

Analýza technologie Hydro-speed polishing z pohledu mechaniky tekutin

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Matěj Vejvoda

Vedoucí práce:

prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Katedra energetických zařízení





Zadání bakalářské práce

Analýza technologie Hydro-speed polishing z pohledu mechaniky tekutin

Jméno a příjmení: **Matěj Vejvoda**
Osobní číslo: S17000316
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

Jednou z nejmodernějších technologií pro výrobu přesné optiky je technologie Synchronspeed. Při této technologii je obrobek přitlačován k nástroji tlakem okolo proudící tekutinou. Pro další vývoj technologie a správné nastavení parametrů je důležité detailní pochopení technologie jak z pohledu leštění, tak z pohledu mechaniky tekutin.

Práci zpracujte s ohledem na následující body:

1. Přehled různých technologií pro přesné leštění (sférických, asférických i freeform ploch).
2. Popis technologie Synchronspeed a Hydrospeed polishing.
3. Analýza a/nebo numerická simulace proudění během technologie Jet polishing.
4. Výčet hlavních parametrů a možnost jejich kontroly a regulace.
5. Shrnutí výsledků.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

max. 20 stran
45 stran
tištěná
Čeština



Seznam odborné literatury:

[1] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.

[2] *Handbook of optical engineering*. Editor Daniel MALACARA, editor Brian J. THOMPSON. New York: Marcel Dekker, c2001. ISBN 0-8247-9960-7.

[3] DRIGGERS, Ronald G. *Encyclopedia of optical engineering*. New York: Marcel Dekker, 2003. ISBN 9780824742508.

Vedoucí práce:

prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce:

1. listopadu 2018

Předpokládaný termín odevzdání:

17. července 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

prof. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. února 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

13. července 2020

Matěj Vejvoda

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. za vstřícný přístup a rady spojené s problematikou mé bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Šimkovi za poskytování pomoci a rad. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým nejbližším, kteří při mně vždy stáli.

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na podrobnou analýzu technologie hydrospeed polishing, která byla vymyšlena jako inovativní technologie leštění optických ploch. Na začátku teoretické části je krátce vysvětlen pojem čočka. Dále jsou popsány jednotlivé technologické postupy výroby čoček. A v bližším náhledu jsou rozebrány různé druhy leštění s jejich jednotlivými benefity a důkladným zaměřením na technologii hydrospeed polishing. Práce se také věnuje stručnému seznámení s výpočty v oboru mechaniky tekutin. V následujících kapitolách je tato technologie dále teoreticky rozebírána za pomoci simulací z hlediska mechaniky tekutin. Těmito simulacemi je zkoumán vliv změny jednotlivých parametrů s důsledkem na síly působící na čočku. Simulace jsou následně doprovázeny jednoduchými výpočty z mechaniky tekutin. Závěrem je porovnána numerická i simulační část, kde jsou zanalyzovány naměřené hodnoty, což je cílem této bakalářské práce.

Klíčové slovo: hydrospeed polishing, CFD analýza, simulace, mechanika tekutin, optická plocha

Abstract

This bachelor's thesis is focused on detailed analysis of the 'hydrospeed polishing' technology, which was conceived as an innovative technology for polishing optical surfaces. The beginning of the theoretical part briefly explains the term lens, followed by the descriptions of different technological method of lens manufacturing. A closer look is taken at different methods of lens polishing and their various benefits, with special attention paid to the hydrospeed polishing technology. Part of the work is also dedicated to brief explanation of calculations regarding fluid mechanics. In the following chapters the studied is further theoretically analysed from the standpoint of fluid mechanics through simulations, used to explore the effects of changing different parameters on the forces acting upon the lens. The simulations are then followed by simple calculations of fluid mechanics. The final part compares the calculations as well as the simulation sections and analyses the measurement, which is the ultimate goal of this bachelor's work.

Key words: hydrospeed polishing, CFD analysis, simulation, fluid dynamic, optical surfaces

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů:	10
1 Úvod.....	12
2 Čočky	13
2.1 Materiály.....	14
3 Postup výroby čoček	15
3.1 Tváření.....	15
3.2 Hrubé broušení	16
3.3 Jemné broušení	17
3.3 Leštění	17
3.3.1 Manuální leštění	18
3.3.2 Pin polishing.....	19
3.3.3 Synchro-speed polishing	20
3.3.4 Technologie HSP	21
4 Metody výpočtů	22
4.1 Bernoulliho rovnice	23
4.2 CFD simulace	23
5 HSP z pohledu mechaniky tekutin	25
5.1 Výpočty proudění technologie HSP.....	25
5.2 Simulace	29
5.2.1 Geometrie	31
5.2.2 Síť	32
5.2.3 Nastavení modelu	33
5.3 Vyhodnocení simulace	34
5.3.1 Hmotnostní průtok.....	35
5.3.2 Proudění kapaliny.....	36

5.3.3 Síla na čočku	38
5.3.4 Tlak působící na spodní stranu čočky.....	40
5.3.5 Tření na spodní stranu čočky	43
5.3.6 Tlak na čočku v mezeře	46
6 Závěr	50
Seznam použité literatury	52

Seznam použitých zkratek a symbolů:

Zkratka/symbol	Název	Jednotky
x	tloušťka stěny	(m)
t	celková tloušťka čočky	(m)
y	poloměr čočky	(m)
r	rádus čočky	(m)
V_o	objem čočky	(m^3)
d	průměr čočky	(m)
s	tloušťka mezi x a vrcholem rádia	(m)
A	nadbytečná tloušťka	(m)
E_k	kinetická energie	(J)
E_p	potenciální energie	(J)
ρ	hustota kapaliny	(kg/m^3)
v	rychlost proudu	(m/s)
p	tlak	(Pa)
g	gravitační zrychlení	(m/s^2)
H	výška těžiště kapaliny	(m)
ξ_c	celkové ztráty v potrubí	(-)
Re	Reynoldsovo číslo	(-)
ν	kinematická viskozita	(m^2/s)
D	průměr potrubí	(m)
λ	součinitel třecích ztrát	(-)
L	délka potrubí	(m)
ξ	ztrátový součinitel	(-)
S	obsah potrubí	(m^2)

\dot{m}	hmotnostní průtok	(kg/s)
HSP	Hydro-Speed Polishing	
CFD	Computation Fluid Dynamic	
DNS	Direct Numerical Simulation	
LES	Large Eddy Simulation	
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations	

1 Úvod

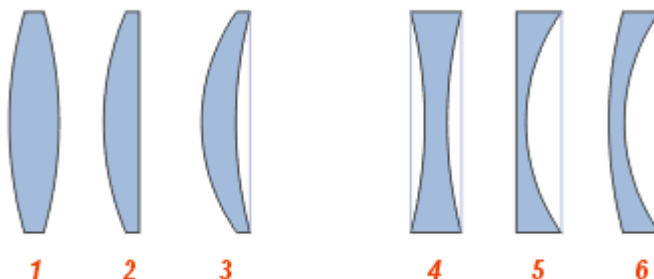
V oboru leštění optických skel existuje celá řada účinných technologií, jako je například ruční leštění, pin polishing a další. V tomto oboru však vznikla zcela unikátní speed polishing. Tato technologie je založena na principu, kdy je pomocí vodního proudu jako hlavní akční síly čočka přitlačována na lešticí kotouč, a tedy leštěna.

Proto tato technologie nabízí zajímavý úhel pohledu pro technology nejen po stránce technologické, ale také z pohledu mechaniky tekutin. V tomto oboru tak dochází ke změně druhu přitlačné síly. Z technologické stránky však zároveň vzniká celá řada neznámých, týkajících se jednotlivých sil působících na čočku, které mohou zásadně ovlivňovat proces leštění. Zároveň na toto téma neexistuje žádná veřejná publikace, která by se podrobněji věnovala těmto silám a chování při procesu leštění technologie HSP z důvodu silného konkurenčního boje, který v tomto oboru panuje.

Teoretická část práce je věnována popisu výroby optických skel, kde cílem této práce je podrobné seznámení s technologií HSP a dále pak výpočtům spojeným s danou problematikou. V praktické části je technologie HSP podrobně prozkoumána z pohledu mechaniky tekutin za pomoci simulací a výpočtů, které jsou na závěr společně vyhodnoceny a porovnány.

2 Čočky

Optika jako taková je druhý nejstarší fyzikální obor po mechanice. Samotná optika se posléze dělí na optiku paprskovou, vlnovou a kvantovou. Čočky jsou pak nástroje pro paprskovou a vlnovou optiku a pomocí jejich materiálových vlastností se využívají k lomu světla. Díky tomu můžeme pozorovat průchod paprsku, někdy i jeho spektrální rozložení. Na hranici materiálu, kde se světlo láme, můžeme pak díky zakřivení stykové plochy paprsek nasměrovat nebo rozdělit a vidět tak objekty různých velikostí a vzdáleností. Zakřivení stykové plochy následně dělíme na tři druhy konvexní (vypuklé), konkávní (vyduté) či planární (ploské). A jejich kombinací vzniká šest základních čoček, a to: bikonvexní (1), plankonvexní (2), konkávkonvexní (3), bikonkávní (4), plankonkávní (5) a konvexkonkávní (6).



Obrázek 1 Typy čoček

Abychom mohli doopravdy vidět různé velikosti i vzdálenosti, je zapotřebí měnit zakřivení konvexních i konkávních stran. Tím jsou rozuměny poloměry křivosti stran, které mají svůj střed a dotykový bod na optické ose. Posledním a zároveň nejdůležitějším bodem je ovšem ohnisko, které se nachází mezi středem křivosti a čočkou. Díky těmto důležitým bodům můžeme přesně měřit zakřivení. V samotném místě dotyku stykových ploch by ovšem čočka nabývala velmi malých hodnot a mohlo by dojít k porušení materiálu, proto se k oddělení stykových ploch používá oddělující tloušťka. Tato tloušťka stěny se následně dosadí do vzorce (1), pomocí kterého se vypočítá celková tloušťka čočky.

$$x \approx t - \left(\frac{y^2}{2r_1} + \frac{y^2}{2r_2} \right) \quad (1)$$

Kde značí:	x	-	tloušťka stěny (m),
	t	-	celková tloušťka čočky (m)
	y	-	poloměr čočky (m)
	r	-	rádus čočky (m)

2.1 Materiály

Jak už jsme zmínili samotným principem čočky je, že materiál, z něhož je čočka vyrobena, musí být čirý a musí mít určitou přesně definovanou optickou hustotu. Vlastnosti materiálu tak musí být převážně homogenní a izotropní. V průmyslu je majoritně používaným materiálem sklo, které tyto vlastnosti splňuje. Ovšem už jen samotný popis složení tohoto materiálu by byl velmi náročný, neboť v samotném sklu nacházíme v různých poměrech spoustu příměsí, které mohou zásadně negativně ovlivňovat jeho vlastnosti. K tomuto však nedochází díky vysoké preciznosti výroby. Samozřejmě i obráceně pak můžeme cíleným přidáváním různých příměsí docílit, že je čočka či sklo použito na některé specifické účely nebo zaměření. Sklo se ovšem nevyrábí na zakázku. Designér vybírá z již nabízených skel. Některá jsou ale tak netradiční, že se pro celý svět vyrábí jen jednou až dvakrát ročně. Tímto popisem by nám mělo být jasné, že už samotné základní rozdělení typu skla je velmi široké a komplikované. Nehledě na další druhy materiálů, jako jsou pak krystaly typu sulfid zinečnatý, selenid zinečnatý, fluorid vápenatý a další. Dále nízké roztažné materiály, což mohou být například tavený křemík nebo tavený křemen, velmi široká škála plastů, také optická keramika typu Zerodur nebo jiné různé materiály.

3 Postup výroby čoček

Technologický postup výroby čoček je velmi rozmanitý. Technologie samotná je přímo závislá na materiálu a na jeho fyzikálních a chemických vlastnostech.

Jak už bylo řečeno, majoritním materiálem zastoupeným ve výrobě čoček je sklo. Proto budeme rozebírat a popisovat veškerý technologický postup vztahující se k tomuto materiálu bez jakýchkoliv specifických vlastností.

3.1 Tváření

Samotná výroba skelných čoček začíná v momentě, kdy surový oxid křemičitý s příměsovými prvky je nataven na teplotu okolo 1500 °C. Z pece je potom tavenina vytlačována do táhlých válců s daným průměrem. Tento válec se následně stříhá na menší kousky. Válce, které byly ustrženy, dáváme do lisu, který má předem daný tvar. Proto musí splňovat zákon zachování objemu. [1]

$$V_o = \pi \left[s_1 \left(r_1 - \frac{s_1}{3} \right) + s_2 (r_2 - s_2) + \frac{d^2}{4} (x) \right] \quad (2)$$

Kde značí: V_o - objem čočky (m³)
 d - průměr čočky (m)
 s - tloušťka mezi x a vrcholem rádia (m)

Aby nedošlo k žádnému poškození skla, musí být zahřáté. Toho docílíme buď samotným tavením, kde díky rychlosti výroby nestihne dostatečně sklo zchladnout, nebo jeho opětovným přehřátím. Čočka samotná musí být vylišována s nadbytečnou tloušťkou, abychom mohli použít další postupy, které používají obráběcí technologie pro získání cílového tvaru. Tuto tloušťku získáme pomocí vzorce, kdy:

$$A = 1,6 + \frac{d}{100} \quad (3)$$

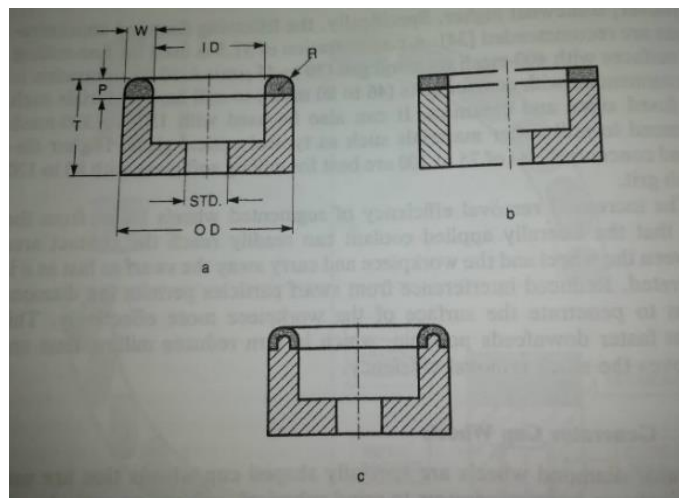
Kde: A - nadbytečná tloušťka (m)

Druhou alternativou výroby čočky, která se používá častěji, je vyformování nataveného skla do kvádru, který jako v předešlém případě rozřežeme na menší kvádry, které vznikají opět s přidanou tloušťkou čočky a následně je možné přejít k hrubému broušení.[1]

3.2 Hrubé broušení

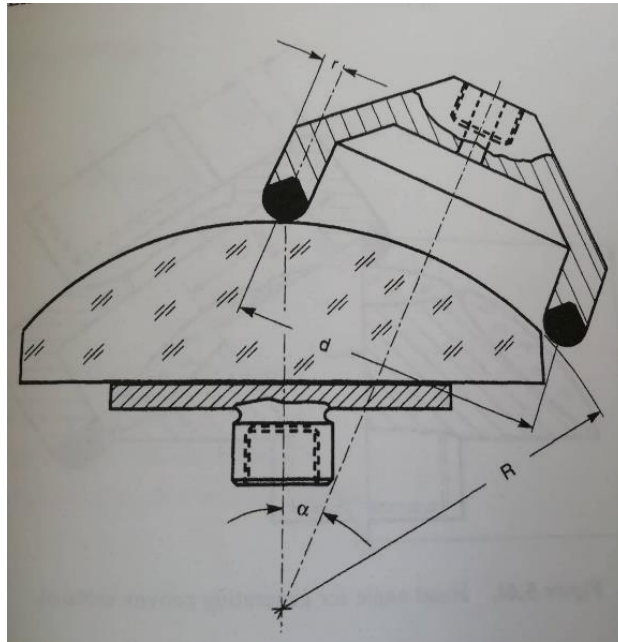
V momentě, kdy je polotovár nebo hrubá čočka připravena, je na pořadí frézování nebo také hrubé broušení. Sférické povrchy jsou frézovány nebo přesněji generovány na speciálním stroji zvaném generátor tvaru. [1]

Jako materiál určený k třískovým technologiím se používá díky své tvrdosti a přesnosti technický diamant. Nástroje, které jsou určeny k frézování, mají podobu dutého válce bez jedné podstavy. Hrana pláště, jež je bez podstavy, je pak následně formována do různých tvarů, jak můžeme vidět na obrázku 2, do zakřivených nebo rovných ploch. Hrana je poté položena na čočku a frézuje ji, aby mohl vzniknout již zmíněný finální rádius.



