

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta designu a umění Ladislava Sutnara

Bakalářská práce

# DESIGN OBRÁBĚCÍHO CENTRA

Ondřej Plášil

Plzeň 2016

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta designu a umění Ladislava Sutnara

Katedra Designu  
Studijní program Design  
Studijní obor Design  
Specializace Průmyslový design

Bakalářská práce

# DESIGN OBRÁBĚCÍHO CENTRA

Ondřej Plášil

Vedoucí práce: Ing. Eva Kubec Krónerová, Ph.D.  
Katedra konstruování strojů  
Fakulta Strojní  
Západočeská univerzita v Plzni

Umělecký konzultant: MgA. Zdeněk Veverka  
Katedra designu  
Fakulta designu a umění Ladislava Sutnara  
Západočeská univerzita v Plzni

Plzeň 2016

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci zpracoval samostatně a použil jen uvedených pramenů a literatury.

Plzeň, květen 2016

.....

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Evě Kubec Krónerové Ph.D. odborné vedení mé práce, vstřícný přístup a cenné rady týkající se výrobních strojů. Stejně tak bych rád poděkoval uměleckému konzultantovi panu MgA. Zdeňku Veverkovi za rady ohledně estetiky stroje.

Nesmím zapomenout ani na přátele, kteří mi pomohli v oblastech, kde mé znalosti nejsou tak hluboké jako jejich. Rád bych tedy poděkoval Vojtovi Štěpánkovi a Bc. Milanu Drbalovi.

# OBSAH

1	Mé dosavadní dílo v kontextu specializace.....	1
2	Téma a důvod jeho volby.....	4
3	Cíl práce.....	5
4	Proces přípravy.....	7
4.1	Rapid prototyping.....	7
4.1.1	Additive manufacturing.....	8
4.1.1.1	Fused Deposition Modeling – FDM.....	9
4.1.1.2	Selective Laser Sintering – SLS.....	10
4.1.1.3	Metody tištění z kovových prášků.....	10
4.1.1.4	Stereolithography – SL, SLA.....	12
4.1.1.5	PolyJet.....	12
4.1.2	Třískové obrábění.....	13
4.2	Srovnání aditivních a obráběcích technologií.....	14
4.3	Konstrukce frézky.....	17
5	Proces tvorby.....	19
5.1	Modální analýza.....	20
5.2	Pevnostní analýza.....	21
5.2.1	Ocelový uzavřený čtvercový profil 40 × 4.....	25
5.2.2	Ocelový profil L 55 × 55 × 5.....	26
5.2.3	Ocelový profil I80.....	27

5.2.4	Hliníkový profil L 60 × 60 × 6.....	28
5.2.5	Alváris 40 × 40L.....	29
5.3	Konstrukce frézky.....	29
6	Technologická specifika.....	31
7	Popis díla.....	34
8	Přínos práce pro daný obor.....	38
9	Silné stránky.....	39
10	Slabé stránky.....	40
11	Použité zdroje.....	41
11.1	Knižní a periodická literatura.....	41
11.2	Internetové zdroje.....	41
12	Resumé.....	42
13	Seznam obrázků.....	i
14	Seznam příloh.....	ii

# 1 MÉ DOSAVADNÍ DÍLO V KONTEXTU SPECIALIZACE

Každý projekt vás vždy posune o něco dál. Úspěšný i neúspěšný.

Z každého je potřeba si něco vzít. Projekt, který se na začátku zdál jako ideální, může být na konci naprosté fiasko, naopak projekt, jež se od začátku jevil jako naprostá ztráta času, vám může přinést mnohem víc než kterýkoli jiný. Možná, že to bude nakonec to nejcennější, co si odnesu z celého studia – být bez předsudků k další práci.

Práce na projektu vás formuje všemi směry. Zjišťujete, co vás baví a čemu byste se nejraději úplně vyhnuli. Cennou zkušeností pro mě byl hlavně kontakt s praxí. Teprve když jsem začal pracovat na projektu s lidmi, kteří měli praktické zkušenosti s výrobou daného produktu a bylo nutné s nimi komunikovat, zjistil jsem, že je vše možná trochu jinak. Že když vám někdo řekne, že chce váš produkt, ještě to neznamena, že ho vyrobí. Dokonce ani to, že vás za to nějak ocení. Ba ani díky možná neuslyšíte a přitom vaše práce bude stát na něčí polici. Nezáleží na tom jak velká firma nebo jak zvučné jméno má, záleží jenom na přístupu lidí, kteří v ní pracují a kteří ji řídí. To, co jste viděl na začátku, se někdy nenávratně rozplyne jako ranní mlha. I tak byl ale kontakt s reálnou firmou, reálnými lidmi a reálným procesem mnohem zajímavější, než řešení projektů na „území“ univerzity. Vzděláváte se mnohem rychleji, za pochodu. Jste nuceni vymýšlet nová řešení, protože několik předchozích možností výroby selhalo a klient čeká, že mu dodáte přesně ten produkt, o jehož lehkosti a elegantnosti jste mluvili poslední hodinu vaší schůzky. Získáváte nové a nové kontakty a další pojítka s obory a technologiemi, o kterých jste si nikdy nemysleli, že je využijete. Pokud jste vůbec věděli, že existují. Určitě by designer již na začátku měl mít představu, jak je možné jeho návrh vyrobit, ale právě když navržené řešení selže, přichází to malé designerské dobrodružství.

Věděl jsem tedy, že jako bakalářskou práci chci dělat produkt, který má reálnou šanci se dostat až do výroby a neskončit ve formě skici a několika vyrenderovaných obrázků na dně šuplíku. Věděl jsem, že chci zkusit zase něco nového.

Pokud mám tedy přeci jen jmenovat nějaké školní práce, výrazně mě ovlivnila spolupráce s jednou firmou zabývající se výrobky z betonu, pro kterou jsem řešil dárkový předmět podtrhující dokonalost a perfektní zpracování materiálu, který používají. Betonem jsem fascinován již nějaký čas a tato skutečnost se promítla i do další práce, na které jsem spolupracoval se svým spolužákem Petrem Vávrou, kdy jsme řešili funerální design. Myslím, že se nám podařilo velmi hezky spojit podstatu materiálu a popele zesnulého tím, že jsme jej využili jako plnivo. Z nebožtíka se tak stala jakási socha, která je mnohem osobnější než pouhé schování popela do nitra urny, navíc je v přímém kontaktu s okolím. Trochu mimo rámec soutěže jsme se rozhodli i pro řešení kolumbárií, protože kultura urnových hájů nám nepřipadala vůbec důstojná. Ani hezká urna umístěná do takového prostředí stejně nikdy nemůže být decentní a osobní památkou.



Obrázek 1 Dosavadní práce



Další přínosnou prací byla realizace náramkových hodinek. Ač nakonec k hodinářské práci vlastně vůbec nedošlo, protože práce se odebírala spíše konceptuálním směrem, mnohé jsem se o tomto překrásném odvětví dověděl.

Jednou z posledních prací bylo řešení inteligentní zásuvky pro firmu Jablotron. Poměrně malé zařízení a poměrně málo omezení co se designu, výroby a technických náležitostí týkalo. Myslím, že nakonec vznikl docela zajímavý koncept, naprosto odlišný od většiny ostatních. Firma návrh ohodnotila kladně, bohužel se však do výroby nedostane.

## 2 TÉMA A DŮVOD JEHO VOLBY

Bylo na nás z několika stran apelováno, abychom výběrem tématu co nejlépe reflektovali specializaci oboru. Neb práce předchozích ročníků se dle některých velmi vzdalovaly od našeho zaměření – od průmyslového designu.

Měl jsem do jisté míry štěstí, že před studiem na vysoké škole jsem absolvoval střední průmyslovou školu. Moje technické lyceum se zaměřením na marketing a multimédia mělo sice pramálo společného s průmyslem, ale několik spolužáků studovalo strojní zaměření a jeden z nich vynikal již na střední škole a postavil několik funkčních frézek.

V době výběru mého tématu studoval druhým ročníkem Fakultu strojního inženýrství při VUT v Brně a čekala ho také volba tématu bakalářské práce. Po vzájemné domluvě jsme se rozhodli, že zkusíme společný projekt, kdy on bude řešit technickou stránku věci a já estetickou. Téma bylo nasnadě – CNC obráběcí zařízení.

### 3 CÍL PRÁCE

Cílem naší práce je ve vzájemné kooperaci postavit hobby CNC frézku, jež bude splňovat jak požadované technické parametry, tak bude esteticky hodnotná.

Snahou mého kolegy je postavit hobby zařízení, které bude perfektně sloužit pro kutily, modeláře a jiné nadšence, ale snad dobře poslouží i pro poloprofesionální realizace částí s menšími rozměry. Klade velký důraz na udržení co nejnižší ceny, ale vždy tak, aby byla dodržena požadovaná kvalita stroje. Nešetří tedy na důležitých částech, které vyžadují vysoké výrobní přesnosti, jako jsou například podepřené tyče a kuličkové šrouby, či vřeteno a další důležité ovládací prvky, což by se mohlo fatálně projevit ve výrobních přesnostech stroje. Naopak se snaží ušetřit na konstrukci, použitím levných profilů nebo například komponentů ze zahraničních prodejních portálů v druhé jakostní kvalitě. Vždy ovšem hledí na dobré recenze prodejce a zkušenosti jejich předchozích zákazníků.

Mou snahou je postavit zařízení tak, aby i při udržení co nejnižší ceny bylo esteticky co nejhodnotnější. Materiálem, který chci využívat, bude primárně ocelový nebo hliníkový plech. Ten bude stříhán, nebo v případě složitějších dílů vysekáván či vyřezáván pomocí laseru. Pro tvarování plechu budu používat pouze prosté ohýbání v jednom směru, aby výroba zůstala co nejlevnější. Jiné technologie výroby, které by se nabízely, jako kování či lisování, by významně ovlivnily výslednou cenu výroby ať už z důvodu pracovní náročnosti nebo nutnosti vytvořit formu. Naohýbané díly budou svařovány tak, aby tvořily funkční celky krytování stroje. Krytování bude ke konstrukci připevněno pomocí šroubů. Plech bude doplněn o polykarbonátové díly, jimiž budou řešeny průhledové části do pracovního prostoru stroje.

Společně se pokusíme tedy vytvořit stroj, který bude cenově dostupnější oproti jiným komerčně prodávaným zařízením. Zároveň se budeme snažit dosáhnout co nejlepší výrobní přesnosti stroje, při zajištění jeho bezpečnosti a co nejnižší hlučnosti. U tohoto stroje by měla být zachována mobilita pro případ přemístění nebo převozu a průchodnost standardními dveřmi šířky 90cm. Zařízení by mělo navíc být natolik pohledově hezké, aby nehyzdilo místo kde bude umístěné a mohlo se tak stát plnohodnotnou a neskrývanou součástí interiéru dílny, či studia, nejen velkých výrobních hal.

Význam CNC frézky spatřuji v dnešní době i ve velké možnosti využití právě designéry, módními návrháři a i jinými druhy umělců. Rapid prototyping a zařízení jež pomohou tvůrci rychle a snadno ověřit si proporce, velikost či ergonomii, ba i díky některým sofistikovanějším zařízením a novým technologiím materiálové a mechanické vlastnosti nového produktu, jsou v dnešní době všeobecně na vzestupu. Bohužel většinou jsou frézky v pozadí za všeobecně dostupnějšími, většinou levnějšími a mnohem medializovanějšími 3D tiskárnami. Naší snahou je tedy i vytvořit zařízení, které by se mohlo stát alespoň nepřímou konkurencí této technologie. Právě proto se nebudu věnovat v rešerši pouze trhu frézek, ale budu porovnávat i možnosti jiných rapid prototyping zařízení.

## 4 PROCES PŘÍPRAVY

### 4.1 Rapid prototyping

Pojem rapid prototyping (dále jen RP) není zcela jasně definovaný. RP chápeme jako proces, při kterém jsou počítačová data přenesena do stroje, který je zpracuje a vytvoří trojrozměrný model. Ten je podle technologie, kterou byl vytvořen, někdy potřeba podrobit ještě dalším dokončovacím pracem. V zásadě jsou prezentovány dvě základní interpretace pojmu RP. Jedna mluví o RP pouze jako o technologiích využívající aditivní princip přidávání materiálu. Ten je přidáván po vrstvách určité tloušťky, závisící na přesnosti softwaru a hardwaru zařízení a použité výrobní technologii. Často se z důvodu podobnosti principu s klasickými tiskárnami užívá pojem 3D tisk. Druhá definice, která je popsána v knize Additive manufacturing technologies zní:

*The term rapid prototyping (RP) is used in a variety of industries to describe a process for rapidly creating a system or part representation before final realise or commercialization. In other words, the emphasis on creating something quickly and that the output is a prototype or basis model from witch further models and eventually the final product will be derived. Management consultant and software engineers both use the term rapid prototyping to describe a proces of developing business and software solutions in a piecewise fashion that allows client and other stakeholders to test ideas and provide feedback during the development proces. In a product development context, the term rapid prototyping was used widely to descirbe technologies which created physical prototypes directly from digital data.<sup>1</sup>*

---

1 GIBSON, I, D ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*, 2015; str. 1

V knize je také uvedeno, že pojem rapid prototyping nevystihuje dostatečně přesně základní princip aditivních technologií, které proto zavádí jako samostatný pojem, jenž lze tedy chápat spíše jako součást rapid prototypingu. Tato mnohem komplexněji pojatá definice pak umožní zařazení do kategorie RP zařízení i další technologie. Vyjma právě frézky například i technologie vakuového lití do měkkých forem, které mohou mnohonásobně zlevnit vývoj litých dílů a nutnou výrobu drahých kovových forem pro každý prototyp, tak například i thermoforming, což je technologie využívající vakuového tváření předehřátých folií do požadovaného tvaru podle předem vytvořeného modelu. Je zřejmé, že nejlepšími výsledky v rámci tvorby prototypu dosáhneme kombinací těchto technologií.

Další, ne ovšem výrobní, technologií, která se při rychlém vývoji nových součástek používá, jsou 3D scannery. Ty se používají k opačnému procesu než výrobní zařízení a to k vytvoření počítačového modelu na základě fyzické předlohy. 3D scannery ovšem nejsou předmětem této práce a nebudu se jim dále věnovat.

Designéry jsou zřejmě nejvíce využívány právě aditivní technologie a frézky, proto do bližšího porovnání zařadím pouze tyto dvě skupiny zařízení.

#### 4.1.1 Additive manufacturing

Existuje poměrně velké množství technologií aditivního výrobního procesu. Ty se neustále vyvíjí a některé vznikly jako kombinace několika různých již používaných technologií. Navíc většina velkých výrobců vyvíjí vlastní technologie, které ač principiálně vycházejí ze základních technologií, používají různé komerční názvy, často patentově chráněné. Z toho pramení fakt, že někdy je složité kategorizovat zařízení dle použité technologie.

