYCHLOSTNÍ HLAVY

Po zhotovení analýz byl proveden konstrukční návrh vysokorychlostní vytlačovací hlavy (Obr. 68 a 69). Materiál pro konstrukční prvky byl zvolen W.Nr. 1.2316 (podle německé normy). Jedná se o nástrojovou nerezovou martenzitickou ocel se zvýšeným obsahem chromu pro lepší odolnost proti korozi i skvělou otěruvzdornost.



Obrázek 68. Návrh vysokorychlostní vytlačovací hlavy.



Obrázek 69. Řez vysokorychlostní vytlačovací hlavou.

Vstupní část bude připojena k vytlačovacímu stroji za pomoci objímky. Vstupní část je připojena ke střední části čtyřmi šrouby a středěná rozměrem 65 H7/e8. Stejná míra i toleranční stupeň jsou aplikovány pro středění výstupního tělesa ke střednímu, také je zde použit stejný počet šroubů. Všechny šrouby užití ve vytlačovací hlavě se musí ošetřit grafitovou vazelinou. Torpédo a vytlačovací trn mají stejný závit (M16-6H), středící průměr (20 H7/e8) i dvojici zápichů.

Na dosedací plochy je předepsaná velice kvalitní povrchová úprava $Ra = 0,4$. Prostory, mezi kterými proudí tavenina, je vhodné ošetřit leštěním. Na již zmíněné středící rozměry je žádoucí předepsat jakost povrchu $Ra = 1,6$.

Přívod tepla zajišťují dva topné pásy. Kontrolu teploty zabezpečuje teplotní čidlo.

Na základě provedených analýz a konstrukčního návrhu byla vytvořena výkresová dokumentace. Výrobní výkresy jsou součástí příloh diplomové práce, též je součástí příloh i výkres sestavy společně s kusovníkem.

ZÁVĚR

V teoretické části práce byl popsán proces vytlačování. Byly zde představeny tokové vlastnosti polymerního materiálu. Největší důraz byl kladen na problematiku vytlačovacích hlav, kdy byly podrobně znázorněny nástroje na výrobu trubiček. Posledním bodem teoretické části byl popis funkčních komponentů potřebných pro vytlačování. Popsány byly vytlačovací stroje, kalibrační ústrojí, odtah společně s měřicím strojem i dělicí či navíjecí zařízení. Tato část práce shrnula problematiku vytlačování a byly zde představeny podklady pro praktickou část.

Na základě tohoto textu byly v praktické části navrženy konstrukční prvky, různé typy rozdělovačů společně se vstupní částí a druhy trnů dohromady s hubicí. Veškeré konstrukční elementy i sestavy byly modelovány v programu Solid Edge. Z těchto funkčních sestav byl následně zhotoven negativ, který byl uložen do formátu *.stp. Tento formát se přesunul do programu Rhino, v němž získal síť v podobě metody konečných prvků. Další část probíhala v programu Virtual Extrusion Laboratory, ve kterém byly provedeny 4 tokové analýzy. První toková analýza naznačila budoucí vývoj daného nástroje. Druhá analýza ukázala sofistikovanější výsledky, rovněž poskytla důležité informace, které potvrdily správné úvahy první analýzy. Třetí analýza prezentovala nejlepší výsledky a na jejím základě byla postavena celá konstrukce. Také potvrdila správné závěry vyvozené z druhé analýzy. Čtvrtá analýza potvrdila dominující výsledky třetí analýzy a stala zajímavým srovnávacím aspektem pro optimalizovanou sestavu. Na základě tokových analýz proběhla diskuse, ze které vyšel finální konstrukční návrh vysokorychlostního nástroje. Součástí návrhu byla i volba materiálu, ze kterého bude nástroj vyroben. Z tohoto návrhu byla zhotovena plnohodnotná výkresová dokumentace.

Hlavním cílem pro tuto práci bylo dosáhnout vytlačovací rychlosti 100 m/min pro trubičku s vnějším průměrem 3,3 mm a silou stěny 0,3 mm. Byl zvolen materiál HDPE (vysokohustotní polyetylen). Navržené řešení plně odpovídá a vyhovuje zadaným požadavkům.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MICHAELI, Walter. Extrusion dies for plastics and rubber. Munich: Carl Hanser Verlag, 2003. 360 s. ISBN 3-44622561-7
- [2] DUCHÁČEK Vratislav. *Polymery výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vydání Praha: VŠCHT Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [3] MLEZIVA Josef, ŠŇUPÁREK Jaromír, *Polymery-výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vydání Praha: Sobotáles 2000. ISBN 80-85920-72-7
- [4] DUCHÁČEK Vratislav. *Základní pojmy z chemie a technologie polymerů, jejich mezinárodní zkratky a obchodní názvy*. Dotisk Praha: VŠCHT Praha 2004. ISBN 80-7080-265-6
- [5] WAGNER, John R., Harold F. GILES a Eldridge M. MOUNT. Extrusion: the definitive processing guide and handbook. 2nd ed. Amsterdam: William Andrew, 2014. Plastics design library. ISBN 9781437734812.
- [6] BĚHÁLEK Luboš. *Polymery* [online]. Liberec: Publi 2016 [cit. 2021-03-20]. ISBN 978-80-88058-68-7 (elektronická verze). Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [7] MAŇAS Miroslav, VLČEK Jiří. *Aplikovaná reologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2001. ISBN 80-7318-039-1
- [8] ŠTĚPEK, Jiří, Jiří ZELINGER a Antonín KUTA. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 637 s.
- [9] STANĚK, Michal. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 211 s. Habilitation thesis.
- [10] MAŇAS, Miroslav a Josef HELŠTÝN. *Výrobní stroje a zařízení: Gumárenské a plastikářské stroje II*. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 199 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0213-X.
- [11] AUSPERGER, Aleš, *Technologie zpracování plastů*. Liberec: Publi 2016 [cit. 2020-03-07]. ISBN 978-80-88058-77-9 (elektronická verze). Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
- [12] ZATLOUKAL, Martin a Natálie HONKOVÁ, ed. *Novel Trends in Rheology ...* Zlín: Tomas Bata University in Zlin, 2007, AIP conference proceedings.