Obrázek 2 Nástroje určené k hrubému broušení [1]

Hlavním aspektem hrubého broušení je usazení nástroje na čočce, neboť právě díky tomu vzniká finální rádius. Zásadním parametrem je, zda se jedná o konkávní, konvexní nebo plan čočku. V případě plan čočky je důležitá pouze rovnoběžnost osy nástroje s optickou osou čočky. U konkávních a konvexních čoček je zapotřebí dvou specifických podmínek. Zaprvé osa nástroje s optickou osou musí být různoběžná. Druhá podmínka se týká průměru nástroje. Pro vytváření konvexních čoček je zapotřebí, aby průměr nástroje, byl větší, než je poloměr čočky. A naopak u konkávních musí být průměr menší než poloměr čočky.[4]



Obrázek 3 Hrubé broušení konvexní strany [1]

V okamžiku, kdy jsou všechny parametry určeny, začíná hrubé broušení. Vřeteno nástroje se otáčí vysokou rychlostí, aby se dosáhlo potřebné řezné rychlosti, zatímco vřeteno obrobku se otáčí mnohem pomaleji. Pomalým přiváděním obrobku do rotujícího diamantového kola se vytváří optický kulový povrch. [1]

3.3 Jemné broušení

Jemné broušení je proces tvarování optických materiálů s volným nebo volnými brusivky. Brusný prášek se smísí s vodou a následně se používá s brusným nástrojem, který je nejčastěji vyroben z litiny. V současné době se v sériové výrobě technologie broušení už tolik nepoužívá díky vysoké přesnosti hrubého broušení. U prototypových čoček a maloobjemové výroby se však stále používá hojně.[1]

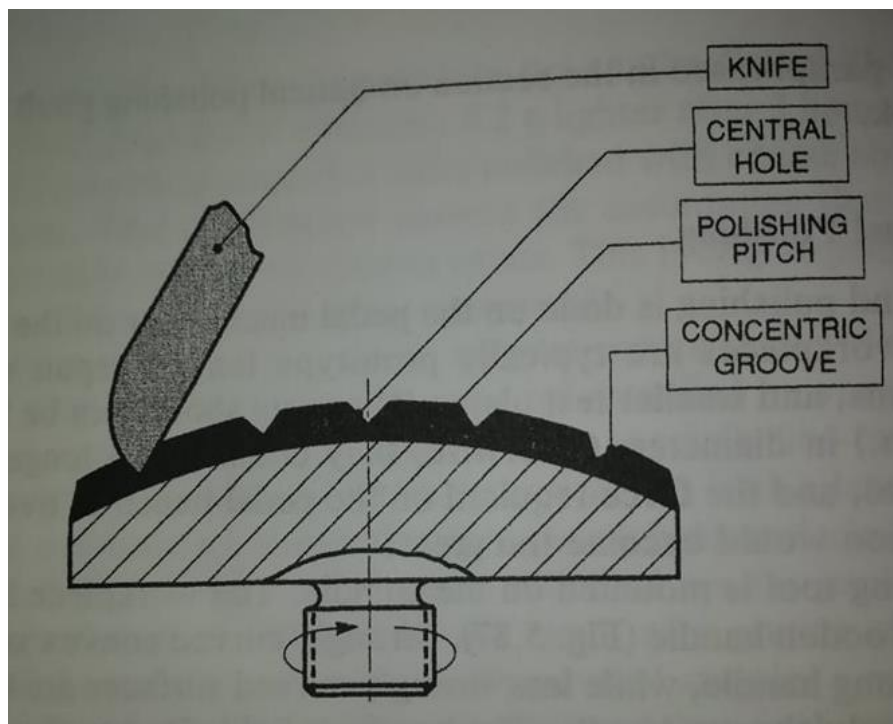
3.3 Leštění

Leštění je dokončovací technologie při výrobě čoček. Je používána pro odstranění zbývajících vad, ale především k vyleštění optických stran pro dokonalou průhlednost. Proto je pro nás leštění při výrobě optických čoček klíčovou technologií. Kromě technologie HSP je i mnoho jiných technologií, které se v současné době hojně používají. Proto z celé řady technologií zde budeme popisovat pouze čtyři vybrané, mezi které patří manuální leštění, pin polishing, sychrospeed a HSP.

3.3.1 Manuální leštění

Manuální nebo také ruční leštění je základní metoda leštění. Ruční leštění by se nemělo používat na příliš malé čočky. Díky malé ploše může docházet k většímu přtlaku a poškození čočky člověkem. Proto se k manuálnímu leštění čoček používají čočky o průměru větším než 60 mm, kde se síla člověka dá lépe rozložit, nicméně záleží na schopnostech a zkušenostech člověka. Často tedy člověk dokáže vyleštit i malou čočku lépe nežli stroj. Jedna z možností uchycení čočky je přilepit na neleštěné straně tyč či rukojeť a pomocí pojidel a ochranných nánosných barev omezit poškození této strany. Délka rukojeti se následně mění podle úhlu zakřivení, kdy se pro větší zakřivení používají delší rukojeti a naopak pro menší kratší tyče.

Pro manuální leštění je také důležité, jak velký použijeme lešticí kotouč. Při ručním leštění by měla velikost kotouče přibližně odpovídat velikosti čočky. V případě silně zakřivených čoček a čoček s větším poloměrem by měl být kotouč přibližně o čtvrtinu větší. Vzhledem k velmi časté možnosti, že kotouč nebude odpovídat finálnímu rádiu, se do nástroje vyřezávají prstě nožem, primárně určené k přívodu leštiva. Díky kroužkům řezaným poblíž středu se leští hlavně vnější část čočky. Pokud jsou řezy na vnější části čočky, lešticí kotouč leští hlavně střed. Proto je možné částečně opravovat rádius a využívat ne zcela ideálně odpovídající ruční nástroje.[1]



Obrázek 4 Nařezané prstě ve smole s různým průměrem [1]

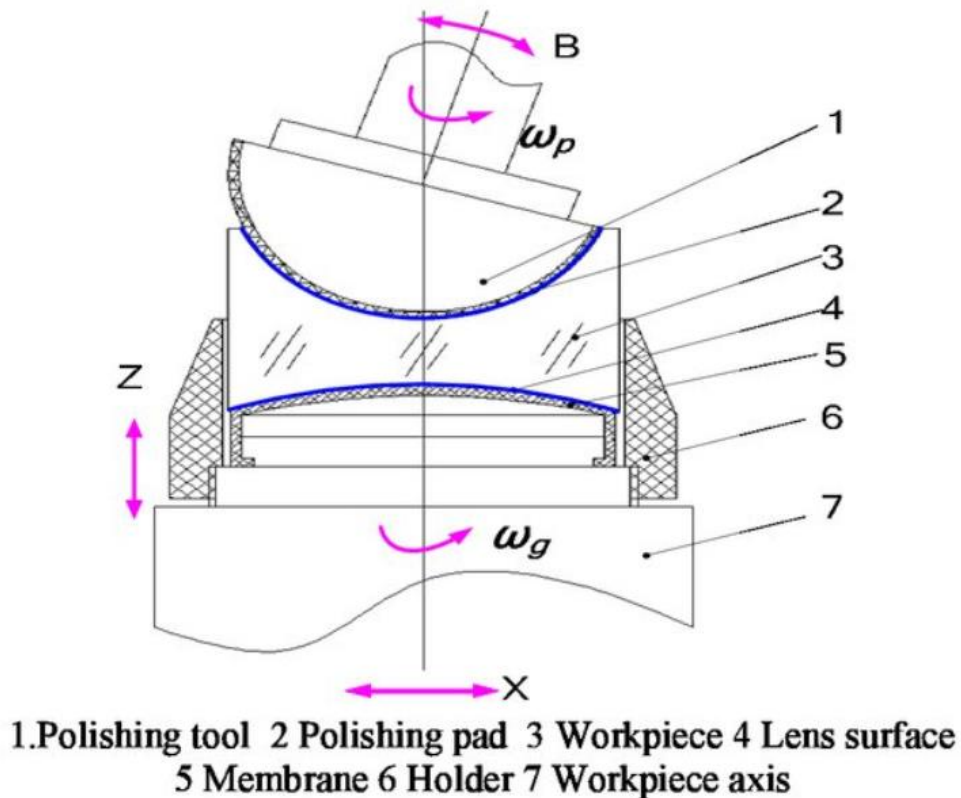
V častější podobě je manuální leštění v podobě, kdy tlak na čočku obstarává stroj nikoliv člověk. Člověk nastaví potřebný tlak a následně ovládá stroj, který čočku leští. Tato technologie se často používá v sériové výrobě, neboť manuální leštění je velmi přesné a používá se jak k opravám, tak i k případnému získávání finálních rozměrů.

3.3.2 Pin polishing

Základním principem technologie pin polishing je stejně jako při manuálním leštění postup, kdy je neleštěná strana natřena ochrannou barvou a posléze nalepena na držák. V případě této technologie je to nutností. Čočka je nalepena na držák neboli kolík (pin), který je druhým koncem ukotven do nástroje za pomoci membrány, která je používána k přichycení pinu. Aby membrána byla přichycení schopna, používá se přivedení vzduchu z druhé strany membrány. Po ukotvení je čočka přitlačena k rotujícímu lešticímu kotouči a sama je uvedena do rotace.

Výhoda této technologie spočívá v univerzálnosti. S pomocí pinu můžeme leštit všechny čočky bez ohledu na průměr nebo rádius. Tato technologie leštění čoček se většinou nehodí pro větší sériovou výrobu, neboť je velmi časově náročná na přípravu v podobě nanášení ochranných barev a lepení na pin, kdy je zapotřebí vše náležitě nechat zaschnout. V současné době je tato technologie nahrazována technologiemi synchrospeed a HSP.

3.3.3 Synchro-speed polishing



Obrázek 5 Technologie synchro-speed polishing [6]

Technologie synchro-speed polishing je technologie, která byla vytvořena s myšlenkou, aby se minimalizovalo poškození neleštěné strany čočky díky nanášení ochranných barev a maximalizoval se uspořené čas pro tuto výrobu.

Čočka je vsazena do kalíšku, jímž je i ohraničena. Ve spodní části kalíšku (držáku) je membrána a z druhé strany je vzdušná tryska. Průběh této technologie spočívá na principu, kdy se tryskou přivádí proud vzduchu, což má za následek nafouknutí membrány, která začne tlačit na čočku a ta se začne leštit o leštící kotouč.

Vzhledem k tomu, že před spuštěním této technologie nepůsobí žádné síly kromě gravitace, musí být tato technologie použita tak, aby byla čočka vsazena do držáku ve vodorovné poloze, aby se zamezilo její vypadnutí. Proto je také zapotřebí správná velikost kalíšku, která se nedá měnit.

Jednou z nevýhod technologie synchro-speed je tedy potřeba vysokého počtu kalíšků na různé velikosti čoček. Velkou výhodou této technologie je absence použití

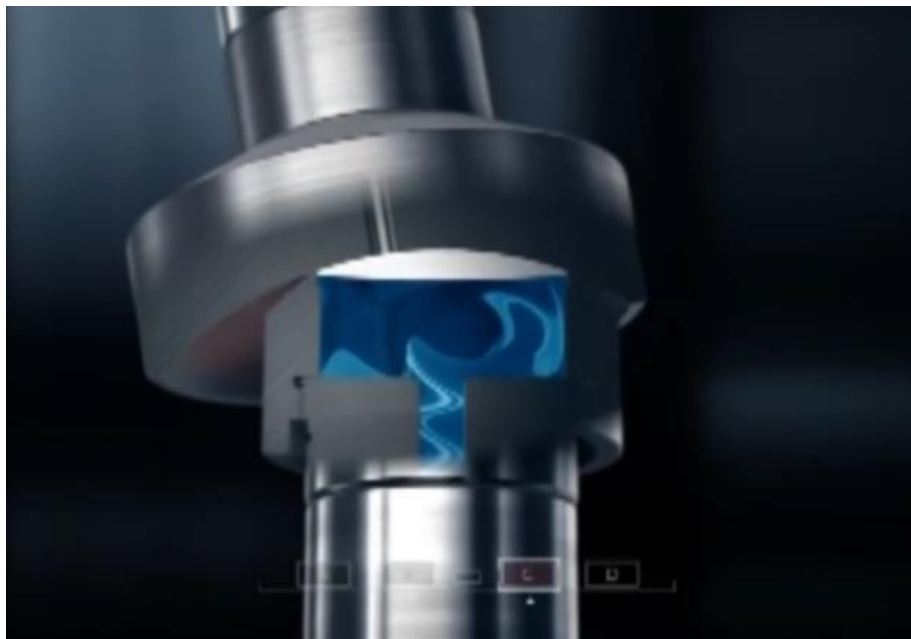
ochranných barev neleštěné strany před vyleštěním, pokud je neleštěná strana už vyleštěna je samozřejmě nutné nanést ochranný lak pro ochranu této strany. Proto není potřeba takového množství času jako při technologii pin polishing. Výhodou této technologie je také rovnoměrně rozložený tlak působící na čočku.

Hlavní nevýhodou této technologie je, že vzhledem k absenci ukotvení čočky a vnějších sil kromě síly lešticího kotouče, je tato technologie využívána převážně na čočky s malým průměrem. Pro čočky s větším průměrem se používá převážně technologie HSP.

3.3.4 Technologie HSP

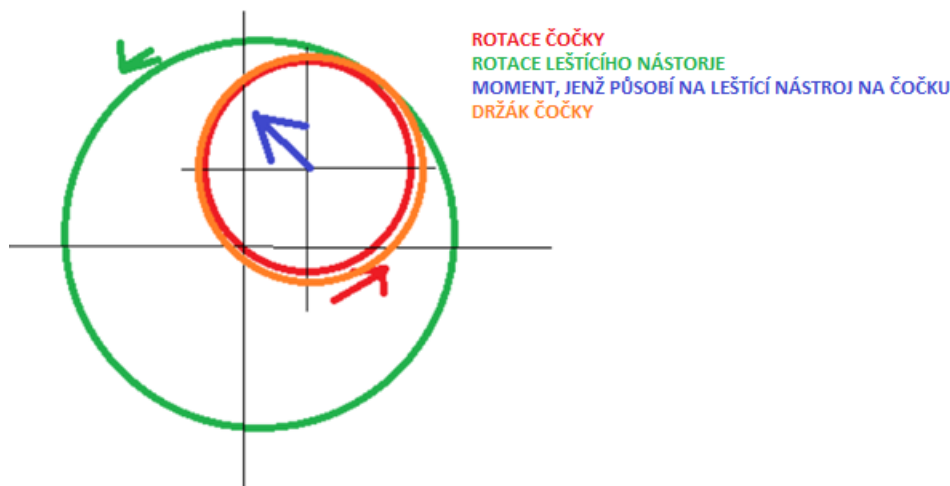
Technologie synchro-speed a HSP se principem velmi podobají.

