

# Zlepšení tuhosti nevyhovujícího dílce pomocí FEM analýzy

Bc. Přemysl Kostka

---

Diplomová práce  
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2018/2019

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Přemysl Kostka**  
Osobní číslo: **T17857**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Zlepšení tuhosti nevyhovujícího dílce pomocí FEM analýzy**

Zásady pro vypracování:

- Vypracujte literární rešerši na dané téma
- Provedte hodnocení současného stavu
- Provedte návrh nového konstrukčního řešení
- Provedte zkoušku a vyhodnocení nového návrhu

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**  
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **ALAWADHI, Esam M. Finite element simulations using ANSYS. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016], xiii, 421. ISBN 978-1-4822-6197-4.**
2. **BOWER, Allan F. Applied mechanics of solids. Boca Raton: CRC Press, 2010, xxv, 794 s. ISBN 978-1-4398-0247-2.**
3. **MADENCI, Erdogan; Ibrahim GUVEN. The finite element method and applications in engineering using ANSYS?. Second edition. New York: Springer, [2015], xiv, 657. ISBN 978-1-4899-7549-2.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 13.05.2019

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevyjádřeně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>34</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce byla zaměřena na zlepšení tuhosti dílce pomocí FEM analýzy. Jedná se o čelist brzdy, která se používá v bubnové brzdě u motocyklu.

Teoretická část se zabývá základní terminologií metody konečných prvků, základní terminologií brzdových systémů u motocyklů, jejich materiálovou podstatou a vysvětlením výrobních systémů používaných k výrobě dílce.

Praktická část řeší návrh nových brzdových čelistí, jejich simulaci při zatížení a výběru nové čelisti. Výrobu nových čelistí s testovacím přípravkem. Nově vyrobené a původní čelisti byly porovnávány.

Klíčová slova: Brzdový systém, tuhost, decelerace, tření, FEM analýza

## **ABSTRACT**

The thesis was focused on improving the stiffness of the part by FEM analysis. It is a brake shoe, which is used in a drum brake for a motorcycle.

The theoretical part deals with the basic terminology of the finite element method, the basic terminology of the brake systems in motorcycles, their material nature and the explanation of the production systems used for the manufacture of the part.

The practical part is focused on the design of new brake shoes, their simulation under the load and selection of new jaw, then the production of new jaws with the testing product. New made and original jaws have been compared.

Keywords: braking system, stiffness, deceleration, friction, FEM analysis

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D za spolupráci, příkladné vedení, ochotu a čas, který mi při vypracování věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, přátelům a kolegům za podporu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
<b>1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....</b>	<b>13</b>
1.1 VÝPOČETNÍ METODY .....	13
1.1.1 FEM.....	13
1.1.2 FEA .....	13
1.1.3 CAE.....	13
1.2 UŽITÍ FEM SYSTÉMU .....	14
1.2.1 Rozdělení analýzy .....	14
1.2.2 Řešené oblasti.....	15
1.2.3 Postup nastavení výpočtu FEM.....	15
1.3 FEM MODELY .....	16
1.3.1 Geometrické vlastnosti.....	16
1.3.2 Uzly a elementy.....	17
1.3.2.1 Uzly.....	17
1.3.2.2 Elementy .....	18
1.4 SYSTÉMY.....	20
<b>2 BRZDOVÉ SYSTÉMY U MOTOCYKLŮ .....</b>	<b>21</b>
2.1 DRUHY SYSTÉMŮ .....	21
2.1.1 Bubnové brzdy .....	21
2.1.2 Kotoučové brzdy .....	24
2.2 ASISTENČNÍ SYSTÉMY .....	26
2.2.1 Protiblokovací systém ABS .....	27
2.2.2 Systém motocyklové stability MSC.....	27
2.2.3 Asistent brzdového systému – rozdělení brzdového účinku .....	28
2.3 ZÁKONNÉ PŘEDPISY .....	28
<b>3 MATERIÁLY BRZDOVÝCH SYSTÉMŮ.....</b>	<b>29</b>
3.1 MATERIÁLY BRZDOVÝCH BUBNŮ .....	29
3.2 MATERIÁLY BRZDOVÝCH ČELISTÍ .....	30
3.3 MATERIÁLY BRZDOVÉHO OBLOŽENÍ.....	32
3.3.1 Struktura materiálu brzdového obložení .....	32
3.3.2 Funkční požadavky na brzdové obložení .....	33
3.4 KAPALINY HYDRAULICKÝCH BRZDNÝCH SYSTÉMŮ.....	34
3.4.1 Základní požadavky na brzdovou kapalinu.....	35
3.4.2 Vlastnosti brzdových kapalin .....	35
3.4.3 Druhy brzdových kapalin .....	35
<b>4 VÝROBNÍ SYSTÉMY .....</b>	<b>36</b>



4.1	CAD SYSTÉM .....	36
4.2	CAM SYSTÉM .....	37
4.3	ZPŮSOBY PROGRAMOVÁNÍ .....	37
4.3.1	Ruční programování u NC stroje .....	37
4.3.2	Automatické programování prostřednictvím CAM systému .....	38
4.4	ROZDĚLENÍ CAD/CAM SYSTÉMŮ.....	38
4.4.1	2D a 2,5D CAM systémy .....	38
4.4.2	Střední CAM systémy .....	39
4.4.3	Velké CAM systémy .....	39
4.5	FRÉZOVÁNÍ V CAM SYSTÉMECH.....	40
4.6	SIMULACE A VERIFIKACE.....	41
4.7	POSTPROCESOR - POSTPROCESING.....	41
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>KONSTRUKCE ČELISTÍ .....</b>	<b>44</b>
6.1	VNITŘNÍ ZÁSTAVBA.....	44
6.2	PŮVODNÍ ČELISTI.....	46
6.2.1	Simulace zatížení .....	47
6.2.2	Nastavení simulace.....	48
6.2.3	Simulace zatížení původní čelisti.....	50
6.3	NOVÉ NÁVRHY ČELISTÍ.....	52
6.3.1	Čelist návrh 1 .....	52
6.3.2	Čelist návrh 2 .....	54
6.3.3	Čelist návrh 3 .....	55
6.3.4	Čelist návrh 4 .....	57
6.4	VÝBĚR NOVÉ ČELISTI .....	59
<b>7</b>	<b>VÝROBA NOVÉ ČELISTI.....</b>	<b>60</b>
7.1	PŘÍPRAVA PROGRAMU .....	60
7.2	PROGRAMOVÁNÍ ČELISTI .....	62
7.2.1	První část programu .....	62
7.2.2	Druhá část programu .....	63
7.2.3	Třetí část programu .....	65
7.2.4	Čtvrtá část programu .....	66
7.2.5	Shrnutí programu .....	68
7.3	PŘÍPRAVA VÝROBY ČELISTI .....	68
7.4	VÝROBA ČELISTI .....	71
<b>8</b>	<b>TESTOVACÍ PŘÍPRAVEK.....</b>	<b>75</b>
8.1	PŘÍPRAVA PROGRAMU PRO VÝROBU TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU .....	75
8.2	VÝROBA TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU .....	80
<b>9</b>	<b>TESTOVÁNÍ ČELISTÍ .....</b>	<b>81</b>

9.1	PŘÍPRAVA TESTOVÁNÍ .....	81
9.2	TESTOVÁNÍ ZATÍŽENÍ .....	81
9.3	TESTOVÁNÍ VE SKUTEČNÝCH PODMÍNKÁCH .....	83
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>84</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>85</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>88</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>90</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>93</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>94</b>

## ÚVOD

K nahrazení původního dílce novými dílci dochází z mnoha důvodů. Jak je vidět již z historie motocyklů a jejich brzd. Nejdříve zde byla kola, u kterých se používaly třecí mechanismy. Na začátku výroby motocyklů se tento mechanismus převzal. Čím se ovšem motocykly stávaly rychlejšími, bylo zapotřebí i větší účinnosti brzd. Byly tedy vyvinuty bubnové brzdy. Po nějaké době přestávali svou účinností u sportovních motocyklů stačit, tak byly vyvinuty kotoučové brzdy. Které byly následně implementovány i do běžných motocyklů kde se používají dodnes. U slabších motocyklů jsou stále používány i bubnové brzdy a na ty se v práci zaměřím.

Výroba brzd je prováděna na sériové a velkosériové úrovni. Na této úrovni výroby není možná individualizace brzd pro konkrétního zákazníka. Touto individualizací, například pro sportovní motocykly, se zabývá kusová výroba brzd. V dnešní době je při vývoji takové brzdy použito velké množství nástrojů. Používají se nejmodernější programy pro modelování jednotlivých dílců. Dále se používají programy na nejrůznější simulace těchto dílců. Možnost simulace chování dílce umožňuje zrychlit a značně snížit cenu za celkový vývoj dílce. Pro řešení a výpočty byla vyvinuta celá řada metod. Mezi nejznámější patří metoda konečných prvků - FEM analýza. Při výrobě se používají programy na simulaci výroby a následné výroby dílce.

V této práci je použit program NX 12 od firmy Siemens, který nabízí široké spektrum funkcí a dává tak možnost přesnému modelování dílců, přesné simulace modelů a také přípravu a simulaci výrobního programu. Práce je zaměřena na zlepšení tuhosti čelisti bubnové brzdy motocyklu. Tato čelist je využívána k brzdění motocyklu. Práce popisuje postup návrhu nových čelistí, jejich simulaci při zatížení, výrobu nových čelistí a porovnání původních s nově vyrobenými čelistmi.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků byla vyvinuta v padesátých letech minulého století a od té doby se neustále vylepšuje. Rychlý pokrok ve výpočetní síle a drastický pokles nákladů činí metodu konečných prvků cenově dostupnou. Nyní je to běžně používaná metoda pro řešení široké škály problémů a potenciál metody konečných prvků je obrovský. Metoda konečných prvků se typicky nachází v leteckém, automobilovém, elektrotechnickém, hydraulickém, biomedicínském, jaderném průmyslu a konstrukčním strojírenství. [1]

## 1.1 Výpočetní metody

Výpočetní metody konečných prvků se rozdělují do tří výpočetních metod.

### 1.1.1 FEM

FEM (Metoda konečných prvků) je počítačová technika pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Jednou z aplikací je předvídat deformační a stresové pole uvnitř pevných těles vystavených vnějším silám. Může být také použita k řešení problémů zahrnujících tok tekutin, přenos tepla, elektromagnetické pole, difúzi a mnoho dalších jevů. [2]

### 1.1.2 FEA

FEA (Konečně prvková analýza) je silnou výpočetní technikou pro přibližná řešení různých inženýrských problémů v reálném světě, které mají komplexní domény vystavené obecným hraničním podmínkám. FEA se stala zásadním krokem při navrhování nebo modelování fyzického jevu v různých inženýrských oborech. Ve skutečnosti FEA snižuje problém s konečným počtem neznámých dělení domény na prvky a vyjádřením neznámého pole proměnné z hlediska předpokládaných přibližovacích funkcí v rámci každého prvku. [3]

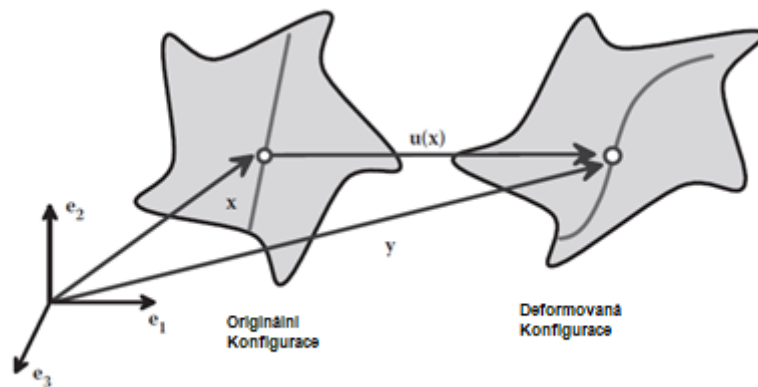
### 1.1.3 CAE

Softwarové nástroje vyvinuté na podporu těchto činností jsou považovány za nástroje CAE (Počítačem podporované konstruování). Nástroje CAE se používají například k analýze robustnosti a výkonu součástí a sestav. Termín zahrnuje simulaci, validaci a optimalizaci výrobků a výrobních nástrojů. V budoucnu budou systémy CAE významnými

poskytovateli informací, které pomohou podpořit projektové týmy při rozhodování. CAE se používá v mnoha oblastech, jako je automobilový a lodní průmysl, letectví a vesmír. [4]

## 1.2 Užití FEM systému

Hlavním cílem je vypočítat pole posunutí uvnitř pevného tělesa vystaveného vnějším silám. Chci-li to provést přesně, vizualizuji tuhé deformace pod vnějším zatížením, jak je znázorněno na Obr. 1. Každý bod pevného tělesa se pohybuje při zatížení. Dispoziční vektor  $u(x)$  určuje pohyb bodu v pozici  $x$  v nedeformované pevné látce. Cílem je určit  $u(x)$ . Jakmile je známo  $u(x)$ , lze odvodit deformační a napět'ové pole v pevné látce. [2]



Obr. 1. Dispoziční vektor charakterizující deformaci pevné látky [2]

### 1.2.1 Rozdělení analýzy

Existují dva obecné typy analýzy konečných prvků v pevném mechanizmu. Ve většině případů, je zájem stanovit chování pevného těla, které je ve statické rovnováze. To znamená, že vnější i vnitřní síly působící na pevný součet jsou nulové. V některých případech můžu mít zájem o dynamické chování pevného těla. Příklady zahrnují modelování vibrací ve strukturách, problémy zahrnující šíření vln, výbušné zatížení a analýzu havárií. [2]

- **Statický** - V tomto případě nemusí být nutné vypočítat časovou změnu pohybu. Některé materiály však závisí na historii. Navíc problém statické rovnováhy může mít více než jedno řešení v závislosti na historii zatížení. V takovém případě musí být vypočteny časové změny řešení.

$$\Sigma F = 0 \text{ [N]} \quad (1)$$

- **Dynamický** - řeší v podstatě rovnice pohybu pro kontinuum složitější verze. Samozřejmě v tomto případě se musí vypočítat pohyb pevné látky jako funkce času.[2]

$$\Sigma F = ma \text{ [N]} \quad (2)$$

### 1.2.2 Řešené oblasti

Mezi řešené oblasti může patřit:

- **statika**
  - lineární strukturní analýza
  - nelineární analýzy (geometrická, materiálová nelinearita)
  - lomová mechanika
- **dynamika**
- **kmitání** (vlastní kmity, vlastní frekvence,...)
- **proudění tekutin**
- **teplo**
- **elektromagnetické jevy.**

### 1.2.3 Postup nastavení výpočtu FEM

Při nastavení výpočtu se postupuje.:

- a) **Geometrie pevné látky:** toto se dělá vytvořením síťového prvku. Síť lze obvykle generovat automaticky počítačem.
- b) **Vlastnosti materiálu:** to se provádí specifikováním materiálu pevné látky.
- c) **Povaha zatížení aplikovaného na pevnou látku:** provede se určením hraničních podmínek problému.
- d) Pokud vaše analýza zahrnuje **kontakt mezi dvěma dalšími pevnými látkami**, musíte specifikovat povrchy, které se pravděpodobně dostanou do kontaktu, a vlastnosti kontaktu.
- e) Pro dynamickou analýzu je třeba **specifikovat počáteční podmínky problému.** To není nutné pro statickou analýzu.

- f) U problémů týkajících se dalších polí může být nutné zadat počáteční hodnoty pro tyto proměnné pole (např. museli byste zadat počáteční rozložení teploty v tepelné analýze). [2]

**Další aspekty problému, které se řeší a postup řešení, který se má použít.:**

- a) Musí se specifikovat, zda by měl výpočet zohlednit konečné změny geometrie tělesa.
- b) Pro dynamickou analýzu je třeba určit časovou periodu analýzy (nebo počet časových kroků).
- c) Pro statickou analýzu se budete muset rozhodnout, zda je problém lineární nebo nelineární. Lineární problémy jsou velmi snadno řešitelné. Nelineární problémy mohou vyžadovat speciální postupy.
- d) Pro statickou analýzu s materiály závislými na historii je třeba zadat časové období analýzy a velikost časového kroku (nebo počet kroků).
- e) Pokud je zájem o výpočet přirozených frekvencí a tvarů režimů, pro které musíte určit, kolik režimů je zapotřebí extrahovat.
- f) Konečně budete muset určit, co FEM musí vypočítat. [2]

### 1.3 FEM modely

Lze rozdělit:

- dle materiálových vlastností:
  - isotropní
  - anisotropní (příčně isotropní, obecně anisotropní,...)
- podle dimenze:
  - 2D (rovinná napětí, rovinná deformace,...)
  - 3D.

#### 1.3.1 Geometrické vlastnosti

Lze rozdělit:

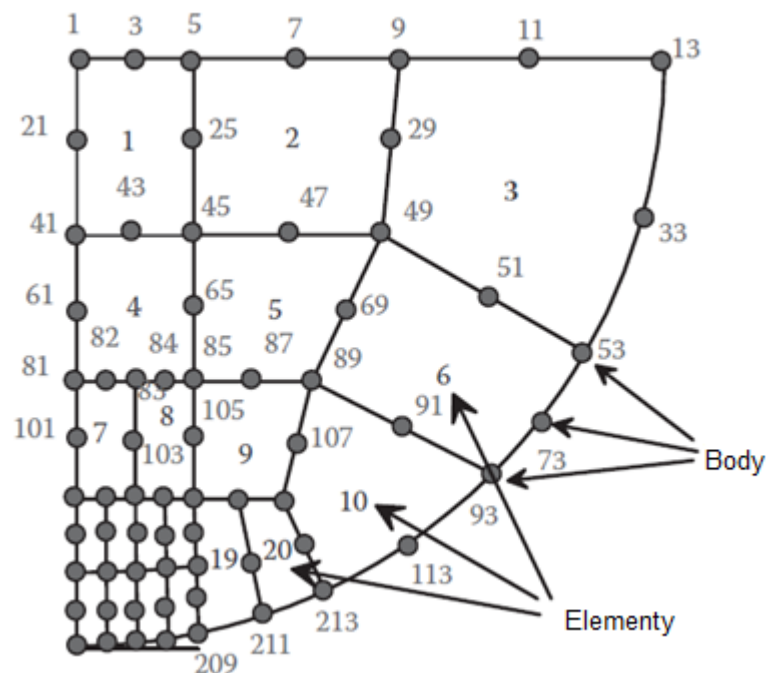
- dimenze elementu:
  - 1D (nosníky, vazníky, skořepiny)
  - 2D (solid, skořepina)
  - 3D (solid)



- rozměry (tloušťka, průřez)
- vrstvy (počet, materiál, tloušťka).

### 1.3.2 Uzly a elementy

Síť konečných prvků je definována sadou uzlů společně se sadou konečných prvků, jak je znázorněna na Obr. 2.



Obr. 2. Uzly a elementy v síti konečných prvků [2]

#### 1.3.2.1 Uzly

Uzly jsou množinou diskrétních bodů uvnitř pevného tělesa. Uzly mají následující vlastnosti.:

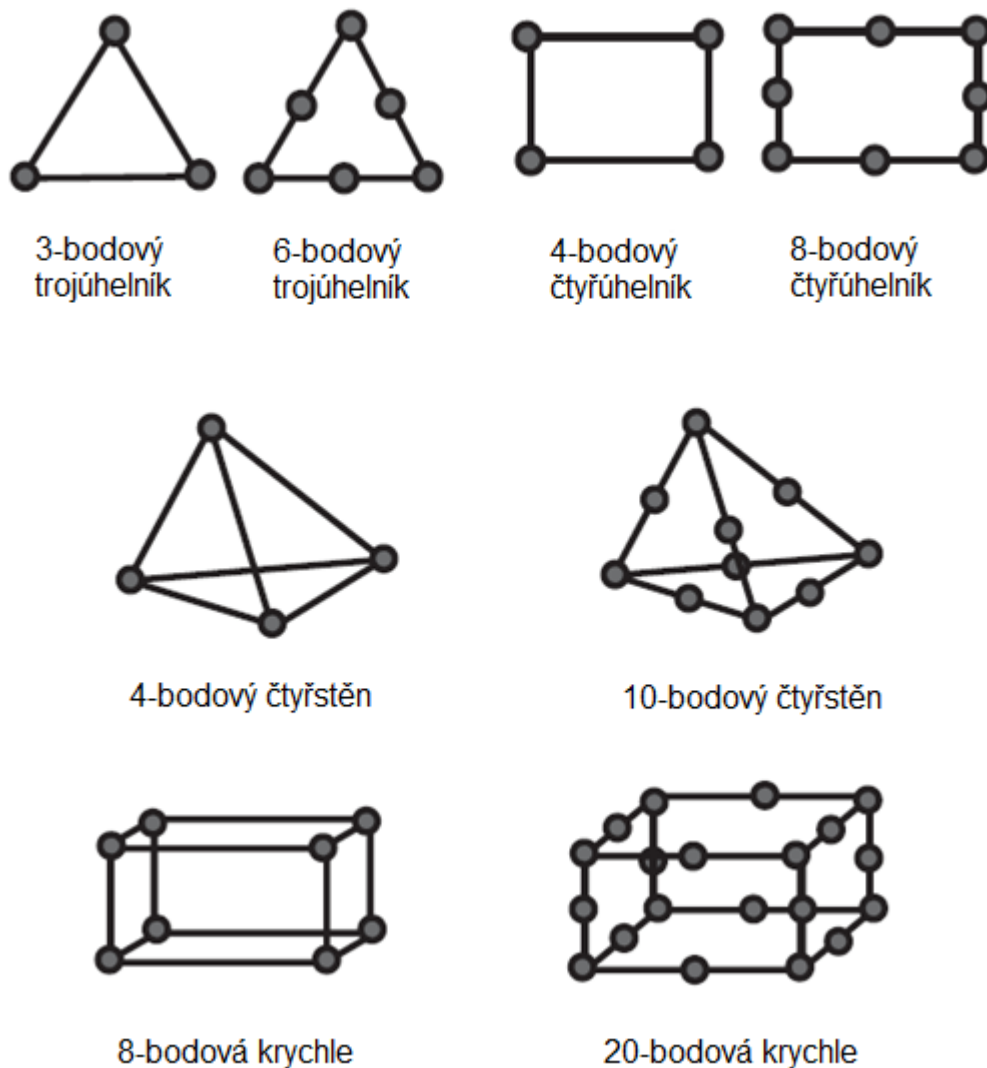
- **Číslo uzlu:** Každému uzlu je přiřazeno celé číslo, které se používá k identifikaci uzlu. Může být vybráno libovolné vhodné schéma číslování, uzly nemusí být očíslovány v pořadí a čísla mohou být vynechány. Například bychom mohli číslovat množinu  $n$  uzlů jako 100, 200, 300, ... 100 $n$  namísto 1, 2, 3, ...  $n$ .
- **Souřadnice uzlů:** U 3D FEM je každému uzlu přiřazena sada souřadnic ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ), která určuje polohu uzlu v nedeformovaném pevném tělese. Pro 2D analýzu je každému uzlu přiřazen pár ( $x_1$ ,  $x_2$ ) souřadnic. U symetrické analýzy musí být osa  $x_2$  shodná s osou rotace symetrie.

- **Uzlové posuny:** Když se pevné těleso deformuje, každý uzel se přesune do nové polohy. Pro 3D FEM určují uzlové posuny tři komponenty pole posunutí  $u(x)$  v každém uzlu:  $(u_1, u_2, u_3)$ . Pro 2D analýzu má každý uzel dvě posunutí  $(u_1, u_2)$ . Uzlové posuny jsou na začátku analýzy neznámé a jsou vypočítávány programem s konečnými prvky.
- **Jiné uzlové stupně volnosti:** Pro komplexnější analýzy můžeme chtít například vypočítat rozložení teploty v pevných látkách nebo distribuci napětí. V tomto případě je každému uzlu přidělena také teplota, napětí nebo podobná zajímavá veličina. Existují také některé metody konečných prvků, které používají více než jen posunutí k popisu změn tvaru v pevné formě. Například při analýze 2D paprsků používáme posunutí a otáčky paprsku v každém uzlovém bodě pro popis deformace. V tomto případě má každý uzel rotaci, stejně jako dvě složky posunutí. Sbírkou všech neznámých veličin (včetně posunutí) v každém uzlu je známá jako stupně volnosti. Program konečných prvků vypočítá hodnoty těchto neznámých stupňů volnosti. [2]

### 1.3.2.2 Elementy

Elementy se používají k rozdělení pevného disku na diskretní oblasti. Prvky mají následující vlastnosti.:

- **Číslo prvku:** Každému prvku je přiřazeno celé číslo, které slouží k identifikaci prvku. Stejně jako při číslovacích uzlech může být vybráno jakékoli vhodné schéma pro číslování prvků.
- **Geometrie:** Existuje mnoho možných tvarů prvků. Některé z běžnějších typů prvků jsou zobrazeny na Obr.3. Uzly připojené k prvku jsou zobrazeny červeně. Ve dvou rozměrech jsou prvky obecně buď trojúhelníkové nebo obdélníkové. Ve třech rozměrech jsou prvky obecně čtyřstěn, šestistěn nebo kvádr. Existují i jiné typy prvků, které se používají ke zvláštním účelům: příklady zahrnují vazníky (které jsou jednoduše axiálními členy), nosníky a prvky skořepiny.
- **Uzlové posuny:** Když se pevné těleso deformuje, každý uzel se přesune do nové polohy. Pro 3D FEM určují uzlové posuny tři komponenty pole posunutí  $u(x)$  v každém uzlu:  $(u_1, u_2, u_3)$ . Pro 2D analýzu má každý uzel dvě posunutí  $(u_1, u_2)$ . Uzlové posuny jsou na začátku analýzy neznámé a jsou vypočítávány programem s konečnými prvky.



