



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA ODLITKU OPTIMALIZOVANÉHO ČELA VÁLCE PNEUMATICKÉHO POHONU

CASTING PRODUCTION OF AN OPTIMIZED INLET SHAPE OF PNEUMOBILE ENGINE PNEUMATIC  
CYLINDER

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Bouchner

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Jan Bouchner</b>
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24

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

## **Výroba odlitku optimalizovaného čela válce pneumatického pohonu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Snížení ztráty tlaku na přívodu stlačeného vzduchu do pohonu pneumatického závodního automobilu je možné dosáhnout optimalizovanou geometrií dutiny čela, což potvrzuje numerická simulace. Výsledná geometrie je tvarově složitá. Využitím metody přesného lití na vytavitelný model lze získat požadované, velmi komplikované, geometrie pro kusovou výrobu v krátkém čase a s relativně nízkými náklady.

### **Cíle bakalářské práce:**

Student technologicky upraví návrh geometricky optimalizovaného čela pneumatického válce, jenž byl dodán výpočtářem. Provede simulace odlévání a vyrobí odlitek této součásti metodou přesného lití na vytavitelný model. Po obrobení bude provedena kontrola těsnosti. Student provede vyhodnocení součásti ve vztahu k původní geometrii.

### **Seznam doporučené literatury:**

KUMAR, Parlad; SINGH, Rupinder; AHUJA, Ips. A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process, Asian Review of Mechanical Engineering. 2013, Vol. 2 No. 2, pp.49-55. ISSN 2249-6289.

BEELEY, Peter R. a SMART, Robert F. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 09-017-1666-9.

CAMPBELL, John. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth–Heinemann Ltd., 1991. ISBN 0-7506- 1072.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce je zaměřena na výrobu součásti pneumatického obvodu metodou hybridní technologie přesného lití. Tato metoda je kombinací přesného lití a aditivních technologií. Vyrobena součást, zvaná čelo válce, je určena k přívodu stlačeného vzduchu do pneumatického pohonu závodního vozu. Tvarově složitý návrh geometrie této součásti vznikl optimalizací z pohledu proudění. Tento návrh byl dodán Pneumobil racing teamem Brno. V práci je dále obsažena technologická rozvaha zohledňující směr tuhnutí, na základě které byla upravena dodaná geometrie. Vyrobiteľnost součásti zde byla ověřena za pomoci numerické simulace v prostředí ProCAST. Práce je dále věnována tisku spalitelného modelu zhotoveného technologií fused deposition modeling. Tento spalitelný model byl použit při výrobě keramické skořepiny, do které byl zhotoven odlitek ze slitiny hliníku AlSi10Mg. Součást musela po obrobení a následné montáži splnit také požadavky na těsnost. Těsnost je zde posuzována jako pokles tlaku v uzavřeném obvodu měřený v čase. Dále byl zkoumán vliv vyrobené součásti na vlastnosti závodního vozu ve vztahu k původní geometrii. Srovnání je provedeno na základě měření otáček kol závodního vozu v nezátíženém stavu. Výstupem práce je zhotovená funkční součást, jež validuje výsledky vědeckého článku vydaného Pneumobil racing teamem Brno.

## Klíčová slova

Pneumobil, čelo válce, hybridní technologie přesného lití, rapid prototyping, přesné lití

## ABSTRACT

Presented bachelor's thesis deals with production of a pneumatic component using hybrid investment casting technology. This method combines investment casting with additive technologies. The manufactured component, called cap-end, supplies compressed air to the pneumatic drive of a racing car. Complex design of this component was created using computer fluid dynamics optimization. This design was delivered by the Pneumobile racing team Brno. Presented thesis further contains a technological consideration taking into account solidification direction, on the basis of which the delivered geometry was modified. Manufacturability of the component is verified by a numerical simulation in the ProCAST environment. This thesis also describes printing process of a combustible model using fused deposition modelling technology. The combustible model is used in the production of a ceramic shell. Using said ceramic shell AlSi10Mg alloy casting was made. The component had to meet the requirements for leak tightness after machining and subsequent assembly. The leak tightness is assessed here as a pressure drop in a closed circuit measured over time. Furthermore, the effect of the cap-end on properties of the racing car in relation to the original geometry was investigated. The comparison is made on the basis of the race car's unloaded wheel speed measurements. The outcome of the thesis is a functional cap-end component that validates the results of a scientific article published by members of the Pneumobile racing team Brno.

## Keywords

Pneumobile, cap-end, hybrid investment casting, rapid prototyping, investment casting

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BOUCHNER, Jan. Výroba odlitku optimalizovaného čela válce pneumatického pohonu. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157648>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

---

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Výroba odlitku optimalizovaného čela válce pneumatického pohonu vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

-----  
místo, datum

-----  
Jan Bouchner

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Vladimírovi Krutišovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytoval při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Michalovi Michalci, Ph.D. a panu Ing. Martinovi Valenovi z týmu Pneumobilu za poskytnutí pomoci s kompletací součástí a následným měřením. V neposlední řadě také děkuji panu Ondřeji Štočkovi za vedení při zhotovení keramické skořepiny.

---

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	9
1 ČELO VÁLCE PNEUMATICKÉHO POHONU .....	11
1.1 Pneumobil.....	11
1.1.1 Pneumobil racing team Brno .....	11
1.1.2 AVENTICS Pneumobile Competition .....	11
1.2 Pneumatické válce .....	12
1.3 Vstupní geometrie čela.....	12
2 ZVOLENÁ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE .....	13
2.1 Hybridní technologie přesného lití .....	13
2.1.1 Přesné lití .....	13
2.1.2 Rapid prototyping .....	14
3 GEOMETRIE ODLITKU .....	16
3.1 Konverze geometrie .....	16
3.2 Úprava geometrie .....	17
4 NUMERICKÁ SIMULACE ODLÉVÁNÍ.....	19
4.1 Preprocessing a nastavení simulace.....	20
4.2 Analýza plnění.....	21
4.2.1 Rozložení teplot při plnění .....	21
4.2.2 Vzduch při plnění .....	22
4.3 Analýza tuhnutí .....	23
4.3.1 Podíl tuhé fáze .....	23
4.3.2 Predikce vzniku porozity .....	24
5 POSTUP VÝROBY .....	25
5.1 Rozdělení modelů pro přesné lití.....	25
5.2 3D Tisk spalitelného modelu.....	25
5.3 Příprava modelu pro výrobu skořepiny .....	26
5.4 Výroba keramické skořepiny.....	27
5.5 Odstranění modelu ze skořepiny .....	29
5.6 Odlévání .....	30
5.7 Obrobení .....	31
5.8 Montáž.....	31
6 KONTROLA TĚSNOSTI .....	32
7 POROVNÁNÍ GEOMETRIE .....	36
7.1 Měření otáček vozidla .....	37
ZÁVĚR.....	40

---



## ÚVOD

Pneumobil je studentským projektem zde na VUT v Brně. Dlouhodobě se zabývá výrobou stejnojmenného závodního vozidla poháněného stlačeným vzduchem. Pohonnou jednotkou Pneumobilu je dvojčinný pneumatický válec. Čelo válce je součástí tohoto pneumatického pohonu, jež slouží k přívodu stlačeného vzduchu na píst. Brněnský tým Pneumobilu se již dříve zabýval problematikou úpravy geometrie této součásti. Před několika lety tým vydal vědecký článek „Inlet shape optimization of pneumatic engine pneumatic cylinder using CFD analysis“. Tento článek se podrobně zabývá optimalizací tvaru dutiny čela válce z pohledu proudění stlačeného vzduchu. Výsledná geometrie je tvarově složitá.

Cílem této práce je vyrobit čelo válce, na základě komplikované geometrie dodané výpočtářem. Metodou hybridní technologie přesného lití by mělo být možné zhotovit danou součást. Jedná se o kombinaci přesného lití s využitím aditivních technologií pro tvorbu spalitelných modelů. Výhodou této technologie je rychlá a cenově dostupná kusová výroba tvarově složitých součástí.

Pro úspěšné zhotovení odlitku je nutné provést úpravu dodané geometrie. Při správném nastavení dokáže numerická simulace odlévání predikovat vznik vad. Touto predikcí lze ověřit, zda provedená úprava geometrie odlitku byla úspěšná ještě před jeho zhotovením. Postup výroby pak zahrnuje tisk modelu technologií fused deposition modelling, výrobu keramické skořepiny s využitím zařízení Cyclone od společnosti MK technology, dále samotné zhotovení odlitku ve školní slévárně a také následné obrobení a montáž součástí.

Zda je těsnost zhotovené součásti dostatečná, lze vyhodnotit na základě měření poklesu tlaku ve srovnání s původním čelem válce. Optimalizovaná součást by dále ve srovnání s původní geometrií měla mít kladný vliv na účinnost pohonné jednotky vozidla. Jestliže bude dosaženo opakovatelných výsledků při měření otáček v nezatíženém stavu vozidla, bude možné tímto měřením validovat výsledky výše zmíněného vědeckého článku.

## 1 ČELO VÁLCE PNEUMATICKÉHO POHONU

Následující kapitola blíže popisuje Pneumobil, jeho pohon a součást čela válce.

### 1.1 Pneumobil

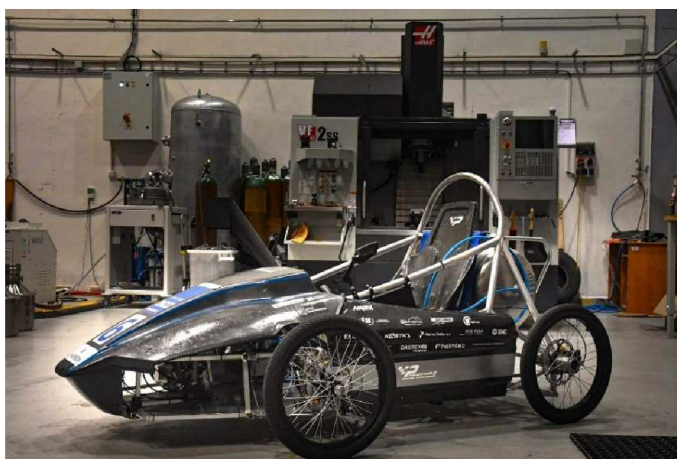
Jedná se o závodní vozidlo poháněné stlačeným vzduchem. Stlačený vzduch je uskladněn v tlakové nádobě. Pomocí řídicí elektroniky je z tlakové nádoby vzduch veden rozvodem nejprve do vzdušníku, který slouží k vyrovnání krátkodobých poklesů tlaku v pneumatickém obvodu. Vzduch je dále veden na dvojčinný pneumatický píst, jenž koná přímočarý vratný pohyb. Tento pohyb je převáděn na rotační pohyb kol vozidla pomocí hřebenového převodu v kombinaci se dvěma opačně orientovanými volnoběžkami a řetězovým převodem.

#### 1.1.1 Pneumobil racing team Brno

Tým Vysokého učení technického v Brně existuje od roku 2012 a je zajišťován Ústavem konstruování. Většinu členů tvoří studenti Fakulty strojního inženýrství. V současnosti tým disponuje dvěma závodními monoposty. Starším tříkolovým monopostem Falcon a novějším čtyřkolovým monopostem Typhoon. Na obrázku 1 je vidět monopost Typhoon, na kterém bude dále testováno nově zhotovené čelo válce. V tabulce 1 jsou zobrazeny jízdní vlastnosti obou vozů. [1]

Tab. 1 Jízdní vlastnosti monopostů[1].

	Rok výroby	Max. rychlost	Max. dojezd	Hmotnost
Typhoon	2021	51 km/h	7 km	97 kg
Falcon	2018	52 km/h	7,2 km	92 kg



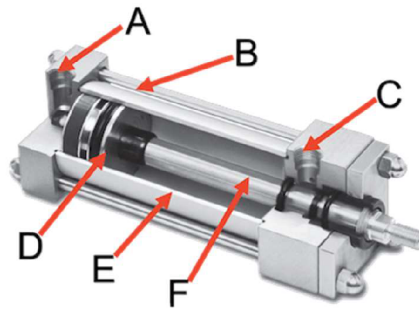
Obr. 1 Monopost Falcon [1]

#### 1.1.2 AVENTICS Pneumobile Competition

AVENTICS Pneumobile Competition byly závody vozů na stlačený vzduch, pořádané společností Emerson International v maďarském Egeru. Právě tyto závody, probíhající od roku 2008 do roku 2021, byly podnětem pro vznik brněnského týmu Pneumobilu. Soutěže, jejímž cílem bylo seznámit studenty technických škol s pneumatickými komponenty, se každoročně účastnilo okolo 37 týmů ze 7 zemí Evropy. V posledních dvou letech se však závody nekonaly. [2]

## 1.2 Pneumatické válce

Pohonnou jednotkou obou výše zmíněných monopostů je dvojčinný pneumatický válec o zdvihu 500 mm a vrtání o průměru 100 mm [1]. V řezu dvojčinným pneumatickým válcem na obrázku 2 je mimo jiné také zobrazena součást A (čelo válce). Tato práce se dále zabývá výrobou právě této součásti. Jejím účelem je plnění a následný výfuk stlačeného vzduchu.



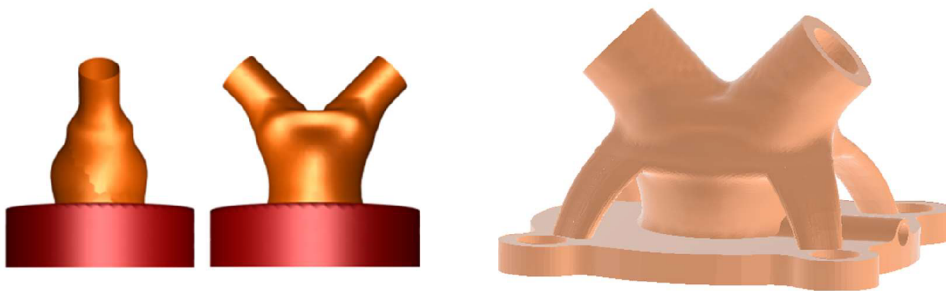
Obr. 2 Řez dvojčinným pneumatickým válcem; (A) čelo válce (zadní víko), (B) svorník, (C) přední víko, (D) píst, (E) vrtání, (F) pístnice. [3]

## 1.3 Vstupní geometrie čela

Geometrie čela i předního víka pneumatických válců byla již dříve upravena. K úpravám došlo u obou monopostů. Jednalo se o navýšení počtu vstupů stlačeného vzduchu do obou zmíněných součástí. Účelem navýšení počtu vstupů bylo dosažení vyšší rychlosti plnění válce a tím také vyššího výkonu pohonné jednotky.

Při zmíněných dřívějších úpravách však nebyla využita analýza geometrie z pohledu proudění. Odborný článek „Inlet shape optimization of pneumobile engine pneumatic cylinder using CFD analysis“ se věnuje právě této problematice. Numerickým řešením v softwaru Ansys Fluent byla stanovena optimalizovaná geometrie dutiny čela [4]. Za pomocí softwaru Ansys Mechanical byl následně stanoven optimální tvar čela pneumatického válce z pohledu zatěžování. Jako vstupní podmínky pro výpočet zde byly zadány optimalizovaná geometrie dutiny, přípojné rozměry a dále zatížení působící na zmíněnou součást [4].

