

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Tereza Búliková



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VYUŽITÍ METOD 3D TISKU PŘI NÁVRHU KONSTRUKCÍ LETECKÝCH NADZEMNÍCH NÁVĚSTIDEL

APPLICATION OF THE 3D PRINTING METHODS IN THE DESIGN OF AERIAL ELEVATED LIGHT FIXTURES
AND SUPPORTING STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tereza Búliková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Studentka:	Bc. Tereza Búliková
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Využití metod 3D tisku při návrhu konstrukcí leteckých nadzemních návěstidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika týkající se požadavků kladených na letecká pozemní návěstidla a světla z hlediska jejich provozní způsobilosti, je spojena s příslušnými legislativními požadavky na jejich provozní vlastnosti. Bez dodržení těchto požadavků, nemůže být letecký výrobek provozován a používán pro civilní účely. Jedním ze základních požadavků na letecké nadzemní konstrukce je jejich křehkost.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout využití vhodných metod 3D tisku při konstrukci nosných částí leteckých nadzemních návěstidel, s ohledem na požadavek jejich křehkosti.

Seznam doporučené literatury:

Předpis L14, Letecká informační služba ČR 2018

Doc.9157 Airport design manual Part 4, ICAO 2004

Zákon o civilním letectví č.49/1997 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá využitím 3D metod při návrhu výroby nosné části leteckého nadzemního návěstidla s přihlédnutím ke všem požadavkům uvedených v leteckých předpisech a konstrukčních manuálech. Výběr 3D metody a příslušného materiálu bude oproti současné situaci cílit na alternativní variantu výroby takového prvku.

Summary

This thesis deals with the usage for 3D methods in the design of a structural element of elevated runway edge light taking into account all the requirements specified in aviation regulations and design manuals. The choice of 3D method and the relevant material is the goal to find an alternative variant of production unlike the production in current situation.

Klíčová slova

Postranní nadzemní návěstidlo, Aerodrome design manual - křehkost, lámací mechanismus, lámací spojka, 3D technologie, 3D materiály, slicování

Keywords

Elevated runway edge light, Aerodrome design manual - frangibility, break-away mechanism, breakable coupling, 3D technologies, 3D materials, slicing

BŮLIKOVÁ, T. *Využití metod 3D tisku při návrhu konstrukcí leteckých nadzemních návěstidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 53 s. Vedoucí Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušila autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 26. 6. 2020

Bc. Tereza Búliková

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Chlebkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Michaelu Horpatzké za ochotné zodpovězení všech mých dotazů. Také děkuji všem, kteří mi při zpracování práce pomohli zasláním potřebných materiálů. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat všem blízkým osobám a rodině za veškerou podporu během studia.

Bc. Tereza Búliková

OBSAH

Úvod	2
1 Letecké návěstidlo	3
1.1 Letecká legislativa	3
1.1.1 ICAO	4
1.1.2 Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví	5
1.1.3 Letecký předpis L14	5
1.2 Aerodrome Desing Manual	6
1.2.1 Vizualizační navigační prostředky	6
1.2.2 Křehkost	7
2 Technologie a materiály 3D tisku	11
2.1 Technologie 3D tisku	11
2.1.1 Tisk na bázi tekutého materiálu	13
2.1.2 Tisk na bázi práškového materiálu	14
2.1.3 Tisk na bázi pevného materiálu	17
2.1.4 Výběr 3D metody	20
2.2 Materiály pro FDM metodu	21
2.2.1 Základní tiskové materiály	21
2.2.2 Pokročilé tiskové materiály	22
2.2.3 Výběr materiálu	24
3 Návrh výroby nosné části leteckého návěstidla	25
3.1 Lámací spojka	26
3.1.1 Zohlednění požadavků manuálu	27
3.1.2 Zohlednění vlastností materiálu	29
3.2 Výpočet zatížení ohybovým momentem a zatížení větrem	32
3.2.1 Zatížení ohybovým momentem	32
3.2.2 Zatížení větrem	36
3.3 Počítačový model	38
3.4 Tiskový model	39
3.5 Testování křehké součásti	41
3.5.1 Testování křehkého prvku nadzemního návěstidla	42
Závěr	43
Literatura	44
Seznam použitých zkratk	51
Seznam použitých jednotek a symbolů	52
Příloha A	53

ÚVOD

Tato bakalářská práce se bude zabývat možným využitím 3D metod při návrhu konstrukce a zhotovení nosných částí leteckých nadzemních návěstidel. Na tuto nosnou část je kladeno několik legislativních požadavků, kde jedním z nejdůležitějších je požadavek na křehkost. Křehkost zde zaručuje, že při případné kolizi letadla s nadzemním návěstidlem dojde k deformaci, příp. porušení návěstidla, resp. jeho nosné části, nikoli letadla. Cílem práce bude navrhnout vhodnou 3D metodu a materiál pro tisk nosné části leteckého nadzemního návěstidla se zohledněním všech nároků leteckých předpisů.

S implementací 3D metod do výrobního procesu se setkáváme stále častěji a 3D metody jsou příhodnou alternativou ke stávajícím obráběcím metodám, zejména díky tvarům, které lze pomocí aditivních 3D metod vyrobit. Mnohdy se tak redukuje několik výrobních kroků pouze na jeden a často zde odpadá nutnost postprocessingu výrobku. Dokončený výtisk je tak ve většině případů rovnou použitelný pro svou aplikaci.

Aby takový výrobek mohl být použit v leteckém průmyslu, musí splňovat požadavky leteckých předpisů a konstrukčních manuálů. Tyto dokumenty řeší podmínky a situace, za kterých bude výrobek provozován. Jaké konkrétní požadavky jsou nárokovány na leteckou stavbu a jaké letecké předpisy musí být dodrženy pro použití výrobku na území České republiky, bude popsáno v první kapitole.

Druhá kapitola se bude věnovat popisu základních 3D technologií, jejich vlastnostem a způsobům nejčastějšího využití. Jednotlivé metody 3D technologií budou mezi sebou porovnány a bude vybrána nejvhodnější metoda pro potenciální výrobu nosné části návěstidla z hlediska největší úspory výrobních nákladů. Dále bude pro vybranou metodu uveden výčet použitelných materiálů s požadovanými vlastnostmi, které budou opět vzájemně posouzeny a bude navržen nejvhodnější materiál.

Poslední kapitola se bude zabývat konkretizací předpisových požadavků pro daný typ leteckého nadzemního návěstidla a jeho nosné části. Bude proveden pevnostní výpočet k ověření křehkosti při porušení nosné části se znalostí vlastností konkrétního materiálu. Dále bude vymodelována nosná část dle existujícího tvaru a budou uvedeny možné konfigurace tisku, na jejichž základě budou porovnány tiskové časy a náklady na výrobu nosné části. V závěru práce bude uvedeno za jakých testovacích podmínek bude nosná část považována za aplikovatelnou pro skutečný letecký provoz.

1 LETECKÉ NÁVĚSTIDLO

Nejen v noci, ale i ve dne je návěstidlo důležitým prvkem letištní dráhy. Při snížené viditelnosti a zhoršených meteorologických podmínkách mohou být letecká návěstidla podstatným nástrojem pro úspěšné přistání či vzlet. Společně s radiokomunikací a značkami jsou návěstidla nepostradatelnou součástí pro bezpečný pohyb letadel nad, kolem i na letišti [1].

Světelná návěst se využívala od počátku letectví. Nejprve to byly parafínové světlice, které zastávaly práci osvětlení přistávacího místa. Později byly vystřídány klasickými žárovkami s maximálním protékajícím proudem 6,6 A. Další významnou generací světla byla světla halogenová, kdy se významně mohla zmenšit vnější konstrukce, bylo dosaženo většího světelného toku a prodloužila se životnost. Halogenová světla se dodnes stále používají, i když je snaha je nahrazovat LED světly. LED světla disponují enormní svítivostí a výdrží [1].

Letecká návěstidla se rozdělují do různých kategorií podle různých charakteristik. Jako první dělení může být uvedeno dělení podle existence stojanu nebo podpěry, kde se uvádí dvě kategorie. Vyvýšené neboli nadzemní návěstidlo je návěstidlo, které se nachází nad zemí a je umístěno na stojanu. Vsazené návěstidlo je vsazeno do země nebo do zpevněné vozovky [1].

Dále může být uvedeno dělení podle umístění ve světelném řetězci. Zde existuje mnoho kategorií, například např. přibližovací, ranvejová, pojížděcí nebo informační návěstidla. Návěstidla se mohou také lišit instalací, typem uložení nebo světelnými charakteristikami. Vyzařovací charakteristiky dělí návěstidla na jedno, dvou nebo všesměrové vyzařování. Lišit se mohou i typem záření - konstantní světlo, zablýsknutí nebo blikání [1]. Na obr. 1.1 je ukázka všesměrového nadzemního návěstidla.

Stejně jako všechna letecká zařízení i letecká návěstidla podléhají mezinárodním standardům. Tyto standardy se poté uplatňují ve formě leteckých zákonů.

1.1 Letecká legislativa

Letecký zákon reguluje provoz civilního letectví prostřednictvím pravidel, kde cílem regulace je zavedení a udržení pořádku v rámci letového provozu. Regulace letecké dopravy vznikla zejména za účelem mezinárodní koordinace a spolupráce. Cílem bylo vytvořit pravidla a normy, podle kterých by se řídil proces letecké dopravy. Sjednotit se musely například technologické požadavky na letadla a letiště nebo zkoordinovat poskytovatele služeb [2].