Ač je možné aditivní technologie rozdělit různými způsoby, nepoužívanější základní rozdělení je podle materiálu, který využívají pro

stavbu modelu. Obecně pak lze toto zařízení rozdělit na 4 základní kategorie. První kategorie používá roztavené materiály. Další využívá sypkých materiálů, které jsou spojovány různými způsoby. Třetím využívaným druhem materiálu jsou fotopolymerní pryskyřice. V poslední řadě jsou to pak materiály v pevných vrstvách.

#### 4.1.1.1 Fused Deposition Modeling – FDM

FDM je nejspíš nejrozšířenější technologie 3D tisku. Tato technologie stála za zrodem levných 3D tiskáren a jejich masovým rozšířením jako open source licencovaný RepRap. FDM technologii si v roce 1989 patentoval S. Scott Crump, který se později stal i spoluzakladatelem společnosti Stratasys, jednoho z největších výrobců 3D tiskáren na světě.

Technologie spočívá v natavení termoplastického materiálu v extrudéru, jenž materiál následně vtlačuje do tiskové trysky, která se pohybuje nad modelovací deskou. Nejčastěji vykonává pohyb v osách X a Y trysková hlava. Ta u některých tiskáren vykonává i pohyb v ose Z, kdy po nanesení kompletní vrstvy v rovině XY popojede o tloušťku vrstvy vzhůru, popřípadě tento pohyb vykonává modelovací deska, která po vytvoření vrstvy popojede dolů.

Tato tisková technologie vyžaduje ze svého principu stavbu podpor v místech, kde předchozí vrstvy netvoří dostatečnou podporu pro vrstvu nově vznikající. V praxi to znamená, že pokud se následující vrstva zvětší o více, než je průměr vytlačovaného materiálu, je nutné aby v tomto místě byla vytvořena podpůrná konstrukce. Ta může být podle kvality zařízení vytvořena z jiného podpůrného materiálu, k čemuž je ale zapotřebí, aby tisková hlava měla dvě samostatné trysky. Takovýto podpůrný materiál má jiné chemické složení než materiál stavební a lze jej pak poměrně snadno odstranit například pomocí louhu, do kterého se výsledný výtisk vloží. Pokud tiskárna nedisponuje dvěma tryskami, staví se podpory ze stavebního materiálu, který je ovšem tisknut s co nejnižší hustotou výplní. Podpory tak mají podstatně nižší

soudržnost než výtisk a jdou většinou relativně snadno mechanicky odstranit.

Nejčastěji používanými stavebními materiály jsou ABS a PLA. Při profesionálních aplikacích jsou používány i polykarbonáty a termoplast ASA, Nylon, PPSF a ULTEM.

#### 4.1.1.2 Selective Laser Sintering – SLS

Technologie využívající pro tvorbu výsledných modelů sypké materiály. Nejhojněji využívaným materiálem jsou plastové prášky. Využít se ale dají i prášky keramické, pryžové nebo speciální písky. Z principu se dá využít i kovový prášek (většinou je pak technologie označována jako Direct Metal Laser Sintering), v praxi se však většinou využívá pro tisk z kovových prášků sofistikovanějších technologií, jako jsou Selective Laser Melting či Direct Metal Printing. Stavební materiál musí být ve formě velmi jemného prášku, jehož zrna mají velikost 20 – 100  $\mu\text{m}$ .

Princip této technologie spočívá v roztavení práškového materiálu pomocí laseru. Často se používá  $\text{CO}_2$  laser, mohou být ale použity i jiné druhy. Na podkladovou desku je nanášena tenká vrstva prášku, která je v požadovaných místech spékána pomocí laseru. Poté podkladová deska popojede o tloušťku vrstvy níž, je nanášena nová vrstva a proces se opakuje.

U této technologie není nutné vytvářet podpory. Jako podpůrný materiál slouží nevytvrzený materiál, který během procesu tvorby není odstraňován. Ten je odstraněn až na konci pomocí vzduchu nebo jednoduchým omytím. Nepoužitý materiál může být znovu použit.

#### 4.1.1.3 Metody tištění z kovových prášků

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, základní technologie tisku z kovových prášků je Direct Metal Laser Sintering. Tato technologie pouze spojí kovový prášek do spečence, jehož mechanické vlastnosti neodpovídají výrobku, vyrobeným produkčními technologiemi.



Oproti tomu při použití technologie Selective Laser Melting dojde k naprostému roztavení prášku. Tím vznikne dokonale spojitý materiál, který díky tomu může mít materiálové a mechanické vlastnosti stejné, jako díl vyrobený z celistvého materiálu. Stejně výsledky slibuje i technologie Direct Metal Printing, což je obchodní název používaný firmou 3D Systems.

Technologie DMSL umožňuje proto tisk pouze ze slitinových prášků jako slitiny niklu, titanu a dalších. Kdežto SLM a DMP umožňují tisk i z jednoprvkových kovů, jako je hliník, titan a kobalt, nebo z nerezavějících a nástrojových ocelí.

Technologie SLM a DMP jsou velmi energeticky náročné. Je totiž nutné, aby v každém místě vrstvy došlo k zahřátí prášku na bod tání kovu. Aby bylo možné dosáhnout bezpečně takto vysokých teplot, jsou většinou zapotřebí ochranné atmosféry uvnitř pracovního prostoru stroje. Využívanými ochrannými plyny bývají dusík a argon. Bohužel navíc díky vysokým teplotním výkyvům při výrobním procesu může dojít k vnitřnímu pnutí a dislokacím uvnitř výsledného modelu.

Pokud ještě vezmeme v úvahu další potřebná nebo přídavná zařízení pro provoz těchto produkčních zařízení, jako jsou vodní chladicí systémy, vzduchotechnika, recyklační systémy na nevyužitý materiál či automatické doplňování materiálu, je jasné, že jak provozní, tak pořizovací náklady těchto zařízení mohou několikanásobně přesáhnout jiné levnější technologie a používají se proto pouze pro vysoce specializované aplikace.

Jako u SLS technologií ani zde není potřeba stavění podpor. Díky tomu představují tyto technologie s doplněním konvenčními metodami výroby velký potenciál například v tvorbě vstřikovacích forem, jejichž výroba byla vždy značně komplikovaná, drahá a jejíž výsledky nebyly vždy dokonale funkční, hlavně kvůli temperačním kanálům. Touto

metodou mohou být jednoduše vytvořeny temperační kanály jakéhokoli tvaru. Je jenom potřeba dodatečně upravit povrch kavit.

#### 4.1.1.4 Stereolithography – SL, SLA

Technologie využívající k tvorbě modelu tekutých polymerních látek, vytvrzovaných bodově pomocí laseru v jednotlivých vrstvách.

Původně se většinou využívalo větších van s tekutou pryskyřicí, kdy laser vykonával pohyb v osách X a Y a po vytvrzení kompletní vrstvy popojelo lože umístěné v lázni s pryskyřicí o tloušťku vrstvy níž a proces se opakoval. To bylo z ekonomických důvodů poměrně nevýhodné. Cena pryskyřic je například oproti termoplastickým strunám využívaným u FDM vyšší a je potřeba velké množství pryskyřice pro vyplnění celého objemu vany. Navíc mohlo dojít ke znečištění pryskyřice.

V dnešní době je tak častěji využíván princip obrácený. Vana je pouze malá a obsahuje tedy malé množství materiálu. Lože je umístěno na vertikálním stojanu a při tisku první vrstvy leží prakticky na dně vany. Po vytvrzení vrstvy popojede směrem vzhůru. Tato technologie je podstatně méně náročná na potřebné množství materiálu.

U této technologie je nutná stavba podpor. U prvního zmiňovaného principu byly podpory velmi subtilní a tak se k jejich odstranění používalo chemických procesů, které mírně naleptaly kompletní povrch výrobku a díky tomu se snadno podpory odstranily mechanickou cestou – například kartáčem. U druhého principu jsou podpory odstraňovány čistě mechanickou cestou.

#### 4.1.1.5 PolyJet

Technologie, které je ze všech additive manufacturing technologií nejpodobnější běžnému inkoustovému tisku. 3D tiskárna nanáší miniaturní kapky tekutého polymerního materiálu za neustálého osvětlení výrobního prostoru UV zářením, čímž se polymer vytvrzuje. Pokud je nutná stavba podpor, 3D tiskárna nanese vhodný materiál,

který je snadno odstranitelný pomocí běžné vody. Modely jsou ihned připravené pro použití i bez nutnosti dalších úprav.

Technologie umožňuje souběžný tisk několik různých materiálů zároveň. To je výhodné jak pro barevné rozlišení, tak i pro materiálové, kdy je možné například vytisknout na prototypu rovnou i pryžové protiskluzové části, či zároveň průhledné a neprůhledné části.

#### 4.1.2 Třískové obrábění

Pro rychlou tvorbu návrhu nebo prototypu můžou velmi dobře sloužit i klasické třískové obráběcí metody. Přesněji řečeno počítačově řízené obráběcí systémy označované termínem CNC.

Podobně jako u aditivních technologií stačí v dnešní době správně upravit počítačová data, která odešlete do stroje a stroj na základě těchto dat vytvoří fyzický 3D model. Je pravda, že při přípravě dat pro CNC zařízení je leckdy nutné vyřešit některá úskalí, ale zase se dá vhodným nastavením dosáhnout lepších výsledků z nepřeberného množství materiálů.

Zásadním problémem těchto technologií je vymyslet, jak obrobek bezpečně upevnit, což občas může způsobovat značené problémy a je nutné použít podstatně větší kusy materiálu, které jsou obrobeny v poslední fázi výroby, nebo je nutné využít ručních dokončovacích prací.

Mnohem více se také do procesu výroby promítají technologické možnosti výrobního stroje. Významnou roli hraje například počet os stroje. Jelikož běžně dostupné stroje mají pouze 3 osy pohybu, málokdy se podaří vyrobit prototyp na jedno vložení obrobku do stroje. Je tedy opravdu nutné mít celý proces dopředu dobře promyšlený.

Jak již bylo zmíněno výše, asi nejčastěji používanou technologií třískového obrábění je frézování, kdy hlavní pohyb je rotační a vykonává ho nástroj. Pomocné pohyby vykonává vřeteník nebo upínací stůl. Běžně

mají tyto stoje 3 – 5 os pohybu, kdy 4. a 5. osa vyjadřují pohyb kyvný nebo rotační.

Samozřejmě se využívá i dalších třískových obráběcích metod jako je soustružení, vrtání či dokončovací práce v podobě broušení. Ty se navíc běžně používají i jako dokončovací práce aditivních technologií.

#### 4.2 Srovnání aditivních a obráběcích technologií.

Na začátku je nutné uvědomit si požadavky a hlavní kritéria výroby prototypu. Každá technologie uvedená v předchozí kapitole má své klady, ale i zápory. Za základní kritéria by nejspíš šlo považovat požadovaný materiál, výrobní přesnost a cenu.

U materiálu musíme mít na paměti, že nejde pouze o výběr materiálu z hlediska pohledových vlastností, ale například i nutnost uvědomit si smršťování některých druhů plastů, jejich životnost i chemické a mechanické vlastnosti. Například pokud potřebujeme otestovat prototyp v reálném prostředí koncového použití nebo ověřit jeho mechanické vlastnosti z důvodu pozdějšího zatížení komponentu.

Výrobní přesnost jistě hraje vždy roli. Někdy ale přece jen nejsou potřeba naprosto přesné rozměry, například jde-li pouze o prototyp, který má ověřit ergonomii nebo proporční velikosti, pak odchylka 0,1 mm, se kterou pracují běžné aditivní technologie, s největší pravděpodobností vadit nebude. Zato pokud potřebujeme vyrobit přesnou malosérii stejných komponentů, bude vhodné doplnit proces výroby o využití technologie vacuum casting. Bude-li tedy zapotřebí dodržet co největší přesnost modelu pro zaformování, zvolíme dražší technologie výroby prototypu nebo kombinaci levnějších technologií jako je FDM s dokončovacími pracemi. Pokud by se ovšem přistoupilo k tomuto kroku, je nutné přizpůsobit tomu tisk. Tato technologie totiž tiskne jen relativně slabou schránku a uvnitř modelu používá voštinovu konstrukci velmi podobnou podpěrám. Pokud je to možné, je tedy nutné nastavit

dostatečnou tloušťku této schránky nebo dokonce tisknout plný materiál.

Zatímco dva předchozí parametry nás nutí volit lepší a lepší technologie, cena některých technologií nás pořád bude bezpečně držet při zemi.

Na základě těchto kritérií potom můžeme vybírat vhodný druh výroby prototypu. I když pojmenování prototyp může být někdy trochu zavádějící, protože se pro výrobu použije stejná technologie jako pro produkční výrobek, tudíž už v podstatě nelze nazývat výsledek prototypem.

Všeobecně lze říct, že obráběcí technologie dosahují vyšších přesností než aditivní. Je poněkud složité srovnávat tyto parametry zaprvé kvůli tomu, že výrobci tento parametr občas ani neudávají, za druhé protože přesnost stroje lze rozdělit na několik dílčích přesností a za třetí protože udávaná přesnost nemusí odpovídat skutečnosti. Rozlišení softwarové, nebo-li jak malý krok je schopen software dát jako příkaz hardwaru. Mechanické rozlišení se odvíjí od použitých posuvů a motorů a jejich přesnosti. Přesnost motoru udává, jak velký je posun hardwaru na jeden mikrokrok, což je jednotka vycházející z dělení kroku motorů. Přesnost posuvu je parametr, který udává možnou odchylku, závislou na přesnosti řízení motoru, výrobní přesnosti posuvných prvků a vůle mezi nimi. Pokud je udáno více těchto parametrů, jako rozhodující bychom měli považovat nejvyšší číslo. Přesnost opakování je parametr udávající odchylku při najetí dvou stejných vzdáleností.