HSP je speciální lešticí technologie patentovaná firmou Optotech. Tato technologie je založena na principu, kdy je čočka za pomoci vodního proudu tlačena na lešticí kotouč. Tuto technologii bychom mohli popsat tak, že je čočka vsazena na dno kalíšku a ze všech stran ohraničena držákem. Následně se spustí tryska ze dna kalíšku, která přitlačí čočku na lešticí kotouč, který je v rotaci a čočku začne leštit. Veškerý prostor mezi tryskou a čočkou se vyplní lešticí kapalinou.



Obrázek 6 Technologie HSP v průřezu [3]

Jelikož je tedy čočka čistě usazena v lešticí kapalině a přitlačena na lešticí kotouč, sama začne rotovat. K leštění pak dochází, když je kotouč a čočka v nesoustředné kružnici a vzniká tak moment, jenž působí na čočku viz. obrázek 6.



Obrázek 7 Vzájemné působení rotace čočky a leštícího nástroje

Tato technologie se používá převážně na leštění konvexní a plan strany, velmi výjimečně konkávní strany. Kalíšek je totiž převážně vzhůru nohama a čočka držena vakuem, dokud se proces nespustí.

Technologie HSP je používána pro její benefity. Neleštěná strana se nemusí upravovat, potírat ochrannou barvou ani nijak ošetřovat, přesto nedochází k jejímu poškození. Není potřeba prodlužovat dobu výroby zbytečným nanášením ochranných barev na neleštěnou plochu a jejich zasycháním, pokud není jako v případě synchro-speed neleštěná strana již vyleštěná. Zároveň je obtékáním kapaliny kolem čočky zlepšen přestup tepla a čočka je tedy lépe chlazená. Dále je zajištěno stejné rozložení tlaku po celém povrchu a následná minimalizace deformací leštěné strany.

Jednou z hlavních nevýhod této technologie stejně jako u technologie synchro-speed je, že je zapotřebí velké množství kalíšků pro různé průměry čočky. Občasným problémem této technologie je rozkomíhání čočky v držáku, kdy dochází k poškození často až rozebrání obvodových stěn. Proto hlavními parametry ovlivňujícími tuto technologii jsou mezera mezi stěnou držáku a stěnou čočky, hloubka mezi čočkou a dnem držáku.

4 Metody výpočtů

Tato kapitola je zaměřena na vysvětlení a pochopení principu fungování numerických a simulačních metod, které dále byly použity při analýze technologie HSP. Pro srovnání jsou simulace přesnější než metoda numerické, která je ovšem méně nákladná, jak finančně tak i časově.

4.1 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je rovnice potřebná při výpočtu úloh v oboru mechaniky tekutin. Samotná rovnice je pak odvozena z integrací bilance hybnosti, a respektuje tak zákon zachování energie. Pro proudění ideální kapaliny ve vodorovném potrubí je tedy zapotřebí pouze znalost kinetické energie. Při obecné Bernoulliho rovnice je zapotřebí do rovnice také dosadit potenciální energii.[4] Poté získáme tvar:

$$E_k + E_p = konst., \quad (4)$$

kde: E_k - kinetická energie (J)

E_p - potenciální energie (J)

Tento tvar dále můžeme rozepsat jako:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p + \rho g H = konst., \quad (5)$$

kde: ρ - hustota kapaliny (kg/m^3)

v - rychlost proudu (m/s)

p - tlak (Pa)

g - gravitační zrychlení (m/s^2)

H - výška těžiště kapaliny (m)

Tyto rovnice simulují pouze chování ideální kapaliny. V obecném případě však dochází k různým ztrátám v závislosti na rychlosti kapaliny, změny tvaru potrubí atd. Tyto ztráty se následně přičítají do Bernoulliho rovnice jako celkové ztráty se symbolem ξ_c .

4.2 CFD simulace

CFD (computation fluid dynamic) je vědní obor zabývající se numerickým řešením proudění tekutin. Toto odvětví se rozvíjelo společně s rozvojem výpočetní techniky. Ze začátku proto šlo modelovat modely pouze pro laminární proudění. Postupem času však bylo možné pomocí vyšší kapacity počítačů také modelovat turbulentní proudění. Výpočet modelu je primárně vytvořen z Navier-Stokesových rovnic a rovnic kontinuity, v některých případech i z rovnic odvozených ze zákonů zachování.[2]

Pro laminární i turbulentní proudění se využívá metoda DNS (Direct Numerical Simulation). Nevýhodou této metody je, že jemnost sítě je ovlivněna velikostí Reynoldsova čísla, čím větší Reynoldsovo číslo je, tím větší jemnost sítě je zapotřebí.[2]

Největší procento řešení inženýrských problémů se však řeší pomocí metody RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations), která funguje na principu středování hodnot. Samotná metoda dále využívá Boussinesquovu hypotézu a Reynoldsova napětí. Metoda RANS je založena na vyřešení Reynoldsových rovnic, kde Reynoldsovy rovnice jsou středované rovnice kontinuity, a Navier-Stokesových rovnic. Pro výpočet nejběžnějších problémů se používá dvourovnicový model Boussinesquovy hypotézy. Nejběžněji se pak používá model $k-\epsilon$. Nevýhodou toho modelu je, že je použitelný pouze v dostatečné vzdálenosti od stěny. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno několik změn. Asi nejpoužívanějším alternativním model je model $k-\omega$, který odstraňuje problém vznikající u stěny s modelem $k-\epsilon$. Bližší podrobnosti ke kapitole naleznete v [2].

Metodou, která se používá pro turbulentní proudění je model LES (Large Eddy Simulation). Kde se problém rozdělí na dvě části, menší a větší víry, které však nemohou být řešeny zvlášť.[2]

5 HSP z pohledu mechaniky tekutin

Předchozí kapitola je věnována popisu technologie HSP a jejímu principu fungování.

V této kapitole se na tuto technologii zaměříme, a to zejména z oblasti mechaniky tekutin. Pomocí výpočetního a simulačního aparátu si důkladněji prověříme chování leštící kapaliny, zejména pak chování blízko čočky, a síly, kterými působí leštící kapalina na spodek a boční stranu čočky.

Veškeré chování a síly kapaliny jsou ovlivněny velikostí prostoru mezi kalíškem a čočkou jak z boční strany (mezera), tak i ze spodní strany (hloubka). Abychom zjistili, jak velký mají tyto parametry vliv, budeme proto chování kapaliny zkoumat změnou vždy jednoho parametru. Také jsme se zmínili, že technologie HSP se využívá hlavně pro plan a konvexní čočky. Nicméně tato skutečnost platí pouze pro leštěnou stranu čočky. Neleštěná strana žádnou podmínku nemá. Tedy dalším parametrem našeho zkoumání bude tvar čočky. A v neposlední řadě se zaměříme na rozložení sil při změně vstupního tlaku.

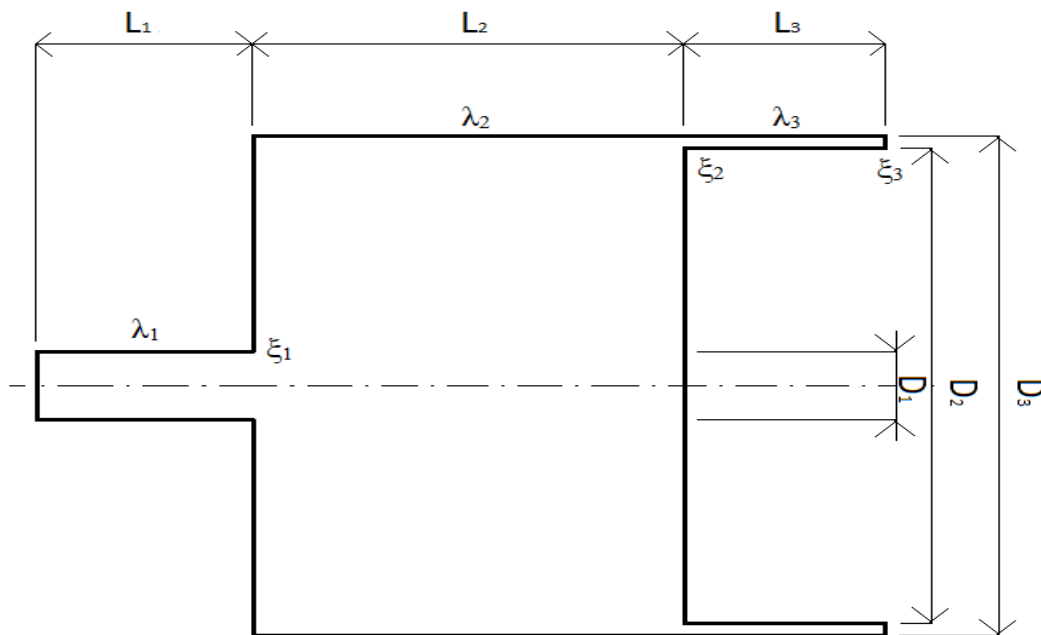
Pro numerickou a simulační část práce musí být všechny tyto proměnné přesně definovány, tj. mezera, hloubka, tvar a vstupní tlak. Proto jsme si stanovili, že mezera bude mít rozměry 0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, kdy hodnota je vzdálenost mezi stranou čočky a stranou kalíšku. Mezera je pak měřena od dna kalíšku po spodek čočky v parametrech 20 mm, 30 mm, 40 mm, 45 mm a 50 mm. Tvar čočky je pochopitelně rozdělený na plan, konvexní a konkávní, a to s poloměrem zakřivení 75 mm pro konkávní a 175 mm pro konvexní. Vstupní tlak jako poslední hodnota je pak rozdělen na tlak 80 kPa, 100 kPa, 200 kPa a 300 kPa.

Při definování proměnných jsme se zmínili, že pouze jeden z těchto parametrů bude měněn. Proto je zapotřebí zvolit referenční stav. Z daných parametrů jsme se rozhodli, že pro tento stav využijeme hodnot, kdy mezera je 0,15 mm, hloubka 40 mm, vstupní tlak 100 kPa a bude se jednat o plan čočku z neleštěné strany.

5.1 Výpočty proudění technologie HSP

Před využitím výpočtů v oboru mechaniky tekutin je zapotřebí si definovat jednotlivé parametry a podmínky. Model se počítá v 3D a z důvodů ulehčení předpokládáme, že nedochází k žádné rotaci čočky. Pro definování použijeme obrázek 7,

na kterém je náčrt technologie HSP s vypsányými rozměry. Toto použijeme jako výchozí stav. Z obrázku je patrné, že můžeme rozdělit model na tři části výpočtu: chování kapaliny v trysce, v kalíšku a v mezeře. Kde tryska má rozměry $D_1 = 6$ mm, $L_1 = 10$ mm, rozměr v kalíšku má rozměry $D_2 = 80$ mm a $L_2 = 40$ mm. Poslední rozměr je mezera, kde $D_3 = 79,7$ mm a $L_3 = 10$ mm. V případě mezery používáme průměr čocky, který se při výpočtech odečítá od průměru D_2 . Při změně tvaru modelu také dochází k místním ztrátám. Tyto ztráty jsme si definovali velikostně jako $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = 0,5$ a $\xi_3 = 1,1$. Poté jsme mohli přejít k výpočtu.



Obrázek 8 Technologie HSP s výpočetními parametry

Pomocí Bernoulliho rovnice v obecném tvaru získáme rovnici

$$\frac{p_1}{\rho} + gH_1 + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_3}{\rho} + gH_2 + \frac{v_3^2}{2} + \xi_c \quad (6)$$

Kde: ξ_c - celkové ztráty v potrubí

Po srovnání obrázku 7 a Bernoulliho rovnice v obecném tvaru můžeme říci, že výška v případě HSP nehraje žádnou roli, tudíž výšky H_1 , H_2 je rovna 0, také tlak p_3 , který je na výstupu technologie je roven 0. Poté můžeme vyjádřit tlak p_1 jako:

$$p_1 = \rho \left(\frac{v_3^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} + \xi_c \right) \quad (7)$$

Po vyjádření rovnice (7) je zapotřebí, abychom si definovali ztrátový člen. K tomu je nutné si v jednotlivých úsecích vypočítat Reynoldsovo číslo (Re), díky kterému zjistíme, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění. Pakliže $Re > 5000$ až 1000 , jedná se o turbulentní proudění a v opačném případě, kdy $Re < 2300$, jedná se o laminární a proudění rozdíl mezi nimi je se pak nazývá přechodové proudění.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (8)$$

Kde:

Re	-	Reynoldsovo číslo (-)
ν	-	kinematická viskozita (m^2/s)
D	-	průměr potrubí (m)

Po dosazení do rovnice nám vychází, že v prvním úseku dochází k turbulentnímu proudění a v druhém úseku dochází k přechodovému proudění a v úseku mezery dochází k laminárnímu proudění. Poté z výsledku Re je možné dopočítat součinitel třecích ztrát, který se dělí pro laminární proudění rovnice 9 a turbulentní proudění rovnice 10.

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad \lambda = \frac{0,0812}{Re^{0,125} \cdot D^{0,11}} \quad (9, 10)$$

Kde:

λ	-	součinitel třecích ztrát (-)
-----------	---	------------------------------

Po dopočtení součinitele třecích ztrát můžeme dosadit do vzorce celkových ztrát vzorec 11. Spolu s hodnotami pro místní ztráty v jednotlivých úsecích.

$$\xi_c = \frac{v_1^2}{2} \left(\lambda_1 \frac{L_1}{D_1} + \xi_1 \right) + \frac{v_2^2}{2} \left[\lambda_2 \frac{L_2}{D_2} + \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2 \right] + \frac{v_3^2}{2} \left(\lambda_2 \frac{L_3}{D_3} + \xi_2 + \xi_3 \right) \quad (11)$$

Kde:

L	-	délka potrubí (m)
ξ	-	ztrátový součinitel (-)
S	-	obsah potrubí (m^2)

Poté jsme dosadili celkové ztráty do rovnice pro zjištění tlaku p_1 . Tento tlak ovšem již známe a neznámou je vstupní rychlost. V tomto případě vede řešení na soustavu

diferenciálních rovnic. Abychom se tohoto složitějšího řešení vyvarovali, zvolíme takové v_1 , aby vstupní tlak odpovídal 100 kPa.

Tabulka 1 Velikost vstupního tlaku po dosažení rychlosti v závislosti na změně mezery

	ref. stav					jednotky
hloubka	40					(mm)
mezera	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	
rychlost v_1	5,0236	7,922	9,752	10,353	11,257	(m/s)
tlak p_1	99997,2	99996,2	99994,3	99908,1	99849,9	(Pa)

V tabulkách 1, 2 je patrné, že abychom dostali přesnou hodnotu 100 kPa, bylo by zapotřebí vstupní rychlosti s vysokým číselným rozvojem. Proto jsme zvolili vstupní rychlosti, které nepřesahují ve většině případů rozdíl větší než 1 % od referenčního vstupního tlaku.

