

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh a výroba vahadla odpružení

Design and manufacture of the suspension rocker arm

TOMÁŠ ZAVADIL

2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zavadil** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **509514**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a výroba vahadla odpružení

Název bakalářské práce anglicky:

Design and manufacture of the suspension rocker arm

Pokyny pro vypracování:

Rešerše řešení a stanovení pracovních podmínek.
Konstrukční návrh.
Pevnostní kontrola.
Výrobní postup.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michal Slaný ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Michal Slaný
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v poslední kapitole této práce.

V Praze dne:.....

.....

Podpis

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a výrobou sestavy vahadel systému zadního odděleného odpružení pro studentskou formuli. Část práce je zaměřená na volbu materiálů a výrobních technologií pro všechny díly sestavy, a část na mechanický návrh jak samotných vahadel, tak i jejich držáků, vložek a uložení. Je zde detailně popsán kompletní proces návrhu od vstupních sil a kinematiky až po finální díly. Součástí práce je taktéž vypracovaný výrobní postup pro jednotlivé díly celé sestavy. Výrobní postup je upraven, tak aby byla výroba možná v laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Práce může být použita jako podklad pro návrh a výrobu dílů odpružení nové studentské formule.

Klíčová slova

Formula student, Výrobní postup, CNC obrábění, Vahadlo odpružení

Abstract

The thesis deals with the design and manufacture of a rear decoupled suspension system for a formula student car. Part of the work focuses on the choice of materials and manufacturing technologies for all parts of the assembly, and part on the mechanical design of the rockers themselves, as well as their brackets, inserts and mounting. The complete design process from input forces and kinematics to the final parts is described in detail. The work also includes a manufacturing procedure for the individual parts of the whole assembly. The manufacturing process is adapted to enable production in the laboratories of the Department of machining, process planning and metrology. The work can be used as a basis for the design and production of suspension parts of the new formula student car.

Key words

Formula student, Manufacturing process, CNC machining, Suspension rocker arm

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Michalovi Slanému za vedení práce, cenné rady a připomínky při jejím zhotovení. Dále týmu eForce a všem jeho členům kteří mi poskytli veškeré podklady a materiál pro realizaci této práce. V neposlední řadě také děkuji přítelkyni a celé rodině za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

Obsah

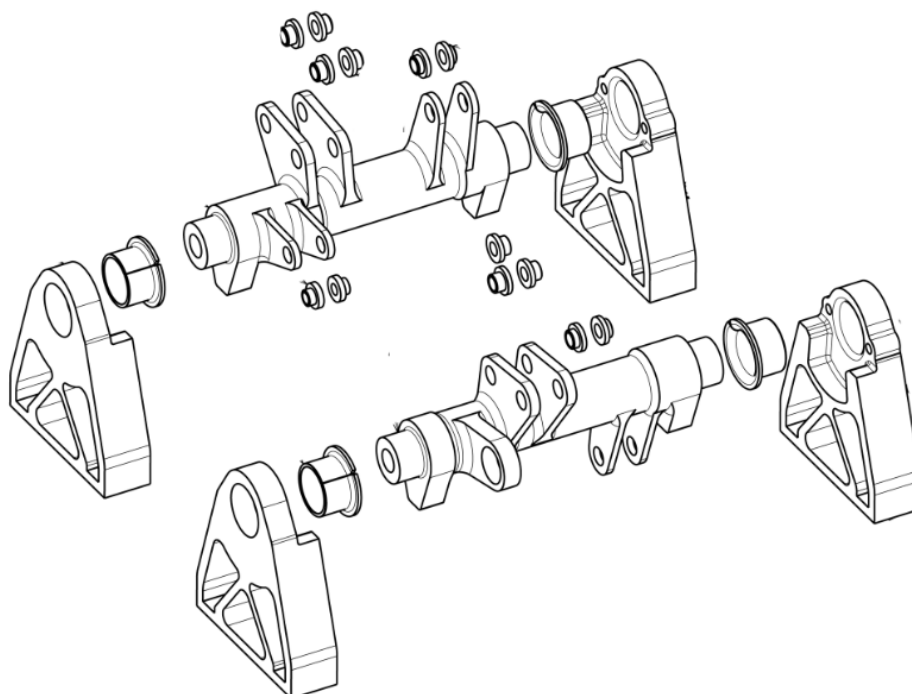
1.	Úvod.....	2
1. 1.	Formula student	3
1. 2.	Formule na ČVUT	4
1. 3.	Systém odděleného odpružení	5
1. 4.	Pravidla Formula student	6
2.	Technologie výroby a materiály.....	7
2. 1.	Obrábění	7
2. 2.	Odlévání.....	9
2. 3.	Spékání kovového prášku	12
3.	Vstupní požadavky návrhu vahadel	13
3. 1.	Kinematika systému a zátěžné síly	13
3. 2.	Výpočtové zátěžné stavy	14
4.	Mechanický návrh.....	16
4. 1.	Uložení vahadla v držácích.....	16
4. 2.	Držáky.....	17
4. 3.	Vahadlo.....	20
4. 4.	Vložky.....	24
4. 5.	Kontrola sestavy	25
5.	Návrh výrobního postupu.....	26
5. 1.	Testovací vahadlo	26
5. 2.	Levé vahadlo.....	28
5. 3.	Pravé vahadlo.....	36
5. 4.	Držáky.....	37
5. 5.	Vložky.....	44
5. 6.	Použité nástroje.....	45
5. 7.	Použité stroje	53
6.	Výrobní proces a dokumentace	57
6. 1.	Řezání polotovarů.....	57
6. 2.	Výroba vložek.....	57
6. 3.	Výroba držáků.....	58
6. 4.	Výroba vahadel	60
7.	Závěr	64
8.	Bibliografie	65
	Seznam obrázků	67
	Seznam tabulek	69
	Seznam tištěných příloh	69
	Seznam příloh na přiloženém CD	69

1. Úvod

Cílem této práce je konstrukční návrh a výroba vahadel systému zadního odděleného odpružení a jejich držáků. Systém je umístěn na voze studentské formule CTU 24. Tato vahadla přenášejí síly z tlačné tyče, vedoucí od těhlice, na soustavu pružin a tlumičů systému odděleného odpružení. Vahadla musí být rotačně uložena v držácích, které slouží k připevnění samotných vahadel k šasi vozu.



Obrázek 1.1 - umístění zadních vahadel na voze CTU.24



Obrázek 1.2 - Navrhované díly

1. 1. Formula student

Formula SAE je konstrukční soutěž pro studenty inženýrských škol. Soutěž vznikla v USA v roce 1981. Od roku 1998 existuje její evropská odnož Formula student. Obě soutěže mají stejný cíl a prakticky stejná pravidla. V současné době se soutěže Formula student účastní více než 500 univerzitních týmů z celého světa. Soutěž má 4 dynamické a 3 statické disciplíny, které prověří tým nejen po stránce jízdní dynamiky, ale i návrhu vozu. [1]

První statickou disciplínou je konstrukční návrh, kde komisaři hodnotí vůz z hlediska použitých konstrukčních řešení a pokročilosti návrhu. Každé řešení je třeba doložit výpočty a simulacemi. Druhou statickou disciplínou je analýza nákladů, ve které se hodnotí cena vozu a správná kalkulace jeho výrobní ceny v případné reálné sériové výrobě. Poslední statickou disciplínou je marketingový plán, kde je potřeba před zástupci fiktivní firmy obhájit plán na sériovou výrobu našeho prototypového vozu. [1]

Dynamické disciplíny se skládají z akcelerace vozu na trati dlouhé 75 m s pevným startem, z jízdy na trati ve tvaru osmičky, kde se hodnotí čas průjezdu, pro zhodnocení kvalit podvozku. Dále z autokrosu, který zahrnuje jízdu na úzké technické trati, hodnotí se zde zrychlení, brždění a ovladatelnost vozu. Autokros je zároveň kvalifikací do vytrvalostního závodu, který je poslední a hlavní disciplínou soutěže. Vytrvalostní závod ověřuje všechny systémy vozu na okružové trati o délce 22 km s povinnou výměnou jezdců v polovině ujeté vzdálenosti. Během vytrvalostního závodu se také hodnotí spotřeba paliva. [1]

1. 2. Formule na ČVUT

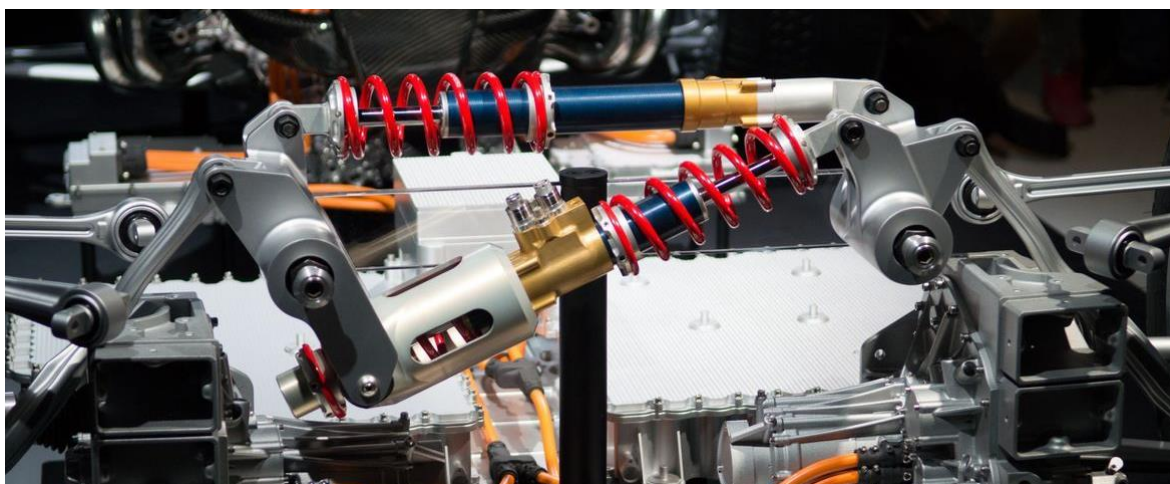
První tým byl založen na fakultě storní ČVUT již v roce 2007 pod názvem CTU CarTech. Tento tým se od svého založení věnoval vývoji a stavbě studentských formulí se spalovacím motorem. O dva roky později vznikl první monopost FS.01. V roce 2010 vznikla na fakultě elektrotechnické ČVUT odnož týmu jenž se později přeměňovala na eForce FEE Prague Formula vyvíjející formule elektrické, od roku 2020 i autonomní. CarTech také nezůstal v inovacích pozadu a v roce 2022 představil první hybridní monopost v soutěži Formula student. I přes velké úspěchy s hybridním vozem byl v roce 2023 vývoj ukončen a došlo ke spojení obou týmů s názvem eForce Prague Formula vyvíjející elektrickou autonomní formuli. Celkově k dnešnímu dni vzniklo na půdě ČVUT 27 unikátních pilotovaných monopostů. Tři z nich byly následně přestavěny na vozy s autonomním řízením. [1][2]



Obrázek 1.3 -Formule FS.15 a FSE.12 ze sezóny 2023 [3]

1. 3. Systém odděleného odpružení

Systém odděleného odpružení ve vozidlech je specifickým typem odpružení, který se zaměřuje na nezávislý pohyb kol ve dvou hlavních rovinách, náklon vozidla při zatáčení a vertikální pohyb kol při přejezdu nerovnosti. Systém odděleného odpružení se snaží minimalizovat přenos pohybu z jedné roviny na druhou, což může vést k lepší stabilitě vozidla v zatáčkách a zároveň k pohodlnější jízdě při přejezdu nerovnosti. Tento typ odpružení je často součástí pokročilých systémů podvozku ve výkonných automobilech a může být implementován různými způsoby v závislosti na konkrétním designu a technologii vozidla.[4]



Obrázek 1.4 - Systém odděleného odpružení vozu Mercedes AMG project one [5]

Běžným řešením stabilizátoru bývá využití tlačné pružiny s tlumičem v kleci, která zajišťuje stlačení pružiny v obou směrech zatěžování. Druhou variantou je využití listové pružiny s tlumičem paralelně jakožto stabilizátoru. Tento systém v sobě i přes svou komplexnost skrývá jednu velikou výhodu. Po doplnění servomotorem otáčejícím s listovou pružinou lze nastavovat tuhost pružiny změnou kvadratického modulu průřezu. Díky tomu si může řidič za jízdy nastavit optimální jízdni vlastnosti pro konkrétní traťový úsek.

1. 4. Pravidla Formula student

Celá sestava musí být konstruována dle pravidel soutěže Formula student pro rok 2024. Podstatná pravidla pro návrh vahadel vybraných z pravidel soutěže: [6]

T2.1.1 Vozidlo musí být navrženo a vyrobeno v souladu se správnou inženýrskou praxí.

T2.5.2 Všechny montážní body zavěšení náprav musí být při technické prohlídce viditelné, a to buď přímým pohledem, nebo po sejmutí případných krytů.

T10.1.1 Kritické spojovací prvky jsou definovány jako šrouby, matice a další spojovací prvky použité v základní konstrukci, v systémech řízení, brzd, postroje řidiče, zavěšení a ty, které jsou v příslušném předpisu výslovně označeny jako kritické spojovací prvky.

T10.1.2 Všechny kritické spojovací prvky se závitem musí být nejméně o průměru závitu 4 mm metrické třídy 8.8 (díly OEM 3 mm metrické třídy 8.8), případně ekvivalentní velikosti nebo velikosti uvedené v odkazujícím pravidle podle toho, která je větší.

T10.1.3 Všechny kritické závitové spojovací prvky musí být typ šroubů se šestihlannou hlavou (ISO 4017, ISO 4014 nebo rovnocenná norma.), nebo typ šroubů s válcovou hlavou (ISO 4762, DIN 7984, ISO 7379 nebo rovnocenná norma.), včetně jejich provedení s jemným závitem.

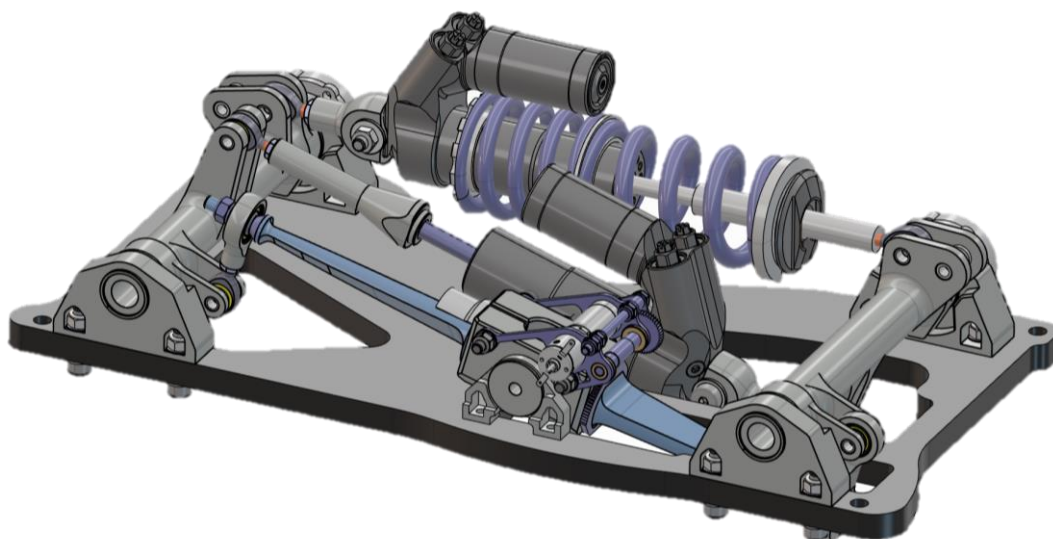
T10.1.5 U systémů řízení a zavěšení jsou povoleny alternativní upevňovací prvky, pokud lze prokázat rovnocennost s T10.1.2 a T10.1.3.

2. Technologie výroby a materiály

Před samotným návrhem dílů jsem musel nejprve určit materiál a technologii výroby. Důvodem je, že každá výrobní technologie vyžaduje odlišný přístup k návrhu dílu.

2.1. Obrábění

Obrábění je nejrozšířenější metodou výroby kusových dílů. Při návrhu dílů pro obrábění je nutné si specifikovat jakou obráběcí technologii budu využívat. Avšak pro všechny obráběcí metody je stejné, že se díl musí jednoduše a pevně upnout do obráběcího stroje. Dalším požadavkem je, aby se nástroj dokázal dostat na všechny obráběné plochy. Velkou výhodou obrobků je velká variabilita materiálů o známých mechanických vlastnostech, které bývají mnohdy lepší než u odlitků nebo 3d tisku. Obráběné díly systému odděleného odpružení využíval tým CTU CarTech na voze FS.15, kde se osvědčily.



Obrázek 2.1 - 3D model obráběných vahadel FS.15 na platformě

U obráběných dílů jsem zvažoval mezi hliníkovou slitinou, ocelí a titanovou slitinou. Konkrétně jsem uvažoval o hliníkové slitině EN AW 7075 (AlZn5,5MgCu) ve stavu T651, protože se jedná o hliníkovou slitinu s výbornými mechanickými vlastnostmi a tým eForce ji má ve skladu. Dále jsem přemýšlel o oceli 42CrMo4, která je konstrukční ocelí vhodnou pro vysoce namáhané díly a také je dostupná ve skladu týmu eForce. Poslední alternativou, nad kterou jsem uvažoval, je titanová slitina Ti-6Al-4V (grade 5), která vyniká vysokou pevností při relativně nízké hmotnosti.

Tabulka 2.1 - porovnání vlastností obráběných materiálů [7][8][9][10]

Název	EN AW 7075 T6	42CrMo4	Ti-6Al-4V (grade5)
Mez pevnosti v tahu	525 MPa	1100 MPa	895 MPa
Smluvní mez kluzu	450 MPa	900 MPa	828 MPa
Modul pružnosti	71 GPa	200 GPa	116 GPa
Tvrdość	163 HBS	45 HRC	36 HRC
Hustota	2700 Kg/m ³	7850 Kg/m ³	4540 Kg/m ³
Měrná pevnost	0,17 Nm/kg	0,11 Nm/kg	0,18 Nm/kg

Z tabulky je patrné, že pro splnění požadavku co nejnižší hmotnosti systému není výhodné použít ocel pro žádný z velkých dílů sestavy. Měrná pevnost je jak u titanové, tak u hliníkové slitiny téměř totožná. Pro velké obráběné díly jsem se proto rozhodl využít materiálu EN AW 7075 T651. Pro malé díly, kde by hliník nevyhovoval jsem se rozhodl využít materiálu 42CrMo4. Titan jsem se rozhodl nevyužívat z důvodu jeho vysoké ceny.

2. 2. Odlévání

Technologie přesného lití umožňuje vyrábět tvarově složitější díly a zároveň využít i složité obrobitelné materiály. Výhodou přesného lití je odlévání složitých kontur s vysokou kvalitou povrchu. Vytavitelné voskové modely je možno vytisknout na speciální 3D tiskárně a tvarové rozmanitosti se tak nekladou meze. Následně je vosk obalen do keramické břechky a vytaven z formy ven. Do této formy je následně odlit samotný odlitek. Po odlití je forma otryskána a vyhotoví se tak samotný díl. [11]

Návrh odlitků a volbu materiálu jsem konzultoval s firmou Alucast s.r.o., která se zabývá kusovou výrobou přesných hliníkových a hořčíkových odlitků. Jedná se o jednu ze tří sléváren na světě, která je schopna přesného lití i hořčíkových slitin.[12]

Systém odděleného odpružení s využitím odlévaných prvků je v soutěži Formula student běžně zastoupen v obdobné míře jako systémy obráběné.