Zatím co frézky, dosahují běžně přesnosti 0,001-0,005 mm, přesnost 3D tiskáren se běžně pohybuje okolo 0,1 mm. Ani ta ovšem nemusí být rozhodující. Výrobci totiž často neudávají nebo dokonce spíše zaměňují přesnost tisku za minimální tloušťku vrstvy. Ta má s přesností posuvů v rovině X a Y jen pramálo společného. Dalším důvodem, proč by ani udaná přesnost nemusela být dobrým měřítkem, je fakt, že většina

termoplastů má tendenci se při chladnutí smršťovat a dochází tak k dalším nepřesnostem – někdy dokonce i tvarovým. To se týká hlavně FDM technologie. Technologie SLA by měla z podstaty vytváření modelů pomocí laseru z tekutiny být velmi přesná – i relativně velmi levné zařízení Nobel 1.0 od firmy XYZprinting má udávanou přesnost 0,025 mm. U jiných technologií využívajících laser by přesnost měla být lepší, úskalí ovšem tkví v tom, že okolní prášek může být částečně nataven nebo zachycen roztaveným materiálem. To se u technologie PolyJet, kterou využívají zařízení například firmy Stratasys stát nemůže, protože zde je materiál nanášený v podobě malých kapek vytvrzován UV zářením. V okolí tak žádný přebytečný materiál, který by mohl ulpět na povrchu výtisku, není. Technologii PolyJet tak lze s výrobcem udávanou přesností 0,016 mm považovat za nejpřesnější aditivní technologii. Tyto technologie jsou ale dost drahé. Nejvyšší model těchto tiskáren Objet1000 stojí zhruba \$ 500,000. Což je srovnatelná cena se zařízením Renishaw AM400 využívající technologii SLM nebo s produkčními frézami. Nejpokrokovější produkční stroje dnešní doby pak přímo kombinují aditivní i obráběcí technologie, kdy je nejprve nanesen kovový prášek a následně jsou plochy s nutností tolerování obrobny na požadovanou přesnost. Ceny těchto strojů ovšem výrobci běžně nesdělují.

Fakt, že obráběcí technologie jsou přesnější, je dán požadavky na přesnost vycházejícími ze strojního prostředí, vyžadující přesné tolerování rozměrů. Z toho plyne většinou mohutnější, těžší a pevnější konstrukce, než je tomu u 3D tiskáren. Co se týče srovnání malých tiskáren a frézek, je tento rozdíl opravdu dobře znatelný. Jak je možné vidět v *příloze 1 a 2*, nejmenší srovnávaná tiskárna TIKO má hmotnost pouhé 1,7 kg, zatímco nejmenší frézka už skoro 20 kg. Což je zhruba 12× větší hmotnost. Stejně tak i rozměry jsou poměrně větší. U větších strojů se tyto rozdíly zmenšují. Porovnání tiskárny Renishaw AM400 a frézky Emco ECOMILL E350 už není tak dramatické. Frézka je v tomto porovnání už jen přibližně 1,5× těžší. Ovšem i v tomto případě je nutné

podotknout, že EMCOMILL E350 je stále malé obráběcí zařízení a zdaleka nedosahuje rozměrům a hmotnostem velkých produkčních strojů.

Podrobné srovnávací tabulky je možné najít v přílohách. Rád bych připomněl, že veškeré porovnávané parametry jsou udávány výrobcem a nemusí zcela přesně odpovídat skutečnosti.

#### 4.3 Konstrukce frézky

Konstrukce frézky byla inspirovaná portálovou frézku koncepcí horní gantry. Konstrukce rámu je uzavřená, tvořící kvádr. Pro její tvorbu byl použit ocelový profil I80, který je svařen do dvou obdélníkových podstav. Stojny jsou k těmto podstavám šroubované z důvodu minimalizace vnitřního pnutí v konstrukci a eliminování koncentrace pnutí. Příčnick je tvořen dvěma kolejnicemi a umožňuje pohyb v ose x. Na kolejnicích je umístěno lineární vedení, na kterém je uložen vřeteník a umožňuje pohyb v ose y. Jako lineární vedení byly použity podepřené tyče o průměru 16 mm.

Pro převod rotačního pohybu krokových motorů na lineární bylo využito kuličkových šroubů. Tento systém je velmi drahý, ale vyniká přesností a efektivností, která je docílena pomocí valivého tření namísto kluzného, které vzniká u šroubů např. s lichoběžníkovým závitem. Použité šrouby mají průměr 16 mm a stoupání 10 mm/otáčku. Pro vytvoření rotačního pohybu byly použity krokové motory s přírubou Nema23 s maximálním krouticím momentem až 3 Nm. Dostatečný krouticí moment by měl eliminovat přeskokování motorů.

Z důvodu nízké hlučnosti bylo vybráno vodou chlazené vřeteno s kleštinovým upínačem ER20. Z důvodu nákupu neznačkového vřetene z Číny bylo na frézce provedeno měření radiálního házení na dřívku nástroje s naměřenou odchylkou 0,02 mm. Chlazení zajišťuje chladicí okruh s aktivním chlazením. Použito bylo oběhové čerpadlo s průtokem 100 l/h. Jako chladivo je využito směsi vody s Fridexem G48. Aktivní

chlazení zajišťují dva 120 mm ventilátory. V okruhu je umístěn průtokový snímač sloužící jako bezpečnostní prvek. Zásobní nádrž má objem 30 l.



## 5 PROCES TVORBY

Na základě první konstrukce frézky začal můj proces navrhování. S ohledem na velikost konstrukce z profilu I80, která dosahovala rozměru 950 × 840 × 620 mm a našemu pozdějšímu rozhodnutí, že využijeme k ovládní obráběcího centra v této oblasti ještě poměrně neobvyklé dotykové obrazovky, bylo nutné pozměnit rozměry konstrukce. Dotykové displeje s otevřeným rámem jsou totiž většinou poněkud větších rozměrů, než ty, které známe z našich pracovních stolů. Často je to kvůli větší odolnosti, předpokládanému hrubšímu zacházení ve veřejných nebo průmyslových prostorách atd. Běžná tloušťka takových displejů dosahuje 60 mm, ale i více. S ohledem na to, že displej bylo potřeba nejlépe umístit do výšky zhruba v rozmezí 90 – 120 cm od země, aby byla zajištěna dobrá ergonomická poloha pro veškerou obsluhu zařízení, bylo nutné předsadit displej před konstrukci, neboť přesně v této výšce se nacházela horizontální příčka konstrukce. V takovém případě bylo jasné, že konstrukce s předsazeným displejem již neprojde 90cm dveřmi, což jsme u tohoto zařízení považovali za zásadní. O přírůstku rozměru s ohledem na krytování či další potřebná konstrukční řešení jako například polohování displeje nemluvě. Konstrukce z profilu I80 také dosahovala vysoké hmotnosti, téměř 51,5 kg.

Z důvodu nutnosti změny konstrukce a snaze o snížení hmotnosti konstrukce bylo vytvořeno několik možných dalších konstrukčních řešení z různých profilů i materiálů. Konstrukce byly podrobeny modálním a pevnostním analýzám. Pro porovnání posloužil původně použitý profil I80 pouze v pozměněném rozměru 950 × 800 × 620 mm. Další profil z konstrukční oceli pro zkoušky byl rovnoramenný L 55 × 55 × 5. Pro zkoušky byly také použity dva hliníkové profily a to L 60 × 60 × 6 a tvarový profil Alváris 40 × 40 L. Po výsledcích pevnostních analýz těchto

profilů a zhodnocení špatné použitelnosti L profilů jsme přidali do porovnání ještě ocelový uzavřený čtvercový profil 40 × 4.

## 5.1 Modální analýza

Modální analýzou čtyř navrhovaných variant rámu byla hodnocena tuhost rámu a to tedy na základě vlastních frekvencí. K těmto výpočtům byl použit software Autodesk Inventor 2016.

Vlastní frekvenci lze stanovit dle vztahu:

$$\omega_0 = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}} = 2\pi f_0 = 2\pi \frac{1}{T_0}$$

Kde  $f_0$  je vlastní frekvence,  $\omega_0$  vlastní úhlová rychlost,  $T_0$  vlastní perioda harmonického oscilátoru,  $k$  tuhost a  $m$  hmotnost.

Z porovnání prvních tří frekvencí plyne, že nejtuzší je rám L 60 × 60 × 6 mm z hliník 6061, po té následuje ocelové L 55 × 55 × 5 mm, hliníkový profil Alvaris 40 × 40L a nejméně tuhým je ocelový rám I80. Ocelové rámy prohrávají hlavně z důvodu vyšší hmotnosti. Rám I80 totiž váží 51,46 kg a ocelové L 55 × 55 × 5 37,16 kg, zatímco hliníkové L 60 × 60 × 6 16,44 kg a rám Alvaris dokonce jenom 15,68 kg.

V tabulkách níže je možné pozorovat vlastní frekvence a maximální výchylky rámu v jednotlivých osách v momentě porušení rámu.

Frekvence v tabulkách je udávána v [Hz] a výchylky v [mm]. Čím je počáteční frekvence vyšší, tím je rám tužší.

**Tabulka 1L 60 × 60 × 6 mm, hliník 6061**

frekvence	max	X	Y	Z
<b>66,94</b>	67,63	14,54	7,129	66,06
<b>69,84</b>	67,63	66,07	7,839	14,69
<b>92,34</b>	67,63	46,71	6,007	45,49
<b>111,51</b>	67,63	51,91	10,38	54,14
<b>178,62</b>	67,63	<b>67,3</b>	43,8	19,32
<b>192,15</b>	67,63	23,96	63,25	44,44
<b>195,49</b>	67,63	46,88	66,44	5,947
<b>206,88</b>	67,63	66,95	67,02	8,745

**Tabulka 2L 55 × 55 × 5, ocel**

frekvence	max	X	Y	Z
60,66	67,25	14,92	6,906	65,59
63,25	67,25	65,62	7,711	14,97
83,37	67,25	45,92	5,671	45,35
101,97	67,25	51,29	10,51	53,26
171,78	67,25	64,87	17,73	41,43
186,82	67,25	38,58	66,87	15,54
193,97	67,25	35,88	64,59	9,54
213,08	67,25	57,49	67,2	11,92

**Tabulka 3 Alváris 40 × 40L**

frekvence	max	X	Y	Z
55,16	69,41	55,09	47,18	5,741
55,33	69,41	44,78	56,06	5,037
66,36	69,41	46,97	51,42	4,428
89,87	69,41	52,14	50,08	5,735
132,92	69,41	45,63	69,35	2,883
171,41	69,41	12,84	2,45	69,37
172,42	69,41	13	8,944	66,79
183,34	69,41	31,6	69,39	6,131

**Tabulka 4 I80, ocel**

frekvence	max	X	Y	Z
35,23	70,58	70,56	1,77	3,532
55,34	70,58	70,37	7,397	3,601
100,43	70,58	6,849	70,55	4,496
100,49	70,58	70,58	54,62	0,803
128,70	70,58	8,291	69,89	7,343
132,55	70,58	70,53	47,46	6,129
166,10	70,58	70,22	19,42	8,003
182,37	70,58	70,58	16,55	1,906

Grafické výsledky modálních analýz je možné najít v přílohách.

## 5.2 Pevnostní analýza

Pevnostní analýza je podstatně komplexnější. Uvažují jak zatížení, tak materiál konstrukce. Z jejích výsledků lze tedy například zjistit maximální celkovou výchylku při zatížení stroje, maximální napětí a další. Pro můj účel byla nejdůležitějším parametrem právě maximální

celková výchylka konstrukce. Ta totiž může významně zhoršit výrobní přesnost stroje.

Při zatěžování konstrukce jsme uvažovali síly v kuličkových šroubech v osách X a Y:

$$F_{osová} = \frac{2000 \times M \times \pi \times \eta}{p}$$

tedy

$$F_{osová} = \frac{2000 \times 2 \times \pi \times 0,75}{10} = \mathbf{942.48\ N}$$

V našem případě zaokrouhlenou na 1000 N. Sílu v ose uvažujeme pouze jako sílu, kterou vytváří krokový motor na závit kuličkového šroubu:

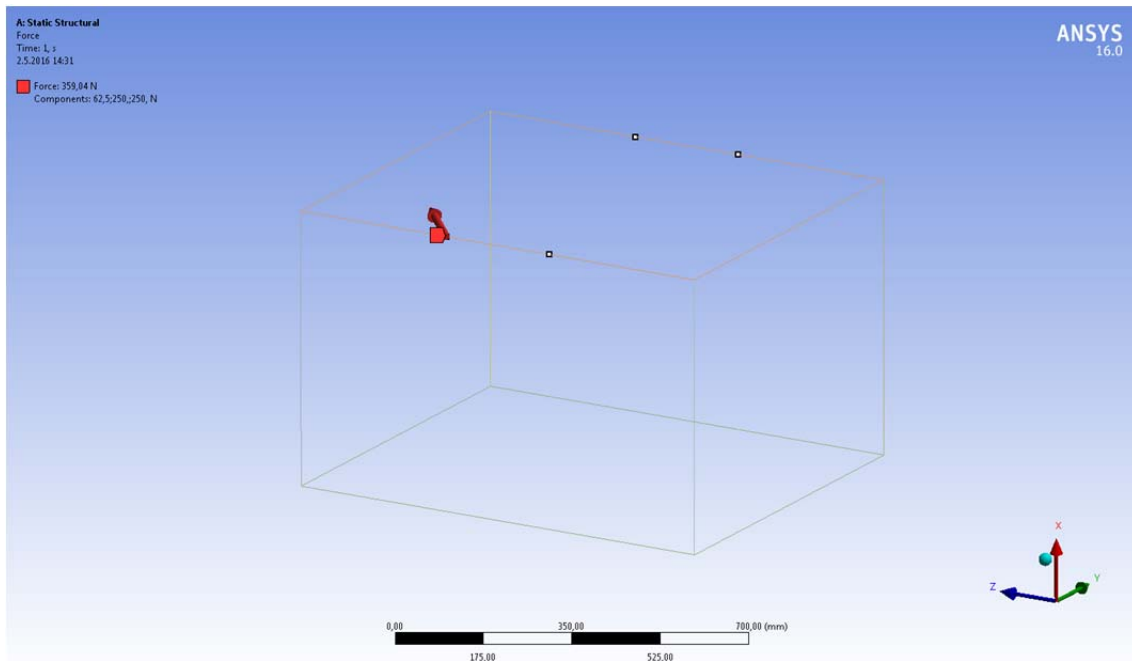
$$F_z = \frac{M}{r}$$

tedy

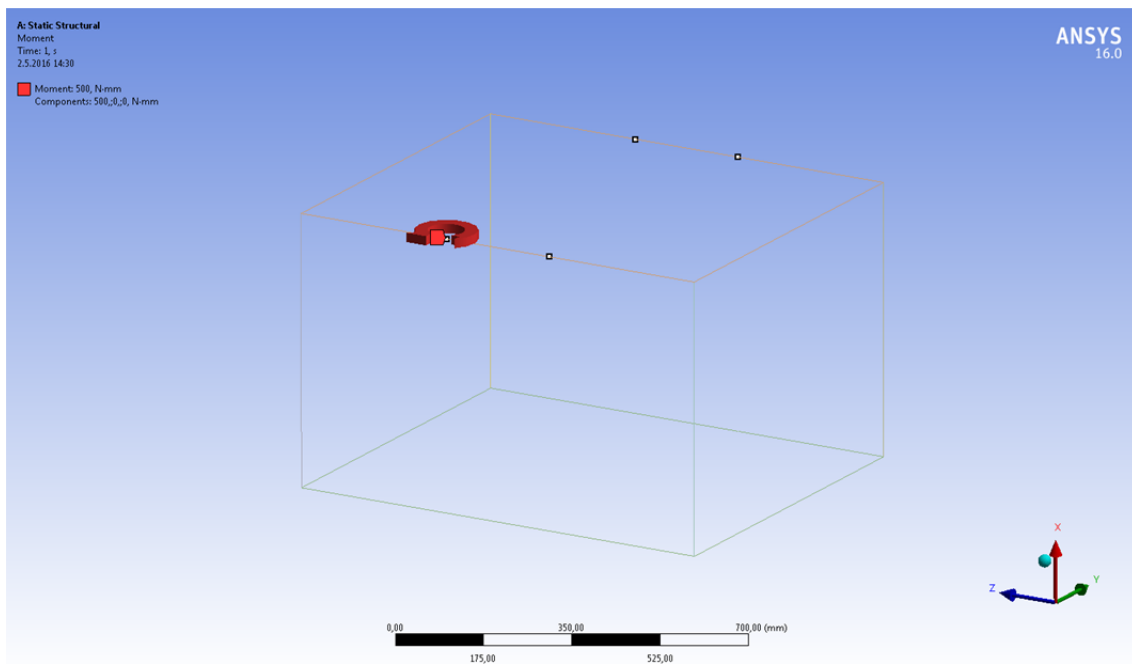
$$F_z = \frac{2}{0,008} = \mathbf{250\ N}$$

Kde  $F_{osová}$  je osová síla v kuličkovém šroubu,  $p$  stoupání kuličkového šroubu,  $\eta$  účinnost kuličkového šroubu,  $M$  krouticí moment a  $r$  poloměr kuličkového šroubu.