- [13] Stoklásek, Václav. *Návrh vytlačovacího nástroje pro výrobu polymerního dílu*. Zlín, 2016. diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická
- [14] BAIRD, Donald G. a Dimitris I. COLLIAS. *Polymer processing: principles and design*. Second edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014, s. 214. ISBN 978-0-470-93058-8.
- [15] ŠŇUPÁREK Jaromír. *Makromolekulární chemie Úvod do chemie a technologie polymerů*. 2. vydání Pardubice: Univerzita Pardubice 2009. ISBN 978-80-7395-166-5
- [16] Seidl, Martin, *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Liberec: Publi 2015 [cit. 2020-03-01]. ISBN 978-80-88058-71-7 (elektronická verze). Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [17] KUTA Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Dotisk Praha: VŠCHT Praha 2007. ISBN 978-80-7080-367-7
- [18] TANNER Roger I. *Engineering Rheology*. 2nd Edition Oxford: OXFORD universitypress 2002. ISBN 0-19—856473-2
- [19] AGASSANT, J. *Polymer processing: principles and modeling*. New York: Distributed in the U.S.A. and Canada by Oxford University Press, c1991, 475 s. ISBN 0195208641X.
- [20] PROKOPOVÁ Irena. *Makromolekulární chemie*. 2. vydání Praha: VŠCHT Praha 2007. ISBN 978-80-7080-662-3
- [21] RÖSLER Joachim, HARDERS Harald, BÄKER Martin. *Mechanical Behaviour of Engineering Materials Metals, Ceramics, Polymers, and Composites*. Berlin: Springer-VerlagBerlin Heidelberg 2007. ISBN 978-3-540-73446-8
- [22] RAUWENDAAL Chris, GRAMANN Paul J., DAVIS Bruce A., OSSWALD Tim A. *Polymer extrusion*. 5nd Edition München: Hanser Publishers 2014. ISBN 978-1-56990-516-6
- [23] CHUNG Chang I. *Extrusion of Polymers: Theory and Practice*. 3rd Edition. Troy: Carl HanserVerlag, München 2020. ISBN 978-1-56990-609-5

- [23] DRÁBEK, Jiří. *Applied rheology for production of polymeric nanofibers*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018, 162 s. Dostupné také z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/43778>
- [24] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141.
- [25] Sortiment interní projektů Compuplast s. r. o. Zlín.
- [26] ČADEK Drahomír. Přírodní kaučuk. *Gumárenské listy*. 2020, III(3), 5-6. ISSN 1212-9704
- [27] KAINTH Sushil. *Die design forextrusionofplasticstubes and pipes*. Walsall: HanserPublishersMünchen 2018. ISBN 978-1-56990-672-9
- [28] WYPYCH George. *Handbook of polymers*. Toronto: ChemTec Publishing 2012. ISBN 978-1-895198-47-8
- [29] DEALY John M., WANG Jian. *Melt Rheology and its Applications in the Plastics Industry*. 2nd Edition New York: Springer 2013. ISBN 978-94-007-6394-4
- [30] RAUWENDAAL Chris. *Understanding extrusion*. 3rd Edition Auburn: Carl Hanser Verlag, München 2019. ISBN 978-1-56990-698-9
- [31] LEINVEBER Jiří, VÁVRA Pavel. *Strojnické tabulky*. 5. upravené vydání Úvaly: Albra Úvaly 2011. ISBN 978-80-7361-081-4

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PP Polypropylen

PE Polyethylen

PS Polystyren

N Síla

LDPE Nízko hustotní polyetylen

HDPE Vysoko hustotní polyetylen

LLDPE Lineární nízko hustotní polyetylen

°C Stupeň Celsia

% Procento

MPA Megapascal

kPa kilopascal

Pa pascal

mm milimetr

τ_w smykové napětí na stěně

kg kilogram

hod hodina

m metr

min minuty

D vnější průměr

d vnitřní průměr

t tloušťka stěny

g gram

cm centimetr

cm³ centimetr krychlový

m měřítko konzistence

α	teplotní funkce
n	stupeň neneutonského chování
ΔP	rozdíl tlaků
η	smyková viskozita
s	sekunda
L	délka trubky
R	poloměr trubky
Q	průtočné množství
τ	napětí ve smyku
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace

Hustota g/cm³

Teplota tání °C

Pevnost v tahu MPa

Prodloužení při přetržení %

Modul pružnosti MPa

Tvrdost Shore D

Vytlačovací rychlost m/min

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Vytlačované profily [25].	11
Obrázek 2. Viskózní model – píst [7].	12
Obrázek 3. Elastický model – pružina [7].	12
Obrázek 4. Maxwellův model [7].	12
Obrázek 5. Rozdělení materiálů dle tokové křivky [7].	13
Obrázek 6. Schéma měření tavného indexu [7].	15
Obrázek 7. Ukázka relaxace napětí [7].	16
Obrázek 8. Weissenbergův efekt [7].	17
Obrázek 9. Lamač [25].	18
Obrázek 10. Rozdělení vytlačovacích hlav dle typu os šneku a hubice [11].	19
Obrázek 11. Příklady uspořádání vytlačovacího trnu s rozdělovačem [10].	20
Obrázek 12. Vytlačovací hlava na trubičky [25].	21
Obrázek 13. Ze strany plněná hlava [13].	21
Obrázek 14. Vytlačovací trn pro plnění materiálu ze strany [14].	22
Obrázek 15. Spirálový trn [25].	22
Obrázek 16. Deska spirálové hlavy [25].	23
Obrázek 17. Příklad Spirálové hlavy [25].	23
Obrázek 18. Oblasti ploché vytlačovací hlavy [25].	25
Obrázek 19. Profilová vytlačovací hlava [25].	26
Obrázek 20. Vytlačovací příčná hlava na opláštění [25].	27
Obrázek 21. FEM analýza polymerní taveniny na výstupu z hlavy [12].	28
Obrázek 22. Schéma vytlačovacích strojů [10].	30
Obrázek 23. Jednoduchý šnek [22].	31
Obrázek 24. Pístový vytlačovací stroj [15].	32
Obrázek 25. Diskový vytlačovací stroj [16].	33
Obrázek 26. Vytlačovací diskový stroj s pístem [10].	34
Obrázek 27. Vytlačovací diskový stroj se šnekem [10].	34
Obrázek 28. Podtlaková kalibrační jednotka [25].	35
Obrázek 29. Přetlaková kalibrace [11].	36
Obrázek 30. Průvlaková kalibrace [11].	36
Obrázek 31. Řez lamelovým kalibračním ústrojím [25].	37
Obrázek 32. Zadaný produkt.	42
Obrázek 33. Montáž vytlačovacího trnu.	45
Obrázek 34. Torpéda.	46