Obr. 3. Společné prvky 2D a 3D [2]

- Jiné uzlové stupně volnosti:** Pro komplexnější analýzy lze chtít například vypočítat rozložení teploty v pevných látkách nebo distribuci napětí. V tomto případě je každému uzlu přidělena také teplota, napětí nebo podobná zajímavá veličina. Existují také některé metody konečných prvků, které používají více než jen posunutí k popisu změn tvaru v pevné formě. Například při analýze 2D paprsků se používá posunutí a otáčky paprsku v každém uzlovém bodě pro popis deformace. V tomto případě má každý uzel rotaci, stejně jako dvě složky posunutí. Sbírkou všech neznámých veličin (včetně posunutí) v každém uzlu je známá jako stupně volnosti. Program konečných prvků vypočítá hodnoty těchto neznámých stupňů volnosti. [2]

## 1.4 Systémy

Pomocí software systému může návrhář analyzovat součásti a sestavy, které byly navrženy ve 3D konstrukčních softwarech. Získat znalosti o vlastnostech svého výrobku v raných fázích návrhu, které by jinak mohly být nalezeny pouze s prototypem. Také zbývá dostatek času na opravu chyb před zahájením výstavby prototypů. [12]

Existuje mnoho software systému, ve kterých se provádí FEM analýzy. Mezi ty nejznámější patří.:

- Abaqus
- ANSYS
- COSMOS
- Fatigus
- Mars
- Nastran
- PAM-Crash

## 2 BRZDOVÉ SYSTÉMY U MOTOCYKLŮ

Brzdy fungují na principu tření pohyblivých součástí o nepohyblivé. Převádí se zde kinetická energie na tepelnou. Při brzdění se přední kolo zatíží a zadní odlehčí. Motocykly mají oddělené ovládání pro přední a zadní brzdu. Rozdělení brzdové síly na jednotlivá kola závisí na jezdcích. Tuto nevýhodu odstraňuje u motocyklů svázaný brzdový systém, kdy dávkování brzdových sil na přední a zadní kolo nezávisí na umění jezdce. [5]

Účinnost brzdového systému ovlivňuje:

- stav a kvalita brzdového systému
- rychlost jízdy
- stav a kvalita pneumatik
- hmotnost motocyklu a jezdce se spolujezdcem a zavazadly
- stav vozovky a povětrnostní podmínky. [5]

### 2.1 Druhy systémů

Motocykly využívají dva základní typy brzd. Jedná se o kotoučové brzdy, kde se tře brzdový kotouč o brzdové destičky a bubnové brzdy, kde se třou brzdové čelisti o brzdový buben. U dnešních motocyklů se využívají převážně kotoučové brzdy z důvodu jejich větší účinnosti. Bubnové brzdy se používají u malých motocyklů a mopedů. [5]

#### 2.1.1 Bubnové brzdy

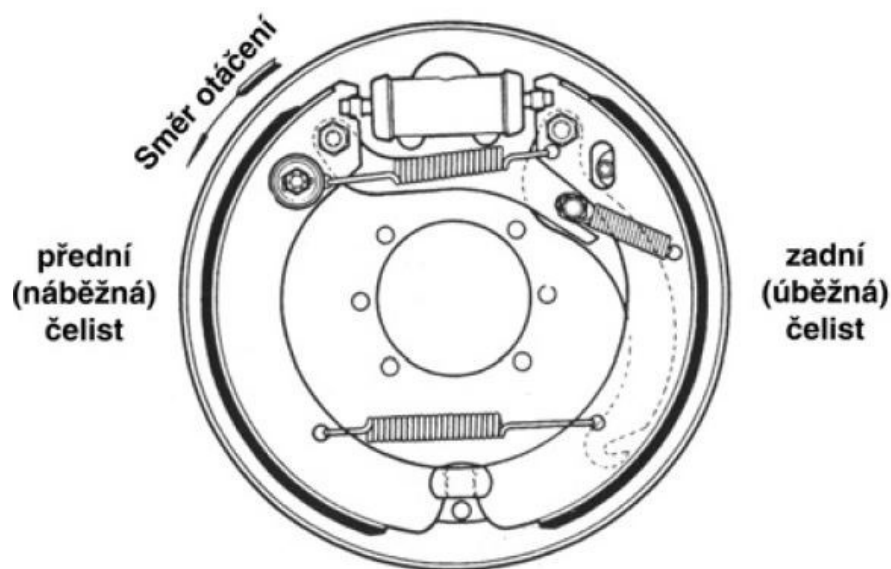
Mechanické bubnové brzdy se u motocyklů považují za zastaralé, přesto však mají své výhody. Díky své uzavřené konstrukci jsou například odolné proti vnikání vody a nečistot. To neplatí u kotoučových brzd, u kterých dochází k znečišťování brzdových kotoučů. Další výhodou je to, že nemají zpožděný náběh, jako je tomu u brzd kotoučových. Proto se tyto brzdy montují spíše na zadní kolo, kde vlivem velkého brzdného účinku může dojít k zablokování brzdy a tím se může dostat do smyku. Bubnové brzdy se používají hlavně u terénních motocyklů i na zadních kolech malých i větších silničních strojů a chopperů. [5]

Čelisti a ovládací mechanismus bubnové brzdy je uchycen na desce pevně spojené s přední nebo zadní vidlicí, tzv. štítu brzdy. Brzdové čelisti pak působí na brzdový buben, který je součástí náboje kola a otáčí se s kolem. Rozevírající se brzdové čelisti tlačí při brzdění na vnitřní povrch brzdového bubnu, tím navozují tření a zpomalují kolo. [5]

Na brzdových čelistích jsou přilepena nebo přinýtována třecí obložení, která při přimáčknutí na vnitřní povrch brzdového bubnu navozují třecí účinek. Při uvolnění páky brzdy stáhnou vratné pružiny brzdové čelisti zpět k sobě. Oproti brzdovým segmentům kotoučových brzd má třecí obložení brzdových čelistí větší životnost. [5]

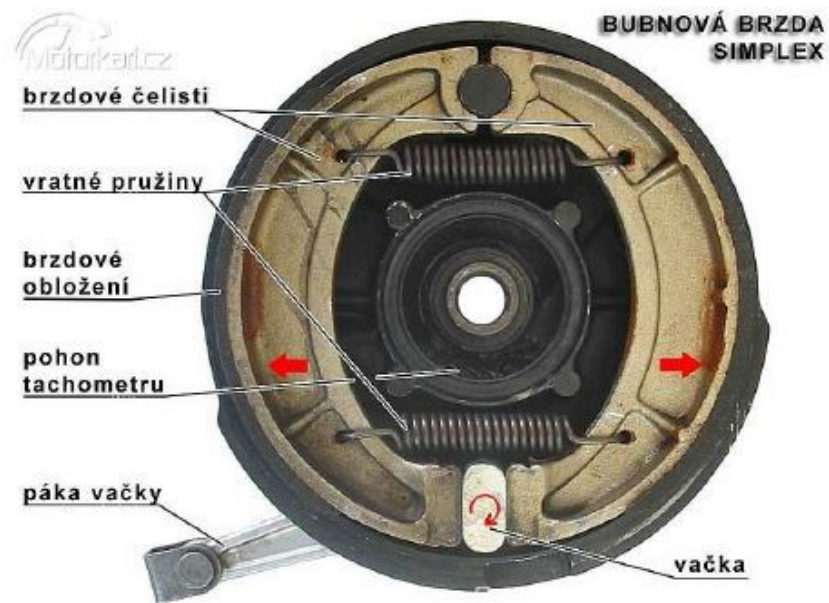
- **Jednočinné bubnové brzdy SIMPLEX**

Jednočinné hydraulické bubnové brzdy typu simplex, jsou ze všech typů bubnových brzd konstrukčně nejjednodušší a při brzdění vyvozují relativně malou brzdovou sílu. Používají se zejména u lehkých motocyklů, mopedů a skútrů a někdy jako zadní brzdy u těžších strojů. U jednočinných brzd se rozlišuje náběžná a úběžná brzdová čelist. Náběžná čelist je ta, která se na brzdový buben přitlačuje předním koncem proti směru otáčení bubnu. Bubnové brzdy u motocyklů jsou ovládány mechanicky pomocí lanek nebo táhel. Přední brzda je napojena na páku na pravé straně řídicího řídítek, zadní brzda je pak ovládána nožní pákou po pravé straně motocyklu. [5]



Obr. 4. Jednočinná hydraulická bubnová brzda SIMPLEX [7]

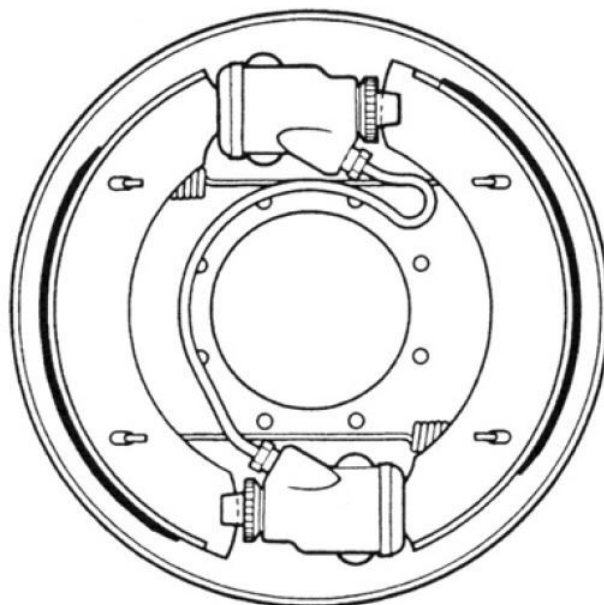
Mezi třecím obložением brzdových čelistí a vnitřním povrchem brzdového kotouče je vůle, která umožňuje volné otáčení kola. Po zmáčknutí páky brzdy se pohyb ovládací páky přenesne přes táhlo na páku spojenou s hřídelem, na kterém je vačka. Hřídel s vačkou se pootočí a vačka odtlačí brzdové čelisti od sebe. Třecí obložení brzdových čelistí se přitisknou na vnitřní povrch brzdového bubnu a začnou brzdit. [5]



Obr. 5. Jednočinná bubnová brzda SIMPEX [6]

- **Dvočinné bubnové brzdy DUPLEX**

Dvočinné bubnové brzdy duplex se používají na předních kolech. Brzdové čelisti jsou od sebe roztahovány a přitlačovány na vnitřní povrch brzdového bubnu působením dvou otáčivých vaček. Brzdové čelisti jsou od sebe roztahovány na obou koncích a mohou tak na brzdový buben tlačit větší plochou. [5]



Obr. 6. Dvočinná bubnová brzda DUPLEX [7]

### 2.1.2 Kotoučové brzdy

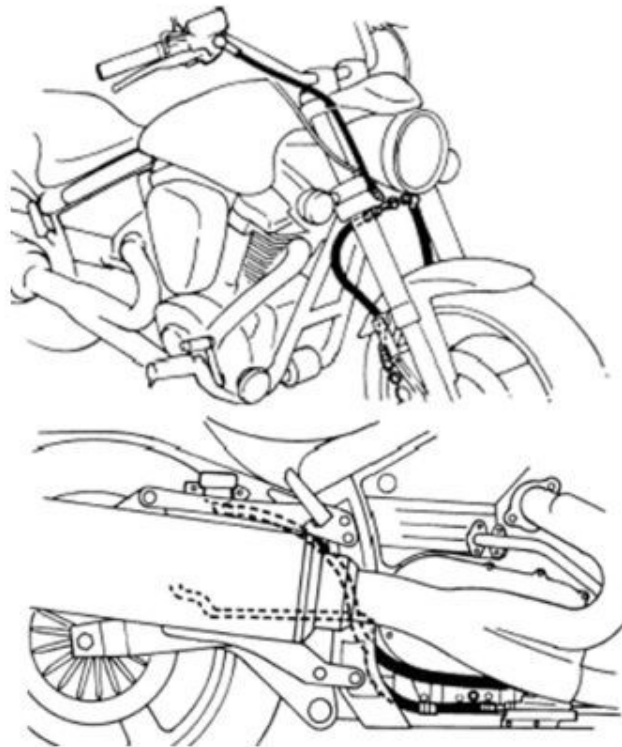
Hlavní součástí kotoučové brzdy je brzdový kotouč, který je upevněn na hlavě (náboji) kola. Brzdový kotouč může být hladký nebo opatřený drážkami, které slouží k lepšímu odvádění tepla od brzd. Po stranách kotouče jsou v brzdovém třmenu, pevně spojením s vidlicí, umístěny brzdové segmenty s obložením. Tyto segmenty se na kotouč ze stran přitlačují a tím ho brzdí. [5]

V brzdovém třmenu jsou dva brzdové segmenty, které se skládají z kovové destičky a nalepeného třecího obložení. Brzdový kotouč spojený s nábojem kola se otáčí mezi těmito segmenty, brzdovými destičkami a ty ho při brzdění svírají mezi sebe. Brzdové destičky jsou k brzdovému kotouči přitlačovány jedním, dvěma až šesti písty, které se pohybují v brzdovém třmenu. [5]

Kotoučové brzdy jsou většinou ovládány hydraulicky. Pro přenos tlaku slouží hydraulická brzdová kapalina. Tato kapalina je tlačena z hlavního brzdového válce přes hydraulické hadičky a potrubím pracovního brzdného válce nebo přímo do brzdného třmenu. Součástí hydraulického systému je zásobní a zároveň vyrovnávací nádržka na brzdovou kapalinu, většinou integrovaná s hlavním brzdovým válcem. Zásobní nádržka pro zadní brzdu je obvykle upevněna odděleně na rámu nebo nad hlavním válcem zadní brzdy. Hlavní brzdový válec přední brzdy je dimenzován silněji než hlavní válec zadní brzdy. [5]

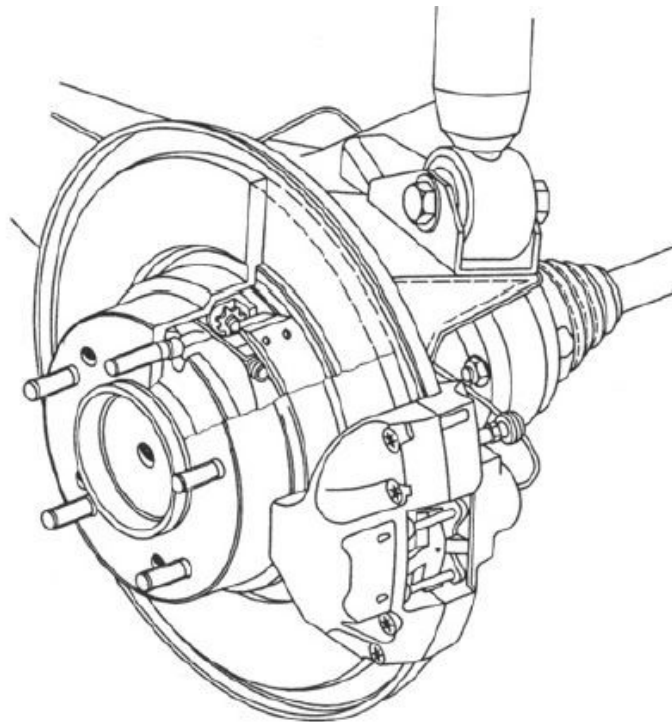
Při stlačení ovládací páky se zatlačí píst do hlavního brzdového válce. Tento píst tlačí v brzdovém válci na hydraulickou kapalinu, která přenáší tlak hydraulickým vedením do pracovního válce brzdy nebo do brzdového třmenu. Působením tlaku se brzdová kapalina vytlačuje do brzdového třmenu a zde tlačí na pohyblivé brzdové písty. Tyto písty pak přitlačují brzdové destičky k brzdovému kotouči. Pohyblivé součásti brzdy jsou opatřeny pryžovými manžetami, které slouží jako ochrana proti vniknutí nečistot. [5]





*Obr. 7. Hydraulické ovládání motocyklových brzd [5]*

Po uvolnění ovládací páky brzdy dochází k poklesu tlaku v soustavě a vratnému pohybu pístu do původní polohy. Tento pohyb je zapříčiněn deformací těsnících kroužků. [5]



*Obr. 8. Kotoučová brzda [7]*

Podle způsobu ovládání dělíme kotoučové brzdy s:

- pevným brzdovým třmenem
- plovoucím brzdovým třmenem
- výkyvným brzdovým třmenem
- otočným brzdovým třmenem
- plovoucím brzdovým kotoučem.

Hlavní výhodou kotoučových brzd je jejich velká odolnost proti tepelnému zatížení. Vynikající tepelnou odolnost mají moderní kotoučové brzdy s brzdovým obložením ze slinutých materiálů. Brzdové destičky mohou u kotoučových brzd tlačit na brzdový kotouč velkou silou a přitom mají velký třecí účinek i na žhavém brzdovém kotouči, který se při dlouhém a intenzivním brzdění může nažhavit až do ruda. Výhodou konstrukce a mechanického provedení kotoučových brzd je, že jsou málo citlivé na teplotní roztažnost jednotlivých součástí. Dále mají tu výhodu, že se velmi dobře chladí náporem vzduchu při jízdě, protože všechny součásti jsou přímo vystaveny proudu vzduchu. [5]

Hlavní nevýhodou kotoučových brzd je, že jejich součásti jsou bezprostředně vystaveny nečistotám, vodě, mastnotě a jiným vlivům. Další nevýhodou kotoučových brzd je nutnost upevnění brzdového třmenu na vidlici předního kola a použití jednoho brzdového kotouče. Brzdový kotouč musí být uchycený mimo střed osy kola. Při brzdění vzniká nepříjemný klopný moment, který ovlivňuje držení přední vidlice v přímém směru. Tomuto jevu lze zabránit použitím masivních závěsů na vidlici, masivního můstku a stabilizátoru vidlice. [5]

## 2.2 Asistenční systémy

Pro bezpečnost silničního provozu mají asistenční systémy nezastupitelný význam, protože mají preventivní charakter. V kritických situacích asistenční systém převezme část kontroly nad motocyklem nebo dočasně jezdci významným způsobem pomáhá při řešení krizové nebo specifické situace. Využití moderních asistenčních systémů pro motocykly je jednou z možností, jak snížit počet dopravních nehod. Motocykly, které jsou těmito systémy vybaveny, se snadněji ovládají a poskytují jejich jezdci větší bezpečí a zároveň i komfort. V určitých situacích je jejich provoz efektivnější a ekonomičtější. [8]

### 2.2.1 Protiblokovací systém ABS

U konvekčních brzdových soustav jezdec určuje svoji ruční a nožní silou velikost brzdového tlaku a tím také velikost brzdných momentů na kolech motocyklu. V kritických situacích, kdy musí často jezdec prudce brzdít, může dojít k zablokování kola a tím ke ztrátě směrové stability. Použitím elektronických protiblokovacích systémů lze zabránit nebezpečným jízdním situacím, tzn. podstatně zvýšit aktivní bezpečnost. Pokud protiblokovací systém ABS rozezná blokování kola, sníží odděleně tlak v brzdovém systému pro přední a zadní kolo. Systém ABS má za úkol zabraňovat blokování kol při brzdění, a to za všech povětrnostních podmínek a na všech typech vozovek. [5]

Na protiblokovací systém jsou kladeny tyto požadavky:

- během regulovaného brzdění musí být zachována říditelnost a stabilita
- regulace musí pracovat v celém rychlostním rozsahu
- regulační soustava musí optimálně využívat přilnavosti kol k vozovce, přičemž říditelnost má přednost před zkrácením brzdné dráhy
- také při brzdění na nerovné (vlhké) vozovce musí být vozilo ovladatelné při libovolně prudkém brzdění, regulace brzdění musí rozpoznat aquaplaning a vhodně na něj reagovat
- je-li rozeznána závada funkce ABS, musí dojít k vypnutí protiblokovací soustavy a řidič musí být o závadě informován (kontrolka ABS)
- při poruše ABS musí být zachována plná funkčnost základní brzdové soustavy. [5]

### 2.2.2 Systém motocyklové stability MSC

Ke standardním činitelům otočení předního a zadního kola se u MSC (Motorcycle Stability Control) přidává i náklonové čidlo. Díky tomu dokáže jednotkami vyhodnotit a vyřešit následující situace – zabraňuje podklouznutí kola při brzdění během náklonu, snižuje narovnávání motorčky při brzdění během náklonu, zabraňuje převrácení motorčky přes přední kolo při nouzovém brzdění, zabraňuje smyku zadního kola při akceleraci v náklonu a zabraňuje zdvihání předního kola při akceleraci. Systém 100x za sekundu vyhodnocuje aktuální náklon motorčky a měří se kolmo k zemi. MSC dokáže díky přednastaveným algoritmům a gyroskopům optimálně rozdělit brzdnu sílu mezi přední a zadní kolo. Díky tomu lze efektivně brzdít i v zatáčce bez rizika podklouznutí kol nebo zvednutí motorčky. Další výhodou je možnost i při krizovém brzdění změnit směr motorčky. [8]

### 2.2.3 Asistent brzdného systému – rozdělení brzdného účinku

Kombinovaný brzdový systém CBS (Combined Brake System) je brzdový systém, který umí propojit přední a zadní brzdy. Může se vyskytovat jak na motorce, tak i na skútru. Při aplikaci buď přední nebo zadní brzdy je systém automaticky schopný brzdit i druhé kolo. Síla každé brzdy je určována kontrolním ventilem a na moderních motocyklech je řízená centrální jednotkou. Může být spojeno i s ABS. Kombinovaný brzdový systém má výhodu v tom, že zkracuje brzdnou dráhu a dokáže efektivně stabilizovat motorku při krizovém brzdění. Při aplikaci plného brzdného účinku na přední kolo dokáže současně brzdit i kolo zadní a tím je motocykl stabilnější. [8]

## 2.3 Zákonné předpisy

Brzdové systémy vozidel jsou předepsané ve vyhlášce Ministerstva dopravy a spojů č.206/2018 Sb., která novelizuje vyhlášku č.341/2014 o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích. Požadavky jsou dané v souladu s homologačními předpisy EHK č. 78 a 90. [9]

Každé vozidlo musí vyhovět zkouškám požadovaným pro vozidla dané kategorie a pro vlastnosti brzd na daném vozidle. Vozidla musí být konstruována tak, aby řidič mohl aktivovat ovládací prvek provozního brzdného systému vsedě v normální jízdni poloze a s oběma rukama na ovládacím prvku řízení. Dvoukolová vozidla musí být vybavena buď dvěma samostatnými provozními brzdovými systémy, nebo vícepruhovým provozním brzdovým systémem s nejméně jednou brzdou působící na přední kolo a nejméně jednou brzdou působící na zadní kolo. [10]

V případech, kdy jsou vozidla vybavena dvěma samostatnými provozními brzdovými systémy, mohou tyto systémy sdílet společnou brzdu, pokud v případě poruchy na jednom systému není dotčena účinnost druhého systému. Náhradní část s brzdovým obložením nebo náhradní obložení bubnových brzd musí být konstruovány a vyrobeny tak, aby v případě, kdy nahrazují originálně montovanou část nebo obložení na vozidle, byl brzdový účinek tohoto vozidla stejný s brzdovým účinkem schváleného typu vozidla. [11]

### 3 MATERIÁLY BRZDOVÝCH SYSTÉMŮ

Materiály brzdových systémů jsou důležité pro výkon a stabilitu brzdového systému. Na velké množství informací je nahlíženo jako na obchodní tajemství společností vyrábějící jednotlivé komponenty brzdových systémů.

#### 3.1 Materiály brzdových bubnů

Brzdové bubny se nejčastěji vyrábějí odléváním. Bubny bývají odlévány zejména z šedé litiny, temperované litiny, ocelolitiny nebo slitiny lehkých kovů. Po odlití bubnu následuje opracování brzdných ploch. Opracování těchto ploch se skládá ze dvou technologických operací. První z těchto operací je soustružení, touto operací zarovnáme funkční plochy a zpřesníme rozměr odlitého bubnu. Po této operaci následuje broušení, broušením funkčních ploch dosáhneme většího rozměrového zpřesnění a zmenšení drsnosti povrchu. [14]



*Obr. 9. Brzdový buben [15]*

#### **Materiál EN-GJS-600-3 – Perliticko-feritická litina**

(dle ČSN 42 2306)

Litina je vhodná pro odlitky s tloušťkou stěny od 5 do 100 mm a to na součástky namáhané mechanicky a otěrem. [13]

- Tvrdost HB – 270
- Mez pevnosti  $R_m$  – 600 MPa

**Materiál EN-GJS-700-2 – Perlitická litina**

(dle ČSN 42 2307)

Litina je vhodná pro odlitky s tloušťkou stěny od 5 do 75 mm na součástky více namáhané a odolné vůči otěru. Je vhodná na ozubená kola, klikové a vačkové hřídele, kola čerpadel a brzdové bubny. [13]

- Tvrdost HB – 300
- Mez pevnosti  $R_m$  – 700 MPa

**Materiál EN-GJL-200 – Šedá litina**

(dle ČSN 42 2420)

Litina s lupínkovým grafitem, je vhodná pro odlitky s tloušťkou stěny 8 až 45 mm. Odolná vůči vyšším teplotám -60 až 500°C. Používá se na odlitky strojů, armatur, části pístových motorů. [13]

- Tvrdost HB – 200
- Mez pevnosti  $R_m$  – 200 - 300 MPa

**Materiál EN-GJL-250 – Šedá litina**

(dle ČSN 42 2425)

Litina obsahuje kuličkový grafit, který dobře tlumí vibrace. Je vhodná pro odlitky s tloušťkou stěny 15 až 70 mm. Odolná vůči vyšším teplotám -60 až 500°C. Používá se na válce motorů, součásti turbín. [13]

- Tvrdost HB – 240
- Mez pevnosti  $R_m$  – 250 - 350 MPa

**3.2 Materiály brzdových čelistí**

Brzdové čelisti se vyrábí buď to z ocelového plechu, který je vypálen na určený rozměr následně ohnut a svařen, jak je vidět na Obr. 9. nebo odlit ze slitiny lehkých kovů, jak je vidět na Obr. 10. Brzdové čelisti jsou konstruovány do tvaru T a to z důvodu tuhosti čelisti. [14]



*Obr. 10. Brzdové čelisti z ocelového plechu [15]*



*Obr. 11. Brzdové čelisti ze slitiny lehkých kovů [15]*

Vlastní tělo čelisti musí být lehké, hliníkové slitiny jsou pro to vhodné. Hliníkové slitiny jsou lehké a s vyšším stupněm hliníku nám dává i vyšší pevnost, aby vydržel pod zatížením. Doporučuje se vysoký stupeň hliníku např. EN AW 7022 nebo EN AW 7075. [16]

### **Materiál CERTAL**

Vysoce pevnostní válcovaná deska CERTAL je založena na slitině EN AW 7022 (AlZn5Mg3Cu). V porovnání s jinými vysoce pevnostními válcovanými deskami vykazuje CERTAL výrazně nižší úbytek pevnosti a tvrdosti od okrajů desky k jejich středu, takže je tvarově stabilnější než např. válcované desky z materiálu EN AW 7075. [17]

- Tvrdost HB – 165 - 170
- Mez pevnosti  $R_m$  – 490 - 555 MPa
- Mez kluzu  $R_{p0,2}$  – 400 - 495 MPa

### **Materiál EN AW 7075**

Vysoce pevnostní válcovaná deska EN AW 7075 (AlZn5,5MgCu) je nejznámější (vysoce pevnostní) válcovaná deska. Je používána ve všech oblastech průmyslu nezávisle na individuální nezbytnosti. [17]

- Tvrdost HB – 104 - 160
- Mez pevnosti  $R_m$  – 360 - 540 MPa
- Mez kluzu  $R_{p0,2}$  – 240 - 460 MPa

### **Materiál EN AW 6082**

Slitina EN AW 6082 (AlSi1MgMn), jedná se o středně pevnostní válcovanou desku, vykazuje vedle teplotní odolnosti také velmi dobrou odolnost vůči napět'ové korozi. [17]

- Tvrdost HB – 89 - 94
- Mez pevnosti  $R_m$  – 295 - 310 MPa
- Mez kluzu  $R_{p0,2}$  – 240 - 460 MPa

## **3.3 Materiály brzdového obložení**

Materiály používané na brzdové obložení (Frikční kompozity) se skládají z 15 až 40 složek.

### **3.3.1 Struktura materiálu brzdového obložení**

Základní složky brzdového obložení lze podle jejich převažující funkce rozdělit do 5 skupin:

- **Abraziva**

Abraziva určují součinitel tření obložení a zajišťují jeho stabilitu při vysokých teplotách. V průběhu brzdění také odstraňují teplem degradovaný materiál, který vzniká na povrchu brzdového obložení v průběhu tření, tím obnovuje povrch. Mezi nejznámější abraziva patří zirkon ( $ZrSiO_4$ ), korund ( $Al_2O_3$ ) a karbid křemíku (SiC). [14]



- **Funkční plniva (maziva)**

Funkční plniva mají za úkol vyplnit objem kompozitu a zároveň přispět k některé z požadovaných vlastností. Příkladem funkčních plniv jsou tuhá maziva, která se vylučují během brzdění a zabraňují zablokování brzdy. Mezi nejznámější patří grafit (C), stinit ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ). [14]

- **Vláknové výztuže**

Plní funkci soudržného systému a slouží také ke zpevnění výsledného frikčního kompozitu, používají se tři skupiny výztuží: [14]

- anorganická: kovová - nepoužívanější jsou zejména ocelová vlákna  
nekovová - nepoužívanější jsou například čedičová nebo skleněná vlákna
- organická - nepoužívanější jsou například kevlarová vlákna nebo vlákna polymerních hmot (polyester).

- **Plniva**

Hlavním úkolem plniv je vyplnit prostor vyrobeného vzorku. Přestože jsou plniva indiferentní složky, předpokládá se, že se podílejí výsledných frikčně-otěrových vlastnostech. Nepoužívanějším plnivem je baryt ( $\text{BaSO}_4$ ). [14]

- **Pojiva**

Pojiva tvoří v těchto typech kompozitu největší podíl a významně se podílejí na funkčních vlastnostech výsledného kompozitu. Nejběžnějším typem pojiv u frikčních kompozitů jsou fenol-formaldehydové nebo epoxidové pryskyřice. Z epoxidových pryskyřic převažují Novolaky, plniva tohoto typu jsou schopna vydržet zatížení při teplotách  $250^\circ\text{C}$ . [14]

### 3.3.2 Funkční požadavky na brzdové obložení

Opotřebení brzdového obložení by mělo být minimální, ale bude záležet na řídicově stylu jízdy. V běžných jízdách podmínkách se očekává, že brzdové obložení bubnových brzd vydrží 50 000 až 80 000 km. Nicméně určité malé opotřebení je žádoucí, aby bylo možné zbytky koroze a materiálových usazenin odstranit během normálního brzdění. [14]

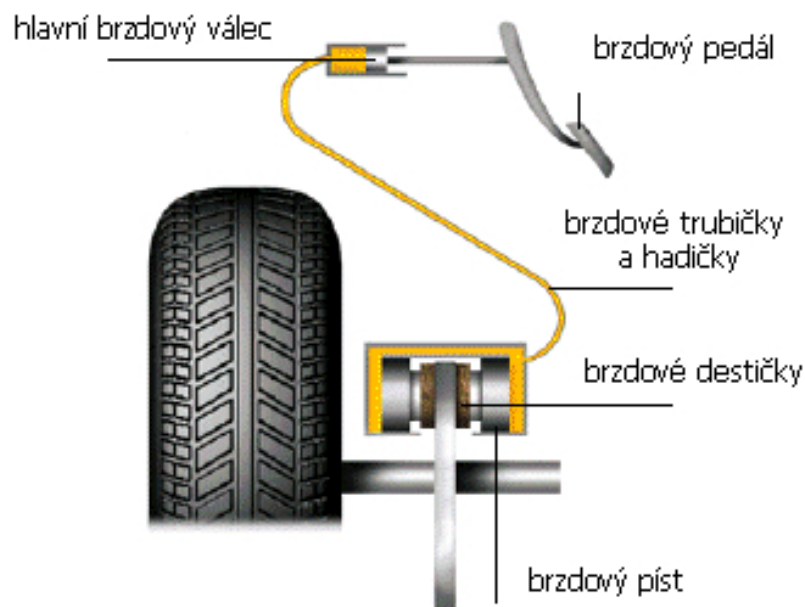
Brzdové obložení by mělo mít určité množství pórovitosti, aby se snížil efekt vody na koeficient tření. Tyto porézní otvory by neměly ukládat nečistoty jako například částice opotřebení, které by mohly ovlivnit tření. [14]

Kovové součásti materiálu brzdového obložení ve spojení s vodou mohou začít korodovat na povrchu rotoru. U vozidel, která jsou používána každý den, brzdové teploty odpaří přítomnou vodu. U vozidel, která nejsou často používána, může koroze způsobit závažné problémy brzdových rotorů. Elektrochemické reakce proniknou do dostatečné hloubky a změni povrch rotoru. To zapříčiní, že jsou brzdy hlasité a vznikají vibrace nebo pulzace brzdového pedálu. Tyto příčiny se dají odstranit pouze výměnou rotorů. [14]

Vibrace může také způsobovat kolísání brzdného momentu, který vychází z rotoru brzdy s nestejnou tloušťkou nebo z bubnu. Změny tloušťky jsou způsobeny mnoha faktory včetně výroby nebo údržby defektů. Dále to mohou zapříčinit materiálové usazeniny na povrchu rotoru, který přichází do kontaktu s obložím nebo lokalizované metalurgické změny, které zapříčinují nehladký povrch způsobený extrémními termálními podmínkami. Tyto změny mohou způsobit ztrátu kontroly nad vozidlem a to z důvodu kolísání brzdového momentu blízkého vlastní frekvenci materiálu. [14]

### 3.4 Kapaliny hydraulických brzdových systémů

Brzdová kapalina je náplň hydraulických brzdových systémů, které mají za úkol přenést sílu mezi hlavním brzdovým válcem a brzdovými válečky kol.



Obr. 12. Princip přenosu brzdné síly [18]

### 3.4.1 Základní požadavky na brzdovou kapalinu

Brzdová kapalina by měla splňovat následující požadavky:

- minimální stlačitelnost kapaliny
- vysoký bod varu kapaliny
- stálost při vysokých a nízkých teplotách
- odolnost proti stárnutí
- minimální změna viskozity v závislosti na změně teploty
- minimální hořlavost a toxicita
- co nejmenší hydroskopičnost (pohlcování vzdušné vlhkosti)
- tepelná a chemická stabilita.