Díky velkému technologickému rozvoji během 2. světové války bylo nutné obnovit a dohodnout nová pravidla umožňující rozvoj letecké dopravy a mezinárodní spolupráci [2]. Proto byla v 1944 uspořádána tzv. Chicagská konference, kde vzniklo několik úmluv a dohod, včetně Úmluvy o mezinárodním civilním letectví.



Obrázek 1.1: Nadzemní návěstidlo s všesměrovým vyzařováním typ TLE 20, výrobce Transcon.

Zdroj: https://www.transcon.cz/cz/produkty-a-sluzby/svetelne-systemy-letiste/runway/item/tle20?category_id=57
[cit. 1. 6. 2020]

1.1.1 ICAO

Úmluva o mezinárodním civilním letectví dala vznik Mezinárodní organizaci pro civilní letectví, neboli International Civil Aviation Organization (ICAO). Tato organizace řeší technické, bezpečnostní, provozní a některé obchodní a právní záležitosti mezinárodního civilního letectví. Zmíněné záležitosti ICAO řídí na tzv. *multilaterální úrovni*, tzn. že vydává doporučení a standardy, které pak jednotlivé členské státy přijímají ve formě zákonů, vyhlášek či předpisů [2].

Doporučení a standardy rozděluje ICAO do dvou právních institutů - mezinárodní norma ICAO, kde její jednotné uplatňování se uznává jako praktické a nezbytné k usnadnění a zlepšení mezinárodního létání a doporučený postup nebo předpis ICAO, jehož dodržování se uznává jako praktické a velmi žádoucí k usnadnění a zlepšení mezinárodního létání [2].

Součástí Úmluvy o mezinárodním civilním letectví jsou i tzv. *annexy*, které popisují, jakým organizačním způsobem mají státy dosáhnout aplikace norem a doporučení [2]. *Annexy* neboli Přílohy mají dohromady 19 částí a kladou minimální požadavky na všechny členské státy. Tyto přílohy přejímá také Česká republika a jsou součástí zákona o civilním letectví jako letecké předpisy.

1.1.2 Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví

Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví se zkráceně označuje jako zákon o civilním letectví. Tento letecký zákon se skládá nejen z požadavků Úmluvy o mezinárodním civilním letectví, ale také z dalších mezinárodních úmluv, ke kterým se Česká republika zavázala (např. Varšavská úmluva, Římská úmluva atd.). Jakožto členský stát Evropské unie je ČR členem Evropské agentury pro bezpečnost letectví (EASA), která se zabývá např. certifikací, údržbou, letovou způsobilostí letadel nebo způsobilostí leteckých výrobků [3]. Požadavky certifikace EASA na postranní nadzemní návěstidlo jsou totožné s požadavky v Přílohách zákona o civilním letectví (popsaných níže), proto se požadavkům EASA práce nebude dále věnovat.

Zákon o civilním letectví dále může být obsáhlejší a konkrétnější tam, kde mezinárodní předpisy dávají národnímu civilnímu letectví dispozici. Tento zákon vešel v platnost 6. března 1997 a byl doposud několikrát novelizován.

Podobně jako Úmluva o mezinárodním letectví dala vznik ICAO, zákon o civilním letectví zřizuje Úřad pro civilní letectví, který je podřízen Ministerstvu dopravy [4]¹. Jeho náplní je především dohlédnout na dodržování stanovených pravidel, včetně vydávání certifikací a povolení např. na letecké stavby. Pod pojmem letecká stavba rozumíme jakoukoli stavbu sloužící k zajištění leteckého provozu [4]².

Certifikace je závislá na splnění prováděcího právního předpisu, který je vydaný na základě konkrétního zákonného zmocnění a určený k upřesnění obsahu právní normy obsažené v zákoně [5]. Návrh letecké stavby tedy musí podléhat všem zákonným požadavkům. Konkrétní požadavky můžeme najít ve výše zmiňovaných Přílohách 1-19, které jsou zde označovány L1-L19, v tomto případě konkrétně v L14.

1.1.3 Letecký předpis L14

Letecký předpis L14 popisuje požadavky na letiště. Dokument se skládá z 11 hlav, několika doplňků a dodatků. Letecká návěstidla popisuje hlava 5 s názvem Vizualizační navigační prostředky, kapitola 5.3 - Návěstidla a světla.

Tato kapitola rozděluje návěstidla podle typu použití, typu konstrukce nebo typu svítivosti. Tato práce se bude věnovat nadzemním návěstidlům, jejichž přesná definice zní:

„Nadzemní návěstidla RWY, dojezdové dráhy nebo pojezdové dráhy musí být křehká. Jejich výška musí být dostatečně malá, aby byla zajištěna bezpečná vzdálenost vrtulí nebo gondol proudových motorů letadel“ [6]³.

Další specifikace nadzemního návěstidla může být podle funkce nebo umístění na letištní dráze. Práce se bude zabývat postranním dráhovým návěstidlem. Předpis

¹§ 3. odst 2. zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví.

²§ 36. odst 1. písm. c) zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví.

³Hlava 5, kapitola 3, oddíl 1, bod 6 Leteckého předpisu L14 - Letiště.

L14 definuje použití a umístění návěstidel, která jsou primárně určena pro provozatele letišť. Dále jsou v předpisu uvedeny charakteristiky návěstidla, kde jsou uvedeny podmínky pro svítivost. Postranní dráhové návěstidlo musí bíle svítit do všech směrů neboli azimutů a jeho svítivost musí být alespoň 50 cd nebo 25 cd pro letiště bez okolního osvětlení [6].

Tento předpis už však dále neupravuje konstrukční požadavky. Pro tyto účely vydává ICAO doplňující doporučené postupy, které jsou nazvány tzv. *Aerodrome Desing Manual*. Zde můžeme najít základní údaje k návrhu a zkonstruování různých prvků na letištní dráze včetně nadzemního návěstidla.

1.2 Aerodrome Desing Manual

Aerodrome Desing Manual obsahuje návod pro návrh leteckých zařízení tak, aby byly dodrženy mezinárodní požadavky. Manuál je rozdělen do několika částí a každá se zabývá jinými zařízeními či požadavky na zařízení.

1.2.1 Vizualizační navigační prostředky

Tento manuál s podtitulem *Vizualizační navigační prostředky* si dává za cíl vytvořit návod charakteristik potřebných ke zkonstruování navigačních prostředků tak, aby byla dosažena bezpečnost a pravidelnost konstrukce [7]. Manuál obsahuje témata od funkčních požadavků, přes osvětlení ranvejí až po údržbu.

Důležitou kapitolou v tomto manuálu je kapitola 15, která se zabývá křehkostí vizualizačních navigačních prostředků. Křehkost je zde nejdůležitější charakteristikou, protože při kontaktu pomocného vybavení s letadlem nesmí dojít k poškození letadla nebo ke ztrátě jeho ovladatelnosti. Křehký objekt je zde definován jako objekt nízké hmotnosti, který se poruší, zkroučí nebo ohne, což má za následek minimální možné ohrožení letadla. Křehkost bývá dosažena použitím materiálů nízké hmotnosti a tzv. lámacích mechanismů, které umožní výše zmíněné znehodnocení objektu. Objekt nebo součást objektu musí být křehká podle předcházející definice, pokud se nachází v blízkosti ranveje, pojížděcí dráhy nebo parkovací plochy [7].

Také výška nadzemního návěstidla je charakteristikou, která musí být uvažována, a to z důvodu možné kolize s vrtulí nebo gondolou letadla, proto je maximální možná výška postranního návěstidla stanovena na 36 cm. Při použití na ranvejích s kódovým číslem 1 nebo 2⁴ musí návěstidlo vydržet zatížení od výfukové rychlosti motoru 200 kt, což je v přepočtu cca 370 km/h⁵. Manuál také uvádí, že všechny křehké objekty by měly být podrobeny podrobnému testování nebo počítačové simulaci v příslušném softwaru [7].

⁴Dvoumístné kódové číslo specifikuje jestli dané letadlo může operovat na daném letišti. První část kódu je číselná a určuje maximální délku přistávací a vzletové dráhy. Číslo 1 má maximální délku 800 m, pro kód 2 je to maximálně 1200 m [8].

⁵1 kt = 1,852 km/h

1.2.2 Křehkost

Jak přesně navrhnout křehký objekt, popisuje manuál s pořadovým číslem 6 a podtitulem *Křehkost*. Manuál na začátek uvádí pojmy, které jsou podstatné pro celý dokument. Jsou to [9]:

- křehký objekt, jehož definice byla popsána v 1.2.1,
- rázové zatížení, což je náhlé zatížení nebo síla na objekt pohybující se velkou rychlostí,
- rázová energie, při které se objekt znehodnotí při působení rázového zatížení,
- lámací mechanismus, který je citlivý na jeden typ zatížení, ale dokáže odolávat klasickým povětrnostním podmínkám a provozním zatížením, je konstruován buď jako součást návěstidla, nebo je to samostatná součástka.

Předpis uvádí, na které objekty umístěné na přistávací dráze, popřípadě v její blízkosti, se vztahuje definice „křehký objekt“ a musí tak podléhat předpisovým požadavkům. Objekty jsou rozděleny do skupin podle umístění na letišti a každá skupina má vlastní specifikace.

Umístění postranního návěstidla by mělo být na okraji nebo vedle dráhy v maximální vzdálenosti 3 m od dráhy. Počáteční a koncové světlo by mělo být umístěno v pravém úhlu k ose dráhy a ideálně v jedné rovině [9].

Provozní podmínky prostředí

Křehká částice musí být dále způsobilá vydržet podmínky okolního prostředí, které se běžně při provozu mohou vyskytovat. Podrobnosti o podmínkách, ale i doplňující podmínky, které musí být dodrženy při konstrukci, lze nalézt v příslušných dokumentech příslušného orgánu. Univerzální specifikace manuálu se zabývají zatížením způsobené větrem, tryskovými motory a vibracemi.