Dále je v analýze zanesen krouticí moment 2 Nm vytvářený vřetenem. Pro zadání působiště těchto sil a momentů uvažujeme kuličkové domečky příčnicku jako body a síly zadáváme ve čtvrtinové hodnotě. Na obrázcích je vždy již výsledná síla a moment, které působí na každý z těchto bodů.

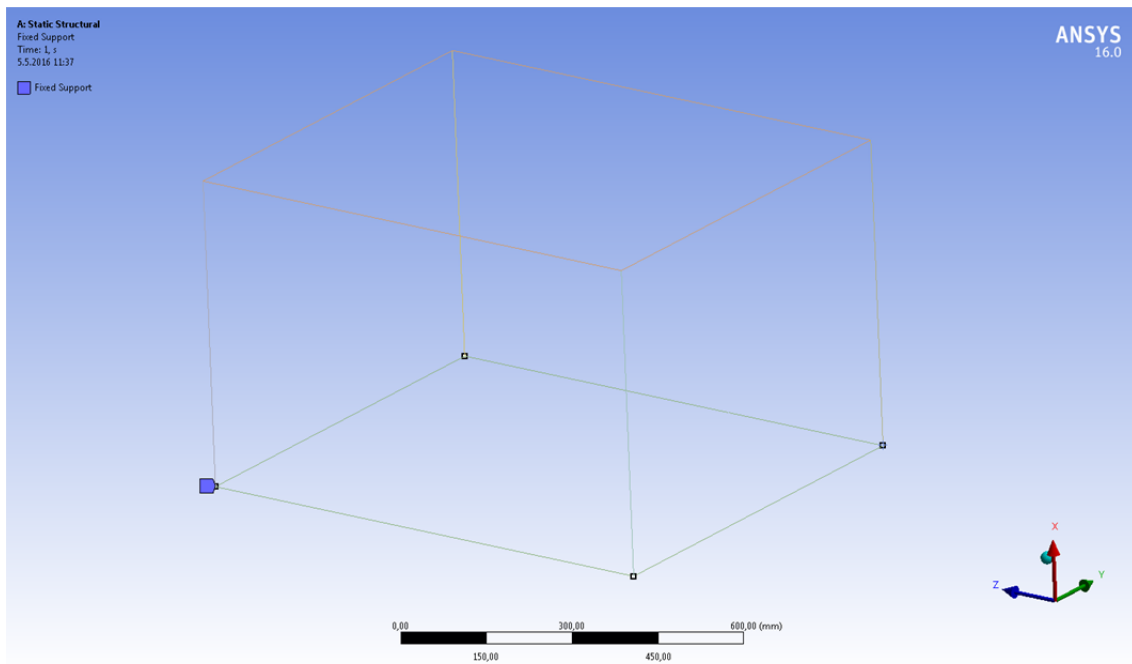


Obrázek 2 Výsledná síla a její umístění



Obrázek 3 Moment a jeho umístění

Pro výpočty byly spodní rohy podstavy použity jako fixní podpory a použité prvky byly typu BEAM 188.

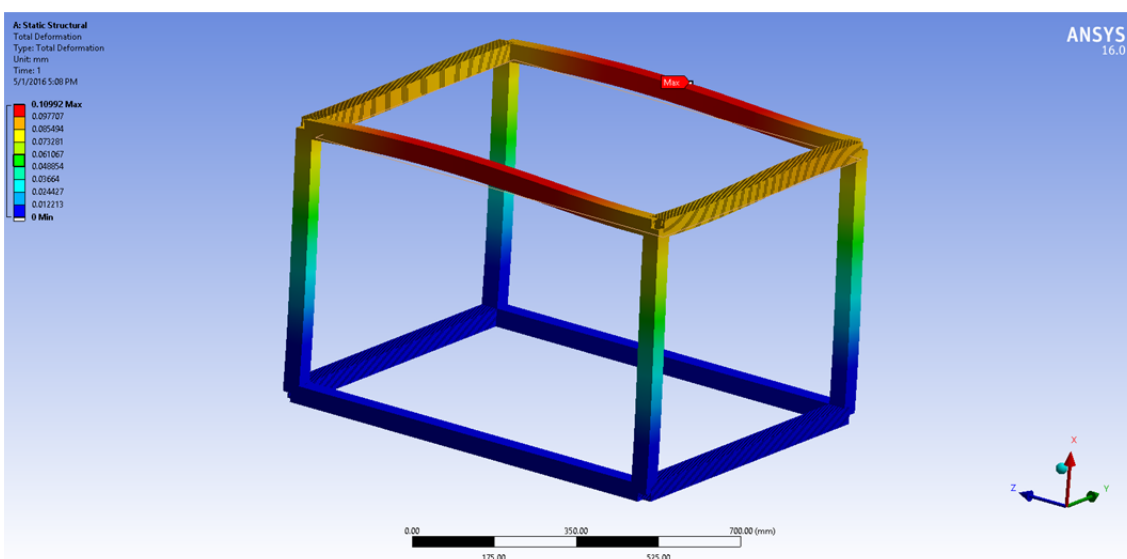


Obrázek 4 Okrajové podmínky

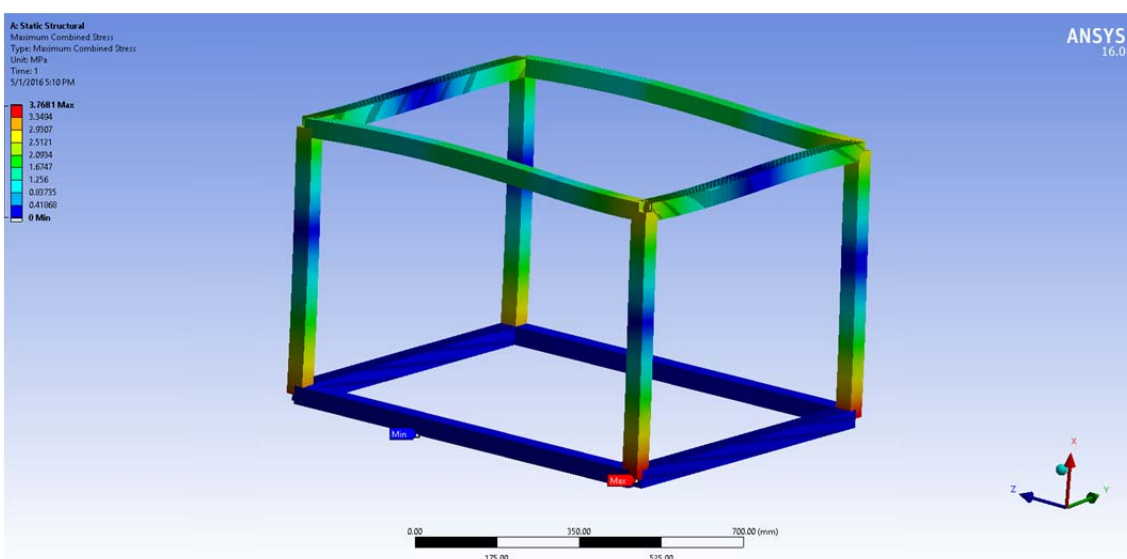
Pro výpočty pevnostních analýz byl použit software ANSYS Workbench 16.0.

## 5.2.1 Ocelový uzavřený čtvercový profil 40 × 4

Ze všech analyzovaných ráků vykazuje nejmenší deformaci rák z ocelového čtvercového uzavřeného profilu 40 × 4. Ta dosahuje hodnoty 0,10992 mm. Pokud nebudeme uvažovat další nepřesnosti, jako geometrické nepřesnosti ráku, výroby, vůle kuličkových šroubů, házení vřetene a další, tento rák by měl tedy i při maximálním zatížení dodržet střední třídu přesnosti u obrobku jakékoli velikosti. U obrobků přesahující délkové rozměry 6 mm dokonce jemnou třídu přesnosti. Což se jeví jako dostačující. Maximální napětí dosahuje 3,7681 MPa.



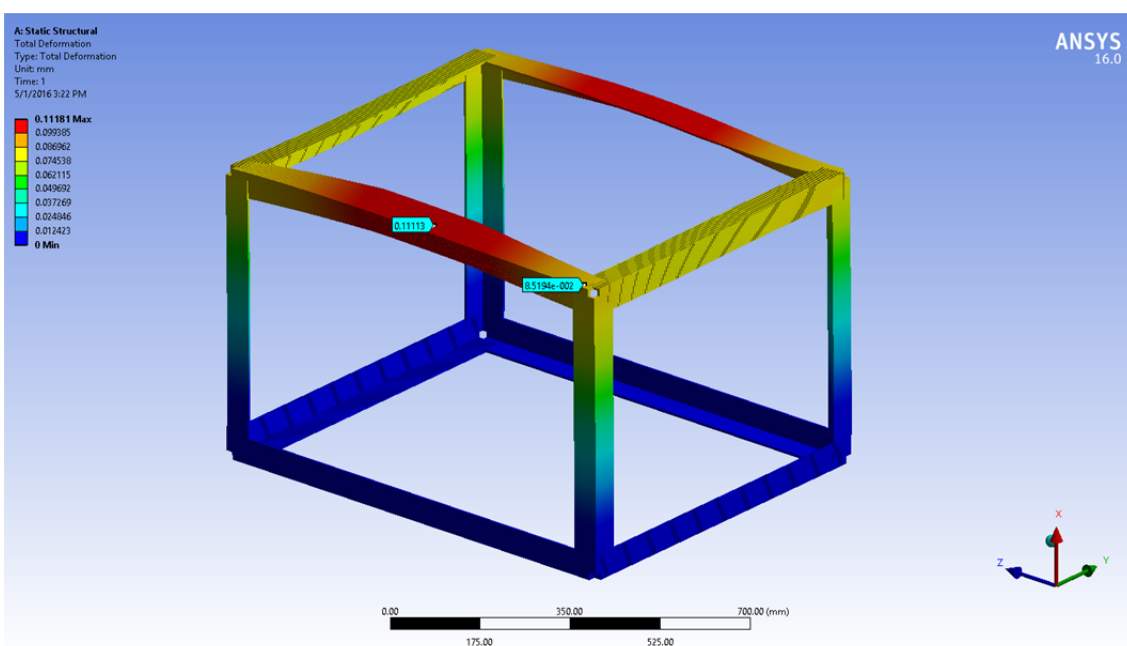
Obrázek 5 Deformace ráku z uzavřeného čtvercového profilu 40 × 4



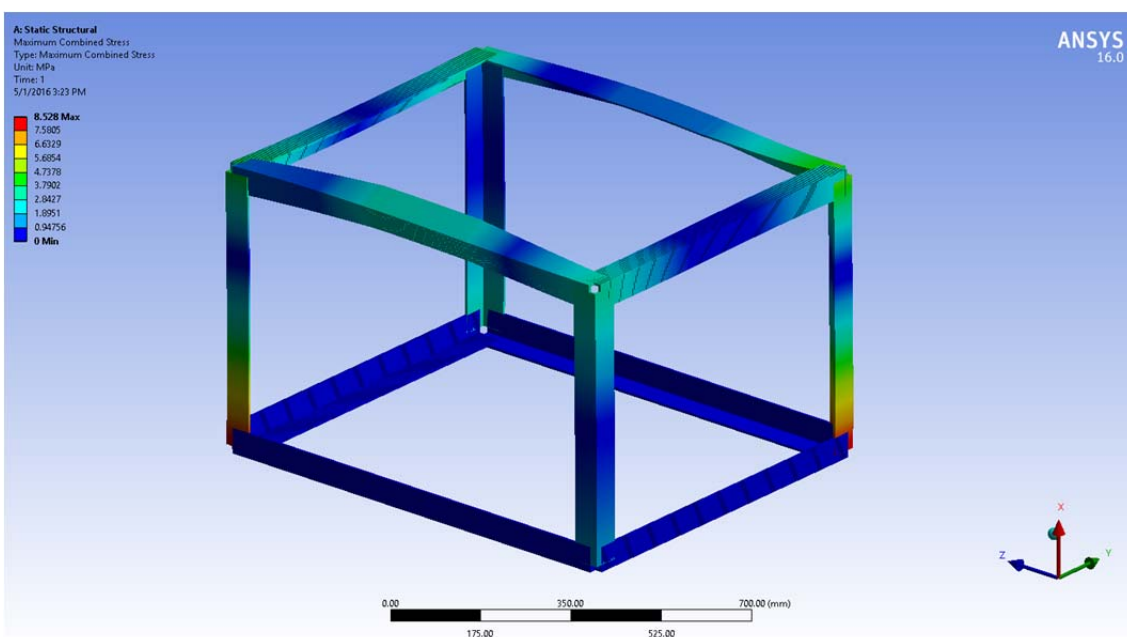
Obrázek 6 Maximální napětí ráku 40 × 4

## 5.2.2 Ocelový profil L 55 × 55 × 5

Druhým nejméně deformovaným rámem je ocelový profil L 55 × 55 × 5, jehož maximální výchylka dosahuje 0,11181 mm. Není tedy o moc horší než čtvercový uzavřený profil a pořád dosahuje menší deformace než původně použitý profil I80. Vzhledem k menší ploše styku se základnou dosahuje maximální napětí podstatně vyšší hodnoty než u čtvercového profilu a to 8,528 MPa.