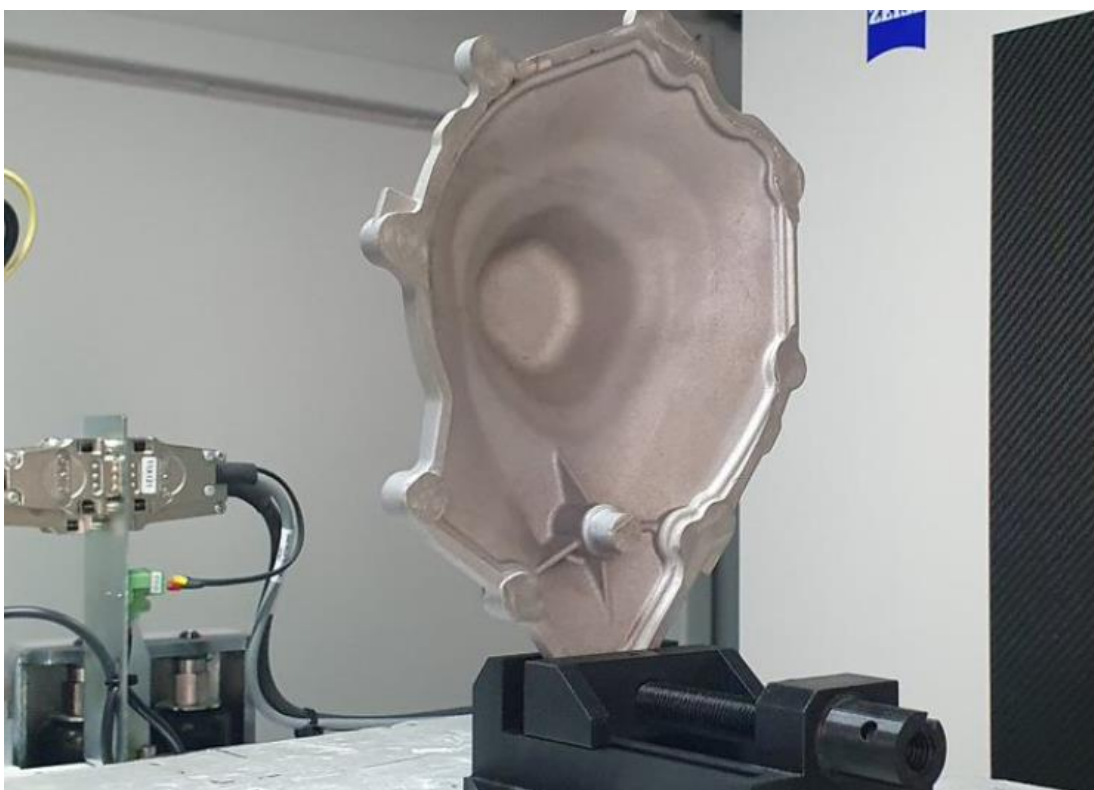


Obrázek 2.2 – Systém odděleného odpružení s odlívanými vahadly [13]

2.2.1. Kontrola a testování odlitků

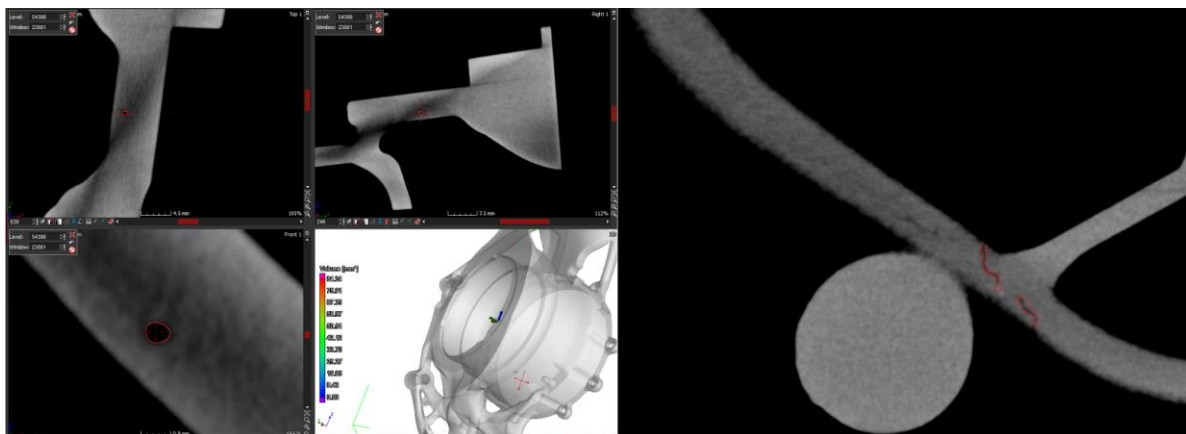
Jelikož odlévané díly znamenaly velký potenciál na ušetření hmotnosti, zabýval jsem se možnostmi, které odlévání nabízí. Od firmy Alucast s.r.o. jsem si vyžádal technické listy vyráběných slitin i s technologickými požadavky na návrh dílů.

Po přečtení několika článků zabývajících se odlitky jsem získal pochybnosti o vnitřní struktuře odlitků vytvořených gravitační metodou přesného lití. Vybral jsem proto dva díly ze série odlitků, které si v minulém roce tým CTU CarTech nechal vyrobit zmíněnou technologií. Zvolil jsem těhlici z materiálu AlSi7Mg0,6 a víčko alternátoru z materiálu Elektron 21. Na těchto dílech jsem následně pozoroval vnitřní vady pomocí výpočetní tomografie na zařízení Zeiss Metrotom 1500. Oba testované díly prošly výstupní kontrolou podle normy SAE AMS-STD-2175 – ASTM E 155 Kategorie B [14].



Obrázek 2.3 - Uchycení hořčikového odlitku v tomografu

Z levé části obrázku 2.4 je možné vidět, že v hliníkovém odlitku nastala pouze jedna bublina. Zbytek materiálu je při velikosti hrany voxelu 117 μm homogenní. Toto rozlišení bylo nutné zvolit z důvodu velké velikosti celého dílu. Hořčíkový odlitek je při stejném nastavení taktéž homogenní. Jedinou vadou hořčíkových odlitků je jejich náchylnost k prasklinám, jak je možno vidět na obrázku 2.4 vpravo.



Obrázek 2.4 - Výsledek skenování dílů

2.2.2. Odlévané materiály

Na základě nabídky firmy Alucast s.r.o. a vlastních testů jsem se začal rozmýšlet mezi testovanými materiály. Konkrétně mezi hliníkovou slitinou AlSi7Mg0,6 a materiálem elektron 21.

Tabulka 2.2 - Porovnání odlévaných materiálů [7] [15][16][17][12]

Název	Elektron 21	AlSi7Mg0,6
Mez pevnosti v tahu	283 MPa	375 MPa
Smluvní mez kluzu	153 MPa	211 MPa
Mez únavy	115 MPa	140 MPa
Hustota	1740 Kg/m ³	2700 Kg/m ³
Měrná pevnost	0,087 Nm/kg	0,078 Nm/kg
Měrná únavová životnost	0,066 Nm/kg	0,051 Nm/kg

Z důvodu vyšší měrné únavové životnosti jsem se rozhodl uvažovat pro odlévané díly materiál Elektron 21 a to i za cenu přísnějších bezpečnostních předpisů při práci s ním.

2. 3. Spékání kovového prášku

Další variantou výroby, kterou jsem zvažoval se při návrhu systému odděleného odpružení, bylo spékání kovového prášku technologií powder bed.

Jedná se o technologii aditivní výroby, kde se využívá vláknového laseru k tavení velmi jemných kovových prášků s cílem vytvořit funkční trojrozměrné díly. Proces je řízen digitálně, k výrobě jsou využita data z 3D CAD modelu virtuálně rozřezaného na velmi tenké 2D vrstvy. Jednotlivé řezy jsou pak postupně zhmotněny. Pro každý řez je na podkladovou desku nanesena rovnoměrná vrstva jemného práškového kovu, který je v kontuře 2D tvaru přesně roztaven laserem. Tento postup se opakuje vrstva po vrstvě, dokud není výrobek hotový. [18]

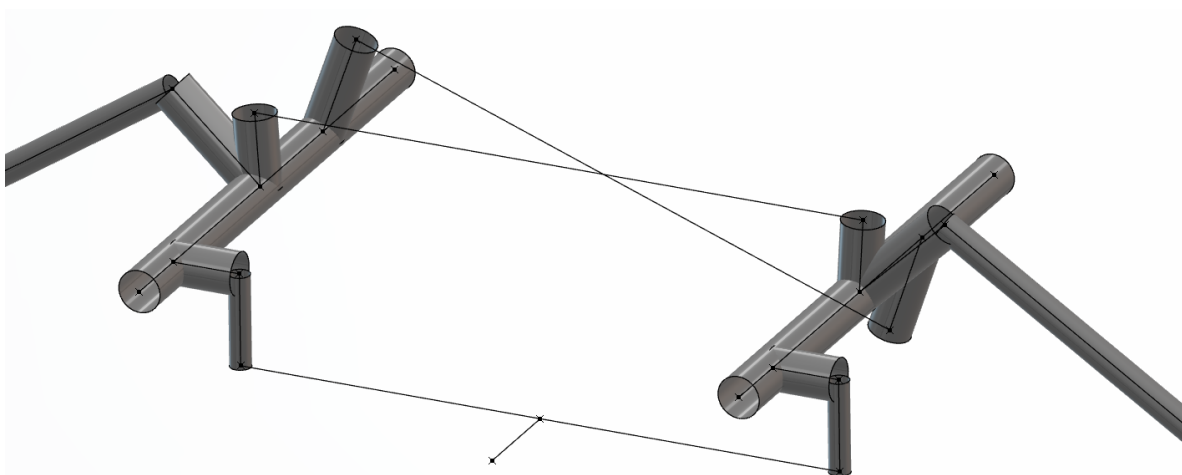
Při výrobě studentské formule je tento způsob výroby pro několik dílů výhodný, avšak pro systém odděleného odpružení nikoliv. Rozhodl jsem se výrobu spékáním kovového prášku nevyužít. Hlavním důvodem byla nekonzistentnost výsledků této technologie a velké šance na vnitřní vady. Kvůli těmto důvodům by bylo nutné nadměrně navyšovat bezpečnost a nebylo by to již hmotnostně výhodné řešení. Dalším důvodem pro zamítnutí této technologie byla velká časová a cenová náročnost samotné výroby.

3. Vstupní požadavky návrhu vahadel

Systém odděleného odpružení je využíván k přenášení sil od tlačné tyče na sestavu pružin a tlumičů. Bezpečnostním požadavkem jsou dorazy sloužící k tomu, aby při selhání jednoho z členů sestav nedošlo k překročení dovoleného rozsahu tlumičů a jejich následnému zničení.

3.1. Kinematika systému a zátěžné síly

Požadavkem tvaru je kinematika systému zadaná formou pohyblivého drátového modelu s vyznačenými mezními stavy. V těchto stavech jsem následně prováděl návrh a pevnostní výpočty dle zadaných sil. Dalším omezením tvaru vahadla byla limitace zástavbového prostoru formule, rozsah použitých kloubků a nutnost jednoduché servisovatelnosti.



Obrázek 3.1 - Kinematika zadního odděleného odpružen vozu CTU24

Maximální síly v sestavě byly vypočteny pomocí programu Lotus Shark Suspension. Tabulka obsahuje síly zvětšené bezpečnostním koeficientem.

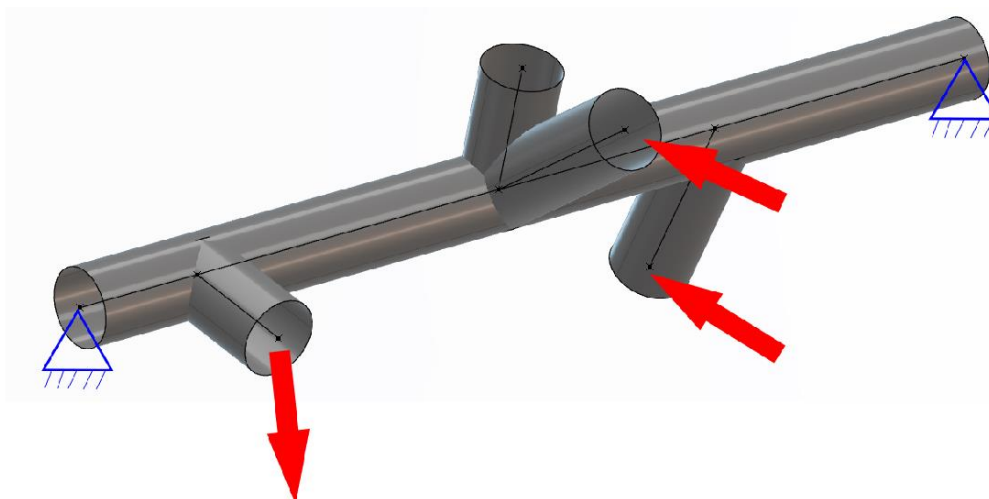
Tabulka 3.1 - Maximální síly v sestavě

Tlačná tyč	Zvedací pružina s tlumičem	Pružina stabilizátoru	Tlumič stabilizátoru
10 848 N	6 186 N	1 340 N	5 494 N

3. 2. Výpočtové zátěžné stavy

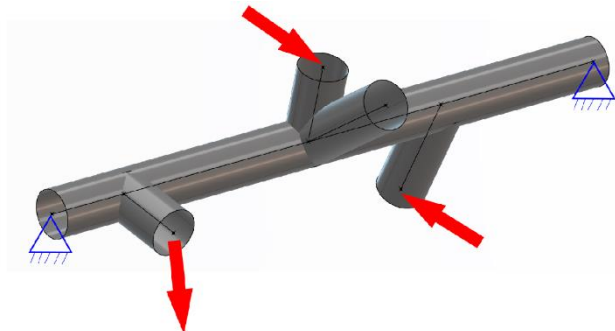
Pro pevnostní výpočty bylo nejprve důležité si určit v jakých mezních stavech bude samotná sestava navrhována. Z konzultace s Ing. Tomášem Dusem z firmy Škoda Auto a.s. Motorsport vznikla potřeba počítat statické zatížení sestavy každého vahadla ve třech jasně specifikovaných případech, z důvodu složitosti dynamických výpočtů. Zátěžné stavy jsem specifikoval pouze pro pravou stranu, protože na levé jsou obdobně symetrické.

První definovaný zátěžný stav demonstruje průjezd zatáčkou s maximálním bočním přetížením, kdy se auto naklání, jedno kolo jde dolů a druhé nahoru.

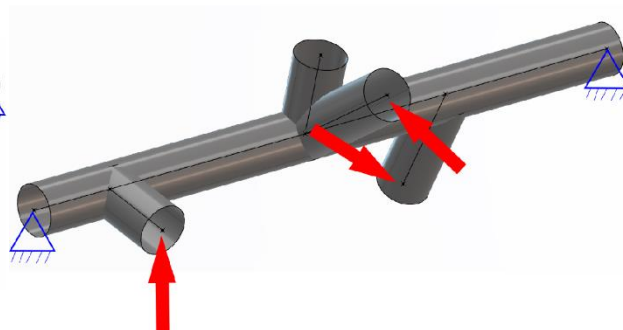


Obrázek 3.2 – Zátěžný stav vahadla pro maximální krut

V případě nájezdu na velkou terénní nerovnost je možné dosednutí vahadla na plánované bezpečnostní dorazy jeho držáků. Tímto dorazem je zabráněno, aby došlo k poškození tlumičů. Jelikož není jednoduché určit síly pro tento zátěžný stav, dle doporučení počítám s maximální silou, které je teoreticky možno dosáhnout před zničením jakéhokoliv členu sestavy. Jedná se o předdimenzovaný návrh, avšak na straně bezpečnosti.



Obrázek 3.3 - Zátěžný stav odskočení kola



Obrázek 3.4 - Zátěžný stav stlačení kola

Pro veškeré zátěžné stavy jsem provedl přepočítání sil do vektorových složek pro zjednodušené zadávání do výpočetního modelu pevnostní simulace.

Tabulka 3.2 - Vektorové složky sil pro jednotlivé zátěžné stavy pravého vahadla

Zátěžný stav	Tlačná tyč FY [N]	Tlačná tyč FZ [N]	Zvedací pružina s tlumičem FY [N]	Zvedací pružina s tlumičem FZ [N]	Pružina stabilizátoru FY [N]	Pružina stabilizátoru FZ [N]	Tlumič stabilizátoru FY [N]	Tlumič stabilizátoru FZ [N]
Maximální krut	-5403	3549	0	0	156	-1331	5294	-1468
Odskočení kola	0	0	6186	0	159	-1331	-5336	1310
Stlačení kola	-9289	5603	0	0	326	1300	5336	-1310

Tabulka 3.3 - Vektorové složky sil pro jednotlivé zátěžné stavy levého vahadla

Zátěžný stav	Tlačná tyč FY [N]	Tlačná tyč FZ [N]	Zvedací pružina s tlumičem FY [N]	Zvedací pružina s tlumičem FZ [N]	Pružina stabilizátoru FY [N]	Pružina stabilizátoru FZ [N]	Tlumič stabilizátoru FY [N]	Tlumič stabilizátoru FZ [N]
Maximální krut	5403	3549	0	0	150	1331	-5294	1468
Odskočení kola	0	0	6186	0	146	1331	5336	-1310
Stlačení kola	9289	5603	0	0	215	-1300	-5336	1310

4. Mechanický návrh

4.1. Uložení vahadla v držácích

Maximální radiální zatížení uložení vahadla v držáku vycházelo dle programu Lotus Shark Suspension pro levé přední uložení 8 846 N. Z důvodu možnosti pohodlného připojení rotačního enkodéru RLS RM44, pro snímání dat z jízdy, jsem se rozhodl volit průměr pod ložiskem 20 mm. Dle katalogu SKF jsem následně vybral co nejlehčí představitele různých typů ložisek.

Tabulka 4.1 - Porovnání ložisek [19]

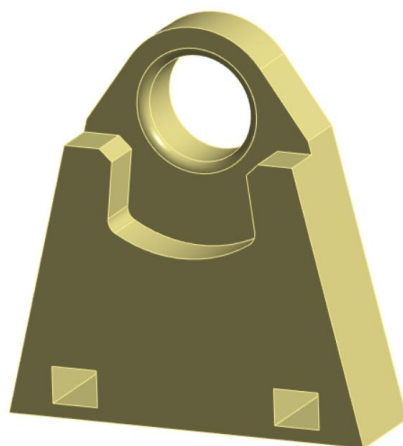
Název	NKI 20/16	PCM 202315 M	PCMF 202315 E
Typ	Jehličkové ložisko	Kluzné POM	Kluzné PTFE s osazením
Dovolené dynamické zatížení	15,4 kN	34 kN	20 kN
Hmotnost	48 g	9,7 g	14 g
Koeficient tření	-	0,02 – 0,2	0,03 – 0,25
Vnější průměr	32 mm	23 mm	23 mm

Jehličkové ložisko jsem i přes jeho mnohem nižší valivý odpor vyloučil z důvodu vyšší hmotnosti a nutnosti větších držáků s axiálním pojištěním. Kluzné pouzdro s POM povrchem má sice nižší koeficient tření, ale taktéž vyžaduje axiální pojištění. Kluzné pouzdro s PTFE povrchem, pro které jsem se nakonec rozhodl disponuje osazením, díky kterému není nutné žádné další axiální pojištění. Proto bylo jeho použití výhodné zejména pro snížení hmotnosti celé sestavy. Zvolil jsem délku pouzdra 15 mm s možností zaříznutí na rozměr dle pevnostních výpočtů celé sestavy. Pro výpočet životnosti jsem tudíž počítal s délkou pouzdra 11,5 mm pro zachování dostatečné bezpečnosti. Výpočet jsem provedl v programu SKF Bearing Select, ze kterého mi vyšla životnost pod maximálním zatížením 858 500 otáček. Tato hodnota značně převyšuje životnost vozu, který je plánovaný pouze na jednu sezonu.

4. 2. Držáky

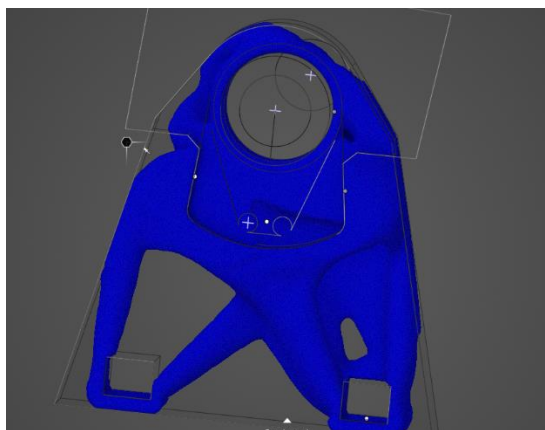
Držáky vahadel se využívají pro radiální i axiální držení vahadel. Také se využívají k držení rotačních enkodérů na přední straně. Rozhodl jsem se je navrhovat jakožto obrobky z hliníkové slitiny ENAW 7075 T651. Pro návrh jsem si určil nejzatíženější stav, což je stlačení kola na levé straně. Pro zjednodušení návrhu a výroby jsem se rozhodl pro návrh symetrických držáků. Z rozměrů šasi jsem se rozhodl pro připevnění pomocí dvojice šroubů M6 ve vzdálenosti 60 mm. Rozhodl jsem se taktéž pro umístění matice do tvarového zámku v držáku a šroubu skrz šasi ze spodu. Pod oba prvky jsem následně umístil podložky z vysokopevnostní ocele pro lepší distribuci zatížení.

Začal jsem s modelem, který obsahoval pouze otvor pro kluzné pouzdro, dorazy a tvarové zámky pro matice.



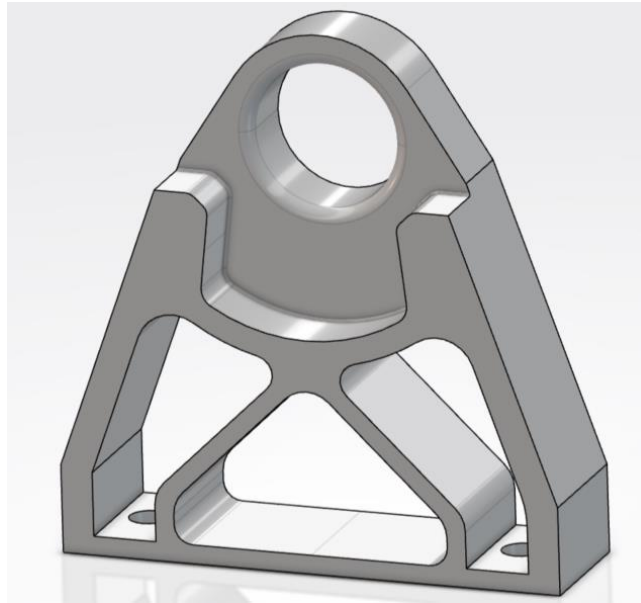
Obrázek 4.1 - Model pro topologickou optimalizaci držáku vahadla

Tento model jsem následně vložil do topologické optimalizace programu Ansys Discovery, který nedosahuje dokonale přesných výsledků, ale je uživatelsky nenáročný a rychlý. Proto se hodí pro tvorbu prvních iterací dílů.