Křehký objekt by měl být dostatečně silný a pevný, aby vydržel standardní operační podmínky při stanovené úrovni rychlosti větru. Tato stanovená rychlost může být snížena, pokud uvažujeme případnou vrstvu sněhu zachycenou na objektu. Úroveň rychlosti pro konkrétní umístění by se měla stanovit dle historických předpokladů, tedy podle průměrů místních větrných map s časovým intervalem 50 let zpětně.

Zatížení výfukovými proudy motorů nesmí poškodit nebo zničit křehký objekt. Pro skutečné zatížení by měla být zohledněna vzdálenost a orientace objektu od letadla, které může mít upraveny výfukové obrisy. Výfukové proudy motorů pak musíme zohlednit na takovém letišti, které je schopno letadlo tohoto typu obsloužit.

Jednotlivé části objektu by měly být konstruovány tak, aby žádný člen a ani jejich kombinace při provozu nekmitala a zároveň nebyla blízka vlastním frekvencím vyvolaných aerodynamickými odezvami (např. vítr, výfukové proudy motorů, zemětřesení a dalšími) [9].

Požadavky na křehkost

Prvním požadavkem je zde už několikrát zmíněná nutnost objektu se deformovat, zlomit či ohnout, pokud by došlo k potenciálnímu nárazu letadla. Materiál pro objekt by měl být zvolen tak, aby při zmíněné deformaci neumožňoval jakkoli se obalit či namotat na letadlo nebo kteroukoli jeho část.

Objekt by měl být navrhnout tak, aby vydržel různá provozní zatížení (viz výše) současně se zvoleným součinitelem bezpečnosti. Deformace objektu by měla nastat při vystavení objektu náhlé nárazové síle způsobené letounem o hmotnosti 3000 kg a rychlosti 140 km/h nebo při poježdění o rychlosti 50 km/h.

Navržený objekt pak musí podstoupit bezpečnostní testování, nebo může být porovnán s podobnou, již schválenou součástí, a následně mohou být požadovány jen doplňující testy objektu [9].

Designová koncepce

Při potenciálním střetu letadla s objektem na nebo blízko letištní dráhy může docházet ke třem jevům. Zaprvé může letadlo ztratit hybnost. Velikost hybnosti je dána integrálem síly podle času, a proto by velikost rázového zatížení a jeho doba měla být co nejmenší. Letadlo vlivem srážky může změnit směr nebo může dojít ke strukturálnímu poškození.

Poškození letadla souvisí s množstvím energie, která je potřebná k posunutí objektu z jeho dráhy. Tato energie může být přenesena do součásti jako energie, která aktivuje lámací mechanismus, energie, která způsobí elastickou nebo plastickou deformaci součásti, nebo energie, která je potřebná ke zrychlení částice na minimální rychlost letadla.

Energie potřebná pro aktivaci lámacího mechanismu záleží na správném a efektivním designu a na počtu mechanismů, které se musí aktivovat. Energie, která způsobuje elastickou či plastickou deformaci, závisí především na výběru materiálu. Energie způsobující zrychlení částice je závislá na rychlosti letadla a hmotnosti objektu. Z tohoto důvodu se pro objekty volí materiály o nízké hmotnosti a je snaha redukovat hmotnost celé součásti, kterou je posouváno.

Poškození letadla je také ovlivněno stykovou plochou mezi letadlem a objektem, skrz kterou se přenáší do objektu energie. Větší kontakt má za následek lepší silové rozložení, což zabraňuje objektům hlouběji proniknout do struktury letadla. Zde je tedy kladen důraz na vhodnou geometrii objektu [9].

Režim porušení

Mohou se vyskytovat dva způsoby, jak správně navrhnout porušení součásti. Může to být design jednoho kusu, kdy se při případném střetnutí letadla se součástí, musí porušit celá součást [9]. Na celou součást se bude přenášet zatížení, což vede k tomu, že bude potřebná relativně velká energie k jejímu poškození. Tato koncepce je tak vhodná pouze pro součásti nesoucí lehké zatížení nebo součásti, které jsou vyrobeny z lehkých materiálů. Porušení při tomto typu designu je obtížně

předvidatelné, tudíž obtížně počítatelné. Koncepce navíc zvyšuje pravděpodobnost navinutí některé části objektu na letadlo.

Druhý koncept je konceptem stavebnicového designu, kdy je použito lámacího mechanismu. Pro aktivování takového mechanismu je potřebná minimální energie. Děj porušení je lehce předvidatelný a zároveň snižuje riziko navinutí. Nevýhodou tohoto konceptu je, že oddělené částice mechanismu mohou být zasaženy jinou částí letadla, která bude místem nárazu procházet záhy. Lámací mechanismus je pak v tomto případě považován za nosnou část nadzemního návěstidla [9].

Výběr materiálu

Materiál může být volen kovový i nekovový, kde oba typy materiálů musí být odolné vůči venkovním podmínkám prostředí (proměnlivé počasí, sluneční radiaci, apod.). Materiál, ze kterého bude vyráběn křehký objekt, by měl být pevný, jeho hmotnost by měla být nízká a měl by mít nízkou houževnatost. Minimální hmotnost je zde důležitá z důvodu minimální energie, které letadlo potřebuje, aby ze svoji dráhy součást odsunulo.

Pro tyto účely jsou používány běžně komerčně dostupné materiály, které vyhovují svou cenou i vlastnostmi. Nekovové materiály mohou být vhodně upraveny tak, aby splňovaly požadavky pro křehkost, nicméně je obtížné správně analyzovat jejich další chování (např. anizotropní vlastnosti) [9].

Elektrické díly

Zde je zmíněno, že elektrické díly musí také podléhat křehkosti, avšak to nesmí omezit jejich použití. Pokud je to možné, mělo by být elektrické vybavení umístěno pod zemí. Elektrické vodiče musí být vybaveny tak, aby se při poškození nepřetrhaly, ale přerušily na předem daných místech k předejití nebezpečí požáru. K řízenému přerušování se používají speciální lámací konektory, které jsou volně dostupné na trhu [9].

Instalace, kontrola a údržba

Křehký objekt musí být umístěn přesně podle doporučení dodavatele součásti. Pro instalaci vizualizační pomůcky jsou nutné pevné základy, které zajistí stabilitu objektu. Podstava je betonová a nesmí být překážkou pro projíždějící letadlo. Toho je dosaženo buď zapuštěním podstavy do země, kde vzniklá dutina musí být zasypaná podpurným materiálem, nebo do strany se svažující se podstavou.

Kontrola součástí by měla být pravidelně prováděna na základě doporučení dodavatele. Kontrolující operátor by měl být vždy plně informován o jejím stavu. Celý proces kontroly se skládá ze tří kroků a měl by být zaznamenán. Přídavné kontroly mohou být nařízeny i po odeznění extrémních podmínek (např. vichřice, orkány, nečekané zatížení výfukovými proudy motorů, apod.). To umožní provozovat součásti a jejich křehké objekty na nejvyšší možné bezpečnostní úrovni [9].

Dle výše popsaných požadavků lze konstatovat, že návrh křehké součásti je silně závislý nejen na jejím umístění na letištní dráze, ale také na podnebí, kde bude

součást umístěna. Reálným podnebím České republiky se pro stanovení návrhu konstrukčního prvku bude věnovat kapitola 3.

Dalším důležitým aspektem je výběr materiálu a jeho zpracování k dosažení požadovaných výsledků. Následující kapitola se tak bude zabývat technologiemi a materiály 3D tisku, jakožto zvolenou metodou pro nalezení alternativní varianty výroby nosné části leteckého návěstidla.

2 TECHNOLOGIE A MATERIÁLY 3D TISKU

Mezi nejnovější technologie výroby patří aditivní technologie. Oproti obrábění je aditivní technologie, dříve známá jako *Rapid Prototyping*, založená na přidávání materiálu tak, aby postupně vznikl předmět podle původního 3D počítačového modelu. Tato technologie je jedinečná vzhledem ke tvarům a strukturám, které můžeme její pomocí vyrobit. Předně se využívala pro výrobu prototypů a díky pokročilému vývoji se dnes používá pro přímou výrobu komponentů a součástí [10].

Z počátku tedy 3D tisk sloužil výhradně pro vizualizaci konečného produktu a k optimalizaci ergonomie. Tyto modely neměly žádnou funkčnost ani výkonnost. Přesto, že pořídit 3D tiskárnu na začátku vývoje této technologie bylo velmi drahé, společně právě možnost tisku modelů a jeho následně rychlé a jednoduché možnosti úpravy několikanásobně navrátilo investici [10]. Časem se tiskárny staly dostupné i komerčně, což umožnilo vyrábět celou škálu produktů nejen profesionálně, ale také amatérsky.

Odvětví, ve kterých se dnes 3D tisk běžně využívá, je nespočet. Je to např. automobilový průmysl, kdy se může jednat o vnější i vnitřní vybavení, šperkovnictví, mincovnictví, výroba nádobí, geografické aplikace, kde se může jednat o 3D mapy, umění, architekturu, zde to mohou být 3D vizualizace různých staveb, módu, zbrojařský průmysl, hudební instrumenty a velmi důležitou oblastí je i zdravotnictví v podobě různorodých protéz [10].

V neposlední řadě sem patří také letecký průmysl. Jak civilní a vojenské tak i vesmírné letectví usilují o detailní rozvoj a nové aplikace pro tuto technologii a intenzivně investují do výzkumu [10]. Tisknutelné mohou být nejen součásti letadel, ať se jedná o exteriérové nebo interiérové prvky, ale i celá letadla (např. UAV). Pro prvky používané v civilním letectví pak platí přísná pravidla pro zachování bezpečnosti pasažérů (letecké předpisy).