Obrázek 7 Deformace rámu z L 55 × 55 × 5

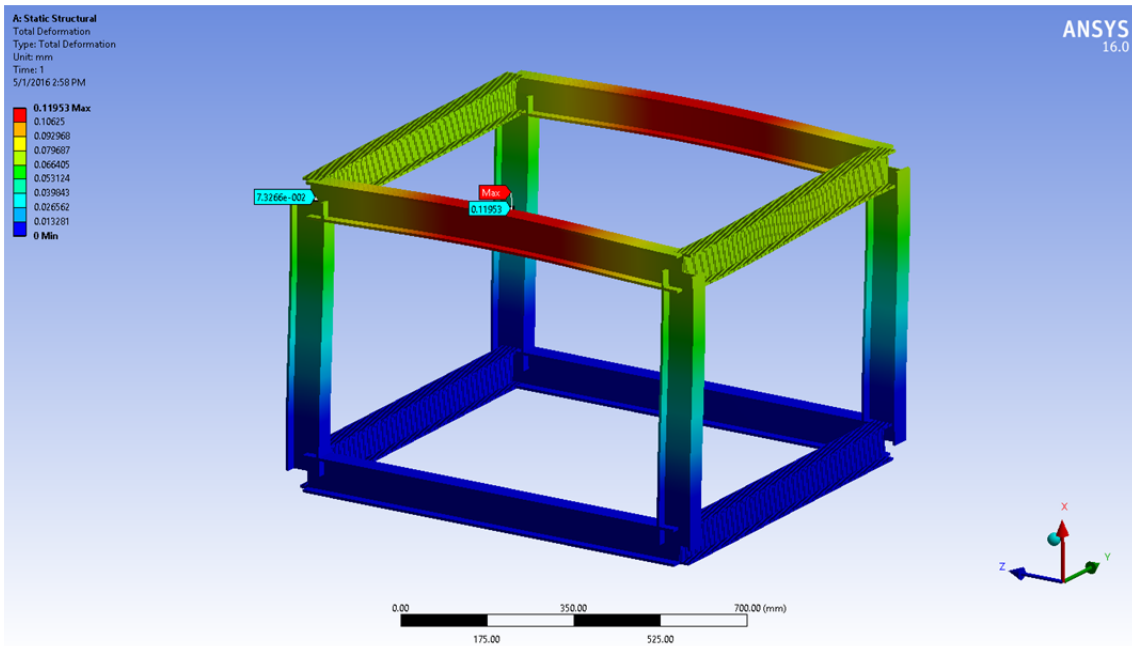


Obrázek 8 Maximální napětí rámu L 55 × 55 × 5

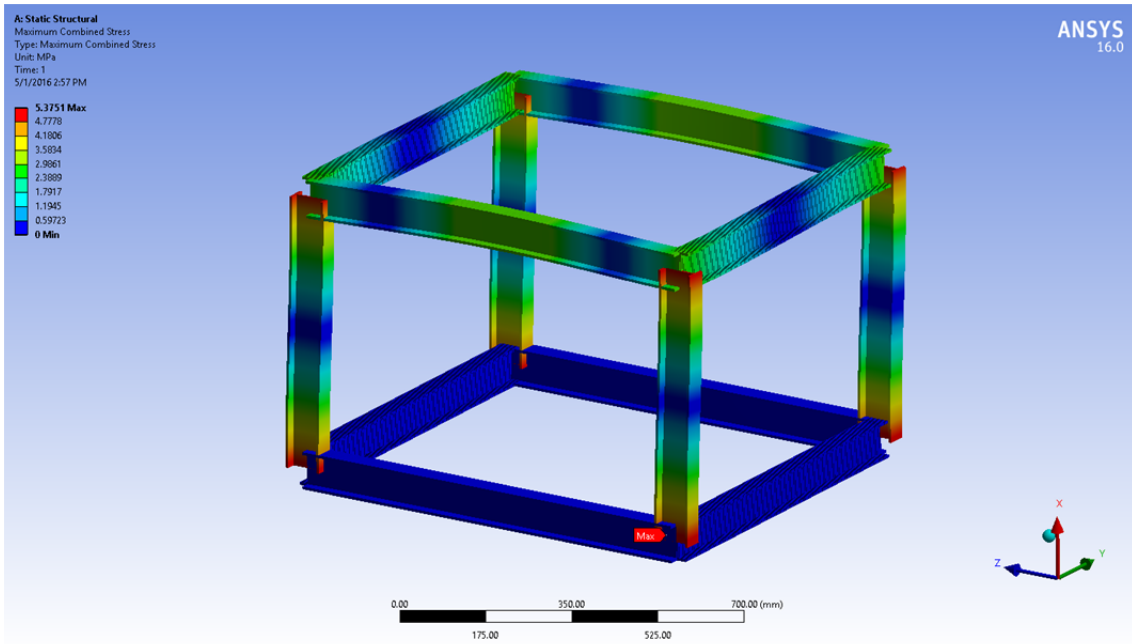


### 5.2.3 Ocelový profil I80

Původně použitý profil se projevil jako třetí nejméně deformující se rám. Pořád dosahuje slušné hodnoty deformace 0,11953 mm, což je pouze o 9,61  $\mu\text{m}$  víc než rám ze čtvercového profilu. Maximální napětí dosahuje hodnoty 5,3751 MPa.



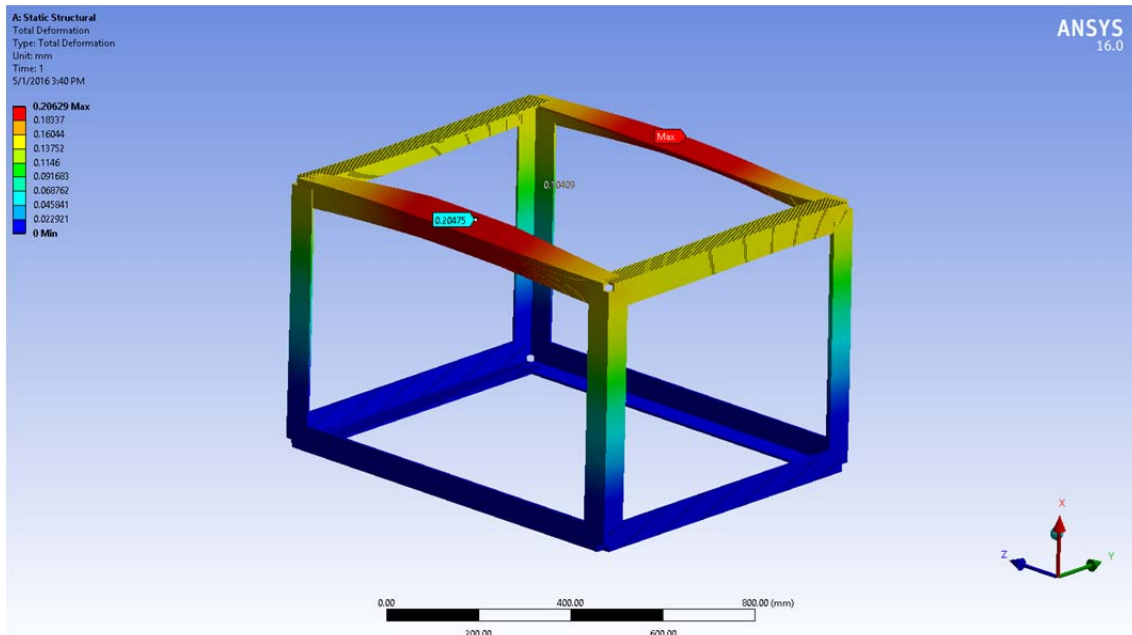
Obrázek 9 Deformace rámu z I80



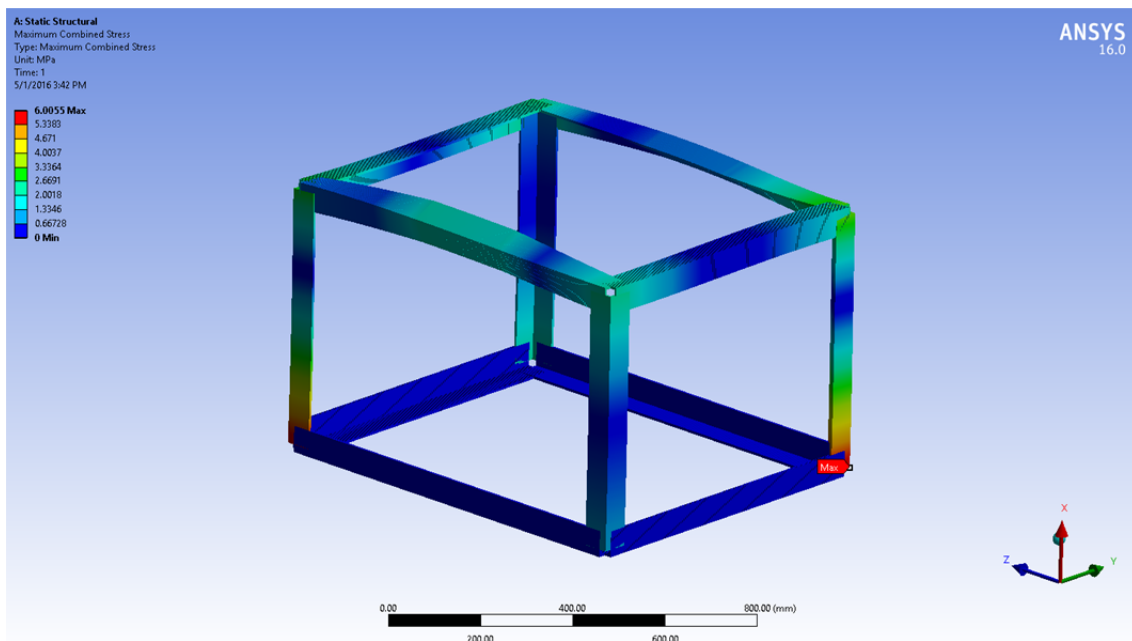
Obrázek 10 Maximální napětí rámu I80

## 5.2.4 Hliníkový profil L 60 × 60 × 6

Hliníkový profil vychází ze všech testovaných profilů jako druhý nejhorší. Maximální výchylka zatíženého rámu přesahuje hodnotu 0,2 mm. To už je skoro dvojnásobná deformace oproti prvnímu testovanému rámu. Maximální hodnota napětí u tohoto rámu je 6,0055 Mpa.



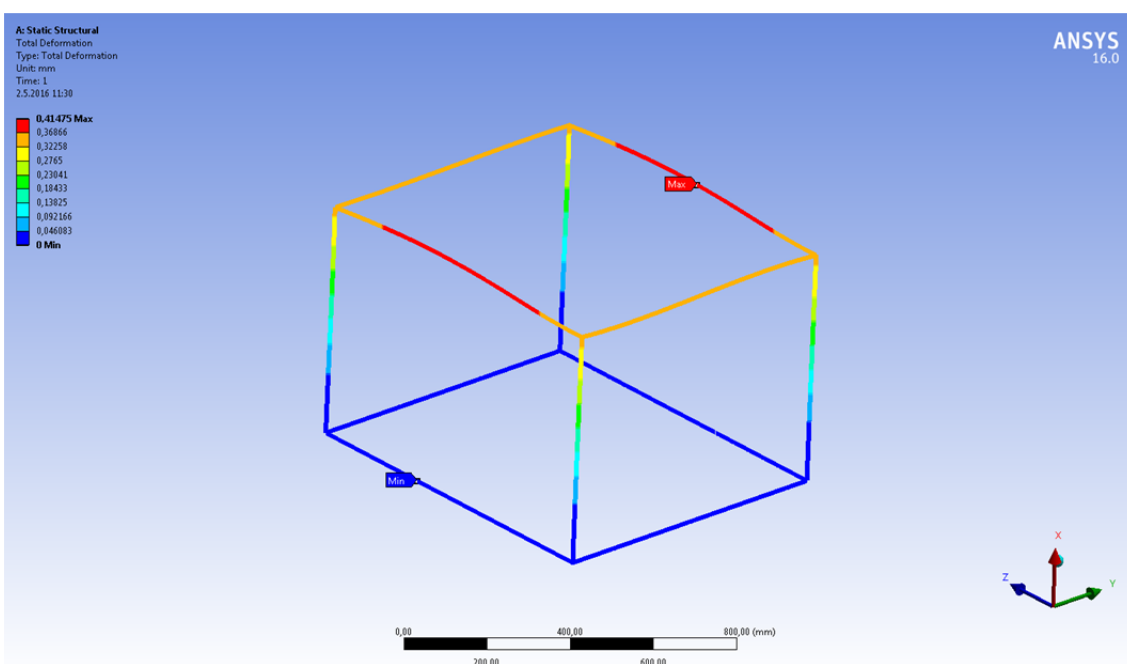
Obrázek 11 Deformace rámu z L 60 × 60 × 6



Obrázek 12 Maximální napětí rámu L60 × 60 × 6

### 5.2.5 Alváris 40 × 40L

Hliníkový profil Alváris 40 × 40L vyšel ze všech testovaných nejhůře. Maximální výchylka dosahuje hodnoty 0,41475 mm. To je více než 3,7× víc než první testovaný rám. U tohoto rámu jsem měl problém s analýzou na základě tvaru profilu. Analýza je tedy provedena pouze na základě průřezových charakteristik a výsledkem je jen celková deformace rámu.



Obrázek 13 Deformace rámu z tvarového profilu Alváris 40 × 40L

### 5.3 Konstrukce frézky

Z pevnostních analýz vyšel podle maximální celkové výchylky jako nejpevnější rám z uzavřeného ocelového profilu 40 × 4. Navíc dojde i k poměrně velkému ušetření hmotnosti, která u tohoto profilu klesne z původních téměř 51,5 kg na necelých 38,7 kg. Naproti tomu tvarový profil Alváris s maximální výchylkou přesahující 0,4 mm jako nevhodný. Hliník se všeobecně kvůli své nízké pevnosti v profesionální sféře obráběcích strojů nepoužívá a používá se tedy jen pro konstrukce hobby frézek. Profesionální stroje používají rámy z litiny, oceli, přírodního kamene nebo vysokopevnostních betonů. Pokud bychom jako materiál uzavřeného čtvercového profilu použili místo konstrukční oceli hliník,

zvýšili bychom maximální výchylku na hodnotu přesahující 0,3 mm, tudíž 3× vyšší.

Z důvodu, že by se rám z tohoto profilu šrouboval velmi obtížně a že maximální kombinované napětí v rámu dosahuje pouze hodnoty 3,768 MPa, je rám svařený. Samotná konstrukce frézky je prodloužena o 1000 mm vysoký podstavec ze stejného profilu. Ten stojí na výškově a částečně stranově stavitelných nožičkách. V této spodní části je ukryt pojízdný díl, na jehož konstrukci jsou použity uzavřené obdélníkové ocelové profily  $80 \times 40 \times 2$  a  $40 \times 20 \times 2$  a čtvercový  $40 \times 2$ .