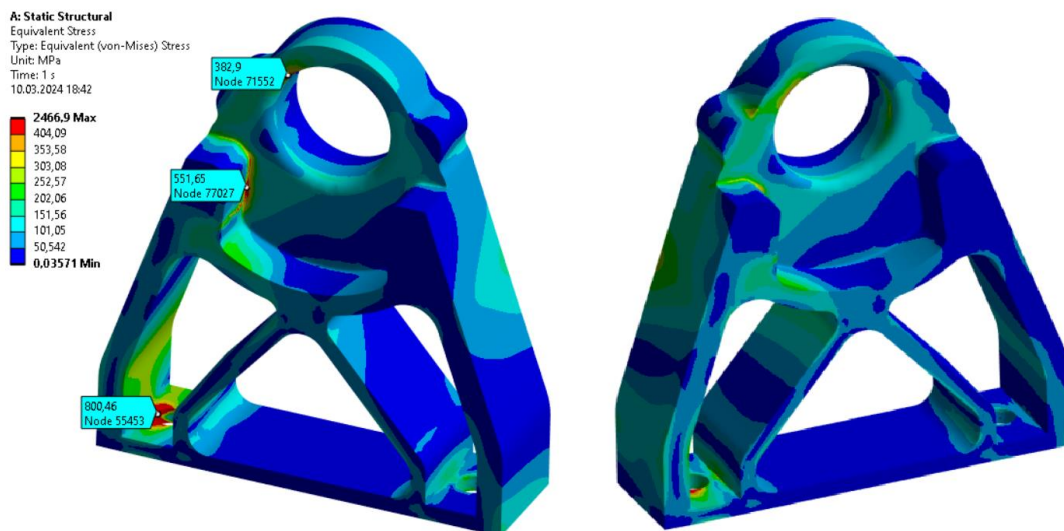
Obrázek 4.2 - Výsledek topologické optimalizace držáku vahadla

Přemodelováním výsledku topologické optimalizace vznikl model první iterace, který již bylo možné vložit do simulace sestavy, kde jsem následně držák upravoval pro vyhovění všem zátěžným stavům při maximálním využití materiálu.



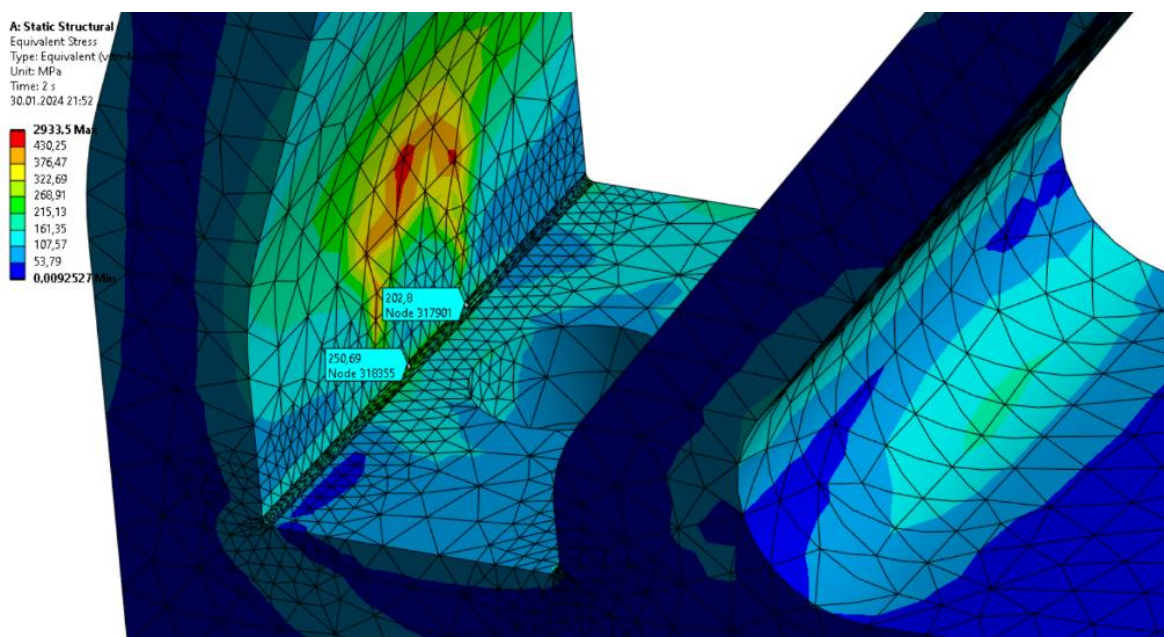
Obrázek 4.3 - první iterace držáku vahadla

Ve výsledcích simulace sestavy se spojovacím materiálem v programu Ansys mechanical jsem našel místa, která bylo nutno upravit. Zvětšil tloušťku spodní postavy z 3 mm na 5 mm. Narovnal a zvětšil jsem středové příčky, zvětšil rádius pod dorazy vahadla a přidal závitové díry pro uchycení rotačního enkodéru RLS RM44. Jedinými místy, kde i přes úpravy nebylo možno dodržet požadované napětí, jsou prostory pro tvarové zámky, kde to bylo způsobeno zvolenými okrajovými podmínkami simulace. A roh dorazové plochy, kde se jednalo o problém špatně nastavené sítě.



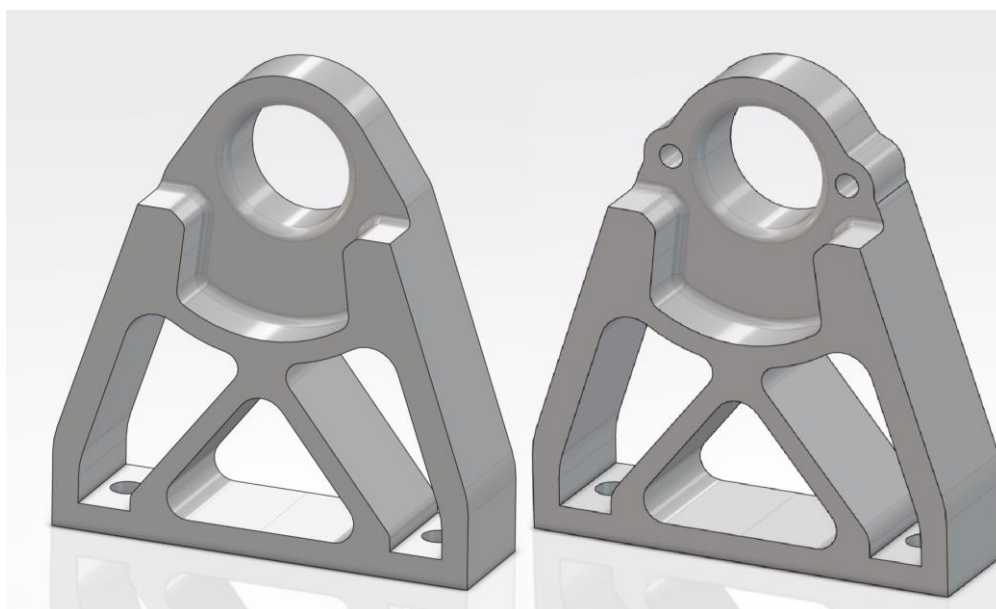
Obrázek 4.4 - Výsledek pevnostní simulace finální iterace držáku

Po zjemnění sítě a přesném definování okrajových podmínek s využitím modelu spojovacího materiálu bylo dosaženo již reálných výsledků.



Obrázek 4.5 - Detail na prostor tvarového zámku držáku

Po sedmi verzích kontrolovaných ve všech zátěžných stavech jsem dospěl k finální podobě držáků. Při tvorbě výkresové dokumentace jsem se rozhodl pro zmenšení díry pro kluzné pouzdro o 0,1 mm, tak aby bylo možné při následném skládání sestavy spasovat konkrétní držák ke konkrétnímu vahadlu.



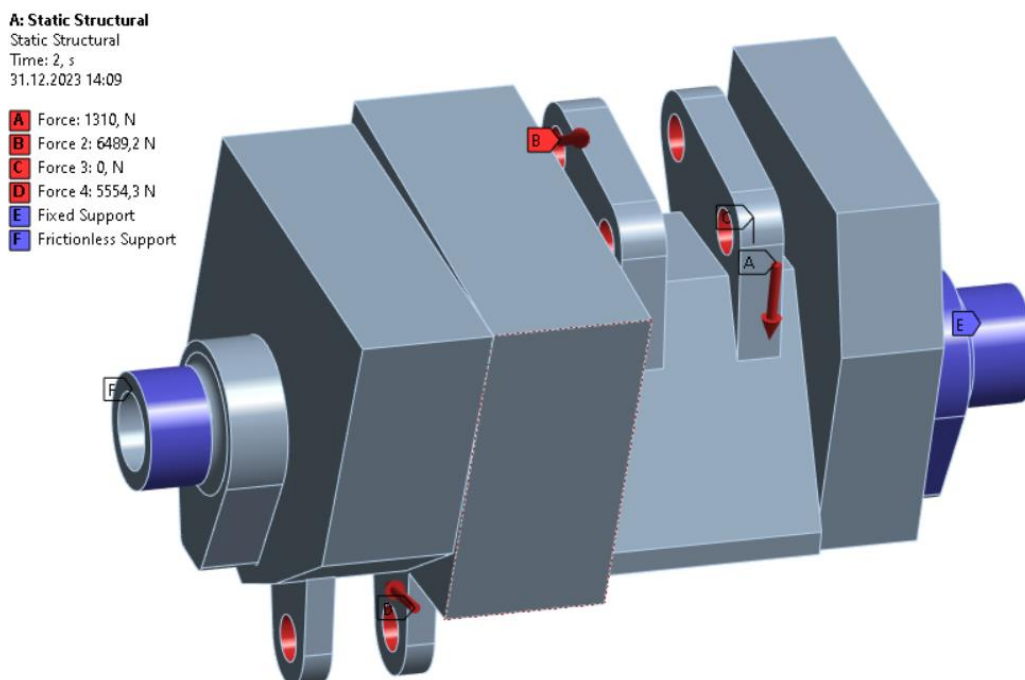
Obrázek 4.6 - Finální podoba držáků vahadla, vlevo zadní, vpravo přední

4. 3. Vahadlo

Vahadlo je využíváno k přednášení sil mezi jednotlivými prvky sestavy. Je uloženo v kluzných pouzdrech, nalisovaných v držácích. Zároveň je vybaveno dorazy pro zabezpečení tlumičů proti poškození. Přenos sil jsem realizoval pomocí sférických kloubků Aurora MM-6 připevněných k vahadlu pomocí lícovaných šroubů typu ISO 7379. Jedinou výjimku představuje připevnění nastavitelné listové pružiny stabilizátoru. Zde jsem se z důvodu zástavby, a to i s přihlédnutím k nižším zátěžným silám, využil kombinace sférických kloubků Aurora MM-5 a Aurora COM-M5 připevněných šroubem DIN 912. Toto řešení má oproti lícovaným šroubům znatelně vyšší vůli, ale u této pružiny to nemá vliv na její provozní vlastnosti.

4.3.1. Odlévané vahadlo

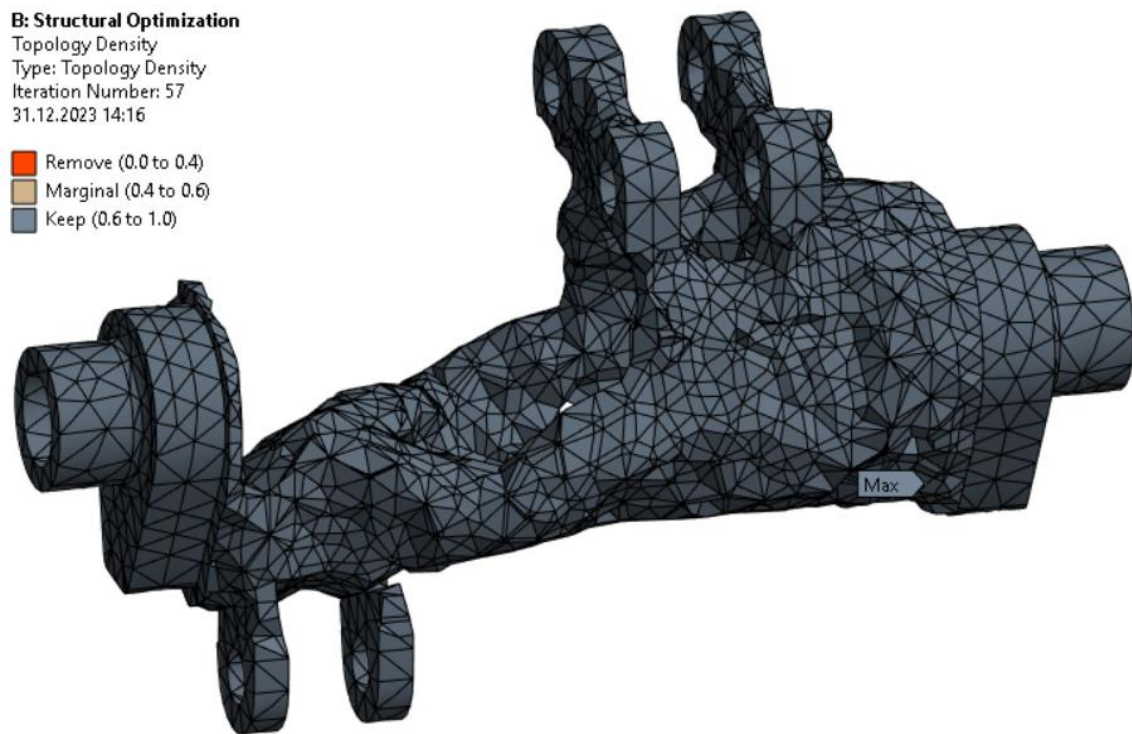
Pro návrh vahadla jsem se prvotně volil odlitek z důvodu výhod komentovaných v kapitole 2.2. Tvar odlitku jsem navrhoval pomocí topologické optimalizace v programu Ansys Mechanical. Program Ansys Discovery nebylo možno použít ani pro první verze z důvodu využití specifických okrajových podmínek, kterými program Ansys Discovery nedisponuje. Topologickou optimalizaci jsem pro zjednodušení prvotního výpočtu definoval pouze pro jeden zátěžný stav, a to konkrétně pro maximální stlačení levého kola.



Obrázek 4.7 - Vstupní model topologické optimalizace okrajovými podmínkami

Sít' byla nastaveno pouze na velikost 5 mm pro rychlost výpočtu. Cíl byl nastaven na minimalizaci hmotnosti při využití materiálu AlSi7Mg0,6, Původně zvolený materiál Elektron 21 nevyhovoval na kontaktní tlak v místě uložení v kluzných pouzdech.

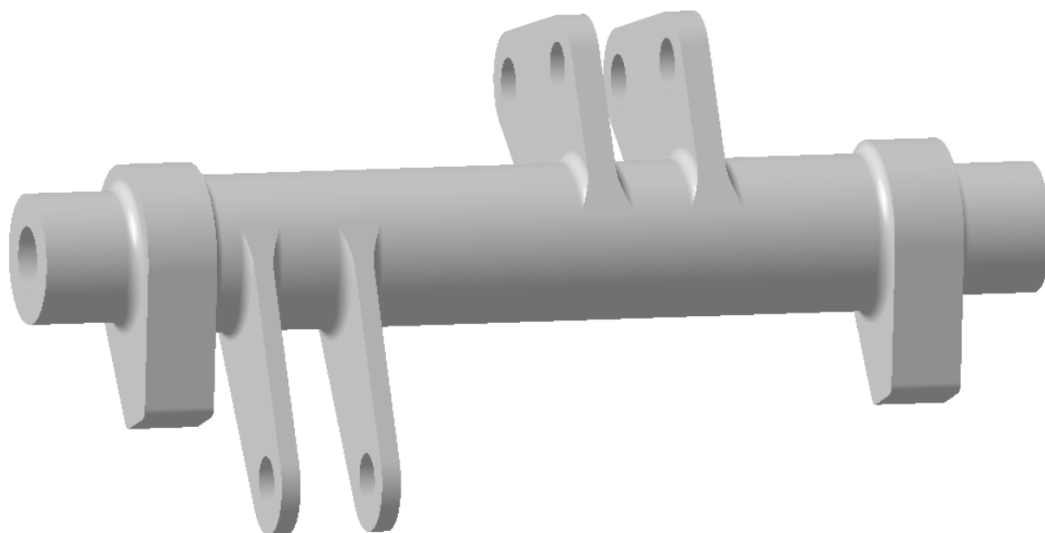
Po vyzkoušení několika variant výpočtu odlitku jsem konstatoval, že pro zvolenou geometrii a síly není odlitek vhodný, a to zejména z důvodu vysokých kontaktních tlaků v místech bezpečnostních dorazů a kluzných pouzder. Taktéž by u odlitku této geometrie bylo náročné doobrábění funkčních ploch.



Obrázek 4.8 - Mezivýsledek topologické optimalizace odlitku vahadla

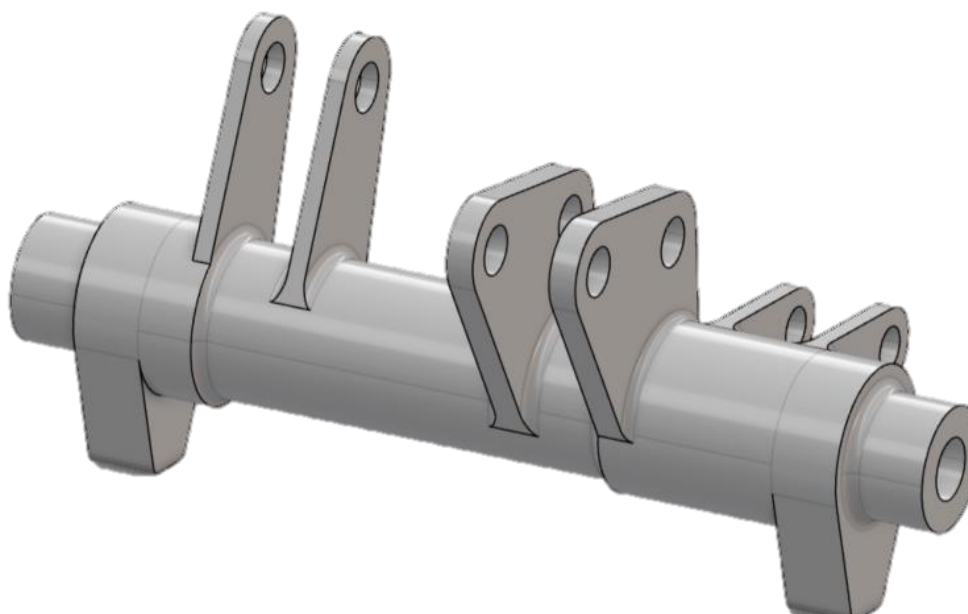
4.3.2. Obráběné vahadlo

Po vyloučení technologie odlévání zůstala jako jediná vhodná varianta výroby vahadla technologií obrábění. Na základě snahy o co nejnižší hmotnost jsem se zvolil návrh z materiálu ENAW 7075 – T651. Navrhl jsem variantu vahadla jakožto centrální trubky, osazené ložiskovými plochami, vačkami a držáky.



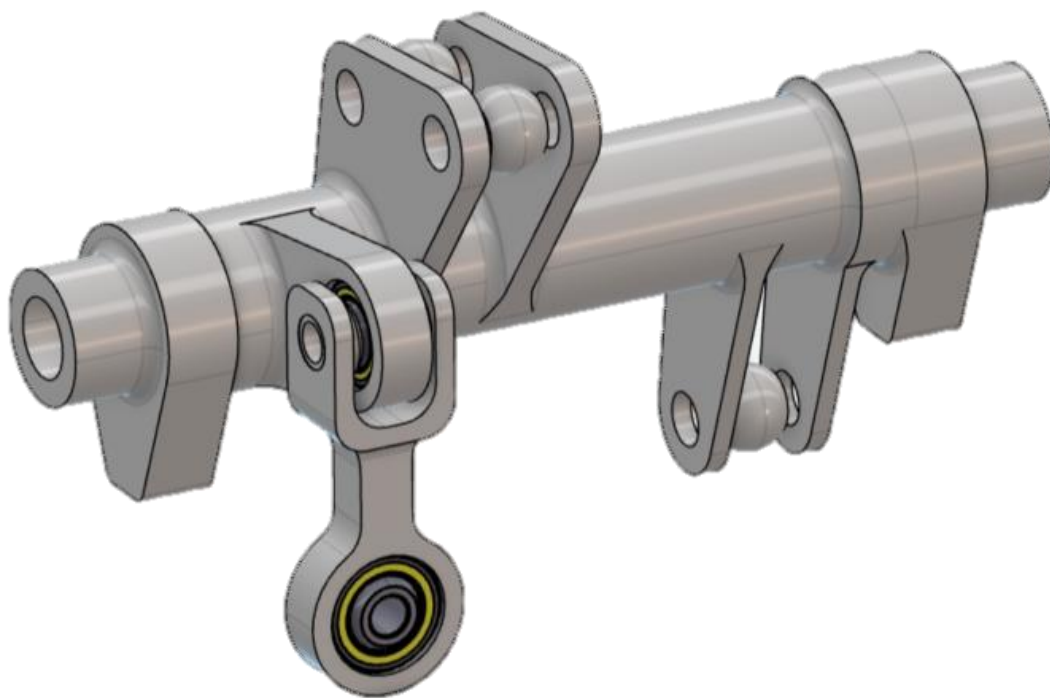
Obrázek 4.9 - První iterace levého obráběného vahadla

Levé vahadlo již po třech verzích splnilo požadované parametry. Oproti první verzi stačilo pro odlehčení pouze zvětšit průměr centrální trubky a snížit tloušťku její stěny. Následně vytvořit závit M11x1 pro umístění držáku magnetu rotačního enkodéru.