Tabulka 2 Velikost vstupního tlaku po dosažení rychlosti v závislosti na vstupním tlaku

	ref. stav				jednotky
hloubka	40				(mm)
mezera	0,15				
tlak	80	100	200	300	(kPa)
rychlost v_1	6,9866	7,922	10,205	12,419	(m/s)
tlak p_1	79999,4	99996,2	204439,5	300013	(Pa)

Zjišťování vstupní rychlosti jsme provedli pouze pro změnu mezery a vstupního tlaku. V případě hloubky a tvaru je tato hodnota pro výpočet neměnná, tudíž rychlost při změně hloubky a tvaru odpovídá rychlosti 7,922 m/s.

Po získání vstupní rychlosti je možné vypočítat hmotnostní průtok pomocí vzorce:

$$\dot{m} = V \cdot \rho \cdot v \quad (12)$$

Kde: \dot{m} - hmotnostní průtok (kg/s)

Tabulka 3 Velikost hmotnostního průtoku při změně mezery

	ref. stav					jednotky
hloubka	40					(mm)
mezera	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	
průtok	0,14175	0,22354	0,27518	0,2921	0,317647	(kg/s)

Po výpočtu průtoku závislém na mezeře je vidět, že s rostoucí mezerou roste i velikost průtoku. V případě změny hloubky můžeme tvrdit, že při neměnné vstupní rychlosti se nemění ani průtok, který pak odpovídá referenční hodnotě 0,22354 kg/s.

Tabulka 4 Velikost hmotnostního průtoku při změně vstupního tlaku

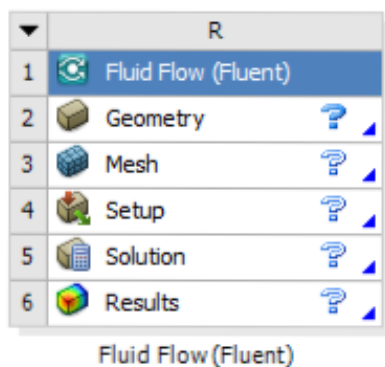
	ref. stav				jednotky
hloubka	40				(mm)
mezera	0,15				
tlak	80	100	200	300	(kPa)
průtok	0,1971	0,22354	0,2879	0,3504	(kg/s)

V případě změny vstupního tlaku pozorujeme, že se vzrůstajícím tlakem také vzrůstá i hmotnostní průtok. Velikost průtoku pro změnu tvaru je stejná v každém tvaru jako referenční stav tj. 0,22354 kg/s.

Pro vypočítaný průtok při různých podmínkách můžeme tvrdit, že průtok se mění pouze pro případy změny mezery a vstupního tlaku. V případě změny hloubky a tvaru nedochází ke změně průtoku, protože v případě Bernoulliho rovnice změna hloubky má zanedbatelný vliv. Zatímco změna tvaru se v rovnici neprojevuje vůbec. Proto pro oba proměnné parametry platí, že jejich průtok odpovídá stejnému průtoku jako průtok v referenčním stavu tj. 0,22354 kg/s.

5.2 Simulace

Program, který jsme použili pro simulaci je Ansys: Fluid Flow (Fluent) verze: R18.1 academic. Tento program jsme použili hlavně k modelování proudění kapalin a pracovali jsme s ním za pomoci odborných rad.



Obrázek 9 Vzhled modelovacích programů

První dva programy na obrázku 8 můžeme označit jako modelovací, kde model dostává tvar. Ve třetím pak dochází k určení veškerých podmínek. Předposlední a poslední program slouží ke kontrole vymodelovaných a vypočtených dat a poslední program slouží k zhodnocení nebo extrapolaci všech dat k dalšímu zpracování mimo program ANSYS.

Zásadně je pro tento program důležitou otázkou rozbor technologie HSP. Zda je možné náš tvar zjednodušit v náš prospěch. Po důkladném uvážení jsme došli k rozhodnutí, že použijeme 2D model, který musíme definovat ještě před spuštěním, a zvolili jsme osově symetrický model. Dalším zjednodušením, které můžeme provést je fakt, že díky specifikaci naší práce pouze na proudění, není třeba výpočtů na výměnu energie. Toho využijeme v definici podmínek modelu. Stejně tak jako gravitace, která má díky tlaku kapaliny z jedné strany a síly lešticího kotouče z druhé strany zanedbatelný vliv.

Tabulka 5 souhrn parametrů použitých při zjednodušení simulace

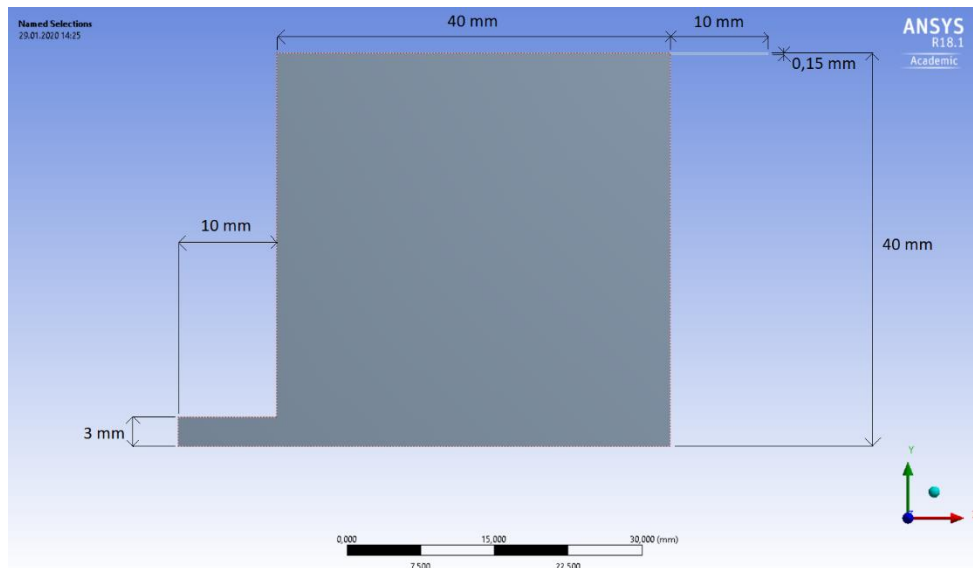
Zvolené parametry pro zjednodušení simulace
2D model
Osově symetrický
Bez gravitace
Bez vlivu teploty
Nestlačitelné proudění

5.2.1 Geometrie

Jak už jsme uvedli v minulé kapitole, předtím než spustíme geometrii, je zapotřebí v nastavení definovat, že se bude jednat o 2D model. Po otevření je však možné modelovat na všech rovinách. V tomto programu je pro 2D definována pouze rovina XY, kterou je tak nutné nastavit.

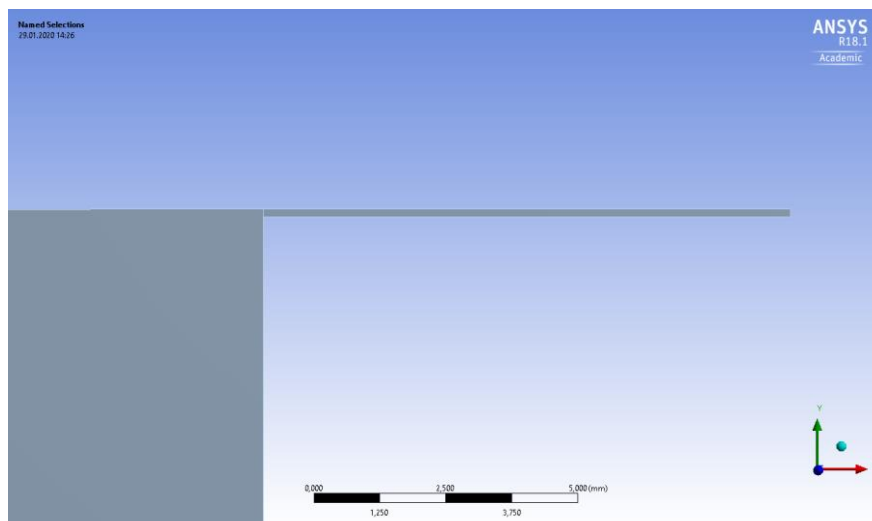
Dále víme, že model je osově symetrický. Program ANSYS tuto podmínku splňuje pouze v případě, že osa symetrie je na souřadnicích $Y = 0$. Díky tomu je náš model nucen být ve svislé poloze.

Po ukončení je vtok vmodelován vlevo a čochka vpravo na obrázku 9, kde vtoková tryska má průměr 6 mm, délku 10 mm. Výtoková mezera má stejnou délku jako tryska. Celkový průměr kalíšku je pak 80 mm.



Obrázek 10 Geometrie technologie HSP v programu ANSYS

Mezera, kterou jsme vmodelovali, byla v následujícím programu moc malá a vytvářela problémy se sítí. Proto jsme celý model rozdělili mezi spodní hranou čochky a stranou kalíšku, čímž nám vznikly v tomto programu dva nezávislé objekty se spojenou jednou stranou, jak můžeme vidět na obrázku 10.

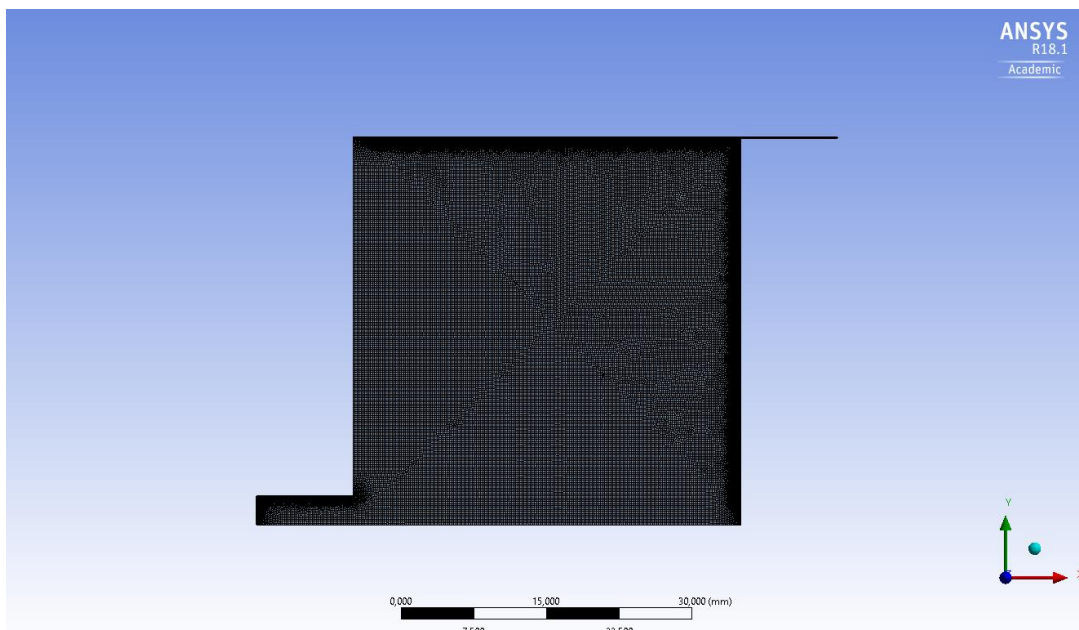


Obrázek 11 Pohled na rozdělení geometrie na dva oddělné modely

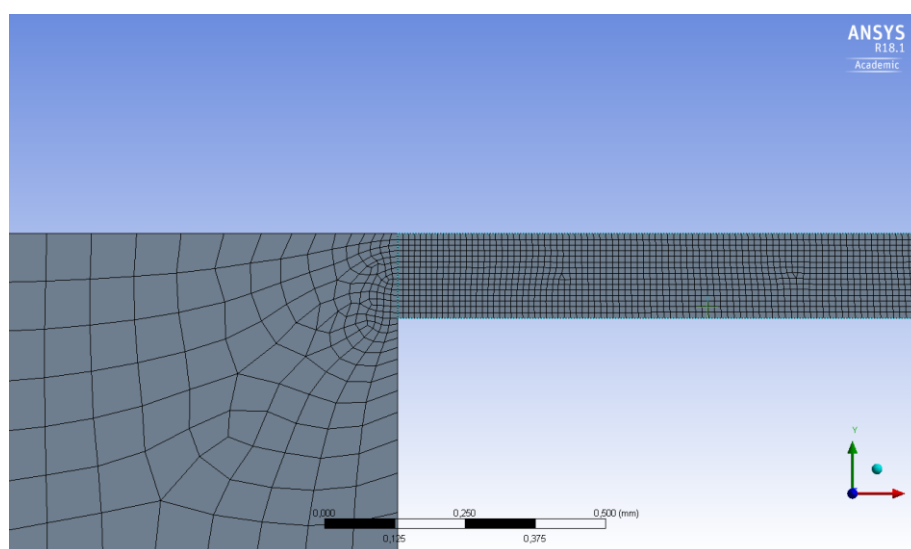
5.2.2 Síť

Druhý modelovací program je program pro tvoření sítě a pojmenování stran. Jako první jsme označili stranu, kterou mají oba tvary společnou jako průtokovou, a tedy nám znovu vzniká jediný model tvořený ze dvou objektů. V dalším kroku jsme pojmenovali strany modelu, přičemž klíčové pro nás byly strany vstupu, výstupu a obě strany čochy, kde jsme následně přišli ke generování sítě. Po vygenerování sítě jsme dostali obecnou hrubou síť. Tuto jsme museli upravit, aby více odpovídala našim potřebám při simulaci a lepším výpočtům.

Nejprve jsme zjemnili obecně celou síť na jemnost 0,2. Poté jsme tuto síť ještě upravili, abychom ve vstupní trysce, straně kalíšku a spodní straně čochy měli přesnější hodnoty na jemnost sítě 0,08. V mezeře jsme tuto síť zjemnili tak, aby na šířku měla minimálně 15 uzlů, což je zjemnění na hodnotu 0,01, kterou můžeme vidět na obrázcích 11 a 12.



Obrázek 12 Upravená síť



Obrázek 13 Přechod jemnosti sítě v místě spojení

5.2.3 Nastavení modelu

Jak jsme se už v předchozích kapitolách zmínili, nastavení je program, který pracuje s hotovou geometrií a zasítováním. Je určen k zadání zbývajících okrajových a počátečních podmínek nutných k započetí a úspěšnému dokončení výpočtů. Poté, co jsme si tento program otevřeli v levé kolonce, nacházíme pod názvem nastavení sedm různých větví, které jednotlivě popíšeme.

V první obecné větvi jsme zvolili tyto dané podmínky. Typ modelu je založen na rozdělení tlaku se standardní rychlostí a časem. Pro usnadnění a díky tvaru modelu můžeme také zvolit, že ve 2D prostoru dochází k osově symetrickému proudění. A v neposlední řadě můžeme vypnout gravitaci, neboť jak jsme uvedli v předchozí kapitole, díky působení sil na čočku je tato síla zanedbatelná.

V předchozí kapitole jsme se rozhodli pro zjednodušení a usnadnění výpočtu zanedbáním všech energií typu tepelná, radiační atd. Proto v druhé větvi označené jako modely vypneme všechny modely až na model viskózní. Tento model zvolíme jako model $k-\omega$ SST. Více informací o tomto typu modelu na [5].

Ve třetí větvi označené jako materiály je zapotřebí určit, jaká látka protéká naším modelem. Z teoretické části víme, že touto látkou je leštící kapalina. Nicméně v našem modelu jako protékající kapalinu použijeme vodu.