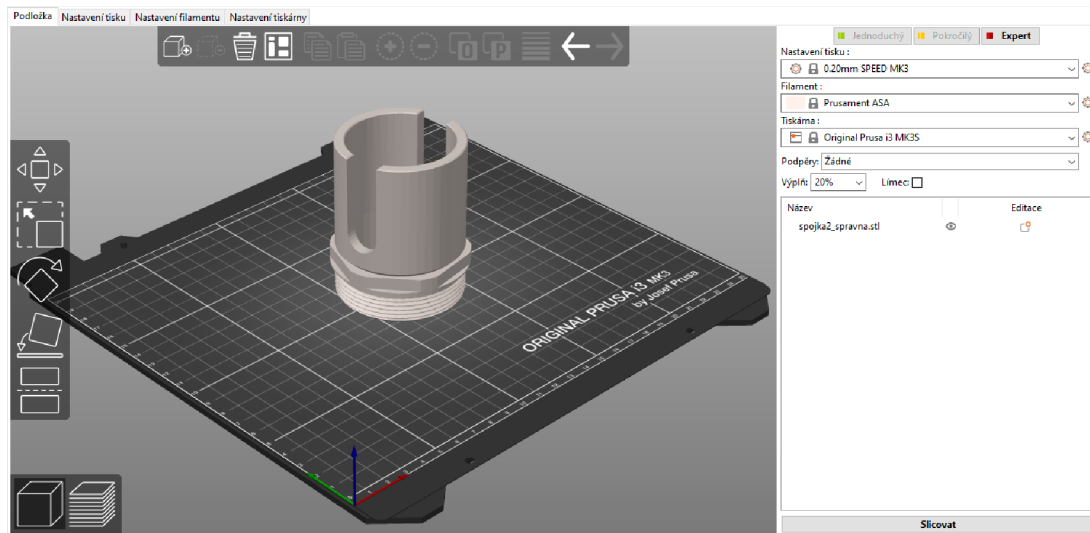
2.1 Technologie 3D tisku

Principem 3D tisku je postupné nanášení vrstev objektu na tiskové ploše natavením materiálu. Kde a jak se má materiál natavit zajišťuje software tiskárny podle předem vytvořeného modelu. Model může uživatel vytvořit v některém z CAD systémů nebo si jej může stáhnout z internetu jako šablonu a případně ji upravit podle svých představ.

Vzniklý nebo stáhnutý soubor by měl mít formátovou koncovku *.stl*, což je nejpoužívanější koncovka pro další zpracování souboru v řetězci 3D tisku. Následujícím krokem je nahrání souboru *.stl* do tzv. *sliceru*. *Slicer* neboli CAM systém převede model na informace, podle kterých se bude tiskárna řídit. Budou to například jednotlivé souřadnice pohybu pro tiskovou hlavu, tiskovou podložku, kdy a kam přidat materiál nebo vytvoření podpor tam, kde by mohlo dojít k tisknutí „do vzduchu“ [11].

Slicování si lze představit také jako proces rozřezání modelu na jednotlivé

vrstvy tak, jak se budou později tisknout. Zde je možné provádět rozsáhlá nastavení tisku, která pak mohou značně ovlivnit kvalitu tisku, dobu tisku i jeho pevnost [12]. Některé společnosti dodávající 3D tiskárny doporučují ke svému hardwaru použít specifický software pro ně vytvořený [12]. Uživatel pak má jistotu, že daný *slicer* dokáže nastavit proměnnou, kterou tiskárna doopravdy umožňuje upravit. Obecně se pak v každém *sliceru* dá nastavit rychlost tisku, výška vrstvy, vytvoření nebo úprava podpor [11]. Ukázka prostředí takového *sliceru* je na obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Program PrusaSlicer 2.1.1 používaný pro převedení modelu do tiskového kódu určený pro tisk na bázi pevného materiálu.

Naslicovaný a nastavený model se opět vyexportuje do nového formátu nazývaného *G-code*. *G-code* je už formátem, který tiskárna umí přečíst a řídit se jeho informacemi. *G-code* do tiskárny může být poslán skrz počítač připojený přes specifické rozhraní nebo může být přenesen pomocí datového média (nejčastěji USB nebo SD karta) do tiskárny [11].

Doprovodné nastavení tiskárny se provádí ještě před spuštěním samotného tisku. Na displeji tiskárny lze zvolit např. vyhřívání tiskové hlavy, vyhřívání podložky nebo se nastaví způsob podávání materiálu. Před spuštěním tisku se některé tiskárny musí zajistit pláštěm udržující konstantní okolní podmínky, nebo ochranným pláštěm pro odsávání nebezpečných zápachů.

Každá tiskárna se může trochu lišit postupem přípravy tisku, stejně jako se postup může odlišovat pro jednotlivé metody 3D tisku. Metod tisku existuje několik, přičemž nejznámější lze klasifikovat podle způsobu zpracování tiskového materiálu na bázích tekutého materiálu, práškového materiálu, či pevného materiálu [10].

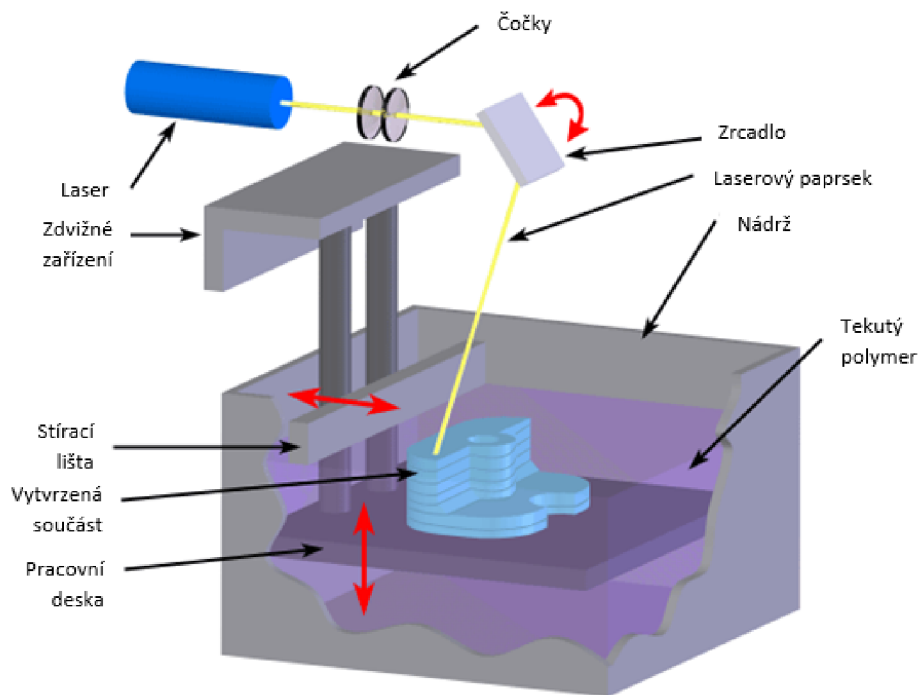
Ke každé variantě materiálu budou uvedeny jejich základní specifikace, na jejichž základě bude zhodnocena vhodnost použití metody k návrhu nosné části leteckého návěstidla. Je třeba zmínit, že každá varianta má mnoho dalších tiskových metod, v práci však budou popsány vždy principy základní metody, které umožnily vznik a rozvoj dalším.

2.1.1 Tisk na bázi tekutého materiálu

Tisk na bázi tekutého materiálu spočívá ve vytvrzování tekuté světlocitlivé pryskyřice, která zatuhne při různých vlnových délkách, nejčastěji při UV záření. Po zatuhnutí tenké vrstvy pryskyřice na povrchu se pracovní deska posune, nanese se tekutá pryskyřice a celý proces tuhnutí se opakuje [10]. Nanášením vrstev tak vzniká nová součást, která musí být následně vytvrzena. Tekutý materiál může být zpracován několika způsoby, přičemž se tyto způsoby mohou od sebe lišit např. směrem posuvného pohybu nebo typem osvětlení pryskyřice.

Stereolitografie

Princip technologií pro tekutý materiál vychází ze stereolitografie (zkratka SLA). Tato metoda se datuje do roku 1986 jako nejstarší metoda aditivních technologií [10]. Popis v odstavci výše tedy přesně popisuje tuto metodu. Tekutá pryskyřice zatuhne v případě osvětlení jejího povrchu laserovým paprskem. Takto se přidává vrstva po vrstvě, kde každá vrstva odpovídá jednomu řezu počítačového modelu. Poté se pracovní deska s rozpracovaným modelem posune právě o tloušťku jedné vrstvy [10]. Celý proces je kontrolován optickým systémem. Schéma procesu této metody je na obr. 2.2.



Obrázek 2.2: Schéma procesu SLA technologie. Převzato z [13].

Výhody této metody spočívají hlavně v [10]:

- vysoké přesnosti,
- jemném povrchu součásti, kde nemusí být rozeznatelné ani jednotlivé vrstvy,
- škále používaných pryskyřic od běžně používaných až po speciálně upravené pryskyřice.

Pro tuto metodu však musí uživatel uvažovat nevýhody, zejména [10][12]:

- nutnost tzv. postprocessingu, kde vyrobená a následně vytvrzená součást je znečištěná nevytvrzenou toxickou pryskyřicí, a proto se výrobek namáčí v předem daných chemikáliích, aby se povrch vyčistil,
- požadavek na podpory všude, kde vznikají převisy a podřezy.