Výsledná návrh součásti je zobrazen na obrázku 3. Tvarově složitá geometrie tohoto návrhu slouží jako vstupní podklad pro výrobu součásti čela válce.



Obr. 3 Vstupní geometrie vnitřní dutiny a čela válce [4]

## 2 ZVOLENÁ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

Následující kapitola pojednává o výrobní technologii zvolené pro výrobu optimalizovaného čela pneumatického válce. Výběr vhodné technologie byl omezen na základě tvarové složitosti požadované geometrie součásti. Níže je uvedeno několik technologií, za pomoci kterých lze docílit požadované geometrie.

Hybridní technologie přesného lití (též HIC) je jednou z technologií pomocí kterých lze zhotovit součásti o požadovaném tvaru [5]. Tato technologie je vhodná pro rychlou a cenově dostupnou výrobu komplexních prototypových součástí [6].

Kovové aditivní technologie mohou také dosáhnout požadovaného tvaru dutiny při malém počtu vyráběných součástí. Využity mohou být kupříkladu technologie SLM či DMLS [7][8]. Tisk kovu bývá rozměrově přesnější, avšak cenově méně dostupný v porovnání s hybridním technologií přesného litím [9].

Obrábění na víceosém CNC stroji propojeném s CAM softwarem je další možnou variantou při volbě technologie pro výrobu součásti o požadované geometrii. V porovnání s výše zmíněnými technologiemi je tato volba nejméně vhodná. Obrábění tvarově složitých dutin na CNC strojích je obecně velmi obtížné. Je také spojeno s nižší kvalitou obrobených ploch v porovnání s běžným obráběním. Cenově je navíc tato varianta méně dostupná než hybridní technologie přesného lití. [10]

Na základě výše zmíněných informací byla pro výrobu součásti vybrána právě hybridní technologie přesného lití. Následně byl na základě dostačujících mechanických vlastností, nízké měrné hmotnosti, dobré slévateľnosti a nízké ceny zvolen materiál odlitku AlSi10Mg. Jedná se o materiál, který je hojně využívaný ve slévárenství.

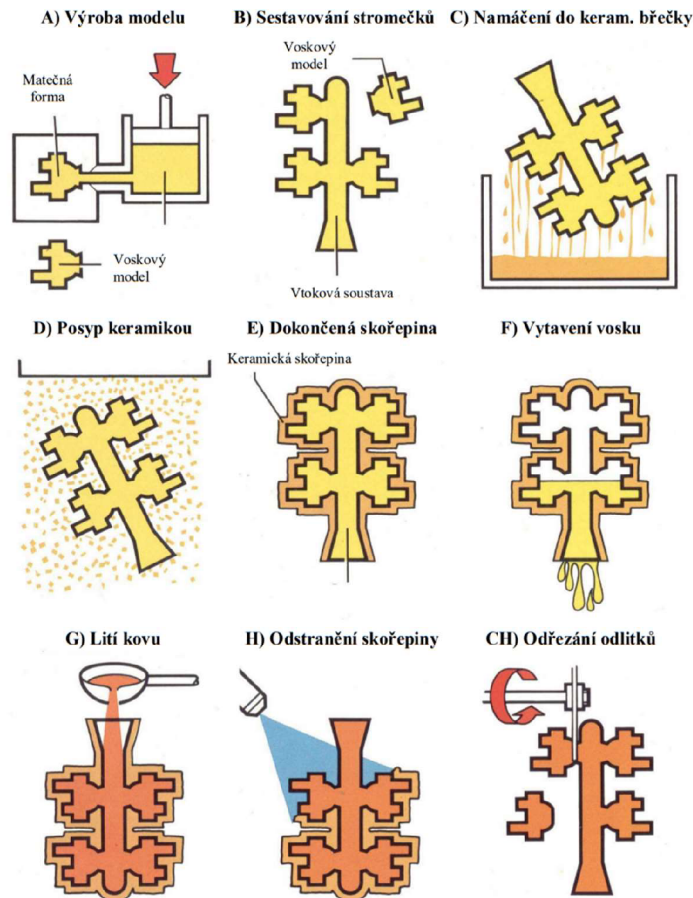
### 2.1 Hybridní technologie přesného lití

Hybridní technologie přesného lití kombinuje přesné lití s využitím aditivních technologií. Výhody této kombinace, využívané pro rychlou tvorbu prototypů, spočívají v nahrazení vytavitelného voskového modelu 3D tištěným spalitelným modelem [5]. Tato technologie eliminuje náklady spojené s výrobou forem pro tvorbu voskových modelů. Z vlastností aditivních technologií však plyne nárůst času pro výrobu jednotlivého modelu. Dojde také ke zhoršení rozměrové přesnosti i struktury povrchu výsledného odlitku [11].

#### 2.1.1 Přesné lití

Přesné lití, nebo též lití na vytavitelný model, je typ slévárenské technologie využívající vytavitelné modely pro tvorbu netrvalé keramické formy. Modely jsou nejčastěji vyráběny z vosku a mohou být spojovány ke vtokové soustavě do tzv. stromečků (viz obrázek 4) [12]. Voskové modely bývají tradičně zhotoveny litím nebo vstřikováním do trvalých kovových forem. Modely dále slouží jako podklad, na kterém je tvořena keramická forma. Po vytvoření keramické formy jsou modely odstraněny vytavením či vypálením [13]. Během tohoto procesu také dochází k tepelnému zpracování keramické formy žíháním [12]. Po odlití je forma odstraněna, čímž dochází k jejímu zničení.

Tato technologie je tradičně využívána pro výrobu tvarově složitých součástí. Není však považována za ekonomicky výhodnou pro kusovou výrobu odlitků [13]. Bez využití v kombinaci s aditivními technologiemi není tato technologie vhodná pro tvorbu prototypů, u kterých dochází k optimalizaci a častým změnám designu. Důvodem jsou náklady na výrobu trvalých forem, ve kterých jsou vytvářeny vytavitelné modely [5].



Obr. 4 Princip technologie vytavitelného modelu [12]

### 2.1.2 Rapid prototyping

Rapid prototyping je obecné označení pro výrobní technologie, které umožňují rychlou výrobu prototypů. Tedy součástí o nízkém počtu kusů, které jsou často v procesu optimalizace a jejichž geometrie se může měnit [5]. Nejčastěji se tento výraz využívá pro metody aditivních technologií, neboli 3D tisku, které jsou založeny na postupném vrstvení materiálu. Přidávaným materiálem mohou být kovy, plasty, vosky a jiné [7].

Aditivní technologie mohou u slévárenského procesu napomoci s tvorbou spalitelných modelů. Obecnou výhodou aditivních technologií je relativně rychlá a cenově dostupná výroba tvarově komplexních, navzájem rozdílných součástí. V tomto smyslu lze říci, že aditivní technologie umožňují velmi pružnou výrobu 3D modelů z dat vytvořených v CAD modelářích [5].

U hybridní technologie přesného lití se můžeme nejčastěji setkat s využitím fused deposition modelling a stereolithography aditivních technologií [11]. Tisk s využitím technologie SLA obecně dosahuje vyšší přesnosti v porovnání s technologií FDM. Pro stejnou velikost tisku je však tato technologie méně cenově dostupná [14]. Pro 3D tisk spalitelného modelu byla z cenových důvodů zvolena technologie FDM [14]. Horší kvalita tisku, kterou tato technologie dosahuje v porovnání s technologií SLA, neohrozila funkci součástí. Negativní vliv na kvalitu povrchu dutiny součástí byl odstraněn za pomoci postupu popsáného níže v kapitole Výroba keramické skořepiny.

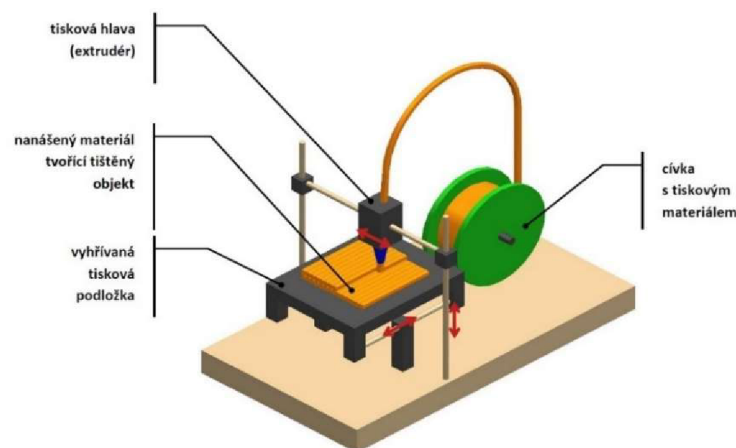
FDM je aditivní technologie založená na extruzi nataveného přídavného materiálu tryskou umístěnou na tiskové hlavě (viz obrázek 5). Tisková hlava se pohybuje po předem definované trajektorii. Trajektorie je definována pomocí strojového kódu. Tímto způsobem se z přídavného materiálu na tiskové podložce postupně po jednotlivých vrstvách vytváří trojrozměrný tištěný model. Přídavný materiál, nazývaný filament, je struna vyrobená z termoplastu. Struny filamentu jsou obvykle k dostání ve formě cívky, ze které je materiál postupně odvíjen během tisku. [11; 14]

Konstrukce FDM tiskáren se může lišit dle pohybů tiskové hlavy a podložky. Nejčastějším typem je kartézská konstrukce. Podložka se pohybuje zepředu-dozadu zatímco tisková hlava koná pohyb doprava-doleva a nahoru-dolů. Všechny osy jsou vzájemně kolmé. Představiteli jiných typů konstrukcí jsou kupříkladu konstrukce delta, corexy, polar a další. Tiskárny se mohou lišit také tvarem a rozměry trysky, konstrukčním provedením tiskové hlavy a dodatečným vybavením, jako je například senzor filamentu a jiné. Konstrukce má vliv na rychlost, kvalitu i maximální možné rozměry tisku. [14]

Tiskové podložky mohou být vyrobeny z nejrůznějších materiálů. V současnosti jsou nejrozšířenější odnímatelné ocelové podložky potažené separační fólií. Podložky bývají vyhřívány. Vyhřívání snižuje riziko zkroucení a odloupení během tisku. Některé tiskárny mohou být kompletně zakrytovány. V tiskové komoře je pak udržována stálá teplota, což vede ke zvýšení kvality tisku. [14]

Kvalita tisku záleží na rozlišení tiskárny. Rozlišení se odvíjí od výšky tiskové vrstvy a průměru trysky. Častý průměr trysky je 0,4 mm. Menší průměr trysky umožňuje vyšší kvalitu tisku, zároveň však tisk výrazně zpomaluje. Nastavitelná výška tiskové vrstvy má na kvalitu i rychlost tisku podobný vliv jako průměr trysky. Dalším aspektem ovlivňujícím kvalitu tisku je vznik tiskových chyb. Na vznik tiskových chyb má vliv konstrukce tiskárny. Větší rozměry tiskáren zvyšují nároky na přesnost a tuhost konstrukce. Rozměrnější či tvarově komplexnější modely je obecně vhodné rozdělit na více výtisků. Výtisky lze následně spojit. Kvalitu povrchu tištěných modelů lze upravit broušením, tmelením či leptáním vhodnými přípravky. [11; 14]

Dobu tisku lze snižovat nejen za cenu snížení kvality. Vhodná orientace modelu, tvar a hustota výplně či vhodná volba podpěr mohou dobu tisku výrazně snížit. Vhodný tvar a hustota výplně se odvíjí od následného využití tištěného modelu. [11; 14]



Obr. 5 Princip FDM tiskárny [15]

### 3 GEOMETRIE ODLITKU

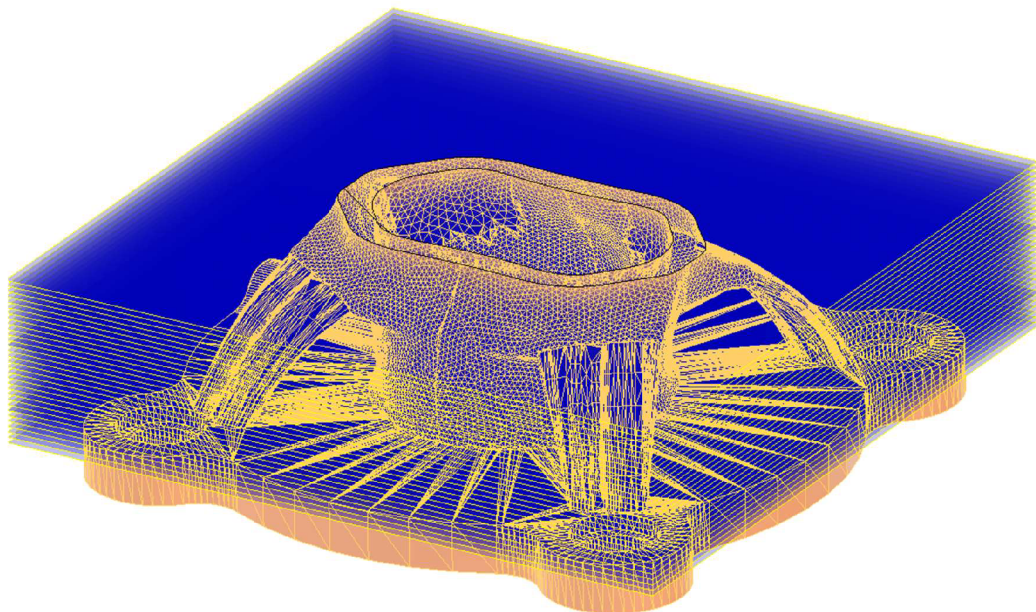
Tato kapitola popisuje zpracování vstupní geometrie součásti a její úpravu z technologického hlediska. Zmíněná úprava je validována numerickou simulací slévárenského procesu v následující kapitole. Upravená geometrie bude později využita při tisku spalitelného modelu.

#### 3.1 Konverze geometrie

Geometrie dodaná výpočtářem je výstupem z prostředí Ansys. Pro výpočet v tomto prostředí je nutná diskretizace. Výstupní generovaná geometrie byla z těchto důvodů dodána ve formátu STL.

Jestliže má být provedena úprava geometrie z technologického hlediska, je nutné provést konverzi souboru z STL na jiný typ formátu. Formát STL je definován za pomoci trojúhelníkových ploch a jejich normál [16]. Geometrie tělesa zadaného v tomto formátu představuje v CAD modelářích síťový prvek neboli „mesh“. Pro umožnění dalšího zpracování dodané geometrie, je nutné ji převést na objemové těleso v univerzálním formátu STEP nebo jiných formátech, nativních pro specifický modelář [17][16].