Obrázek 4.10 - Finální verze levého vahadla

U pravého vahadla je z důvodu funkčnosti kinematiky umístěn bod uchycení pružiny stabilizátoru na opačné straně. Z toho důvodu začala kolidovat hlava lícovaného šroubu s tlačnou tyčí. Zvolil jsem, proto spoj s využitím lisovacího sférického kloubku Aurora Bearing COM-M5 a vidličky. Tento systém jsem dokončil do finální podoby po deseti verzích.

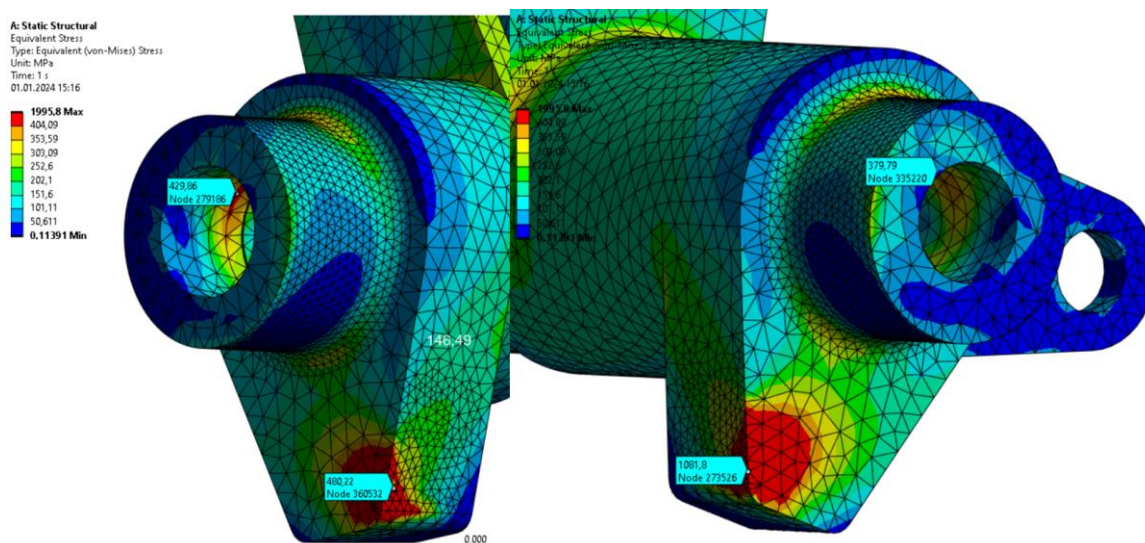


Obrázek 4.11 - Finální verze Pravého vahadla

Uložení nalisovaného kloubku jsem volil dle doporučení výrobce Aurora jako 16^{+0}_{-18} na kloubku a 16^{-15}_{-28} pro díru ve vahadle.

Obě vahadla jsem pevnostně kontroloval v programu Ansys Mechanical metodou konečných prvků. Na tělech obou vahadel se objevovalo napětí maximálně 400 MPa. Jedinými problémovými místy bylo na obou vahadlech odlehčení pod kluznými pouzdry a hrot dorazu.

Odlehčení jsem proto zmenšil tak abych dodržel maximální dovolené napětí. Na základě konzultace s jinými konstruktéry jsme dospěli k závěru, že dorazy slouží pouze pro havarijní případ, a je tak možné je navrhovat až do meze pevnosti.



Obrázek 4.12 - Detail na problémová místa vahadel

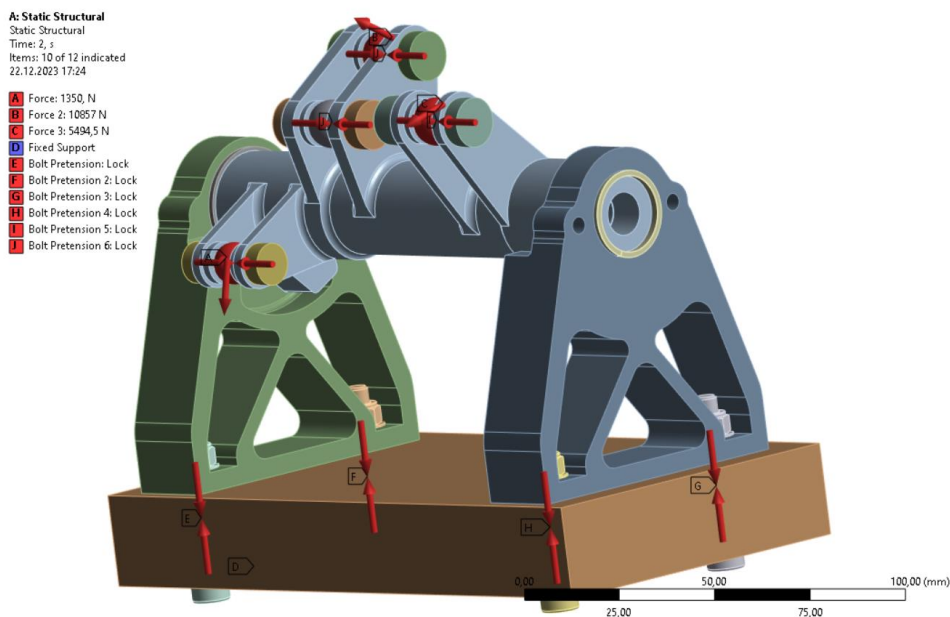
4. 4. Vložky

Při návrhu vahadla jsem volil pro přenos síly z prvků zavěšení na vahadlo šrouby ISO 7379 a DIN 912. V pevnostních simulacích uvažuji přenos síly rovinným stykem. V realitě se vlivem výrobních vůlí jedná pouze o styk čárový, což by mohlo znamenat vymačkání otvoru ve vahadle. Rozhodl jsem se proto každou díru vyvložkovat vložkou z materiálu 42CrMo4. Tyto vložky jsem zároveň vybavil osazením, které částečně zamezuje rotaci tlumičů kolem vlastní osy, aby nemohlo dojít ke kolizím tlumičů mezi sebou a s šasi.

Pro vložku volím uložení 8 H7 pro díru a $8_{+0,03}^{+0,05}$ pro vložku a stejné tolerance pro vložku 7 mm použitý na levém vahadle pro připojení pružin stabilizátoru. V nejhorším případě vyšlo dle simulace v programu KissSoft nejvyšší redukované napětí na vložce 293 MPa a vahadle v okolí lisované vložky 177 MPa.

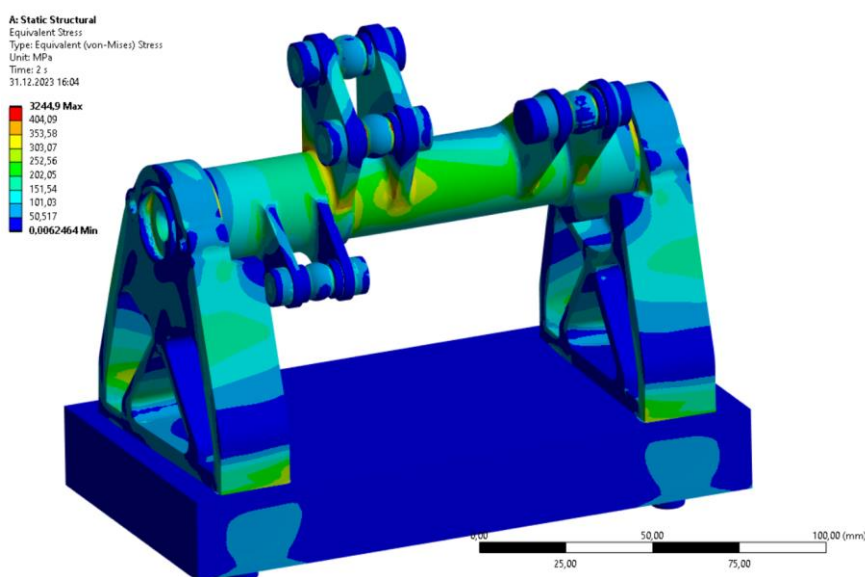
4. 5. Kontrola sestavy

Pro ověření funkčnosti celé sestavy jsem provedl pevnostní simulaci celku metodou konečných prvků včetně spojovacího materiálu a části šasi. Veškerý spojovací materiál je předepjatý. Tento výpočet jsem provedl pouze pro levé vahadlo ve stavu stlačení kola. Tento výpočet slouží ke kontrole míst, která byla v přechozích simulacích svázána přísnými okrajovými podmínkami.



Obrázek 4.13 - Definice zátěžných stavů do simulace

Z této validační simulaci vyšlo že jsem vše navrhl s co nejnižší hmotností, a stále vyhovující pevností. Kompletní simulaci včetně reportu příkládám v příloze.

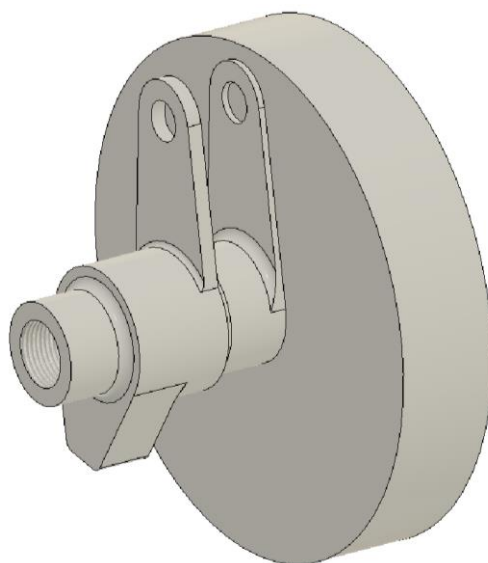


Obrázek 4.14 - Ukázka výsledku simulace sestavy

5. Návrh výrobního postupu

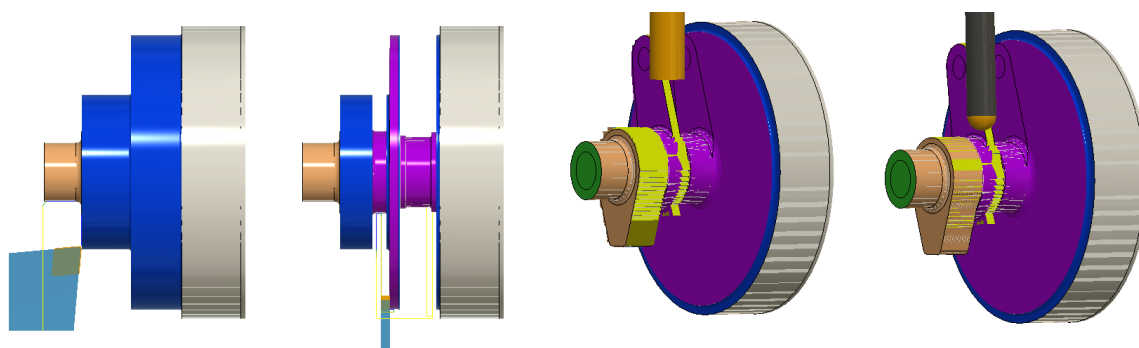
5.1. Testovací vahadlo

Jelikož vahadla jsou z velké části rotační díly, navrhl jsem výrobu na soustruhu. Pro ověření funkčnosti této technologie jsem se rozhodl vyrobit testovací díl na CNC Soustruhu Okuma Genos L200E-MY v laboratořích školy. Testovací díl jsem se rozhodl vyrábět ze zbytku materiálu EN AW 6080 v rozměrech d100-100. Ověřil jsem si tak zdali je vůbec možné výrobu na tomto stroji realizovat. Pro tento účel jsem si vymodeloval část vahadla, tak aby to vyšlo ze zmíněného polotovaru.



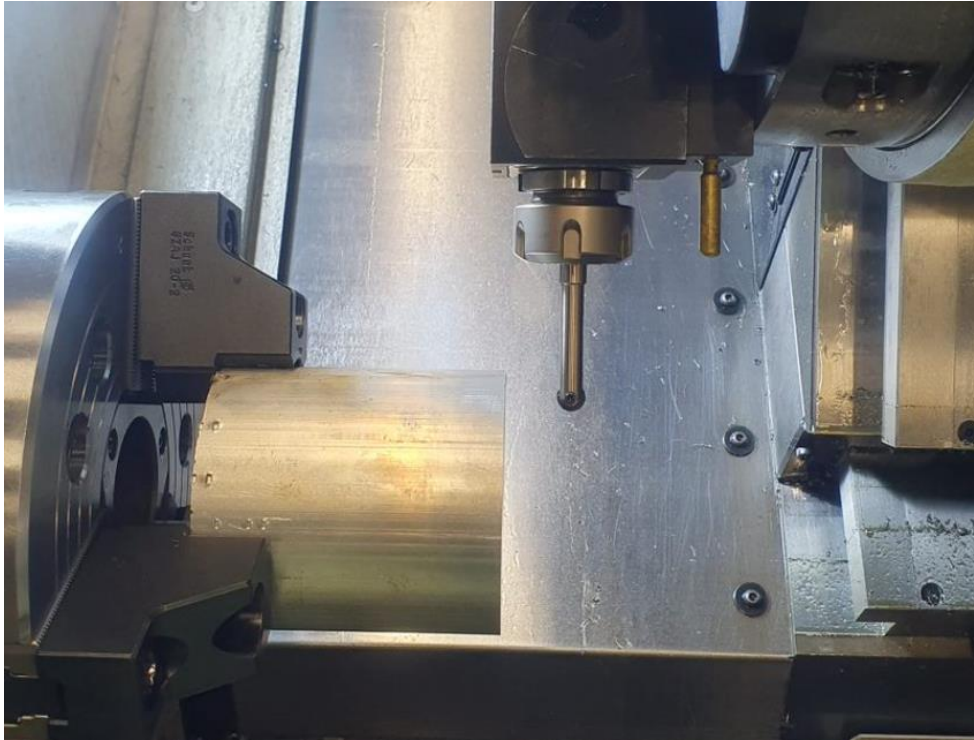
Obrázek 5.1 - Testovací část vahadla

Navržený postup spočíval ve vysoustružení plochy pod kluzné pouzdro, kotoučů zapichovacím nožem, vyhrubování kotoučů indexovaným frézováním a dokončením ploch rotační konturou kulovou frézou.



Obrázek 5.2 - Plánovaný postup na soustruhu

Po těchto operacích mělo následovat vrtání děr pro závit a inserty. To vše buď na soustruhu anebo na frézce. Tento postup se ukázal jako nevhodný. Hlavním problémem se ukázala být nutnost vyložených nástrojů a malý rozsah posuvu v ose Y. Tato kombinace zapříčinila že nebylo možno se s kulovou frézou dostat nad materiál.



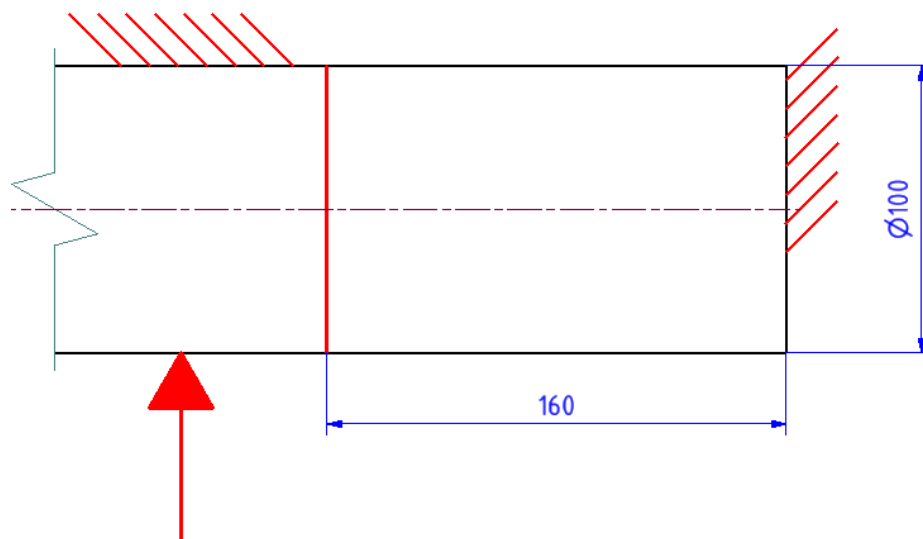
Obrázek 5.3 - Maximální výška posuvu v ose Y

5. 2. Levé vahadlo

Celé vahadlo jsem realizoval z polotovaru d100-160 EN AW 7075 T651. Nejprve bylo nutné polotovary uříznout na délku 160 mm na Pásové pile Pilous ARG 300 plus S. A. F. Poté upnout uříznutý díl za čela do velkého strojního svěráku zhruba za 25 mm. Z vrchní strany následně vyfrézovat upínací hranol a plochy pod vačkami na 3 osé frézce Haas VF-2. Finální operací bylo upnutí za zmíněný hranol do 5 osé frézky Okuma MU-400V, která vyrobila všechny funkční plochy nejprve indexovaným frézováním válcovou frézou a následně vrtáním děr. Pro estetické dokončení dílu jsem využil indexované frézování kulovou frézou až do stavu, kdy zůstal díl upevněn pouze za úzkou planžetu. Tato planžeta byla následně uražena a prostor planžety dokončen kulovou frézou na frézce Haas VF-2 s dílem upnutým v dělicím přístroji.

5.2.1. Řezání

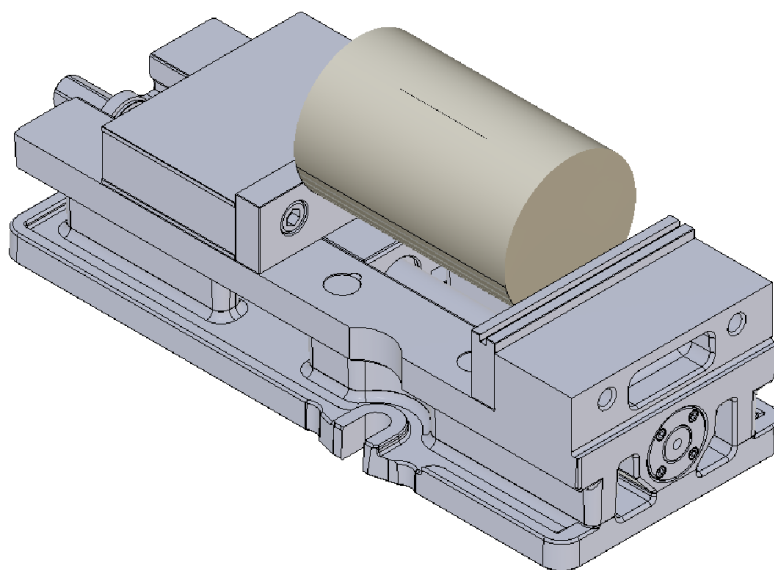
Materiál byl nakoupen jakožto tyč d100-2000 EN AW 7075 T651, která byla potřeba rozřezat na kusy o délce 160 mm na pásové pile Pásové pile Pilous ARG 300 plus S. A. F. Tuto délku jsem se rozhodl zvolit, jelikož by výsledný díl měl mít délku 155,4 mm a naplánoval jsem výrobu na moderních obráběcích strojích vybavených sondou pro zaměření polotovaru. Abych dosáhl opakovaně přesné délky, rozhodl jsem se využít mechanického dorazu.



Obrázek 5.4 - Vahadlo schéma upnutí pro řezání

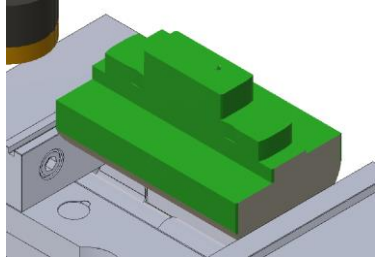
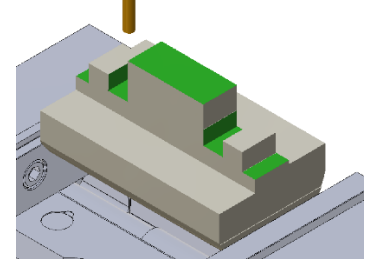
5.2.2. Předhrubování upínacího hranolu a vaček

Operace předhrubování upínacího hranolu a prostoru pod vačkami jsem realizoval na 3osé frézce Haas VF-2. Tato operace spočívá v upnutí válcového polotovaru podloženého, tak aby byl uchycen za 25 mm do strojního svěráku. Pro stanovení nulového bodu válce jsem se rozhodl pro zaměření obrobkovou sondou. Prvním procesem bylo předhrubování frézovací hlavou následované vybráním kapsy u vaček válcovou frézou. Pro celou tuto operaci jsem definoval přírůstek 3 mm pro vymezení nepřesného ustavení dílu při následujících operacích.