V další větvi se zpětně definují strany modelu. Spodní strana je označená jako osa. Následně se zkontrolují strany, zda platí označení stran vtoku, výtoku a průtoku z jednoho objektu do druhého, jak už bylo definováno v geometrii a síťování. U vtoku pak ještě napíšeme podmínku, že voda vtéká do modelu pod tlakem 100 kPa. V neposlední řadě strany pojmenované jako čočka uvedeme do rotačního pohybu kolem osy s rychlostí 104,47 rad/s, což je přibližně 1000 otáček/min.

Předposlední větev označenou jako dynamická síť nepoužijeme, protože v našem případě nedochází k žádnému kmitání, a tedy se jedná pouze o statický model.

V poslední větvi, která má název referenční hodnoty, už pouze zkontrolujeme, zda je správně napsaná hustota a viskozita a následně můžeme přejít k výpočtu modelu.

Těsně před spuštěním simulace si nastavíme počet itenerací a hodnotu, kdy bude model zastaven, pokud bude konvergovat.

5.3 Vyhodnocení simulace

V předchozích kapitolách jsme popisovali tři modelovací programy pro tvorbu našeho modelu, a to geometrii, síť a nastavení. Po jejich úspěšném vypracování jsme dostali v posledních programech výsledky, které v této kapitole podrobně rozebereme podle jednotlivých aspektů.

5.3.1 Hmotnostní průtok

V první řadě nás po dokončení simulace zajímal průtok kapaliny naším modelem. Pomocí průtoku jsme si mohli ověřit, zda byl model vypočítán správně. Vzhledem k jeho jednoznačné uzavřenosti platí, že hmotnostní tok by se měl na vstupu a výstupu rovnat. Což po prozkoumání můžeme potvrdit až na malé odchylky, kterých se mohl dopustit program při výpočtech modelu.

Tabulka 6 Změna průtoku na velikosti mezery

	ref. stav					jednotky
hloubka	40					(mm)
mezera	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	
vstup	0,123434	0,211142	0,27203	0,309845	0,332668	(kg/s)
výstup	0,123433	0,21114	0,272032	0,309844	0,332667	

V první tabulce je možné vidět, že čím větší velikost mezery je, tím dochází k většímu hmotnostnímu toku. Jeho nárůst přibližně odpovídá průběhu logaritmické funkce.

Tabulka 7 Změna průtoku na velikosti mezery

	ref. stav					jednotky
hloubka	20	30	40	45	50	(mm)
mezera	0,15					
vstup	0,212229	0,211568	0,211142	0,212604	0,213219	(kg/s)
výstup	0,21223	0,211571	0,21114	0,212605	0,213217	

V tabulce 6 je jasně patrné, že změna velikosti hloubky nemá na průtok kapaliny žádný vliv. V tabulce jsou sice patrné odchylky, ale ty můžeme označit za určitou chybovost simulačního programu.

Tabulka 8 Změna průtoku na změně tlaku

	ref. stav				jednotky
tlak	80	100	200	300	(kPa)
hloubka	40				(mm)
mezera	0,15				
vstup	0,185518	0,211142	0,312618	0,390634	(kg/s)
výstup	0,185518	0,21114	0,31262	0,390637	

Při změně vstupního tlaku je jasně patrné, že změna tlaku ovlivňuje velikost průtoku, přičemž při narůstajícím vstupním tlaku narůstá současně i průtok.

Tabulka 9 Změna průtoku na změně tvaru

	ref. stav			jednotky
tvar	plan	konvexní	Konkávni	
hloubka	40			(mm)
mezera	0,15			
vstup	0,211142	0,214748	0,214337	(kg/s)
výstup	0,21114	0,214744	0,214336	

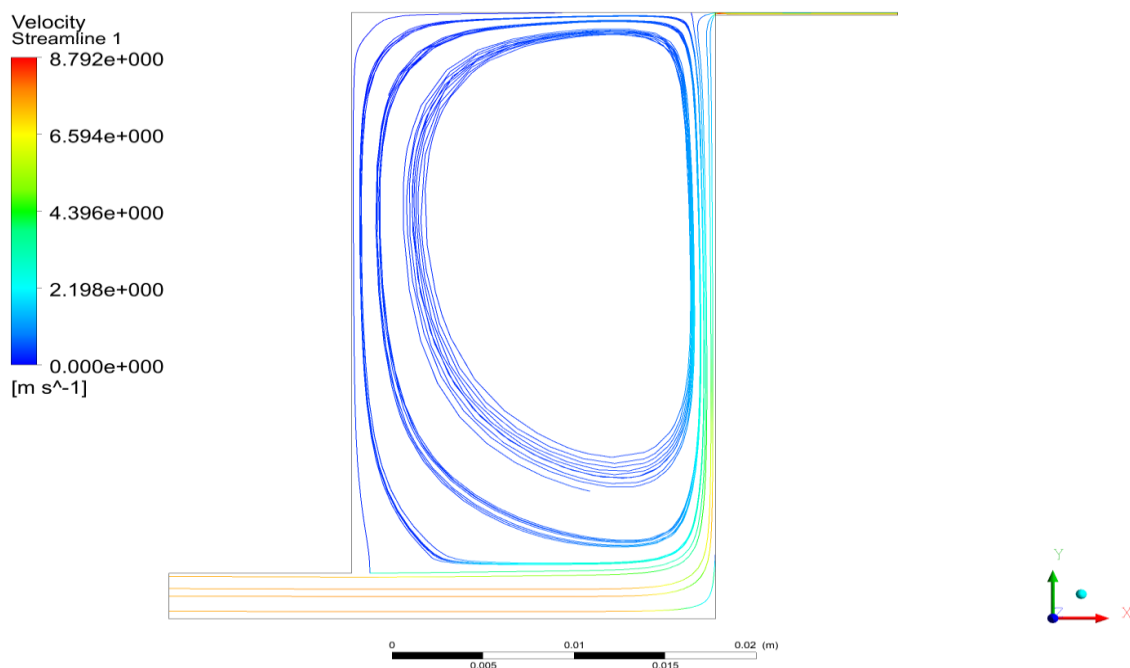
V poslední tabulce, kde je znázorněna změna průtoku na tvaru, můžeme vidět, že změna tvaru čočky má velmi malý vliv na hmotnostní průtok kapaliny.

Po porovnání výsledků při různých změnách parametrů je možné zhodnotit, že největší vliv na hmotnostní tok má změna mezery a vstupního tlaku, přičemž při porovnání má změna mezery o 0,1 mm velmi podobný průtok jako změna vstupního tlaku na tlak 200 kPa. Naopak je jasné patrné, že změnou hloubky a tvaru čočky docílíme velmi malých změn, a tudíž se dá říci, že při změně průtoku na hloubce a tvaru čočky nezáleží.

5.3.2 Proudění kapaliny

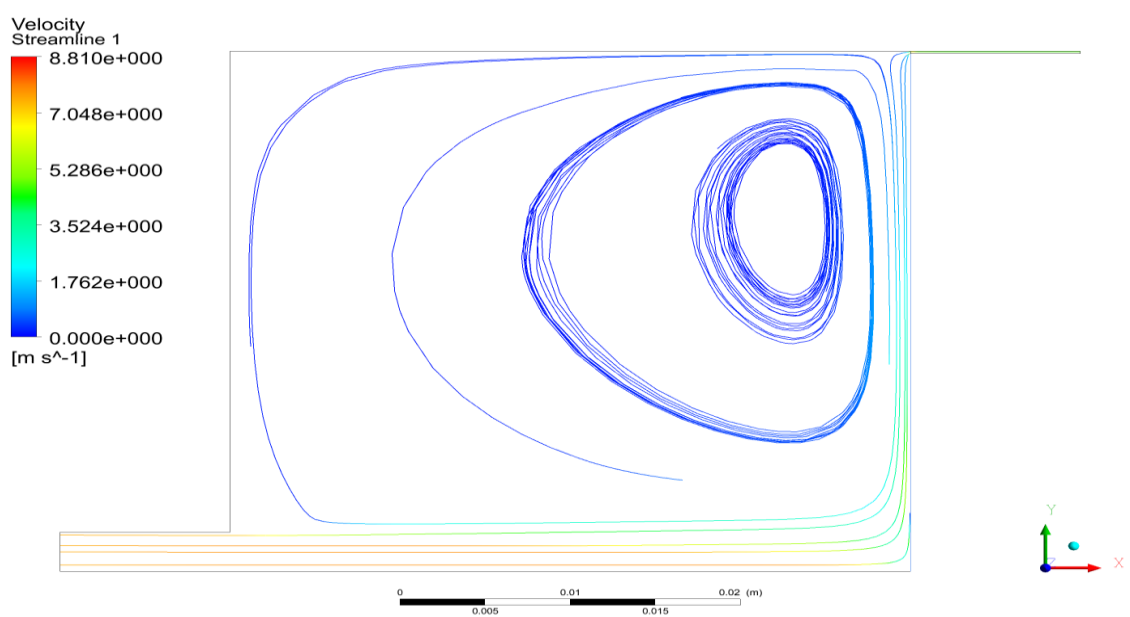
Po naměření a porovnání hmotnostního průtoku je zapotřebí, abychom si také přiblížili samotný pohyb kapaliny v modelu. V momentě, kdy kapalina proudí z trysky, je její rychlost velmi vysoká, což má za následek, že vstupní proud je nenarušen i v kalíšku. Poté se tento proud tříští o plochu čočky, kde se následně pohybuje podél stěny až ke stěně kalíšku. Zde je pak naprostá většina kapaliny vytlačena mezerou do volného prostoru. Toto proudění od trysky ven nazýváme hlavní proud kapaliny. Zbývající kapalina je pak následně nucena pokračovat podél strany kalíšku na jeho dno, dále k proudu od trysky, kde je opětovně hnána hlavním proudem a vytváří tak vír.

Po vysvětlení, jak se průtok pohybuje, je ještě zapotřebí dodat, že vír v kalíšku zabírá naprostou většinu plochy v modelu. Proto nejzásadnějším parametrem pro proudění je jeho hloubka. Tento parametr blíže rozebereme za pomoci obrázku proudnic, na kterých jsou zobrazeny rychlosti v daném okamžiku.



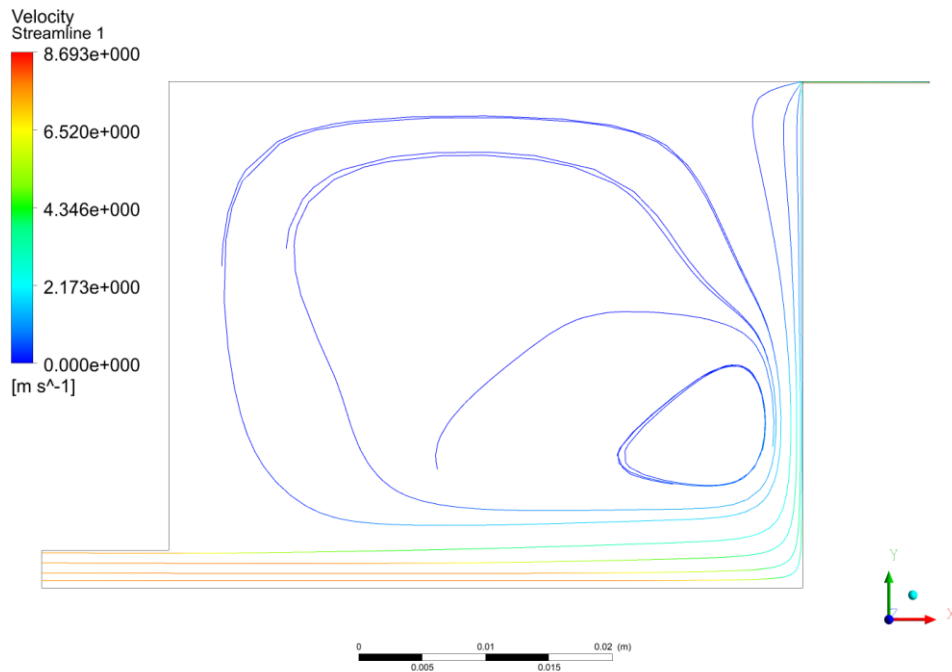
Obrázek 14 Proudnice pro model s hloubkou 20 mm

Jak je vidět na obrázku 13, má parametr hloubky nejmenší hodnotu. V místě čočky u osy rotace dochází k hluchému bodu, kde je minimální až nulová rychlost. Dále je patrné, že rychlost kapaliny je i po styku s čočkou výrazná. Poté, co hlavní proud zabíhá do mezery, je vidět, že rychlost opět stoupá na určitou velikost, která je stejná až do doby, kdy opouští náš model.



Obrázek 15 Proudnice pro referenční model

Na obrázku 14 Proudnice při referenčních podmínkách je vidět, že vstupní rychlost z trysky opadá těsně před nárazem do čočky a opět zrychluje v mezeře. Zde se opět vyskytuje hluchý bod.



Obrázek 16 Proudnice pro model s hloubkou 50 mm

Pro nejvyšší hloubku 50 mm je vidět, že tryska opět ztrácí svoji původní rychlost před nárazem a vytváří se hluchý bod. Následně se proud zrychlí opět v místě mezery. Také je zde vidět menší rozpad víru.

Když porovnáme proudnice všech třech změn hloubky, je patrné, že postupným zvětšováním hloubky se zmenšuje rychlost v hlavním toku. Díky tomu dochází k postupné destabilizaci víru.

5.3.3 Síla na čočku

Po získání a rozebrání samotného chování kapaliny v našem modelu jsme přešli ke zkoumání vlivu kapaliny na čočku. Nejprve jsme získali porovnání velikostí obecné síly, která působí na celou plochu čočky za různých podmínek. Tato síla je onou hlavní akční silou působící na lešticí kotouč.

Tabulka 10 Velikost síly za rozdílné mezery

	ref. stav					jednotky
hloubka	40					(mm)
mezera	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	
síla na spod. plochu čočky	449,16	350,1	251,58	178,67	130,08	(N)

Jak je možné vidět v tabulce 9, změna mezery ovlivňuje sílu působící na čočku. Čím je menší mezera, tím vzniká větší tlak.

Tabulka 11 Velikost síly za rozdílné hloubky

	ref. stav					jednotky
hloubka	20	30	40	45	50	(mm)
mezera	0,15					
síla na spod. plochu čočky	347,21	348,4	350,1	348,64	348,32	(N)

V druhé tabulce je možné vidět, že změna velikosti hloubky má malý vliv na celkovou sílu působící na čočku. Při bližším pohledu pak můžeme vidět, že síla se vzrůstající hloubkou nepatrně stoupá až do hodnoty 40 mm, kde je její hodnota maximální, a pak opět klesá. S ohledem na počet měření a odchylku, která mohla vzniknout z počítání programu, by bylo zapotřebí provést více simulací, abychom mohli s jistotou tvrdit, zda se jedná nebo nejedná o náhodný jev.

Tabulka 12 Velikost síly za rozdílného vstupního tlaku

	ref. stav				jednotky
tlak	80	100	200	300	(kPa)
hloubka	40				(mm)
mezera	0,15				
síla na spodní plochu čočky	284,53	350,1	672,34	989,72	(N)

V tabulce 11 je vidět, že síla je velmi zásadně ovlivněna změnou vstupního tlaku. Síla působící na čočku roste se vzrůstajícím tlakem téměř lineárně.