Obrázek 35. Vstupní elementy.....	47
Obrázek 36. Světlost.	48
Obrázek 37. Délka paralelní části.	49
Obrázek 38. Kombinace hubice a trn základní.	49
Obrázek 39. Kombinace hubice a trn prodloužená verze.	50
Obrázek 40. Sestava hlavy pro 1. tokovou analýzu.	52
Obrázek 41. Negativ 1. tokové analýzy.	52
Obrázek 42. Průběh tlaků pro 1. analýzu.	53
Obrázek 43. Průběh smykové rychlosti pro 1. analýzu.	54
Obrázek 44. Průběh smykového napětí pro 1. analýzu.....	55
Obrázek 45. Průběh rychlosti pro 1. analýzu.....	56
Obrázek 46. Správné natočení trnu vůči žebrům.	57
Obrázek 47. Konstrukční změny zaoblených ploch.	57
Obrázek 48. Sestava hlavy pro 2. tokovou analýzu.	58
Obrázek 49. Negativ 2. tokové analýzy.	58
Obrázek 50. Průběh tlaků pro 2. analýzu.....	59
Obrázek 51. Průběh smykové rychlosti pro 2. analýzu.	60
Obrázek 52. Detail výstupní zóny smykové rychlosti pro 2. analýzu.	60
Obrázek 53. Průběh smykového napětí pro 2. analýzu.....	61
Obrázek 54. Průběh rychlosti pro 2. analýzu.....	62
Obrázek 55, Torpédo s nosem.	62
Obrázek 56, Sestava hlavy pro 3. tokovou analýzu,.....	63
Obrázek 57, Negativ 3. tokové analýzy.	63
Obrázek 58. Průběh tlaků pro 3. analýzu.....	64
Obrázek 59. Průběh smykové rychlosti pro 3. analýzu.	65
Obrázek 60. Průběh smykového napětí pro 3. tokovou analýzu.	66
Obrázek 61. Průběh rychlosti pro 3. analýzu.....	67
Obrázek 62. Sestava hlavy pro 4. tokovou analýzu.	67
Obrázek 63. Negativ 4. tokové analýzy.	68
Obrázek 64. Průběh tlaků pro 4. analýzu.....	68
Obrázek 65. Průběh smykové rychlosti pro 4. analýzu.	69
Obrázek 66. Průběh smykového napětí pro 4. analýzu.....	70
Obrázek 67. Průběh rychlostí pro 4. analýzu.....	70
Obrázek 68. Návrh vysokorychlostní vytlačovací hlavy.....	72
Obrázek 69. Řez vysokorychlostní vytlačovací hlavou.....	73

seznam TABULEK

Tabulka 1 Srovnání vybraných vlastností základních druhů polyetylenů	44
Tabulka 2. Výsledky zdržné doby.	71