Laserový paprsek, který postupně kopíruje tvar vrstvy řezu modelu, však není jediným způsobem, jak lze tekutou pryskyřicí vytavit. Existují další dva způsoby, které mohou mít pozitivní dopad na dobu tisku a především jeho kvalitu. Oproti laserovému paprsku, kdy se tisková doba bude zvyšovat podle velikosti a složitosti tvaru vrstvy, lze zkrátit tiskovou dobu metodou osvětlení celé vrstvy najednou pomocí digitálního projektoru - metoda DLP. Třetí metoda s označením MSLA je založená na UV LED osvětlení a maskování LCD displejem [12].

Využití, materiály a vhodnost použití SLA

Stereolitografii lze vhodně použít, pokud je potřeba vyrobit velmi přesné a kvalitní díly za velmi krátkou dobu. Její pomocí se vyrábějí ukázkové díly, prototypy s omezenou funkčností, formy pro vakuové lití, ale také formy pro odlévání [14].

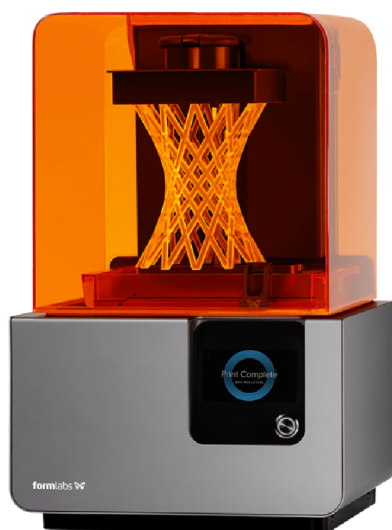
V leteckém průmyslu pak přesné vyrobené prototypy slouží k testování, verifikaci nebo designu profilů křidel. Výrobky vytvořené pomocí stereolitografické technologie jsou používány pro příslušenství v pilotní kabině např. pro prvky na ovládacím panelu, opěradla sedadel či vstupní dveře [15].

To jaké bude mít koncový výrobek vlastnosti určuje zejména použitý materiál. Vzhledem k rozvoji samotné metody se zároveň s ní rozvíjí také škála pryskyřic různých vlastností, které zajišťují příměsi [12]. Většina pryskyřic po vytvrzení zůstává průhlednými, ale liší se pevností, nárazuvzdorností, trvanlivostí, odolností vůči vlhkosti nebo teplotě [14]. Výběr druhu pryskyřice tak záleží vždy na aplikaci technologie a požadovaných vlastnostech, které jsou třeba ověřit u konkrétního výrobce nebo v katalogových listech.

Přesto, že je stereolitografie nejstarší technologií, není nejpoužívanější a ani nejlevnější variantou aditivních technologií. Zatímco běžná cena stereolitografické tiskárny (ukázka na obr. 2.3) se pohybuje okolo deseti tisíců korun, profesionální tiskárna může stát statisíce i miliony korun [12].

2.1.2 Tisk na bázi práškového materiálu

Metody práškových materiálů by se obecně mohly řadit jako speciální metody pevných materiálů [10]. Vzhledem k jejich širokému využití se ale většinou uvádí jako samostatná kategorie. I pro práškové metody existuje několik variant. Zatímco



Obrázek 2.3: Stereolitografická tiskárna Form 2, výrobce FormLabs.
Zdroj: <https://www.dynamism.com/3d-printers/form-2/pricing.shtml>
[cit. 30. 5. 2020]

některé jsou podobné metodám stereolitografie popsané v 2.1.1, jiné jsou podobné metodám pevného materiálu.

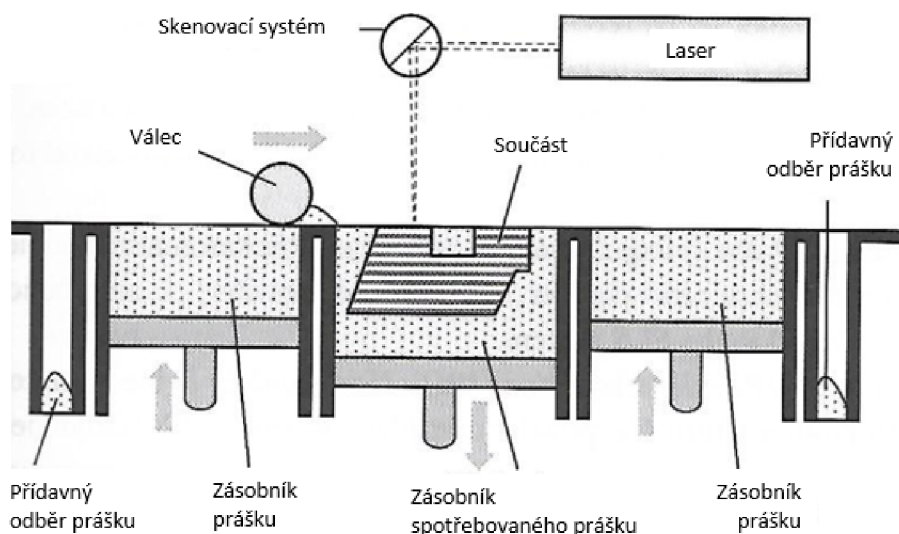
Selective Laser Sintering

V metodě *Selective Laser Sintering*, zkráceně SLS, je součást vytvořena spékáním jednotlivých vrstev. Spékání je zajištěno dopadem paprsku CO_2 laseru na prášek, kdy se po dopadu laserového paprsku zvýší v tomto místě teplota na teplotu tání materiálu, což způsobí spojení jednotlivých částic prášku a následné spojení s předchozí vrstvou. Každá další vrstva se tvoří směrem nahoru nad předchozí, kdy po spečení konkrétní vrstvy je válečkem nanесena nová vrstva prášku [10]. Schéma tohoto procesu je zobrazeno na obr. 2.4.

Velkou výhodou spékání oproti tavení je, že materiál nemusí být v úplném tekutém stavu, čímž se vyhne případným deformacím materiálu během tavení. Na druhou stranu je k tomuto procesu potřebná 300 až 500krát větší energie než pro metodu stereolitografie [10].

Pokud by se shrnuly výhody této metody, uvažovali bychom [10]:

- dobrou stabilitu výtisku, kdy většina výrobků je ihned připravena k použití,
- široké rozpětí používaných materiálů, např. nylon, polykarbonáty, kovy i keramiky,
- nepotřebnost užití podpor, jelikož celý výrobek je postupně zasypán práškem, který tvoří přirozenou podporu všech částí,
- žádný nebo minimální post-processing, kdy se může jednat pouze o očištění součástí.



Obrázek 2.4: Schéma procesu SLS technologie. Převzato z [10].

Nevýhody pro práškovou metodu jsou [10]:

- velikost jednotky, kdy jednotka zde představuje celou zástavbu tiskárny, která bývá náročná na prostor,
- velká spotřeba prášku
- a zejména nemožnost tvořit dutiny, protože prášek by se odtud nedal odstranit, pokud je potřeba dutinu zakomponovat, musí se vytvořit otvor, ze kterého se prášek může odstranit.

Využití, materiály a vhodnost použití SLS

Technologie SLS umožňuje vyrábět prototypy s mechanickými vlastnostmi srovnatelnými se součástmi vyrobenými vstřikováním do formy, velké, komplexní díly, které jsou odolné a funkční. Zejména je technologie vhodná k výrobě pohyblivých, spřažených dílů a ohebných spojů, protože nevytváří během tisku podpory [16].

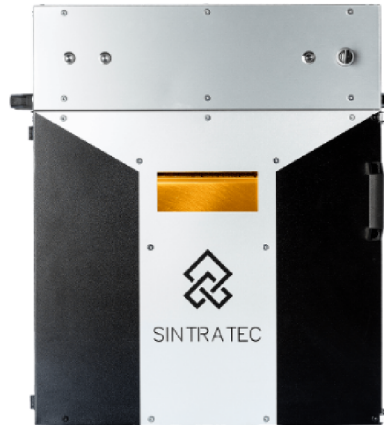
Pro výrobu komponent motorů, ventilačních potrubí a dalších menších součástí se v letectví využívá právě metoda SLS [15].

Základem práškových materiálů je polyamidový prášek, který disponuje vysokou mechanickou a tepelnou odolností. Zde se jako příměsi do původního práškového materiálu často využívají částičky kovů nebo skelné částice. Jejich vlastnosti se tak mohou výrazně a vhodně měnit a vyrobená součást může podstoupit i jednoduché obrábění [16].

Tisk z práškových materiálů je v letectví velmi používanou technologií, používanými materiály jsou ale většinou celokovové prášky a proto se pro ně používají DED metody. *Directed Energy Deposition* využívá tepelnou energii k natavení a

spojení materiálů. Tato metoda se primárně nepoužívá pro výrobu nových dílů, ale především pro opravu a přestavbu poškozených součástí [15].

SLS tiskárny jsou zejména využívány v průmyslové výrobě, od čehož se také odvíjí jejich cena. I zde záleží zda se jedná o jednodušší stolní tiskárnu (ukázka na obr. 2.5) nebo o profesionálně navrženou.



Obrázek 2.5: Tiskárna pro technologii SLS, výrobce Sintratec.