Mezi základní normy, které se zabývají brzdovými kapalinami, patří americká norma FMVSS CFR 571.116, v rámci této normy se používá specifikace DOT. Další používanou normou zabývající se brzdovými kapalinami je norma ISO 4925. [19]

### 3.4.2 Vlastnosti brzdových kapalin

Brzdová kapalina musí být chemicky neutrální a to z důvodu vzniku koroze na kovových částech brzdného systému. Také by neměla negativně působit na pryžové díly. Mezi základní vlastnosti brzdných kapalin patří hydroskopičnost neboli schopnost pohlcovat a udržovat vlhkost. Vlhkost se do brzdového systému může dostat odvodušňovacími otvory například ve vyrovnávací nádobě systému, popřípadě také po otevření balení s brzdou kapalinou. Vlhkost v brzdové kapalině zhoršuje její vlastnosti, už při nízkých teplotách se v ní mohou tvořit bubliny vodních par, to může vést až k selhání brzd. U brzdových kapalin také platí, že čím vyšší má bod varu, tím vyšší je spolehlivost při vysokém zatížení. [19]

### 3.4.3 Druhy brzdových kapalin

Existují tři základní druhy brzdových kapalin používaných v hydraulických brzdných systémech k přenosu síly vyvinuté na brzdový pedál. Jedná se o kapaliny na bázi: [19]

- silikonových olejů
- minerálních olejů
- alkoholu, to jsou především glykoly (glykolové směsi se speciálními přísadami).

## 4 VÝROBNÍ SYSTÉMY

Mnoho velkých i malých firem se v současné době snaží zavést do výrobního procesu počítačem řízené obráběcí stroje. Nutnost tohoto kroku vysvětluje komerční prostředí. Produktivita, efektivita, přesnost a rychlost výroby jsou rozhodující existenční faktory. Hlavní uplatnění CAD/CAM systémů je v oblasti výroby forem, zápusťek a jiných tvarově složitých součástí v různých odvětvích strojínského průmyslu. [20]

### 4.1 CAD systém

Jedná se o konstrukční návrh nové součásti, kdy celá geometrie je interaktivním způsobem modelována a zobrazována ve skutečné reálné formě. Je to tedy souhrn prostředků pro vytváření geometrických modelů. Informace reprezentující geometrický model jsou uloženy v aplikačně sestavené databázi, která je základem pro další kroky v komplexním inženýrském řešení problému návrhu nového modelu. [20]

Počítačová podpora návrhu a tvorby konstrukční dokumentace je interaktivní způsob geometrického modelování tvaru a rozměru navrhovaného produktu v uživatelsky přehledném prostředí. Geometrické modelování vyjadřuje počítačově matematický popis objektu, který se v prostředí CAD zhotovuje v rovině 2D způsobem modelování, jehož charakteristickým rysem je uzavřená lomená čára tvořící postupný profil modelu, nebo modelování v 3D prostoru, při kterém má model identický tvar se zadáním. [20]

Výsledkem této práce jsou tedy modely, výkresy, sestavy, zjednodušeně CAD data, které tvoří důležitý faktor při integraci CAD systému s jinými CA systémy a aplikacemi pro jejich další využití např. import modelu do prostředí CAM. [20]

V dnešní době se 2D systémy už moc nepoužívají, mezi nejznámější softwary patří AutoCAD, který má různé nastavby pro různé průmyslové odvětví například pro strojírenství je Mechanical, pro stavebnictví Architecture a další. Převažují 3D softwary, kterých je velké množství. Mezi nejznámější softwary patří například:

- Catia
- Inventor
- Creo
- NX
- SolidWorks

Ke každému z těchto softwaru je kromě CAD systému možno dokoupit nějakou nastavbu například CAM modul, FEM modul, modul k vytváření vstřikovacích forem a další.

## 4.2 CAM systém

CAM označuje systém, který připravuje data a programy pro počítačem řízené stroje, které slouží k automatické výrobě součástí. Tento systém využívá geometrické a další informace vytvořené ve fázi návrhu v systému CAD. Připravuje v užším pojetí automatizované operativní řízení výroby na dílenské úrovni a zahrnuje i automatický sběr dat o skutečném stavu výrobního procesu, numericky řízené výrobní systémy, automatické dopravníky a automatické sklady. [20]

Produkty tohoto charakteru umožňují simulovat sled technologických operací při vlastní výrobě součástí. Simulují práci jednotlivých nástrojů v nejrůznějších technologiích obrábění, např. 3D frézování, soustružení, vrtání, elektroerosivní obrábění, obrábění laserem, vodním paprskem atd.. Po prověření a odzkoušení bezpečného chodu výroby součástí je tímto modulem vygenerován program pro řízení NC, CNC strojů. [20]

## 4.3 Způsoby programování

Technologie obrábění při zpracování NC programu se v principu neliší od konvekční technologie. Při zpracování NC technologie se vychází z obecných principů – postupnou volbou technologických operací (hrubování, dokončování) nebo úkonů v logickém sledu, se realizuje požadovaný technologický výsledek. NC technologie, na rozdíl od klasického pojetí, je zpravidla řešena na detailnější úrovni, proto se musí při zpracování NC technologie respektovat např. způsob frézování (sousedné, nesousedné atd.), dynamické nebo jiné charakteristiky NC stroje. Pro dosažení požadované přesnosti při realizaci dokončovacích operací se musí respektovat i geometrické parametry nástroje atd. Technolog – programátor proto musí k problému zpracování technologie přistupovat mnohem komplexněji. [21]

Vytvoření programu je možné následujícími způsoby:

### 4.3.1 Ruční programování u NC stroje

Tento způsob má využití především v opravárenských provozech a malých dílnách, kde stroj není tolik vytížen a programování je možné přímo u stroje. Dále pak tam, kde výkresy

nejsou dodávány ve formě CAD dat. Je určeno pro jednodušší, tvarově nenáročné součásti. [20]

#### 4.3.2 Automatické programování prostřednictvím CAM systému

Používá se tam, kde není možné použití ručního programování (složitost obráběného dílce), nebo tam kde ruční programování je velice zdlouhavé. Použití automatického programování závisí také na technologických, ekonomických, ale i personalistických možnostech firmy. [20]

### 4.4 Rozdělení CAD/CAM systémů

CAD/CAM systémy představují integraci mezi CA systémy. A to mezi CAD a CAM systémy. CAM systémy lze dělit podle několika kritérií. Hlediska dělení mohou být různá a to např. podle ceny, podle využití nebo podle podpory ze strany výrobce daného software. CAM systémy mohou být rozděleny dle velikosti systému. Velikosti systému je myšleno konkrétní využití dané aplikace (množství doplňků nadstaveb, obráběcích operací atd.). [20]

Společná databáze umožňuje, že CAD/CAM systémy se budují principem modulárnosti. To znamená, že každý CAD/CAM se skládá z několika samostatných modulů, přitom je možné využívat výsledky jiných modulů právě přes společnou databázi. Počet a rozsah modulů závisí na konkrétní úloze, kterou chceme řešit pomocí CAD/CAM systémů. [22]

Podle úrovně systémů a na základě ceny lze CAM systémy rozdělit na.:

#### 4.4.1 2D a 2,5D CAM systémy

Do této skupiny patří systémy s malou počítačovou podporou konstruování, která nepřesahuje hranici 2D zobrazení a slouží jen jako elektronické rýsovací desky. Z hardwarového hlediska nevyžadují náročné počítače a jejich ovládání je většinou velmi jednoduché. [20]

Malé CAM systémy umožňují programovat dráhu nástroje na základě kontur definovaných pomocí základních geometrických entit (přímka, kruh, bod). Programování je možné provádět ve 2D a 2,5D podobně jako u ručního. K ověření procesu se používá jednoduchá simulace. Na rozdíl od programování přímo na stroji lze tvary (kontury) obrobků načíst

pomocí přenosového formátu DXF do tohoto systému a vygenerovaný NC program nemusí být NC program pro jeden řídicí systém, ale záleží na volbě postprocesoru. [20]

#### 4.4.2 Střední CAM systémy

Jsou většinou zaměřeny pouze na oblast CAM, i když v poslední době se výrobci softwarů snaží pojmout i oblast CAD. Střední systémy umožňují programovat dráhu nástroje na základě předem definovaných kontur a ploch. Programování dráhy nástroje je možné provádět ve 2D, 2.5D, 3D i ve více osách. Modely předem vytvořené v jiných CAD systémech formou plošných popř. objemových modelářů je možné do těchto systémů importovat přes rozhraní IGES, STEP a dalších. Importovaný model lze ještě editovat pomocí jednoduchých CAD funkcí. Momi jiné je možné provádět simulace a verifikace procesu obrábění. Vygenerovaný NC program na základě volby postprocesoru slouží jako řídicí instrukce pro CNC stroj. Představitel středního systému jsou např. systémy AlphaCAM, MasterCAM, EdgeCAM, VISI, SurfCAM, NX CAM atd. [20]

#### 4.4.3 Velké CAM systémy

Velké systémy jsou zaměřeny na oblast kompletních CAD/CAM systémů. Zabývají se jak vytvářením modelů – konstrukcí, tak i přípravou NC programů – technologií. Na rozdíl od středních systémů mohou vytvářet a zpracovávat složitější plochy. Tak jako u středních CAM systémů vytvářejí NC programy i pro vícere obrábění. Simulace ve fotorealistickém režimu a verifikace procesu obrábění je zde samozřejmostí. [20]

Do této skupiny spadají často systémy v rámci velkých komplexních systémů CAD/CAM/CAE. Hlavní výhodou je provázanost jednotlivých modulů. Nevznikají zde problémy s přenosy dat, protože systémy pracují na jedné platformě. Mezi jejich hlavní nevýhody patří vysoké pořizovací náklady spojené s provozuschopností celého systému. [20]

Uplatnění těchto systémů je především v oblasti výroby forem, zápuštěk, popř. v leteckém, automobilovém a energetickém průmyslu. Představitelé takových velkých systémů jsou např. systémy Creo, Catia, NX aj. [20]

NX je komplexní CAD/CAM/CAE systém zahrnující podporu širokého spektra činností v konstrukci a výrobě od prvního ideového návrhu přes výpočty, simulace a analýzy, modelování jednotlivých dílů i celých sestav, tvorbu výkresové dokumentace,

programování NC obráběcích a měřících strojů a simulaci obrábění až po kontrolu kvality, správu dat a projektů a integraci do podnikového informačního systému. NX je moderní modulární systém s plnou asociativitou všech spolupracujících modulů, postavený nad jednotnou grafickou objektivně orientovanou databází. [20]

#### 4.5 Frézování v CAM systémech

Rozdělení frézovacích strategií, operačních úseků a nabídek obráběcích cyklů v CAM systémech není obecně definováno. Je jich však velké množství např. pro 2,5 osé frézování: [20]

- hrubování
- frézování rovinných a čelních ploch
- frézování profilu, kontury a osazení
- frézování kapes
- obrábění děr
- vrtání děr
- frézování sražení
- dokončování rovinných ploch
- a další.

V závislosti na typu zvoleného obráběcího cyklu, po jeho zvolení, je nutné postupně vybrat: [20]

- obráběnou geometrii (body, úsečky, profily, kontury, plochy, apod.)
- polotovar
- hranice obrábění
- pozice pomocných prvků
- omezující prvky, apod.

Na povrchu obrobku lze vyznačit hranice obrábění, ve kterých se bude obrábět, nebo naopak ve kterých se obrábět nebude. Obráběcím cyklům lze měnit pořadí, lze je editovat, vkládat nové cykly mezi již vytvořené, nebo mezi ně vkládat jednotlivé instrukce a příkazy. Dráhy nástrojů, vytvořené dle nabídek obráběcích cyklů, mohou být editovány (zrcadleny, posunuty, rotovány, kopírovány do jiné hloubky, apod.). [20]



## 4.6 Simulace a verifikace

Další širokou oblastí CAM programů, která ve značné míře přispívá ke zvyšování efektivnosti obrábění je kvalitní vizualizace a verifikace vytvořeného NC programu. Jednoduchá vizualizace a verifikace vytvořeného NC programu je již standardně vestavěná do většiny CAM programů. Pomocí této verifikace lze kontrolovat kolizi nástroje s obrobkem nebo upínkami. Verifikace také analyzuje případný zbytkový materiál nebo podřezání. [20]

Některé CAM systémy mohou simulovat a verifikovat kolize s materiálem a upínkami nejen pro držák a vřeteno, ale i kompletní obráběcí stroj, včetně jeho plné geometrie a pohybů. Takové programy umožňují modelovat libovolné tvary nástroje, držáků, upínek, svěráků apod. a ukládat je do knihoven. Pomocí speciálních modulů lze definovat rozměry a kinematiku konkrétního stroje, importovat jeho řídicí systém a provést simulaci a verifikaci pohybu stroje. Protože namodelovaný obráběcí stroj je ovládán stejnými řídicími funkcemi, chová se simulace stroje stejně jako reálný stroj v dílně. Tímto způsobem lze zvýšit spolehlivost obrábění a provést kontrolu funkcí stroje. Výhodou je prohloubení zkušeností programátorů a obsluhy bez vlastního použití stroje. [20]

## 4.7 Postprocessor - Postprocessing

Problematika postprocesorů je u CAM programů velmi důležitá. Co to vlastně je postprocessing? Jednoduše řečeno, jde o překlad INC souborů (tedy již vygenerovaných drah nástroje) do řeči srozumitelné příslušnému řídicímu systému obráběcího stroje. Ve světě i u nás je mnoho řídicích systémů, včetně jejich nejrůznějších variant. Požadavky na postprocessing tedy vycházejí od konkrétně použitého stroje. [20]

Po dokončení tvorby všech obráběcích cyklů a po bezkrizové simulaci obrábění se vygeneruje NC kód. Pro vytvoření NC kódu použije CAM systém generátor NC kódu, který převede vytvořený soubor do instrukcí daného stroje a řídicího systému. Generátor NC kódu zapíše instrukce do textového souboru. Tento soubor je možné ještě před odesláním do stroje upravit. K úpravě se využije buď speciální NC editor dodávaný např. s balíčkem produktů CAM, nebo jednoduchý program, který je na každém počítači – např. poznámkový blok. [20]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo zlepšit tuhost dílce za pomoci FEM analýzy. Jako dílec byla použita čelist bubnové brzdy z motocyklu Babetta 210. Při zatížení je patrné, že čelist propružuje, proto byly pro praktickou část stanoveny tyto cíle:

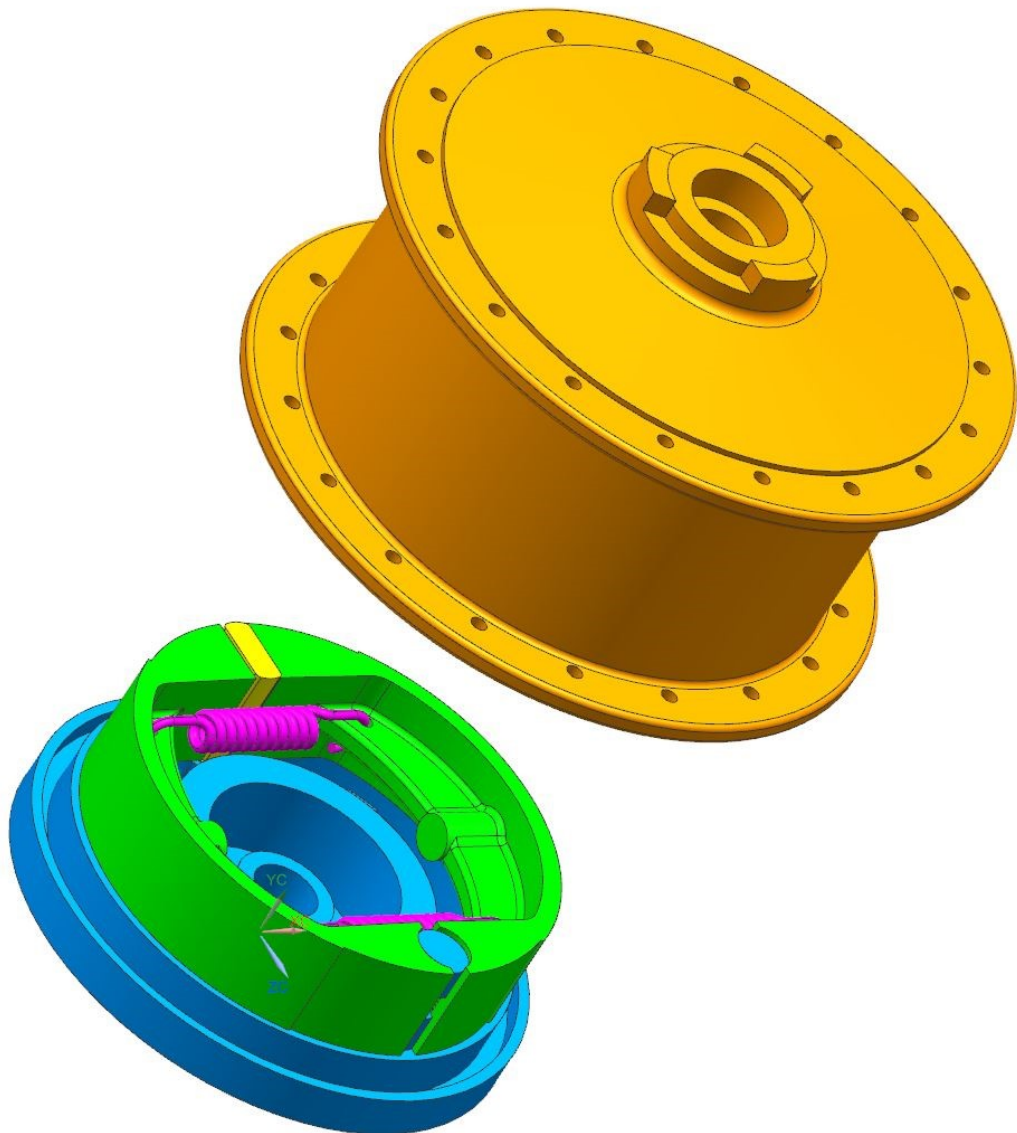
- snížit deformaci čelisti
- snížit největší napětí v čelisti
- navrhnout technologii výroby
- vytvořit výrobní program
- navrhnout testování čelistí.

## 6 KONSTRUKCE ČELISTÍ

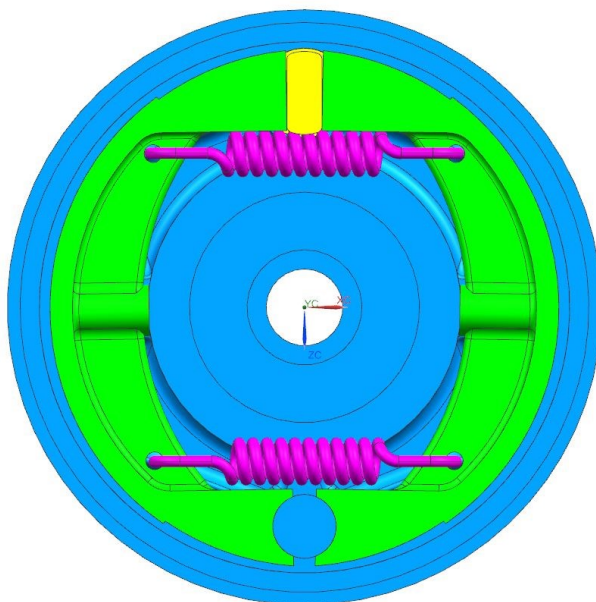
Pro návrhové účely bylo nutné vymodelovat zástavbu bubnové brzdy.

### 6.1 Vnitřní zástavba

Vnitřní zástavba brzdy je složena z brzdového štítu s čepem, vačky, čelistí a pružin. Po vyšroubování kola z vidlice zle vyjmout kolo a následně se brzdovým štítem vyndá celá vnitřní zástavba brzdy z bubnu, jak je vidět na Obr. 13. Detailní zobrazení vnitřní zástavby na Obr. 14.

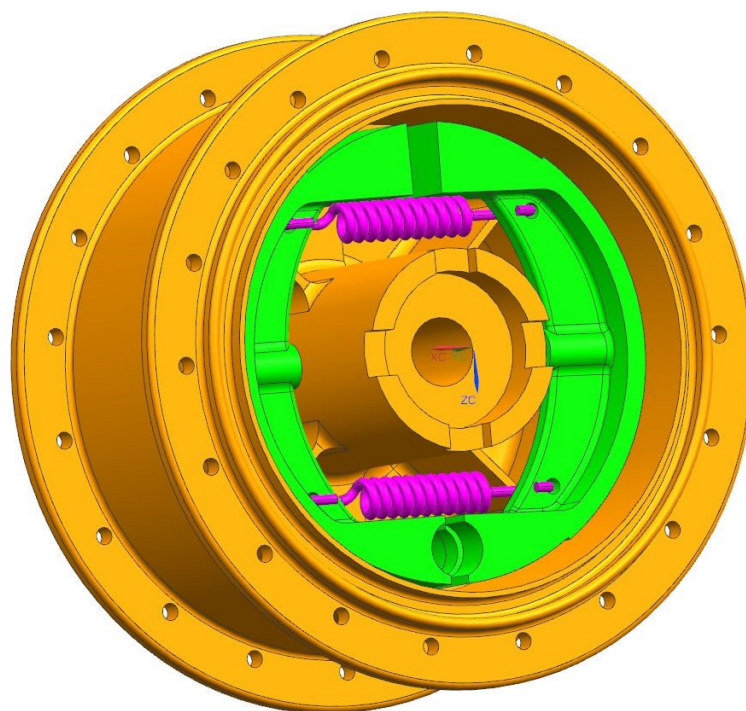


Obr. 13. Model vnitřní zástavby bubnové brzdy po vyjmutí z bubnu



*Obr. 14. Detailní model vnitřní zástavby bubnové brzdy*

Buben brzdy je součástí kola, na který jsou navázány dráty, následně ráfek, vložka a pneumatika s duší.



*Obr. 15 Detailní model vnitřní zástavby bubnu*

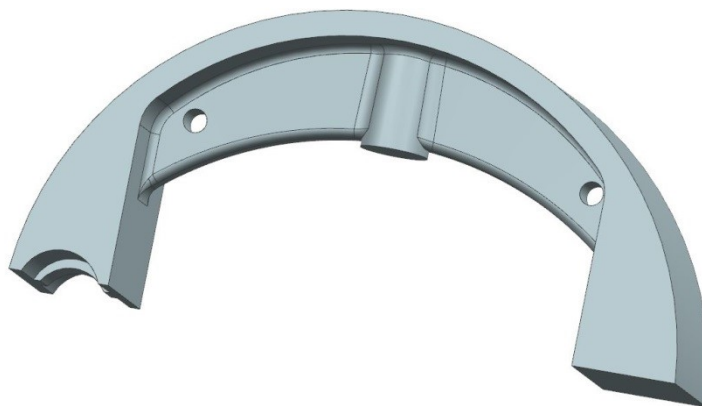
## 6.2 Původní čelisti

Původní čelisti Obr. 16. byly vyrobeny ve velkosériové nebo sériové výrobě a to odléváním. Odpovídá tomu váleček uprostřed čelisti, jedná se o nejspíše o náliček. Následně byly čelisti obrobena.



*Obr. 16. Původní čelist*

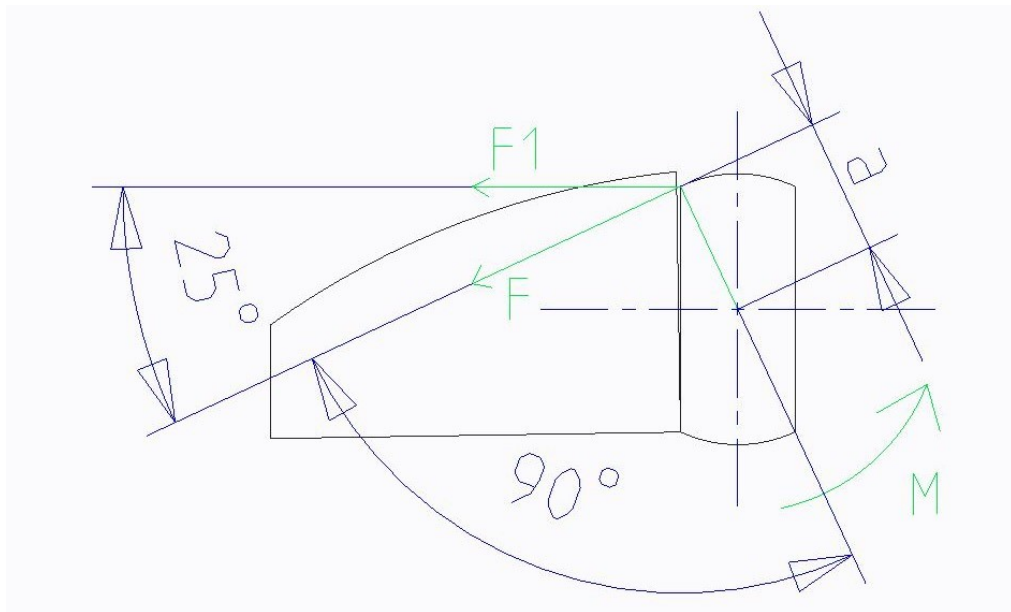
Čelisti jsou vyrobeny z některé ze slitiny hliníku s největší pravděpodobností z EN AW 6082. Z materiálového rozboru čelisti byl zjištěn modul pružnosti v tahu. Ten se pohyboval od 64 GPa do 77 GPa. Průměr 10 naměřených hodnot byl 69.84 GPa. Což odpovídá materiálu EN AW 6082 ten má modul pružnosti v tahu 70 GPa.



*Obr. 17. Model původní čelisti*

### 6.2.1 Simulace zatížení

Simulace zatížení byly vytvářeny v softwaru NX v modulu Nastran určenému k simulacím zatížení. U simulace byla snaha co nejlépe simulovat skutečné podmínky při brzdění. Bohužel není možné změřit všechny působící síly v brzdě. Podařilo se, za pomoci experimentu zjistit, jakou silou působí vačka na čelisti brzdy. Vačka svým pootočením roztahuje čelisti. Roztažením čelistí dojde ke styku bubnu s brzdovým obložním čelisti. U vačky byl naměřen kroutící moment 28 Nm, byl přepočítán podle schématu na Obr. 18. Tím byla zjištěna síla působící na čelist.



Obr. 18. Schéma výpočtu síly působící na čelist

$$M = 28 \text{ Nm}$$

$$a = 65 \text{ mm} = 0.0065 \text{ m}$$

$$M = F \cdot a \text{ [Nm]} \quad (3)$$

$$F = \frac{M}{a} \text{ [N]} \quad (4)$$

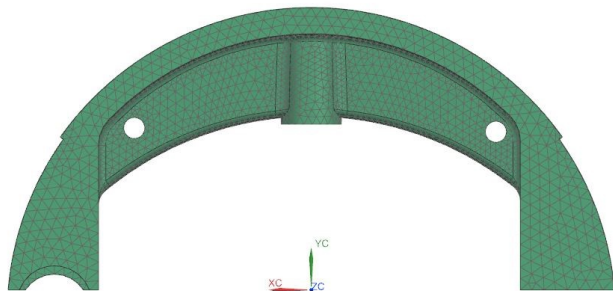
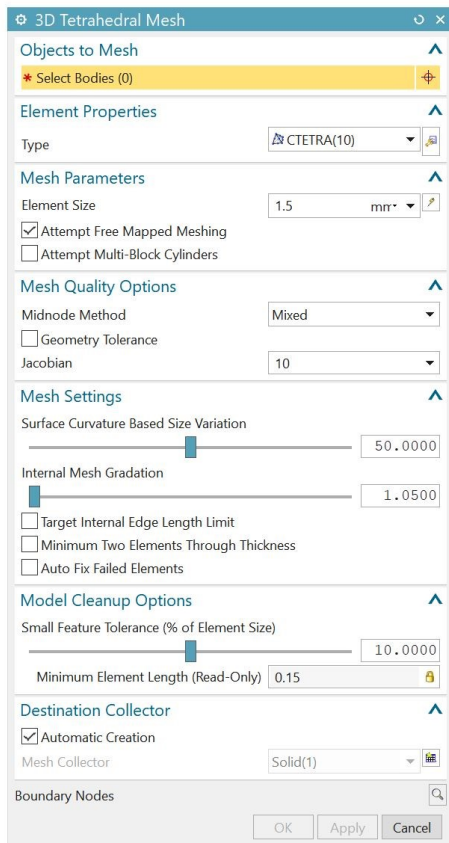
$$F = \frac{28}{0.0065} = 4\,307 \text{ N}$$

$$F_1 = F \cdot \cos 25^\circ \quad (5)$$

$$F_1 = 4\,307 \cdot \cos 25^\circ = 3903 \text{ N}$$

## 6.2.2 Nastavení simulace

Nejdříve byla na čelist nanесena 3D síť elementů rozdělující dílec na jednotlivé čtyřstěny. Velikost jedné strany byla 1.5 mm.

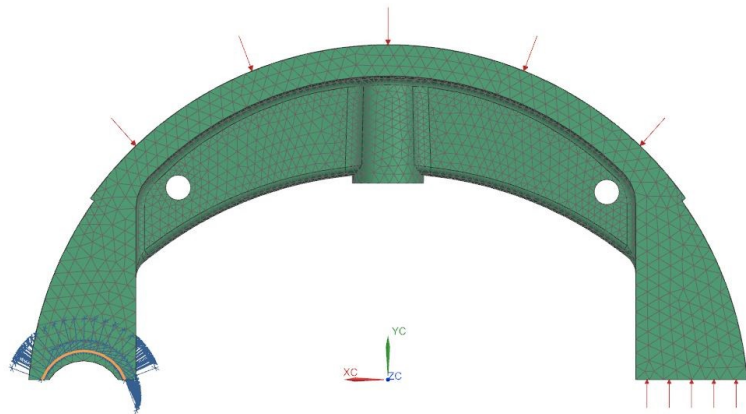
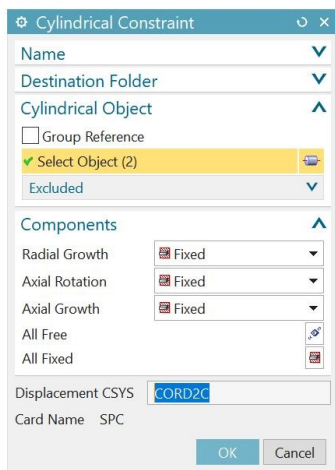


Obr. 19. Nastavení sítě čelisti

Po nastavení sítě se nastavil materiál. Ze seznamu materiálů byl vybrán nejbližší podobný materiál EN AW 6061. Materiál, ze kterého byla vyrobena čelist EN AW 6082 v nabízeném seznamu bohužel nebyl.