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkres sestavy

Příloha P II: Kusovník

Příloha P III: Výrobní výkres – těleso vstupní

Příloha P IV: Výrobní výkres – těleso střední

Příloha P V: Výrobní výkres – torpédo s nosem

Příloha P VI: Výrobní výkres – těleso výstupní

Příloha P VII: Výrobní výkres – hubice

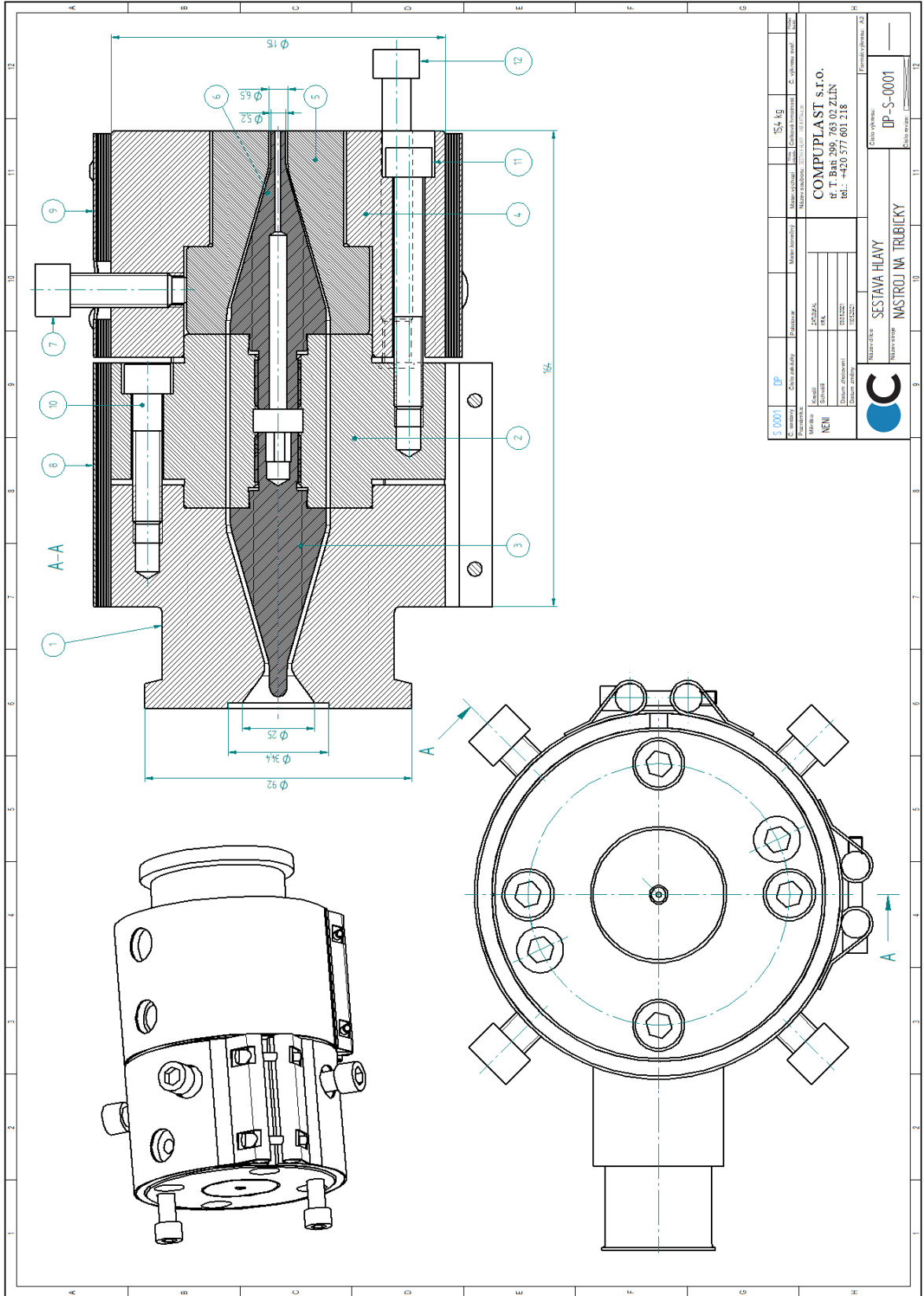
Příloha P VIII: Výrobní výkres – trn

Příloha P IX: Výrobní výkres – šroub stavěcí

Příloha P X: Výrobní výkres – topný pás 1


Příloha P XI: Výrobní výkres – topný pás 2

PŘÍLOHA P I: VÝKRES SESTAVY

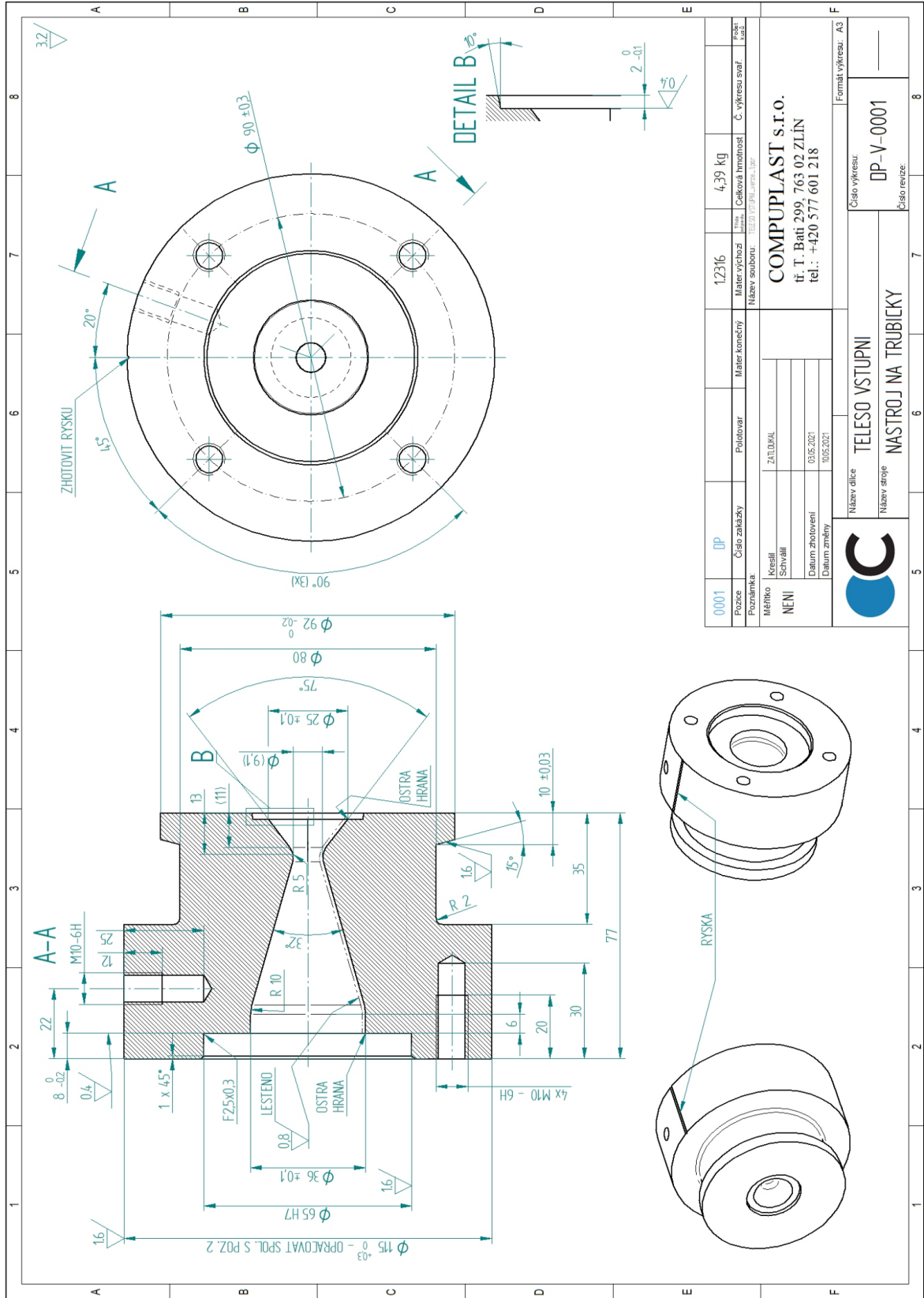


PŘÍLOHA P II: KUSOVNÍK

Pozice	Číslo výkresu	Název - rozměr dílce	Polotovár - norma	Material	Poznámka	Hmotnost	Poč. kusů
1	DP-V-0001	TELESO VSTUPNI		12316		4,4 kg	1
2	DP-V-0002	TELESO STREDNI		12316		3,4 kg	1
3	DP-V-0003	TORPEDO S NOSEM		12316		0,2 kg	1
4	DP-V-0004	TELESO VYSTUPNI		12316		4,3 kg	1
5	DP-V-0005	HUBICE 6,5		12316		10 kg	1
6	DP-V-0006	TRN 5,2		12316		0,2 kg	1
7	DP-V-0007	SROUB M12x40 STAVECI	CSN 02114355			0,1 kg	4
8	DP-V-0008	TOPNY PAS 115x84				0,9 kg	1
9	DP-V-0009	TOPNY PAS 115x77				0,8 kg	1
10		SROUB M10x45	DIN 912 A2	NEREZ		0,0 kg	4
11		SROUB M10x80	DIN 912 A2	NEREZ		0,1 kg	4
12		SROUB M10x100	DIN 912 A2	NEREZ		0,1 kg	2

	COMPUPLAST s.r.o. tř. T. Bati 299, 764 22 ZLÍN tel./fax : +420 577 601 218	
	Zhotovitel / Schválil ZATLOUKAL KRAL	Datum 03.05.2021
Název dílce / Název stroje SESTAVA HLAVY NASTROJ NA TRUBICKY		Č. projektu DP-S-0001
		Č. listu