Obrázek 5.5 - Upnutí vahadla pro před hrubování

Tabulka 5.1 - Operace před hrubování upínacího hranolu a vaček

Poř.	Proces	Haas VF-2		Simulace Fusion 360
1.	Adaptivní hrubování vnější kontury	Nástroj	1	
		n [ot/min]	1768	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	8	
		h [mm]	13	
2.	Adaptivní hrubování vnější kontury	Nástroj	10	
		n [ot/min]	8500	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	20	

5.2.3. Obrábění v pěti osách

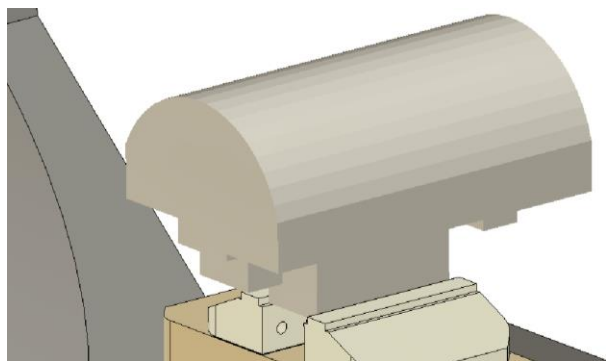
Operace prvního obrábění v pěti osách spočívala v upnutí polotovaru za před hrubovaný hranol do středícího svěráku Kastr CU-T 77, podloženém 32 mm deskou. Obrábění začalo dohrubováním polotovaru frézovací hlavou s přídavkem 2 mm. Dále jsem vyhruboval plochy pro kluzná pouzdra s radiálním přídavkem 1 mm, které jsem dokončil frézováním kruhovou interpolací po spirále toroidní frézou o průměru 10 mm s rádiusem rohu 1 mm. Předhrubované plochy úchytů jsem následně dokončil válcovou frézou o průměru 16 mm. Zvolil jsem axiální přídavek 2 mm, tak abych dokončil boky úchytů ale zároveň neprofrézoval centrální válec.

Do již připravených úchytů a centrálního válce jsem tvrdokovovými vrtáky vyvrtal sérii děr sloužících jak pro nalisování vložek pro úchyty, tak i děr odlehčovacích v centrálním válci. Do díry v centrálním válci jsem závitovací frézou se stoupáním 1 mm vyřezal závit M11x1.

Jelikož již nebylo potřeba vrtat do úchytů a nebyla tak potřeba jejich kolmá tuhost. Mohl jsem tak obrobit i prostor mezi nimi. Pro toto obrábění jsem se rozhodl využít dlouhou válcovou frézu o průměru 8 mm s řeznou částí o délce 40 mm, tak abych se mohl pohodlně dostat v pěti různých na pozicování stolu na všechny úchyty a vačky. Vzniklé zuby jsem zarovnal kulovou frézou do průměru 10 mm ve třech natočení stolu.

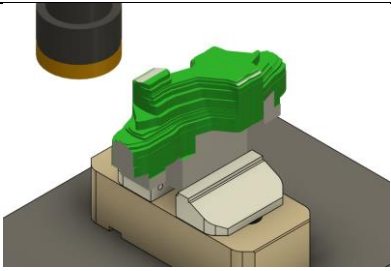
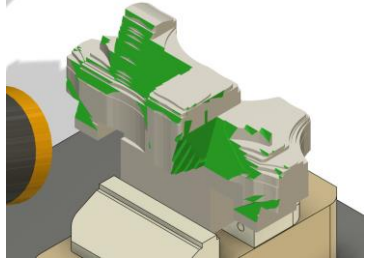
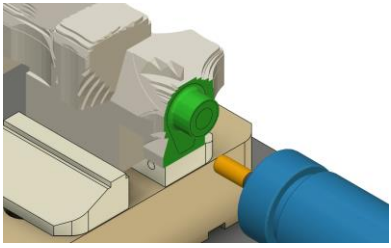
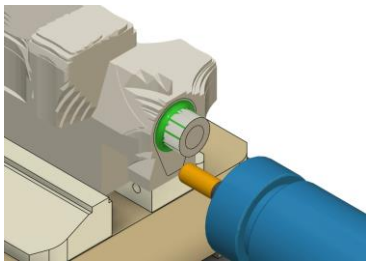
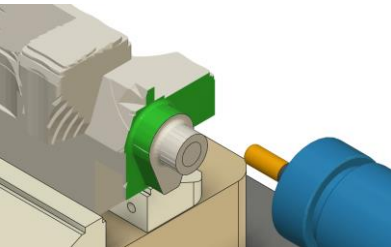
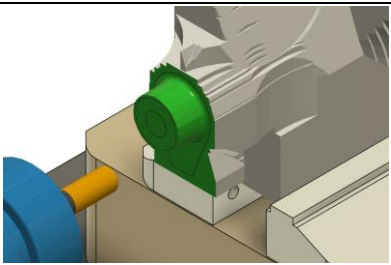
Vahadlo bylo v tu chvíli dokončené ze tří stran, zbývalo pouze odfrézovat hranol, za který vahadlo drželo upnuté. Velkou část hranolu jsem odfrézoval dlouhou válcovou frézou průměru 8 mm. Po odhalení většiny dosud nedostupných kontur jsem použil kulovou frézu o průměru 6 mm pro jejich dočištění.

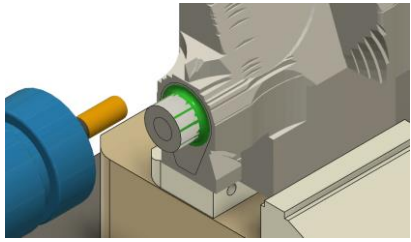
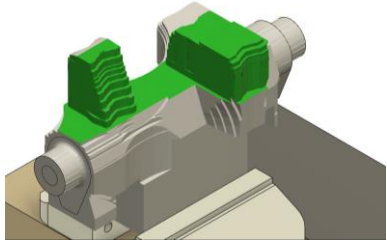
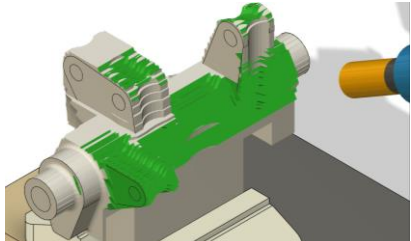
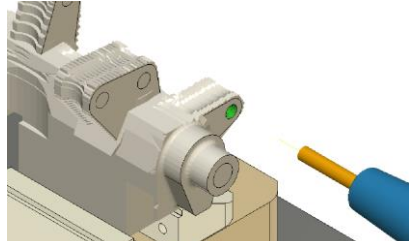
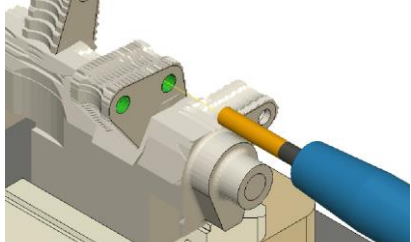
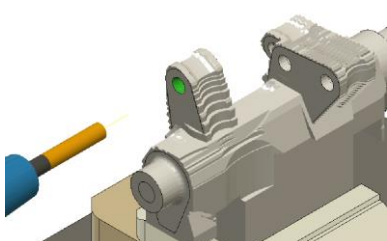
Malý kousek materiálu, za který bylo vahadlo ještě upnuté jsem odstranil postupným natáčením stolu za pomoci dvojice více zmíněných kulových fréz, a to až do stavu kdy zůstalo vahadlo upnuté pouze za planžetu. Tuto planžetu jsem následně odlomil a získal tak téměř hotový díl.

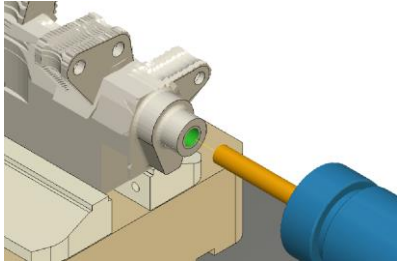
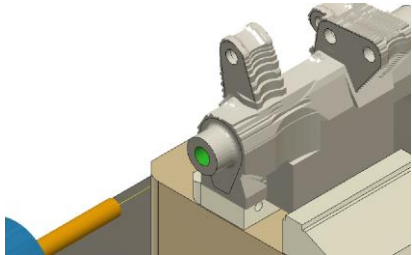
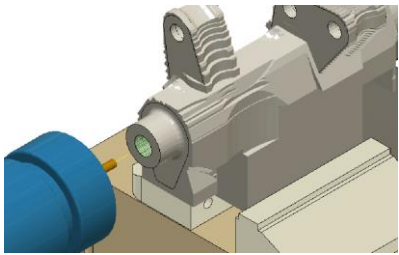
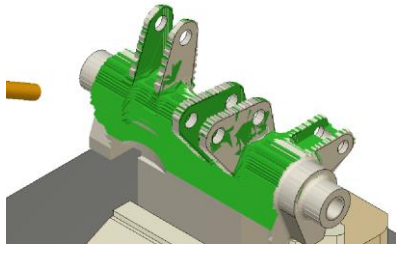
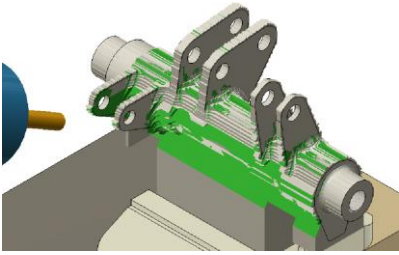
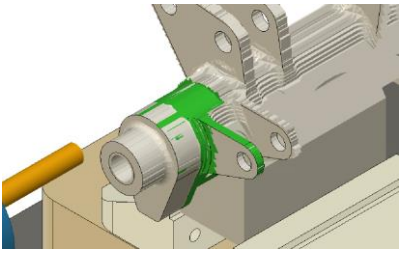


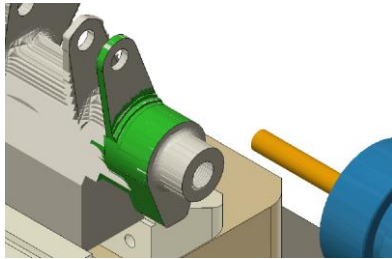
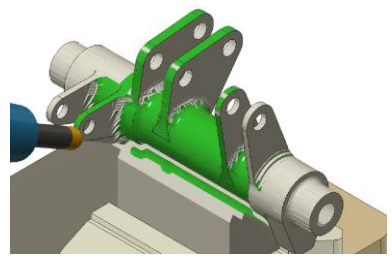
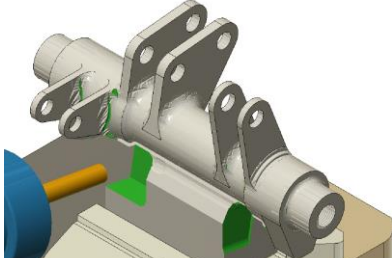
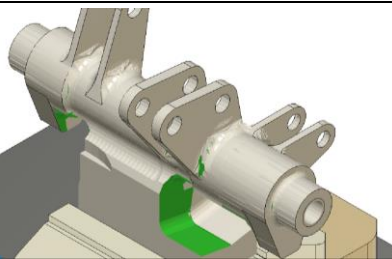
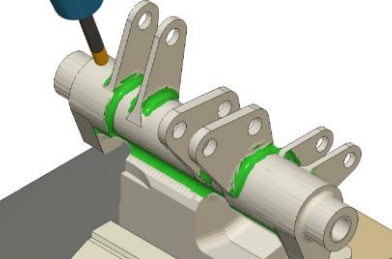
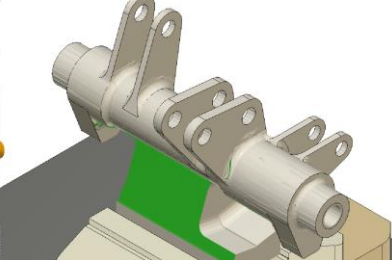
Obrázek 5.6 - Simulace vahadla upnutého ve středícím svěráku

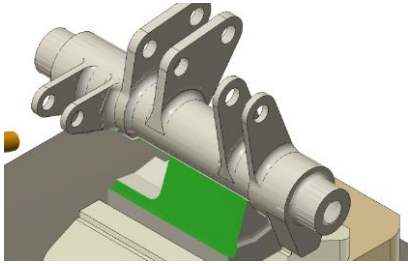
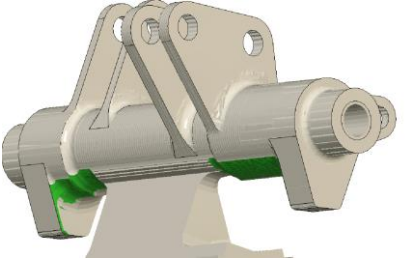
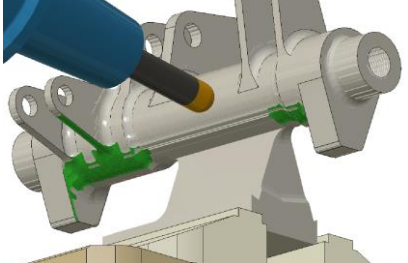
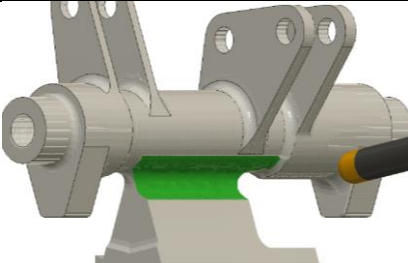
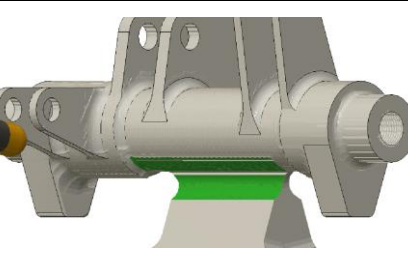
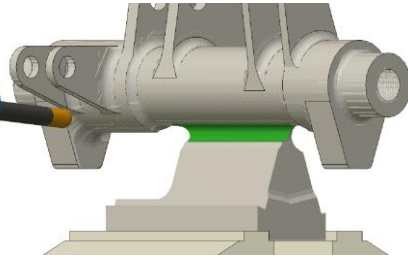
Tabulka 5.2 - Obrábění vahadla v pěti osách

Poř.	Proces	Okuma MU – 400 V		Simuace Fusion 360
1.	Adaptivní hrubování vnější kontury	Nástroj	1	
		n [ot/min]	1200	
		f_z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	10	
		h [mm]	8	
2.	Adaptivní hrubování vnější kontury	Nástroj	1	
		n [ot/min]	1200	
		f_z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	10	
		h [mm]	8	
3.	Adaptivní hrubování válce pod kluzné pouzdro	Nástroj	2	
		n [ot/min]	11140	
		f_z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	3	
		h [mm]	8	
4.	Kontura pro kluzné pouzdro	Nástroj	2	
		n [ot/min]	11140	
		f_z [mm/zub]	0,01	
		b [mm]	0,2	
		h [mm]	1	
5.	Adaptivní obrábění vačky	Nástroj	2	
		n [ot/min]	11140	
		f_z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	3	
		h [mm]	8	
6.	Adaptivní hrubování válce pod kluzné pouzdro	Nástroj	2	
		n [ot/min]	11140	
		f_z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	3	
		h [mm]	8	

Poř.	Proces	Okuma MU – 400 V		Simulace Fusion 360
7.	Kontura pro kluzné pouzdro	Nástroj	2	
		n [ot/min]	11140	
		f _z [mm/zub]	0,01	
		b [mm]	0,2	
		h [mm]	1	
8.	Adaptivní hrubování vnější kontury úchytů	Nástroj	9	
		n [ot/min]	3500	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	6	
		h [mm]	15	
9.	Adaptivní hrubování vnější kontury úchytů	Nástroj	9	
		n [ot/min]	3500	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	6	
		h [mm]	15	
10.	Vrtání děr v držáku	Nástroj	3	
		n [ot/min]	4850	
		f _z [mm/ot]	0,05	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
11.	Vrtání děr v držáku	Nástroj	4	
		n [ot/min]	3950	
		f _z [mm/ot]	0,05	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
12.	Vrtání děr v držáku	Nástroj	4	
		n [ot/min]	3950	
		f _z [mm/ot]	0,05	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	

Poř.	Proces	Okuma MU – 400 V		Simulace Fusion 360
13.	Vrtání středové díry	Nástroj	9	
		n [ot/min]	2950	
		f _z [mm/ot]	0,075	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
14.	Vrtání středové díry	Nástroj	9	
		n [ot/min]	2950	
		f _z [mm/ot]	0,075	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
15.	Frézování závitu	Nástroj	6	
		n [ot/min]	5000	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1	
16.	Adaptivní obrábění úchytů	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	
17.	Adaptivní obrábění úchytů	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	
18.	Adaptivní obrábění vačky	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	

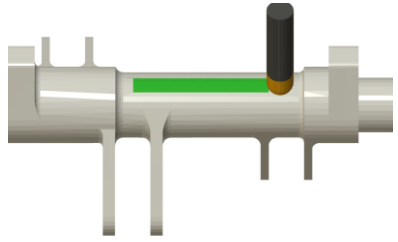
Poř.	Proces	Okuma MU – 400 V		Simulace Fusion 360
19.	Adaptivní obrábění vačky	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	
20.	Dokončení povrchu centrálního válce a úchytů	Nástroj	5	
		n [ot/min]	5000	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1,5	
21.	Odfrézování části upínacího hranolu	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	
22.	Odfrézování části upínacího hranolu	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	
23.	Dokončení rádiusů	Nástroj	8	
		n [ot/min]	9000	
		f _z [mm/zub]	0,02	
		b [mm]	0,35	
		h [mm]	1	
24.	Zúžení upínacího hranolu	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	

Poř.	Proces	Okuma MU – 400 V		Simulace Fusion 360
25.	Zúžení upínacího hranolu	Nástroj	10	
		n [ot/min]	12772	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	10	
26.	Dokončení plochy po hranolu	Nástroj	5	
		n [ot/min]	5000	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1,5	
27.	Dokončení plochy po hranolu	Nástroj	5	
		n [ot/min]	5000	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1,5	
28.	Zužování planžety	Nástroj	5	
		n [ot/min]	5000	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1,5	
29.	Zužování planžety	Nástroj	5	
		n [ot/min]	5000	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1,5	
30.	Odřezání planžety	Nástroj	8	
		n [ot/min]	9000	
		f _z [mm/zub]	0,02	
		b [mm]	0,35	
		h [mm]	1	

5.2.4. Do obrobení prostoru pod planžetou

Odlomená planžeta po sobě nechala na povrchu vahadla zbytky materiálu. Proto bylo nutné vahadlo upnout do přípravku mezi hroty ve stroji Haas VF-2 a kulovou frézou dokončit povrch středního válce.

Tabulka 5.3 - Obrábění planžety

Poř.	Proces	Haas VF-2		Simulace Fusion 360
1.	Odfrézování zbytku planžety	Nástroj	5	
		n [ot/min]	5000	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1,5	

5.3. Pravé vahadlo

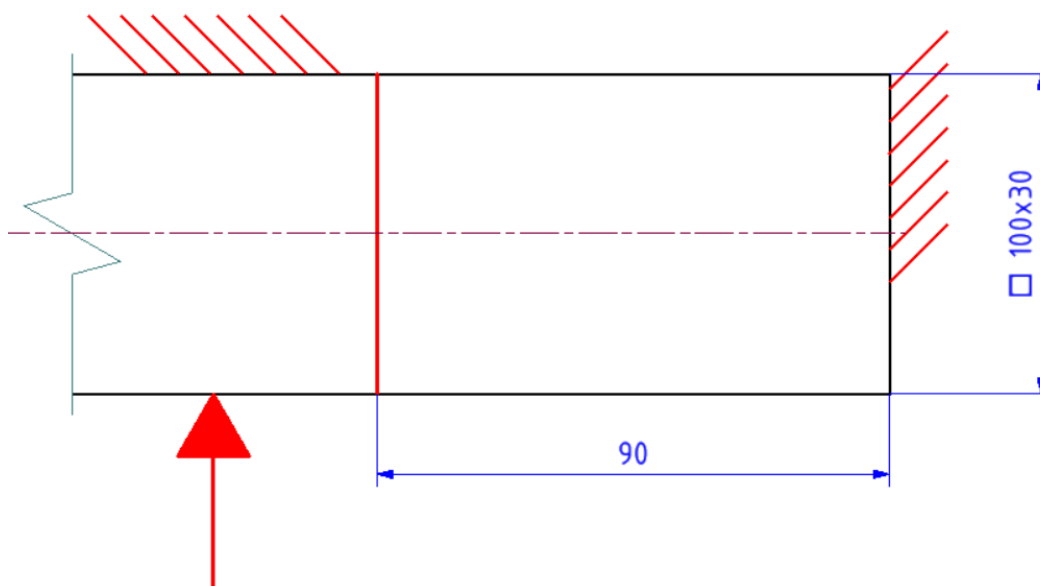
Pravé vahadlo jsem vyráběl obdobným způsobem jako vahadlo levé. Jediným znatelným rozdílem vyplívajícím z konstrukce je výměna procesu vrtání díry průměru 7 mm za frézování kapsy pro lisovací kloubek Aurora Bearing COM-M5.

5. 4. Držáky

Výrobu obou držáků jsem realizoval na stroji Haas VF-2 s upínáním v středící svěrák Kastr CU-T 77 na 3 upnutí. Nejprve jsem nařezal polotovaru z hliníkové desky. V prvním upnutí jsem srovnal upínací plochy a vyvrtal díry pro uchycení s šasi. V druhém následně vyfrézoval veškeré funkční rozměry držáku. Ve třetím upnutí jsem pouze odfrézoval upínací části v plastových 3D tištěných čelistech. Popisuji pouze výrobu držáku s dírami pro uchycení rotačního enkodéru. Druhý držák se liší pouze ve vynechání procesu vrtání a závitování díry pro uchycení rotačního enkodéru.