Tabulka 13 Velikost síly při rozdílném tvaru

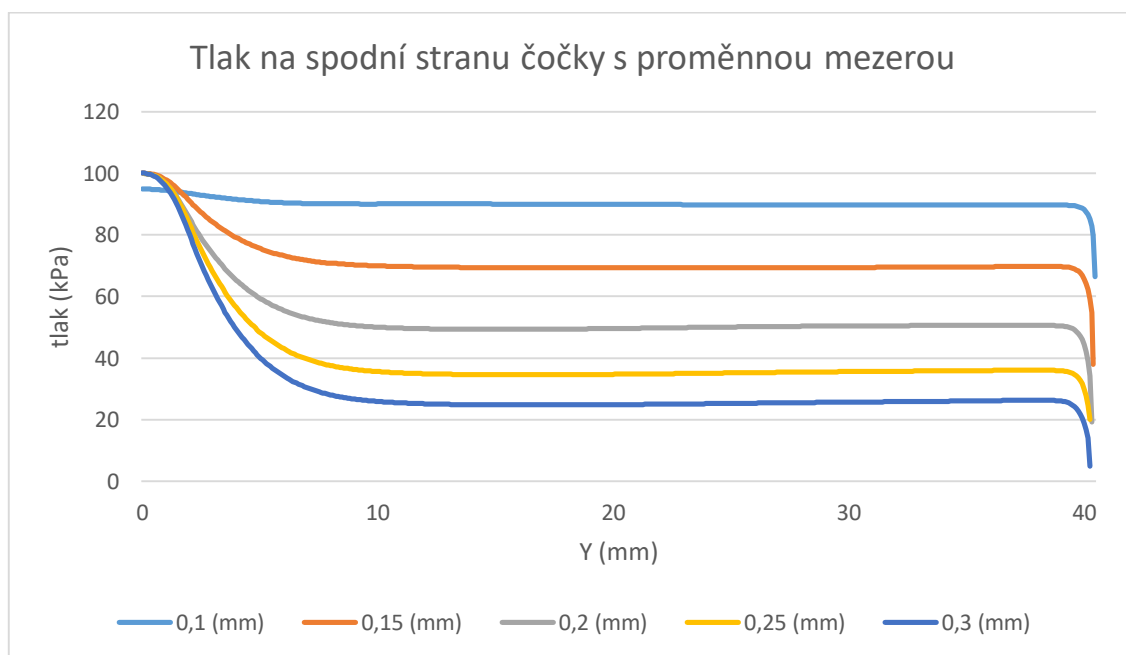
	ref. stav			jednotky
tvar	plan	konvexní	konkávní	
hloubka	40			(mm)
mezera	0,15			
síla na spodní plochu čočky	350,1	345,12	345,86	(N)

V tabulce 12 je následně patrné, že nerovný tvar čočky nepříznivě ovlivňuje sílu působící na čočku, nikoliv však výrazně.

Srovnáním všech tabulek v této kapitole pak dostaneme výsledek, že parametry které přímo ovlivňují sílu působící na čočku, jsou mezera a vstupní tlak. Při porovnání hodnot z kapitoly Hmotnostní průtok pak můžeme říci, že při zvyšujícím se vstupním tlaku stoupá jak průtok, tak síla. Naopak v případě mezery, čím je větší mezera, tím je větší průtok. Klesá však síla na čočku. V případě změny hloubky a tvaru nedochází pak k zvláště velkým výkyvům, které by zásadně ovlivňovaly sílu na čočku.

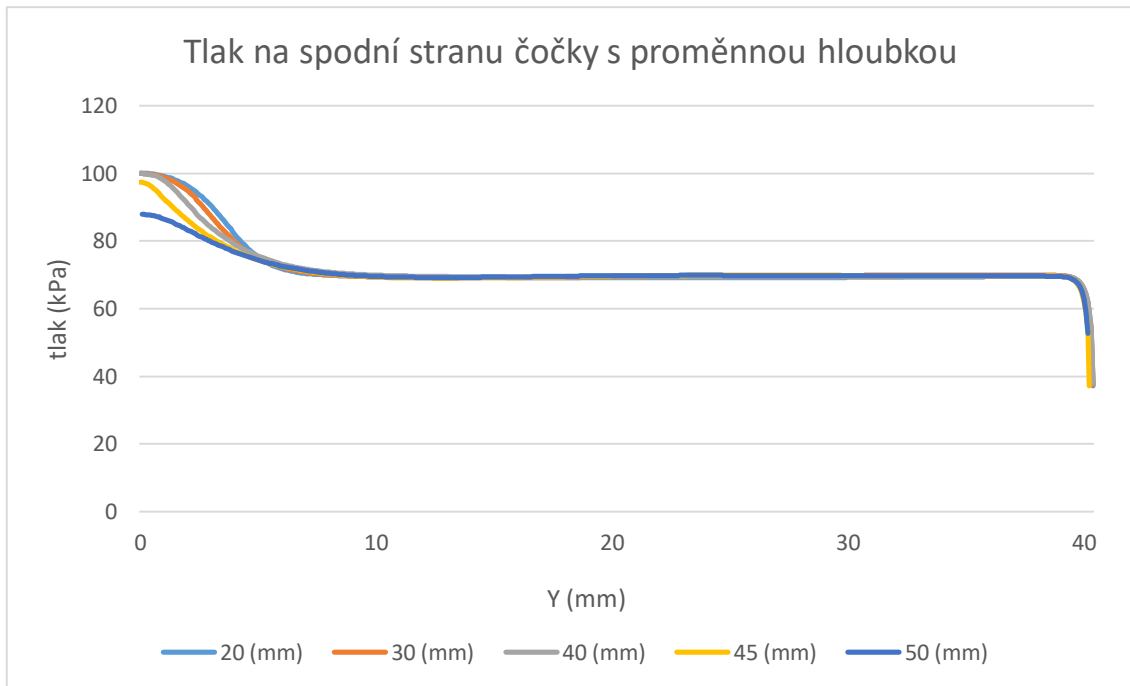
5.3.4 Tlak působící na spodní stranu čočky

V předchozí kapitole jsme zjistili, jaká je celková síla působící na spodní stranu čočky. Jedním z parametrů, které utvářejí tuto sílu, je tlak působící na spodek čočky. Tento tlak by měl být teoreticky neměnný. Proto jsme se podrobněji podívali na tento působící tlak a prověřili tak, zda doopravdy odpovídá předpokladům.



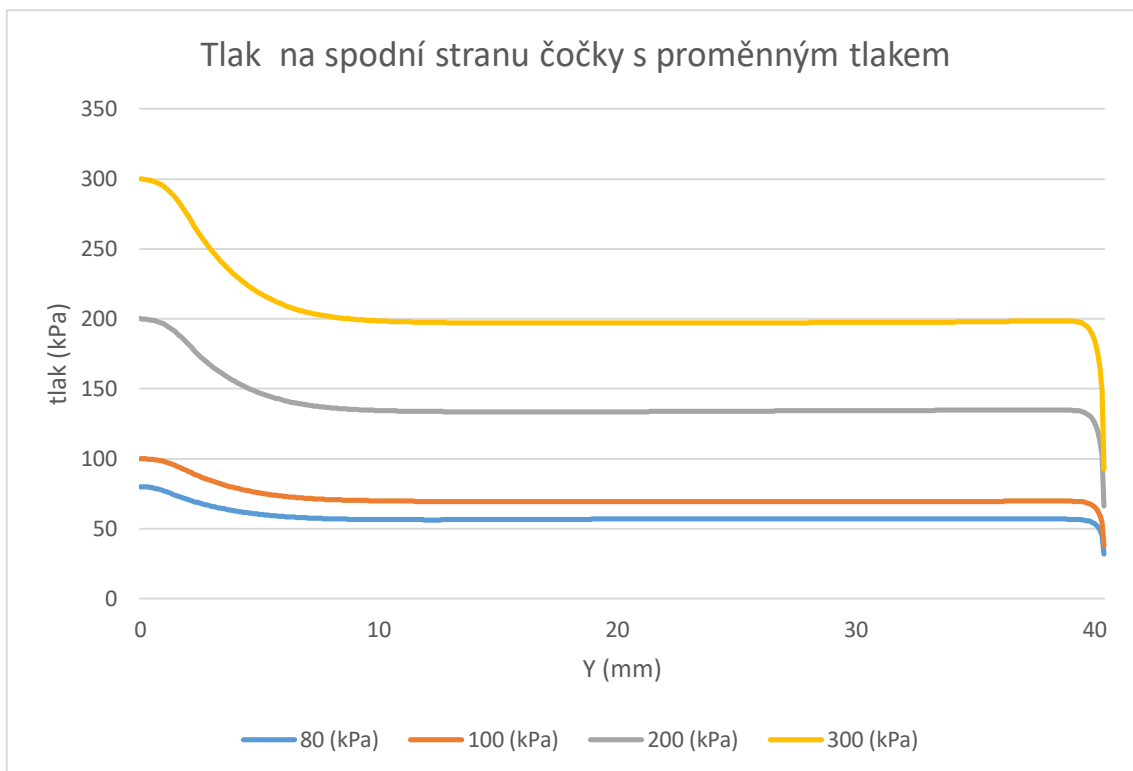
Graf 1 Průběh tlaku na spodní stranu čočky s proměnnou mezerou

V grafu 1 je možné vidět náraz trysky na spodní stranu čočky. Tlak následně klesá a drží stálou hodnotu až do místa mezery, kde tlak výrazně klesá. Z grafu je také patrné, že zvětšující se mezera zmenšuje tlak působící na čočku.



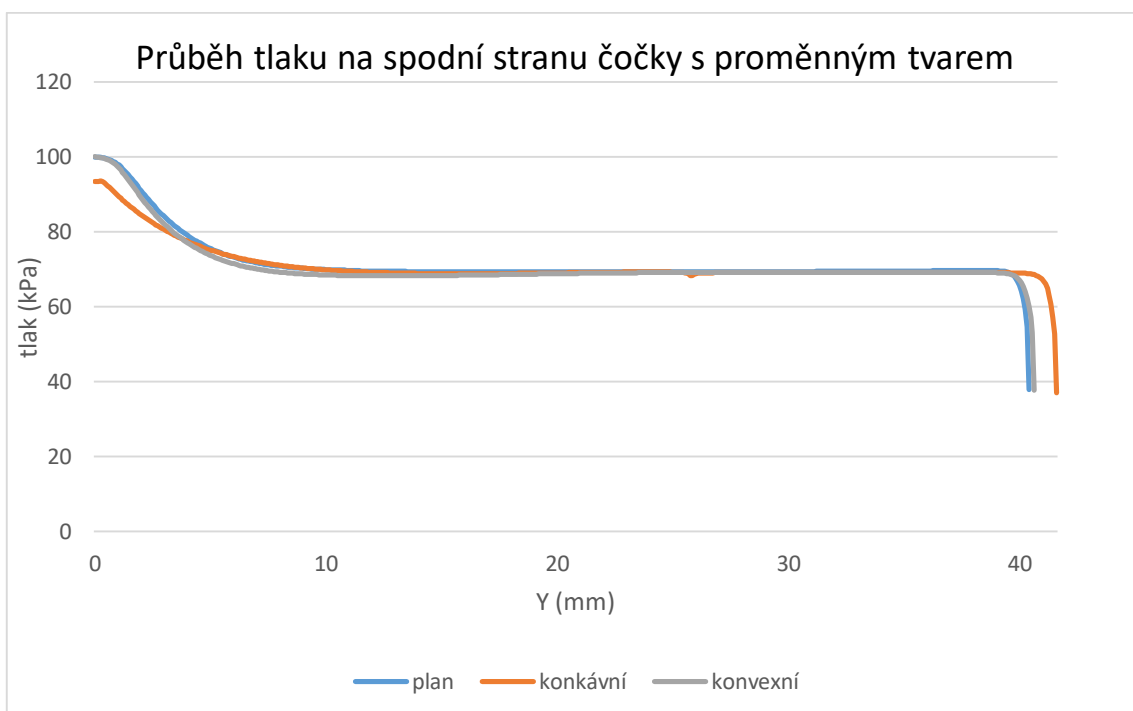
Graf 2 Průběh tlaku na spodní stranu čočky s proměnnou hloubkou

Při vzrůstající mezeře je vidět, že tlak, který při nárazu trysky vzniká, postupně klesá. Po nárazu se tlaky pro všechny rozdílné mezery ustálily na stejné hodnotě, která je pak konstantní až do chvíle, kdy hlavní proud vtéká do mezery.



Graf 3 Průběh tlaku na spodní stranu čočky s proměnným vstupním tlakem

Při změně vstupního tlaku je jasně patrné, že se vzrůstajícím tlakem vzrůstá náraz proudu od trysky a následně klesá na konstantní hodnotu. Je také jasně patrné, že se vzrůstajícím vstupním tlakem stoupá i tlak působící na čočku.



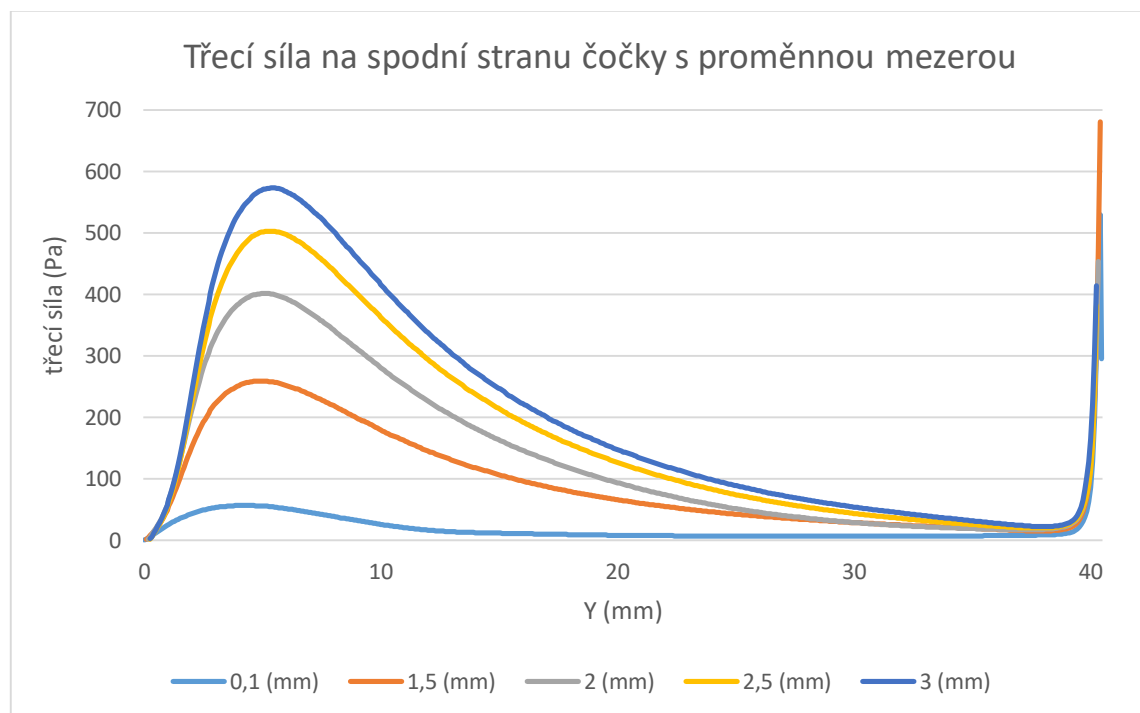
Graf 4 Průběh tlaku na spodní stranu čočky s proměnným tvarem

V grafu 4, který zobrazuje tlak na spodní stranu čočky v závislosti na tvaru, je možné vidět, že změnou tvaru nedochází k vážnějším výchylkám, které by ovlivňovaly působící tlak. Jedinou výchylku způsobuje graf konkávní funkce, kde je vidět mírný pokles v konstatní fázi. V tomto bodě se vyrovnává její konkávnost do plochosti. Zároveň konkávní graf končí v jiném místě než ostatní dva, což je zapříčiněno pohybem dat.