PŘÍLOHA P III: VÝROBNÍ VÝKRES – TĚLESO VSTUPNÍ

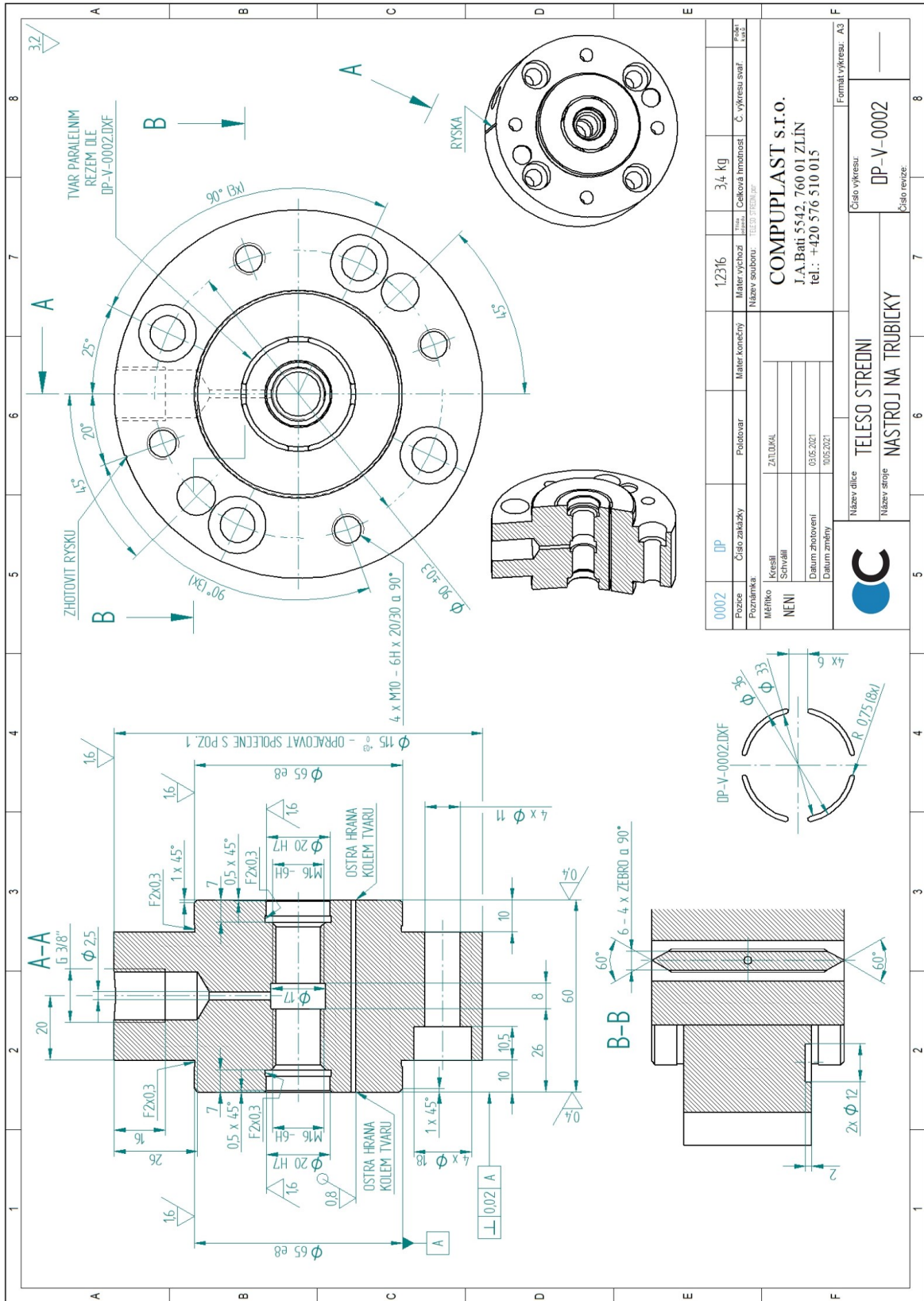


0001	DP			12316	4,39 kg		
Pozice		Císlo zakázky	Polotovary	Mater konečný	Mater výchozí	Celková hmotnost	Č. výkresu svář.
Poznámka		Název souboru: TĚLO VSTUPNÍ.nbr					
Měřítka	Kresli	21.10.04					
SOVÁŘI							
Datum zhotovení		03.05.2021					
Datum změny		00.05.2021					
Název dílice		TELESO VSTUPNÍ			Císlo výkresu:		
Název stroje		NASTROJ NA TRUBÍČKY			DP-V-0001		
					Císlo revize:		
					Formát výkresu: A3		

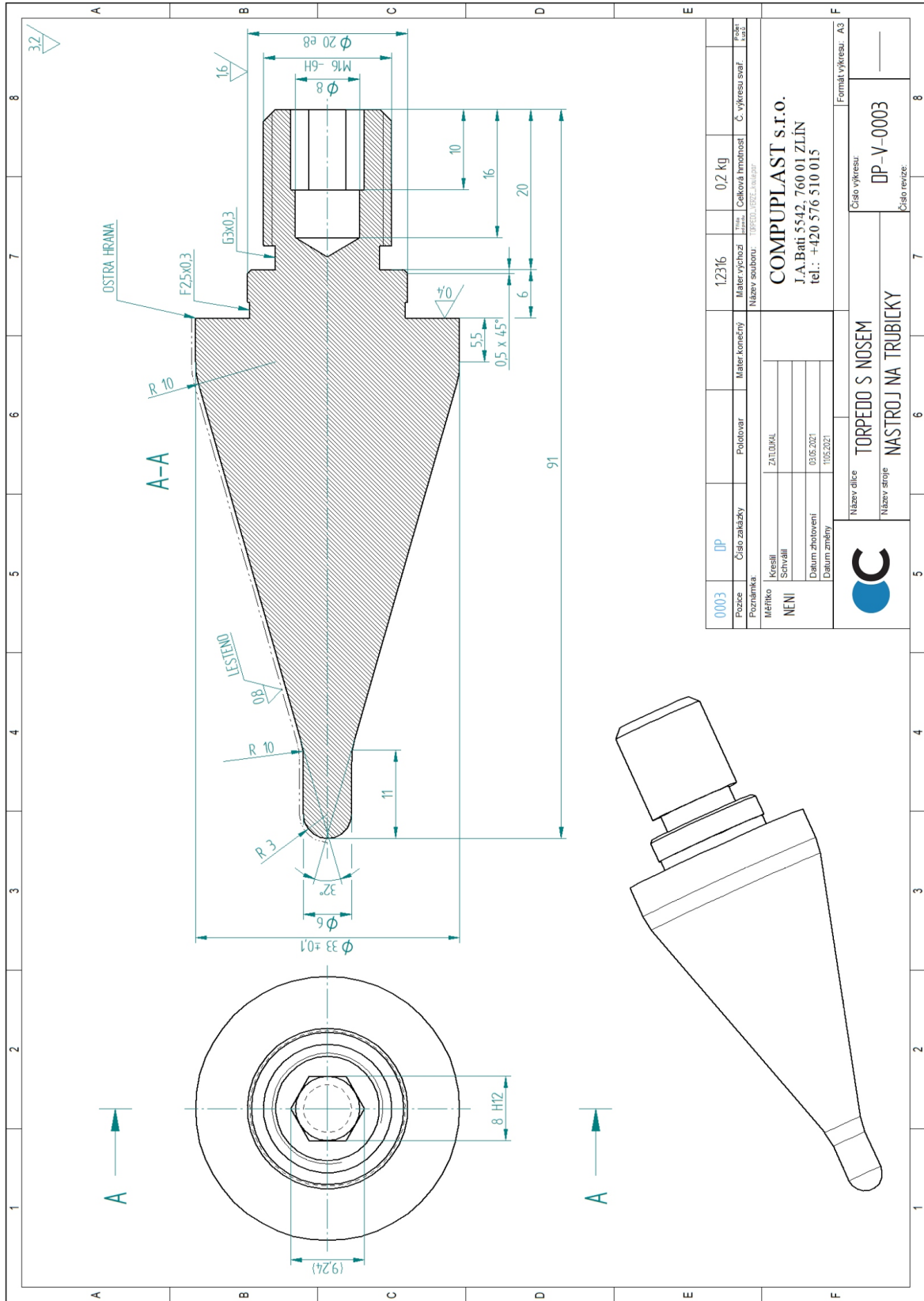
COMPUPLAST s.r.o.
 tř. T. Bati 299, 763 02 ZLÍN
 tel.: +420 577 601 218