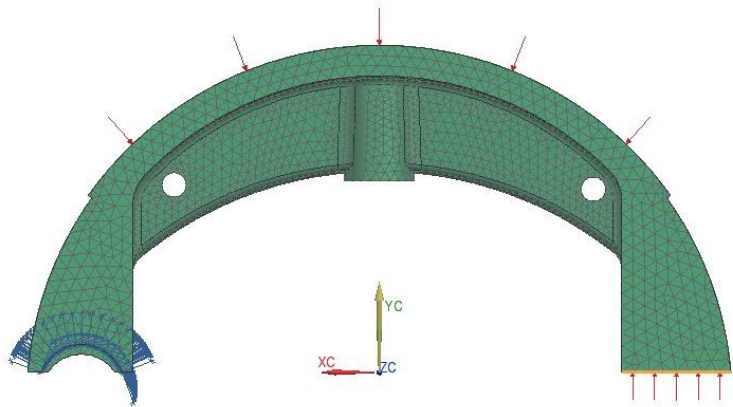
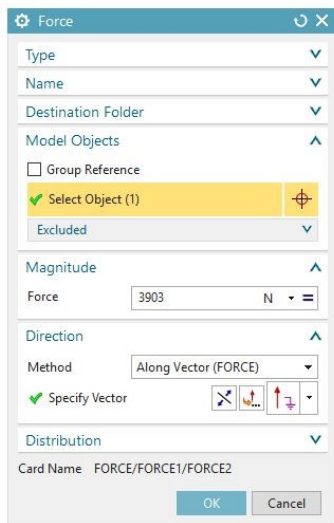
Uložení čelisti bylo simulováno stejně, jako je tomu ve skutečném bubnu. Čelist se v bubnu otáčí na čepu, který je součástí štítu. Bylo zde zvoleno válcové uložení, jelikož v bubnu dochází k minimálnímu otočení, tak aby bylo docíleno rovnovážného systému.





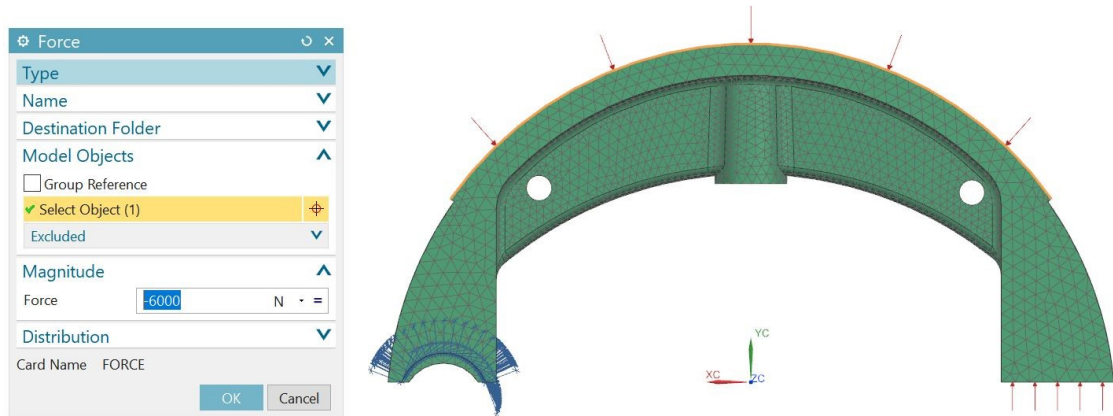
Obr. 20. Uložení čelisti

Zatížení v bubnu jsou dvě. Vačka svým otočením tlačí čelist na buben a od bubnu působí zatížení zpět na čelist. Síla působící vačkou na čelist je spočítána ze schématu na Obr. 18. velikost této síly je 3 903 N.



Obr. 21. Zatížení čelisti pootočením vačky

Sílu působící od bubnu na čelist není možno nijak naměřit. Pro simulaci byla tato síla nastavena tak, aby vznikl vyrovnaný stav. Tato síla působí na třecí plochu čelisti.

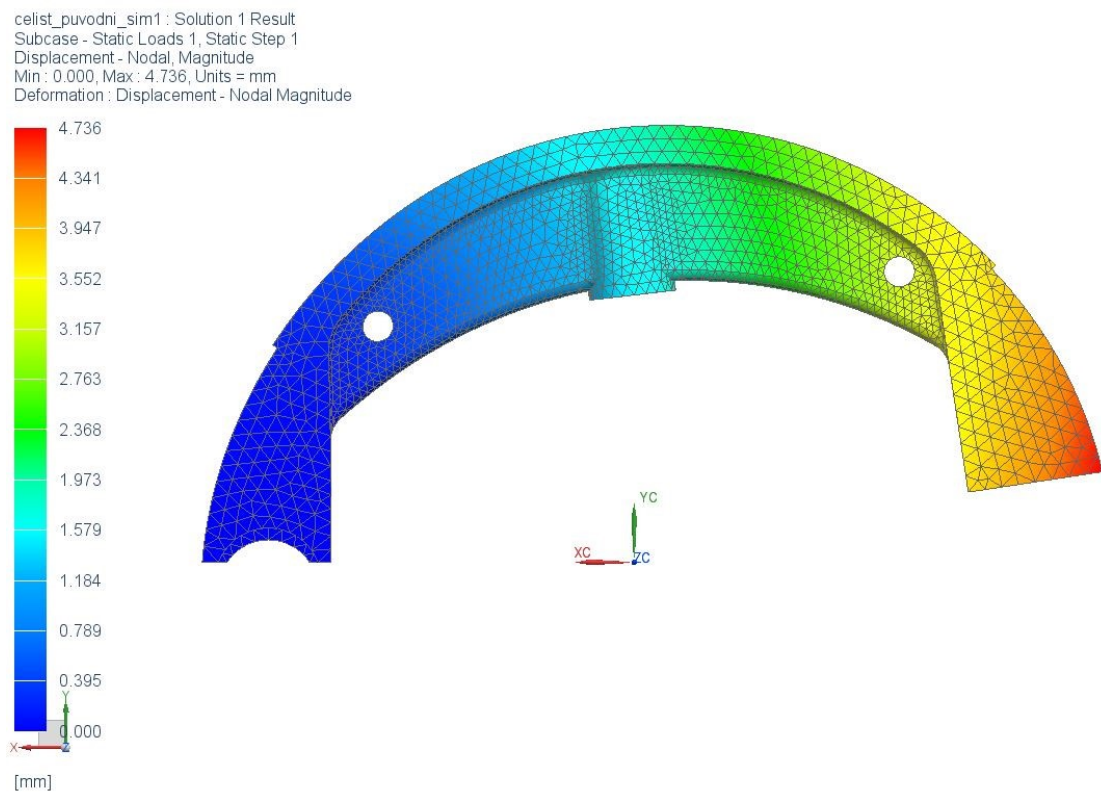


Obr. 22. Zatížení čelisti od bubnu brzdy

Stejně jako původní čelist budou nastaveny i nově navrhnuté čelisti.

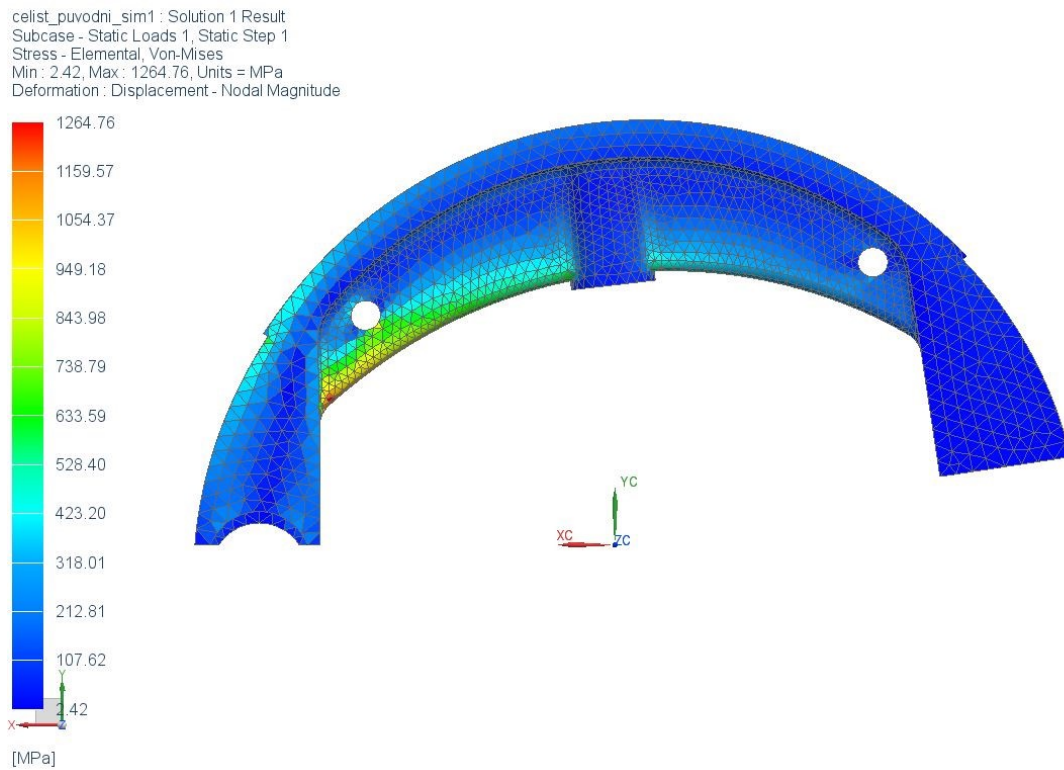
### 6.2.3 Simulace zatížení původní čelisti

Ze simulace bylo zjištěno, jaké jsou při zatížení deformace čelisti a jaké největší napětí při zatížení vzniká a kde se napětí vyskytuje. Největší deformace je u původní čelisti 4.736 mm

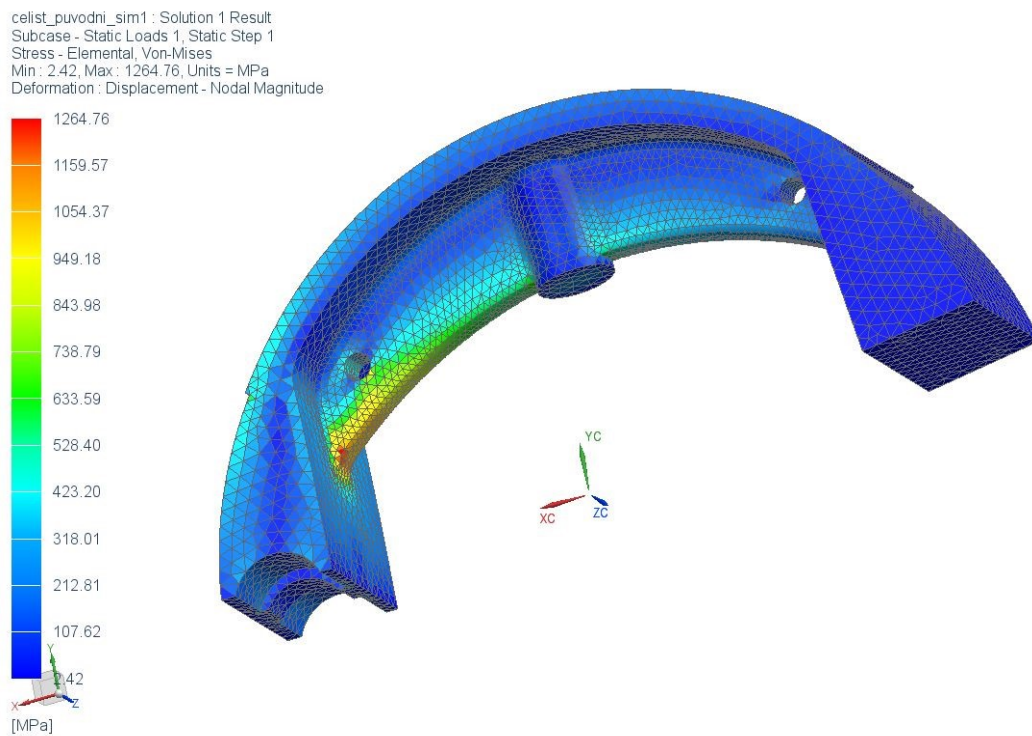


Obr. 23. Deformace původní čelisti

Největší napětí u původní čelisti vzniká na straně u čepu a to na konci žebra. Velikost tohoto napětí je 1 264.76 MPa.



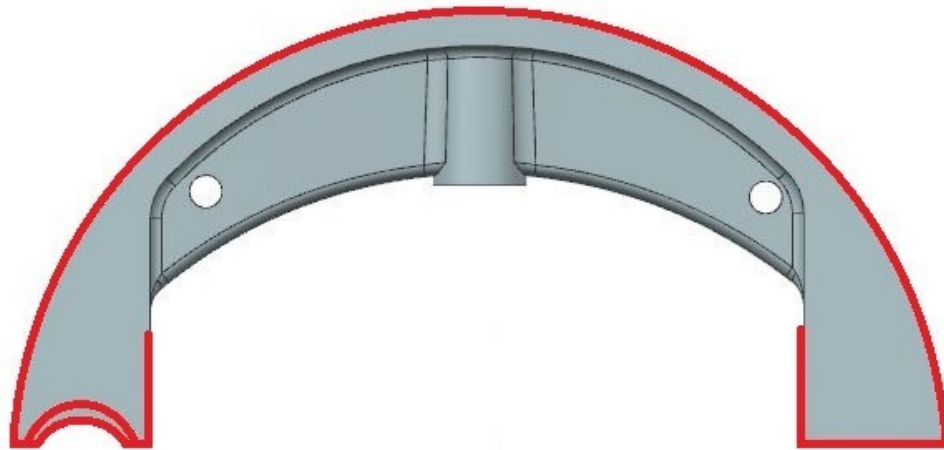
Obr. 24. Největší napětí u původní čelisti – pohled 1



Obr. 25. Největší napětí u původní čelisti – pohled 2

### 6.3 Nové návrhy čelistí

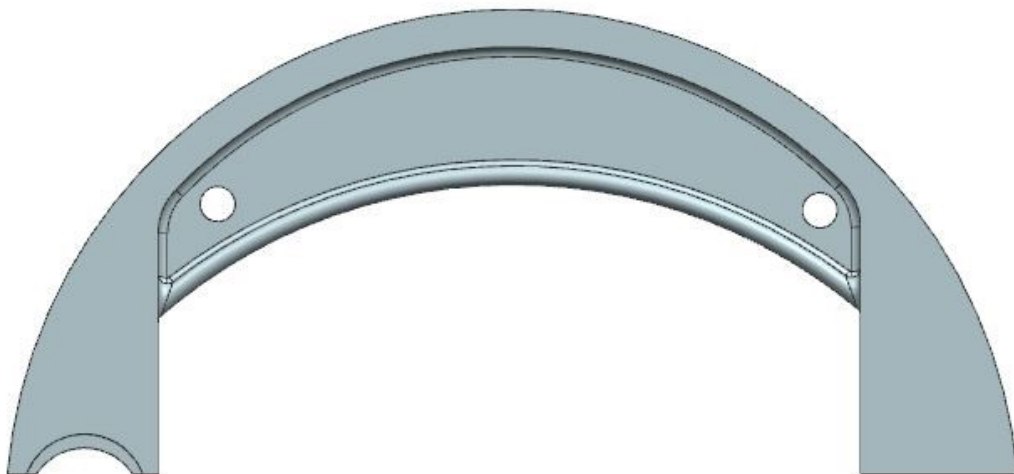
U nových návrhů čelistí musí být zachováno několik hodnot, které nesmí být změněny a to z důvodu zachování funkčnosti brzdy. Červeně vyznačená kontura na Obr. 26 musí být pro funkčnost brzdy zachována. Vnitřní zástavba brzdy musí být navržena tak, aby nic nebránilo pohybu čelisti a vnitřní zástavbě bubnové brzdy.



Obr. 26. Zachované křivky nově navrhovaných čelistí

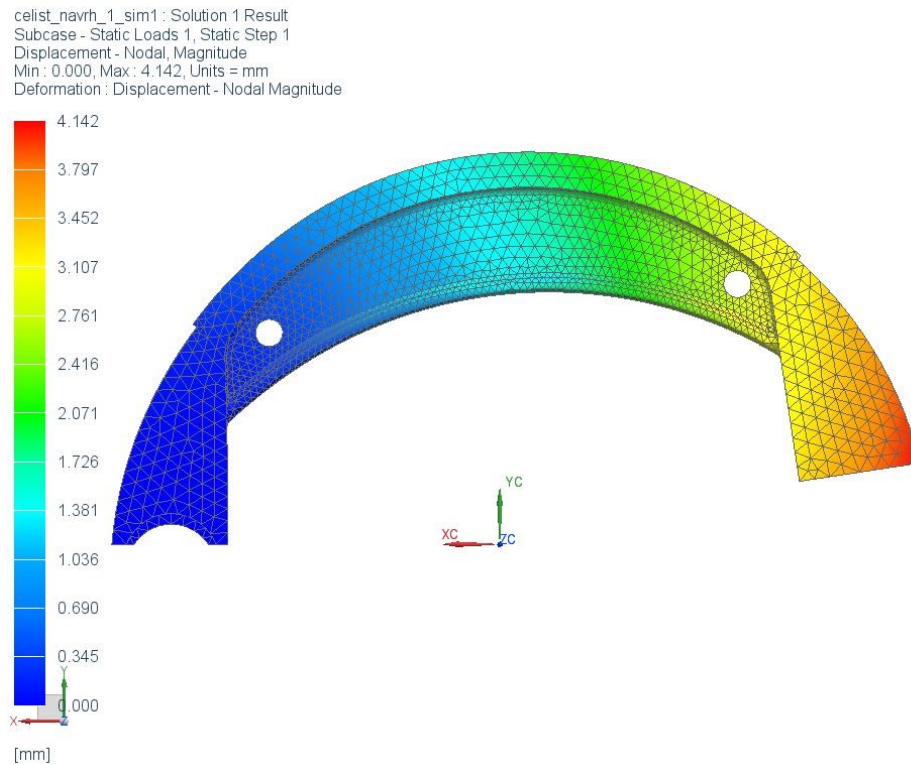
#### 6.3.1 Čelist návrh 1

U čelisti návrhu 1 byl k žebro přidán lem a byl odstraněn válec uprostřed čelisti.



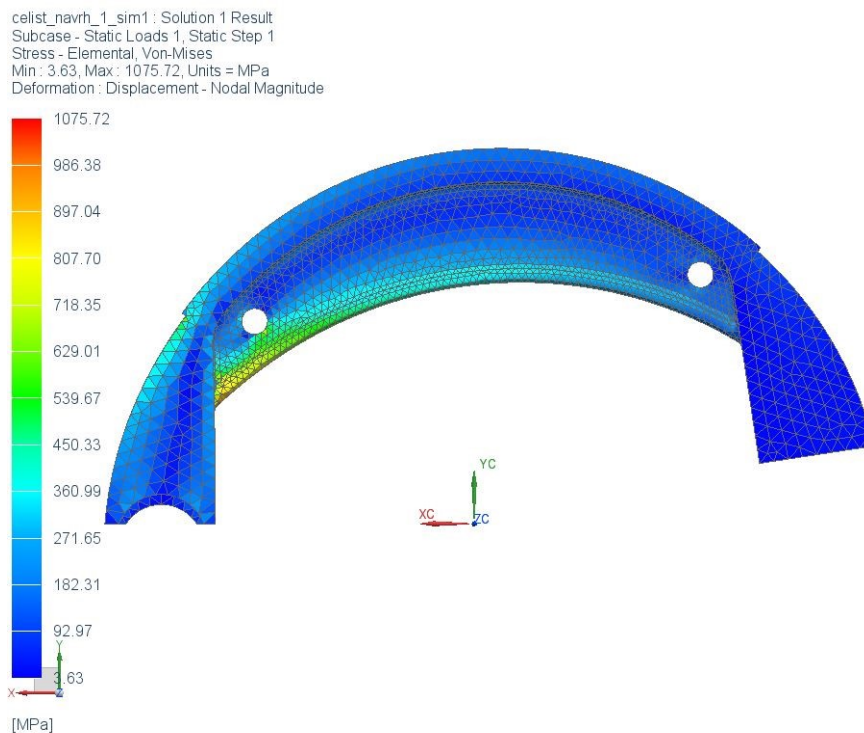
Obr. 27. Čelist návrh 1

Ze simulace bylo zjištěno, že největší deformace čelisti návrhu 1 je 4.142 mm, což je nižší než u původní čelisti.



Obr. 28. Deformace čelisti návrhu 1

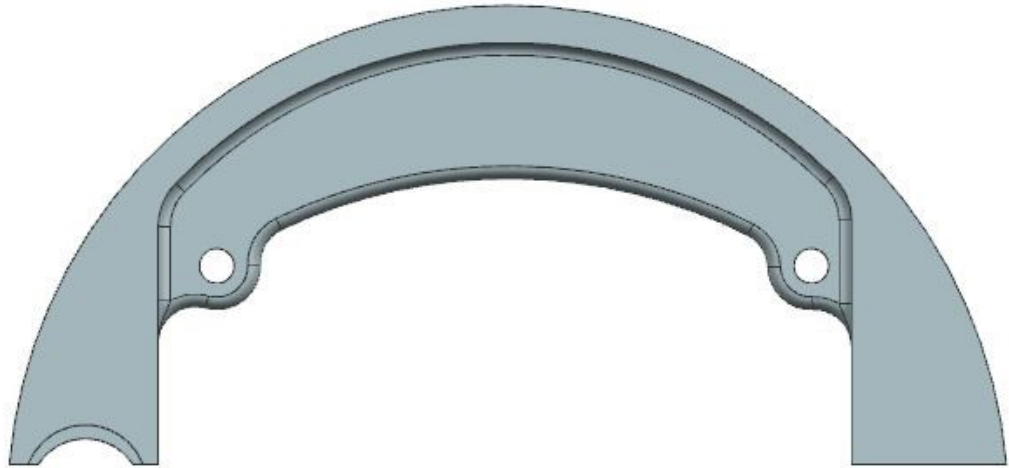
Největší napětí u čelisti návrhu 1 se nachází v přibližně stejném místě jako je tomu u původní čelisti. Velikost tohoto napětí je 1 075.72 MPa.



Obr. 29. Největší napětí čelisti návrhu 1

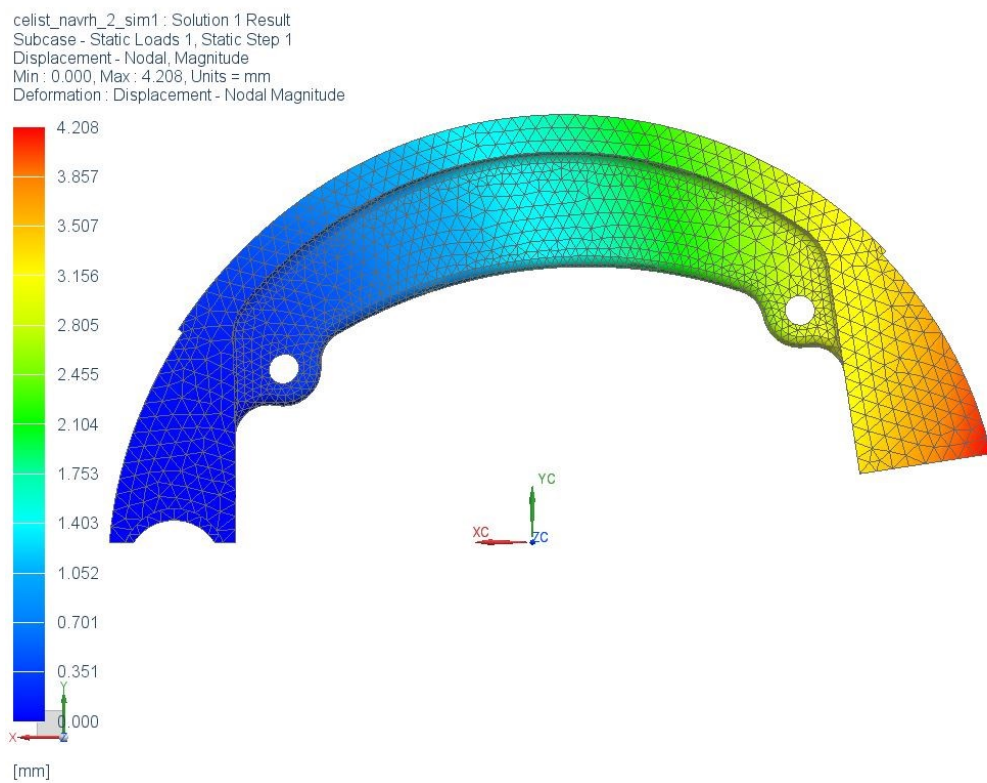
### 6.3.2 Čelist návrh 2

U čelisti návrh 2 byl opět odstraněn válec ze středu čelisti. Dále byly posunuty více ke středu díry pro pružiny.



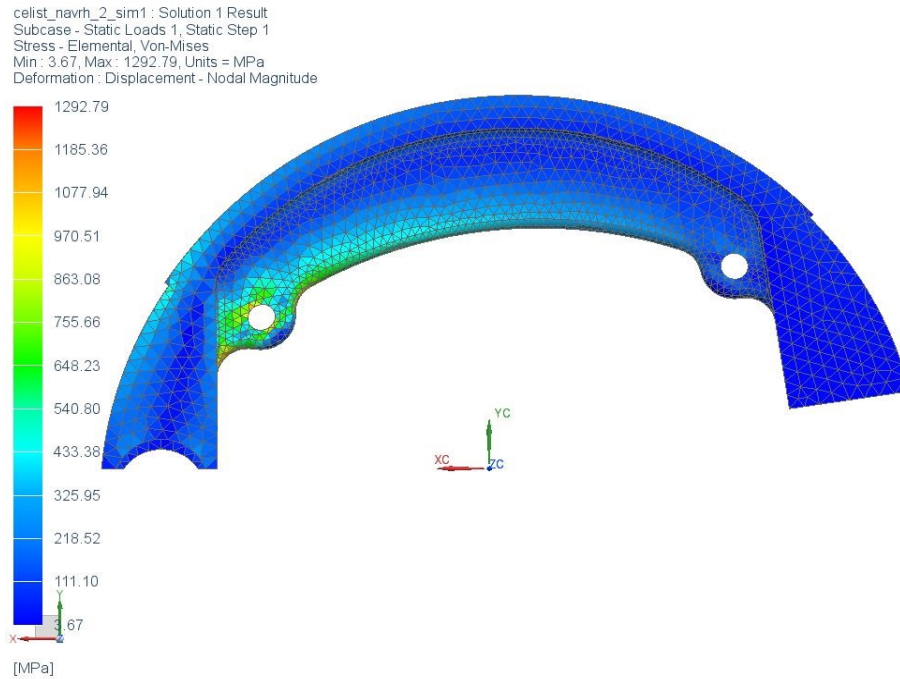
Obr. 30. Čelist návrh 2

Ze simulace bylo zjištěno, že největší deformace čelisti návrhu 2 je 4.208 mm, což je nižší než u původní čelisti, ale jedná se o vyšší hodnotu než u čelisti návrhu 1.



Obr. 31. Deformace čelisti návrhu 2

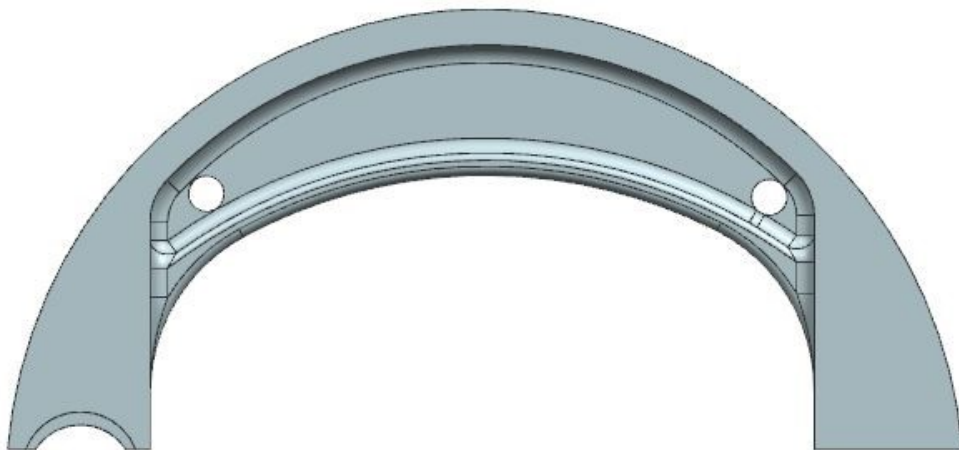
Největší napětí u čelisti návrhu 2 se nachází kolem díry pro pružinu a to na straně u čepu. Velikost tohoto napětí je 1 292.79 MPa. Velikost napětí u tohoto návrhu je větší než u původní čelisti.