## 6 TECHNOLOGICKÁ SPECIFIKA

Jak již bylo zmíněno, rám bude svařovaný. Z důvodu jednoduchosti konstrukce i dobré svařitelnosti zvoleného materiálu není potřeba volit jakýkoli sofistikovanější druh sváření. Postačí technologie MIG/MAG či v dnešní době už poměrně dobře dostupný TIG.

Plechové díly budou vyrobeny z 1 mm silného ocelového plechu. Ten bude upraven do potřebných formátů pomocí stříhání. Složitější tvary plechu budou podle vhodnosti vyřezány laserem nebo vyrobeny pomocí vysekávání a vyštípnutí. To bude použito převážně v místech, kde je nutné dosáhnout vnitřního úhlu 90°, tedy pro díly, které jsou učeny pro ohyb ve dvou směrech s následným zavařením. Vysekávání se může použít i na děrování pro šrouby. Na to se použijí běžné vysekávací nástroje a nebude tedy potřeba vyrábět tvarové nástroje, které by prodražily celkovou výrobu.

Výsledné plechy budou ohýbány prostým jednosměrovým ohybem. Několik dílů jako je horní kryt frézy, přední panel a madla dveří bude nutné po ohnutí svařit. Výsledné díly budou nalakovány. Jelikož je v dnešní době možné lakovat práškovými barvami i dvoubarevně, a toto lakování se významně neprojeví v ceně, bude z důvodu odolnosti těchto laků tato technologie upřednostněna pře běžným lakováním.

Plechové díly budou ke konstrukci přišroubovány. Většina dílů bude z důvodu tlumení vibrací, snížení hlučnosti stroje a potřebné výškové korekci 1 mm podlepena běžným gumovým těsněním. Dveře budou kvůli snížení hlučnosti podlepeny mikroporézním těsněním.

Dveře jsou umístěny na skrytých pantech. Ten v tomto provedení umožní mezeru mezi bočnicemi a dveřmi pouhé 2 mm a společně s těsněním tak absolutně zamezí průhledu do útrob stroje z bočních stran. Dveře jsou na svých okrajích zpevněny ohybem plechu o 180°. Díky

použití ocelových materiálů se dveře jednoduše zajišťují na magnety skryté v gumových pouzdech, aby se zabránilo tupému nárazu dveří při zavírání. Dveřní panty by bylo možné upevnit pomocí rozepření nebo přišroubováním k navařeným závitům na vnitřní straně dveří. Zda bude tuhost dveří dostatečná a nebude nutné jejich další vyztužení, stejně jako jestli nebude nutné prošroubování šroubů skrz dveře pro přichycení pantů, bude nutné ověřit až v praxi.



Obrázek 14 Kontrukce frézky

Přední posuvný panel je umístěn na běžném kluzném vedení CF. K výškovému nastavení slouží plynová pružina s průběžnou aretací s pístem dlouhým 248 mm, což vzhledem k poloze umístění umožní výškovou stavitelnost tohoto panelu až 255 mm. Podle výsledné

hmotnosti celého dílu – displej, držák displeje, plechování, kluzné vedení  
– bude použita pružina se silou až 1200 N.

Celé konstrukce bude usazena na výškově a částečně stranově  
stavitelných nožičkách.

Vnitřní spodní díl je umístěn na 69mm vysokých pojezdových  
kolečkách, z nichž přední jsou bržděná a slouží k zamezení pohybu.  
Vyjma první police jsou všechny ostatní umístěny na kuličkových  
plnovýsuvech v délce 500 mm s maximální únosností 45 kg. V zadní  
části spodního prostoru je umístěno oběhové čerpadlo s chlazením  
pomocí dvou 120mm větráčků a plochá nádrž chladicí kapaliny. Vše  
bude upevněno do zadního dílu krytování. Pro spojení spodního a  
horního dílu a zamezení posouvání horního dílu bude využito upínacích  
uzávěrů.

## 7 POPIS DÍLA

Vizuálně nejvýraznější na celém obráběcím centru je určitě jeho přední strana. Obsahuje prakticky všechny prvky, které narušují naprostou utilitárnost celkového tvaru frézky. Ostatní plochy jsou de facto všechny naprosto rovné, narušené jen jedním oknem z pravé strany, jedněmi bočními dveřmi nebo hlavičkami šroubků a ventilačními otvory chladícího okruhu.

Asi opticky nejvýraznějším prvkem na přední straně je křivka, začínající madlem horních prosklených dveří, pokračující až úplně dospod stroje. K té se z druhé strany sbíhá obrácená křivka téhož tvaru na spodních levých dveřích. Tento prvek, který je tedy tvořen madlem horních dveří a prohlubní mezi oběma spodními dveřmi, jenž tvoří zároveň madla pro oboje spodní dveře, je navíc podpořen barevným akcentem. Ten je nejvýraznější hlavně okolo středu stroje, ale pokračuje jemnou spárou až k jeho spodnímu okraji. Tvar této křivky je využit i na bočních dveřích, umožňující přístup k elektroinstalaci, počítači a dalším ovládacím prvkům stroje. Opět je doplněna i barevným akcentem prohlubně.

Snažil jsem se o celkové minimalizování spojovacího materiálu. Původně jsem chtěl minimalizovat hlavně počet viditelných šroubů. Tuto snahu jsem však v průběhu práce prakticky opustil. Ano, bylo by možné opravdu minimalizovat počet viditelných šroubů, řešit vše záslepkami, šroubky uchycenými v navářkách z vnitřních stran plechových konstrukcí nebo různými nacvakávacími systémy uchycení. To by ale v každém případě přispělo k celkově složitější konstrukci, ke zdražení výrobního procesu, ale také k rozměrovému příbytku či horšímu odhlučnění. Šroubky tak sice ve výsledném návrhu nejsou vyjma čelní strany skryty prakticky vůbec, ale k minimalizaci dochází díky přichycení několika prvků krytování nebo i jiných konstrukčních prvků naráz. Například šrouby pantů přichycují současně i obě bočnice,



stejně tak je i lineární kluzné vedení přeniho posuvného dílu je přichyceno společně s bočnicí. Horní díl nepotřebuje jediný vlastní šroubek a je přichycen šrouby na horní straně bočních dílů. To navíc umožňuje vcelku jednoduchý přístup k mechanice posuvů, vřetenu, kabelovodům v horní části a v případě nutnosti je možný velmi jednoduchý servis pouze povolením těchto šroubků a sejmutím horního dílu bez nutnosti jiné demontáže.



Obrázek 15 Výsledná vzhled obráběcího centra

Na přední části je umístěn výškově stavitelný posuvný panel. Je to jediná věc, která významně navyšuje rozměr samotné konstrukce. S ohledem na tloušťku dotykových displejů s *open frame* konstrukcí a nutnost předsadit tento displej před konstrukci a spodní dveře však prakticky

není možné se tomuto rozměrovému nárůstu vyhnout. Předsazení displeje před konstrukci bylo nutné pro udržení správné ergonomické pozice tohoto ovládacího prvku. Spodní strana displeje jde výškově nastavit od 90 cm až do 115 cm. Společně s možností vyklápění displeje by tak měla být zajištěna optimální ergonomická poloha jak při ovládání displeje, tak při jeho sledování. Bez polohování předního displeje by také jinak nebylo možné otevřít pravou stranu dveří.

Pokud ohnete plech ve dvou na sebe kolmých směrech do pravého úhlu a jejich konce budete chtít svařit, vždy vám vznikne z důvodu technologie této výroby malinká dírka na rohu. Tomu by se dalo zabránit pouze velkým množstvím přídavného materiálu při sváření a následnému obroušení, což je z ekonomického hlediska výroby nevhodné. Tento malý detail je na jednom z horních rohů krytu vytvořen v úplně jiném měřítku a podpořen znovu barevným odlišením pro jeho zdůraznění.

Vyjma tohoto jednoho detailu jsou barevně zvýrazněny jenom prvky, které slouží k uchopení, otvírání nebo polohování. Je tak vytvořen na první pohled možná neznatelný, přesto však naprosto intuitivní systém ovládání těchto prvků.

Při zašroubování nožiček vnější konstrukce tato dosedne na spodní díl, který je umístěn na kolečkách a je tedy snadné stroj na krátkou vzdálenost převést. Slouží také jako úložný prostor, se kterým je snadné dojet si pro materiál. Čtyři plně výsuvné police o rozměru 500 × 760 mm poskytují celkem místo až pro 180 kg materiálu, náradí a další věci. Na vrchní pevné polici je volně umístěna vana na obrobený materiál. Je to velmi neobvyklé řešení, připadalo mi však nepraktické řešit vanu přímo v samotné konstrukci frézky, zmenšilo by to vnitřní prostor.

Neumožňovalo by to ani s plnou vanou pohodlně manipulovat – vysát ji, vynést, odvézt, vysypat. Nemohla by být tak velká nebo by se musela zvětšit konstrukce samotné frézky, což by mělo negativní dopad na její pevnost.

Police v tomto boxu nedosahují plné hloubky stroje ze dvou důvodů. V zadní části je totiž umístěn kompletní chladicí systém – čerpadlo, chlazení, nádrž. Ta i přes svou relativně malou tloušťku poskytuje dostatečný objem pro chladicí kapalinu.

## 8 PŘÍNOS PRÁCE PRO DANÝ OBOR

Netroufám si tvrdit, že by má práce byla nějakým významným přínosem v designu CNC zařízení či dokonce designu samotného. Avšak zařízení je podstatně odlišné od jiných komerčních zařízení a to jak co se týče velikosti, tak i konstrukce. Pokud tedy neuvažujeme konstrukci samotné obráběcí horní části, ale celkovou konstrukci s podstavcem a pojízdným vnitřním spodním dílem. Proto se nebojím říct, že v celkovém uspořádání, na kterém jsem usilovně pracoval, je zařízení ojedinělé.

CNC obráběcí centra jsou zařízení, na kterých je potřeba dodržet vysoce funkční design s ohledem na množství technologických požadavků a jsou proto většinou poměrně stroze tvarována. I mé zařízení v tomto ohledu nijak nevybočuje, neboť celkový tvar je *de facto* utilitárně jednoduchý kvádr. Jak ale pevně doufám, celkově se od konkurenčních strojů vizuálně dostatečně významně odlišuje. Hlavním kritériem bylo zachování co nejjednodušších krycích částí a co největší prostorová úspornost, což konkurence s ohledem na velikost a hmotnost samotné konstrukce často vůbec neřeší. U naší frézky tak podle mě byl s ohledem na velikost celého zařízení vytvořen poměrně pěkný, velký obrobitebný prostor.

Nejde ale jen o přínos designu pro CNC obráběcí centra! Vnímám také přínos takového zařízení pro obor designu. Zařízení, které by běžně mohli designéři využívat pro svou práci. Které by mohlo stát v rohu studia a vizuálně nenarušovalo interiér, jako by tomu bylo u velkých obráběcích center. Taková normální plechová skříň, ze které ale mohou vylézt krásné a funkční věci a pomohou dosáhnout lepších výsledků.

## 9 SILNÉ STRÁNKY

Jako jednu z nejsilnějších stránek práce považuji jednoduchost konstrukce i plechování. Tím jsou minimalizovány výrobní procesy a tedy i náklady. S jednoduchostí plechování souvisí i dobrá údržba a seřizování stroje. Stejně jako zachování velkého obráběcího prostoru s ohledem na velikost konstrukce. Řešení tohoto obráběcího centra neřeší jen frézku, ale zohledňuje i nutnost uskladnění náradí, materiálu k obrábění a nástrojů. Pevně věřím ve vysokou funkční hodnotu stroje, tu ale bude možno ověřit až v praxi.

## 10 SLABÉ STRÁNKY

Nejslabší stránkou stroje spatřuji v těsnosti mezi obráběcím prostorem a vanou, které já umístěna ve spodním díle. Ustavením stroje na nožičkách tak, aby stůl ležel ve vodorovné pozici se konstrukce vlastního stroje trochu zvedne od spodní konstrukce s vanou. Stojím si za tímto řešením, připadá mi u takového stroje vhodná. Bude ale možná náročně udržet čistotu uvnitř spodního dílu. Hlavně pokud půjde o obrábění pěn nebo dřeva, které netvářejí větší třísky jako měkké kovy, ale spíše částice prachového charakteru. Původně jsem myslel, že frézka bude kompaktnějších rozměrů a tak vnímám jako slabší stránku i rozměry, které umožní umístění pouze v prostorách s minimální šířkou dveří 90 cm.

## 11 POUŽITÉ ZDROJE

### 11.1 Knižní a periodická literatura

KRÁTKÝ, Jaroslav, Eva KRÓNEROVÁ a Stanislav HOSNEDL. *Obecné strojní části 2: základní a složené převodové mechanismy*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2011. ISBN 9788026100935.

BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. 5., přeprac. vyd. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL, 1989. Česká matice techn. ISBN 8003000467.

HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. *Příručka strojního inženýra: obecné strojní části*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 1999. Edice strojaře. ISBN 8072260553.

GIBSON, I, D ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, 2015. ISBN 1493921126.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.

### 11.2 Internetové zdroje

*Aditivní technologie - metody Rapid prototypingu* [online]. [28. března 2016]. Dostupné z: [bit.ly/1qAOGh2](http://bit.ly/1qAOGh2)

*MCAE Systems* [online]. [28. března 2016]. Dostupné z: [www.mcae.cz](http://www.mcae.cz)

*3D tisk: Fused Deposition Modeling* [online]. c2014 [28. března 2016]. Dostupné z: [bit.ly/26UQD7I](http://bit.ly/26UQD7I)

*Sintratec Kit* [online]. c2016 [28. března 2016]. Dostupné z: [sintratec.com/](http://sintratec.com/)

*Accutek Testing Laboratory: 3D Printing in Metal Manufacturing* [online]. 2014 [28. března 2016]. Dostupné z: [bit.ly/1SPBtGO](http://bit.ly/1SPBtGO)

*Quora: 3D Printing: What's the difference between Selective Laser Sintering (SLS) and Selective Laser Melting (SLM)?* [online]. 2013 [28. března 2016]. Dostupné z: [bit.ly/1Y9rUpN](http://bit.ly/1Y9rUpN)

*3D Printing Solutions | Stratasy: PolyJet Technology; Precision 3D printing in a wide range of materials* [online]. c2016 [28. března 2016]. Dostupné z: <http://bit.ly/24yHK18>

## 12 RESUMÉ

I am a student of Industrial Design, a very complex specialization which requires balanced mix of creative and technical skills. A considerable level of background knowledge across many fields is required, but everyone has their focus. Mine lies mainly on working with material and function. And I believe that the topic of my bachelor thesis should represent this fact and stay simply very industrial. Thus the idea of designing a machining center was born.