5.4.1. Řezání

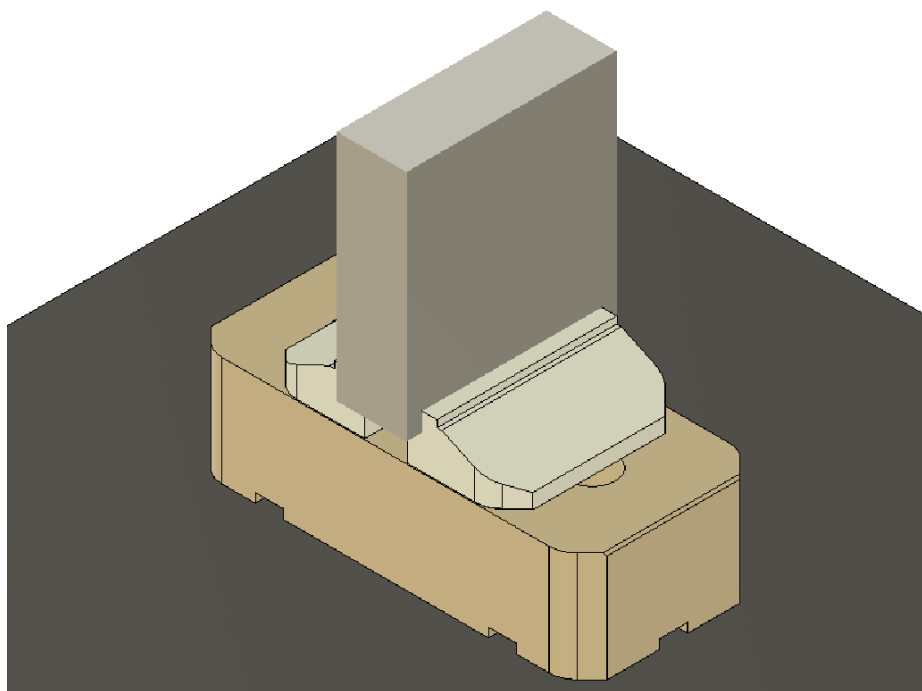
Polotovaru jsem si nařezal z desky materiálu ENAW 7075 T651 100x30x450 mm na pásové pile Pilous ARG 300 plus S. A. F. na rozměr 100x90x30 mm.



Obrázek 5.7 - Schéma upnutí polotovaru držáku při řezání

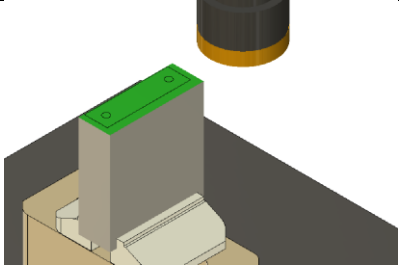
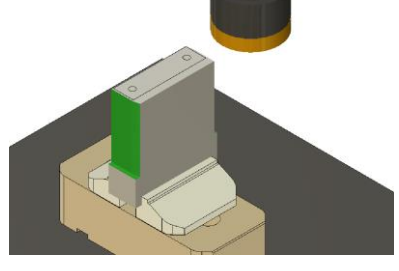
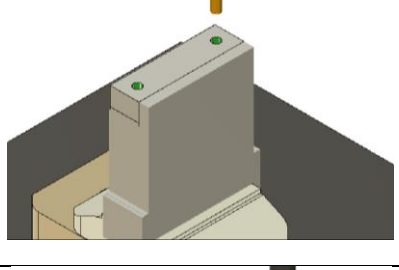
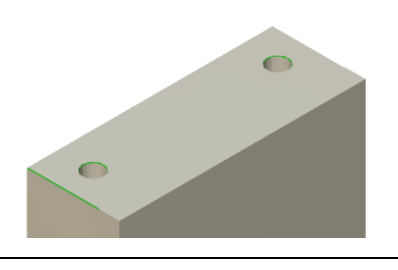
5.4.2. Obrábění na stojato

Nařezaný polotvar jsem v první operaci obrábění upnul na stojato do středícího svěráku Kastr CU-T 77, kde jsem frézovací hlavou srovnal čelo a upínací plochy pro následující operace. Následně jsem vrtákem průměru 6,5 mm vyvrtal díry pro uchycení k šasi, na kterých jsem poté srazil hranu srážěčem hran.



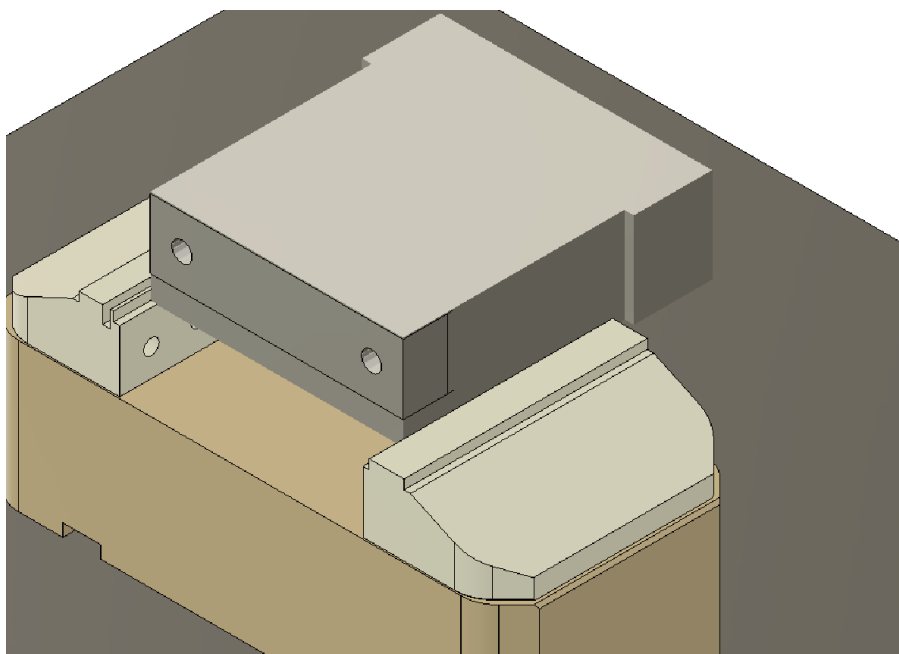
Obrázek 5.8 - Upnutí polotovaru držáku při obrábění na stojato

Tabulka 5.4 - Obrábění na stojato

Poř.	Proces	Haas VF-2		Simulace Fusion 360
1.	Srovnání čela	Nástroj	1	
		n [ot/min]	1200	
		f_z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	8	
		h [mm]	1	
2.	Adaptivní hrubování upínacích ploch	Nástroj	1	
		n [ot/min]	1200	
		f_z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	8	
		h [mm]	8	
3.	Vrtání děr	Nástroj	2	
		n [ot/min]	3950	
		f_z [mm/ot]	0,05	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
4.	Sražení hran	Nástroj	3	
		n [ot/min]	5000	
		f_z [mm/zub]	0,03	
		b [mm]	0,3	
		h [mm]	0,3	

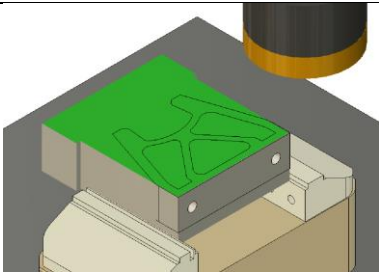
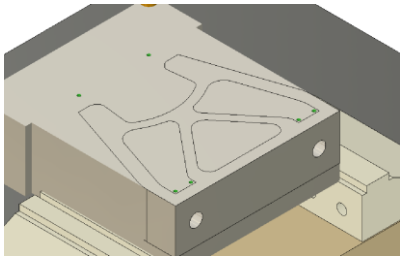
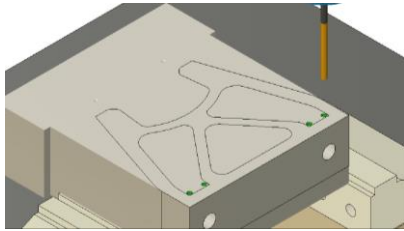
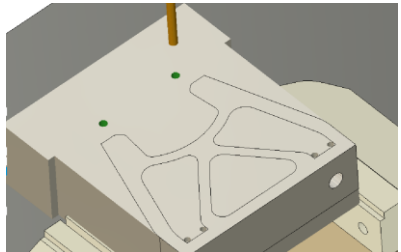
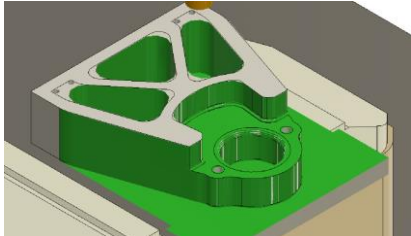
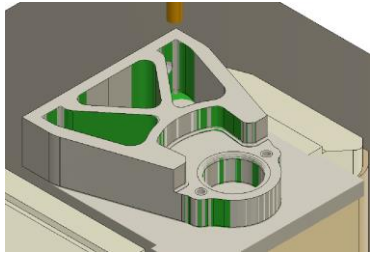
5.4.3. Obrábění funkčních ploch

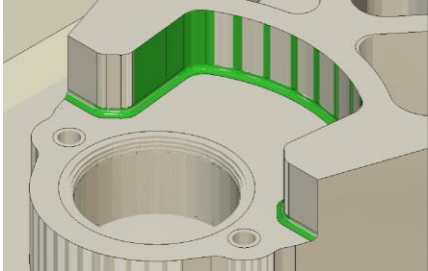
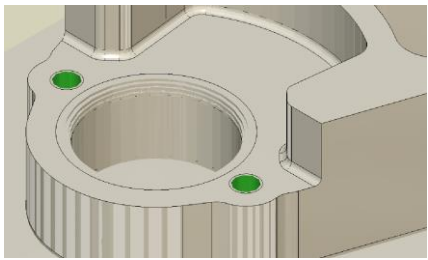
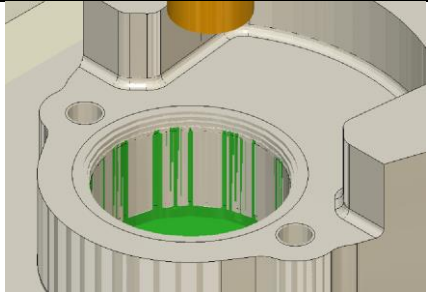
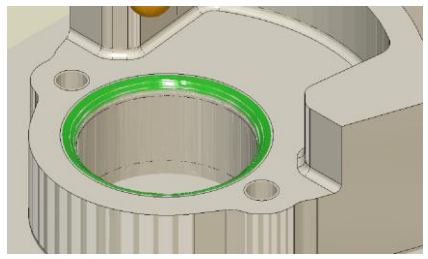
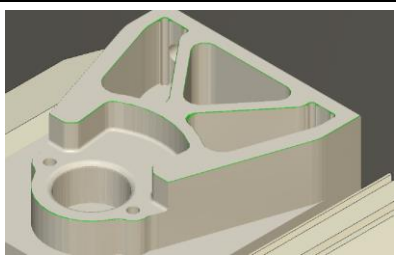
Pro obrábění funkčních ploch jsem upnul díl za obrobené plochy z přechozí operace do svěráku Kastr CU-T 77. Nejprve jsem srovnal frézovací hlavou čelo. Poté jsem předvrtal důlky a vyvrtal díry o průměru 3,3 mm pro závit M4. Dále jsem vrtal do ostrých rohů kapes díry o průměru 2,5 mm, abych měl co možná nejmenší rádius rohu. Válcovou frézou průměru 10 mm jsem adaptivně vyhruboval veškeré kapsy s radiálním přídkem 1 mm. Tyto kapsy jsem dokončil kombinací válcové frézy průměru 6 mm a toroidní frézy o průměru 4 mm s rádiusem rohu 1 mm. Do předvrtaných děr jsem vyřezal závit M4 a frézoval plochu pro kluzné pouzdro s přídkem, tak aby bylo možno sestavu následně sesadit s přechodným uložením. Posledním procesem bylo sražení hran kombinací kulové frézy a srážecí hran.



Obrázek 5.9 - Uchycení polotovaru při frézování funkčních ploch

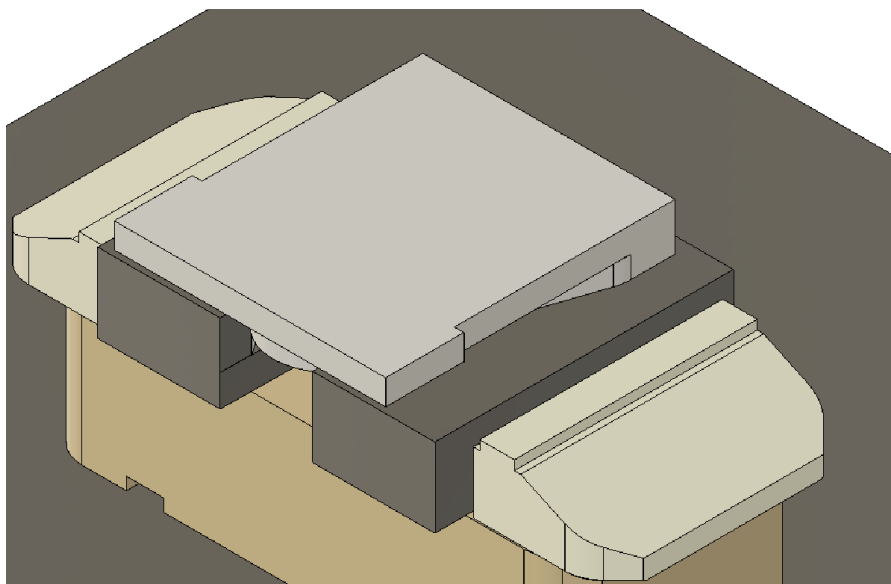
Tabulka 5.5 - Obrábění funkčních ploch

Poř.	Proces	Haas VF-2		Simulace Fusion 360
		Nástroj		
1.	Zarovnání čela	Nástroj	1	
		n [ot/min]	1200	
		f_z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	10	
		h [mm]	8	
2.	Předvrtání důlků	Nástroj	2	
		n [ot/min]	3950	
		f_z [mm/ot]	0,05	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
3.	Vrtání děr	Nástroj	4	
		n [ot/min]	5000	
		f_z [mm/ot]	0,05	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
4.	Vrtání děr	Nástroj	5	
		n [ot/min]	5000	
		f_z [mm/ot]	0,05	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
5.	Adaptivní hrubování kontur	Nástroj	6	
		n [ot/min]	5700	
		f_z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	4	
		h [mm]	8	
6.	Adaptivní dokončení kontur	Nástroj	7	
		n [ot/min]	9500	
		f_z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	2	
		h [mm]	6	

Poř.	Proces	Haas VF-2		Simulace Fusion 360
7.	Dokončení vnitřního rádiusu	Nástroj	8	
		n [ot/min]	9500	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1	
8.	Řezání závitu	Nástroj	8	
		n [ot/min]	500	
		f _z [mm/zub]	-	
		b [mm]	-	
		h [mm]	-	
9.	Kontura díry	Nástroj	6	
		n [ot/min]	5700	
		f _z [mm/zub]	0,02	
		b [mm]	0,5	
		h [mm]	1	
10.	Řádkování vnějšího rádiusu	Nástroj	10	
		n [ot/min]	9000	
		f _z [mm/zub]	0,016	
		b [mm]	1	
		h [mm]	1	
11.	Sražení hran	Nástroj	3	
		n [ot/min]	8000	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	0,3	
		h [mm]	0,3	

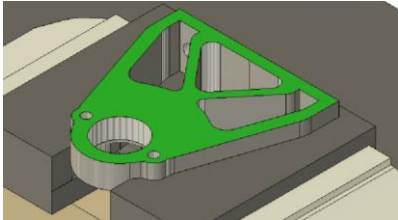
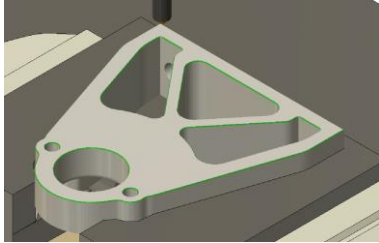
5.4.4. Odfrézování upínací části

V poslední operaci výroby držáků jsem upnul téměř hotový díl do 3D tištěných plastových čelistí z materiálu PET-G. Frézovací hlavou jsem odfrézoval materiál, ze který byl díl upnut a srazil jsem hrany srážecem hran.



Obrázek 5.10 - Uchycení polotovaru při odfrézování upínacích částí

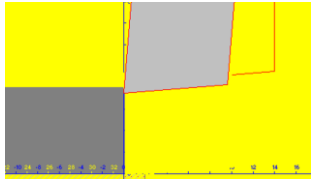
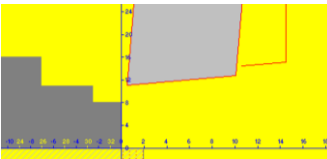
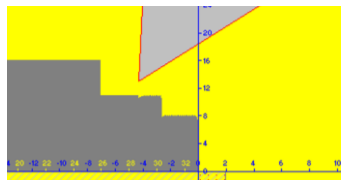
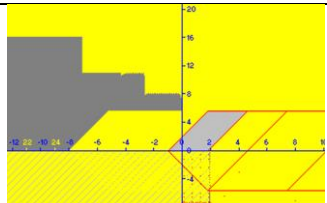
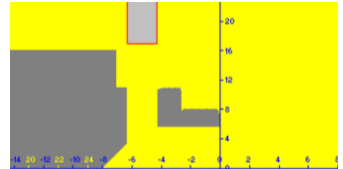
Tabulka 5.6 - Odfrézování upínací části

Poř.	Proces	Haas VF-2		Simulace Fusion 360
1.	Zarovnání čela	Nástroj	1	
		n [ot/min]	1200	
		f _z [mm/zub]	0,1	
		b [mm]	10	
		h [mm]	8	
2.	Sražení hran	Nástroj	3	
		n [ot/min]	8000	
		f _z [mm/zub]	0,05	
		b [mm]	0,3	
		h [mm]	0,3	

5. 5. Vložky

Všechny vložky jsem vyráběl na soustruhu Mikronex SRL 160 CNC z tyče o průměru 16 mm materiálu 42CrMo4 . Jelikož jsou všechny tři typy vložek tvarově stejné, zvolil jsem variantu tvorby pouze jednoho programu, ve kterém jsem následně měnil proměnné rozměry vložek. Program se skládá z několika bloků, kde se každý stará o část výroby. Nejprve jsem vložil polotvar do sklíčidla, následně se nástroj, hrubovací nůž, postavil jako doraz, na který bylo možno dorazit polotovar. Po utažení a odjetí nože do bezpečné vzdálenosti se roztočilo vřeteno a došlo ke srovnání čela a vyhrubování kontury s přídávkem 0,2 mm. Následně kopírovací nůž provedl začištění kontury a zápich. Poté vrták vyvrtal středovou díru. A nakonec upichovák upíchl hotovou vložku.