Obr. 32. Největší napětí čelisti návrhu 2

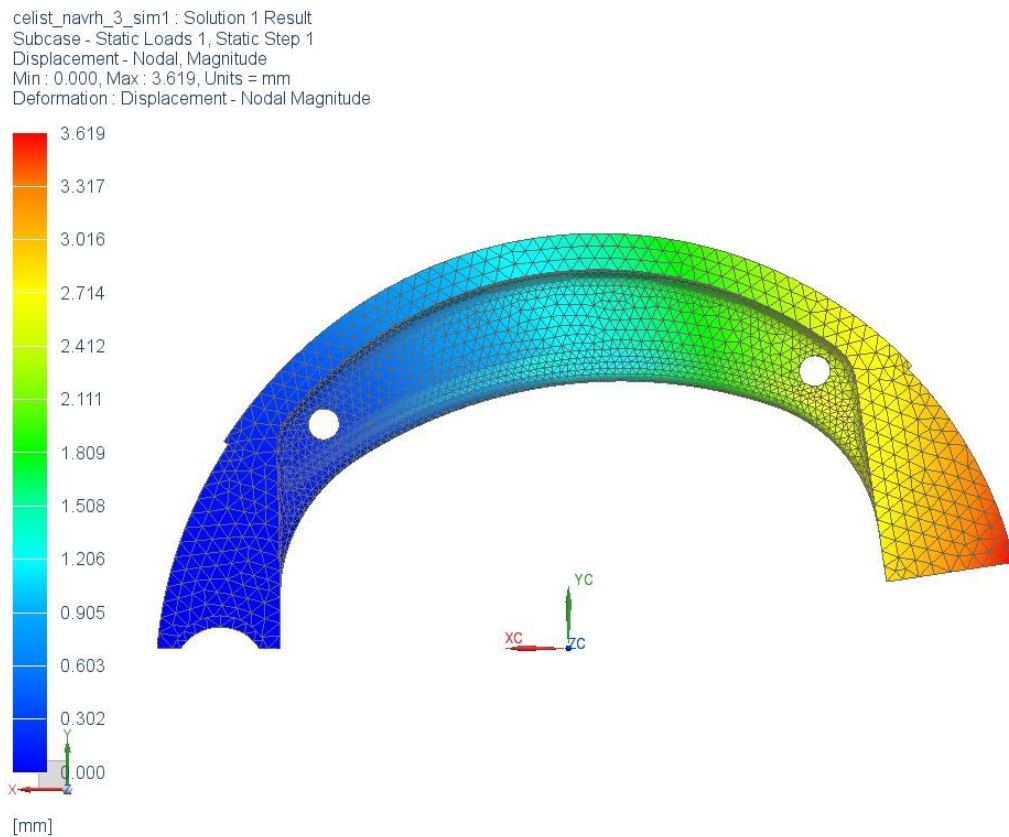
### 6.3.3 Čelist návrh 3

U čelisti návrh 3 byl opět odstraněn válec ze středu čelisti. Na vnitřní žebro byl přidán lem, který byl nepatrně větší než u návrhu 1. Také byla nepatrně upravena poloha děr pro pružinu. Dále byl přidán rádius na koncích žebra, aby zde oproti původní čelisti a návrhu 1 vznikalo menší napětí.



Obr. 33. Čelist návrh 3

Ze simulace bylo zjištěno, že největší deformace čelisti návrhu 3 je 3.619 mm, což je nižší než u původní čelisti a také nižší než předchozí dva návrhy.

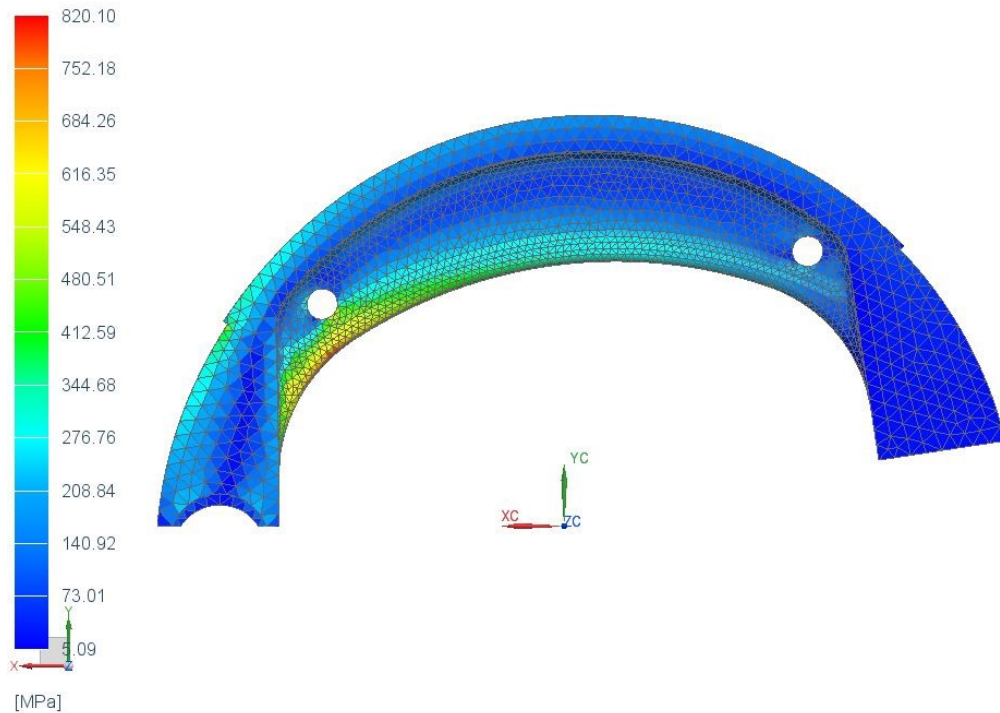


Obr. 34. Deformace čelisti návrhu 3

Největší napětí u čelisti návrhu 3 se nachází pod dírou pro pružinu a to na straně u čepu. Velikost tohoto napětí je 820.10 MPa. Velikost napětí u tohoto návrhu je nižší než u původní čelisti a také nižší než u předchozích návrhů.



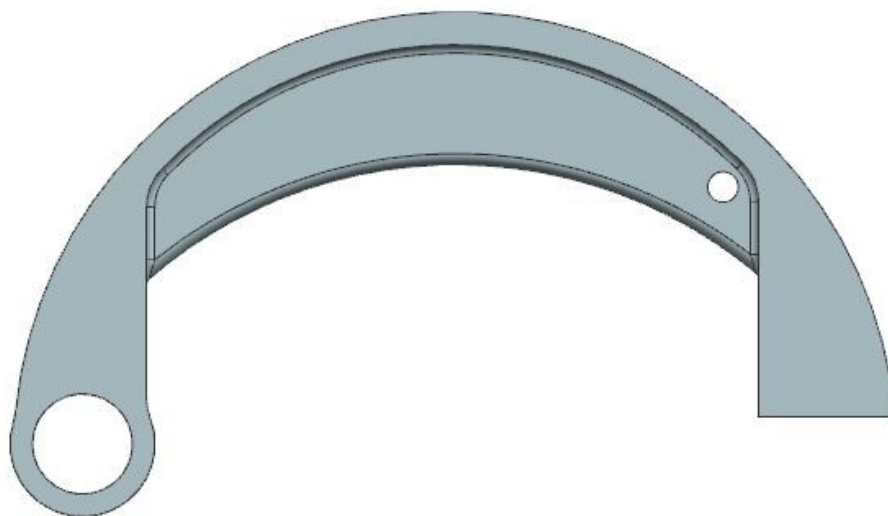
celist\_navrh\_3\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 5.09, Max : 820.10, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obr. 35. Největší napětí čelisti návrhu 3

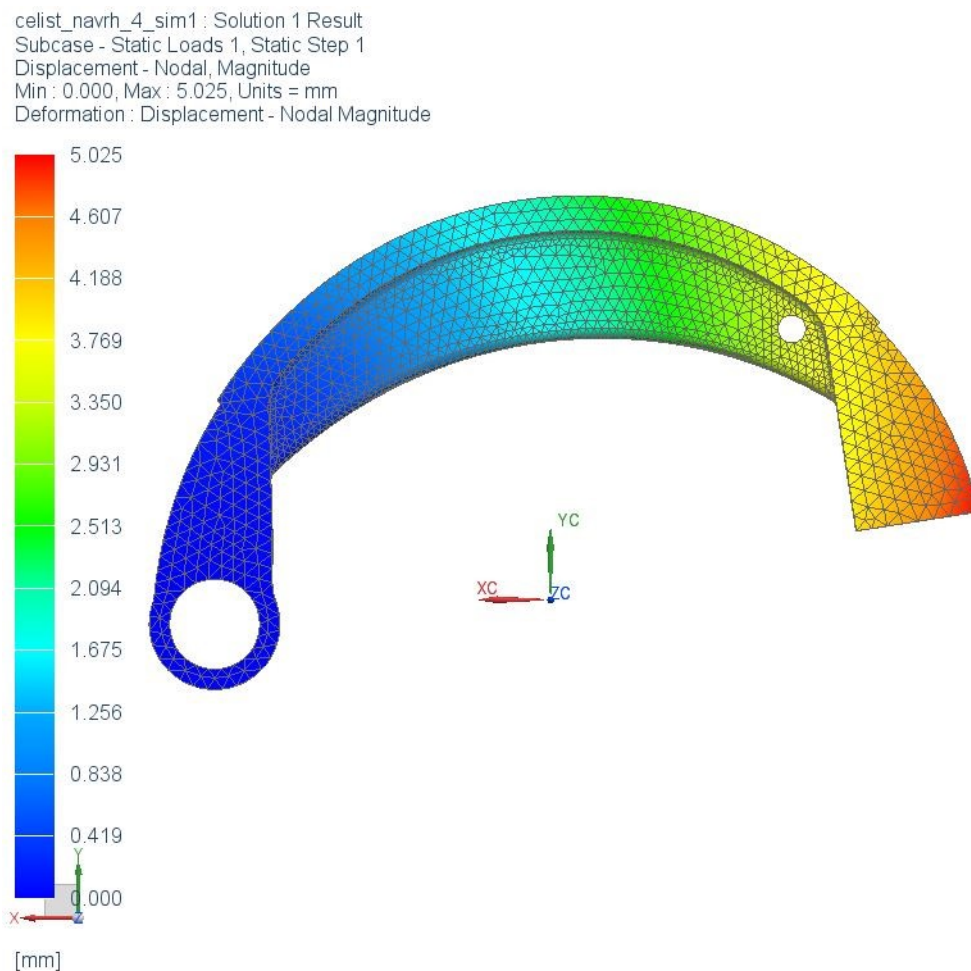
#### 6.3.4 Čelist návrh 4

U čelisti návrh 4 byl opět odstraněn válec ze středu čelisti. Na místo pouhého vybrání je zde otvor pro nasazení čelisti na čep. Pro tento návrh by byla nutná úprava čepu na štítu brzdy. Byla také odstraněna díra pro pružinu na straně u čepu.



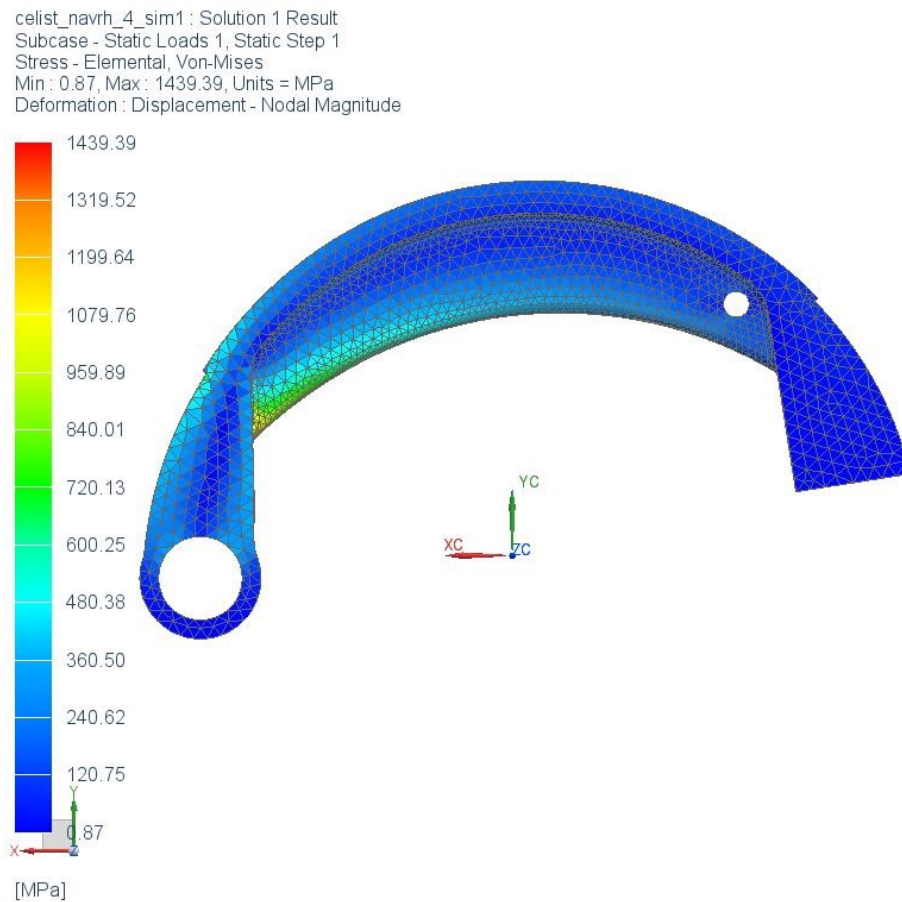
Obr. 36. Čelist návrh 4

Ze simulace bylo zjištěno, že největší deformace čelisti návrhu 4 je 5.025 mm, což je vyšší než u původní čelisti a také vyšší než předchozí tři návrhy.



Obr. 37. Deformace čelisti návrhu 4

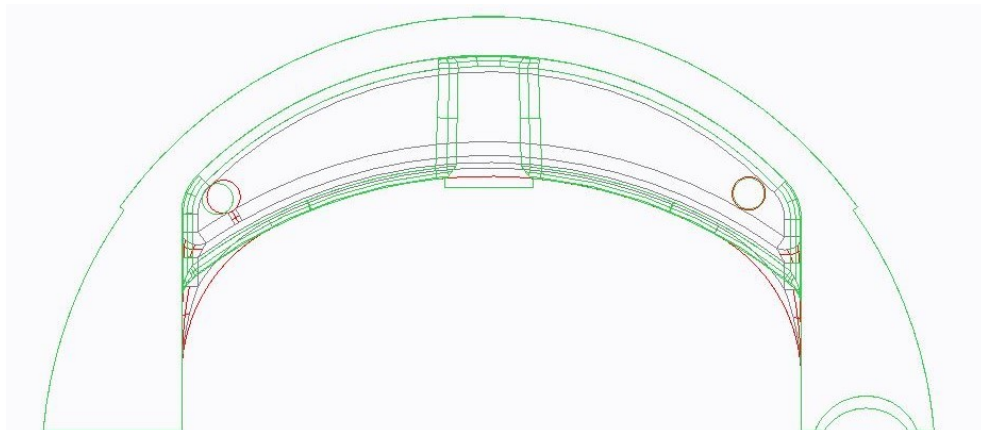
Největší napětí u čelisti návrhu 4 se nachází na začátku žebra a to na straně u čepu. Velikost tohoto napětí je 1439.39 MPa. Velikost napětí u tohoto návrhu je vyšší než u původní čelisti a také vyšší než u předchozích návrhů.



Obr. 38. Největší napětí čelisti návrhu 4

## 6.4 Výběr nové čelisti

Jako nejlepší se z navržených čelistí jeví návrh 3. Tato čelist má nejmenší deformaci a také u této čelisti vzniká nejmenší napětí při stejném zatížení. Pro použití této čelisti není nijak zapotřebí upravovat zástavbu brzdy a jiné komponenty.



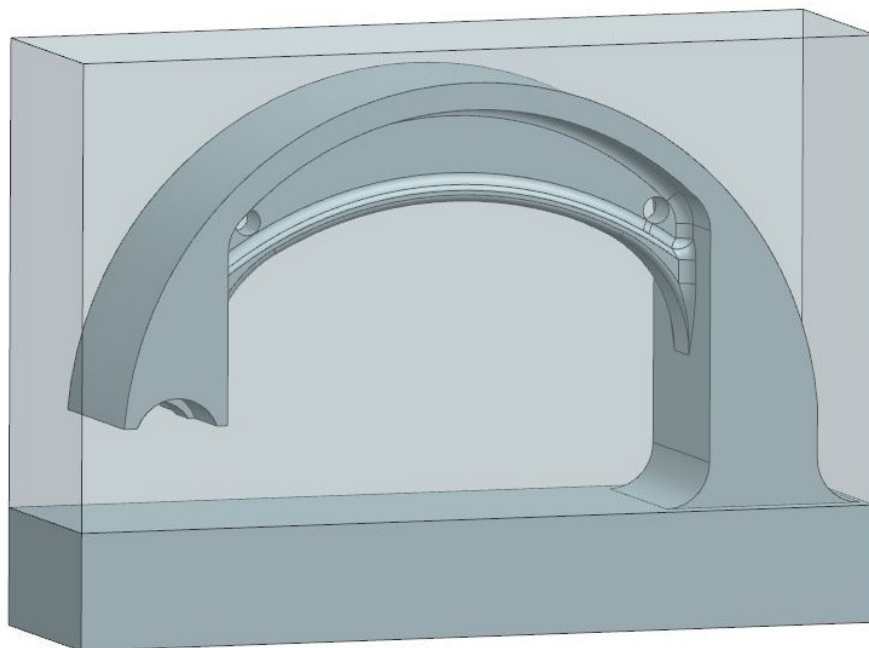
Obr. 39. Porovnání tvaru původní čelisti (zelená) a návrhu 3 (červená)

## 7 VÝROBA NOVÉ ČELISTI

Pro výrobu nové čelisti bylo zapotřebí nejdříve vytvořit výrobní program v softwaru NX. Po vytvoření programu se čelist vyrobí na obráběcím centru.

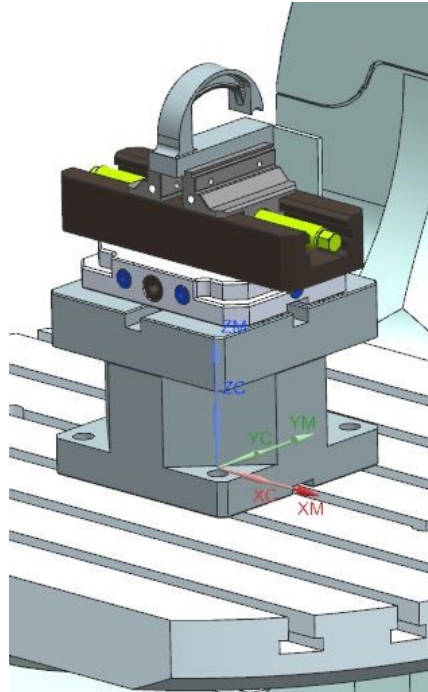
### 7.1 Příprava programu

Pro přípravu programu byl model upraven a to z důvodu využití 5 - osého obráběcího centra, aby byla čelist vyrobena na jedno upnutí. Polotovar pro výrobu čelisti byl o velikosti 92x65x25 mm



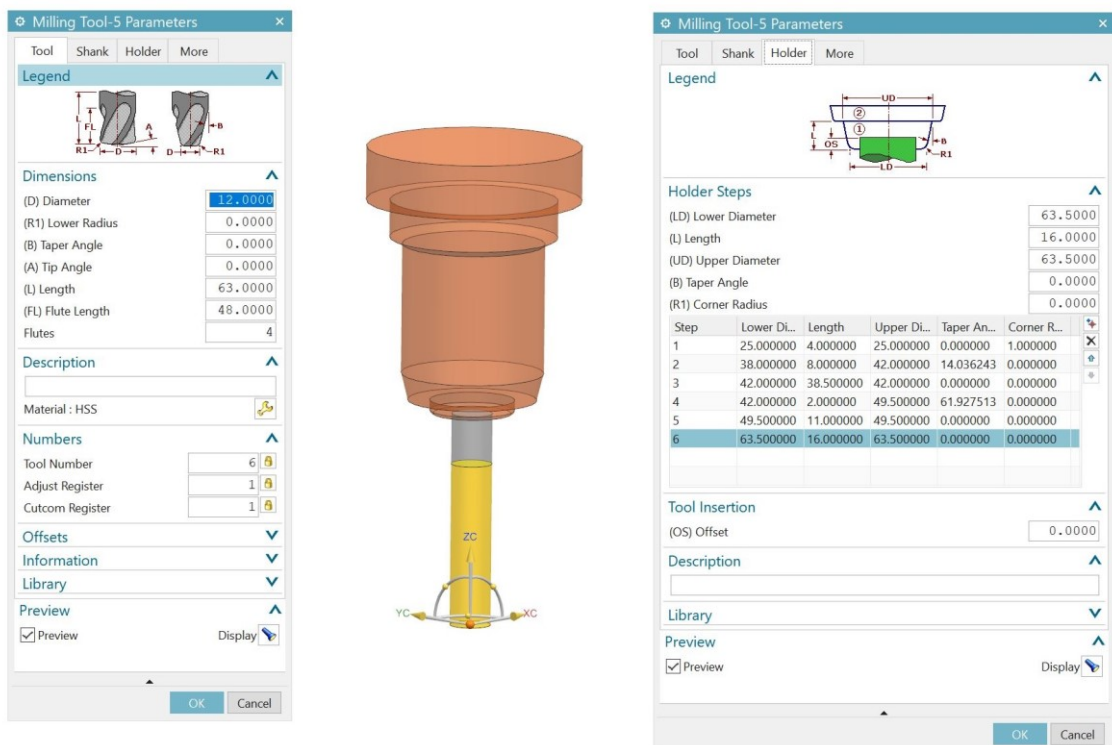
*Obr. 40. Polotovar s upravenou čelistí*

Polotovar byl následně zavazben do svěráku, který je umístěn na podstavci. Podstavec byl zavazben na střed stolu. Viz. Obr. 41.



Obr. 41. Svěrák s polotovarem

Pro výrobu čelisti jsou důležité nástroje, kterými se bude čelist vyrábět. Tyto nástroje se podle skutečných nástrojů vymodelovali v softwaru. Nejedná se pouze o nástroje, ale také o držáky těchto nástrojů. Modelování nástrojů se liší podle tvaru a podle typu použití.



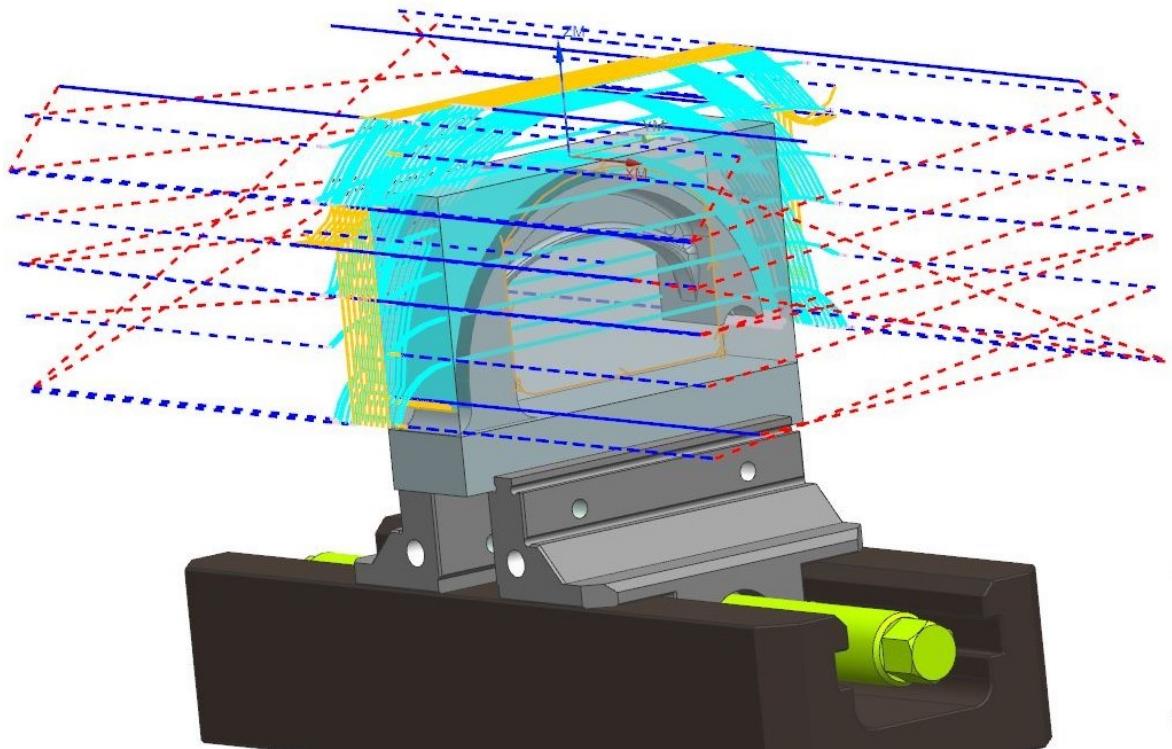
Obr. 42. Příklad modelování nástroje a držáku nástroje

## 7.2 Programování čelisti

Program na výrobu čelisti byl rozdělen na 4 části a to podle toho, k jakým operacím v jednotlivých částech docházelo.

### 7.2.1 První část programu

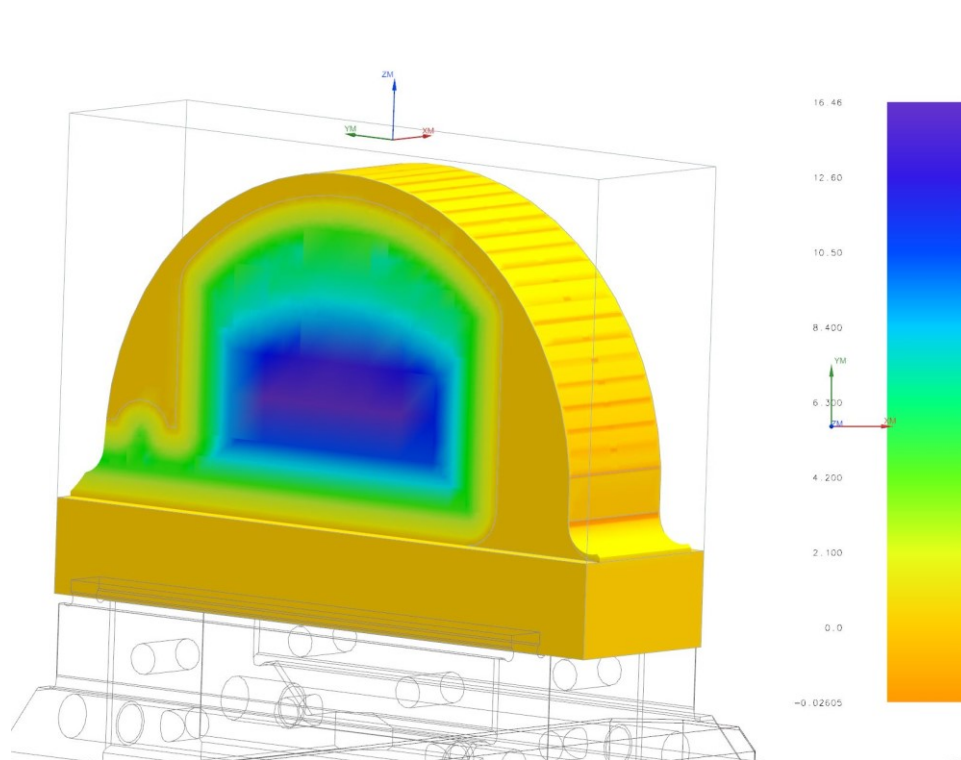
U první části programu se jedná o hrubování čela polotovaru, hrubování polotovaru z vnější strany a následného obrábění na čisto z vnější strany.



*Obr. 43. První část programu*

Hrubování polotovaru bylo v této části prováděno nástrčnou kopírovací frézou o průměru 32 mm. Obrábění na čisto bylo prováděno monolitickou frézou o průměru 8 mm. Řezné a posuvové rychlosti k těmto operacím byly vyhledány v katalogu nástrojů. Další nastavení jednotlivých operací v této části byly řešeny individuálně a to tak aby bylo docíleno co nejlepší kvality obráběného povrchu.

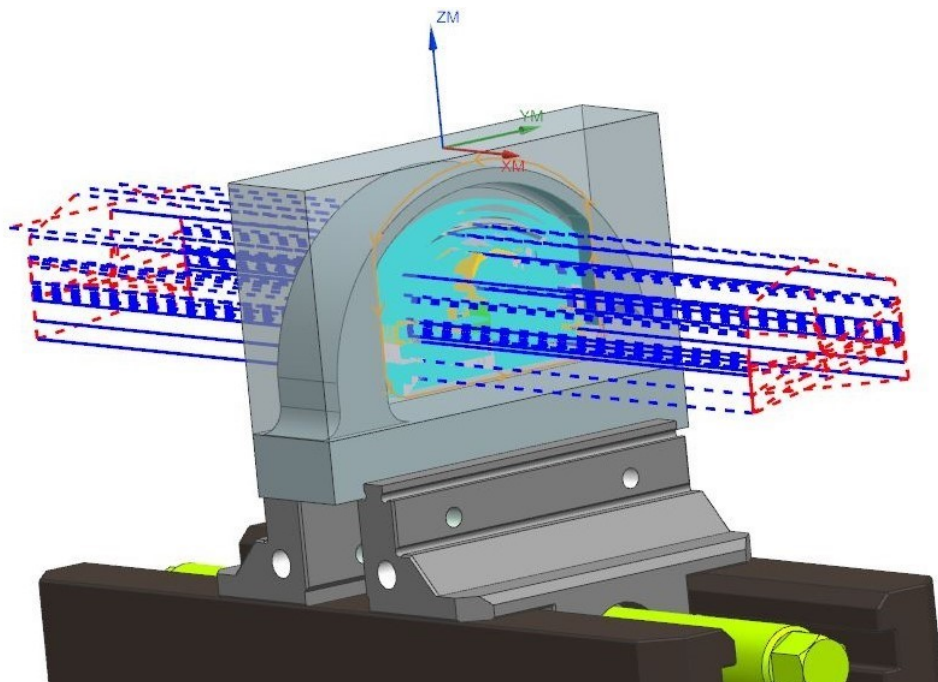
Po dokončení nastavení této části programu byla provedena verifikace programu (Obr. 44.). Na této verifikaci je barevně zobrazeno, ve kterých místech zbývá kolik materiálu.