The main goal is to design (and prepare for potential mass production) a functional and aesthetically pleasing product for hobby and semi-professional use. This CNC cutter should be able to handle a huge variety of tasks, thus creating competition for 3D printers on the field of rapid prototyping market. 3D printers are the center of interest at the moment, but many tasks of rapid prototyping can be done by machining which doesn't use so expensive materials. The only problem is that there are currently no appropriate machines on the market. There are many reasons for the success of 3D printers, but between the most important we can also identify the ease of use, clean operation, compact dimensions or portability. The last two factors are crucial so they also became the main requirements for this design. Meeting those requirements should later ensure the machining center its place on the market.

But this brings forth many other technical and dimensional limits. For example the maximal width of the machine cannot exceed 900 mm, as it needs to be able to go through standard doors without major disassembling. Also the position of controls and display is determined by this fact.



And last, but definitely not least, this whole concept highlights the need for very well designed aesthetics. Since this machining center is supposed to be placed in industrial halls as well as small shops, it has to become a pleasing sight in the interior.

While working on this project I had to constantly keep in mind all aspects of the design. The ergonomics, technical aspects and aesthetics had to comply with the requirements. And they all influenced each other, which led to a great many variants being designed before reaching the final form of this machining center. Even some stress and rigidity analysis had to be conducted, to ensure full functionality. This way the construction could have been kept relatively light and economical. That was very important, because competitiveness of the final design was always one of the key goals.

## 13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Dosavadní práce.....	2
Obrázek 2 Výsledná síla a její umístění .....	23
Obrázek 3 Moment a jeho umístění.....	23
Obrázek 4 Okrajové podmínky.....	24
Obrázek 5 Deformace rámu z uzavřeného čtvercového profilu 40 × 4 ..	25
Obrázek 6 Maximální napětí rámu 40 × 4.....	25
Obrázek 7 Deformace rámu z L 55 × 55 × 5 .....	26
Obrázek 8 Maximální napětí rámu L 55 × 55 × 5.....	26
Obrázek 9 Deformace rámu z I80 .....	27
Obrázek 10 Maximální napětí rámu I80.....	27
Obrázek 11 Deformace rámu z L 60x60x6.....	28
Obrázek 12 Maximální napětí rámu L60 × 60 × 6 .....	28
Obrázek 13 Deformace rámu z tvarového profilu Alváris 40 × 40L.....	29
Obrázek 14 Kontrukce frézky.....	32
Obrázek 15 Výsledná vzhled obráběcího centra .....	35

Všechny obrázky jsou z vlastní tvorby.

## 14 SEZNAM PŘÍLOH

### **Příloha 1**

Srovnávací tabulka obráběcích zařízení

### **Příloha 2**

Srovnávací tabulka 3D tiskárny

### **Příloha 3**

Modální analýza ocelového profilu I80

### **Příloha 4**

Modální analýza ocelového profilu L 50 × 50 × 5

### **Příloha 5**

Modální analýza hliníkového profilu L 60 × 60 × 6

### **Příloha 6**

Modální analýza tvarový profil Alváris 40 × 40L

### **Příloha 7**

Obráběcí centrum 1

### **Příloha 8**

Obráběcí centrum 2

### **Příloha 9**

Obráběcí centrum 3

### **Příloha 10**

Obráběcí centrum 4

Příloha 1 Srovnávací tabulka obráběcích center; zdroj: vlastní tvorba

	Roland SRM-20	Roland MDX-40A	Roland MDX-540	Roland MDX-540A	IKH ICV 4030	IKH ICP 4030	Emco Concept Mill 105	Emco ENCOMILL E 350
Zdroj	<a href="#">bit.ly/crm-20</a>	<a href="#">bit.ly/mkx-40a</a>	<a href="#">bit.ly/mkx-540</a>	<a href="#">bit.ly/mkx-540</a>	<a href="#">bit.ly/seriesICV</a>	<a href="#">bit.ly/seriesICP</a>	<a href="#">bit.ly/emconill105</a>	<a href="#">bit.ly/emconill350</a>
Konstrukce	uzavřená	uzavřená	dřevěná <sup>1)</sup>	dřevěná <sup>1)</sup>	uzavřená	uzavřená	uzavřená	uzavřená
Velikost <sup>2)</sup>	445,0 x 436,6 x 426,2 mm	669 x 760 x 554 mm	745 x 955 x 858 mm	765 x 955 x 859 mm	769 x 826 x 901 mm	780 x 850 x 810	1135 x 1100 x 1100 mm <sup>3)</sup>	1600 x 1700 x 2200
Hmotnost	19,5 kg	65 kg	102 kg	109 kg	150 kg	130 kg	400 kg	1920 kg
Obrobitelný prostor	202,2 x 152,4 x 60,5 mm	305 x 305 x 105 mm	500 x 400 x 155 mm	400 x 400 x 155 mm	400 x 300 x 140 mm	400 x 300 x 140	200 x 150 x 250	150 x 250 x 300 mm
Obrobitelné materiály	modelovací vosk, dřevoplast, pěny, akryl (PMMA), polyacetát (PA), ABS, pláštěný spoj	dřevoplast a modelářské netekavé materiály	plast, papírkovice, dřevo a nečerné kovy	plast, papírkovice, dřevo a nečerné kovy				
Maximální hmotnost obrobku	2 kg	4 kg	0,26 - 12 kg	0,26 - 12 kg				100 kg
Rychlost posuvu	0,1 - 30 mm/s	XV 0,1 - 50 mm/s	max 7,5 m/min	max 7,5 m/min	max 200 mm/s			
Rozlišení mechanické	0,00298894 mm/krok	Z-0,1 - 30 mm/s	0,001 mm	0,001 mm				
Rozlišení softwarové	RML-1: 0,01 mm/krok NC kód: 0,001 mm/krok	RML-1: 0,01 mm/krok NC kód: 0,001 mm/krok	RML-1: 0,01 mm/krok NC kód: 0,001 mm/krok	RML-1: 0,01 mm/krok NC kód: 0,001 mm/krok				
Přesnost posuvu			±0,05 mm resp. ±0,02 mm <sup>4)</sup>	±0,05 mm resp. ±0,02 mm <sup>5)</sup>	± 0,02 mm	± 0,02 mm		
Přesnost opakování			3 <sup>6)</sup>	3 <sup>6)</sup>	3 <sup>6)</sup>	3 <sup>6)</sup>		
Pohon vřetene	stejnomyšerný motor	stejnomyšerný bečkarškový motor 100 W	stejnomyšerný bečkarškový motor 400 W	stejnomyšerný bečkarškový motor 400 W	servo motor	servo motor	3 řázyový asynchronní motor	3 řázyový asynchronní motor
Pohon os	krokový motor	krokový motor	střídatý servo motor 60 W	střídatý servo motor 80 W		krokový motor	3 řázyový krokový motor	3 řázyový krokový motor
Čeky vřetene	3000 - 7000 ot/min	4500 - 15 000 ot/min	400 - 12 000 ot/min	400 - 12 000 ot/min			150 - 5000 ot/min	400 - 10000 ot/min
Výměna nástrojů	manuální	manuální <sup>7)</sup>	manuální <sup>8)</sup>	manuální <sup>8)</sup>			automatická	automatická
Ujmutí frýzy	kleštin	kleštin	700 W	700 W				
Spotřeba	50 W	210 W	bez obrábění: 65 dB	bez obrábění: 65 dB			1,4 kW	
Hlučnost	bez obrábění: 65 dB	bez obrábění: 56 dB	pohotovostní režim: 42 dB	pohotovostní režim: 40 dB				
Příslušenství		rotační osa, 3D scan	rotační osa, automatická výměna nástrojů, bezpečnostní kryt	rotační osa, bezpečnostní kryt	rotační osa			rotační osa, elektronické řízení
Cena	54,995	57,995	520,995 resp. 526,995 <sup>9)</sup>	531,995 resp. 536,995 <sup>9)</sup>				

1) šířka x hloubka x výška  
2) čtvrtá osa volitelná  
3) volitelný bezpečnostní kryt  
4) volitelná automatická  
5) verze s vedením s kulčkovými frýzami  
6) bez obrobku  
7) bez obrobku  
8) bez obrobku  
9) výrobní náklady

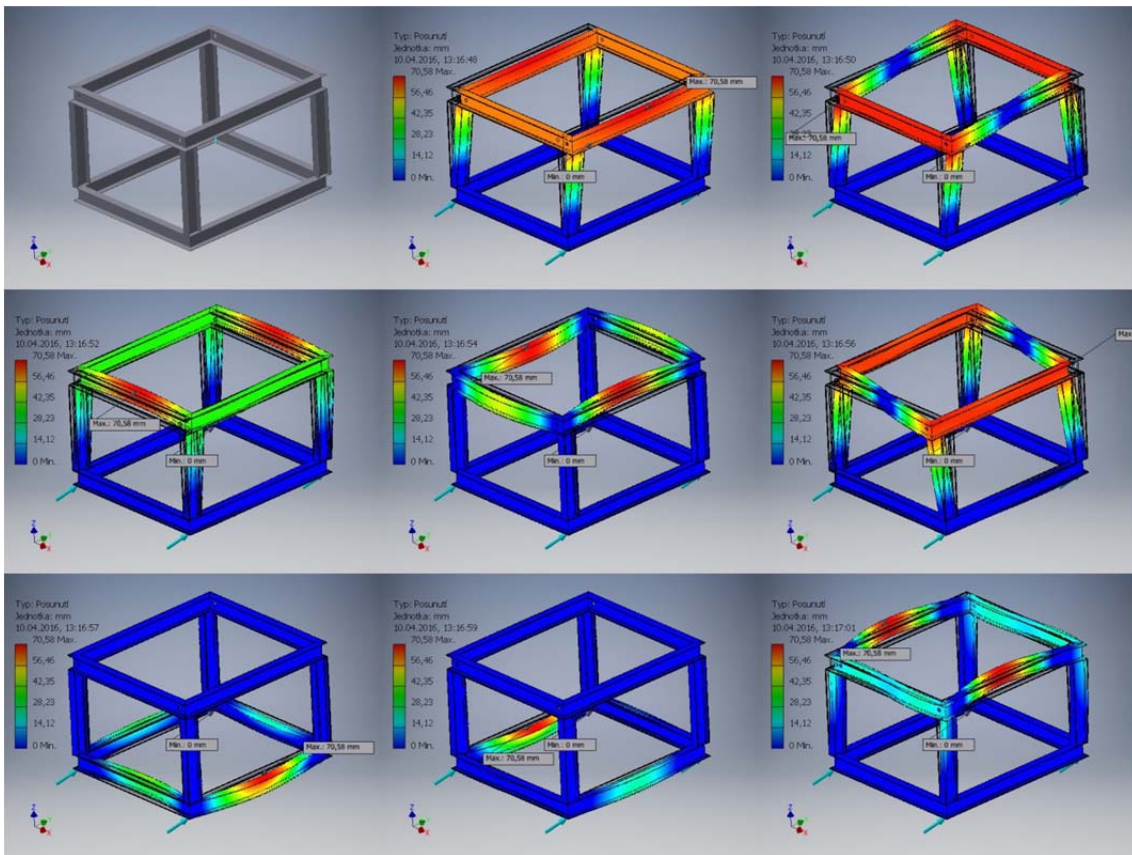
	TIKO	Up! Mini	XYZprinting Nobel 1.0	MakerBot Replicator 2	Sintratec Kit	Stratasys Objet500	Renishaw AM400
Zdroj	<a href="http://bit.ly/tiko3dprinter">bit.ly/tiko3dprinter</a>	<a href="http://bit.ly/upmini">bit.ly/upmini</a>	<a href="http://bit.ly/nobel-1">bit.ly/nobel-1</a>	<a href="http://bit.ly/makerbot2">bit.ly/makerbot2</a>	<a href="http://sintratec.com/kit">sintratec.com/kit</a>	<a href="http://bit.ly/object500">bit.ly/object500</a>	<a href="http://bit.ly/renishaw400">bit.ly/renishaw400</a>
Konstrukce	uzavřená	uzavřená	uzavřená	otevřená	uzavřená	uzavřená	uzavřená
Vnější rozměry <sup>1)</sup>	237 x 221 x 390 mm	240 x 340 x 355 mm	280 x 337 x 590 mm	490 x 420 x 380 mm	560 x 380 x 590 mm	1400 x 1260 x 1100 mm	853 x 1700 x 2115 mm
Hmotnost	1,7kg	6 kg	9,6 kg	11,5 kg	29 kg	430 kg	1225 kg
Tisknutelný prostor	Ø125 x 125 mm	120 x 120 x 120 mm	128 x 128 x 200 mm	285 x 153 x 155 mm	130 x 130 x 130 mm	490 x 390 x 200 mm	248 x 248 x 285 mm
Tisková technologie	FDM	FDM	SLA	FDM	SLS	PolyJet	SLM
Tisknutelné materiály	PLA	PLA, ABS	fotopolymery	PLA, ABS	Nylon	termoplasty, fotopolymery	AISI10Mg, CoCr, In625, In718, stainless steel 316L, Ti6Al4V
Tloušťka vrstvy	0,05mm	0,2 mm	0,025 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,016 mm	0,020 - 0,1 mm
Cena	\$179 <sup>2)</sup>	\$600	\$1,499	\$3,320	€ 4,999	\$250,000	\$500,000 <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> výška x šířka x hloubka