Pro tuto činnost byl vybrán modelář Autodesk Inventor. Důvodem je dostupnost studentské verze tohoto programu. Nativním formátem pro soubory součástí v Inventoru je IPT. Inventor disponuje doplňkem Mesh Enabler [18]. Tento doplněk slouží pro konverzi síťových těles na tělesa plošná či objemová. Doplňek pracuje dobře pro soubory o menším počtu trojúhelníkových ploch. Dodaná geometrie obsahuje 94 256 těchto ploch. Vstupní geometrii proto bylo možné převést pouze na soubor plošných těles. Při dalších pokusech o převedení na objemové těleso modelář zahlásil chybu, nebo došlo k jeho výpadku. K podobným výsledkům došlo i při použití modeláře Solidworks či Fusion 360. Ke srovnatelným výsledkům vedlo i použití dalších programů specializovaných na opravu souborů ve formátu STL, jako je například All3DP a jiné [19].



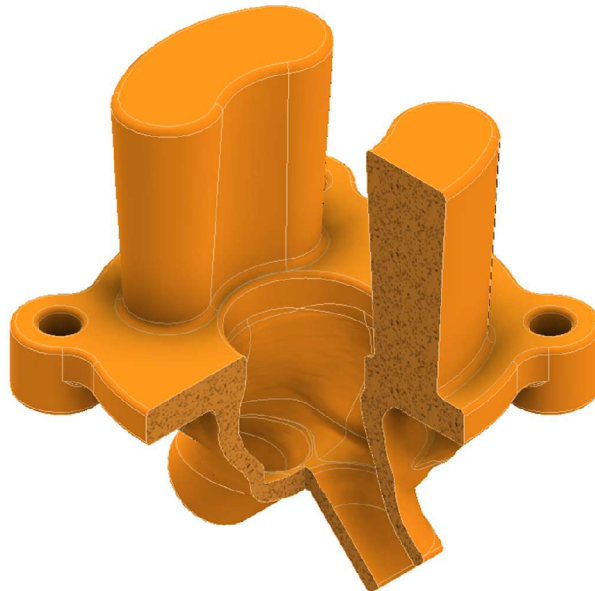
Obr. 6 Roviny připravené na tvorbu náčrtů modeláři Inventor

Další možnou metodou pro získání objemového 3D modelu na základně vstupní geometrie je kompletní přemodelování v prostředí CAD modeláře [17]. Pro tuto činnost byl opět vybrán modelář Autodesk Inventor. Po otevření souboru v modeláři nebyla provedena konverze geometrie ze síťového tělesa. Síťové těleso bylo ponecháno jako referenční. Pomocí příkazu „Měření“ bylo možné snadno odměřit rozměry na původním modelu. Jednoduše geometricky popsatelné části modelu, jako jsou například přípojné rozměry byly modelovány napřímo [17]. Geometricky komplexnější rozměry jako vnitřní dutina či podpůrná žebra byly modelovány za pomoci příkazu „Šablonování“. Nejprve by vytvořeno dostatečné množství rovin vzájemně posunutých o určitý pravidelný inkrement (viz obrázek 6). Na těchto rovinách byla pomocí náčrtů popsána geometrie v řezu součásti [17]. Jednotlivé náčrty byly následně spojeny v plošná tělesa pomocí příkazu „Šablonování“. Takto vzniklá plošná tělesa bylo následně možné spojit v uzavřenou plochu pomocí příkazu „Hraniční záplata“. Uzavřenou plochu bylo poté možné převést na objemové těleso pomocí příkazu „Sešíté plochy“. S takto získaným objemovým tělesem lze dále pracovat při úpravě geometrie.

### 3.2 Úprava geometrie

Úprava geometrie z technologického pohledu měla několik fází. Nejprve bylo nutné určit polohu formy při odlévání. Spodní část čela válce je masivnější a dochází k postupnému zužování směrem nahoru. To není vhodné z pohledu tuhnutí. Z tohoto důvodu došlo k otočení pozice odlitku (viz obrázek 7). Otočení umožní usměrněné tuhnutí taveniny tak, aby byl zaručen stálý přívod tekutého kovu do místa tuhnutí [20].

Bylo provedeno zaslepení díry pro pneumatickou brzdu a sjednocení průměru na čtyřech obvodových dírách pro šrouby. Tato místa by mohla být problematická při tvorbě keramické formy. Špatný přístup keramického posypu do těchto míst by mohl způsobit oslabení formy a její následné porušení při odlévání [13]. Z konstrukčních důvodů bylo dále nutné rozšířit výšku součásti v místech děr pro šrouby [21].



Obr. 7 Čtvrtinový řez technologicky upraveným modelem



Tepelné uzly jsou části odlitku o větším nahromaděném materiálu v porovnání se svým okolím. Důsledkem pomalejšího chladnutí těchto částí odlitku je vznik nežádoucích staženin. Graficky je možné posoudit vznik staženin například metodou vepsaných koulí. [20]

Nálitky jsou zásobníky roztaveného kovu sloužící jako cílené tepelné uzly. Metodou vepsaných koulí můžeme opět aproximovat směr tuhnutí. Je snaha o to, aby byl náletek posledním místem tuhnutí taveniny v odlitku, a tedy místem ve kterém se cíleně formuje staženina. Nálitky jsou po odlití odstraněny. Nálitky (viz obrázek 7) byly umístěny nad místa s předpokládanými tepelnými uzly. [20]

Pro vtokovou soustavu byl zvolen netradiční přístup. Jako vtoková soustava slouží jeden z nálitků. S tím souvisí zaslepení příruby čela válce a rozšíření této plochy o příslušný přídavek na obrábění. Přídavek na obrábění, stanovený na základě Výběrů z norem činil 2 mm [22]. Volba vtokové soustavy v těchto místech má výhodu z hlediska odstranění, jelikož je umístěna na obráběné ploše. Ačkoli by umístění vtokové soustavy na spodní stranu odlitku bylo možné, zvedalo by se tak riziko zatuhnutí vtokové soustavy během naplňování formy. Příčinou je malá tloušťka stěny v těchto místech. Spodní vtok je nevýhodný i s ohledem na rozložení teplotního pole, které by v tomto případě nenapomáhalo usměrněnému tuhnutí. Docházelo by totiž k vyššímu prohřátí spodní části odlitku.

Oslabení vlivu předpokládaných tepelných uzlů bylo dále docíleno pozvolnou změnou tloušťky stěny [20]. Tloušťka stěny se rozšiřuje od spodní strany odlitku nahoru směrem k nálitkům. To lze pozorovat v řezu na obrázku 7. Zároveň bylo ověřeno, že v žádném místě není tloušťka stěny pod minimální povolenou hodnotou, která dle Výběrů z norem činí 4 mm [22]. Veškeré hrany byly zaobleny příslušným poloměrem zaoblení [22].

Smrštění, ke kterému dochází při chladnutí odlitku, je zapotřebí zahrnout do modelu [20]. Ze zkušeností s hybridní technologií přesného lití vyplývá, že zvětšení modelu pro odlitky z materiálu AlSi10Mg činí 1 %. Při exportu souboru byl z tohoto důvodu pro model nastaven faktor zvětšení 1,01. K podobným hodnotám vede také níže uvedený výpočet pro jednotkovou teplotní objemovou roztažnost. Tento vzorec však předpokládá neměnnou hodnotu koeficientu teplotní objemové roztažnosti, rovnoměrné chladnutí a zanedbává vliv formy [20]. V tabulce 2 jsou vypsány vlastnosti materiálu AlSi10Mg, které jsou potřebné pro výpočet.

Tab. 2 Vybrané vlastnosti AlSi10Mg dle EN AC-43100 AlSi10Mg.

Materiál	Teplota tuhnutí (likvidus-solidus)	Teplotní součinitel roztažnosti
AlSi10Mg	592-539 °C	$22,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Pro jednotkovou teplotní objemovou roztažnost platí následující vztah:

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta T) = (1 + \beta \Delta T) = (1 + (539 - 25) \cdot 22,8 \cdot 10^{-6}) = 1,012 \quad (3.1)$$

kde:  $V_0$  – objem tělesa při původní teplotě [ $\text{m}^3$ ],

$\Delta T$  – rozdíl teplot [K],

$\beta$  – koeficient teplotní objemové roztažnosti [-].

## 4 NUMERICKÁ SIMULACE ODLÉVÁNÍ

Numerické simulace ve slévárenství umožňují testovat návrhy a nastavení technologie liti. Simulace tak mohou kupříkladu usnadnit proces výběru vhodné geometrie odlitku, tvaru vtokové soustavy či podmínek panujících při odlévání. Časté je také jejich využití při analýze stávajících technologií a vyhodnocení vad vyskytujících se v odlitcích. [23]

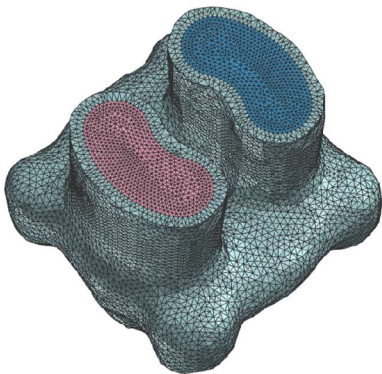
Výpočet simulace je proveden na základě numerických metod. Při těchto metodách je zjednodušena geometrie a výpočet je proveden na základě velkého počtu algebraických rovnic. Toto zjednodušení geometrie se nazývá diskretizace. Výpočet je řešen v konečném počtu uzlů. Jedná se tedy pouze o aproximaci řešení, jehož přesnost je závislá na diskretizaci. Jednotlivé metody se poté mohou lišit například způsobem tvorby sítě mezi uzly. Při výpočtu je dále nutné zadat počáteční podmínky a materiálové charakteristiky do všech bodů takto diskretizované geometrie. Nastavení vstupních dat má dopad na správnost výsledků simulace. Materiálové charakteristiky bývají obsaženy v knihovnách výpočetních softwarů. [23]

Simulace odlévání zde byla provedena v prostředí simulačního softwaru ProCAST. Jedná se o pokročilý nástroj určený pro simulaci procesů odlévání vyvinutý firmou ESI Group [24]. Z fyzikálního pohledu je software ProCAST postaven na zákonu zachování hmotnosti (zobecněná rovnice kontinuity), zákonu zachování hybnosti (Navier-Stokesova rovnice), zákonu zachování energie a také rovnici přenosu tepla [25].

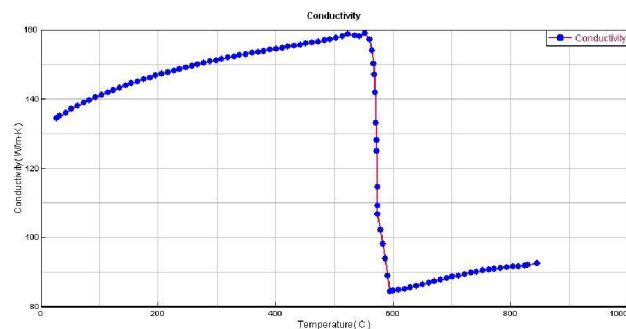
K numerickému řešení využívá software metodu konečných objemů (FVM), metodu konečných prvků (FEM) a Multi-Grid linear solver [24]. Druh využitých metod se liší pro jednotlivé analýzy podle typu úlohy. Tento software nabízí následující základní moduly pro analýzu plnění a tuhnutí:

- Fluid flow module (modul proudění) – Tento modul umožňuje simulovat účinky proudění, turbulenci, tixotropní chování kapalin a pevných látek a proudění v porézních médiích (např. filtry). Tixotropní chování představuje změnu viskozity na základě rychlosti smyku v dané látce. Tento modul se využívá při analýze plnění formy. [24]
- Thermal module (modul tuhnutí a přenosu tepla) – Tento modul se využívá při analýze teplotních polí během tuhnutí a chladnutí odlitku. Do výpočtu zahrnuje také latentní teplo při přechodu kovu do nové fáze pomocí entalpické rovnice [26]. Slouží k predikci porozity a vzniku staženin v odlitku.

Existují také nadstavbové moduly jako modul pro analýzu napětí nebo modul mikrostruktury odlitku. Při simulaci bylo využito pouze modulu pro přenos tepla a modulu pro analýzu proudění. Software také disponuje rozsáhlou knihovnou materiálů (Ni, Co, Ti, TiAl, Al, Ocel a další slitiny) [24].



Obr. 8 Nastavení FEM sítě pro simulaci



Obr. 9 Tepelná vodivost AlSi10Mg

#### 4.1 Preprocessing a nastavení simulace

Preprocessing zahrnuje vytvoření nebo import geometrických dat a jejich využití při tvorbě konečnoprvkové sítě. Výše upravený soubor byl exportován do formátu IGES. Tento export umožnil kompatibilitu daného souboru s prostředím simulačního softwaru ProCAST. Při takovémto exportu mohou vznikat chyby v geometrii, kupříkladu při nevhodně zvoleném zaoblení. Tyto chyby lze odstranit předefinováním chybové geometrie nebo pomocí vhodných nástrojů přímo v prostředí simulačního softwaru. Importovaná geometrie byla dále rozdělena na tři sekce (Odlitek, Nálitek 1 a Nálitek 2). Toto rozdělení později usnadnilo odečítání výsledků. Za pomoci odsazení byl dále vytvořen model skořepiny o tloušťce 5 mm. Zmíněná hodnota odpovídá tloušťce skořepiny později využitě při výrobě odlitku. Následně byla vytvořena uzavřená hraniční oblast sloužící k nastavení tepelného záření. Spojitá geometrie byla nahrazena generovanou sítí popsanou za pomoci tetrahedronových (čtyřstěnných) prvků. Tato objemová síť prvků je vidět na obrázku 8.

Tělesům popsaným objemovou sítí je zapotřebí nastavit materiál. Materiály jednotlivých těles byly nastaveny dle tabulky 3 a odpovídají materiálům později využitým při realizaci odlitku. Vlastnosti nastavených materiálů jsou dostupné z knihovny programu ProCAST a jsou definovány jako funkce teploty. Na obrázku 9 je zobrazena hodnota tepelné vodivosti materiálu AlSi10Mg v závislosti na teplotě.

Tab. 3 Nastavené materiály

Těleso	Odlitek	Nálitek 1	Nálitek 2	Skořepina
Materiál	EN AC-43100 AlSi10Mg	EN AC-43100 AlSi10Mg	EN AC-43100 AlSi10Mg	Molochite (TM)

Při procesu bylo nastaveno gravitační lití se standardní hodnotou gravitačního zrychlení, která činí  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . V tabulce 4 jsou vidět nastavené hodnoty naklápění. Naklápění bylo použito k eliminaci turbulence taveniny při plnění formy. Dále byla nastavena rychlost, teplota a místo vtoku taveniny. Dalšími okrajovými podmínkami nastavenými pro výpočet byla počáteční teplota formy a místnosti. Konkrétní hodnoty okrajových podmínek jsou zobrazeny v tabulce 5. Dále byl nastaven typ rozhraní mezi jednotlivými tělesy. Při nastavení záření pro uzavřenou oblast byla použita hodnota emisivity 0,9 a teplota  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tyto hodnoty vycházejí ze zkušeností pro školní slévárnu.