Zdroj: <https://sintratec.com/product/sintratec-kit/>

[cit. 30. 5. 2020]

2.1.3 Tisk na bázi pevného materiálu

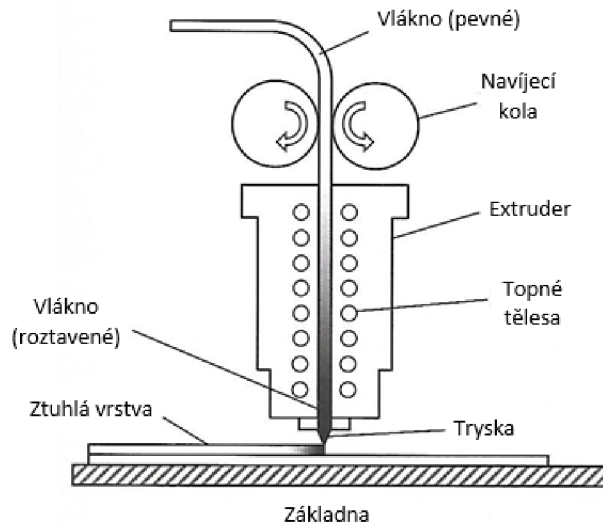
Tisk na bázi pevného materiálu je jednoznačně nejrozšířenější metoda 3D tisku [10]. Pevný materiál pro 3D tisk se používá ve formě vláken, drátků, plátů, rolí nebo pelet. Jednotlivé metody pak používají jednu nebo více forem materiálu. Základní a neznámější metoda je *Fused Deposition Modeling*, jejíž ekvivalentní označení zní *Fused Filament Fabrication*. Rozdíl spočívá v tom, že zkratka FFF označuje obecně metodu a zkratka FDM je registrovanou značkou vývojářské společnosti [12].

FDM/FFF

Princip této metody je založený na povrchové chemii, tepelné energii a vrstvení. Metoda je známá pro spolehlivost a trvanlivost součástek. Je založená na vytlačování jemné linie roztaveného vlákna termoplastu, která postupně tuhne při ukládání [10]. Linie se postupně skládají na sebe podle počítačem řízených cest. Pro tuto metodu lze nastavit hned několik proměnných od materiálových vlastností (výběrem termoplastu), šířky vlákna, rychlosti vytlačování, teploty tisku a další.

Schéma procesu FDM technologie je zobrazeno na obr. 2.6. Zde je vidět, že vlákno termoplastu v pevném stavu vstupuje do extruderu neboli tiskové hlavy, která se skládá z několika částí. Jedna z těchto částí zajišťuje roztavení vlákna, které je na tiskovou podložku vytlačováno skrz trysku. Tryska je vyměnitelná

s možností volby průměru. Roztavené vlákno dopadá na tiskovou podložku, která může být vyhřívána, nebo na již dříve vytisknutá vlákna a chladí se na teplotu okolního vzduchu.

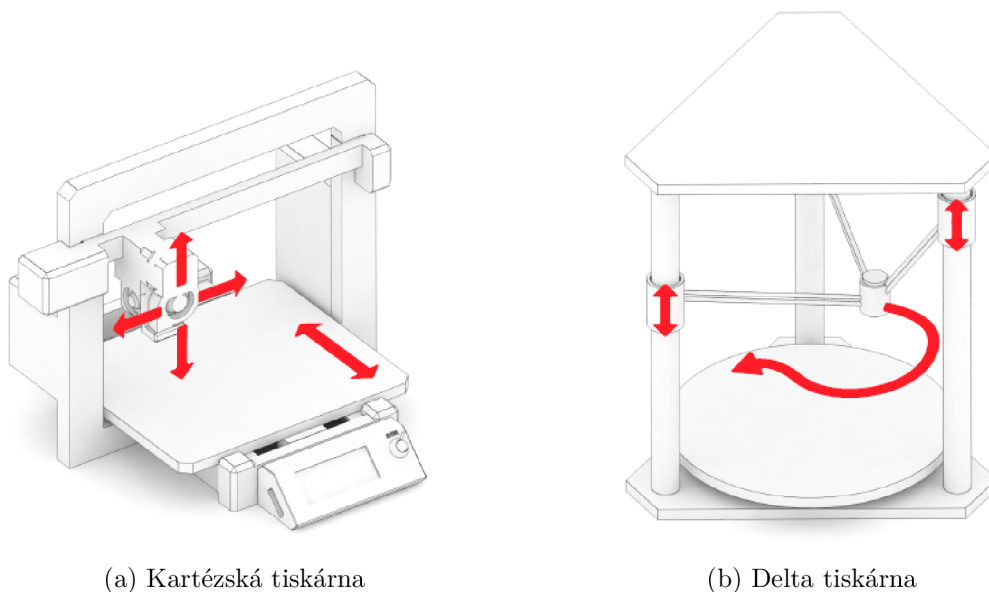


Obrázek 2.6: Schéma procesu FDM technologie. Převzato z [10].

Pro tuto metodu pak existuje i několik typů tiskáren s rozdělením zejména podle pohybu v trojrozměrném prostoru. Kartézská tiskárna (obr. 2.7a) umožňuje pohyb ve třech osách, kde tisková hlava zajišťuje pohyb v osách x a z a tisková podložka v ose y . Delta tiskárna (obr. 2.7b) má extruder zavěšený a spojený na třech ramenech, což umožňuje velký operační prostor pro osu z . Toto uspořádání však vyžaduje velmi přesnou kalibraci při stavbě tiskárny a složité výpočty pro pohyby jednotlivých ramen. Polar tiskárna je založena na polárním pohybu tiskové hlavy po dvou osách a rotační podložce. Tento systém ale není tolik používaný kvůli složité přípravě modelu pro tisk [12].

Mezi výhody technologie FDM patří [10]:

- možnost výroby funkční součástky, kdy pomocí specifických materiálů můžeme vytvořit stejně pevný materiál, jako kdyby byl vytvořen vstřikováním, což je velmi užitečné pro rychlou výrobu prototypů a jejich následného testování,
- minimalizace odpadu, jelikož vrstvení vláken řídí počítač a vyrábí se hotová součást, která nepotřebuje další opracování v podobě odebrání materiálu, pokud neuvažujeme odstranění podpor tisknutelné součásti, které ale vzhledem k obráběcím metodám představují opět minimalizaci odpadu,
- jednoduché odstranění podpor, které ve většině případů mohou být odstraněny ihned po tisku a to pouhým ulomením od součástky nebo mohou být použity roztoky pro jejich vyleptání,
- jednoduchá výměna materiálu,
- možnost sestavení velké tiskárny, co se týče objemu tiskové plochy.



Obrázek 2.7: Typy 3D tiskáren pro pevný materiál firmy Prusa Research. Převzato z [12].

Na druhou stranu se tato technologie potýká s nevýhodami jako jsou [10]:

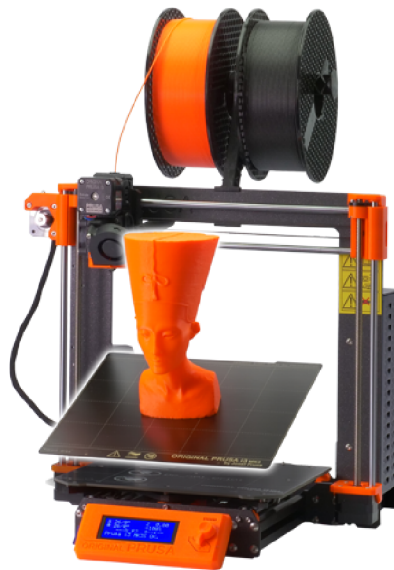
- omezená přesnost, jednak pro jednotlivé tvary plastového materiálu, které následně udávají s jakou přesností lze součást vytvořit (např. průměr vlákna),
- pomalý výrobní postup, kdy čas výroby roste se zaplněním tiskové plochy, s požadovanou přesností a se specificky vybraným materiálem,
- nepředvídatelné smršťování, jelikož materiál chladne ihned po vytlačení z tiskové hlavy, může dojít k tepelným sraženinám a tím k vyvolání napětí, pro některé materiály je tato vlastnost horší než pro jiné, a jelikož je tato vlastnost těžko předpověditelná, uživatelé se musí především spoléhat na své tiskové zkušenosti.

Využití, materiály a vhodnost použití FDM

Nejvhodnější aplikace FDM technologie je výroba funkčních, odolných dílů s vysokou přesností a stabilitou, které jsou používány pro prototypy ke zkoušce tvarů, sestavení a funkčnosti nebo ke koncovému použití [17].

Součástky vyrobené touto technologií pronikají do leteckého průmyslu především díky nízké hmotnosti oproti kovovým součástkám a rychlé možnosti opravy [15]. Výtisky se například používají na vnitřní výplně křídel nebo se z nich dá postavit celý bezpilotní letoun typu UAV [15].

Technologie FDM je cenově nejdostupnější metodou pro amatérské i profesionální aplikace [12]. Pro některé tiskárny tohoto typu existují tzv. *open-source* soubory, kde si uživatel může celou FDM tiskárnu vytisknout na jiné FDM tiskárně a následně sestavit. Cena tiskárny pak roste s pokročilejšími naprogramovanými funkcemi nebo vyhříványými podložkami, jako je to u této tiskárny (obr. 2.8).



Obrázek 2.8: 3D tiskárna I3 MK3S, výrobce PrusaResearch.
Zdroj: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>
[cit. 30. 5. 2020]

2.1.4 Výběr 3D metody

Výběr 3D metody ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi nejdůležitější faktory se řadí vhodnost metody a pořizovací cena. Pokud se jedná o malosériovou výrobu, není žádoucí pořizovat drahá zařízení kvůli pomalé návratnosti investice. Při pořízení levnějšího zařízení se ale musí vzít v potaz možnost nedostatečné přesnosti a nezpůsobilosti použití produktů tisku, zvláště pokud se jedná o letecké výrobky, které musí podléhat velmi přísným kritériím.

Stereolitografie je vhodná pro výrobu velmi malých součástí s požadavkem na výborný výsledný povrch součástí. Výrobky se musí vytvrzovat a chemicky čistit, je nutné tedy počítat i s pořízením doplňků k tomuto postprocessingu. Pokud se připočítá i opotřebení některých částí tiskárny, u stereolitografické metody musí být často měněna nádrž na pryskyřici (cca po 2 - 3 litrech pryskyřice) a méně často pak pracovní deska.