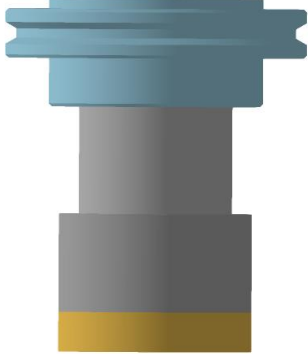

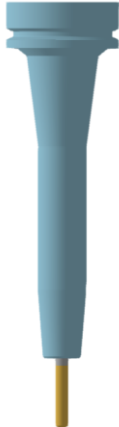
Tabulka 5.7 - Obrábění vložek


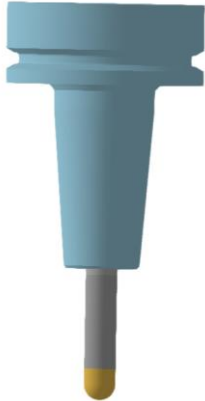
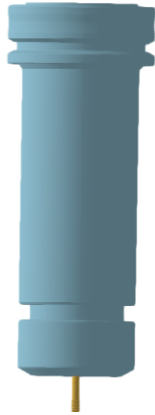

Poř.	Proces	Mikronex SRL 160 CNC		Simulace Mikroprog – s
1.	Srovnání čela	Nástroj	T1	
		n [ot/min]	2500	
		f [mm/min]	200	
		h [mm]	0,5	
2.	Vyhrubování kontury	Nástroj	T1	
		n [ot/min]	2500	
		f [mm/min]	200	
		h [mm]	0,5	
3.	Dokončení kontury se zápichem	Nástroj	T2	
		n [ot/min]	2500	
		f [mm/min]	150	
		h [mm]	0,1	
4.	Vrtání díry	Nástroj	T4/T5	
		n [ot/min]	1500	
		f [mm/min]	100	
		h [mm]		
5.	Upíchnutí dílu	Nástroj	T6	
		n [ot/min]	800	
		f [mm/min]	40	
		h [mm]	2	

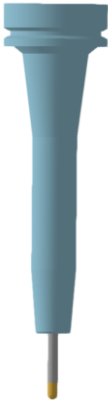
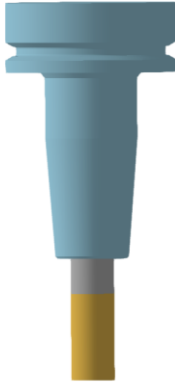

5. 6. Použité nástroje

5.6.1. Okuma MU- 400 V

Tabulka 5.8 - Nástroje Okuma MU -400V

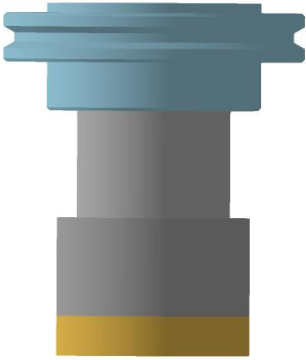
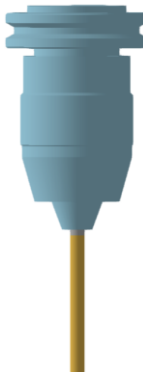

Pozice	Popis		Fusion 360 simulace
1.	Název	63A05R-S90LN16-C	
	Průměr	63 mm	
	Délka	121 mm	
	Vysunutí z držáku	22 mm	
	Břítů	6	
	Rádus rohu	0,8 mm	
	Max hloubka řezu	16 mm	
	Držák	HSK.63 A- FMH2.22.100	
2.	Název	S66210.0XR2.0	
	Průměr	10 mm	
	Délka	72 mm	
	Vysunutí z držáku	35 mm	
	Břítů	4	
	Rádus rohu	2 mm	
	Max hloubka řezu	22 mm	
	Držák	HSK A63 ER32x160	
3.	Název	R4587.0	
	Průměr	7 mm	
	Délka	79 mm	
	Vysunutí z držáku	40 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	36 mm	
	Držák	A63.146.08	

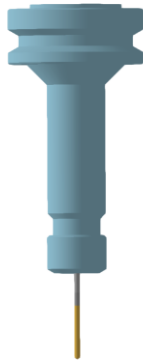
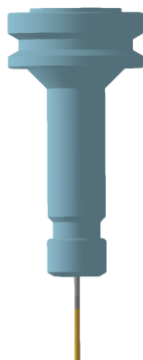
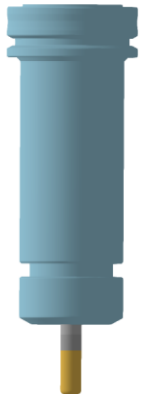
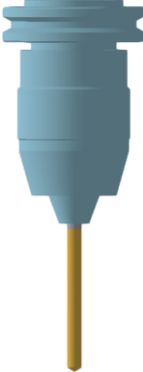
Pozice	Popis		Fusion 360 simulace
4.	Název	R4588.0	
	Průměr	8 mm	
	Délka	79 mm	
	Vysunutí z držáku	50 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	36 mm	
	Držák	A63.142.08	
5.	Název	10B2R75-14A10KERU	
	Průměr	10 mm	
	Délka	75 mm	
	Vysunutí z držáku	42 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	5 mm	
	Max hloubka řezu	10 mm	
	Držák	A63.140.10	
6.	Název	Závitová fréza	
	Průměr	4 mm	
	Délka	30 mm	
	Vysunutí z držáku	15 mm	
	Břítů	3	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	11 mm	
	Držák	HSK A63 ER32x160	
7.	Název	R45810.0	
	Průměr	10 mm	
	Délka	103 mm	
	Vysunutí z držáku	65 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	61 mm	
	Držák	HSK A63 ER32x160	

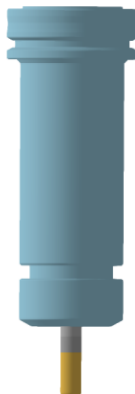
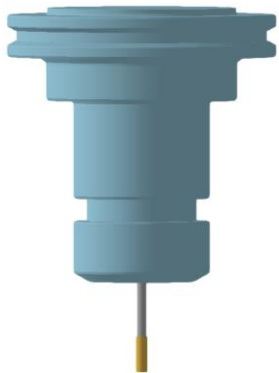

Pozice	Popis		Fusion 360 simulace
8.	Název	S5116.0	
	Průměr	6 mm	
	Délka	75 mm	
	Vysunutí z držáku	40 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	3 mm	
	Max hloubka řezu	10 mm	
	Držák	A63.146.06	
9.	Název	S90316.0	
	Průměr	16 mm	
	Délka	92 mm	
	Vysunutí z držáku	45 mm	
	Břítů	3	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	32 mm	
	Držák	HSK A63 SRKIN6X80	
10.	Název	S6148.0	
	Průměr	8 mm	
	Délka	100 m	
	Vysunutí z držáku	50 mm	
	Břítů	3	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	40 mm	
	Držák	HSK A63 ER32x160	

5.6.2. Haas VF-2

Tabulka 5.9 - Nástroje Haas VF -2

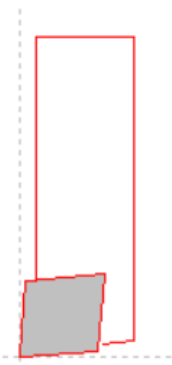
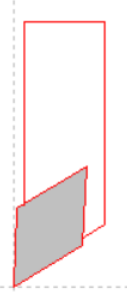
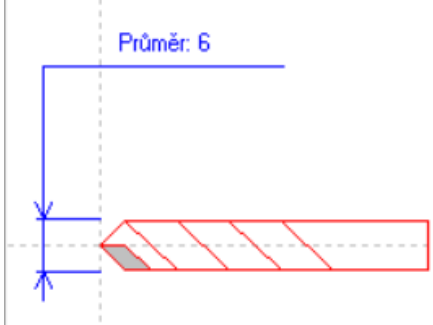
Pozice	Popis		Fusion 360 simulace
1.	Název	63A05R-S90LN16-C	
	Průměr	63 mm	
	Délka	121 mm	
	Vysunutí z držáku	22 mm	
	Břitů	6	
	Rádus rohu	0,8 mm	
	Max hloubka řezu	16 mm	
	Držák		
2.	Název	R4586.4	
	Průměr	6.4 mm	
	Délka	70 mm	
	Vysunutí z držáku	45 mm	
	Břitů	2	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	40 mm	
	Držák	BT40 NPU13 NC	
3.	Název	S7404.0	
	Průměr	4 mm	
	Délka	50 mm	
	Vysunutí z držáku	30 mm	
	Břitů	2	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	1 mm	
	Držák	BT40 ER25	

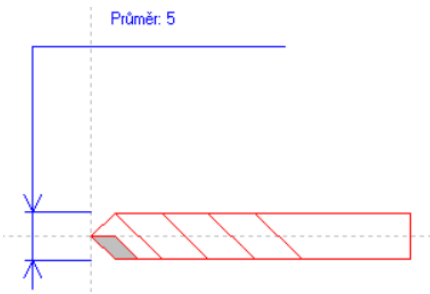
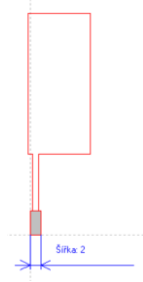
Pozice	Popis		Fusion 360 simulace
4.	Název	R4582.5	
	Průměr	2.5 mm	
	Délka	40 mm	
	Vysunutí z držáku	30 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	25 mm	
	Držák	BT40 ER25	
5.	Název	R4583.3	
	Průměr	3.3 mm	
	Délka	40 mm	
	Vysunutí z držáku	30 mm	
	Břítů	2	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	25 mm	
	Držák	BT40 ER25	
6.	Název	3ALC-100-10-100	
	Průměr	10 mm	
	Délka	100 mm	
	Vysunutí z držáku	70 mm	
	Břítů	4	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	35 mm	
	Držák	BT40 ER25	
7.	Název	S6146.0	
	Průměr	6 mm	
	Délka	75 mm	
	Vysunutí z držáku	40 mm	
	Břítů	3	
	Rádus rohu	0 mm	
	Max hloubka řezu	31 mm	
	Držák	BT40 NPU13 NC	

Pozice	Popis		Fusion 360 simulace
8.	Název	S2624.0XR1.0	
	Průměr	4 mm	
	Délka	57 mm	
	Vysunutí z držáku	30 mm	
	Břítů	3	
	Rádus rohu	1 mm	
	Max hloubka řezu	12 mm	
	Držák	BT40 ER25	
9.	Název	E297M4	
	Průměr	4 mm	
	Délka	62 mm	
	Vysunutí z držáku	40 mm	
	Břítů	4	
	Rádus rohu	0	
	Max hloubka řezu	21 mm	
	Držák	BT40 ER25	
10.	Název	S5116.0	
	Průměr	6 mm	
	Délka	80 mm	
	Vysunutí z držáku	40 mm	
	Břítů	3	
	Rádus rohu	3 mm	
	Max hloubka řezu	10 mm	
	Držák	BT40 ER25	

5.6.1. Mikronex SRL 160 CNC

Tabulka 5.10 Nástroje Mikronex SRL 160 CNC

Pozice	Popis		Mikroprog-s simulace
1.	Název	SCFCL 1212 F 09	
	Destička	CCMT 09T302E-FM:T8330	
	Funkční výška	12 mm	
	Funkční šířka	12 mm	
	Funkční délka	125 mm	
	Rádus rohu	0,4 mm	
2.	Název	SDJCL 1212 K 11-S	
	Destička	DCMT 11T308E-UR:T8315	
	Funkční výška	12 mm	
	Funkční šířka	12 mm	
	Funkční délka	125 mm	
	Rádus rohu	0,4 mm	
3.	Název	R4586.0	
	Průměr	6 mm	
	Délka	57 mm	
	Vysunutí z držáku	35 mm	
	Břítů	2	
	Max hloubka řezu	31 mm	
	Držák	Kostka pro upínání osových nástrojů	

Pozice	Popis		Mikroprog-s simulace
4.	Název	R4585.0	
	Průměr	5 mm	
	Délka	56 mm	
	Vysunutí z držáku	35 mm	
	Břitů	2	
	Max hloubka řezu	30 mm	
	Držák	Kostka pro upínání osových nástrojů	
6.	Název	XLCFL 1612 H 02	
	Destička	LFUX 020802TN:T8330	
	Funkční výška	16 mm	
	Funkční šířka	16 mm	
	Funkční délka	100 mm	
	Rádus rohu	0,2 mm	

5. 7. Použité stroje

5.7.1. Pilous ARG 300 plus S. A. F. [20]

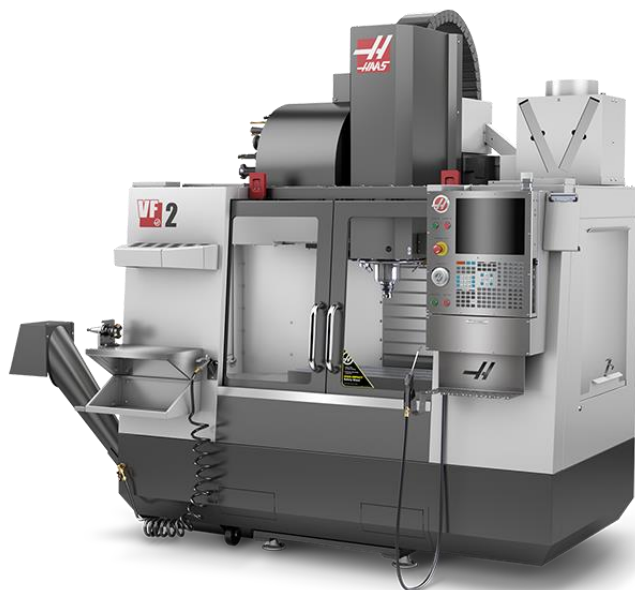


Obrázek 5.11 - Pilous ARG 300 plus S.A.F.[20]

Tabulka 5.11 - Parametry Pilous ARG 300 plus S.A.F.

Technická data: PILOUS ARG 300 plus S. A. F.	
Motory:	
Hlavní motor pásové pily:	2,2 kW
Motor čerpadla pásové pily:	0,05 kW
Motor hydraulického agregátu:	0,55 kW
Rozměry:	
Rozměry pásové pily (min.):	1740 x 950 x 1560 mm
Rozměry pásové pily (max.):	2190 x 1870 x 2050 mm
Pracovní výška svěráku pily:	910 mm
Hmotnost pásové pily:	690 kg
Pás:	
Rozměry pilového pásu:	3150x 27 x 0,9 mm
Rychlost pilového pásu:	15—90 m/min
Kapalina:	
Nádrž chladící kapaliny:	cca 15 l
Olej v hydraulickém systému pily:	cca 25 l

5.7.2. Haas VF-2 [21]



Obrázek 5.12 - Svislá frézka Haas VF-2 [21]

Tabulka 5.12 - technická data Haas VF-2

Technická data: HAAS VF-2	
Dráhy pojezdů:	
Osa X	762 mm
Osa Y	406 mm
Osa Z	508 mm
Vřeteno:	
Max. výkon	22,4 kW
Max. rychlost	8100 ot/min
Max. moment	122 Nm
Rozměry stolu:	
Délka	914 mm
Šířka	365 mm
Max. zatížení stolu	1391 kg
Rychlosti posuvů:	
Max. obrábění	16,5 m/min
Rychloposuv	25,4 m/min
Zásobník nástrojů:	
Kapacita	20
Max. průměr nástroje	89 mm
Max. hmotnost nástroje	5,4 kg
Rozměry:	
Rozměry	2490x2320x2570 mm
Hmotnost	3590 kg

5.7.3. Okuma MU-400 V [22]



Obrázek 5.13 – Pěti osé frézovací centrum Okuma MU-400 V [22]

Tabulka 5.13 - Technická data Okuma MU-400 V

Technická data: Okuma MU-400 V	
Dráhy pojezdů:	
Osa X	762 mm
Osa Y	460 mm
Osa Z	460 mm
Osa A	20 až -110 °
Osa C	360°
Vřeteno:	
Max. výkon	22 kW
Max. rychlost	15 000 ot/min
Parametry stolu:	
Průměr	400 mm
Max. otáčky	50 ot/min
Max. zatížení stolu	300 kg
Rychlosti posuvů:	
Max. prac. posuv	32 m/min
Rychloposuv	40 mm/min
Rychloposuv	18 000°/min
Zásobník nástrojů:	
Kapacita	32
Max. průměr nástroje	90 mm
Max. hmotnost nástroje	8 kg
Max délka nástroje	240 mm
Rozměry:	
Rozměry	2946x2160x2810 mm
Hmotnost	7700 kg

5.7.4. Mikronex SRL 160 CNC [23]



Obrázek 5.14 - CNC soustruh Mikronex SRL 160 CNC [23]

Tabulka 5.14 - Technická data Mikronex SRL 160 CNC

Technická data: Mikronex SRL 160 CNC	
Oběžný průměr na ložiskem	200 mm
Oběžný průměr nad ložem	160 mm
Délka obrábění maximálně	300 mm
Délka mezi hroty (dle upínače) max.	300 mm
Průměr tyčového materiálu	24 mm
Průměr tyče při použití kleštinového up. 20 mm	20 mm
Max. otáčky vřetene	5000 ot/min
Opakovatelná přesnost	0,004 mm
Max. rychlost posuvu	5000 mm/min
Půdorysná plocha stroje (bez ramene ŘS)	1030 x 730 mm
Celková hmotnost stroje	400 kg
Napájecí napětí	3x400 V
Výkon stroje	4 kW

6. Výrobní proces a dokumentace

6. 1. Řezání polotovarů

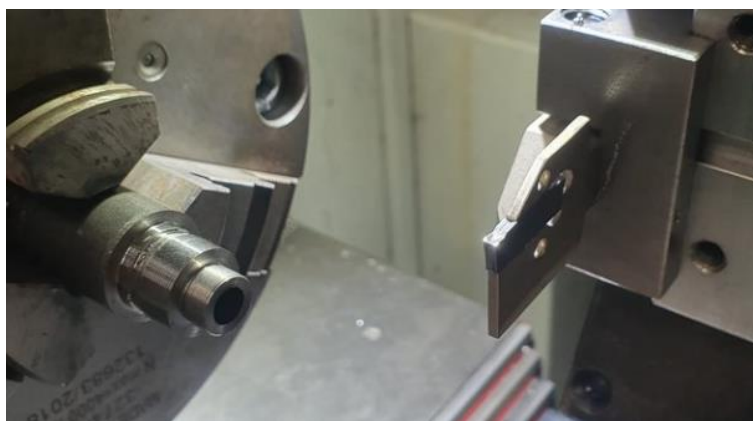
Na pásové pile jsem nadělil nejprve hliníkový přířez pro výrobu držáků, následně tyč pro výrobu vložek a tyč pro výrobu vahadel na požadovaný rozměr. V průběhu řezání rozlehlých polotovarů pro výrobu vahadel bylo nutné z důvodu nadměrného zahřívání změnit přítlak karbidových vodících ploch pilového listu.



Obrázek 6.1 - Řezání hliníkové desky pro výrobu držáků

6. 2. Výroba vložek

Jako první jsem vyráběl vložky na CNC soustruhu, do vřetene jsem vložil tyč o průměru 16 mm a délce 400 mm. Spustil jsem program začínající najetím těla hrubovacího nože jako dorazu pro založení polotovaru. Na tento doraz jsem dorazil zmíněnou tyč, utáhl sklíčidlo a spustil samotné obrábění. Pro přesnou výrobu jsem upravil korekci nástrojů na prvotních seřizovacích kusech. Po seřízení již stroj vyrobil všechny typy vložek přesně jde požadovaných rozměrů.



Obrázek 6.2 - Vložka před upíchnutím

6. 3. Výroba držáků

Do CNC frézky Haas VF-2 jsem upnul a vyrovnal středící svěrák Kastr CU-T 77, ve kterém jsem zaměřil a obrobit držáky na stojato dle zvoleného postupu. V průběhu obrábění jsem snížil rychlost posuvu nástroje, aby nedocházelo k vibracím v řezu.



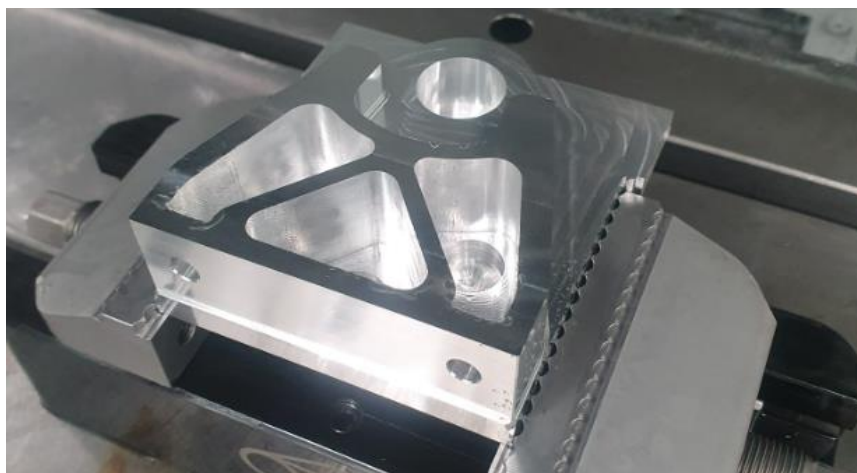
Obrázek 6.3 - Zaměření obrobku sondou



Obrázek 6.4 - Držák obrobený na stojato

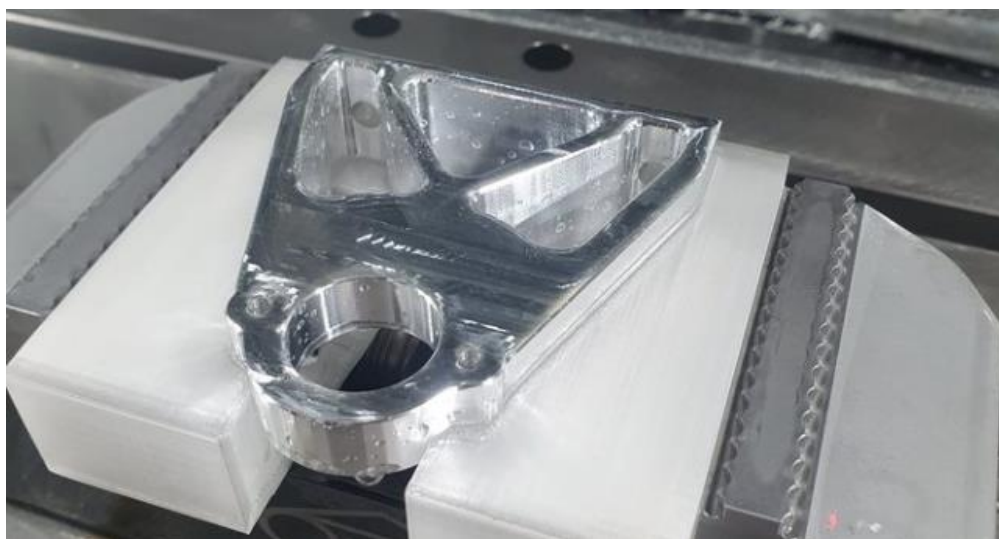
Po obrobení na stojato následovalo obrábění funkčních ploch vahadla. První kus jsem spustil dle zvoleného postupu, bohužel se ukázal jako ne příliš optimální.

Přidal jsem, proto cyklus pro předvrtání děr všech kapes, tak aby se nemusely frézy zavrtávat. Druhou změnou bylo přidání cyklu obrábění kontury jak do kapes, tak na vnější povrch pro zajištění přesnějších rozměrů. Kontura byla nutná z důvodu, že adaptivní cyklus nedisponuje funkcí dokončovacího řezu a bez něj byly křivky kontur rozdělené pouze na několik mnohoúhelníků v závislosti na nastavení cyklu. Třetí změnou bylo posunutí cyklu vrtání děr 3,3 mm až za adaptivní hrubování kontury. Tuto změnu jsem provedl z důvodu osazení na vrtáku, u kterého byla možná kolize s obrobkem.



Obrázek 6.5 - Dokončené funkční plochy držáku vahadla

Poslední operací držáku vahadla bylo odfrézování upínací části. Abych mohl díl pevně upnout a nedošlo při tom k jeho poškození, bylo výhodné využít měkkých plastových čelistí z materiálu PET-G vyrobených metodou FDM 3D tisku. Tyto čelisti jsem přišrouboval čtyřmi imbusovými šrouby M6 k centrálnímu upínači a upnul do nich držák vahadla. Na takto upnutém díle jsem odfrézoval čelo. Před použitím srážече hran na kontury jsem vždy provedl nové zaměření dílu, jelikož původní zaměření nebylo vždy přesné z důvodu použití zakusovacích čelistí.