Tab. 4 Hodnoty naklápění v čase

Čas [s]	0	6	8	10
Úhel [°]	-45	-30	-20	0

Tab. 5 Nastavené okrajové podmínky

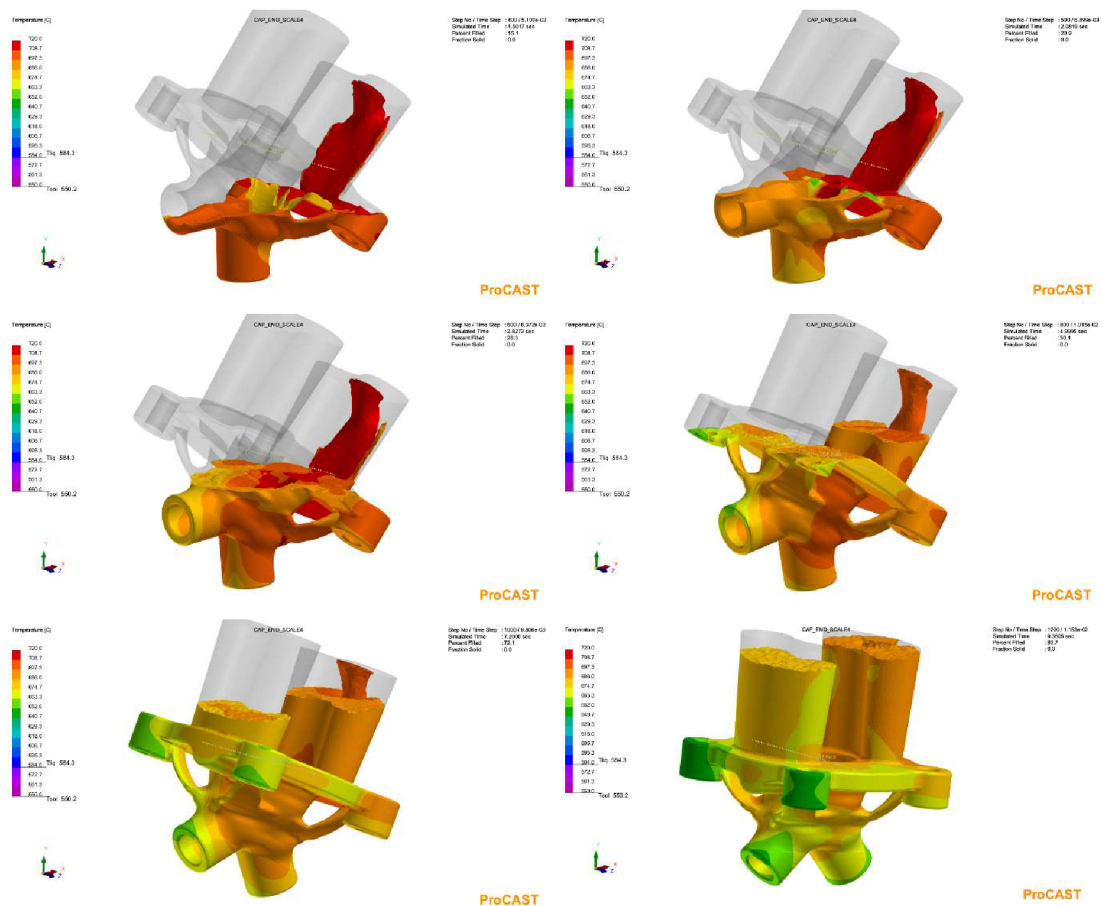
Podmínka	Rychlost vtoku	Teplota taveniny	Teplota formy	Teplota místnosti
Hodnota	0,16914 m/s	720 °C	550 °C	30 °C

## 4.2 Analýza plnění

Proces odlévání lze rozdělit na plnění formy a následné tuhnutí taveniny v odlitku. Po úspěšném výpočtu nastavené numerické simulace jsou vyhodnoceny její výsledky. Během analýzy plnění keramické skořepiny bylo vyhodnoceno zda nedojde k zatuhnutí vtokové soustavy, a tedy zda bude možné skořepinu zcela naplnit taveninou.

### 4.2.1 Rozložení teplot při plnění

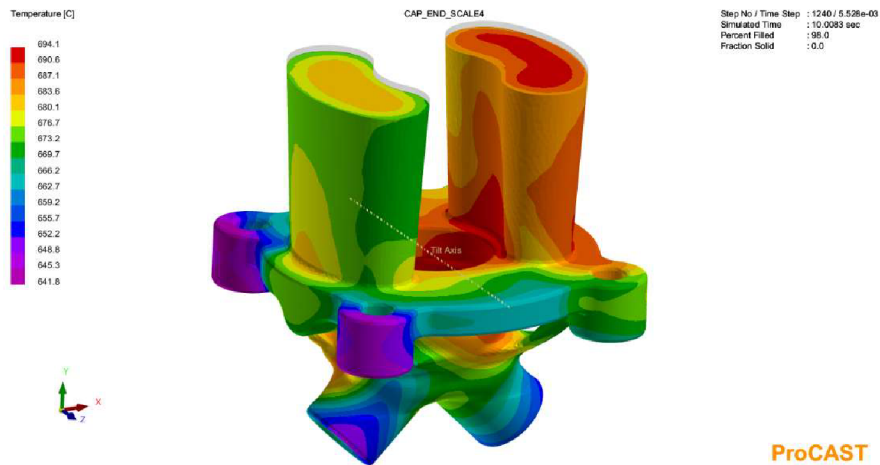
Na obrázku 10 je zobrazeno rozložení teplot taveniny v několika časových okamžicích. Na počátku je skořepina nahnuta, což zajišťuje hladší průběh jejího plnění. Již na první pohled není z hlediska proudění počátek plnění zcela ideální. S postupným plněním formy však dojde ke stabilizaci hladiny a plnění je dále rovnoměrnější. Teplota taveniny je vykreslena prostřednictvím barev, které odpovídají zobrazené stupnici. V pravém horním rohu je dále zobrazena informace o čase (simulated time), procentu zaplnění formy (percent filled) a podílu tuhé fáze (fraction solid). Podíl tuhé fáze umožňuje ověřit zda nedochází k tuhnutí taveniny již během plnění formy. Tuhnutí v průběhu plnění by mohlo vést ke tvorbě studených spojů, které jsou nežádoucí.



Obr. 10 Teplotní pole při plnění formy

Dle simulace by nemělo dojít k zatuhnutí vtokové soustavy během plnění. Teplota taveniny se v žádném časovém okamžiku neblíží teplotě likvidu a podíl tuhé fáze tak zůstává roven nule. Taveninu by nemělo být problém dolít a zároveň by nemělo docházet ke tvorbě studených spojů. To je vidět i na obrázku 11, který zobrazuje rozložení teplot po úplném naplnění keramické skořepiny.

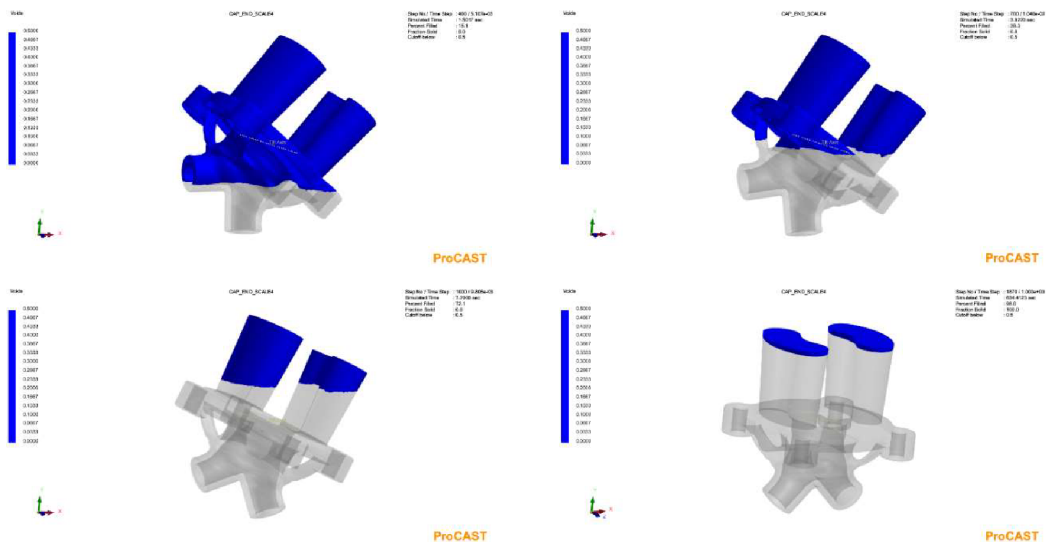
Na tomto obrázku lze dále pozorovat, že nejteplejším místem po naplnění skořepiny je oblast vtokové soustavy. Nejchladnější je pak tavenina na tenkých okrajích odlitku. Tato chladnější místa se posléze stanou místy počátku tuhnutí taveniny.



Obr. 11 Teplotní pole po naplnění formy

#### 4.2.2 Vzduch při plnění

Během plnění je dále vhodné vyhodnotit tok vzduchu. Je možné posoudit zda nedojde k jeho zachycení ve formě. Uzavření objemu vzduchu může být další příčinou vzniku vad v odlitku. Vzduch při plnění formy je zobrazen na obrázku 12. Krátce po počátku plnění dochází k jeho stabilizaci a na konci plnění již nezůstává žádný vzduch uzavřený v tavenině.



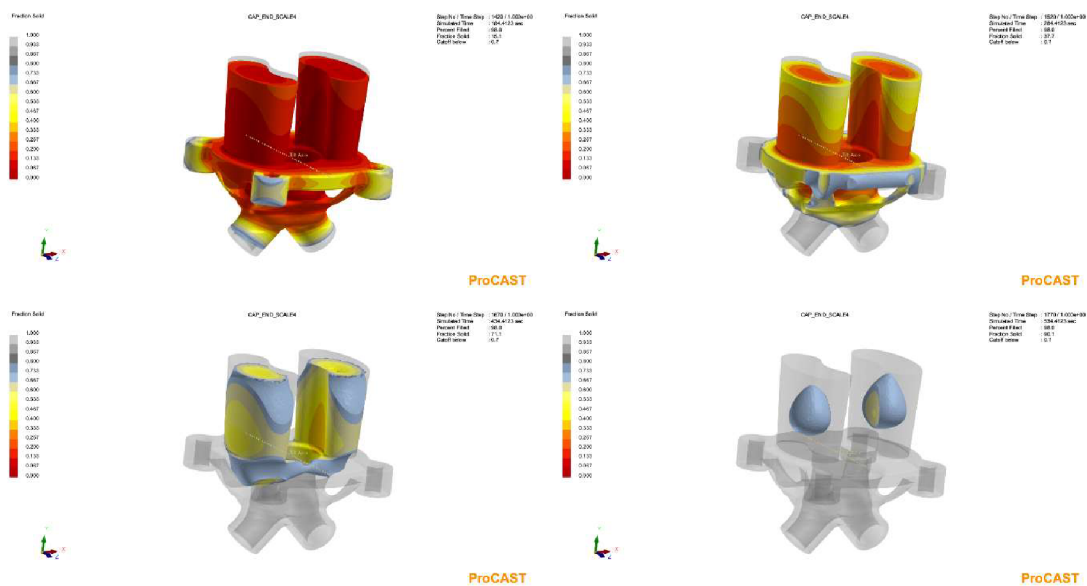
Obr. 12 Vzduch při plnění formy

### 4.3 Analýza tuhnutí

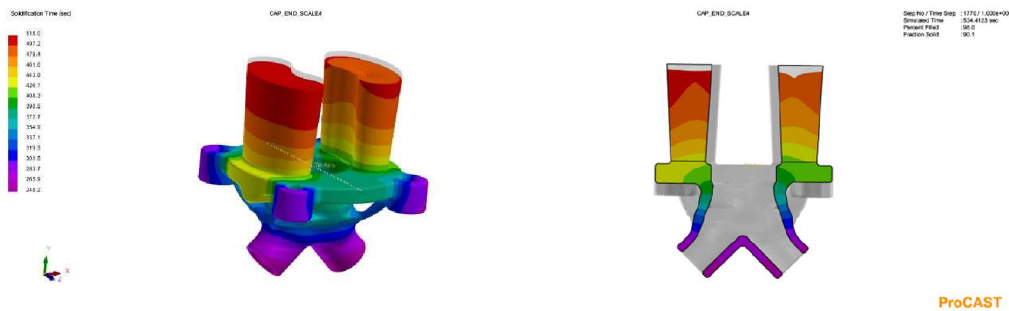
Kromě plnění formy lze provést také analýzu tuhnutí taveniny. Za pomoci výsledků numerické simulace může být provedena predikce vzniku staženin či ředin. Jsou zde také nástroje pro vyhodnocení postupu tuhnutí taveniny, které mohou sloužit kupříkladu pro ověření funkčnosti nálitků.

#### 4.3.1 Podíl tuhé fáze

Průběh tuhnutí lze zobrazit například za pomoci podílu tuhé fáze v odlitku. Tento podíl je znázorněn na obrázku 13. Na tomto obrázku jsou vykresleny oblasti, ve kterých podíl tuhé fáze činí méně než 0,7 (70 %). Jedná se tedy o zobrazení míst, ve kterých je kov stále tekutý. Lze pozorovat, že tuhnutí probíhá směrem od okrajů a spodní části odlitku. Tuhnutí pak pokračuje směrem nahoru za stálého doplňování taveniny z nálitků. K uzavření taveniny pak dochází právě v nálitcích. Na základě těchto poznatků lze říci, že nálitky splňují svoji funkci. Slouží jako účinné zásobníky tekutého kovu po celou dobu tuhnutí. Jsou zároveň cílenými tepelnými uzly, které do sebe vytahují staženiny z odlitku. K podobným závěrům o usměrněném tuhnutí lze dojít také za pomoci obrázku 14, na kterém je zobrazena doba tuhnutí jednotlivých částí odlitku.



Obr. 13 Podíl tuhé fáze pod 0,7



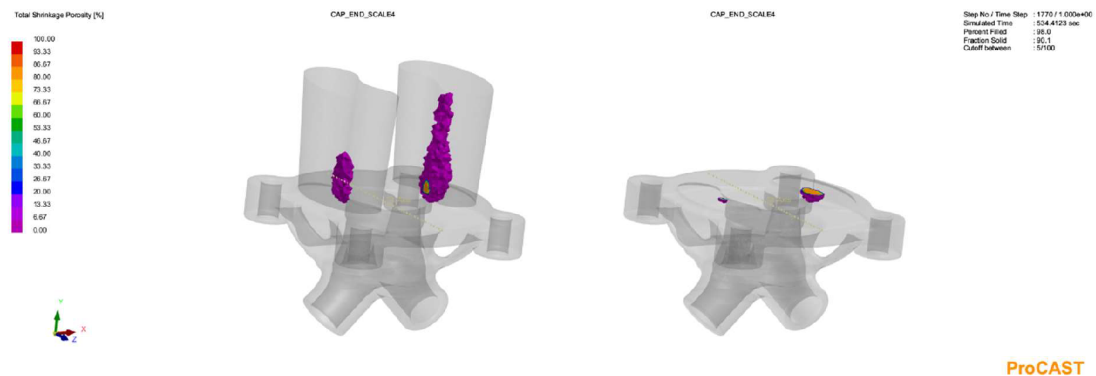
Obr. 14 Doba tuhnutí

### 4.3.2 Predikce vzniku porozity

Při analýze tuhnutí lze dále vyhodnotit výsledek „Total Shrinkage Porosity“. Jedná se o predikci vzniku porozity v odlitku. Zobrazeny jsou části odlitku, v nichž po ztuhnutí chybí určité procento kovu. Pomocí zobrazení „Cut off“ byla vykreslena místa, ve kterých predikovaná porozita překračuje hodnotu 5 %. Na obrázku 15 jsou pak vidět právě tato místa.