PŘÍLOHA P IV: VÝROBNÍ VÝKRES – TĚLESO STREDNI

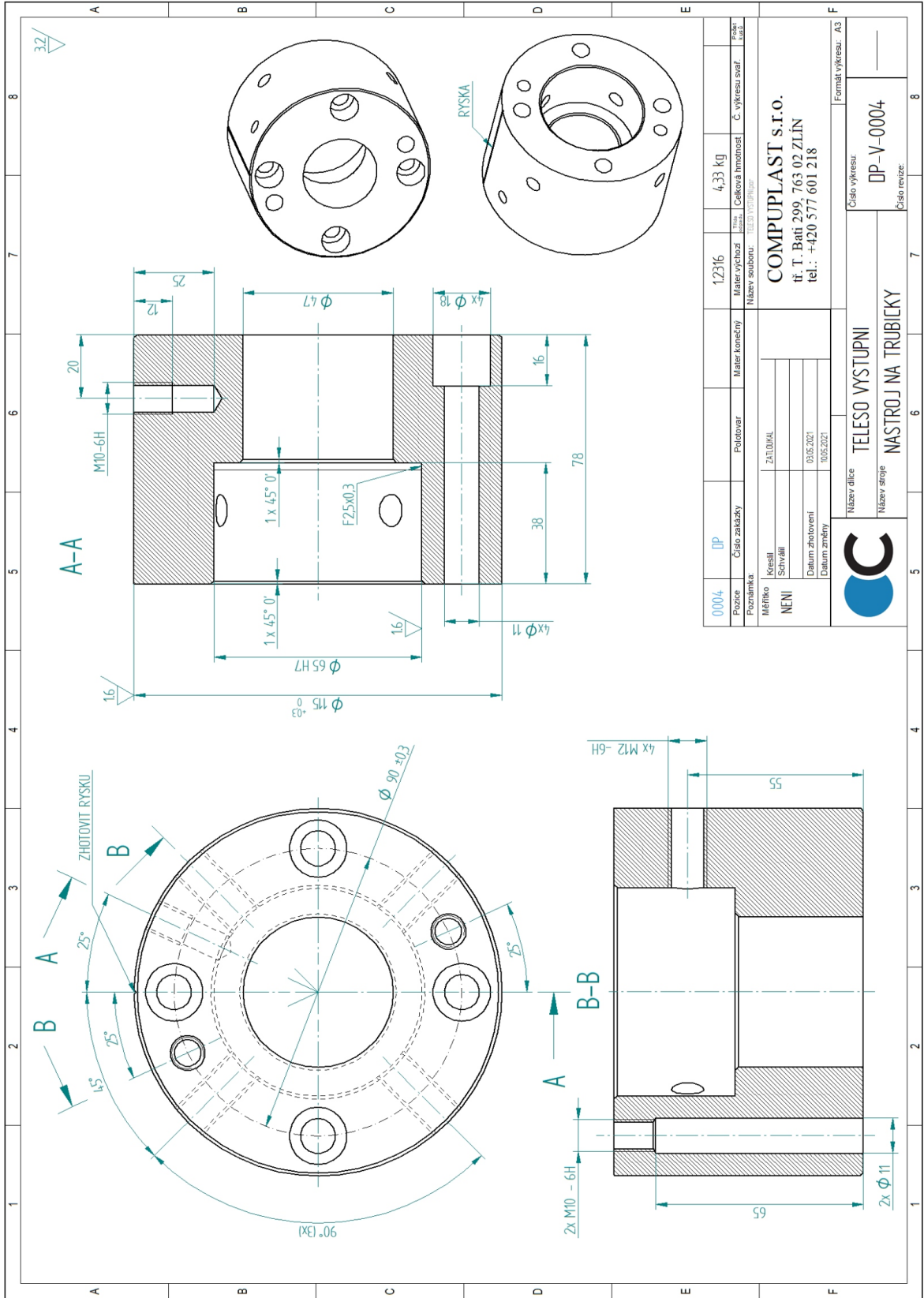


PŘÍLOHA P V: VÝROBNÍ VÝKRES – TORPÉDO S NOSEM

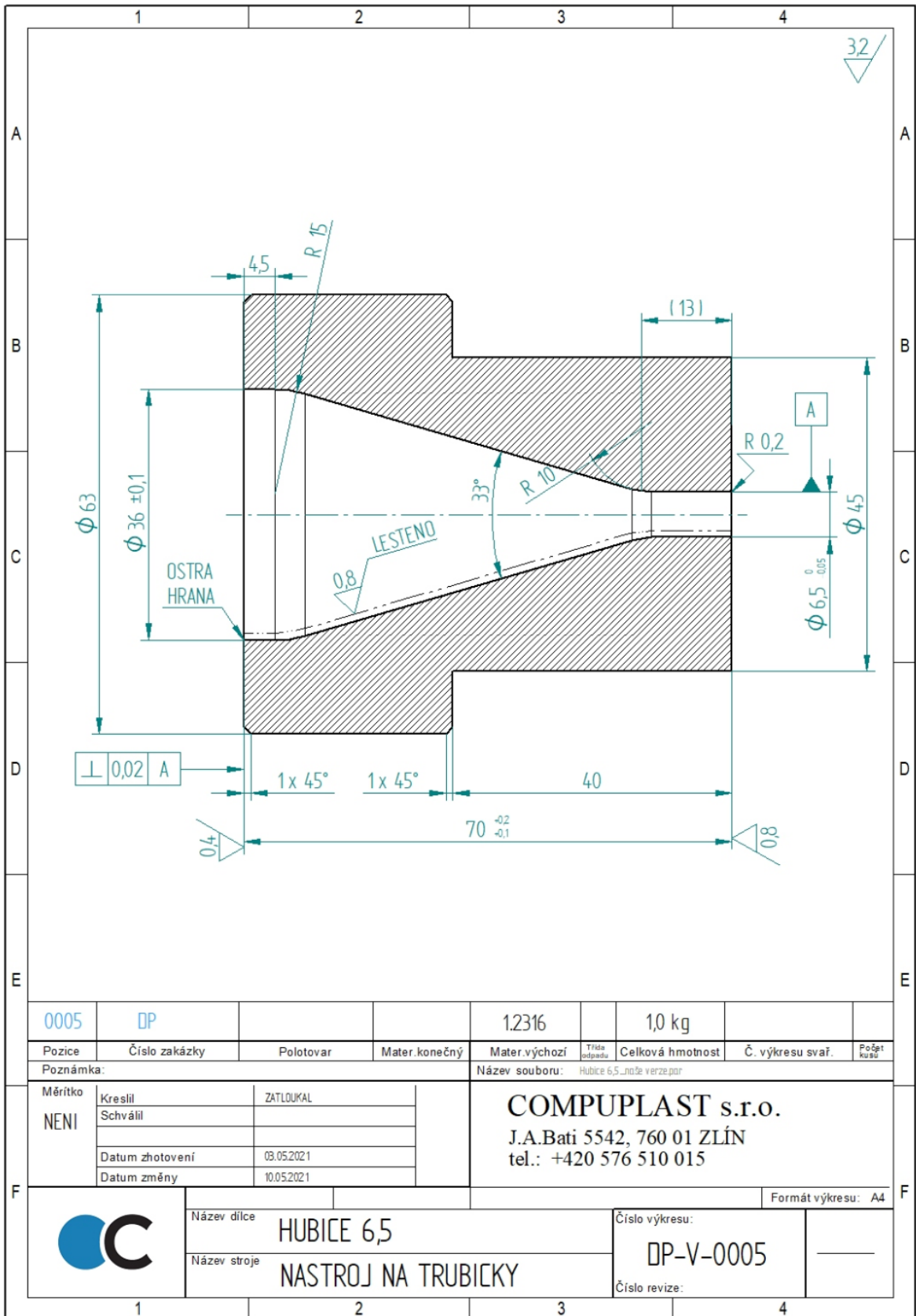


0003	DP	12316	0.2 kg		
Číslo zakázky	Předmět	Mater. konečný	Mater. výchozí	Číslo výkresu svf.	Číslo revize
Poznámka:		Název souboru: TORPEDO_S_NOSEM.dwg			
Měřička	Kreslí	ZATLUBKA	Celková hmotnost		