Nevýhodou SLS metody je vysoká pořizovací cena tiskárny, na druhou stranu je možné nespečený prášek opakovaně použít. Materiálu je však potřeba mít dostatek, protože se neustále přidává na celý rozměr pracovní plochy. Čištění stroje i výtisku od prášku pak může být nákladné. Častěji se přesto pro výrobu dílů používají celokovové prášky místo prášku tvořené plastovými částicemi. Je nutné vzít v úvahu také velkou spotřebu energie potřebné pro tisk touto metodou.

Pro většinu základních aplikací se však používá FDM metoda. Je vhodná pro výrobu pouze několika dílů, ale i celých sérií, široká škála materiálů umožňuje zvolit materiál požadovaných vlastností a materiály pro jednotlivé tisky měnit. Spotřebním materiálem, který je třeba pravidelně měnit, je u těchto tiskáren pouze tryska.

Ceny za pořízení tiskáren uvedených v textu pro jednotlivé metody a průměrné ceny materiálů jsou shrnuty v tab. 2.1.

Tabulka 2.1: Porovnání pořizovacích cen tiskáren různých 3D metod a průměrné ceny nejběžnějších tiskových materiálů.

Metoda	Cena tiskárny	Cena tiskového materiálu
Stereolitografie	69 084 Kč	5000 Kč/l
SLS	134 600 Kč	2000 Kč/l
FDM	26 900 Kč	500 Kč/kg

Z tabulky je patrné, že cenově nejvýhodnější metoda je FDM, proto i pro výrobu konstrukčního prvku leteckého návěstidla bude navržena právě tato metoda. Dále je potřeba vybrat vhodný materiál ze všech dostupných materiálů pro tuto metodu.

2.2 Materiály pro FDM metodu

Jak už bylo zmíněno výše, nejběžnější využívanou metodou je metoda pevných materiálů, specificky metoda FDM. Je to zejména kvůli její cenové dostupnosti, ale také díky škále materiálů, ze kterých dokáže tisknout poměrně přesné výtisky. Ze začátku byli uživatelé odkázáni na pár základních materiálů, ale postupem vývoje dnes můžeme vybírat z celé řady materiálů, ať už se jedná o jednotlivé druhy jednoho materiálu (např. barevné provedení) nebo o materiály s odlišnými vlastnostmi [11].

2.2.1 Základní tiskové materiály

Jako tři nejběžnější materiály pro FDM tisk se uvádí materiály PLA, PETG a ABS [12]. Tyto materiály jsou velmi rozšířené, proto by uživatel měl kontrolovat jejich vlastnosti vždy u konkrétního výrobce materiálu.

PLA

PLA se vyrábí z kukuřičného nebo bramborového škrobu nebo z cukrové třtiny. Jeho zkratka vznikla z názvu *polylactit acid*, česky kyselina polymléčná, a je to biologicky plně odbouratelný materiál [18].

Mezi jeho základní materiálové vlastnosti patří pružnost, tvrdost (při mechanickém namáhání spíše praskne než se ohne [12]) a odolnost oproti jiným plastům [18]. Dále disponuje malou teplotní roztažností, což znemožňuje kroucení výtisku nebo odlepování od podložky. Na druhou stranu je málo teplotně odolný, tudíž může měknout už při teplotě cca 60°C [12]. PLA je málo odolný vůči povětrnostním vlivům [12] a má sklon pohlcovat vzdušnou vlhkost [18]. Tisk z materiálu PLA nevydává znatelný zápach [12].

Uživatelsky je tento materiál oblíbený hlavně vzhledem k dobrým tiskovým vlastnostem, výslednému hezkému povrchu, nejnižší ceně tiskového materiálu i široké barevné škále [12].

ABS

ABS je amorfní termoplastický průmyslový kopolymer vyráběný z ropy [19]. Oproti PLA má velkou tepelnou roztažnost, což se projevuje smršťováním materiálu při tisku [12]. Během tisku by se měl objekt chladit a před začátkem tisku je důležité nastavit vyhřívání podložky [19].

Tento materiál charakterizují vlastnosti jako je tuhost, houževnatost, odolnost proti nízkým i vysokým teplotám, odolnost vůči kyselinám, hydroxidům, olejům a tukům. Je odolný vůči mechanickému poškození a je velmi lehce opracovatelný. ABS ale nemůže být vystaven dlouhodobému slunečnímu záření, nadměrné vlhkosti ani povětrnostním vlivům. Při tisku je nutné místnost větrat, protože z ABS uniká škodlivý zápach [19].

Vhodné využití pro ABS je výroba funkčních vzorků, nástrojů i pro běžně používané věci, jelikož ABS je zdravotně nezávadný [19]. Povrch výtisku se dá vyhladit v acetonu stejně jako je možné acetonem lepit jednotlivé součásti k sobě [12].

PETG

Označení PET je označení pro nejběžnější používaný plast, ze kterého se vyrábí plastové lahve, oděvní vlákna nebo obaly na potraviny. Písmeno G za touto značkou vyjadřuje přidání modifikovaného glykolu do matrice během polymerace. Takto vzniklé vlákno spojuje vlastnosti PLA a ABS [20].

Znaky PETG materiálu jsou odolnost vůči změnám teplot, pevnost nebo odolnost vůči kyselinám a rozpouštědlům. Tiskově se však nejedná o jednoduchý materiál, a proto je nutné najít správné nastavení tiskárny pro úspěšný tisk [20]. PETG má také tendenci během tisku stringovat¹ [12]. Materiál nicméně nevykazuje takové zkroucení nebo smršťování při tisku jako ABS [20].

2.2.2 Pokročilé tiskové materiály

Tím, že je 3D tisk nejčastěji používaným, existuje mnoho dalších materiálů se specifickými vlastnostmi pro cílenou součást. Mohou to být materiály, které dobře vodí elektrický proud nebo jsou naopak nevodivé, pružné a elastické atd.

Přehled pokročilejších materiálů bude tak proto zúžen pouze na materiály, které svými vlastnostmi odpovídají potenciálnímu použití pro návrh nosné části leteckého návěstidla podle specifikací v kapitole 1.2.

¹Stringování znamená, že z tiskové hlavičky neboli extruderu vytéká materiál, přesto že se přesunuje na nové místo [21].

ASA

ASA materiál byl vytvořen jako nástupce a alternativa k ABS. Oproti ABS disponuje zvýšenou odolností vůči povětrnostním podmínkám a UV záření, proto je vhodný i pro venkovní aplikace [22].

Jeho dalšími vlastnostmi jsou dobrá mechanická odolnost, tuhost, odolnost proti teplotě, kvalita tisku i jeho jednoduchost oproti ABS [22]. Zároveň se ale při tisku uvolňuje zápach, takže je nutné tisknout ve větrané místnosti. Materiál je hygroskopický, tedy pohlcuje a udržuje vzdušnou vlhkost [23].

Materiál se proto hodí na výrobu prototypů, nástrojů i koncových výrobků [22]. Lze z něj dobře tisknout i malé detaily a výsledný povrch výtisku je lesklý.

PEEK

Pro náročné provozní prostředí byl vyvinut materiál PEEK. Zachovává si své mechanické vlastnosti až do 250°C, je odolný, tuhý, vhodný pro aplikaci tažnosti [24].

Disponuje odolnostmi proti vysokým teplotám, UV záření a vnějším podmínkám a vůči chemikáliím vyjma kyseliny sírové [24].

Jeho použití najdeme v leteckém, automobilovém, ropném i plynárenském průmyslu, stejně jako v lékařském i potravinářském díky jeho nezávadnosti [24].

Materiál je recyklovatelný a dá se žíhat ke zvýšení pevnosti a odolnosti. Pro tento materiál však musí uživatel použít tiskárnu, která dokáže natavit vlákno až na 400°C a vyhřívat podložku na 120°C, což pro většinu levnějších tiskáren není běžné [24].

ULTEM 9085

Materiál, který se hojně používá v dopravním průmyslu je ULTEM [25]. Filament se vyrábí z polyetherimidové pryskyřice ULTEM, kdy vzniká vysoce výkonné amorfní vlákno [26].

Je to pevný materiál s tepelnou odolností a pevností v tahu. Má dobré FST hodnocení, které vyjadřuje nízkou toxicitu, vývoj kouře a plamene, a proto je aplikovatelný i pro letecký a kosmický průmysl [25].

Je dlouhodobě hydrolyticky stabilní a má vynikající rozměrovou stabilitu, tedy nízkou citlivost na tečení a jednotný koeficient tepelné roztažnosti. ULTEM disponuje také dobrou odolností vůči široké škále chemikálií [26].

Tento materiál se vhodně používá v elektronických a elektrotechnických aplikacích díky stabilní dielektrické konstantě [26]. I ULTEM ke svému tisku ale potřebuje tiskovou hlavu, která umožňuje tisk materiálu při 390°C a vyhřívanou podložku až do 160°C [25].

ULTEM je jeden z mála materiálů, který se dodává společně s certifikačním listem, kde jsou uvedeny jeho různé materiálové charakteristiky. Aby všechny vlastnosti byly zaručeny, musí být tisknut na speciální tiskárně a musí být použit hrot T16A.

2.2.3 Výběr materiálu

Z popsaných materiálů tedy jasně vyplývá, že nejvhodnější materiál pro aplikaci návrhu konstrukčního prvku leteckého návěstidla by byl ULTEM 9085. Nejvhodnějším se stává výhradně proto, že jako jeden z mála materiálů určených pro 3D tisk disponuje oficiální certifikací od výrobní společnosti Stratasys. Pro dosažení vlastností materiálu ULTEM uvedených v certifikaci by však bylo potřeba zajistit specifickou tiskárnu v hodnotě cca 2,5 až 6 mil. Kč². Takováto investice je velmi nákladná a pro malosériovou výrobu je tak naprosto nevhodná.