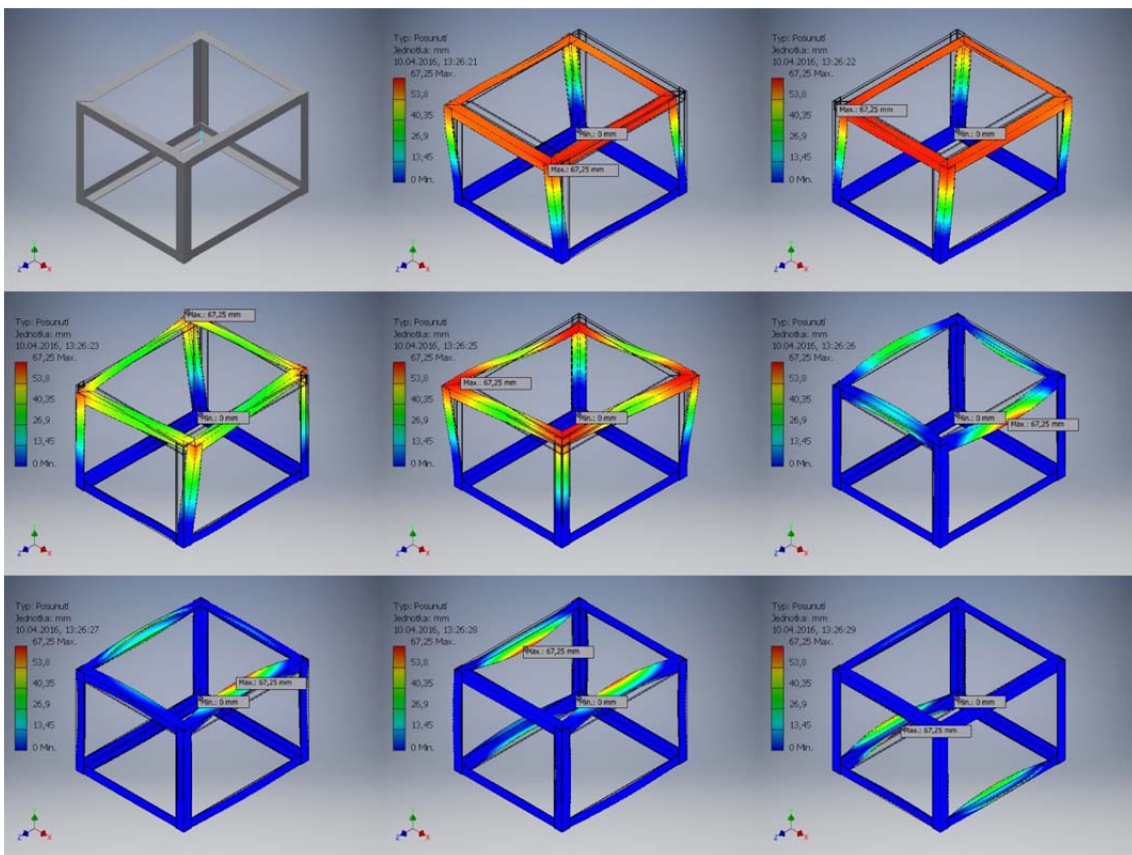
<sup>2)</sup> zatím pouze předobjednávky

<sup>3)</sup> přibližná cena s potřebnými přídatnými zařízeními a softwarem

Příloha 2 Srovnávací tabulka 3D tiskáren;  
zdroj: vlastní tvorba

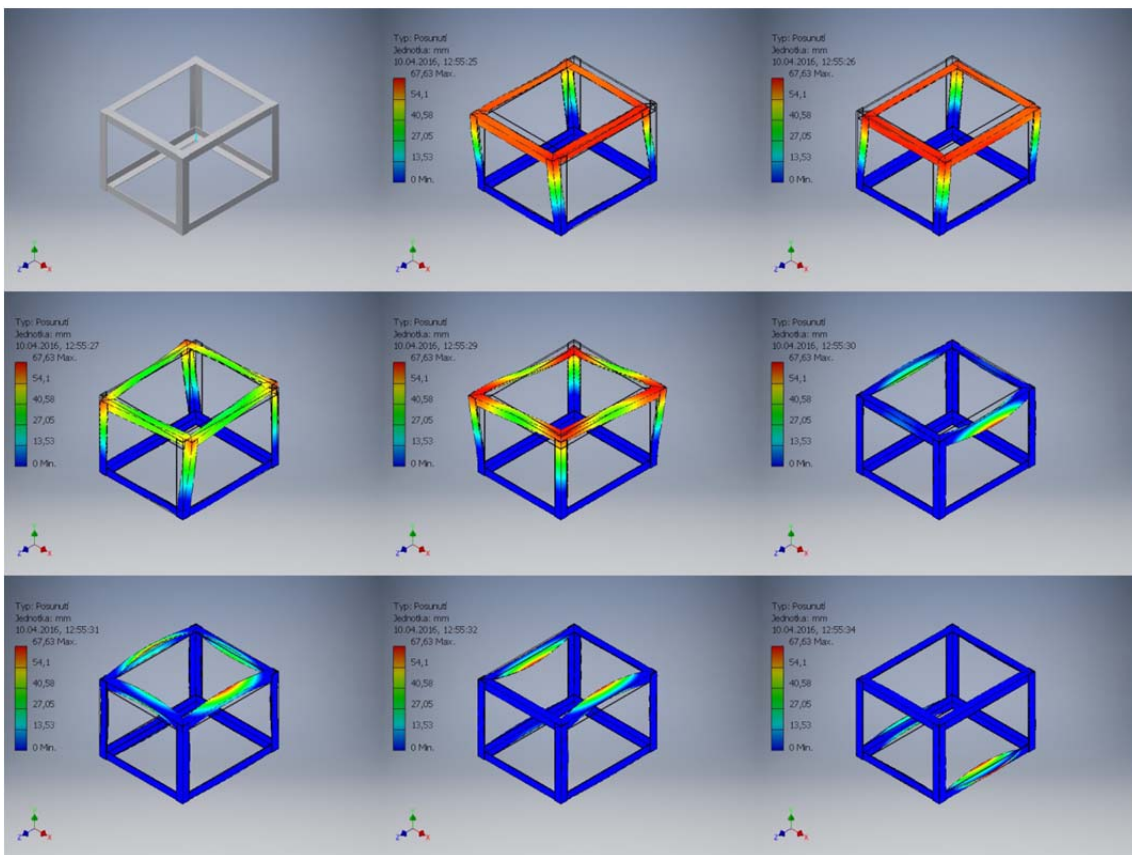


Příloha 3 Modální analýza ocelového profilu I80; zdroj: vlastní tvorba



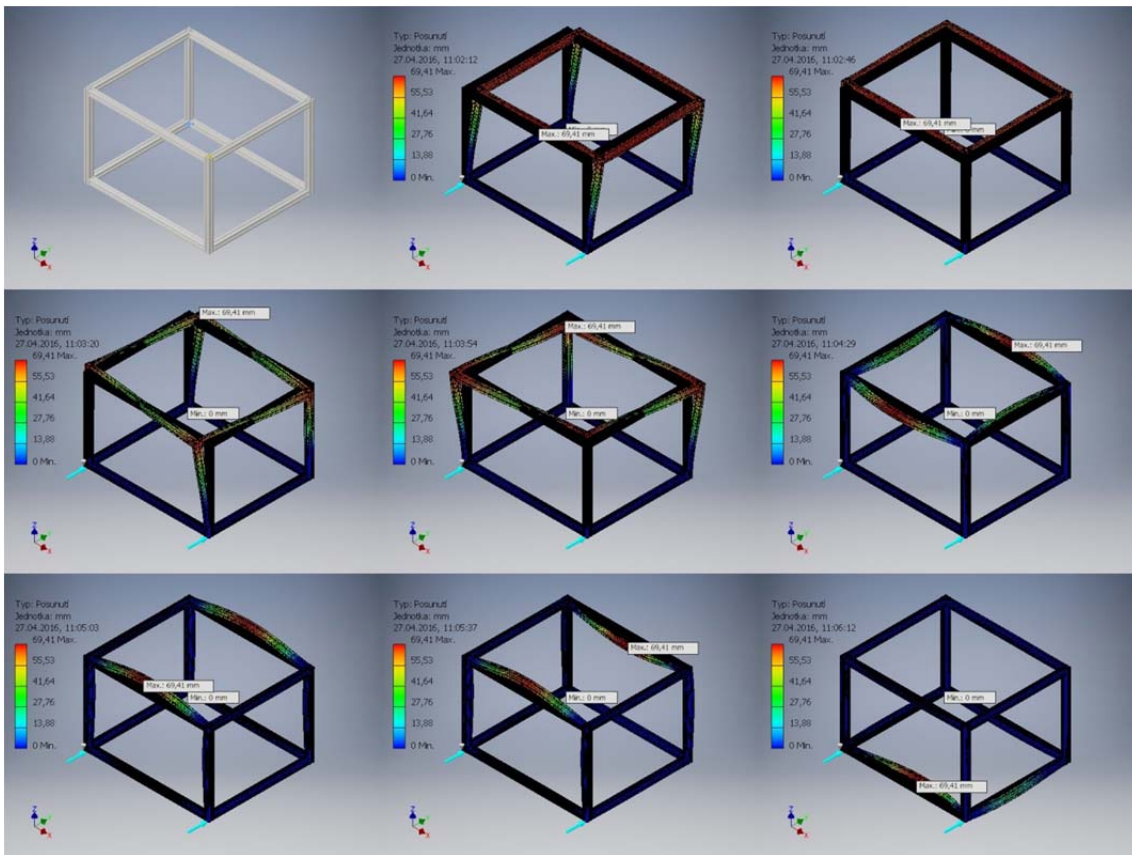
Příloha 4 Modální analýza ocelového profilu L 50 × 50 × 5; zdroj: vlastní tvorba





Příloha 5 Modální analýza hliníkového profilu L 60 × 60 × 6; zdroj: vlastní tvorba





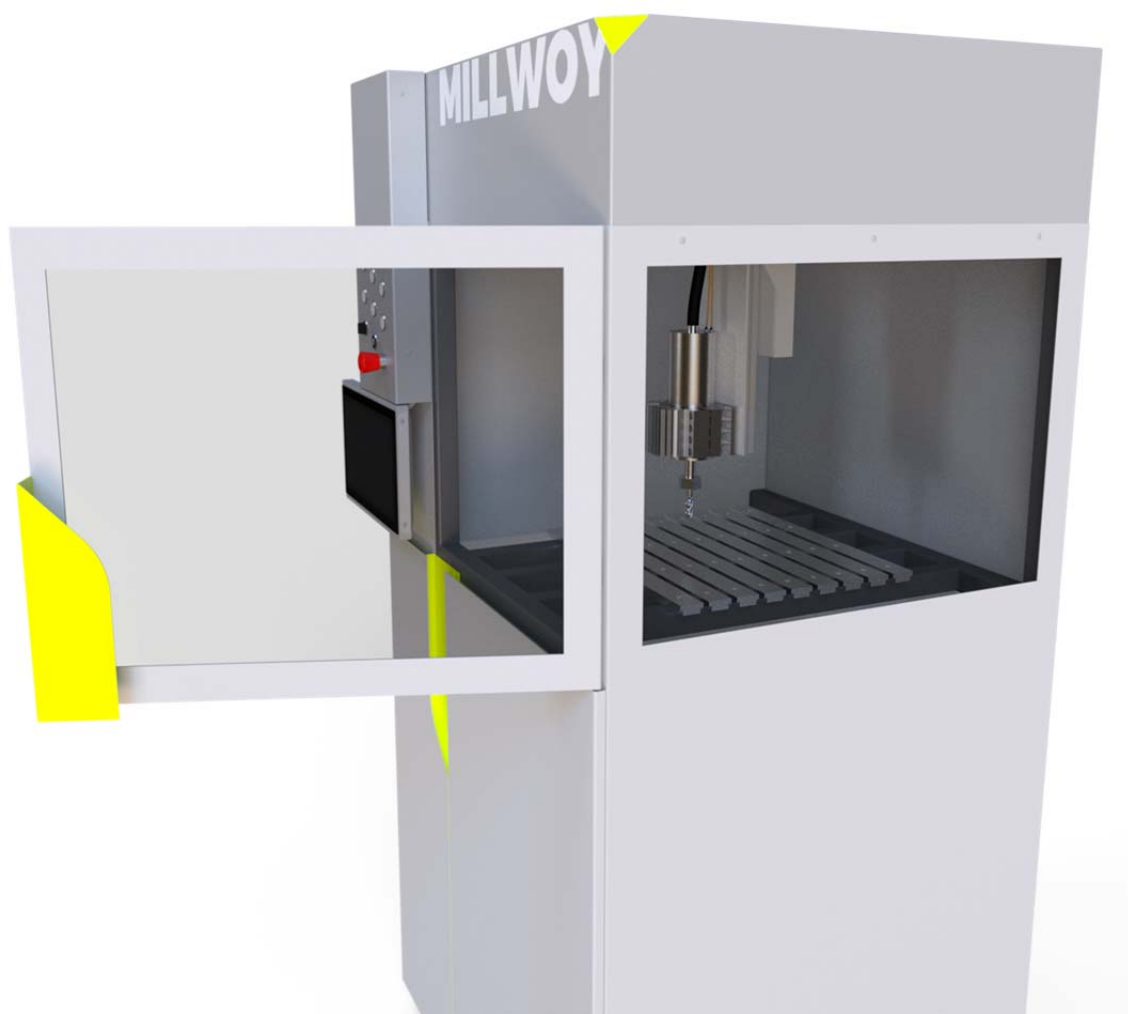
Příloha 6 Modální analýza hliníkového profilu Alváris 40×40L; zdroj: vlastní tvorba



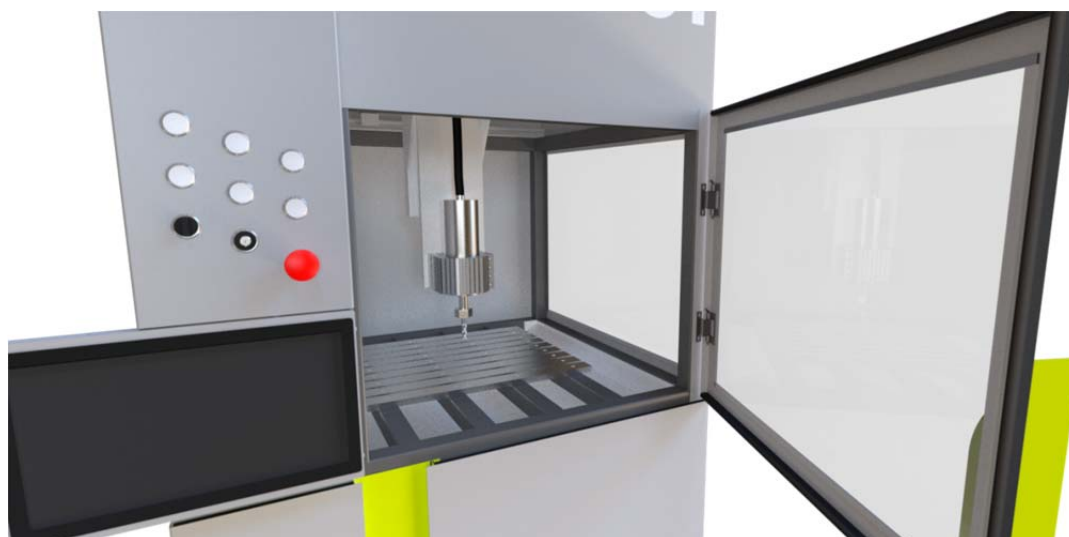
Příloha 7 Obráběcí centrum v prostředí; zdroj: vlastní tvorba



Příloha 8 Polohování displeje zajistí správnou ergonomickou pozici; zdroj: vlastní tvorba



Příloha 9 Velký přístupový prostor umožní snadnou manipulaci s obrobkem; zdroj: vlastní tvorba



Příloha 10 Detail velkorysého přístupu do obráběcího prostoru stroje; zdroj: vlastní tvorba