Dle predikce vznikají dva shluky porozity, které jsou z větší části lokalizované v nálitcích. Lze předpokládat, že v těchto místech dojde ke vzniku staženin. Staženiny v nálitcích ničemu nevadí, neboť nálitky jsou později odstraněny.

Na témže obrázku je vpravo zobrazena ta samá predikce vzniku porozity v odlitku po apretaci. Zde je již porozita nežádoucí. Porozita by mohla zasahovat do odlitku i po obrobení. Tento problém byl při realizaci odlitku vyřešen obalením skořepiny tepelnou izolací v oblasti nálitků, což způsobilo vytažení tepleného uzlu o něco výše. Na základě simulace bylo určeno, že takto upravenou geometrii lze využít při odlévání součásti čela pneumatického válce. [20]



Obr. 15 Porozita nad 5 % s nálitky a v samotném odlitku

## 5 POSTUP VÝROBY

Tato kapitola popisuje konkrétní postup, jímž byla zhotovena součást čela pneumatického válce. Zmiňuje také chyby v technologickém postupu, které vedly k vadám na výsledné součásti.

### 5.1 Rozdělení modelů pro přesné lití

Modely lze rozdělit do tří skupin dle materiálu a způsobu odstranění ze skořepiny:

Spalitelné modely jsou vyrobeny z materiálu, u kterého při odstraňování ze skořepiny dochází ke kombinaci vytavení i hoření. Do této skupiny patří právě plastové modely, vyrobené kupříkladu za pomoci aditivních technologií. Tavenina je lita do prázdné keramické skořepiny.

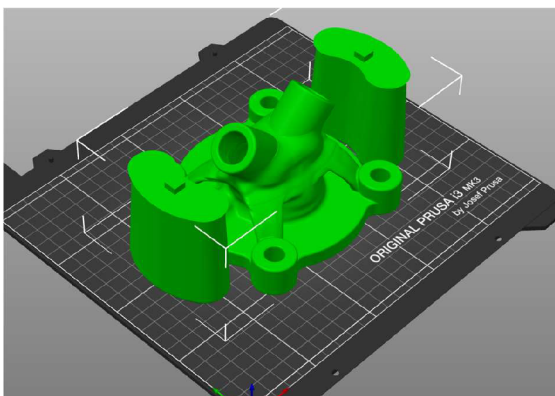
Vytavitelné modely jsou takové modely, u nichž při odstraňování ze skořepiny materiál odtéká. Jedná se nejčastěji o voskové modely. Tavenina je i v tomto případě lita do prázdné keramické skořepiny.

Vypařitelné modely mohou být vyrobeny například z polystyrenu. Tyto modely se před litím neodstraňují. Model je z formy vypařen během odlévání. U technologie přesného lití se však tento typ modelů spíše nepoužívá.

### 5.2 3D Tisk spalitelného modelu

Technologicky upravená geometrie odlitku je tvarově složitá. Tisk takto složité geometrie jako jednoho dílu je náročný. Geometrie proto byla rozdělena na tři části (viz obrázek 16). Zjednodušení geometrie zvýšilo kvalitu tisku a také snížilo množství potřebných podpor. Snížení množství podpor vedlo k menší spotřebě filamentu a rychlejšímu tisku. Na takto rozdělených součástech modelu byly v CAD modeláři vytvořeny zámky čtvercového tvaru (viz obrázek 16). Zámky umožňují kompletaci modelu po vytištění.

Geometrie modelu byla dále převedena do formátu STL. Převod do tohoto formátu umožňuje využití upravenou geometrii při nastavení tisku. Při exportu do STL dochází k nahrazení spojitě geometrie konečným počtem trojúhelníkových ploch. Pro zachování dostatečného rozlišení je zapotřebí vhodně nastavit kvalitu exportu. Vyšší množství ploch zvyšuje velikost souboru, zachovává však také vyšší rozlišení pro následný tisk. Export do tohoto formátu byl nastaven v prostředí CAD modeláře Autodesk Inventor.



Obr. 16 Nastavení tisku PrusaSlicer



Obr. 17 Zkušební tisk PLA



Nastavení tisku proběhlo v programu PrusaSlicer. Byl nastaven typ tiskárny Original Prusa i3 MK3S s tryskou o průměru 0,4 mm (viz obrázek 18). Toto nastavení odpovídá použité tiskárně. Dále byl nastaven druh filamentu a výška vrstvy. Výška vrstvy a druh filamentu se lišil pro zkušební tisk a tisk výsledného spalitelného modelu. Na základě nastavení byl následně vygenerován G-code, neboli strojový kód tiskárny.

Tisku spalitelného modelu předcházela zkušební tisk. Smyslem zkušebního tisku bylo ověření tisknutelnosti daného tvaru. Zkušební tisk byl zhotoven z PLA filamentu. PLA je často využívaným materiálem pro technologii FDM. Jedná se o relativně levný druh filamentu, vhodný i pro rozměrnější výtisky [14]. Při tomto tisku nebyly zahrnuty nálitky. Nastavená výška vrstvy byla vyšší než u výsledného modelu, díky čemuž byl tisk rychlejší. Zkušební tisk je vidět na obrázku 17.

Po ověření tisknutelnosti byl zhotoven tisk spalitelného modelu. Pro tento tisk byl jako materiál filamentu zvolen Polymaker Polycast. Při přesném lití je problémem objemová expanze modelu, která doprovází jeho vytavení. Teplená roztažnost modelu bývá zpravidla vyšší než tepelná roztažnost keramické skořepiny. Vzniklá napětí mohou následně způsobovat praskání skořepin. Materiál Polymaker Polycast má menší tepelnou roztažnost oproti běžným materiálům využívaným na filamentech. Tento materiál byl navržen právě pro hybridní lití se spalitelným modelem.

Cílem je, aby se při vytavení model zhroutil sám do sebe a nepoškodil tak skořepinu. Z tohoto důvodu byla nastavena hustota výplně modelu na pouhých 7 %. Výška vrstvy byla nastavena na 0,1 mm. Nastavení pozice modelu na podložce je vidět na obrázku 16.



Obr. 18 Tiskárna Prusa i3 MK3S [27]

### 5.3 Příprava modelu pro výrobu skořepiny

Před zhotovením keramické skořepiny bylo zapotřebí provést některé úpravy tištěného modelu. Dutina odlitku vyžaduje z konstrukčních důvodů vyšší kvalitu povrchu. Na modelu byla proto provedena úprava tohoto povrchu tmelením. Na povrch byla v těchto místech nanášena jemná vrstva vosku (viz obrázek 20). Vosk srovnal nerovnosti vrstev vzniklých tiskem.

Pomocí pájecí pistole byly proděravěny všechny tři části modelu. Drobné otvory byly zhotoveny na místech, která nejsou klíčová pro konečný odlitek. Těmito místy jsou spoje mezi modely nálitků a samotným modelem odlitku. Nálitky byly dále proděravěny na vrchní ploše. Perforace byly zhotoveny za účelem úniku vzduchu z modelu při jeho vypalování. Expanze vzduchu lapaného v dutině by totiž mohla způsobit porušení skořepiny.

Modely byly k sobě přichyceny lepením. Pozice nálitku byla ustavena pomocí výše zmíněných čtvercových zámků viditelných na obrázku 20. Na obrázku 21 je zobrazen výsledný slepený model. Po zaschnutí lepidla byla na spoj nanášena vrstva vosku. Vosk byl roztaven pájecí pistolí a pomocí kapilárního jevu byl vtažen do spáry tohoto spoje (viz obrázek 22). Tímto byla zajištěna nepropustnost spoje, klíčová pro správnou tvorbu skořepiny.

Pro tvorbu skořepiny je dále nutné připevnit model k unašeči. Před připevněním byl unašeč očištěn od zbytků předchozí skořepiny a byl natřen vrstvou separačního vosku. Při natírání je separační vosk v tekutém stavu. Po odpaření rozpouštědla vytváří vosk tenkou vrstvu na povrchu unašeče. Tato vrstva později slouží ke snadnějšímu odstranění přebytečné skořepiny vytvořené na unašeči. Pro spojení unašeče s modelem byly použity čtyři vruty (viz obrázek 22). Vruty byly nahřaty horkovzdušnou pistolí nad teplotu skelného přechodu materiálu použitého pro spalitelný model. Nahřáté vruty byly vtlačeny do spoje. Po zchlazení vrutů bylo provedeno jejich dotažení. Tento postup umožnil rychlé zhotovení spoje, které zároveň předešlo lomu tištěného modelu.

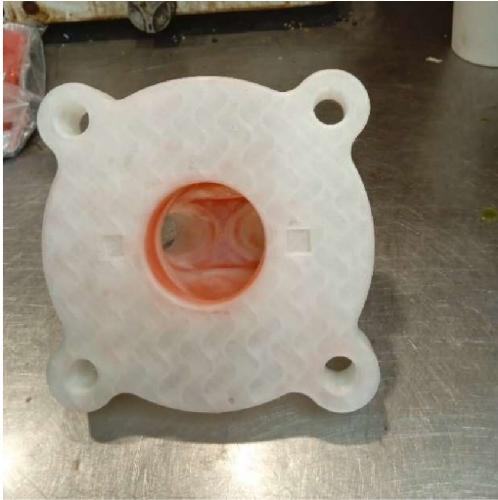
#### 5.4 Výroba keramické skořepiny

Model je namáčen do keramické suspenze složené z pojiva a plniva. Pojiva jsou koloidní roztoky, které mohou být na bázi hydrosolů či alkosolů. Z bezpečnostních a ekologických důvodů v současnosti převládá využití pojiv na bázi hydrosolů. Jako plniva bývají využívány žáruvzdorné křemenné moučky. Namáčení je prováděno pod vícero úhly tak, aby suspenze pokryla celý povrch modelu. Při vynoření modelu ze suspenze je nutné její přebytek nechat z modelu okapat. Musí být zaručeno míchání suspenze, aby nedocházelo ke tvorbě sedimentu. Poměr pojiva a plniva je měřen a upravován na základě kontrolních zkoušek suspenze. Po okapání suspenze následuje posyp modelu žáruvzdorným materiálem. Tento materiál by měl být stálý za vysokých teplot a neměl by jakkoli reagovat se slitinou odlitku. Každá takto vzniklá vrstva musí být následně vysušena. [13]

Zařízení Cyclone od společnosti MK technology je plně automatické zařízení sloužící k výrobě keramických skořepin. Obsahuje dvě nádrže s keramickou suspenzí a dva sprchové bubny pro posyp žáruvzdorným materiálem. Zařízení je řízeno za pomoci PLC s dotykovým panelem. Model se skořepinou je k zařízení upnut pomocí unašeče umístěného na pohyblivém ramenu. Zařízení je zobrazeno na obrázku 19. [28]



Obr. 19 Zařízení Cyclone od společnosti MK technology [28]



Obr. 20 Tmelení dutiny voskem



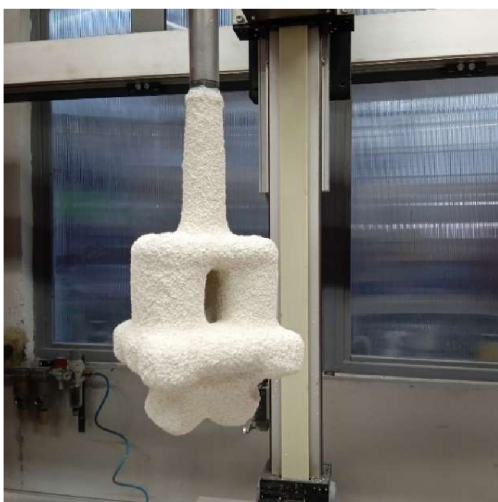
Obr. 21 Slepěný model



Obr. 22 Spojení unašeče s modelem



Obr. 23 První vrstva skořepiny



Obr. 24 Finální vrstva skořepiny



Obr. 25 Vypálení modelu

Všechny zhotovené vrstvy byly ponechány schnout ve speciální sušící komoře, která je součástí zařízení Cyclone. V této komoře byla za pomoci ventilace a infračervených světél udržována stálá teplota 22 °C a stálá hodnota relativní vlhkosti 15 %. Proud vzduchu z ventilace zařízení dosahuje rychlosti 12 m·s<sup>-1</sup> [28]. Unašečem s upnutým modelem je pomalu otáčeno, čímž je zajištěno rovnoměrného vysoušení vrstev vytvářené skořepiny. Těmito podmínkami je celý proces značně urychlen. Doba sušení jednotlivých vrstev tedy činila 20 minut. Rychlejší vysoušení skořepiny má kladný vliv také na její pevnost [28].

Primární, tedy první vrstva skořepiny má vliv na kvalitu povrchu výsledného odlitku. Pro tuto vrstvu se využívá jiné složení suspenze i posypu než pro zbytek skořepiny. Tato vrstva byla zhotovena ručně. Ruční zhotovení skořepiny v porovnání se strojem umožňuje lepší natočení modelu. Větší úhel natočení při tvorbě skořepiny zajistí rovnoměrnější distribuci suspenze i posypu. Primární vrstva skořepiny je vidět na obrázku 23. Materiály použité pro tuto vrstvu jsou uvedeny v tabulce 6

Sekundární neboli zesilovací vrstvy zajišťují pevnost a prodyšnost skořepiny. Jelikož tyto vrstvy již nemají takový vliv na kvalitu povrchu jako vrstva primární, nemusí být zaručeno tak dokonalé pokrytí povrchu suspenzí. Z tohoto důvodu bylo možné využít strojovou výrobu skořepiny. Pro výrobu těchto vrstev bylo využito zařízení Cyclone. Na zařízení byly nastaveny maximální možné hodnoty pro naklopení při ponoru i posypu modelu. Výhodou stejné výroby je menší časová náročnost a vyšší stálost kvality skořepin. Tímto způsobem bylo zhotoveno celkem sedm zesilovacích vrstev. Finální vrstva skořepiny je vidět na obrázku 24. Materiály použité pro tyto vrstvy jsou uvedeny v tabulce 6

Po zhotovení finální vrstvy skořepiny byl unašeč vyjmut ze stroje. Unašeč byl následně odstraněn ze skořepiny uvolněním spojovacích vrutů a užitím úhlové brusky s diamantovým brusným kotoučem.