Obr. 44. Verifikace první části programu

### 7.2.2 Druhá část programu

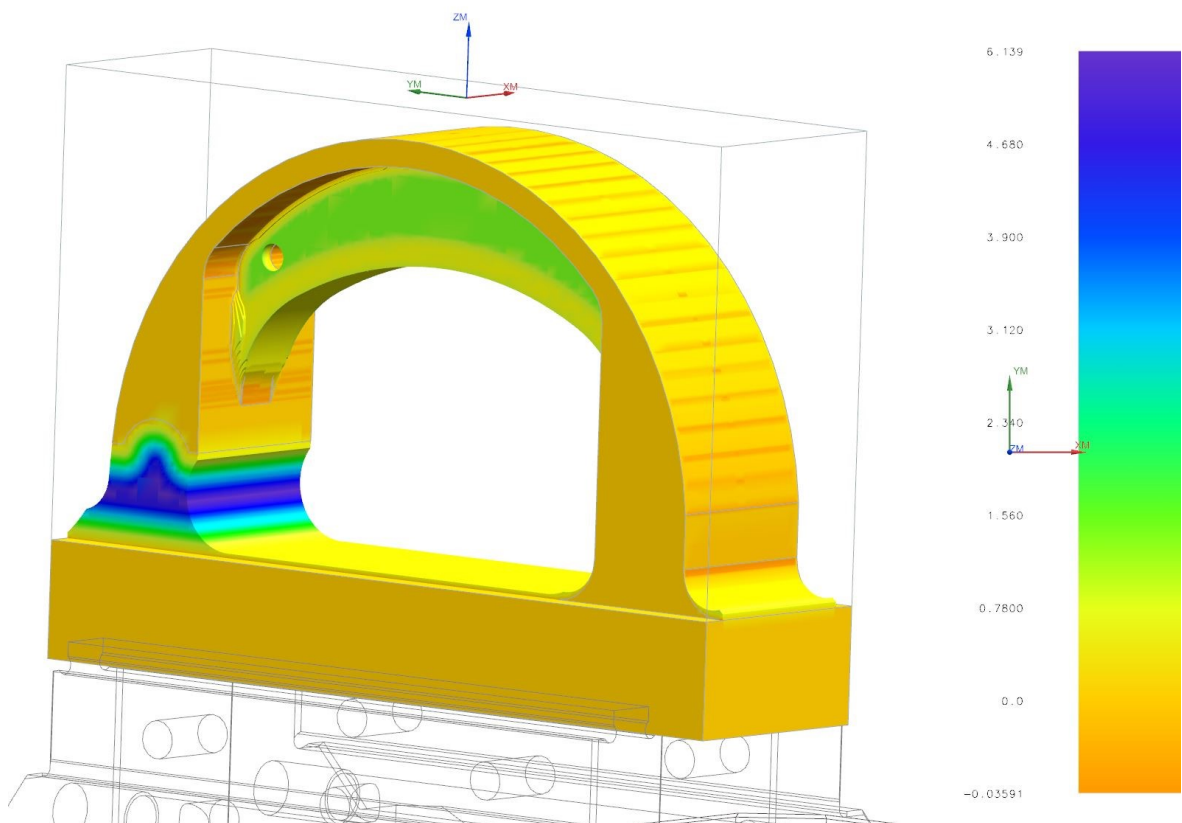
V druhé části programu se jedná o hrubování vnitřní kapsy čelisti, vrtání děr pro pružiny a obrábění na čisto některých vnitřních ploch.



Obr. 45. Druhá část programu

Hrubování vnitřní části čelisti bylo prováděno monolitickou frézou o průměru 12 mm. Následně byly vyvrtány díry pro pružiny a to vrtákem o průměru 3 mm. V posledním kroku se obrábí na čisto vnitřní kapsa, ale pouze boční plochy. Obrábí se monolitickou frézou o průměru 8 mm. Řezné a posuvové rychlosti k těmto operacím byly vyhledány v katalogu nástrojů.

Po dokončení nastavení této části programu byla provedena verifikace programu (Obr. 46.). Na této verifikaci je barevně zobrazeno, ve kterých místech zbývá kolik materiálu.

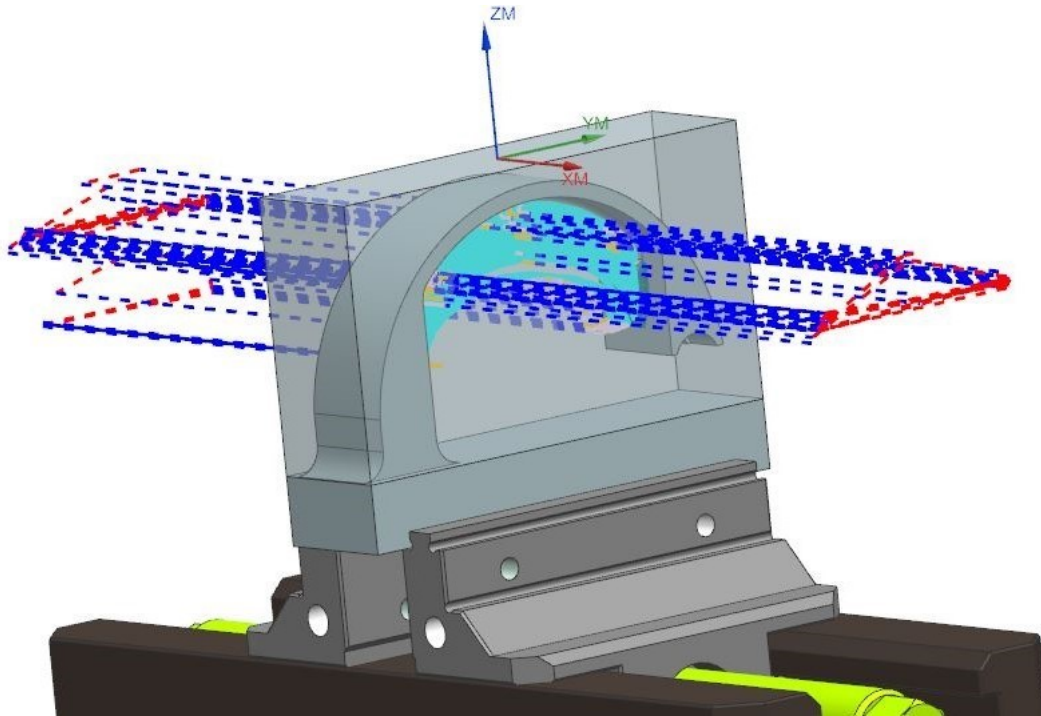


Obr. 46. Verifikace druhé části programu



### 7.2.3 Třetí část programu

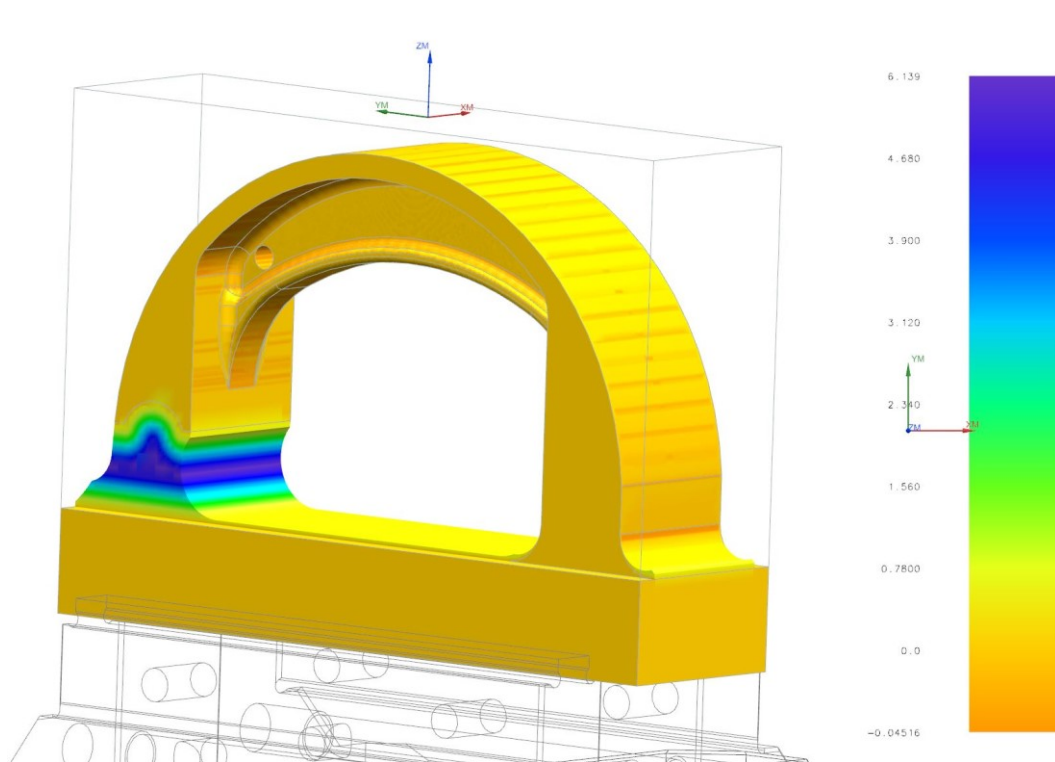
V této části programu se jedná hrubování a následné obrábění na čisto ploch žebra uvnitř čelisti.



*Obr. 47. Třetí část programu*

Obrábění žebra na čisto bylo prováděno v několika krocích. V prvním kroku byla hrubována rovná plocha vnitřní strany žebra monolitickou kulovou frézou o průměru 6 mm. Po obrobení této plochy se obráběl na čisto vnitřní rádius žebra a to kulovou monolitickou frézou o průměru 3 mm. Hrubovaná vnitřní rovná plocha byla následně obrobená na čisto a to stejnou monolitickou frézou jako předchozí obrábění na čisto. Po obrobení na čisto vnitřní strany žebra se přešlo k obrobení na čisto lemu pod žebrem, který byl tvarově složitější a to z důvodu množství zaoblených ploch. Tento lem byl obráběn také kulovou monolitickou frézou o průměru 3 mm. Jako poslední krok této části programu bylo obrobení na čisto spodní strany žebra. To bylo provedeno monolitickou frézou o průměru 8 mm. Řezné a posuvové rychlosti k těmto operacím byly vyhledány v katalogu nástrojů.

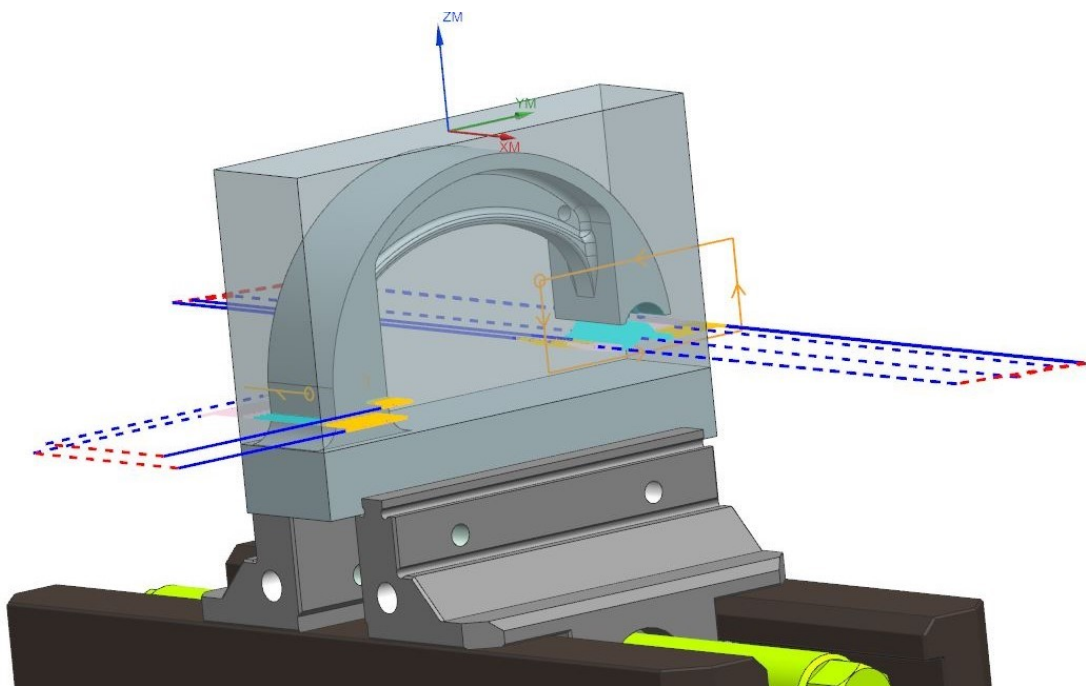
Po dokončení nastavení této části programu byla provedena verifikace programu (Obr. 48.). Na této verifikaci je barevně zobrazeno, ve kterých místech zbývá kolik materiálu.



Obr. 48. Verifikace třetí části programu

#### 7.2.4 Čtvrtá část programu

V této části programu se jedná o hrubování a následně obrábění na čisto podpěry a hrubování samotné čelisti od držáku.

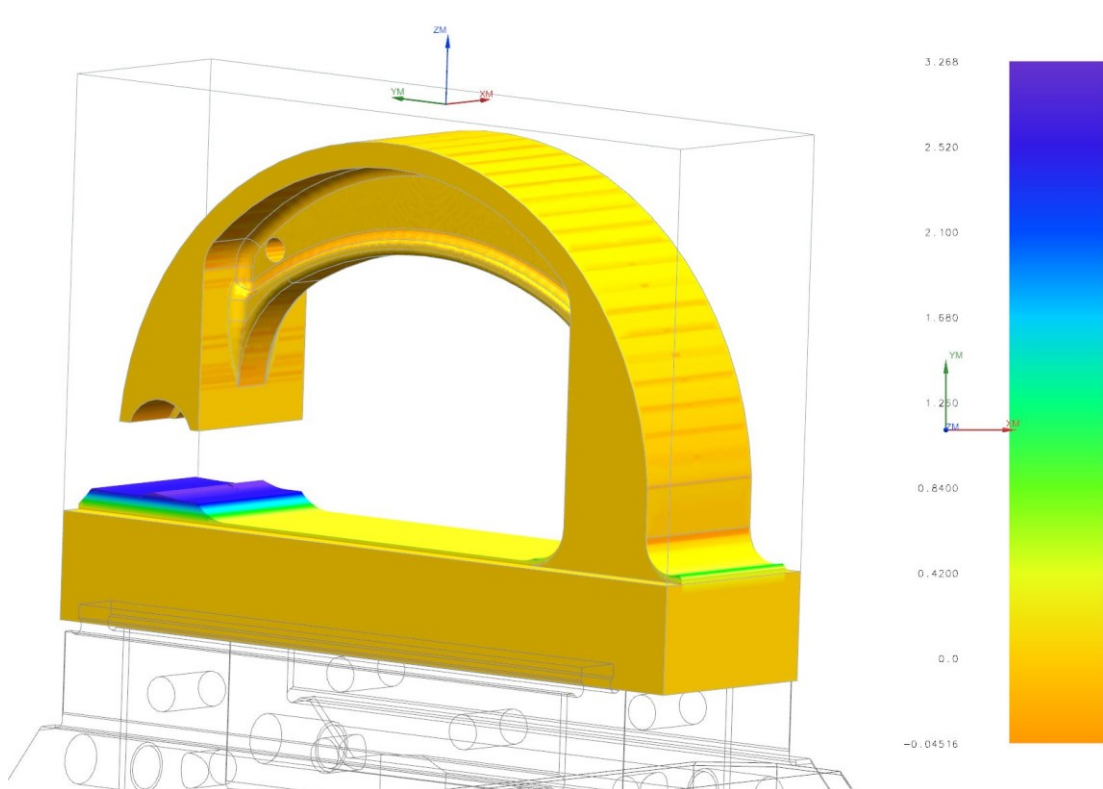


Obr. 49. Čtvrtá část programu

Odstranění podpěry na straně, kde se čelist stýká s čepem, bylo provedeno v šesti krocích. Z důvodu zachování co největší tuhosti čelisti bylo nutné tuto podpěru odstranit až v samém závěru výrobního programu. Byl zde použit jeden nástroj, jednalo se o monolitickou frézu o průměru 8 mm. Podpěru lze rozdělit do tří částí, jedná se o dvě stykové plochy a plochu zabraňující čelisti vysunutí z čepu. U stykových ploch bylo potřeba zajistit lepší opracování povrchu než u plochy zabraňující vysunutí čelisti. Jelikož zde se začínala čelist chvět, byly nejdříve frézovány stykové plochy. Podpěra byla hrubována a následně obráběna na čisto z jedné strany a následně i ze strany druhé, tak aby u plochy zabraňující vysunutí podpěra prozatím zůstala. Následně byla hrubována a obráběna na čisto i tato podpěra.

Po odfrézování podpěry se přešlo k odfrézování samotné čelisti z držáku. Toto frézování bylo rozděleno na dvě části. V první části byla hrubována frézou o průměru 12 mm větší část materiálu i s větším úběrem materiálu. V druhé části bylo hrubováno menším nástrojem a to frézou o průměru 8 mm. Byl zde menší úběr materiálu a po hrubování zde zůstala stěna tenká 0,5 mm. Tato stěna byla následně odlomena a začištěna.

Verifikace programu (Obr. 50.) byla provedena před odfrézováním čelisti z držáku. Na této verifikaci je barevně zobrazeno, ve kterých místech zbývá kolik materiálu.



Obr. 50. Verifikace čtvrté části programu

## 7.2.5 Shrnutí programu

Kompletní program je zobrazen na Obr. 51.

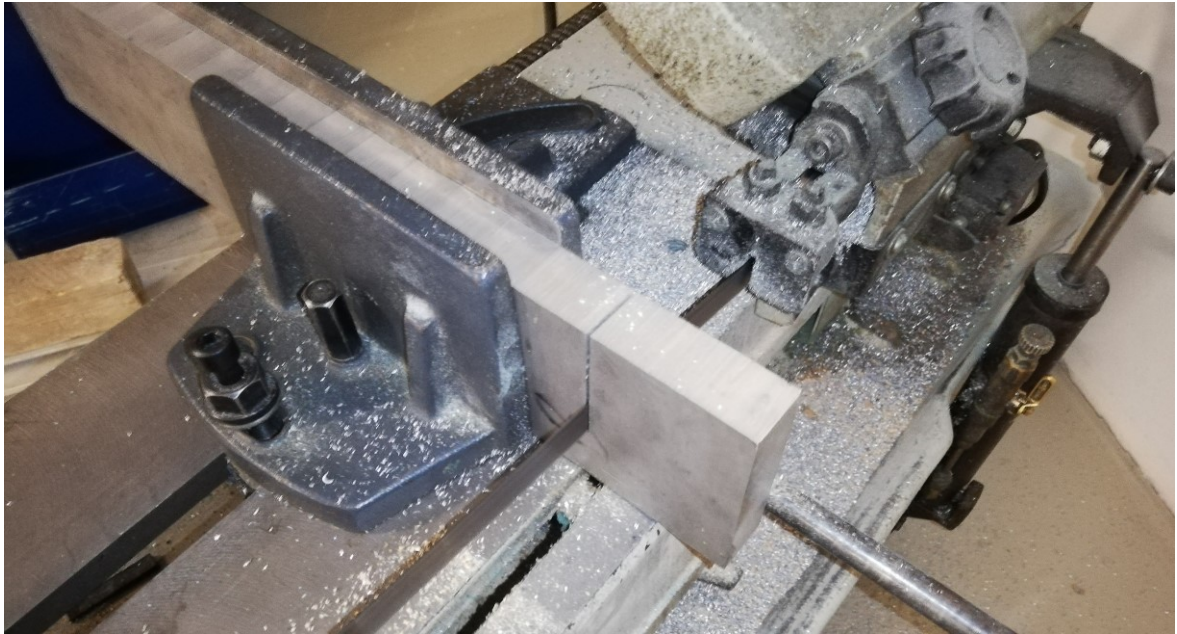
Operation Navigator - Program Order

Name	Toolchange	Path	Tool	Tool Number	Time	Geometry	Method	Speed
NC_PROGRAM					00:52:18			
Unused Items					00:00:00			
PROGRAM					00:52:18			
PROGRAM_1					00:09:22			
CELO_1	ⓘ	✓	FN_ROHOV...	1	00:01:03	WORKPIECE	MILL_ROUGH	9947 rpm
HRUB_1_1	ⓘ	✓	FN_ROHOV...	1	00:02:32	WORKPIECE	MILL_ROUGH	9947 rpm
CELO_2	ⓘ	✓	FN_ROHOV...	1	00:01:02	WORKPIECE	MILL_ROUGH	9947 rpm
HRUB_2_1	ⓘ	✓	FN_ROHOV...	1	00:01:25	WORKPIECE	MILL_ROUGH	9947 rpm
NA_CISTO_1	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:03:21	WORKPIECE	MILL_FINISH	11141 rpm
PROGRAM_2					00:15:34			
HRUB_1_2	ⓘ	✓	FM_D12_L45...	6	00:01:59	WORKPIECE	MILL_ROUGH	7958 rpm
HRUB_2_2	ⓘ	✓	FM_D12_L45...	6	00:01:25	WORKPIECE	MILL_ROUGH	7958 rpm
VRTNE_DIRY	ⓘ	✓	VT_D3_L23	5	00:00:03	WORKPIECE	DRILL_METHOD	14500 rpm
NA_CISTO_1_1	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:06:52	WORKPIECE	MILL_FINISH	11141 rpm
NA_CISTO_2	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:05:14	WORKPIECE	MILL_FINISH	11141 rpm
PROGRAM_3					00:23:07			
DIRA_1_1	ⓘ	✓	FM_D6_L12...	3	00:00:18	WORKPIECE	MILL_FINISH	13263 rpm
DIRA_1_2	ⓘ	✓	FM_D3_L6_R...	4	00:02:31	WORKPIECE	MILL_FINISH	14324 rpm
DIRA_1_3	ⓘ	✓	FM_D3_L6_R...	4	00:04:04	WORKPIECE	MILL_FINISH	14324 rpm
DIRA_1_4	ⓘ	✓	FM_D3_L6_R...	4	00:04:07	WORKPIECE	MILL_FINISH	14324 rpm
DIRA_2_1	ⓘ	✓	FM_D6_L12...	3	00:00:18	WORKPIECE	MILL_FINISH	13263 rpm
DIRA_2_2	ⓘ	✓	FM_D3_L6_R...	4	00:02:21	WORKPIECE	MILL_FINISH	14324 rpm
DIRA_2_3	ⓘ	✓	FM_D3_L6_R...	4	00:04:04	WORKPIECE	MILL_FINISH	14324 rpm
DIRA_2_4	ⓘ	✓	FM_D3_L6_R...	4	00:04:07	WORKPIECE	MILL_FINISH	14324 rpm
NA_CISTO_2_2	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:01:16	WORKPIECE	MILL_FINISH	11141 rpm
PROGRAM_4					00:04:14			
HRUB_2_3	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:00:25	WORKPIECE	MILL_ROUGH	11141 rpm
NA_CISTO_2_3	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:00:35	WORKPIECE	MILL_FINISH	11141 rpm
HRUB_1_3	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:00:27	WORKPIECE	MILL_ROUGH	11141 rpm
NA_CISTO_1_3	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:00:45	WORKPIECE	MILL_FINISH	11141 rpm
HRUB_3	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:00:28	WORKPIECE	MILL_ROUGH	11141 rpm
NA_CISTO_3	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:00:27	WORKPIECE	MILL_FINISH	11141 rpm
ODRIZNUTI_1	ⓘ	✓	FM_D12_L45...	6	00:00:35	WORKPIECE	METHOD	7958 rpm
ODRIZNUTI_2	ⓘ	✓	FM_D8_L32...	2	00:00:31	WORKPIECE	METHOD	11141 rpm

Obr. 51. Shrnutí programu

## 7.3 Příprava výroby čelisti

Hlavní součástí přípravy výroby bylo přichystat polotovar výrobku, jak již bylo zmíněno jeho velikost je 92x65x25 mm. Původní čelist byla vyrobena z materiálu EN AW 6082. Pro nově navrženou čelist byl použit materiál EN AW 7075, jedná se také o slitinu hliníku. Tato slitina hliníku má lepší vlastnosti než původní. Materiál byl objednan ve velikosti 92x500x25 mm. Před samotnou výrobou byla z tohoto hranolu odřezána na pásové pile potřebná velikost polotovaru.



*Obr. 52. Odřezání polotovaru*

Další důležitou součástí přípravy výroby jsou nástroje, kterými se bude vyrábět čelisti. Použité nástroje jsou vypsány v tabulce č.1. a zobrazeny na Obr. 53. U tohoto obrázku číslo nástroje odpovídá číslu nástroje v simulaci, nikoliv na obrázku. Součástí nástrojů jsou také upínače. Upínače pro jednotlivé nástroje byly voleny tak, aby při práci nedošlo ke kolizi vřetena stroje s výrobkem nebo s jiným příslušenstvím stroje. Proto jsou upínače i součástí simulace programu. Všechny použité nástroje jsou od firmy SECO.



*Obr. 53. Nástroje na výrobu čelisti*

Tabulka 1. Nástroje použité na výrobu čelisti

Číslo nástroje	Obchodní název nástroje	Typ nástroje	Průměr nástroje [mm]	Délka nástroje [mm]	Rohový rádius [mm]	Počet břitů [ks]
1	R217.97-1632.RE-X12.3A	Kopírovací fréza	32	65	0.8	3
2	JS514080D3C.0Z4-NXT	Monolitní karbidová fréza	8	32	0	4
3	JS532060D1B.0Z2-NXT	Monolitní karbidová fréza	6	12	3	2
4	JS532030D1B.0Z2-NXT	Monolitní karbidová fréza	3	6	1.5	2
5	SD1105A-0300-023-06R1	Monolitní karbidový vrták	3	23	-	2
6	JS514120D3C.0Z4-NXT	Monolitní karbidová fréza	12	45	0	4

Poté co byly nástroje upevněny do upínačů, byly jednotlivě vloženy do frézky. Zde se musel název nástroje ze simulace shodovat s názvem nástroje v systému frézky. Nástroj se vložil do vřetena a pomocí dotykového čidla byla přeměřena jeho délka.

Pro jednotlivé nástroje je také za potřebí určit jednotlivé řezné podmínky, při kterých obrábí. Jednotlivé řezné podmínky byly voleny z tabulek řezných podmínek, které se nachází v tabulkách u parametrů nástroje. Pro zjednodušení byly tyto parametry vypsány do tabulky 2.

Tabulka 2. Řezné podmínky nástrojů

Číslo nástroje	Druh operace	Rychlost posuvu ve [m/min]	Posuv na zub fz [mm/zub]	Otáčky vřetene [RPM]	Úběr [mm]
1	Hrubování	1000	0.08	9947	1,5
2	Hrubování	280	0.04	11 141	1
2	Obrábění na čisto	280	0.07	11 141	0,25
3	Hrubování	250	0.048	13 263	1.5
4	Obrábění na čisto	135	0.024	14324	0.1
5	Vrtání	136	0.15	14500	-
6	Hrubování	300	0.11	7958	1

#### 7.4 Výroba čelisti

Výroba čelistí probíhala na stroji DMG MORI - DMU 50, jedná se o univerzální CNC frézku s naklápěcím rotačním stolem.

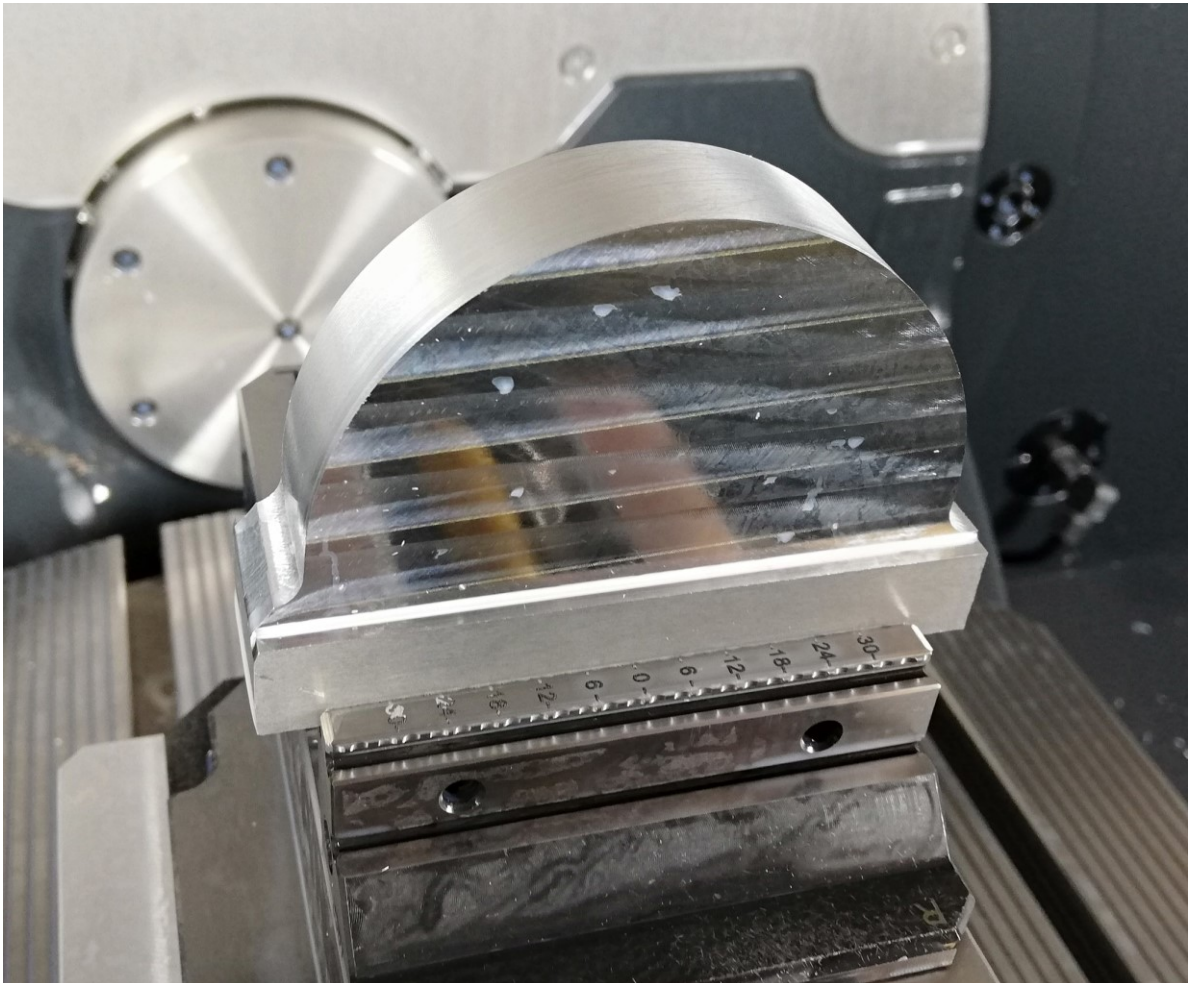
Po nahrání programu do frézky a po následné simulaci programu ve stroji se přešlo k samotné výrobě čelisti.