NEJ	Schválí				
Datum zhotovení	Datum změny	03.05.2021	Číslo výkresu: A3		
		10.05.2021	Formát výkresu: A3		
Název díle		TORPEDO S NOSEM		Číslo výkresu: DP-V-0003	
Název stroje		NASTROJ NA TRUBICKY		Číslo revize: —	
		COMUPLAST s.r.o. J.A. Bati 5542, 760 01 ZLÍN tel.: +420 576 510 015			

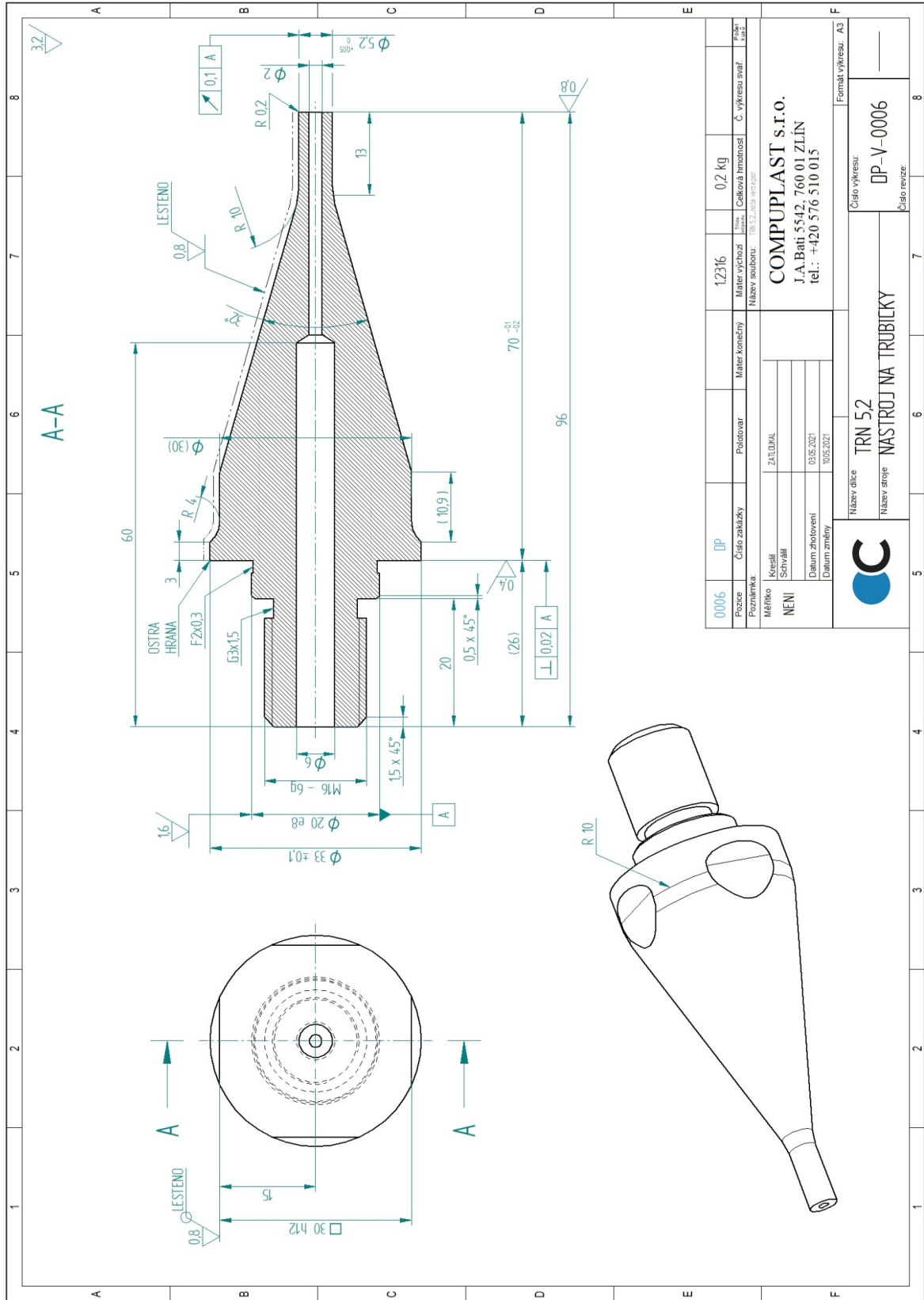
PŘÍLOHA P VI: VÝROBNÍ VÝKRES – TELESO VYSTUPNI