Při provnání všech změn parametrů je opět jasně patrné, že mezera ovlivňuje tlak nejvíce. Zároveň je překvapující, že změna tvaru nemá takřka žádný vliv na působící tlak. Jak jsme předpokládali, změna vstupního tlaku velikost tlaku na čočku ovlivňuje. Hloubka v našem případě tlak neovlivňuje. Nedá se však říci, že nemá žádný vliv, protože je vidět, že kdybychom mezeru velmi zvětšili, došlo by ke zmizení tlaku od trysky. Také by mohlo docházet ke zmenšení tlaku. Tyto hloubky jsou však z hlediska technologie nepotřebné.

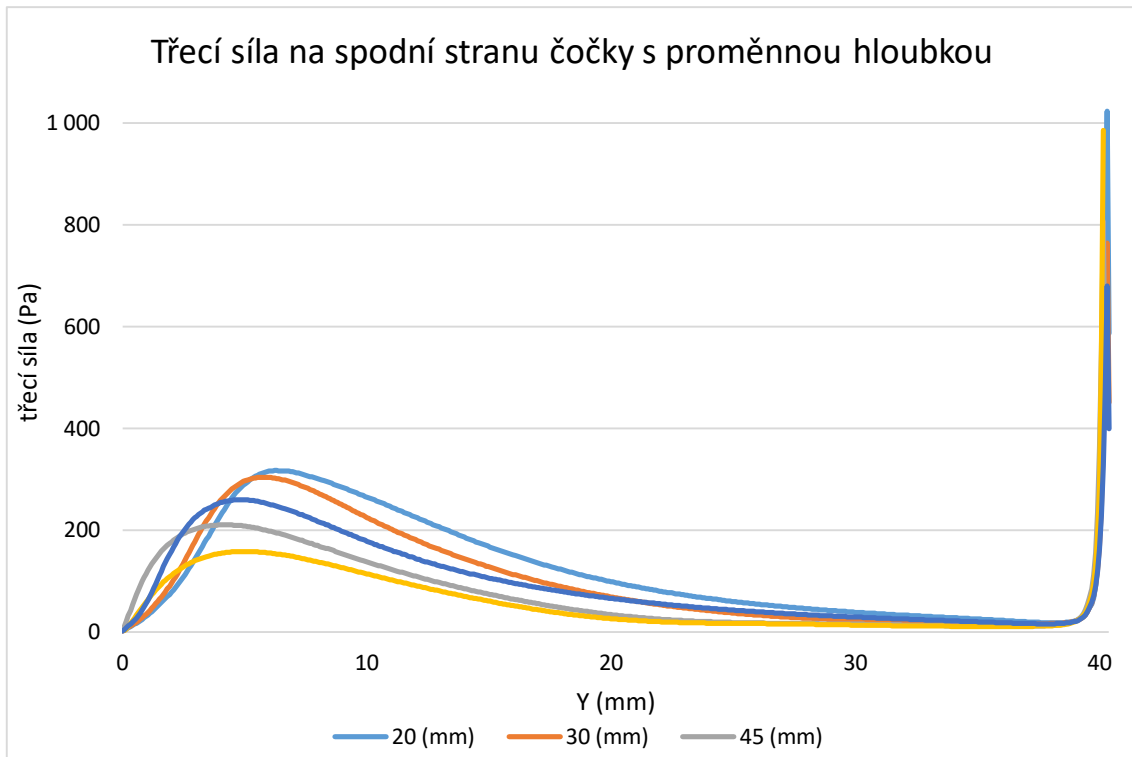
5.3.5 Tření na spodní stranu čočky

Po zjištění průběhu tlaku působícího na spodek čočky je pro nás důležité ověřit třecí sílu. Tato síla byla zkoumána pouze ze spodu čočky. Dalším aspektem této síly je, že její působení na čočku je v celé délce nulové. Proto je zapotřebí měřit třecí sílu od středu čočky až po stranu kalíšku.



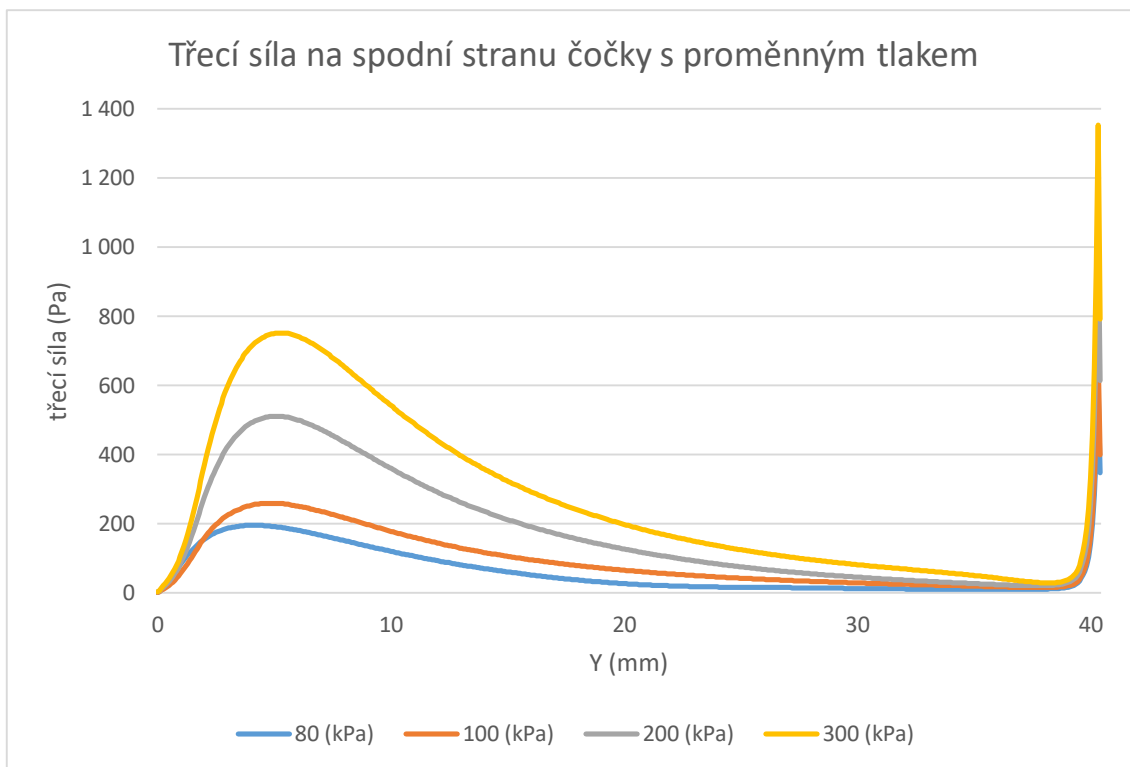
Graf 5 Průběh třecí síly na spodní stranu čočky s rozdílnou mezerou

Z naměřených hodnot v grafu 5 je patrné, že největší třecí síla působí v momentě, kdy hlavní proud naráží do čočky. Zároveň je vidět, že se vzrůstající mezerou roste i třecí síla.



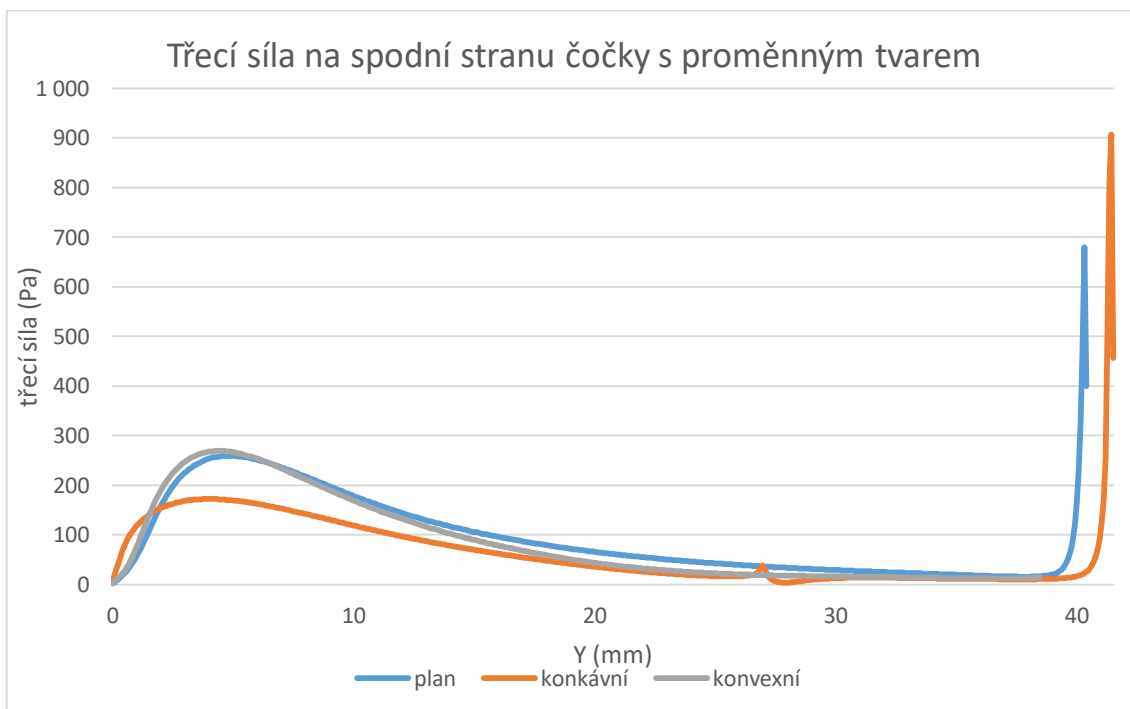
Graf 6 Průběh třecí síly na spodní stranu čočky s rozdílnou hloubkou

Při změně mezery v grafu 6 je vidět, že vzrůstající změna hloubky postupně zmenšuje třecí sílu především při kontaktu čočky s trykou.



Graf 7 Průběh třecí síly na spodní stranu čočky s rozdílným vstupním tlakem

Při změně vstupního tlaku je vidět, že třecí síla opět vzrůstá v místě prvního dotyku trysky, přičemž zvyšováním vstupního tlaku vzrůstá i třecí síla, a to v místě prvního kontaktu.



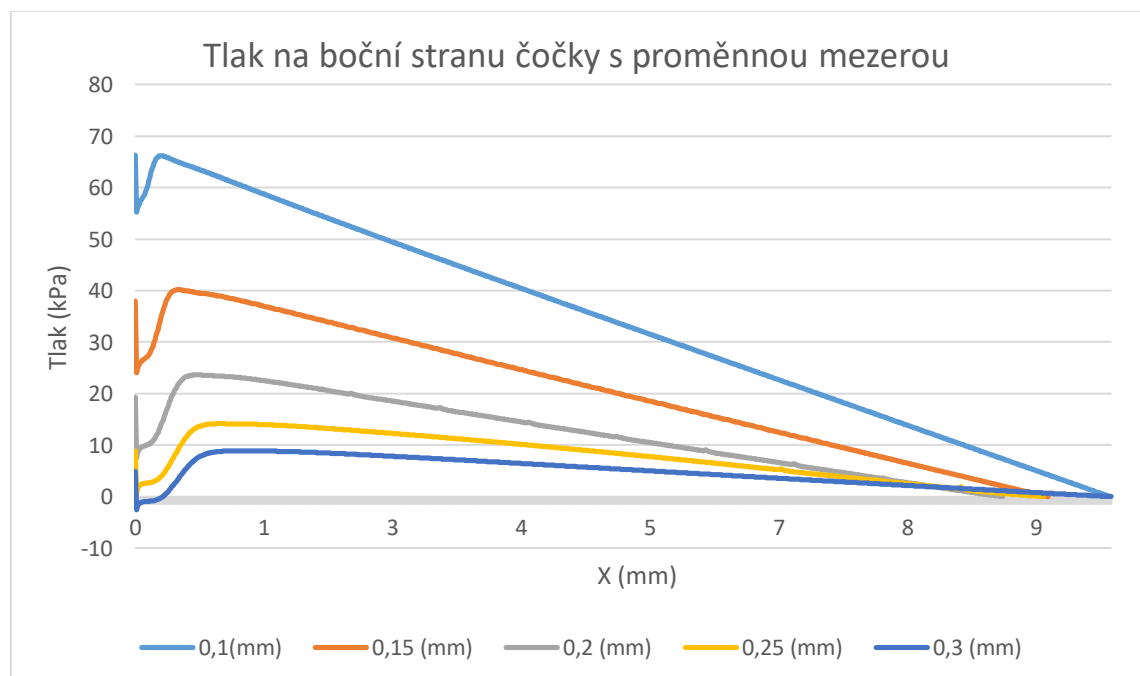
Graf 8 Průběh třecí síly na spodní stranu čočky s rozdílným tvarem

Při porovnání různých tvarů čočky je vidět, že třecí síla probíhá stejně až na konkávní čočku, kde vyšší vzdálenost od trysky zmenšuje nástup třecí síly. Dále je pak vidět přechod z konkávního zakřivení do plan. V poslední řadě je vidět koncová odchylka, která ovšem vznikla špatným zpracováním dat při vytváření grafu v programu Excel.

Po změření změny třecí síly na jednotlivých parametrech je patrné, že velikost třecí síly závisí na rychlosti hlavního proudu. Také můžeme říci, že změna vektoru rychlosti v místě dotyku proudu z trysky působí právě největší třecí sílu, která se pak objevuje v grafu. Na konci je také vidět dramatický nárůst tlaku teoreticky až k nekonečnu, který je ovšem zaviněn mezerou, kde tekutina protéká. Při porovnání různých parametrů má největší nárůst změna vstupního tlaku a následně mezery. Změna tvaru čočky nemá na působící třecí sílu skoro žádný vliv. Poslední parametr, změna mezery, má jako jediný se vzrůstající hodnotou klesající průběh.