Obr. 54. Frézka DMG MORI - DMU 50 [23]

Do svěráku se upnul polotovár a odměřily se jeho rozměry pomocí sondy. Spustil se program. Frézka automaticky vyměnila sondu za nástroj číslo 1 a začala hrubovat podle programu. Při prvním najíždění nástroje byl ručně snížen posuv nástroje a kontrolován jeho nájezd a to z důvodu bezpečnosti, kdyby vznikla nějaká chyba, aby nebyl zničen nástroj nebo poškozena frézka.

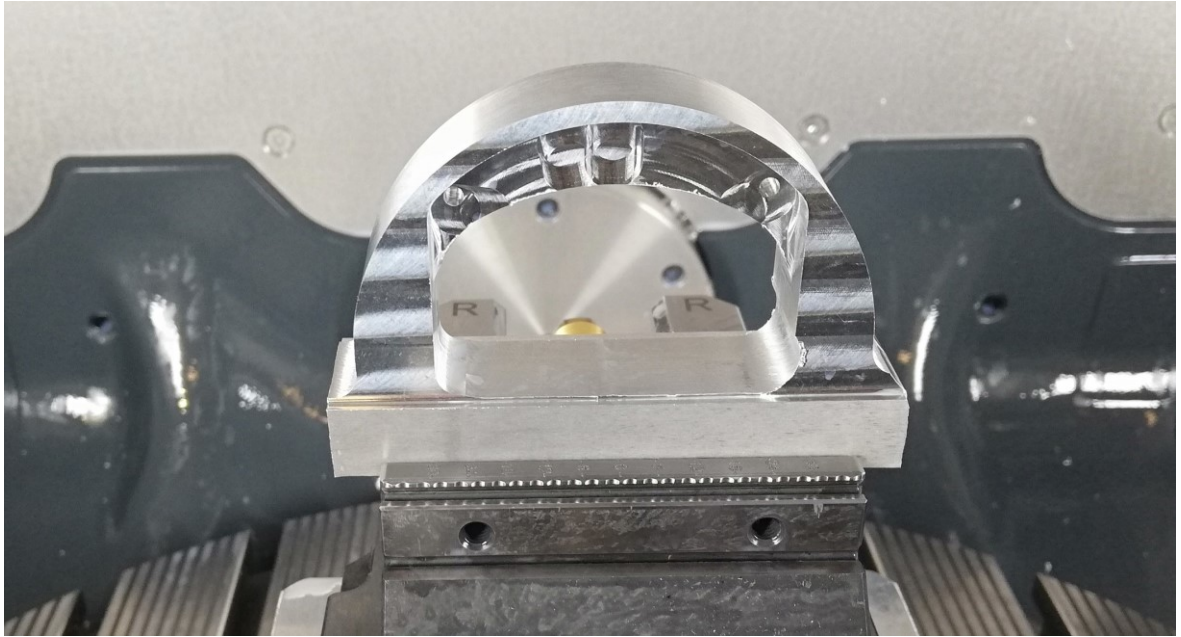
V první části programu byl polotovár hrubován a následně vnější plocha obrobena na čisto.



*Obr. 55. Polotovár po první části programu*

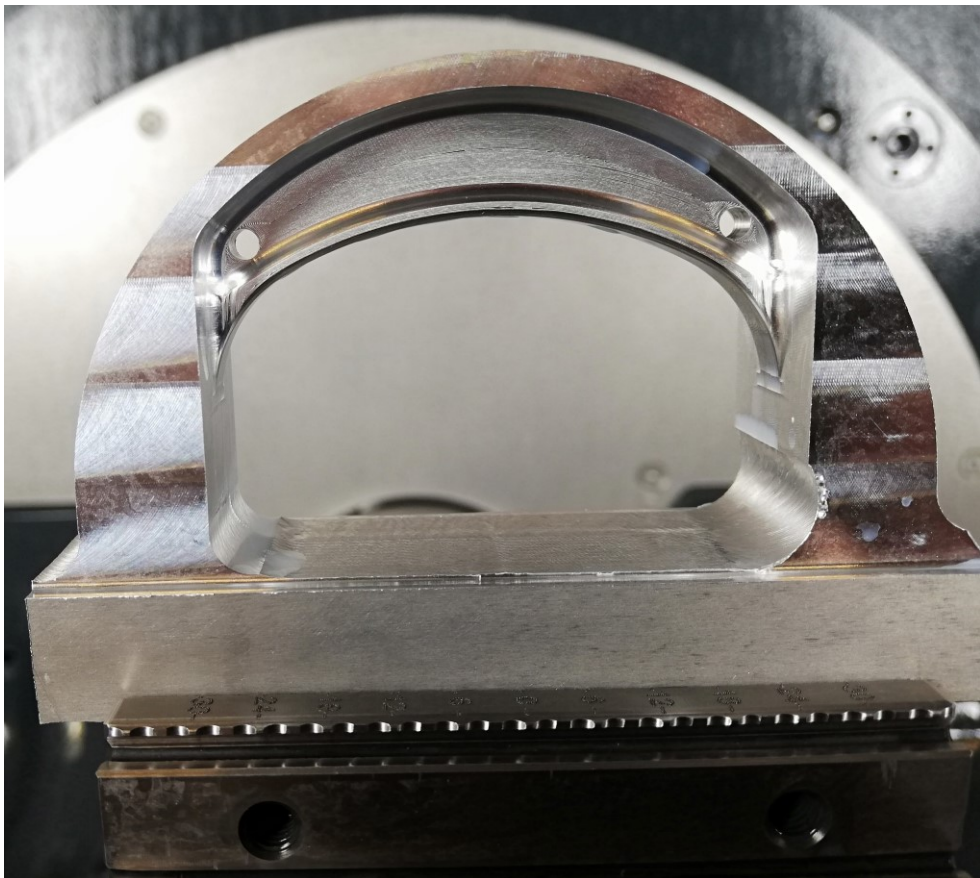
Ve druhé části programu byla hrubována vnitřní část polotovaru, byly vyvrtány díry pro pružiny a obráběny na čisto boční plochy polotovaru.





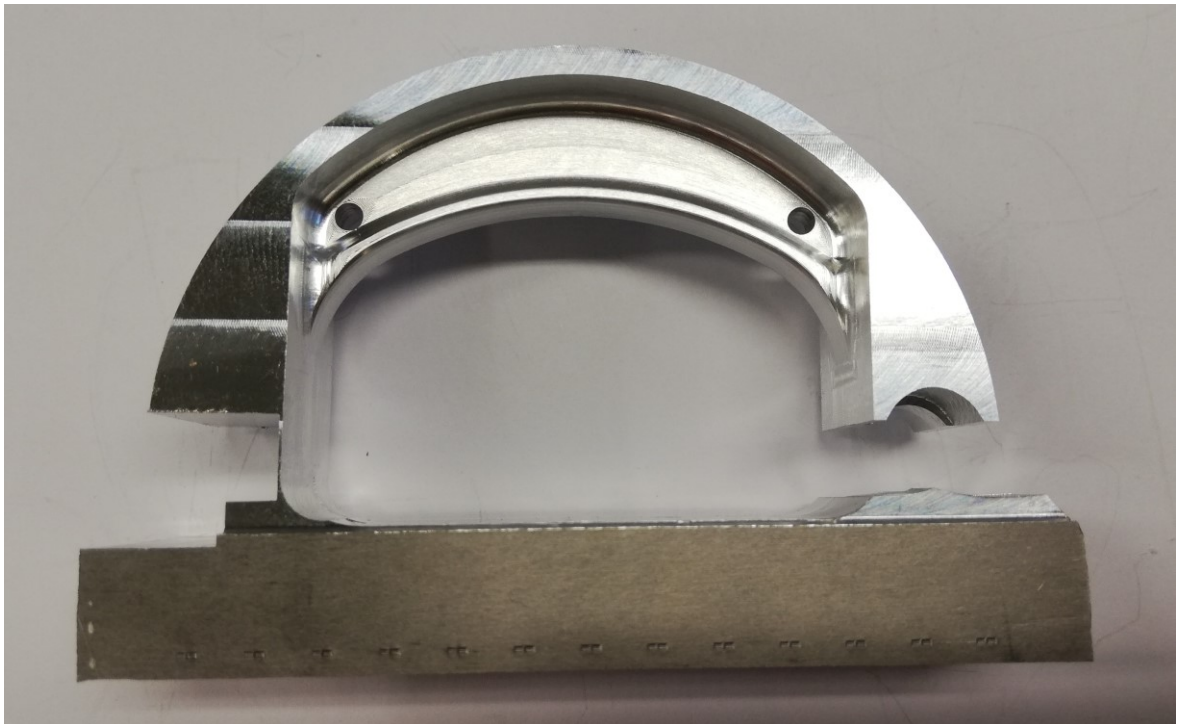
*Obr. 56. Polotovár po druhé části programu*

Ve třetí části programu bylo dohrubováno žebro a následně obrobena na čisto i se zbytkem vnitřních ploch.



*Obr. 57. Polotovár po třetí části programu*

Ve čtvrté části programu došlo k odfrézování podpěry čelisti a následnému odfrézování čelisti od držáku, za který byl polotovár upnut v čelistech.



*Obr. 58. Čelist po čtvrté části programu vyjmutá ze svěráku*

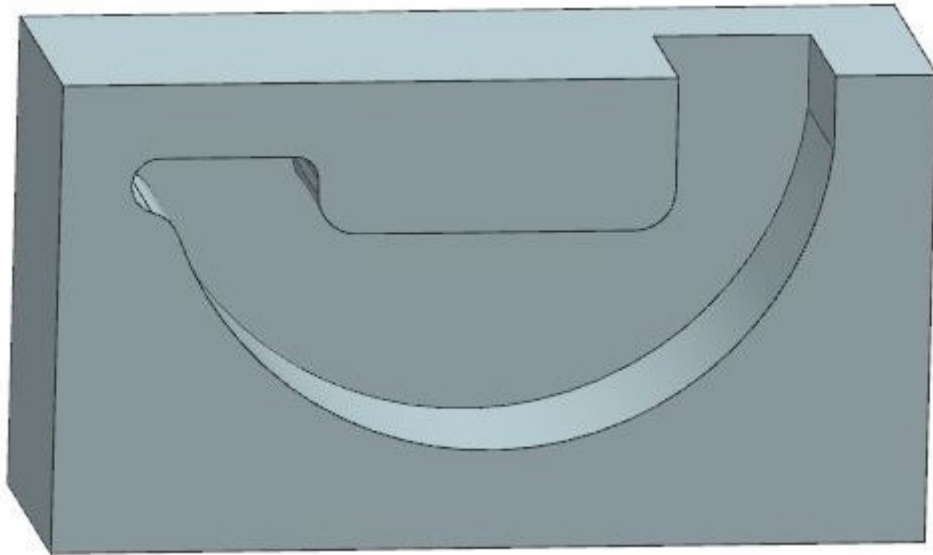
Po vyjmutí čelisti ze svěráku byl odstřížen držák a zbytky po něm byly zabroušeny.



*Obr. 59. Čelist po odstranění držáku a zabroušení*

## 8 TESTOVACÍ PŘÍPRAVEK

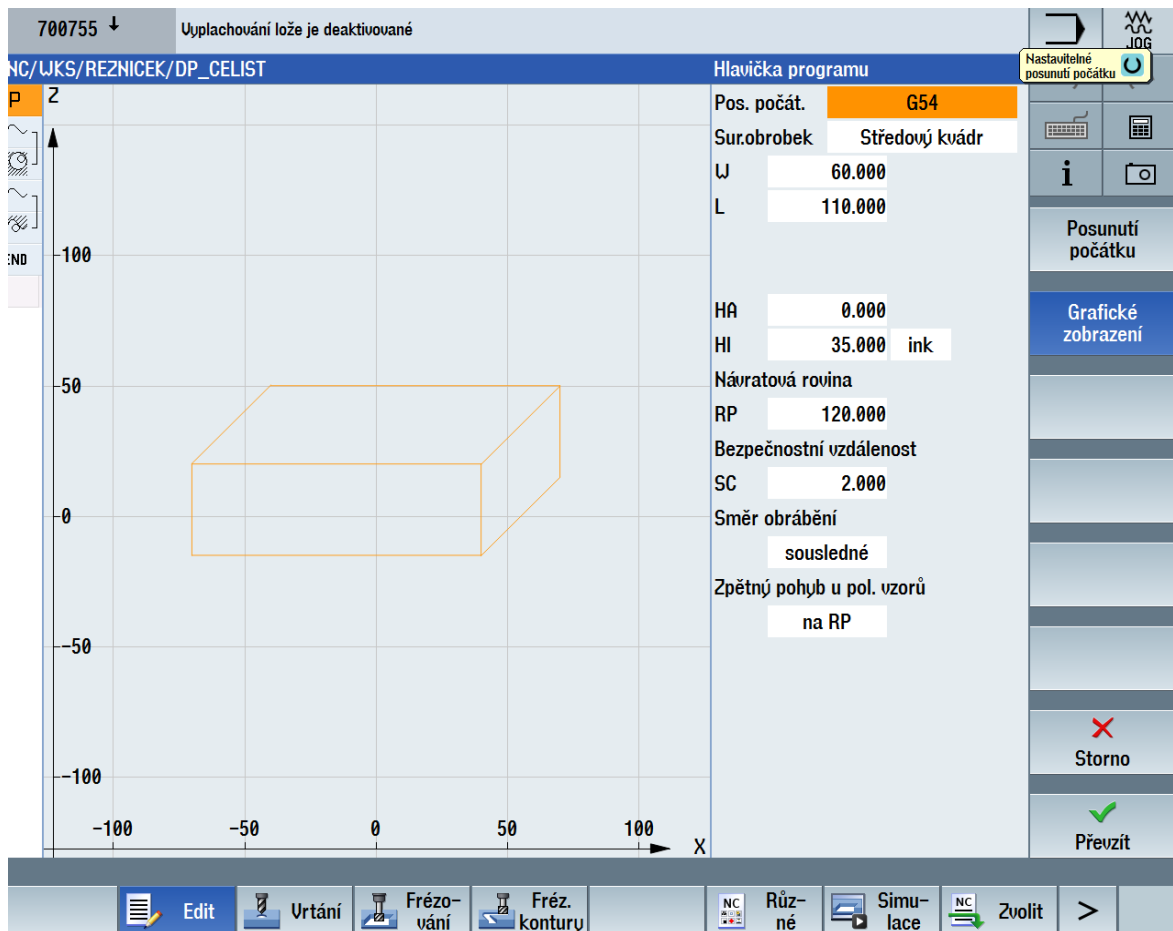
Pro testování čelistí byl navržen testovací přípravek. Testovací přípravek slouží k testování zatížení čelistí. Testovací přípravek je vyroben z konstrukční oceli E 335. Při návrhu testovacího přípravku, se vycházelo z rozměrů brzdového bubnu. Testovací přípravek má stejný rádius jako bubnová brzda.



*Obr. 60. Testovací přípravek*

### 8.1 Příprava programu pro výrobu testovacího přípravku

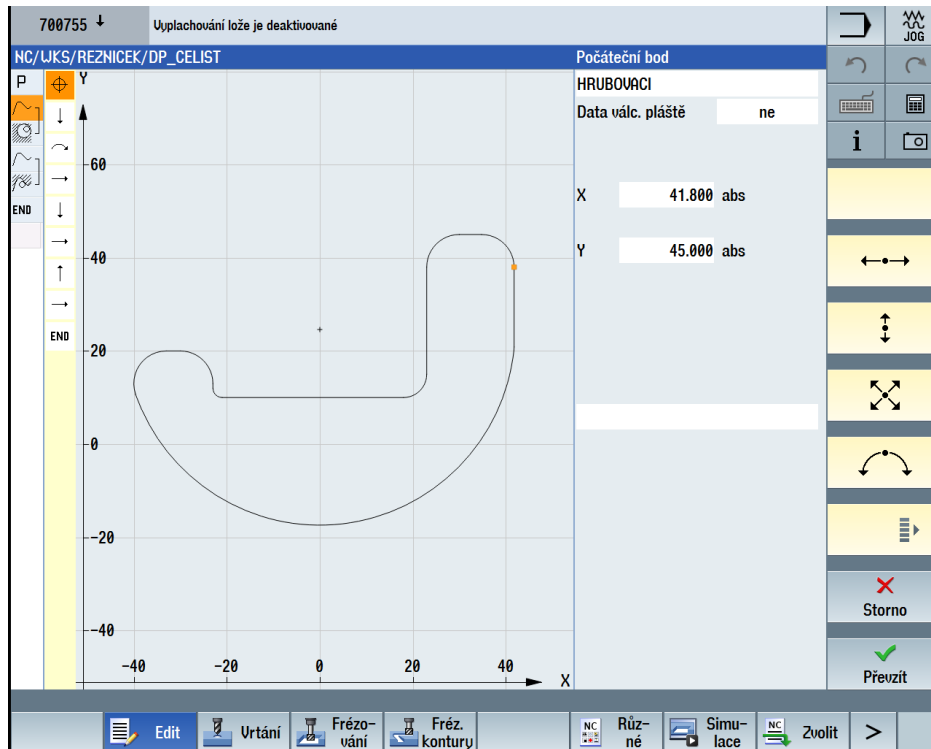
Testovací přípravek byl naprogramován za pomoci ručního programování přímo na obráběcím stroji. Nejdříve byl vložen do programu polotovar testovacího přípravku. Tento polotovar měl velikost 110x60x35 mm. Pro vytvoření výrobního programu byl vytvořen model přípravku a také výrobní výkres.



Obr. 61. Vytvoření polotovaru testovacího přípravku

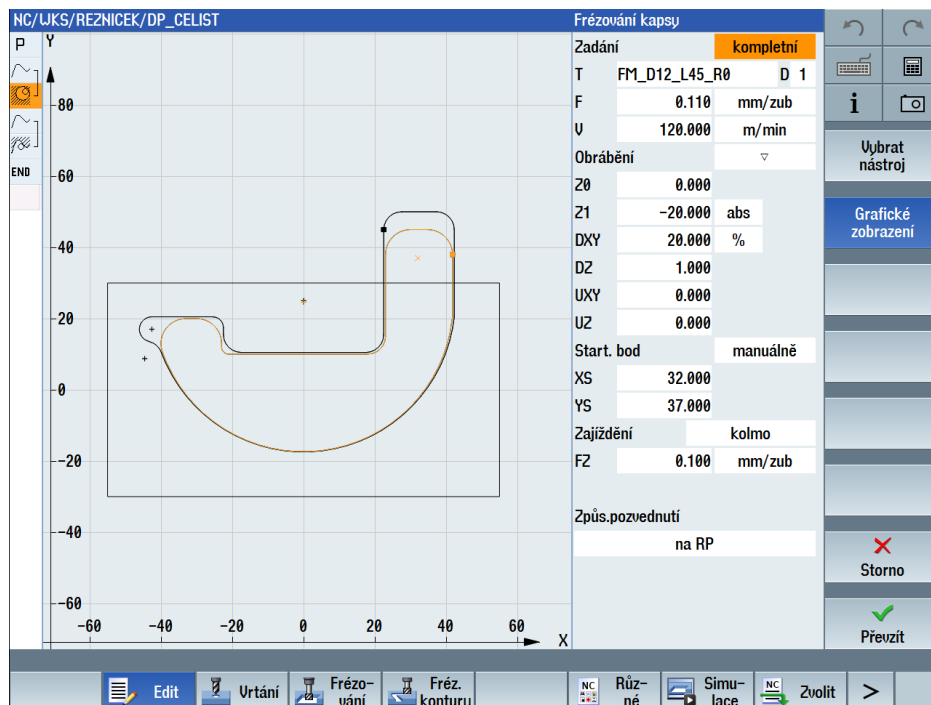
Následně byl polotovar testovacího přípravku hrubován. Pro vytvoření hrubovací operace, bylo za potřebí zvolit v programu funkci frézování kapsy.

Pro orientaci kde se má hrubovat byla podle výkresu testovacího přípravku vytvořena kontura kapsy s přídávkem na obrábění na čisto. Nejdříve byl určen počáteční bod hrubování. Ten byl zvolen mimo dílec, aby nemusel nástroj najíždět z horní strany do plného materiálu, ale aby obráběl čelem pro což je konstruován. Pomocí absolutního programování a prvků k tomu určených, jak je vidět na Obr. 63. vpravo, byla určena celá kontura kapsy.



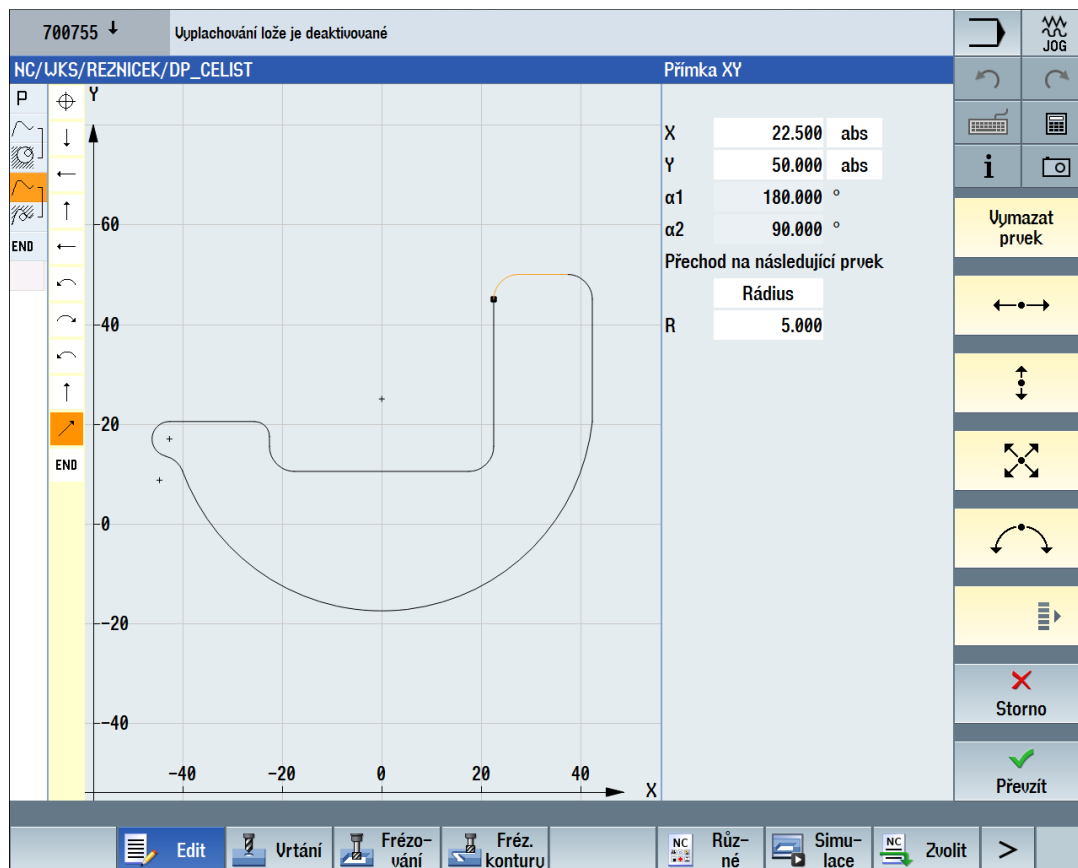
Obr. 62. Kontura hrubování polotovaru testovacího přípravku

Pro hrubovací operaci byla vybrána monolitní karbidová fréza od firmy SECO o průměru 12 mm. Jedná se o stejný nástroj, se kterým byla hrubována čelist ve druhé části programu výroby čelisti. Jednotlivé parametry hrubování jsou patrné na Obr. 64.



Obr. 63. Nastavení hrubování polotovaru testovacího přípravku

Po hrubovací operaci se přešlo k obrábění testovacího přípravku na čisto. Pro obrábění na čisto byla zvolena funkce programu frézování po dráze. Dráha byla zvolena podle výkresu testovacího přípravku, tentokrát již bez přídavku. Bylo postupováno stejně jako při vytváření kontury pro hrubování. Nejdříve byl určen nulový bod dráhy a následně podle jednotlivých prvků byla určena celá dráha pro frézování na čisto.

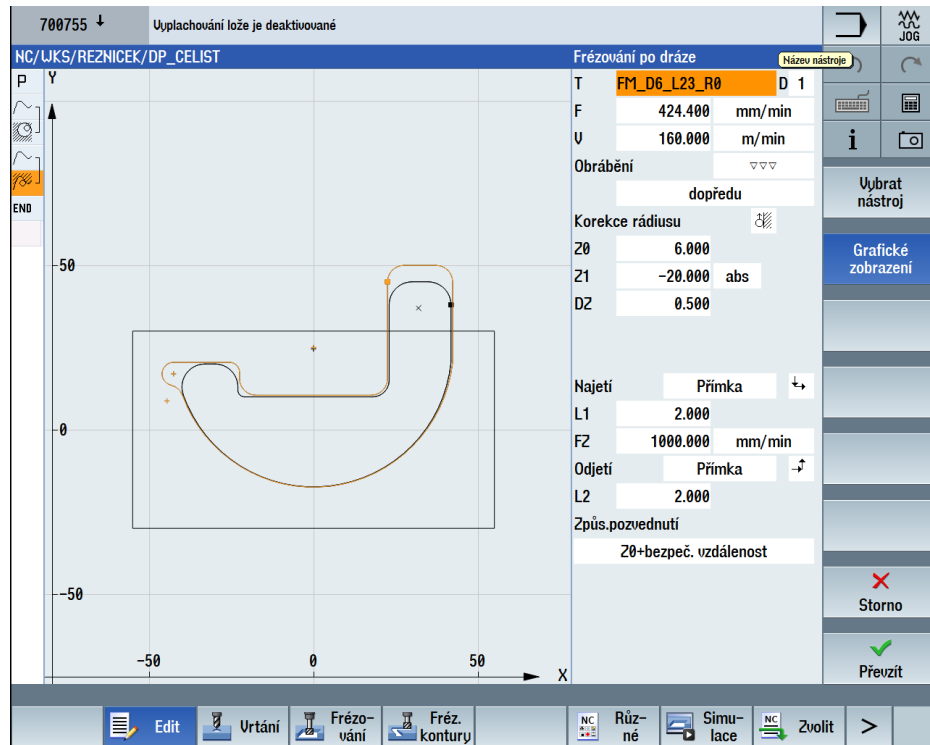


Obr. 64. Dráha pro frézování na čisto testovacího přípravku

Pro frézování na čisto byl vybrán nástroj od firmy SECO o průměru 6 mm. Bližší informace k nástroji jsou v Tab. 3. Jednotlivé parametry frézování na čisto jsou patrné na Obr. 66.

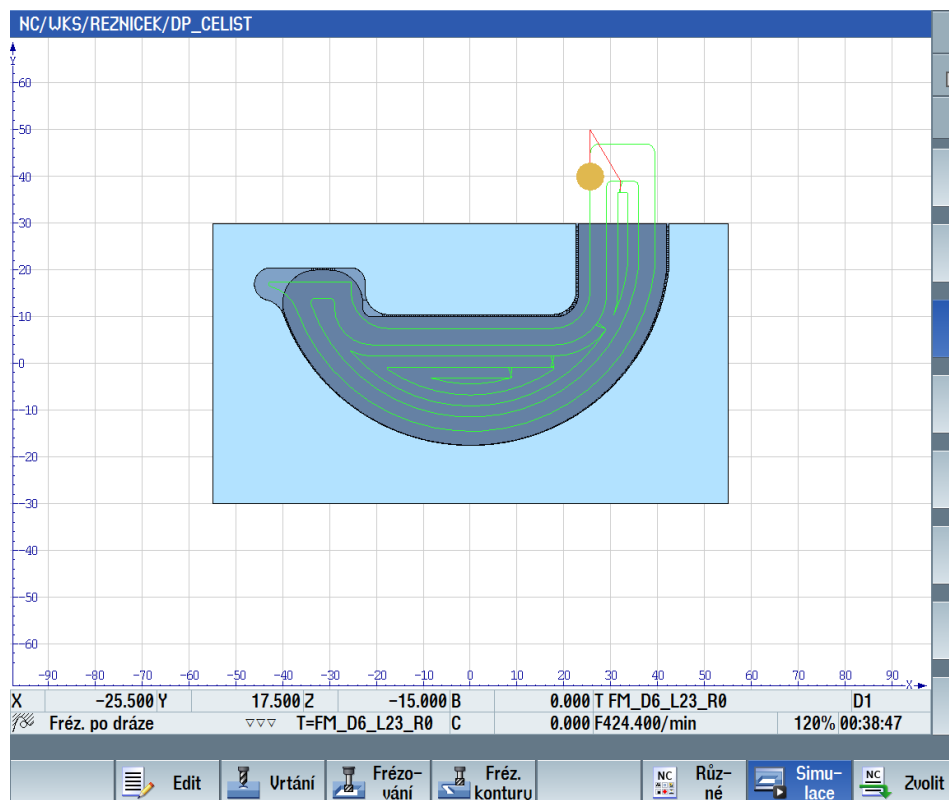
Tabulka 3. Parametry nástroje

Obchodní název nástroje	Typ nástroje	Průměr nástroje [mm]	Délka nástroje [mm]	Rohový rádius [mm]	Počet břitů [ks]
JS514060D3C.0Z5 -NXT	Monolitní karbidová fréza	6	23	0	4



Obr. 65. Nastavení frézování na čisto testovacího přípravku

Po vytvoření výrobního programu pro testovací přípravek byla provedena simulace programu. Tato simulace proběhla v pořádku, a proto se přešlo k výrobě přípravku.