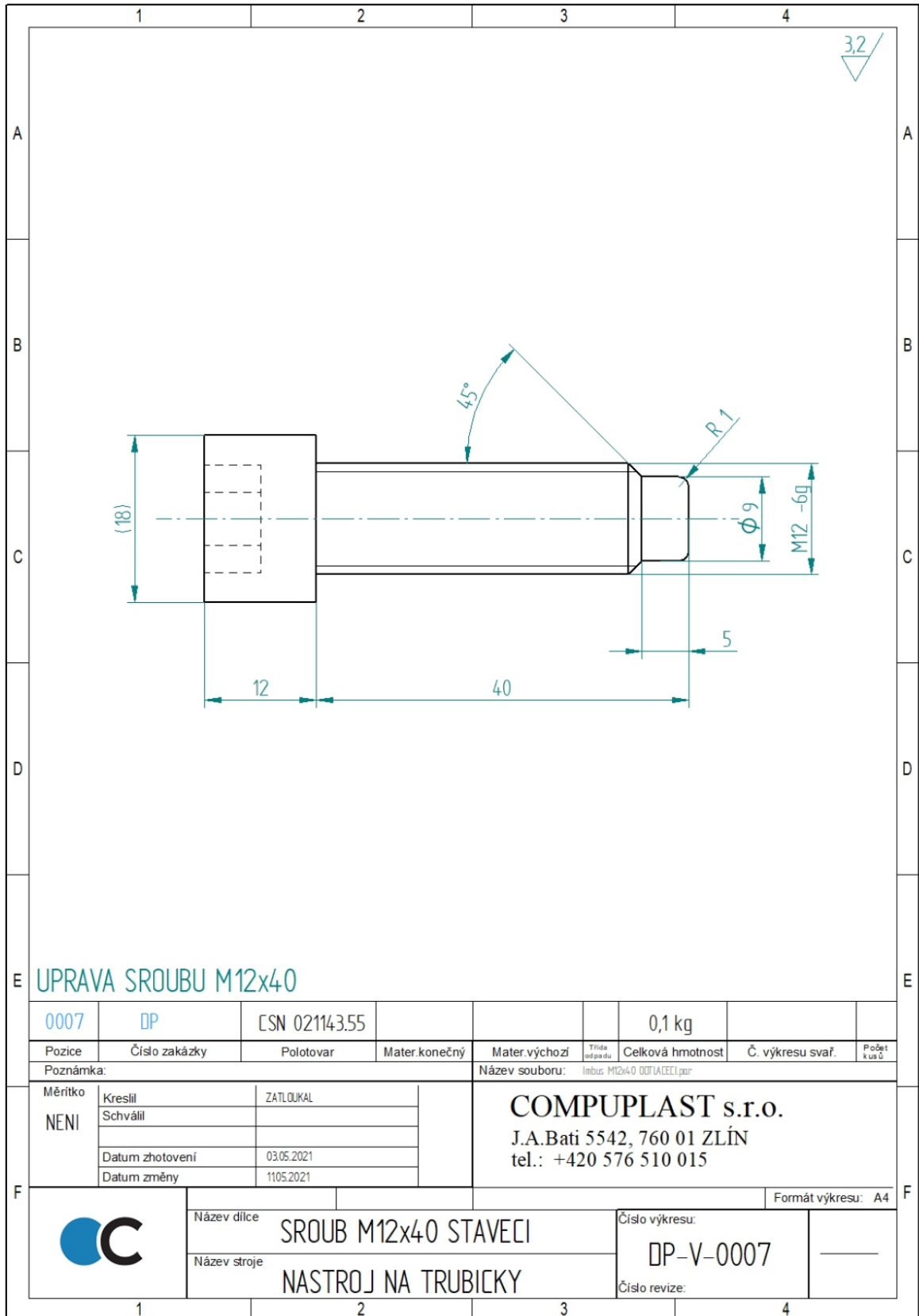
PŘÍLOHA P VII: VÝROBNÍ VÝKRES – HUBICE



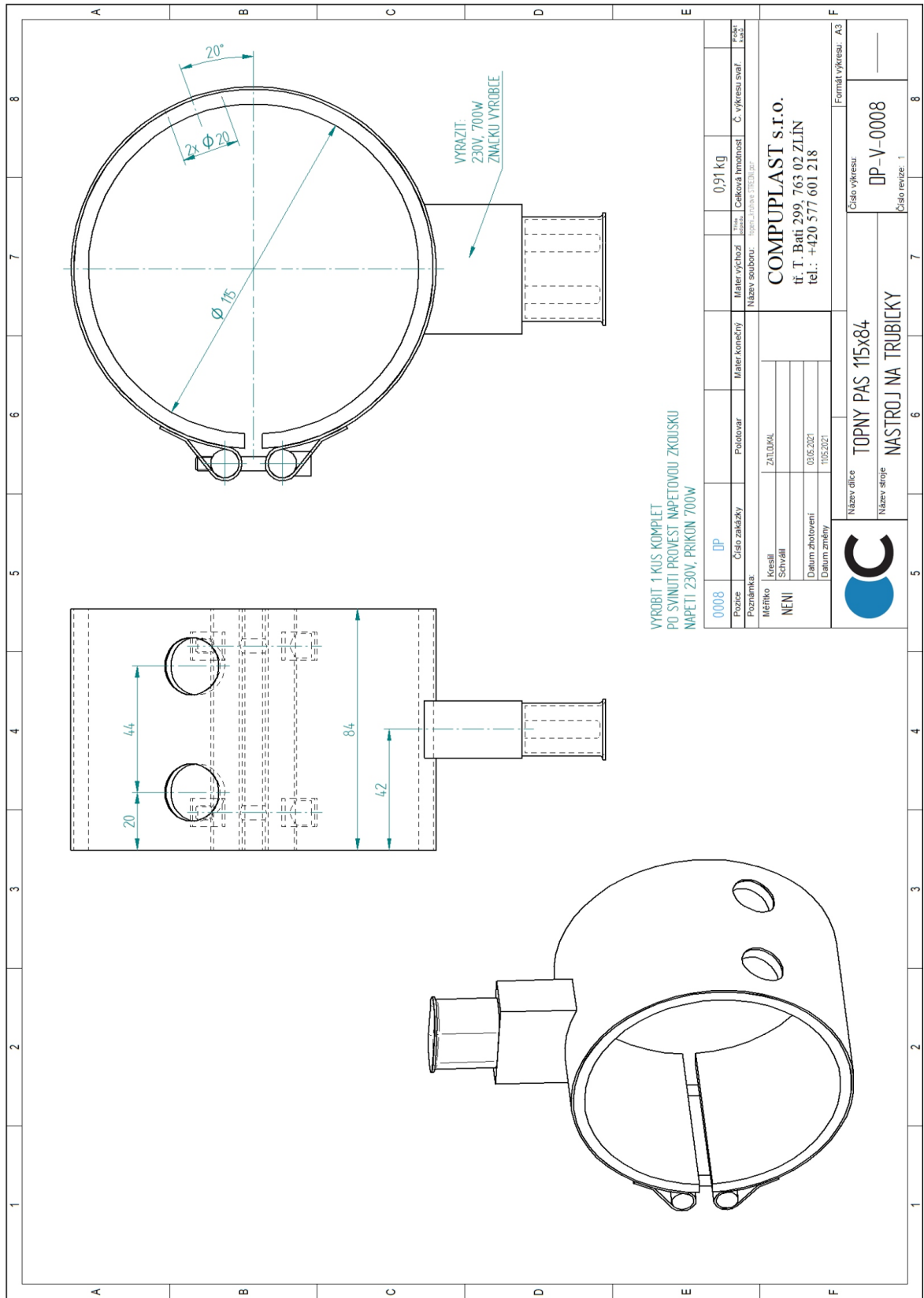
PŘÍLOHA P VIII: VÝROBNÍ VÝKRES – TRN



PŘÍLOHA P IX: VÝROBNÍ VÝKRES – SROUB STAVECI



PŘÍLOHA P X: VÝROBNÍ VÝKRES – TOPNÝ PÁS 1



PŘÍLOHA P XI: VÝROBNÍ VÝKRES – TOPNÝ PÁS 2