Tab. 6 Materiály využití pro tvorbu skořepiny

	Primární vrstva	Zesilovací vrstvy
Pojivo	Primcote® binder	Wexcoat® 24
Plnivo	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh
Posyp	Zirkon – 50/150	Molochite 16/30

## 5.5 Odstranění modelu ze skořepiny

Výroba keramické skořepiny je dokončena vytavením či vypálením modelu. K tomuto procesu by mělo dojít nejdříve den po dokončení poslední vrstvy keramické skořepiny. Při standardním postupu je před vytavením modelu skořepina ponechána schnout několik dní. Z časových důvodů nebyl dodržen tento technologický postup. Odstranění modelu bylo provedeno v den zhotovení skořepiny, což způsobilo její nestandardní chování. Na povrchu skořepiny došlo v několika místech k delaminaci vrstev ve formě drobných vzduchových bublin.

Během procesu vytavování či vypalování modelů ze skořepin obecně může docházet k porušení jejich celistvosti. K tomuto porušení dochází vlivem rozdílné tepelné roztažnosti materiálu modelu a keramické skořepiny. Tepelná roztažnost skořepiny bývá typicky nižší než tepelná roztažnost vytavitelných či spalitelných modelů. Tento rozdíl tepelných roztažností vyvíjí tlak na povrch skořepiny. Vlivem působení tlaku může následně dojít k poškození skořepiny. [13]

U vytavitelných voskových modelů je výše zmíněný problém řešitelný za pomoci přehřátí skořepiny. Spolu se skořepinou je přehřáta i tenká vrstva vosku na povrchu skořepiny. Odtavením vrstvičky vosku vzniká dilatační spára, která umožní další roztažení voskového modelu bez porušení skořepiny. Vosk z vytavitelných modelů je možné separovat, filtrovat a dále regenerovat. Vlastnosti znovu použitého vosku však již neodpovídají vlastnostem vosku panenského. Tento vosk je však možné využít například na vtokové soustavy. [13]

U tištěných spalitelných modelů je porušení celistvosti skořepin předcházeno správným nastavením výplně modelu. Správná struktura výplně zaručí její zborcení při vytavení. Praskání skořepin lze dále zamezit nanesením tenké vrstvičky vosku na povrch modelu. Tato vrstvička následně způsobuje podobný efekt dilatační spáry, jako je tomu u voskových modelů. [5]

Odstranění modelu ze skořepiny může probíhat za nízkých nebo vysokých teplot. Odstraňování za nízkých teplot (takzvaný boilerkláv) je vhodné použít pouze pro voskové modely. Pro spalitelné modely se využívá výhradně odstraňování za vysokých teplot. Tento způsob odstranění modelu tepelným šokem, též nazývaný FlashFire, bývá opatřen dospalovací komorou. Komora slouží ke spálení plynů vzniklých při vypalování modelu v samotné peci. Model byl vypálen v odporové peci školní slévárny. V přehřáté peci byla udržována teplota 650 °C. Vypalování trvalo 20 minut. Jedná se o standardní hodnoty pro tento typ vypalování modelu, kterého se využívá ve školní slévárně. [13]

S výjimkou výše zmíněné delaminace vrstev, jenž je vyskytla pouze lokálně, nebyly po vypálení modelu nalezeny žádné další vady či praskliny na povrchu skořepiny. Vzhled skořepiny po odstranění modelu je zobrazen na obrázku 25.

Žihání, které obvykle následuje po vytavení modelu, má za cíl dosáhnout vyšších pevností skořepiny a také vypálení zbytkových reziduí. Při tomto žihání dochází ke slinování keramiky. Zpevnění je způsobeno přeměnou amorfně vázaného  $\text{SiO}_2$  na krystalickou strukturu. U skořepin pro odlitky ze slitin hliníku však není potřeba dosahovat vysokých pevností. Z tohoto důvodu tedy skořepina nebyla žihána. [13]

## 5.6 Odlévání

Gravitační odlévání slitiny AlSi10Mg do zhotovené skořepiny proběhlo ve školní slévárně. Podmínky při odlévání odpovídaly podmínkám nastaveným při simulaci. Po odlití byla skořepina odstraněna otloukáním a otryskáním. Nálitky, zde sloužící zároveň jako vtoková soustava, byly odstraněny úhlovou bruskou. Odlitek po odstranění skořepiny a následné apretaci je vidět na obrázcích 26 a 27.



Obr. 26 Očištěný odlitek 1



Obr. 27 Očištěný odlitek 2

Povrchové vady vzniklé nedodržením správného technologického postupu se nacházejí pouze na nefunkčních plochách odlitku. Po konzultaci s konstruktéry z Pneumobil racing teamu Brno bylo vyhodnoceno, že tyto vady neohrožují funkci odlitku. Na odlitku nebylo dále provedeno žádné tepelné zpracování.

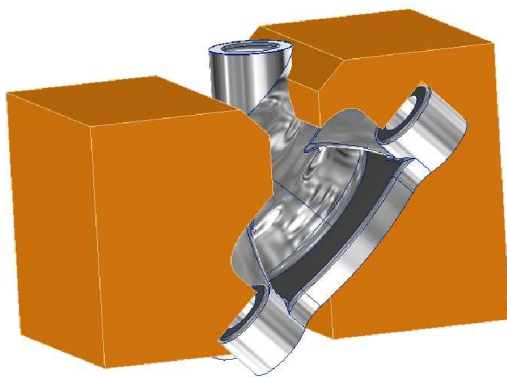
## 5.7 Obrobení

Pro sestavení výkresové dokumentace obrobku bylo využito reverzního inženýrství původního čela pneumatického válce. Nejprve byly naměřeny přípojné rozměry. Hodnoty těchto rozměrů byly následně ověřeny v katalogu prodejce pneumatických komponent. Tímto způsobem byl stanoven typ závitů pro spojky s nástrčnou koncovkou. Tyto spojky, zobrazené na obrázku 29, jsou umístěny na vtcích do vyráběné součásti [29]. Obdobně byl pro tuto součást dále stanoven také tvar a rozměry příruby. Tolerance lícovaných šroubů byly sestaveny na základě Výběru z norem [22]. Boční závit, původně soužící pro regulaci průtoku stlačeného vzduchu pneumatickou brzdou, byl upraven pro připojení spojky s nástrčnou koncovkou. Tato spojka slouží pro připojení manometru, jenž byl později využit při měření poklesu tlaku. Výsledný výrobní výkres součásti je obsažen v příloze 1.

Na základě výrobní dokumentace byla součást obrobena na Ústavu konstruování v rámci Pneumobil racing teamu Brno. Uchycení tvarově složitého odlitku bylo provedeno za pomoci přípravku (viz obrázek 28). Geometrie tohoto přípravku byla vytvořena v CAD modeláři Autodesk Inventor jako negativ zjednodušeného tvaru součásti. Přípravek byl vytištěn na tiskárně Original Prusa i3 MK3S z PLA filamentu.

## 5.8 Montáž

Má-li být při montáži zaručena těsnost součásti pneumatických spojek s nástrčnou koncovkou, je nutné do závitů aplikovat teflonovou pásku. Teflonová páska zde souží jako těsnění trubkového závitu. Jedná se o standardní způsob těsnění závitových spojů u Pneumobilu. Dále bylo nutné provést zkrácení závitové části lícovaných šroubů. Důvodem byla nedostatečná délka závitu v originálním svorníku. Výsledek montáže je vidět na obrázku 29.



Obr. 28 Přípravek pro obrobení

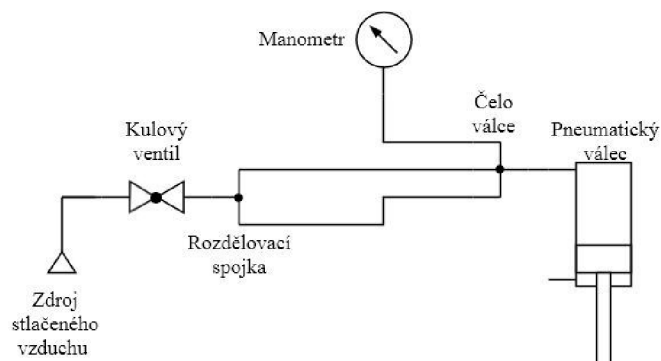


Obr. 29 Montáž čela válce

## 6 KONTROLA TĚSNOSTI

Pro udržení účinnosti pneumatických obvodů je zapotřebí dodržet jistou míru těsnosti. Nesmí docházet k příliš velkým unikům stlačeného vzduchu. To znamená, že musí být zaručena dostatečná těsnost všech součástí i spojů mezi nimi. Kontrola těsnosti čela pneumatického válce tak určuje zda byla výroba a montáž této součásti úspěšná či nikoli. Úplné těsnosti pneumatického obvodu nelze dosáhnout. Důvodem je například využití nástrčných spojek, které jsou zdrojem netěsností již z principu konstrukce. [30]

Těsnost je zde posuzována jako pokles tlaku v uzavřeném obvodu měřený v čase. Z výše zmíněných důvodů byla těsnost nového čela porovnána s referenční hodnotou. Jako referenční hodnota slouží výsledky téhož měření na původním čele pneumatického válce. Obvod pro obě čela byl zapojen identicky a to dle diagramu na obrázku 30.



Obr. 30 Diagram pneumatického obvodu pro měření tlakových ztrát

Zdrojem byl rozvod stlačeného vzduchu budovy C3, kde probíhalo měření. Z měření vyplývá, že tlak zdroje kolísá kolem hodnoty 7 bar. Tato hodnota řádově odpovídá hodnotám tlaku v rozvodu Pneumobilu. Maximální hodnoty tlaku v rozvodu Pneumobilu činí 10 bar. Na tuto hodnotu jsou také dimenzovány použité pneumatické komponenty. Kolísání tlaku zdroje je příčinou zvýšených odchylek od měření (viz tabulka 9).

Kulový ventil, někdy též označovaný jako kulový kohout, je zařízení pro uzavření průtoku v hydraulických i pneumatických systémech [30]. Princip činnosti této obousměrné uzavírací spojky spočívá v kulové zátce umístěné v těle kohoutu. Spoj s obvodem může být realizován vícero způsoby [31]. Při měření byl využit kulový ventil opatřený nástrčnými spojkami na obou svých koncích.

Rozdělovací spojka je komponentou pneumatického obvodu, jejímž cílem je rozdělit proud stlačeného vzduchu do více větví. Pro pneumatický obvod viditelný na obrázku 30 byla využita spojka typu T, rozdělující obvod na dvě větve. Toto rozdělení je nezbytné pro uzavření obvodu v oblasti čela válce. Zapojení čela válce je viditelné na obrázku 29. Spoje jsou realizovány nástrčnými spojkami. [30]

Při měření byl využit analogový manometr. Jedná se o mechanické měřidlo tlaku plynu či kapaliny. Tlak je měřen na základě deformace vyvolané v deformačním členu [30]. Manometr měří přetlak nikoli tlak absolutní.

Před začátkem měření byl skrze kulový ventil do obvodu napuštěn stlačený vzduch ze zdroje. Po ustálení tlaku byl ventil vypnut a zdroj stlačeného vzduchu odpojen. Tento okamžik je počátkem měření. Hodnoty tlaku byly měřeny analogovým manometrem po desetiminutových intervalech a to po dobu dvou hodin. Charakteristiky použitého manometru jsou zobrazeny v tabulce 7. Tímto způsobem byla provedena celkem tři dvouhodinová měření pro každé z čel. Naměřené hodnoty jsou obsaženy v příloze 2. Podmínky měření jsou zobrazeny v tabulce 8. Hodnota nejistoty typu B použitého manometru byla stanovena na základě odborné konzultace na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

Tab. 7 Charakteristiky použitého manometru

Měřidlo	Rozlišení	Rozsah stupnice	Rozsah použití	Nejistota typu B
Analogový manometr	0,25 Bar	16 Bar	12 Bar	0,125 Bar

Tab. 8 Podmínky měření

Podmínky měření	Atmosférický tlak	Relativní vlhkost	Teplota
Obě čela	986,1 hPa	41 %	20 °C

Tab. 9 Charakteristiky měření pro časové okamžiky

Měření	Maximální směrodatná odchylka	Maximální standardní kombinovaná nejistota	Maximální celková rozšířená nejistota
Původní čelo	0,15 [Bar]	0,23 [Bar]	0,46 [Bar]
Nové čelo	0,15 [Bar]	0,23 [Bar]	0,46 [Bar]

Směrodatná odchylka, a tedy i nejistoty měření jsou definovány pro jednotlivé časové okamžiky. Jejich hodnoty se tak v čase mírně liší. V tabulce 9 jsou zobrazeny maximální vypočtené hodnoty těchto charakteristik v průběhu obou měření. Charakteristiky byly stanoveny na základě níže uvedených vzorců. Celková rozšířená nejistota byla určena pro pravděpodobnost 95,45 %. Výsledky výpočtů pro všechny časové okamžiky jsou uvedeny v příloze 2. [32] Grafy na obrázcích 31 a 32 byly sestaveny na základě průměrných hodnot, které byly vypočteny z měření. Hodnoty v obou grafech byly proloženy lineární funkcí. Rovnice těchto funkcí jsou uvedeny na výše zmíněných obrázcích. Na grafech je dále znázorněna celková rozšířená nejistota v jednotlivých časových okamžicích.

Na základě sestavených grafů a směrnic proložených lineárními funkcí je patrné, že hodnoty poklesu tlaku nového čela pneumatického válce odpovídají hodnotám čela původního. Součást tedy splňuje stanovenou podmínku těsnosti.



Pro stanovení rozšířené nejistoty měření v daných časových okamžicích byly využity následující vzorce [32]:

- Aritmetický průměr hodnot měření  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

kde:  $x_i$  – naměřená hodnota tlaku [Bar],  
 $n$  – počet měření [-].

- Výběrová směrodatná odchylka:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6.2)$$

kde:  $x_i$  – naměřená hodnota tlaku [Bar],  
 $\bar{x}$  – aritmetický průměr naměřených hodnot tlaku [Bar],  
 $n$  – počet měření [-].

- Nejistota typu A:

$$u_A = s(\bar{x}) = K \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}} \quad (6.3)$$

kde:  $K$  – koeficient počtu měření (pro 3 měření  $K=2,3$ ) [-],  
 $x_i$  – naměřená hodnota tlaku [Bar],  
 $\bar{x}$  – aritmetický průměr naměřených hodnot tlaku [Bar],  
 $n$  – počet měření [-].