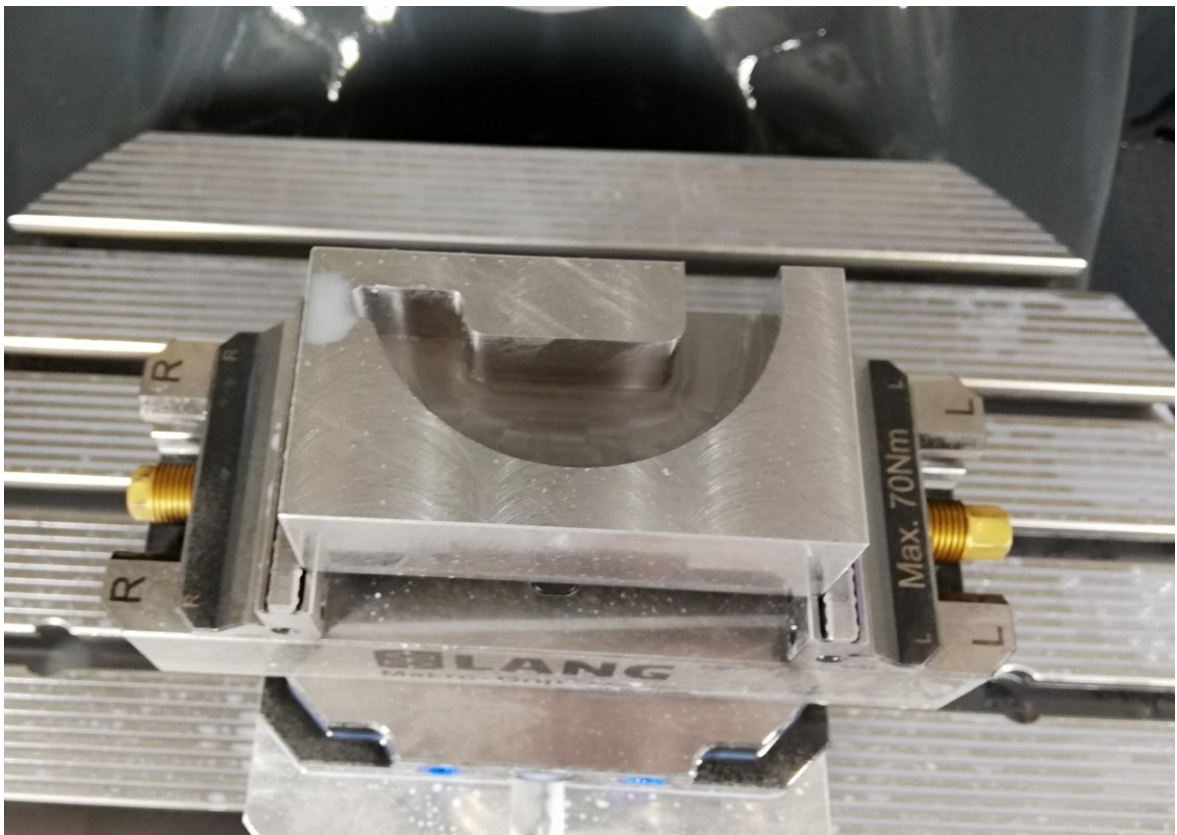
Obr. 66. Simulace výroby testovacího přípravku

## 8.2 Výroba testovacího přípravku

Do čelistí byl vložen polotovar testovacího přípravku. Frézka byla přeprnuta na ruční režim a do vřetena byla upnuta sonda. Pomocí sondy byl odměřen polotovar.

Po spuštění výrobního programu byla do vřetene upnuta fréza o průměru 12 mm, která začala hrubovat testovací přípravek. Po dokončení hrubovací operace byl do vřetene upnut druhý nástroj určený k obrábění na čisto. Tato fréza o průměru 6 mm dokončila výrobní program.

Výroba testovacího přípravku proběhla podle připraveného programu.



*Obr. 67. Vyrobený testovací přípravek*



## 9 TESTOVÁNÍ ČELISTÍ

Před testováním vzorků bylo nutné nově vyrobené vzorky upravit. Samotné testování probíhalo v laboratoři a při skutečném zatížení přímo na motocyklu.

### 9.1 Příprava testování

Před samotným testováním nově vyrobených čelistí bylo na tyto čelisti naneseno brzdové obložení. Toto obložení bylo naneseno firmou Renopart s.r.o. v Kunovicích. Nanesený materiál brzdového obložení je Beral 1126.



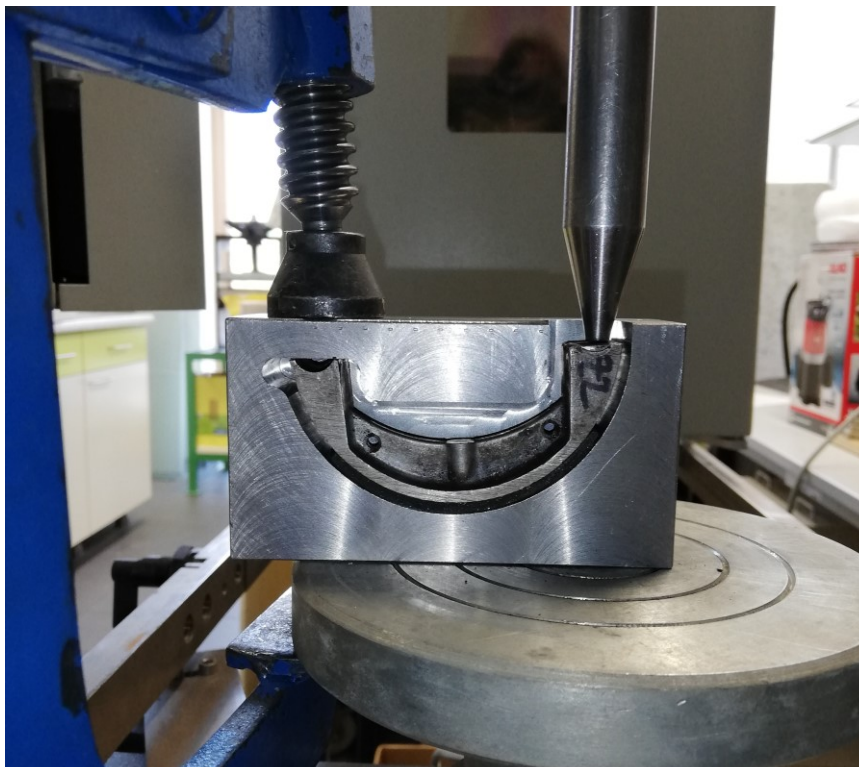
*Obr. 68. Vyrobené čelisti s brzdovým obložením*

Vzorky je nyní možno díky brzdovému obložení využít a otestovat přímo v bubnové brzdě za běžného provozu motocyklu.

### 9.2 Testování zatížení

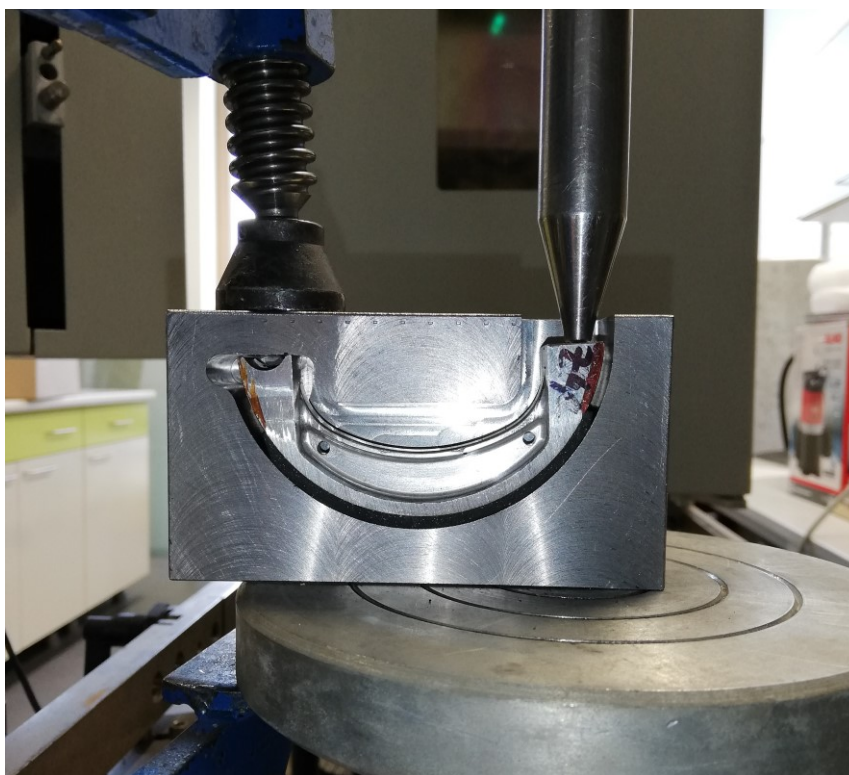
Již při návrhu čelistí bylo simulováno zatížení čelistí, nyní se bude testovat zatížení na vyrobeném testovacím přípravku v laboratoři.

Testovací přípravek byl ukotven na desku trhačího stroje. Do testovacího přípravku byla vložena původní čelist. Tato čelist byla zatížena silou, tato síla postupně vzrostla až na hodnotu 3000 N a na této hodnotě vydržela 10 sekund a síla se postupně snížila na hodnotu 100 N.



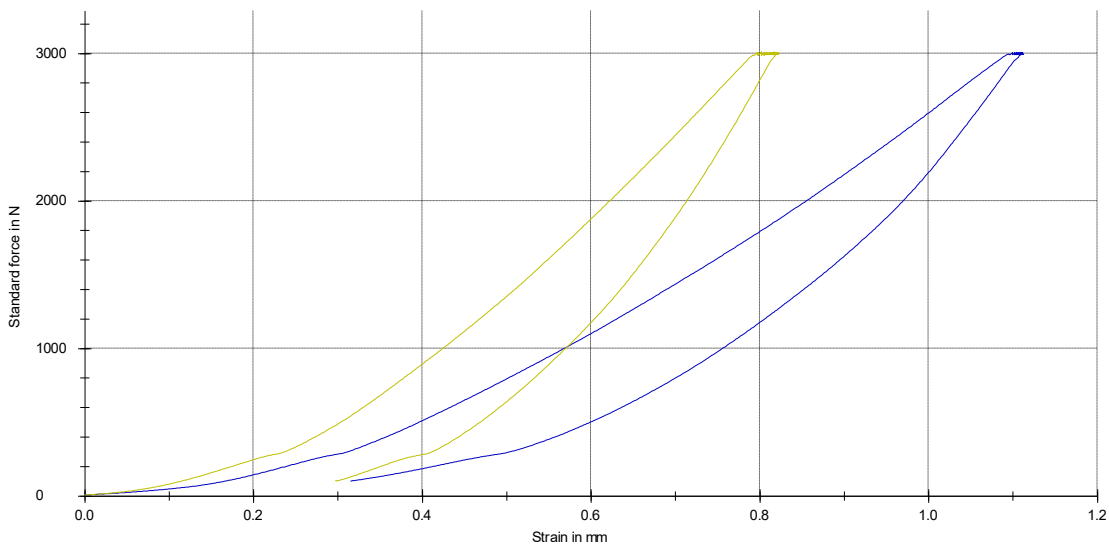
*Obr. 69. Testování původní čelisti*

Po otestování všech vzorků původní čelisti se přešlo na testování nově vyrobených čelistí. Postup při testování nově vyrobených čelistí byl stejný jako u původních čelistí.



*Obr. 70. Testování nově vyrobené čelisti*

Při tomto testování bylo zjišťováno, zda čelisti vydrží toto zatížení. Pokud tomu tak je, tak jaký je rozdíl v deformacích u různých čelistí. To je vidět na Obr. 71. Na grafu jsou vidět průměrné hodnoty původní čelisti (modrá) a nově vyrobené čelisti (žlutá). Při stejném zatížení 3000 N zde vznikají různé deformace čelistí. U původní čelisti je tomu přibližně 1,1 mm a u nově vyrobených čelistí přibližně 0,8 mm.



Obr. 71. Graf testování závislosti zatížení na deformaci

### 9.3 Testování ve skutečných podmínkách

Toto testování probíhalo přímo na motocyklu. Na motocyklu byly původní brzdové čelisti, které byly dostatečně zajety. Na těchto čelistech bylo naježděno více než 500 kilometrů. Na dráze se motocykl rozjel na rychlost 40 km/h na vyznačeném místě začal motocykl brzdit. Naměřená brzdná dráha byla 11.2 metrů. Po tomto testu byly čelisti vyjmuty a společně se zástavbou byly modelovány pro účely práce.

Poté co byly vyrobeny nové čelisti, nasadily se na motocykl a zkontrolovaly. Po kontrole bylo na motocyklu spuštěno zajetí nových čelistí. Na těchto čelistech bylo naježděno přibližně 50 kilometrů. Po zajetí se znovu uskutečnilo testování brzdné dráhy, tentokrát s novými čelistmi. Test probíhal stejně jako u původních čelistí. Naměřená brzdná dráha byla 9.7 metrů. Dá se předpokládat, že při delším zajetí čelistí se bude tato dráha ještě snižovat.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zlepšit tuhost čelisti bubnové brzdy. V teoretické části práce jsou rozebírány základní terminologie metody konečných prvků, brzdových systémů u motocyklů. Dále je zde zkoumána materiálová podstata brzd a jejich součástí. Následně jsou zde vysvětleny výrobní systémy, které jsou používány při výrobě dílců.

V praktické části je rozebrán postup vývoje nové brzdové čelisti. Čelist i s vnitřní zástavbou bylo nutné vymodelovat. K modelování i k navazujícím úkonům byl použit software NX 12 od společnosti Siemens. Z materiálového rozboru bylo zjištěno, že je čelist vyrobena ze slitiny hliníkového materiálu EN AW 6082. Pomocí experimentu bylo zjištěno, že u vačky bubnové brzdy vzniká kroutící moment o velikosti 28 Nm.

Ze simulace původní čelisti bylo zjištěno, že při zatížení zde vzniká deformace o velikosti 4.736 mm a největší napětí v čelisti má hodnotu 1 264.76 MPa. Z nově navržených čelistí nejlépe dopadl návrh 3, u něj byla naměřena největší deformace o velikosti 3.619 mm a největší napětí o velikosti 820.10 MPa. Ze simulace je patrné, že deformace je u nově navržené čelisti o 23 % nižší a napětí je zde o 35 % nižší.

Pro výrobu nové čelisti byl vytvořen výrobní program. V simulaci výrobního programu byly nastaveny veškeré parametry skutečné. Na výrobu nové čelisti byl použit materiál EN AW 7075, který má lepší vlastnosti než původní. Po výrobě nových čelistí bylo na čelisti nanášeno brzdové obložení.

Na testování čelistí v laboratoři byl navrhnout testovací přípravek. Testovací přípravek byl vyroben z konstrukční oceli E 335. Na frézce vytvořen výrobní program, ze kterého byl následně testovací přípravek vyroben.

Při testování v laboratoři bylo zjištěno, že čelisti mají průměrnou deformaci přibližně 1.1 mm. Při stejném zatížení nově vyrobených čelistí byla deformace 0.8 mm. Z toho vyplývá, že nově vyrobené vzorky mají o 27 % menší deformaci. Tato hodnota je o 4 % nižší než při simulaci.

Při testování ve skutečných podmínkách bylo měřeno, jak se liší brzdná dráha za stejných podmínek u původních čelistí a u nově vyrobených čelistí. U původních čelistí byla brzdná dráha 11.2 m. U nově vyrobených čelistí byla brzdná dráha 9.7 m. Z toho vyplývá, že nově vyrobené čelisti mají o 13 % lepší brzdnu účinnost než původní čelisti.

Všechna testování prokázala, že nově vyrobené čelisti jsou lepší.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ALAWADHI, Esam M. *Finite element simulations using ANSYS*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016], xiii, 421. ISBN 978-1-4822-6197-4.
- [2] BOWER, Allan F. *Applied mechanics of solids*. Boca Raton: CRC Press, 2010, xxv, 794 s. ISBN 978-1-4398-0247-2.
- [3] MADENCI, Erdogan; Ibrahim GUVEN. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*. Second edition. New York: Springer, [2015], xiv, 657. ISBN 978-1-4899-7549-2. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1508/2014955722-t.html>
- [4] SARACOGLU, B. O.; GOZLU, S. *Identification of Technology Performance Criteria for CAD/CAM/CAE/CIM/CAL in Shipbuilding Industry*. 2006 Technology Management for the Global Future - PICMET 2006 Conference, Istanbul, 2006, pp. 1635-1646. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4077559>
- [5] VLK, František. *Teorie a konstrukce motocyklů*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.
- [6] *Technika motocyklů – 3 část – Brzdy* [online]. [cit. 2018-11-10] Dostupné také z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/technika-motocyklu-3.-cast-brzdy-3259.html>
- [7] BROŽ, Jiří; TRNAK, Luboš. *Praktická dílna – Brzdové systémy 2* [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné také z: <http://www.znalec.tym.cz/brzdy%202.pdf>
- [8] BESIP, Ministerstvo dopravy ČR. *Asistenční systémy na motocyklech*. [online]. [cit. 2018-11-16]. Dostupné také z: <https://www.ibesip.cz/Besip/media/Besip/data/web/soubory/motocyklista/besip-systemy-nr.pdf>
- [9] Ministerstvo dopravy ČR. *Vyhláška č. 206/2018 Sb.* [online]. [cit. 2018-11-16]. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-206>
- [10] *Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 78 – Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel kategorií L1, L2, L3, L4*

- a L5 z hlediska brzdění* [online]. [cit 2018-11-23]. Dostupné také z:  
<https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=42015X0130%2801%29>
- [11] *Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN) č. 90 – Jednotná ustanovení pro schvalování typu náhradních částí s brzdovým obložením, obložení bubnových brzd a kotoučů a bubnů pro motorová vozidla a jejich přípojná vozidla* [online]. [cit 2018-11-23]. Dostupné také z:  
[https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=42012X0713\(02\)](https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=42012X0713(02))
- [12] ANDERL, Reiner; Peter BINDE. *Simulation with NX: kinematics, FEA, CFD, EM and data management : with numerous examples of NX 9*. Munich: Hanser, c2014, vii, 386 s. ISBN 978-1-56990-479-4.
- [13] PODRÁBSKÝ, Tomáš; POSPÍŠILOVÁ, Simona. *Struktura a vlastnosti grafických litin* [online]. [cit. 2018-12-08] Dostupné také z:  
<https://archive.is/zpIVJ>
- [14] LIMPert, Rudolf. *Brake design and safety*. 3rd ed. Warrendale, Pa. (400 Commonwealth Dr., Wallendale PA USA): Society of Automotive Engineers, 2011, 1 online zdroj (1 online zdroj (xv, 415 pages)). Society of Automotive Engineers. Electronic publications. DOI: 9781680154498. Dostupné také z:  
[http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBDSE0003/brake\\_design\\_and\\_safety\\_3rd\\_edition](http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBDSE0003/brake_design_and_safety_3rd_edition)
- [15] *Brzdové součástky* [online]. [cit. 2018-12-08] Dostupné také z:  
<https://www.skoda-dily.cz/online-obchod.html>
- [16] *Materiály brzdových čelistí* [online]. [cit. 2018-12-15] Dostupné také z:  
<https://www.quora.com/Which-is-the-best-material-for-a-brake-caliper>
- [17] *Hliníkové materiály* [online]. [cit. 2018-12-15] Dostupné také z:  
<https://gleich.de/cz/produkty/>
- [18] *Brzdová kapalina* [online]. [cit. 2018-12-15] Dostupné také z:  
<http://www.autolexicon.net/cs/articles/brzdova-kapalina/>
- [19] *Brzdové kapaliny – důležitý prvek bezpečnosti* [online]. [cit. 2018-12-15] Dostupné také z:  
<http://www.petrol.cz/aktuality/brzdove-kapaliny-dulezity-prvek-bezpecnosti-3392.aspx>

- [20] SADÍLEK, Marek. *CAM systémy v obrábění I. 2.*, dopl. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, 138 s. ISBN 978-80-248-2278-5.
- [21] KOŽMÍN, P. *Kdy nasadit NC technologie a CAM řešení*. Příspěvek na semináři pořádaný na KTO s firmou Expert&Partner. Plzeň, ZČU únor 2001.
- [22] PETERKA J.;KURIC,I.*CAD/CAM systémy – významný prvok integrovanej výroby*. Časopis Infoware, č.8/98, Bratislava, 1998, s.24-27
- [23] Frézka DMG MORI – DMU 50 [online]. [cit. 2018-05-01] Dostupné také z: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1440>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

FEM [-]	Metoda konečných prvků
FEA [-]	Konečně prvková analýza
CAE [-]	Počítačem podporované konstruování
CAM [-]	Počítačová podpora obrábění
CAD [-]	Počítačem podporované navrhování
NC [-]	Číslicově řízený obráběcí stroj
CNC [-]	Řízení obráběcího stroje počítačem
DXF [-]	Textový formát výkresových souborů
IGES [-]	Výměnný souborový formát pro CAD data
STEP [-]	Výměnný souborový formát pro CAD data
ABS [-]	Protiblokovací systém brzd
MSC [-]	Systém motocyklové stability
CBS [-]	Systém rozdělující brzdny účinek
EHK [-]	Evropská hospodářská komise
ČSN [-]	Česká technická norma
ISO [-]	Mezinárodní norma
DOT [-]	Norma brzdové kapaliny
AW [-]	Označení slitiny hliníku
EN [-]	Evropská technická norma
FMVSS [-]	Federální bezpečnostní normy pro motorová vozidla
CFR [-]	Kodex federálních předpisů
HB [-]	Tvrдость podle Brinella
F[N]	Síla
F <sub>1</sub> [N]	Síla



---

$M$ [N·m]	Kroučící moment
$a$ [m]	Strana trojúhelníku
$R_m$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$ [MPa]	Mez kluzu

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Dispoziční vektor charakterizující deformaci pevné látky [2]</i> .....	14
<i>Obr. 2. Uzly a elementy v síti konečných prvků [2]</i> .....	17
<i>Obr. 3. Společné prvky 2D a 3D [2]</i> .....	19
<i>Obr. 4. Jednočinná hydraulická bubnová brzda SIMPLEX [7]</i> .....	22
<i>Obr. 5. Jednočinná bubnová brzda SIMPEX [6]</i> .....	23
<i>Obr. 6. Dvočinná bubnová brzda DUPLEX [7]</i> .....	23
<i>Obr. 7. Hydraulické ovládání motocyklových brzd [5]</i> .....	25
<i>Obr. 8. Kotoučová brzda [7]</i> .....	25
<i>Obr. 9. Brzdový buben [15]</i> .....	29
<i>Obr. 10. Brzdové čelisti z ocelového plechu [15]</i> .....	31
<i>Obr. 11. Brzdové čelisti ze slitiny lehkých kovů [15]</i> .....	31
<i>Obr. 12. Princip přenosu brzdné síly [18]</i> .....	34
<i>Obr. 13. Model vnitřní zástavby bubnové brzdy po vyjmutí z bubnu</i> .....	44
<i>Obr. 14. Detailní model vnitřní zástavby bubnové brzdy</i> .....	45
<i>Obr. 15. Detailní model vnitřní zástavby bubnu</i> .....	45
<i>Obr. 16. Původní čelist</i> .....	46
<i>Obr. 17. Model původní čelisti</i> .....	46
<i>Obr. 18. Schéma výpočtu síly působící na čelist</i> .....	47
<i>Obr. 19. Nastavení sítě čelisti</i> .....	48
<i>Obr. 20. Uložení čelisti</i> .....	49
<i>Obr. 21. Zatížení čelisti pootočením vačky</i> .....	49
<i>Obr. 22. Zatížení čelisti od bubnu brzdy</i> .....	50
<i>Obr. 23. Deformace původní čelisti</i> .....	50
<i>Obr. 24. Největší napětí u původní čelisti – pohled 1</i> .....	51
<i>Obr. 25. Největší napětí u původní čelisti – pohled 2</i> .....	51
<i>Obr. 26. Zachované křivky nově navrhovaných čelistí</i> .....	52
<i>Obr. 27. Čelist návrh 1</i> .....	52
<i>Obr. 28. Deformace čelisti návrhu 1</i> .....	53
<i>Obr. 29. Největší napětí čelisti návrhu 1</i> .....	53
<i>Obr. 30. Čelist návrh 2</i> .....	54
<i>Obr. 31. Deformace čelisti návrhu 2</i> .....	54
<i>Obr. 32. Největší napětí čelisti návrhu 2</i> .....	55

<i>Obr. 33. Čelist návrh 3</i> .....	55
<i>Obr. 34. Deformace čelisti návrhu 3</i> .....	56
<i>Obr. 35. Největší napětí čelisti návrhu 3</i> .....	57
<i>Obr. 36. Čelist návrh 4</i> .....	57
<i>Obr. 37. Deformace čelisti návrhu 4</i> .....	58
<i>Obr. 38. Největší napětí čelisti návrhu 4</i> .....	59
<i>Obr. 39. Porovnání tvaru původní čelisti (zelená) a návrhu 3 (červená)</i> .....	59
<i>Obr. 40. Polotovár s upravenou čelistí</i> .....	60
<i>Obr. 41. Svěrák s polotovarem</i> .....	61
<i>Obr. 42. Příklad modelování nástroje a držáku nástroje</i> .....	61
<i>Obr. 43. První část programu</i> .....	62
<i>Obr. 44. Verifikace první části programu</i> .....	63
<i>Obr. 45. Druhá část programu</i> .....	63
<i>Obr. 46. Verifikace druhé části programu</i> .....	64
<i>Obr. 47. Třetí část programu</i> .....	65
<i>Obr. 48. Verifikace třetí části programu</i> .....	66
<i>Obr. 49. Čtvrtá část programu</i> .....	66
<i>Obr. 50. Verifikace čtvrté části programu</i> .....	67
<i>Obr. 51. Shrnutí programu</i> .....	68
<i>Obr. 52. Odřezání polotovaru</i> .....	69
<i>Obr. 53. Nástroje na výrobu čelisti</i> .....	69
<i>Obr. 54. Frézka DMG MORI - DMU 50 [23]</i> .....	71
<i>Obr. 55. Polotovár po první části programu</i> .....	72
<i>Obr. 56. Polotovár po druhé části programu</i> .....	73
<i>Obr. 57. Polotovár po třetí části programu</i> .....	73
<i>Obr. 58. Čelist po čtvrté části programu vyjmutá ze svěráku</i> .....	74
<i>Obr. 59. Čelist po odstranění držáku a zabroušení</i> .....	74
<i>Obr. 60. Testovací přípravek</i> .....	75
<i>Obr. 61. Vytvoření polotovaru testovacího přípravku</i> .....	76
<i>Obr. 62. Kontura hrubování polotovaru testovacího přípravku</i> .....	77
<i>Obr. 63. Nastavení hrubování polotovaru testovacího přípravku</i> .....	77
<i>Obr. 64. Dráha pro frézování na čisto testovacího přípravku</i> .....	78
<i>Obr. 65. Nastavení frézování na čisto testovacího přípravku</i> .....	79

---

<i>Obr. 66. Simulace výroby testovacího přípravku .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 67. Vyrobený testovací přípravek .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 68. Vyrobené čelisti s brzdovým obložením.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 69. Testování původní čelisti .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 70. Testování nově vyrobené čelisti.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 71. Graf testování závislosti zatížení na deformaci.....</i>	<i>83</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1. Nástroje použité na výrobu čelisti .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 2. Řezné podmínky nástrojů .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 3. Parametry nástroje .....</i>	<i>78</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1: Technický list EN AW 7075

Příloha P2: Výkresová dokumentace nově vyráběné čelisti

Příloha P3: Výkresová dokumentace testovacího přípravku

# PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST EN AW 7075



Válcované desky EN AW

EN AW 7075

TECHNICKÝ LIST

## EN AW 7075

Znaky slitiny	
Slitina	EN AW 7075 [AlZn5,5MgCu]
Typ slitiny	vytvrditelná
Povrch	T6 / T651 / T7351
Stav materiálu	válcovaný povrh

Mechanické vlastnosti <sup>1)</sup>		typické hodnoty
Mez kluzu R <sub>0,2</sub>	[MPa]	240 - 460
Pevnost v tahu R <sub>m</sub>	[MPa]	360 - 540
Tažnost A <sub>50</sub>	[%]	2 - 8
Tvrdość HBW	[2,5/62,5]	104 - 160

Fyzikální vlastnosti <sup>1)</sup>		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,80
Modul pružnosti	[GPa]	71
Elektrická vodivost	[m/Ω · mm <sup>2</sup> ]	19 - 23
Koeficient tepelné roztažnosti	[K <sup>-1</sup> · 10 <sup>-6</sup> ]	23,4
Tepelná vodivost	[W/m · K]	130 - 160
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	862

Technologické vlastnosti <sup>2)</sup>		typické hodnoty
Tvarová stálost/Vnitřní pnutí		5 - 6
Obrobitelnost		1
Vhodnost k erozivnímu obrábění		1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB)		6 / 6 / 6 / 2 / 5
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětrí / SPRK)		5 / 5 / 3
Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) <sup>3)</sup>		90 / 120
Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé-) <sup>4)</sup>		4/ 6/ 2
Leštitelnost		1
Vhodnost k leptání struktur		1
Kontakt s potravinami (podle EN 602)		ne

Tolerance			
Při tloušťce [mm]	Rovinnost [mm] <sup>5)</sup>	Tloušťka [mm]	Délka & šířka [mm]
10 - 200	EN 485-3	EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte ≤ 150			DIN ISO 2768-1m
Zuschnitte > 150			-0 / +5 mm

Dodávané formáty		
Formáty [mm]	1.520 × 3.020	u tloušťek od 10 - 200 mm
Tloušťky na skladě	10 ; 12 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 45 ; 50	
	55 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90 ; 100 ; 120 ; 130 ; 140 ; 150 ; 160 ; 180 ; 200	

Další tloušťky podle poptávky!

Datum: 12.07.2016

- 1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.
- 2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný).
- 3) Bez ztráty pevnosti po ochlazení.
- 4) Vylučné technická anodizace. Neposkytujeme žádnou záruku na barevný vzhled/řešení.
- 5) Tolerance rovinnosti se měří vylučně na měřicích stolech a s použitím ocelového pravítka.