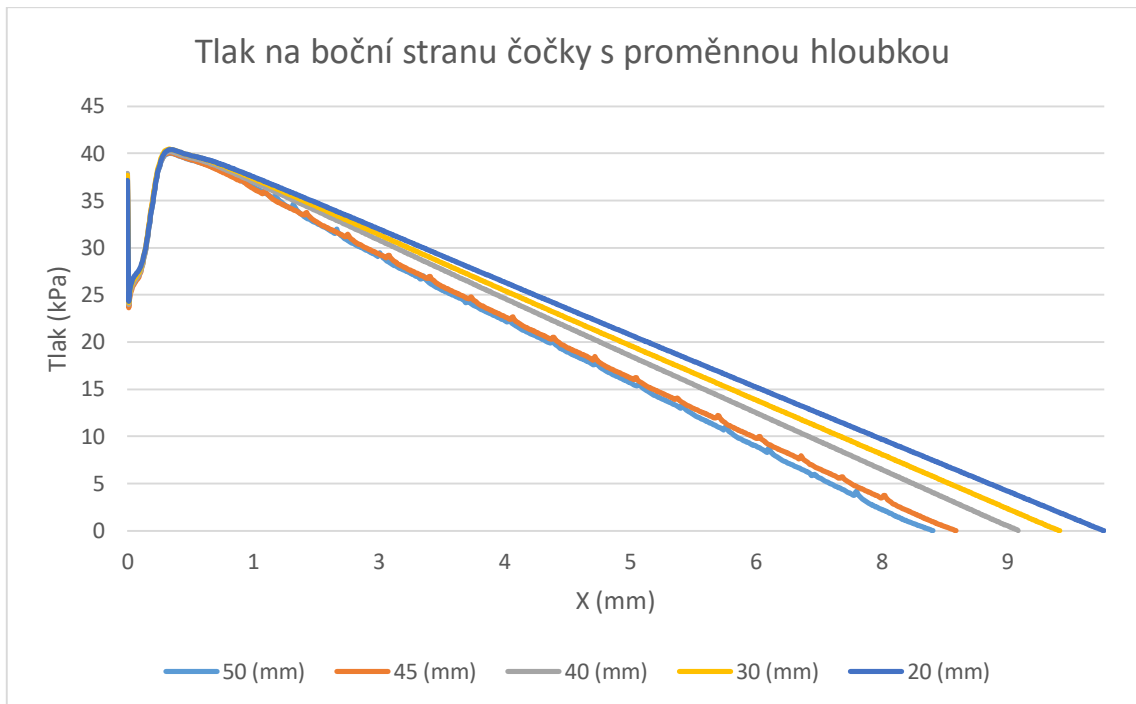
5.3.6 Tlak na čočku v mezeře

Po zjištění chování kapaliny na spodek čočky si musíme uvědomit, že kapalina působí i na boční stranu čočky. K tomuto dochází v místě, kde hlavní proud je vtlačěn do mezery a na konci následně vytéká. Proto z hlediska kapaliny působící na čočku může docházet k zajímavým průběhům změny tlaku.



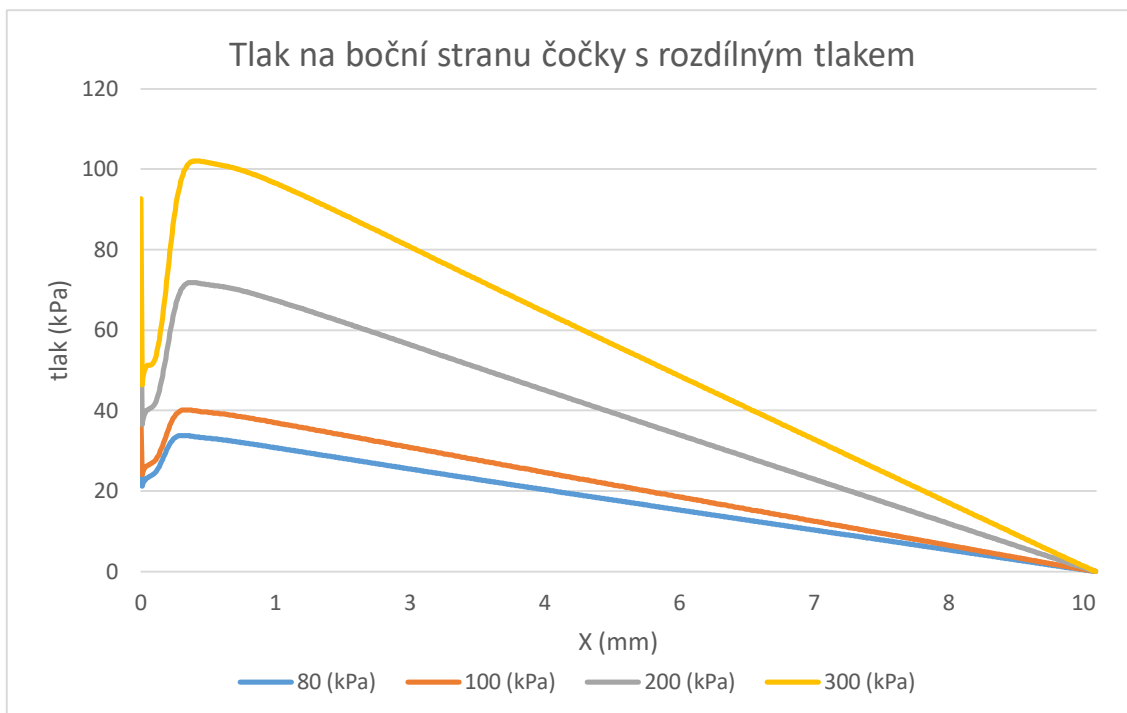
Graf 9 Průběh tlaku na boční stranu čočky s rozdílnou mezerou

Při vtoku do mezery můžeme pozorovat zmenšení tlaku, které je zapříčiněno vírem, který v daném místě vzniká. Poté se tlak opět zvýší a posléze lineárně klesá. Při pozorování změny mezery je vidět, jak její velikost ovlivňuje vznikající tlak na čočku. Její tlak klesá s velikostí mezery.



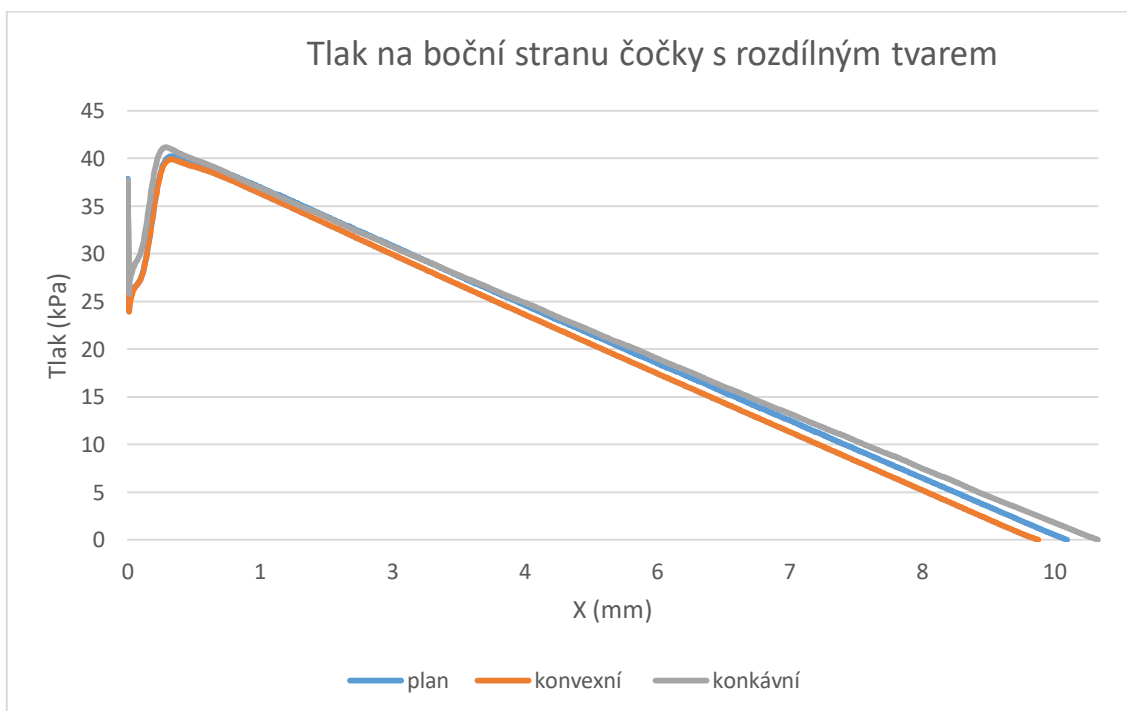
Graf 10 Průběh tlaku na boční stranu čočky s rozdílnou hloubkou

V grafu 10 je vidět pokles tlaku vinou víru při vtoku. Poté tlak stoupá na určitou hodnotu a opět lineárně klesá. Když pomineme chybovost programu, ve kterém byl graf tvořen, můžeme říci, že průběh tlaku s rozdílnou hloubkou je identický. Pouze na hodnotách 50 a 45 mm je vidět mírný rozdíl v průběhu poklesu. To však může být zapříčiněno chybou výpočetního programu.



Graf 11 Průběh tlaku na boční stranu čočky s rozdílným vstupním tlakem

V grafu 11 závislosti na vstupním tlaku můžeme pozorovat, že hodnoty se vzrůstajícím vstupním tlakem stoupají. Je zde vidět zvětšující se skoková hodnota, kterou nabývá tlak při vstupu do mezery a která je způsobena vírem. Po překonání tohoto víru je pozorován lineární pokles tlaku až do jeho výtoku, kde je tlak nulový.



Graf 12 Průběh tlaku na boční stranu čočky s rozdílným tvarem

Při pozorování průběhu bočního tlaku na různé tvary čoček je patrné, že je průběh tlaku stejný, až na odchylku vzniklou chybou programu Excel. Nejprve dochází ke snížení tlaku vlivem působení víru a následně tlak stoupá do svého maxima, kde pak lineárně klesá až do místa, kde proud vytéká.

Po zjištění chování tlaku na bok čočky za rozdílných parametrů můžeme říci, že parametrem, který nejvíce ovlivňuje tlak, je velikost mezery. Dále můžeme konstatovat, že průběh křivky tlaku stoupá se vzrůstajícím vstupním tlakem. Naopak je patrné, že mezera a tvar nemá na boční tlak žádný vliv.

6 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na analýzu technologie HSP z pohledu mechaniky tekutin. V teoretické části bakalářské práce byl vysvětlen postup výroby optických skel. Podrobněji byly popsány různé druhy technologie leštění optických skel, které se v současné době používají, zejména pak technologie HSP. Před zahájením analytické části práce byly rozebrány potřebné výpočetní postupy a metody.

Praktická část práce byla rozdělena na metodu numerickou a metodu simulační.

Numerická metoda byla řešena v rámci základních výpočtů a rovnic v oboru mechaniky tekutin. Tyto rovnice vedly k řešení diferenciálních rovnic, proto byla pro zjednodušení použita aproximace. Z výsledků numerické metody bylo možné konstatovat, že pouze dva ze čtyř parametrů mají přímý vliv na průtok kapaliny, a to velikost mezery a změna vstupního tlaku. Tyto výsledky však nemusely odpovídat reálnému chování proudění kapaliny, neboť v numerické části nebyla zohledněna rotace samotné čočky z důvodu velmi složitých rovnic, které by v tomto případě vznikly.

V případě simulační metody byl použit program ANSYS: fluent. Prvním krokem tedy bylo vytvoření geometrie modelu a následně vygenerování sítě, kterou bylo nutné upravit pro naše potřeby. Po vypočtení a dokončení simulační metody byla posléze vyhodnocena všechna data.

Nejprve byl zjištěn hmotnostní průtok. Ten ovlivňovala pouze změna mezery a vstupního tlaku. Kromě průtoku kapaliny bylo pozorováno chování kapaliny v modelu v závislosti na mezeře. Bylo zjištěno, že pro všechny mezery má proudění v modelu stejnou podobu. Po prozkoumání chování kapaliny byla práce zaměřena na samotné působení síly kapaliny na čočku. Vyhodnocením výsledků bylo opět potvrzeno, že klíčovými parametry jsou mezera a změna vstupního tlaku. Po zjištění celkové síly byla graficky rozebrána jednotlivá působení tlaků a třecích sil. Zároveň se v některých grafech objevovala chyba v podobě rozhozené pravé strany grafu. Tato chyba byla způsobena programem Microsoft Excel, kde byl graf vytvářen na základě množství získaných dat, a ne na samotných hodnotách. V případě spodního a bočního tlaku bylo patrné, že mezera a vstupní tlak nejvíce ovlivňují průběh tlaku. Spodní tlak udržoval konstantní hodnotu v celém průměru až na místo středu, kde bylo patrné, že tryska zvyšuje jeho velikost. Při bočním tlaku byl pozorovatelný trend tvoření víru na okraji čočky, který by mohl způsobovat lámání hran v případě nezjištěných vad na okraji čočky. Poslední zkoumaná oblast simulační části byla

zaměřena na třecí síly, kde nejvyšší síly působily s rozdílnou mezerou a tvarem čočky. Naopak bylo zjištěno, že změnou hloubky třecí síla klesala. Kdyby se tato mezera dále zvětšovala, došla by do bodu, kdy se třecí síla bude rovnat nule, a tedy v grafu tlaku na spodní stranu čočky by nebylo pozorováno působení trysky.

Při porovnávání dat průtoků pro numerickou a simulační metodu bylo vypořádkováno, že hodnoty v obou metodách jsou si podobné. Změna velikosti průtoku s rozdílnou mezerou numerické metody se pohybovala maximálně okolo rozdílu 10 % od metody simulační. Při srovnání vlivu hloubky na průtok v obou metodách bylo pozorováno, že v simulační metodě hodnota zůstává konstantní až na jemné rozdíly, stejně jako v metodě numerické. Největší rozdíly obou metod byly naměřeny při změně vstupního tlaku, kdy s rostoucí velikostí vstupního tlaku rostl i rozdíl průtoků obou metod. Při změně tvaru čočky pak bylo patrné, že změna tvaru měla jistý vliv v simulační metodě, ale nikoliv v numerické. Díky podobnostem hodnot naměřených v obou metodách si můžeme dovolit konstatovat, že rotace čočky nijak zásadně neovlivňuje průtok kapaliny technologie HSP. Zároveň nemůžeme říci s jistotou, že dané rozdíly způsobuje rotace čočky. Rozdíly hodnot by také mohly být způsobeny chybou při simulační i numerické části.

Závěrem je nutné konstatovat, že nejzásadnějším parametrem technologie HSP je velikost mezery mezi bokem čočky a stěnou kalíšku. Právě tento parametr zásadně ovlivňuje všechny měřené případy. Proto je pro technologii HSP nutné využívat velikost kalíšku s minimálním přesahem.

Druhým důležitým parametrem je změna vstupního tlaku. Při změně bylo pozorováno, že s rostoucím tlakem stoupá i tlak působící na čočku, zejména pak tlak od trysky v místě styku s čočkou a v místě přechodu proudu do mezery.

Změna tvaru je pak parametr, při kterém nebyly vypořádkovány žádné výrazné změny, a tedy jsme usoudili, že nemá na technologii HSP vliv.

Posledním parametrem je změna hloubky. Zde byly zaznamenány změny pouze v případě tření. Jinak tento parametr nevykazoval žádné změny. Proto je možné usoudit, že vzdálenost čočky od trysky technologie HSP neovlivňuje.

Seznam použité literatury

Literatura

[1] KARROW, Hank H. *Fabrication Methods for Precision Optics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2004. ISBN 0471703796.

[2] ŘIDKÝ, Bc. Václav. *Paralelní výpočty proudění* [online]. Liberec, 2011 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z:

https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/48909/V_15411_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y&. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Šidlof, Ph.D.

[3] HydroSpeed Polishing Technology. *OptoTech* [online]. Wetztenberg: OptoTech Optikmaschinen, 2005 - 2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupé

z:<<https://www.optotech.de/en/hydrospeed-polishing-technology>>

[4] BRUS, A., M. DONOVALOVÁ a Š. NOVOTNÝ. *Bernulliho rovnice a její aplikace* [online]. Praha, 2008 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z:

<http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2008-2009/Zima08/proc/bernuli.pdf>. Seminární práce. České vysoké učení technické v Praze.

[5] SST k-omega model. *CFD Online* [online]. 2005, 28. 2. 2011 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model

[6] [online]. In: . Spie, 2020 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z:

https://www.spiedigitallibrary.org/ContentImages/Proceedings/9683/96831R/FigureImages/00067_psisdg9683_96831r_page_2_1.jpg