- Standardní kombinovaná nejistota:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (6.4)$$

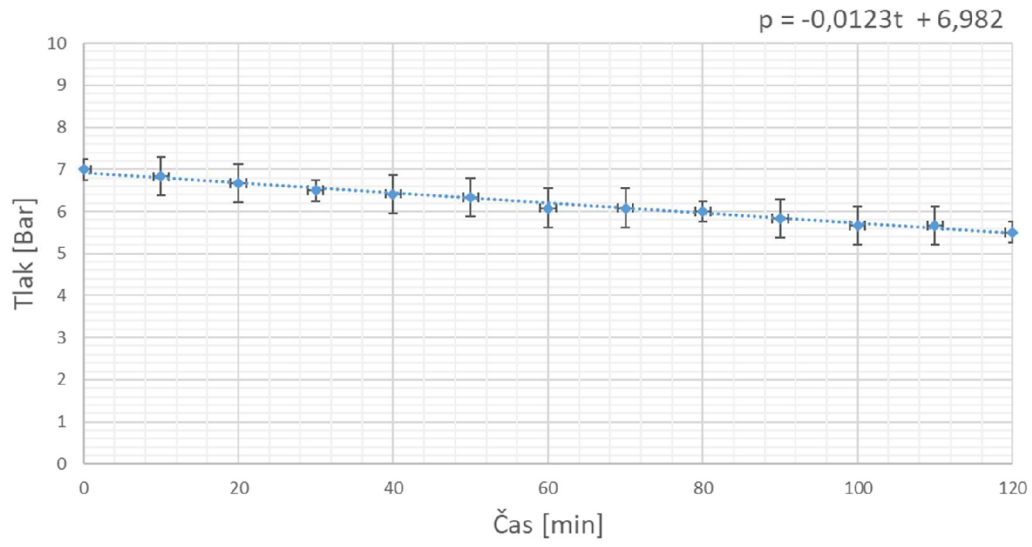
kde:  $u_A$  – nejistota typu A [Bar],  
 $u_B$  – nejistota typu B [Bar],

- Celková rozšířená nejistota:

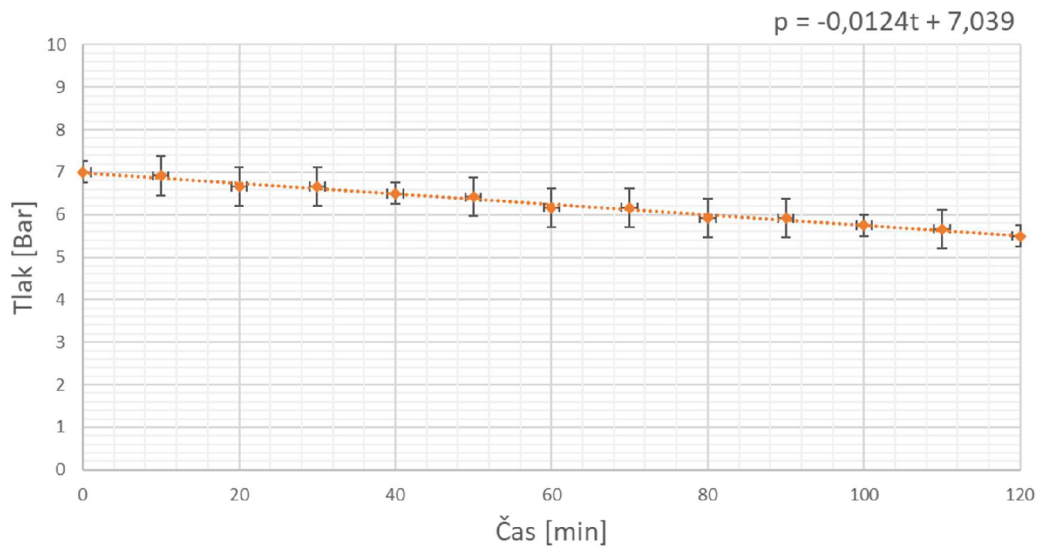
$$U = k \cdot u_C \quad (6.5)$$

kde:  $u_C$  – standardní kombinovaná nejistota [Bar],  
 $k$  – koeficient rozšíření (pro pravděpodobnost 95,45 %  $k=2$ ) [-].

---



Obr. 31 Graf poklesu tlaku původního čela



Obr. 32 Graf poklesu tlaku nového čela

## 7 POROVNÁNÍ GEOMETRIE

Tvar dutiny vyrobené součásti je výsledkem numerické optimalizace z pohledu proudění. Tato optimalizace je podrobně popsána v odborném článku „Inlet shape optimization of pneumobile engine pneumatic cylinder using CFD analysis“ vydaným členy Pneumobil racing teamu Brno. Na součásti s takto optimalizovanou geometrií by v porovnání s původním čelem měly klesnout ztráty tlaku, ke kterým dochází při plnění pneumatického válce. [4]

Způsob porovnání nově vyrobeného a původního čela válce lze stanovit na základě níže uvedených rovnic. Z těchto rovnic plyne, že snížení tlakových ztrát by mělo navýšit mechanický výkon vozidla. Nárůst tlaku zvyšuje sílu působící na plochu pístu. Tato síla je přenášena na pístnici, a tím způsobuje její zrychlení. Za předpokladu konstantního točivého momentu vozidla by tak s nárůstem tlaku mělo dojít ke zvýšení úhlové rychlosti, a tedy i otáček na kolech tohoto vozidla.

- Z hydrostatiky platí:

$$\overrightarrow{dF} = -dp \cdot \vec{n}_p \cdot S \quad (7.1)$$

kde:  $F$  – síla od tlaku [N],  
 $p$  – tlak působící na plochu pístu [Pa],  
 $S$  – plocha pístu [m<sup>2</sup>],  
 $n_p$  – jednotkový vektor normály plochy [-].

- Druhý Newtonův pohybový zákon:

$$\overrightarrow{dF} = \frac{d}{dt} (m \cdot \vec{v}) = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (7.2)$$

kde:  $F$  – síla přenášena pístnicí [N],  
 $m$  – redukovaná hmotnost soustavy [kg],  
 $v$  – rychlost pístnice [m·s<sup>-1</sup>],  
 $t$  – čas [s].

- Mechanický výkon:

$$P = \frac{dW}{dt} = F \cdot v = M \cdot \omega \quad (7.3)$$

kde:  $P$  – výkon [W],  
 $W$  – práce [J],  
 $t$  – čas [s],  
 $F$  – síla [N],  
 $v$  – rychlost [m·s<sup>-1</sup>],  
 $M$  – točivý moment [N·m],  
 $\omega$  – úhlová rychlost [rad·s<sup>-1</sup>],

## 7.1 Měření otáček vozidla

Měření otáček na kolech vozidla bylo uskutečněno za pomoci vyrobeného enkodéru, který je zobrazen na obrázku 33. Přerušovací disk i přípravek pro uchycení optické závory byly zhotoveny 3D tiskem pomocí technologie FDM. Po obvodu zmíněného přerušovacího disku je umístěno šedesát děr, které slouží k průchodu a následnému přerušení signálu optické závory. Pro měření byla použita optická závora LITE ON LTH301-07.

Elektrický signál z optické závory byl zpracován za pomoci kompatibilní vývojové desky Arduino MEGA 2560. Naměřená data byla průběžně ukládána do přenosného počítače, kde byla posléze zpracována v softwarech MATLAB a Excel. Bodový graf naměřených hodnot je vidět na obrázku 34.

Samotné měření probíhalo bez záběru kol vozidla. Protáčením kol naprázdno bylo možné eliminovat některé z vedlejších vlivů, které by mohly výsledky měření znehodnotit. Mezi tyto vlivy lze počítat kupříkladu vliv nestálosti počasí, povrchu vozovky či dráhy jízdy.

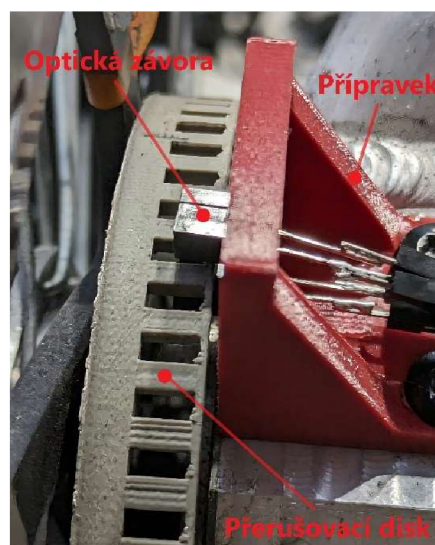
Vzdušník byl před každým měřením natlakován na 600 kPa, tedy 6 Bar. Tlak byl měřen za pomoci elektrického snímače přímo na vozidle. Všechna měření byla uskutečněna z nulových počátečních otáček. Uvedení kol do pohybu bylo provedeno vždy pouze jedním zdvihem dvojčinného pneumatického válce. Atmosférické podmínky, které panovaly během měření jsou zobrazeny v tabulce 10.

Tab. 10 Podmínky měření

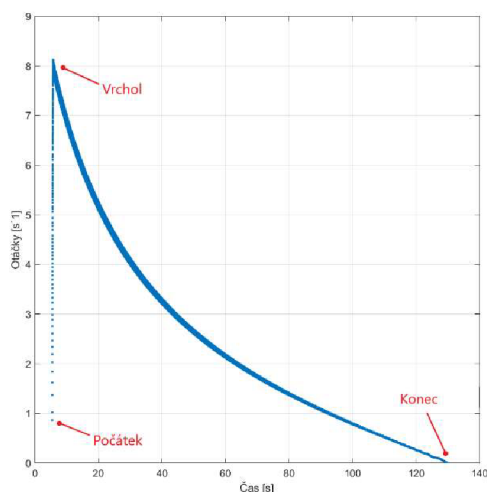
Podmínky	Atmosférický tlak	Relativní vlhkost	Teplota
Celé měření	995,6 hPa	48 %	21 °C

Tímto způsobem bylo provedeno deset měření pro každou z níže zmíněných variant:

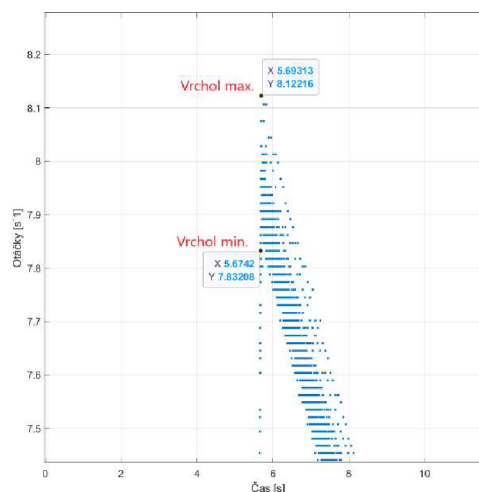
- Původní čelo – Plnění
- Původní čelo – Výfuk
- Nové čelo – Plnění
- Nové čelo – Výfuk



Obr. 33 Vyrobený enkodér



Obr. 34 Bodový graf měřených otáček



Obr. 35 Přiblížení na vrchol grafu

Doba rotace byla vypočtena jako rozdíl času naměřeného na počátku a na konci měření. Špička dosažené úhlové rychlosti byla vypočtena z aritmetického průměru otáček vrcholu, jak je zobrazeno na obrázku 35. Úhlové zrychlení bylo následně vypočteno jako přírůstek úhlové rychlosti za čas od počátku po dosažení naměřeného vrcholu. Tuto aproximaci bylo možné učinit, neboť se na daném intervalu měřené hodnoty jeví lineárně (viz obrázek 34).

Naměřené hodnoty byly dále zpracovány obdobným způsobem jako v předchozí kapitole (vzorce 6.1 – 6.5). Hodnoty celkových rozšířených nejistot měření zde byly vypočteny pro standardní pravděpodobnost 95,45%. Nejistota typu B byla aproximována šířkou pásma měřených hodnot. Výsledky vypočtené z měření otáček na vozidle jsou zobrazeny v tabulce 11. Výsledky měření jsou spolu s výpočtem obsaženy v příloze 3.

Tab. 11 Výsledky z měření otáček vozidla

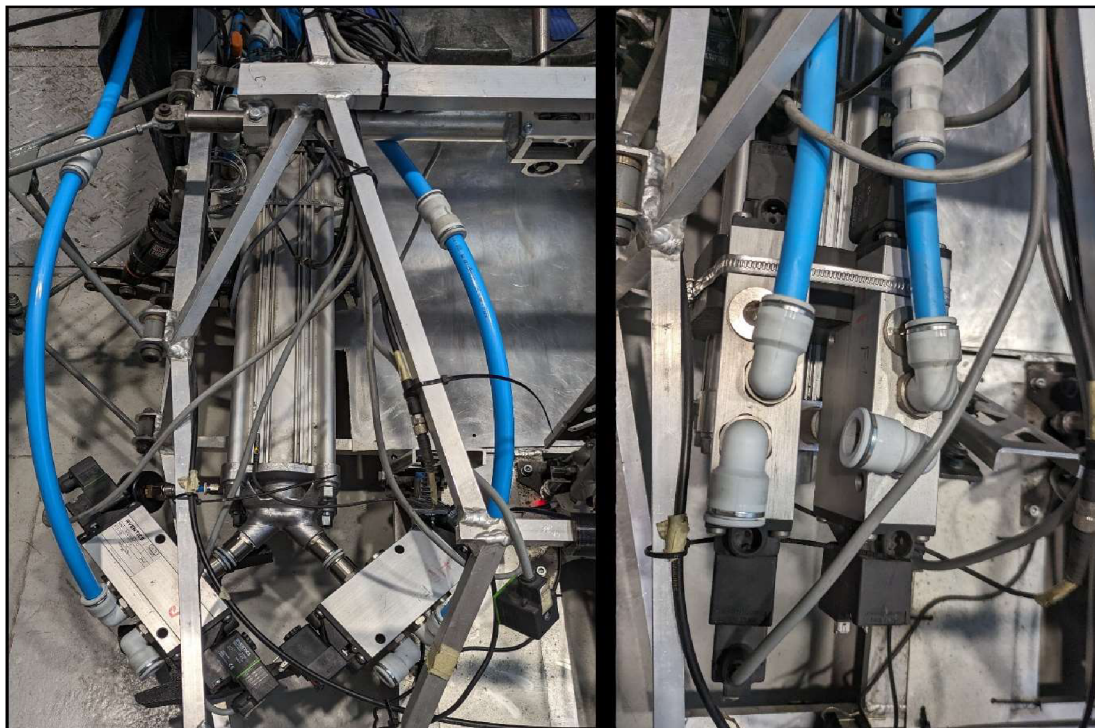
Plnění	Úhlové zrychlení [rad·s <sup>-2</sup> ]	Max. úhlová rychlost [rad·s <sup>-1</sup> ]	Doba rotace [s]
Původní čelo	197,81 ±2,26	50,56 ±0,52	124,23 ±0,57
Nové čelo	202,15 ±1,61	50,73 ±0,37	126,17 ±0,36
Nárůst [%]	2,19 ±1,95	0,33 ±1,75	1,56 ±0,12
Výfuk			
Původní čelo	214,76 ±1,14	50,73 ±0,27	124,93 ±0,21
Nové čelo	217,60 ±2,01	54,48 ±0,42	127,95 ±0,52
Nárůst [%]	1,32 ±1,46	7,38 ±1,32	2,42 ±0,09
Celkově			
Původní čelo	206,28 ±1,71	51,47 ±0,39	124,58 ±0,39
Nové čelo	209,87 ±1,81	52,60 ±0,41	127,06 ±0,44
Nárůst [%]	1,74 ±1,71	2,20 ±1,53	1,99 ±0,11

Z výsledků měření vyplývá, že s největší pravděpodobností skutečně došlo ke snížení tlakových ztrát výměnou původního čela válce za nové tvarově optimalizované čelo. Nárůst sledovaných parametrů je důkazem poklesu tlakových ztrát v pneumatickém obvodu. Jsou tak prokázána tvrzení položená ve výše zmíněném odborném článku „Inlet shape optimization of pneumobile engine pneumatic cylinder using CFD analysis“.