Obrázek 6.6 - Do obroběný držák vahadla

Při pokusu o vložení matic do tvarových zámků držáku jsem zjistil, že i přes použití navrtání rohu je rádius stále moc velký, a tudíž bylo nutné každý kus upravit ručně pilníkem. Při výrobě více kusů by připadalo v úvahu využití obrážčky.



Obrázek 6.7 - Dokončené držáky vahadel

6. 4. Výroba vahadel

Po dokončení držáků jsem namontoval a vyrovnal velký strojní svěrák do frézky Haas VF-2. Jelikož jsem potřeboval upínat pouze za 25 mm, kdežto celková hloubka svěráku byla 60 mm, musel jsem polotovar podložit. Pro podložení jsem využil kombinaci čtyř obdélníkových polotovarů Radeco. Při dotažení svěráku vznikla mezera u jednoho z čel vlivem podřezání na pile a bylo tak nutné čela srovnat. To jsem udělal na soustruhu TOS SV 18RA, tak že jsem si vždy upnul polotovar do sklíčidla jen zlehka. Následně jsem provedl vyrovnání gumovou paličkou v kombinaci s úchylkoměrem. Vyrovnaný polotovar jsem poté dotáhl a zarovnal čelo.



Obrázek 6.8 - Zarovnávaní čela na polotovarech vahadel

Zarovnaný polotovar jsem opět upnul do strojního svěráku do frézky. Tentokrát již šel doklepat gumovou paličkou na podložky a tím tak vyrovnat.



Obrázek 6.9 - Zarovnaný polotovar vahadel

Upnutý polotovár jsem zaměřil obrobkovou sondou a vyhruboval dle předem připraveného programu.



Obrázek 6.10 - Předhrubované vahadlo

Po předhrubování jsem upnul středící svěrák do frézky Okuma MU-400 V, do kterého jsem následně upnul připravený díl a začal s hrubováním všech kontur vahadla z druhé strany.



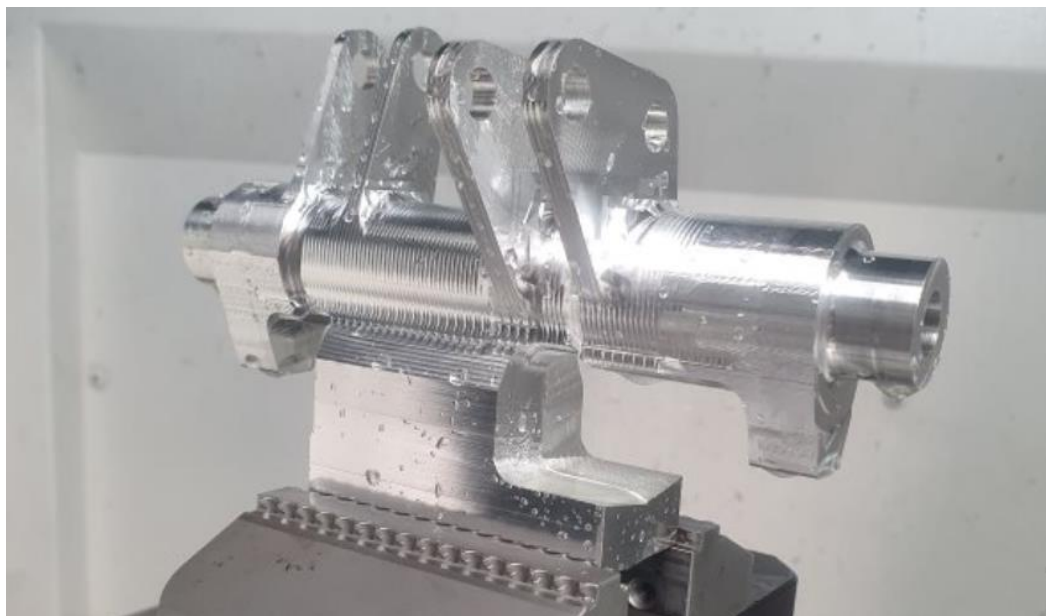
Obrázek 6.11 – Předhrubované vahadlo upnuté do stroje Okuma

Na vyhrubovaném vahadle jsem nejprve frézováním dokončil plochy pro kluzná pouzdra. Následně jsem v několika natočeních polotovaru vrtal díry pro vložky a taktéž centrální odlehčovací díru se závitem.



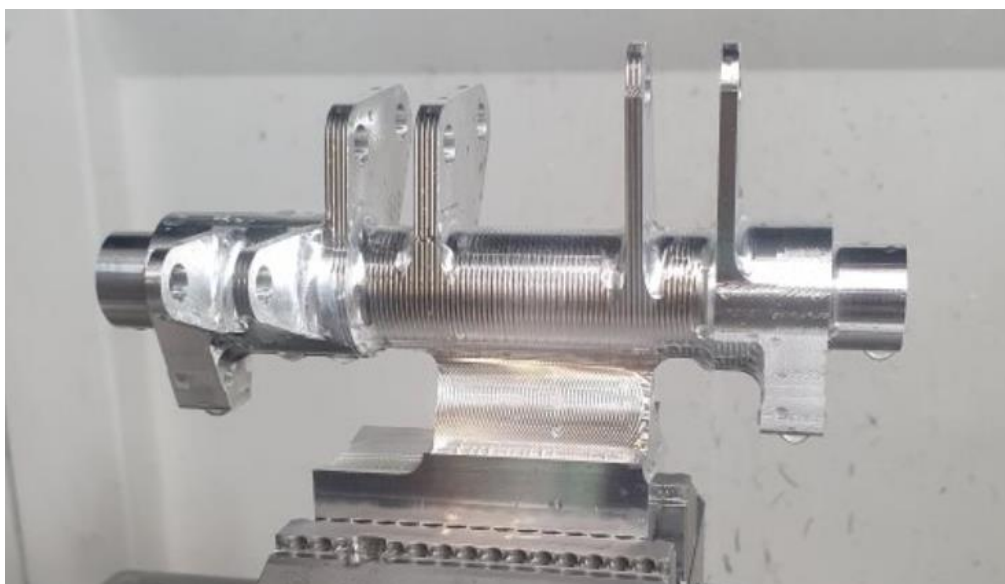
Obrázek 6.12 - Vyhrubované a vyvrtané vahadlo

Po vrtání děr jsem již mohl obrobít všechny držáky dlouhou válcovou frézou. Po kterém následovalo zahlazení povrchu kulovou frézou.



Obrázek 6.13 - Obrobené vahadlo na upínacím bloku

Nakonec bylo potřebné odfrézovat celý upínací blok, aby tak vzniklo hotové vahadlo.



Obrázek 6.14 - Obrobené vahadlo na planžetě

Po dokončení frézování stačilo rukou vahadlo odlomit z planžety, jejichž zbytky jsem nakonec nefrézoval, ale osoustružil mezi hroty na konvenčním soustruhu. Soustružení se totiž ukázalo jako rychlejší a jednodušší varianta. Po obrobení planžety jsem nefunkční plochy pískoval pro sjednocení textury povrchu a vznikla tak hotová vahadla.



Obrázek 6.15 - hotová vahadla

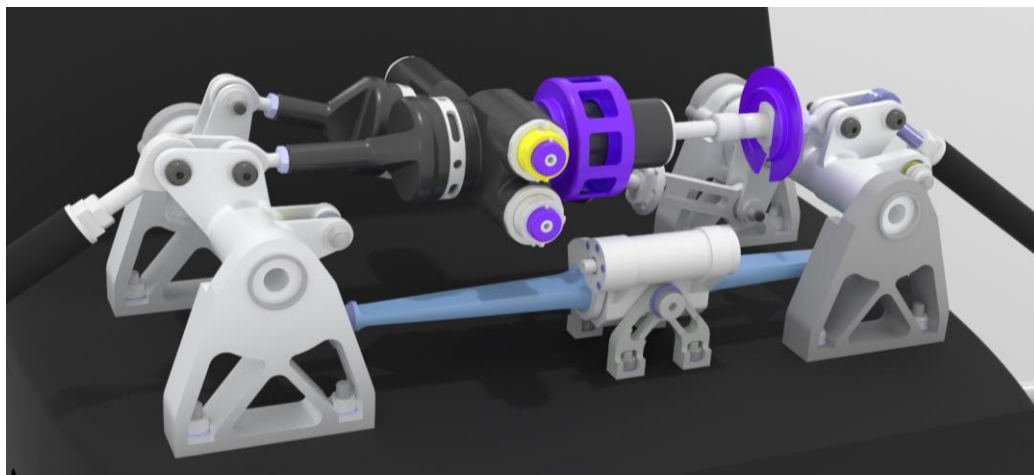
7. Závěr

Cílem této práce byl návrh a výroba systému vahadel odděleného odpružení pro vůz studentské elektrické formule pro rok 2024. Sestava byla navrhovaná s důrazem na co nejnižší hmotnost a vyrobitelnost v halových laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie.

Sestavu jsem navrhl v souladu s pravidly soutěže Formula student. Nejprve jsem analyzoval zadanou kinematiku a silové účinky. Následně jsem se zabýval porovnáním výrobních metod a jednotlivých materiálů. Pro výrobu jsem zvolil technologii obrábění z materiálu ENAW 7570 T651 v místech šroubů vyvločkovanou vložkami z materiálu 42CrMo4. Pro zvolenou technologii a materiál jsem navrhl sestavu dílů splňující požadované mechanické vlastnosti. Následně jsem celou sestavu pevnostně simuloval v programu Ansys mechanical ve třech zátěžných stavech a ověřil tak nepřekročení meze kluzu v žádném místě sestavy. Jedinou výjimkou je havarijní stav bezpečnostních dorazů, kde v případě jejich použití dojde k trvalé plastické deformaci.

Pro všechny navržené díly jsem vytvořil detailní výrobní postup, na základě, kterého jsem všechny díly vyrobil v halových laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Celkem jsem takto vyrobil dvojici vahadel, čtveřici držáků a čtrnáct vložek.

Po dokončení své práce jsem nechal na všech dílech hliníkových dílech provést černé eloxování a na ocelových vložkách černění. Následně jsem celou sestavu složil a nyní již slouží na voze CTU.24 týmu eForce.



Obrázek 7.1 - Render systému vahadel na voze CTU.24

8. Bibliografie

- [1] CTU CarTech. Online. CTU CarTech – Formula Student Team. 2022. Dostupné z: <https://ctucartech.cz/>. [cit. 2023-11-11].
- [2] EForce FEE Prague Formula. Online. EForce FEE Prague Formula. 2021. Dostupné z: eforce.cvut.cz. [cit. 2023-11-11].
- [3] FS.15 & FSE.12 [@ctucartech]. Online. Dostupné z: Instagram, https://www.instagram.com/p/CyQ-pyUsuWh/?utm_source=ig_web_button_share_sheet&igshid=MzRIODBiNWFIZA==. [cit. 2023-11-11].
- [4] OPENAI. *Decoupled roll-heave suspension*. Online. 2023. Dostupné z: OpenAI, <https://chat.openai.com/c/72702283-9895-4830-97e2-4e21ce8af88f>. [cit. 2024-05-22].
- [5] NENALEZENÝ AUTOR. *Mercedes AMG Project One - Pinterest*. Online. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/356769601721993630/>. [cit. 2024-03-14].
- [6] *Formula Student Rules 2024*. Online PDF. 2023. Dostupné také z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.0.pdf. (vlastní překlad autora práce).
- [7] BUREŠ, Jiří. *Hustota pevných látek - fyzikální tabulky objemové hmotnosti*. Online. <https://www.converter.cz/>. 2002. Dostupné z: <https://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>. [cit. 2023-11-12].
- [8] SMITHS METAL CENTRES. *Titanium Alloy Ti-6Al-4V (Grade 5)*. Online PDF. 2023.
- [9] ALUNET.cz. Online. EN AW-7075 T6 (AlZnMgCu1,5). 2023. Dostupné z: <https://www.alunet.cz/ENAW-7075>. [cit. 2023-11-12].
- [10] BOHDAN BOLZANO, S.R.O. *Přehled vlastností oceli 42CrMo4*. Online PDF. 2020.
- [11] PŘESNÉ ODLITKY s.r.o. Online. <https://www.presne-odlitky.com/>. 2021. Dostupné z: <https://www.presne-odlitky.com/technologie.html>. [cit. 2023-11-12].
- [12] ALUCAST, S.R.O. *Alucast, s.r.o. | Výroba přesných odlitků na zakázku - Uherské Hradiště*. Online. 2023. Dostupné z: <https://alucast.cz/>. [cit. 2023-11-12].
- [13] DOSTÁL, Marek. *Suspension Design :: marekdostal*. Online. In: [Marekdostal.com](http://marekdostal.com). 2022. Dostupné z: <https://www.marekdostal.com/suspension-design/>. [cit. 2023-11-13].
- [14] SAE INTERNATIONAL (SAE). SAE AMS-STD-2175, *Odlitky, klasifikace a kontrola*. A. 2003.
- [15] LUXFER MEL TECHNOLOGIES. *Luxfer-MEL-Technologies-Elektron-21.pdf*. Online PDF. 2018.
- [16] SLM SOLUTION GROUP AG. *MDS_Al-Alloy_AlSi7Mg0_6_0219_EN.pdf: Material Data Sheet Al-Alloy AlSi7Mg0,6*. Online PDF. 2018.
- [17] MATTOS, J. J. I., UEHARA, A., SATO, M. A FERREIRA. *Fatigue Properties and Micromechanism of Fracture of an AlSiMg0.6 Cast Alloy Used in Diesel Engine Cylinder Head*. 0.1016/j.proeng.2010.03.082. Procedia Engineering, 2010.
- [18] RENISHAW PLC. *Co je aditivní výroba z kovů?* Online. Renishaw.cz. 2023. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/co-je-aditivni-vyroba-z-kovu--15240>. [cit. 2023-11-12].
- [19] SKF GROUP. *Katalog SKF*. PDF. PUB BU/P1 17000/1 CS. 2019.

- [20] WEB REVOLUTION S.R.O. *LEGNEX.CZ | Pásová pila PILOUS ARG 300 plus S.A.F.* Online. LEGNEX.CZ. 2024. Dostupné z: <https://www.legnex.cz/pasova-pila-pilous-arg-300-plus-s-a-f>. [cit. 2024-04-07].
- [21] HAAS CNC. *VF-2*. Online. Stroje s řízením CNC Haas. 2024. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>. [cit. 2024-04-07].
- [22] MAXSOFT.CZ - MARTIN@MAXSOFT.CZ. *Okuma MU-400V II - Okuma - Katalog - Misan*. Online. Misan. 2024. Dostupné z: <https://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-400v-ii-okuma-mu-400v-ii/>. [cit. 2024-04-07].
- [23] MIKRONEX S.R.O. *CNC SOUSTRUHY*. Online. Mikronex s.r.o. 2024. Dostupné z: <https://mikronex.cz/nabidka/cnc-soustruhy/>. [cit. 2024-04-07].

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - umístění vahadel na voze CTU.24.....	2
Obrázek 1.2 - Navrhované díly.....	2
Obrázek 1.3 -Formule FS.15 a FSE.12 ze sezóny 2023 [3]	4
Obrázek 1.4 - Systém odděleného odpružení vozu Mercedes AMG project one [5].....	5
Obrázek 2.1 - 3D model obráběných vahadel FS.15 na platformě.....	7
Obrázek 2.2 – Systém odděleného odpružení s odlívanými vahadly [13]	9
Obrázek 2.3 - Uchycení hořčikového odlitku v tomografu	10
Obrázek 2.4 - Výsledek skenování dílů.....	11
Obrázek 3.1 - Kinematika zadního odděleného odpružen vozu CTU24.....	13
Obrázek 3.2 – Zátěžný stav vahadla pro maximální krut.....	14
Obrázek 3.3 - Zátěžný stav stlačení kola	14
Obrázek 3.4 - Zátěžný stav odskočení kola	14
Obrázek 4.1 - Model pro topologickou optimalizaci držáku vahadla	17
Obrázek 4.2 - Výsledek topologické optimalizace držáku vahadla.....	17
Obrázek 4.3 - první iterace držáku vahadla	18
Obrázek 4.4 - Výsledek pevnostní simulace finální iterace držáku	18
Obrázek 4.5 - Detail na prostor tvarového zámku držáku	19
Obrázek 4.6 - Finální podoba držáků vahadla, vlevo zadní, vpravo přední	19
Obrázek 4.7 - Vstupní model topologické optimalizace okrajovými podmínkami.....	20
Obrázek 4.8 - Mezivýsledek topologické optimalizace odlitku vahadla.....	21
Obrázek 4.9 - První iterace levého obráběného vahadla	22
Obrázek 4.10 - Finální verze levého vahadla	22
Obrázek 4.11 - Finální verze Pravého vahadla.....	23
Obrázek 4.12 - Detail na problémová místa vahadel.....	24
Obrázek 4.13 - Definice zátěžných stavů do simulace	25
Obrázek 4.14 - Ukázka výsledku simulace sestavy.....	25
Obrázek 5.1 - Testovací část vahadla	26
Obrázek 5.2 - Plánovaný postup na soustruhu	26
Obrázek 5.3 - Maximální výška posuvu v ose Y.....	27
Obrázek 5.4 - Vahadlo schéma upnutí pro řezání	28
Obrázek 5.5 - Upnutí vahadla pro před hrubování	29
Obrázek 5.6 - Simulace vahadla upnutého ve středícím svěráku	30
Obrázek 5.7 - Schéma upnutí polotovaru držáku při řezání	37
Obrázek 5.8 - Upnutí polotovaru držáku při obrábění na stojato	38
Obrázek 5.9 - Uchycení polotovaru při frézování funkčních ploch	40
Obrázek 5.10 - Uchycení polotovaru při odfrézování upínacích částí	43
Obrázek 5.11 - Pilous ARG 300 plus S.A.F.[20]	53
Obrázek 5.12 - Svislá frézka Haas VF-2 [21]	54
Obrázek 5.13 – Pětiosé frézovací centrum Okuma MU-400 V [22]	55
Obrázek 5.14 - CNC soustruh Mikronex SRL 160 CNC [23]	56
Obrázek 6.1 - Řezání hliníkové desky pro výrobu držáků	57
Obrázek 6.2 - Vložka před upíchnutím	57
Obrázek 6.3 - Zaměření obrobku sondou	58
Obrázek 6.4 - Držák obrobený na stojato	58
Obrázek 6.5 - Dokončené funkční plochy držáku vahadla.....	58
Obrázek 6.6 - Do obrobený držák vahadla.....	59
Obrázek 6.7 - Dokončené držáky vahadel.....	59
Obrázek 6.8 - Zarovnávání čela na polotovarech vahadel.....	60

Obrázek 6.9 - Zarovnaný polotovár vahadel	60
Obrázek 6.10 - Předhrubované vahadlo	61
Obrázek 6.11 – Předhrubované vahadlo upnuté do stroje Okuma	61
Obrázek 6.12 - Vyhrubované a vyvrtané vahadlo	62
Obrázek 6.13 - Obrobené vahadlo na upínacím bloku	62
Obrázek 6.14 - Obrobené vahadlo na planžetě.....	63
Obrázek 6.15 - hotová vahadla	63
Obrázek 7.1 - Render systému vahadel na voze CTU.24.....	64

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 - porovnání vlastností obráběných materiálů [7][8][9][10].....	8
Tabulka 2.2 - Porovnání odlévaných materiálů [7] [15][16][17][12]	11
Tabulka 3.1 - Maximální síly v sestavě.....	13
Tabulka 3.2 - Vektorové složky sil pro jednotlivé zátěžné stavy pravého vahadla.....	15
Tabulka 3.3 - Vektorové složky sil pro jednotlivé zátěžné stavy levého vahadla.....	15
Tabulka 4.1 - Porovnání ložisek [19]	16
Tabulka 5.1 - Operace před hrubováním upínacího hranolu a vaček	29
Tabulka 5.2 - Obrábění vahadla v pěti osách	31
Tabulka 5.3 - Obrábění planžety	36
Tabulka 5.4 - Obrábění na stojato	39
Tabulka 5.5 - Obrábění funkčních ploch	41
Tabulka 5.6 - Odfrézování upínací části.....	43
Tabulka 5.7 - Obrábění vložek	44
Tabulka 5.8 - Nástroje Okuma MU -400V	45
Tabulka 5.9 - Nástroje Haas VF -2.....	48
Tabulka 5.10 Nástroje Mikronex SRL 160 CNC	51
Tabulka 5.11 - Parametry Pilous ARG 300 plus S.A.F.....	53
Tabulka 5.12 - technická data Haas VF-2	54
Tabulka 5.13 - Technická data Okuma MU-400 V	55
Tabulka 5.14 - Technická data Mikronex SRL 160 CNC	56

Seznam tištěných příloh

1. Výkres CTU-24-DECR-2
2. Výkres CTU-24-DECR-3
3. Výkres CTU-24-DECR-4
4. Výkres CTU-24-DECR-5
5. Výkres CTU-24-DECR-7
6. Výkres CTU-24-DECR-8
7. Výkres CTU-24-DECR-9

Seznam příloh na přiloženém CD

1. Levé vahadlo max krut report
2. Levé vahadlo odskočení report
3. Levé vahadlo stlačení report
4. Pravé vahadlo max krut report
5. Pravé vahadlo odskočení report
6. Pravé vahadlo stlačení report
7. Lisování vložek report KissSoft
8. Kluzná pouzdra report SKF bearing select