Zajímavým zjištěním je poměrně vysoké navýšení maximálních dosahovaných úhlových rychlostí při výfuku, které se pohybuje v řádu sedmi procent. Na druhou stranu během plnění pneumatického válce došlo pouze k nízkému navýšení sledovaných parametrů. Rozdíl měřených úhlových rychlostí při plnění válce je mezi oběma čely dokonce natolik nízký, že nelze s jistotou tvrdit zda skutečně došlo k jejich navýšení.

Nízké navýšení sledovaných parametrů při plnění může být způsobeno změnou v pneumatickém obvodu, ke které došlo z konstrukčních důvodů. Tato změna zahrnovala prodloužení a mírné zahnutí pneumatického potrubí dopravujících stlačený vzduch k ventilům nového čela (viz obrázek 36). Jedná se o jedinou další změnu ke které došlo s výjimkou výměny čela válce. Tato změna by navíc neměla mít žádný vliv na výfuk skrze nově zhotovenou součást, což prokazují i vyšší procentuální nárůsty sledovaných parametrů právě při výfuku.

Optimalizace tvaru z pohledu proudění se ukazuje jako vhodná cesta ke snižování tlakových ztrát v pneumatických obvodech. Při návrhu těchto obvodů je však krom konkrétních prvků vhodné vzít v potaz také realizaci zapojení či délku vzduchových rozvodů. K dalšímu snížení tlakových ztrát by mohlo vést také snižování parametrů textury povrchu, čehož lze dosáhnout například pomocí dokončovacích metod obrábění.



Obr. 36 Srovnání nového (vlevo) původního (vpravo) pneumatického zapojení (modrá)

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá výrobou součásti pohonné jednotky závodního vozu s využitím hybridní technologie přesného lití. Odlitkem je čelo pneumatického válce, jehož geometrie vznikla optimalizací z pohledu proudění stlačeného vzduchu. Této optimalizaci se věnuje odborný článek „Inlet shape optimization of pneumobile engine pneumatic cylinder using CFD analysis“. Tato práce tedy krom výroby odlitku slouží také k validaci výsledků zmíněného článku.

Na základě technologické rozvahy byla nejprve provedena úprava dodané geometrie, jež vedla ke snížení rizika vzniku vad při výrobě odlitku. Pro umožnění této úpravy bylo nutné provést konverzi datového souboru z formátu STL do formátu IPT. Tato konverze je obecně komplikovanou záležitostí. Jako vhodné řešení této problematiky se ukázalo kompletní přemodelování dodané geometrie. Úspěšnost zmíněné geometrické úpravy byla následně ověřena numerickou simulací slévárenského procesu v prostředí ProCAST. Simulace potvrdila, že takto upravenou geometrii lze využít při výrobě. Dále bylo zjištěno, že tepelnou izolací vtokové soustavy lze docílit snížení rizika vzniku porozity v odlitku, čehož bylo také využito při samotném odlévání.

S využitím tiskárny Prusa i3 MK3S byl nejprve zhotoven testovací tisk z levnějšího materiálu pro ověření tisknutelnosti upravené geometrie. Obdobně byl poté zhotoven spalitelný model z materiálu Polymaker Polycast, který byl následně využit při tvorbě keramické skořepiny. Výroba skořepiny byla usnadněna za pomoci automatického zařízení Cyclone od společnosti MK technology. Z časových důvodů nebylo možné dodržet korektní technologický postup této výroby. Zkrácení doby sušení u skořepiny vedlo k lokální delaminaci vrstev, ke které došlo v průběhu vypalování tištěného modelu. Tato delaminace byla poté příčinou vzniku vad na povrchu odlitku. Snížení rizika vzniku vad tohoto typu by v budoucnu mělo být možné docílit prodloužením doby sušení keramické skořepiny. Tato skořepina i výsledný odlitek ze slitiny hliníku AISi10Mg byly zhotoveny ve školní slévárně. Na základě konzultace s konstruktéry z Pneumobil racing teamu Brno bylo stanoveno, že vady vzniklé na povrchu odlitku neohrožují funkčnost vyrobené součásti.

Po obrobení a následné montáži bylo provedeno měření těsnosti. Těsnost je zde posuzována jako pokles tlaku v uzavřeném obvodu měřený v čase. Těsnost nově zhotoveného čela odpovídá těsnosti čela původního. Z pohledu těsnosti byla tedy výroba součásti úspěšná. Při montáži se zde osvědčilo využití teflonové pásky pro zajištění těsnosti šroubových spojů.

Dále byl za pomoci optické závory zhotoven enkodér sloužící k měření otáček přímo na kolech vozidla. Měřením otáček v nezatíženém stavu se podařilo naměřit pozitivní vliv geometricky optimalizované součásti na rychlost, zrychlení i dobu otáčení. Nárůst těchto veličin byl způsoben snížením tlakových ztrát při proudění stlačeného vzduchu skrze zhotovenou součást. Pokles tlakových ztrát potvrzuje výsledky položené ve výše zmíněném odborném článku.

S ohledem na zadání bakalářské práce lze prohlásit, že byly splněny všechny stanovené cíle. Vyplyvá, že do budoucna má smysl se při návrhu pneumatických obvodů zabývat tvarovou optimalizací za účelem navýšení účinnosti. Kromě tvaru by však mohlo být vhodné se zaměřit také na texturu povrchu, délku potrubí či realizaci spojů v obvodech. Z pohledu výroby se pak hybridní technologie přesného lití osvědčila při zhotovení prototypové součásti s tvarově komplikovanou dutinou. Zvýšení kvality odlitku by mohlo být možné docílit například s využitím aditivní technologie SLA namísto zde využití technologie FDM. Kvalita odlitku je totiž závislá na kvalitě použitého spalitelného modelu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Pneumobil racing team Brno*. Online. 2022. Dostupné z: <https://pneumobilteam.netlify.app/#header>. [cit. 2024-01-04].
2. EMERSON. *En.pneumobil.hu*. Online. 2022. Dostupné z: <https://en.pneumobil.hu/introduction>. [cit. 2024-01-04].
3. TAMESON. *PNEUMATIC CYLINDER - HOW THEY WORK*. Online. 2021. Dostupné z: <https://tameson.com/pages/pneumatic-cylinders>. [cit. 2024-01-05].
4. ČERNÁK, M.; MICHALEC, M.; VALENA, M. a RANUŠA, M. Inlet shape optimization of pneumobile engine pneumatic cylinder using CFD analysis. Online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, roč. 1935, č. 1, s. 9. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012011>. [cit. 2024-01-05].
5. KUMAR, Parlad; SINGH, Rupinder a AHUJA, I.P.S. Investigations on dimensional accuracy of the components prepared by hybrid investment casting. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015, roč. 20, s. 525-533. ISSN 2249-6289. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.07.008>. [cit. 2024-01-04].
6. KRUTIŠ, Vladimír; NOVOSAD, Pavel; ZÁDĚRA, Antonín a KAŇA, Václav. Requirements for Hybrid Technology Enabling the Production of High-Precision Thin-Wall Castings. Online. *Materials*. 2022, roč. 15, č. 11, s. 3805. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma15113805>. [cit. 2024-01-20].
7. SALVATORE BRISCHETTO (ED.). *Additive Manufacturing Technologies and Applications*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. ISBN 9783038425489. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-549-6>.
8. KONDA GOKULDOSS, Prashanth. *Selective Laser Melting: Materials and Applications*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. ISBN 3039285793. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03928-579-2>.
9. *Metal 3D Printing vs. Casting vs. CNC: Which is Better?* Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.thesteelprinters.com/news/metal-3d-printing-vs-casting-vs-cnc-which-is-better>. [cit. 2024-01-20].
10. JOSHI, Vratraj; RAVAL, Harit a DESAI, Keyur. A Review Article on Machining of Closed Contour Profile on CNC Milling Machine. Online. In: *AIP Conference Proceedings*. Melville: American Institute of Physics, 2023. ISBN 0735447357. ISSN 0094-243X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0166751>. [cit. 2024-01-20].
11. GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent a KHORASANI, Mahyar. *Additive Manufacturing Technologies*. Third edition. Cham: Springer International Publishing, 2020. ISBN 9783030561260. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
12. HORÁČEK, Milan. ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU. Online. 2009. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>. [cit. 2024-01-21].
13. BEELEY, Peter R. a SMART, Robert F. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 09-017-1666-9.
14. *Typy tiskáren a rozdíl mezi nimi*. Online. Prusa Knowledge Base. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi\\_112464](https://help.prusa3d.com/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi_112464). [cit. 2024-01-21].
15. *Dkmp Nový Jičín, Ostrava*. Online. [cit. 2024-01-26].



16. HALLMANN, Martin; GOETZ, Stefan a SCHLEICH, Benjamin. Mapping of GD&T information and PMI between 3D product models in the STEP and STL format. Online. *Computer aided design*. 2019, roč. 115, s. 293-306. ISSN 0010-4485. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.006>. [cit. 2024-01-22].
17. GROTH, Greg. Reverse Engineering Software 101. Online. *Quality (Wheaton)*. 2020, roč. 59, č. 5, s. 27-27. ISSN 0360-9936. [cit. 2024-01-24].
18. *Mesh Enabler*. Online. Autodesk App Store. Dostupné z: <https://apps.autodesk.com/IN-VNTOR/en/Detail/Index?id=6950391119076900441&appLang=en&os=Win64>. [cit. 2024-01-22].
19. *All3DP Pro*. Online. All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/7-free-stl-editors-edit-repair-stl-files/>. [cit. 2024-01-22].
20. CAMPBELL, John. *Castings*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991. ISBN 0-7506-1072.
21. SVOBODA, Pavel a BRANDEJS, Jan. *Základy konstruování*. Vydání osmé, přepracované a doplněné. Brno: CERM - akademické nakladatelství, 2020. ISBN 978-80-7623-034-7.
22. SVOBODA, Pavel a BRANDEJS, Jan. *Výběry z norem: pro konstrukční cvičení*. Vydání šesté, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-7623-010-1.
23. a BEŇO, Jaroslav. *POČÍTAČOVÁ PODPORA LITÍ A TUHNUTÍ ODLITKŮ*. Online. Nenalezený vydavatel. 2013. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/07\\_Pocitacova\\_podpora\\_liti\\_a\\_tuhnuti\\_odlitku/Beno\\_Pocitacova\\_podpora\\_liti\\_a\\_tuhnuti\\_odlitku.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/07_Pocitacova_podpora_liti_a_tuhnuti_odlitku/Beno_Pocitacova_podpora_liti_a_tuhnuti_odlitku.pdf). [cit. 2024-02-10].
24. GROUP, Esi. *ProCASTCasting Simulation Software*. Online. ESI Group. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/products/procast>. [cit. 2024-01-24].
25. DUBEY, Shashank a SWAIN, Smruti Rekha. Numerical investigation on solidification in casting using ProCAST. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, roč. 561, č. 1, s. 12049. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012049>. [cit. 2024-01-24].
26. *ESI Group*. Online. [cit. 2024-01-24].
27. *3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S*. Online. Prusa3D by Josef Prusa. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>. [cit. 2024-02-02].
28. *Cyclone*. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.mk-technology.com/?pageID=152>. [cit. 2024-02-01].
29. FESTO. *Šroubení s nástrčnou koncovkou QS*. Online. Festo CZ. Dostupné z: [https://www.festo.com/cz/cs/p/sroubeni-s-nastrcnou-koncovkou-id\\_QS/](https://www.festo.com/cz/cs/p/sroubeni-s-nastrcnou-koncovkou-id_QS/). [cit. 2024-01-29].
30. *Základy průmyslové automatizace: stlačený vzduch a jeho využití*. 6. vydání. Brno: SMC Industrial Automation CZ, 2023. ISBN 978-80-11-02798-8.
31. FESTO. *Uzavírací ventily a kulové kohouty*. Online. Festo CZ. Dostupné z: [https://www.festo.com/cz/cs/c/vyrobky/prumyslova-automatizace/ventily-a-ventilove-terminaly/uzaviraci-ventily/uzaviraci-ventily-a-kulove-kohouty-id\\_pim257/](https://www.festo.com/cz/cs/c/vyrobky/prumyslova-automatizace/ventily-a-ventilove-terminaly/uzaviraci-ventily/uzaviraci-ventily-a-kulove-kohouty-id_pim257/). [cit. 2024-02-01].
32. *Measurement Uncertainty*. Basel: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. ISBN 3036566082. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6609-2>.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
F	Síla	[N]
K	Koeficient počtu měření	[-]
k	Koeficient rozšíření	[-]
M	Točivý moment	[N·m]
m	Hmotnost	[kg]
n	Počet měření	[-]
$n_p$	jednotkový vektor normály plochy	[-]
P	Výkon	[W]
p	Tlak	[Bar, Pa]
S	Plocha pístu	[m <sup>2</sup> ]
S(x)	Výběrová směrodatná odchylka	[Bar]
T	Teplota	[K]
t	Čas	[min, s]
U	Celková rozšířená nejistota	[Bar]
$u_A$	Nejistota typu A	[Bar]
$u_B$	Nejistota typu B	[Bar]
$u_C$	Standardní kombinovaná nejistota	[Bar]
$V_0$	Objem tělesa při původní teplotě	[m <sup>3</sup> ]
V	Měrná změna objemu	[-]
v	rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
W	Práce	[J]
$x_i$	Naměřená hodnota tlaku	[Bar]
$\bar{x}$	Aritmetický průměr naměřených hodnot tlaku	[Bar]
$\beta$	Koeficient teplotní objemové roztažnosti	[-]
$\omega$	Úhlová rychlost	[rad·s <sup>-1</sup> ]

### Zkratky

Označení	Legenda
3D	Trojdimenzionální
CAM	Computer aided manufacturing
CNC	Computer numerical control
DMLS	Direct metal laser sintering
FDM	Fused deposition modeling
FEM	Finite element method
FVM	Finite volume method
HIC	Hybrid investment casting
IGES	Initial graphics exchange specification
IPT	Inventor part
SLM	Selective laser melting
SLA	Stereolithography
STEP	Standard for the exchange of product data
STL	Stereolithography

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Dokumentace pro obrobení
Příloha 2	Měření tlakových ztrát – zpracování dat
Příloha 3	Měření otáček – zpracování dat

## **SEZNAM VÝKRESŮ**

Název výkresu	označení výkresu (rok-typ práce-ID studenta-číslo výkresu)
Čelo válce	2024-BP-239421-01 (součást přílohy 1)