Na druhou stranu použití tohoto materiálu a pořízení tiskárny by měli zvážit větší výrobci, kteří disponují potřebným kapitálem a produkují součástky ve větším rozsahu z důvodu, že materiál nemusí být znovu celkově testován pro osvědčení a ověření vlastností. Cena materiálu ULTEM je zhruba 3 500 Kč za 500 g³.

Další možností je použití materiálu PEEK. Materiál PEEK sice nepotřebuje specifickou tiskárnu, nicméně ani tiskárna MK3 S zobrazena na obr. 2.8 by tento materiál nedokázala vytisknout z důvodu nemožnosti nastavení vyšších vyhřívacích teplot tiskové hlavy a podložky, které jsou pro tisk PEEK nutné. Vhodnou tiskárnu lze pořídit cca za 230 tis. Kč⁴, čímž překračuje i cenu základní tiskárny pro SLS tisk. Na této tiskárně je však možné tisknout i další materiály včetně materiálu ULTEM a ASA i všech základních materiálů. Cena materiálu PEEK se pak pohybuje okolo 10 000 Kč za 500 g⁵, tudíž ani v tomto ohledu nemůže být tisk tohoto materiálu považován za levnou variantu.

Mezi zvažované materiály pro výrobu konstrukčního prvku patří ASA a PETG. Oproti výše zmíněným materiálům se oba materiály dají tisknout na FDM tiskárně uvedené na obr. 2.8 a cena materiálů se pohybuje okolo sedmiset korun za jeden kilogram⁶. Jejich vlastnosti odpovídají použití materiálu ve venkovním prostředí, kdy materiál ASA je výrazně odolnější proti UV záření a je více teplotně odolný, zatímco PETG je odolnější vůči únavovému poškození, chemikáliím a je vodotěsný [27]. Jejich mez pevnosti při porušení součásti je téměř shodná, ale ve výsledku je při zahrnutí všech vlastností více trvanlivý materiál ASA [27]. Oba materiály jsou tak možnou alternativou stávajících materiálů pro zhotovení nosné části leteckého návěstidla vhodné i pro malosériovou výrobu.

²<https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/stratasys-f900/> [cit. 21. 6. 2020]

³<https://www.intamsys.com/product/3dxtech-ultem-9085-3d-filament/> [cit. 21. 6. 2020]

⁴<https://www.na3d.cz/p/3845/vysokoteplotni-tiskarna-magic-1> [cit. 21. 6. 2020]

⁵<https://www.na3d.cz/p/2499/peek-175-mm-500-g-natural> [cit. 21. 6. 2020]

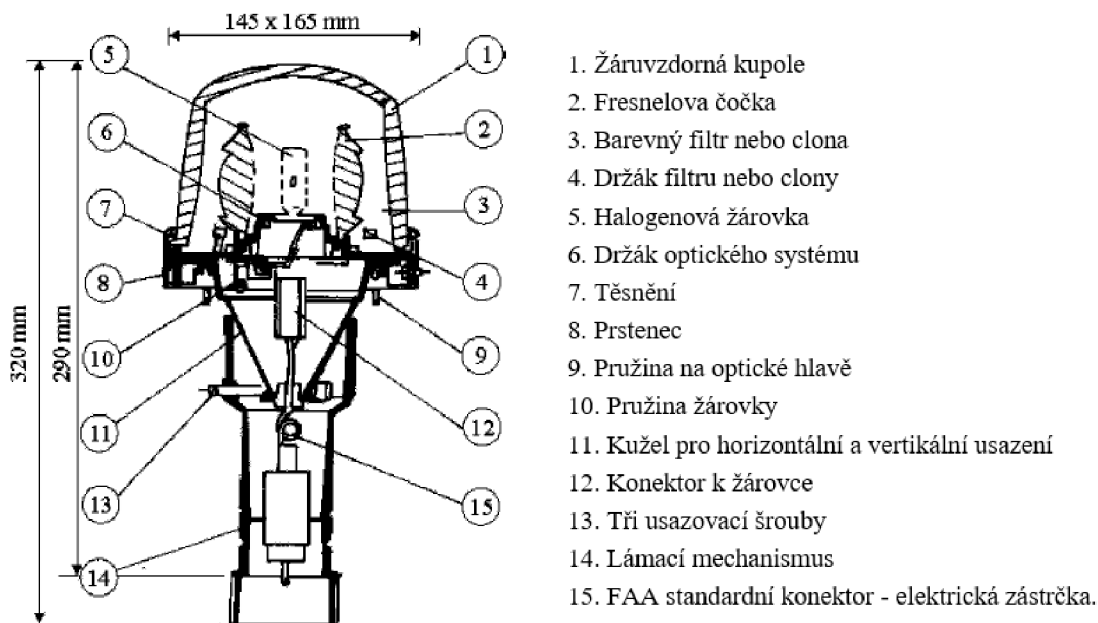
⁶<https://www.prusa3d.cz/materialy/> [cit. 21. 6. 2020]

3 NÁVRH VÝROBY NOSNÉ ČÁSTI LETECKÉHO NÁVĚSTIDLA

Všesměrové nadzemní návěstidlo se předně používá pro systémy jednoduchého přiblížení, jako postranní návěstidlo pro přístrojově řízené letištní dráhy nebo v noci pro přístrojově neřízené dráhy. Díky všesměrovému vyzařování tak nenavádí pouze odlety nebo vzlety, ale také kroužící letadla čekající na přistání [1].

Konstrukce takového návěstidla je navržena tak, aby měla výborné aerodynamické vlastnosti pro snadnou odolnost vůči větru či proudu výtokových plynů motoru a váhu okolo dvou kilogramů (v závislosti na použité elektronice a vybraném zdroji světla). Pro obsluhu letiště je důležitý jednoduchý přístup k zařízení a možnost rychlé výměny žárovky [1].

Jednotlivé prvky návěstidla jsou pak vidět na obr. 3.1, kdy při procesu výměny žárovky většinou dochází k výměně celé vrchní části návěstidla - světelné hlavice, přičemž návěstidlo nemusí být demontováno ze svého uložení. Uložení návěstidla (stojan, podpěra) musí být křehké, což zajišťuje lámací mechanismus [1]. Takovým mechanismem je např. lámací spojka.



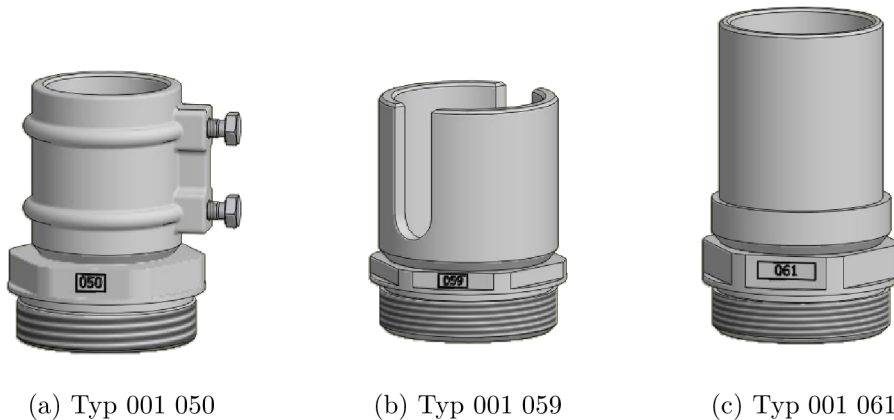
Obrázek 3.1: Schéma všesměrového nadzemního návěstidla. Převzato z [1].

3.1 Lámací spojka

„Lámací spojka je upevňovací díl, jehož účelem je snadné odlomení návěstidla a dílů nad úrovní lámací roviny spojky (úroveň terénu) v případné kolizi s letadlem“ [28].

Takto zní definice lámací spojky, která bude předmětem návrhu jako nosná část návěstidla. Dimenzování spojky je závislé také na typu letiště, pro které se bude prvek navrhovat. Dle širšího zadání této práce se jedná o všechna letiště VFR, což je zkratka pro lety prováděné v souladu s pravidly pro let za viditelnosti [29]¹, s délkou přistávací dráhy do 1200 m, která dokáže obsloužit letouny s maximální vzletovou hmotností 5700 kg.

Dále je třeba provést výběr tvaru spojky ke konkrétnímu typu návěstidla, které bude umístěno na letištní dráze. Různé typy spojek lze vidět na obr. 3.2 a jednotlivé typy si navrhuje sám výrobce. Protože se tato práce zabývá alternativní metodou výroby nosné části, není její podstatou navrhnout lámací spojku jako takovou, nýbrž použít již existující a ověřený tvar spojky. V tomto případě se bude jednat o spojku typu číslo 001 059.



Obrázek 3.2: Typy lámacích spojek výrobce Transcon. Převzato z [28].

Lámací spojka je velmi důležitým členem pozdějšího procesu přenosu rázové energie při srážce. Její konstrukce tak musí dále podléhat požadavkům, které vycházejí z *Aerodrome design manual* uvedených v částech 1.2.1 a 1.2.2 a budou nyní rozebrány podrobněji.

¹Hlava 1 Leteckého předpisu L2 - Pravidla létání

3.1.1 Zohlednění požadavků manuálu

Pro návrh funkční součásti je nutné dodržet postupy a hodnoty parametrů uvede-
ných v manuálu. Hodnoty jsou zde uvedeny jako orientační a je zapotřebí je ověřit
s hodnotami odpovídajícími konkrétnímu zadání.

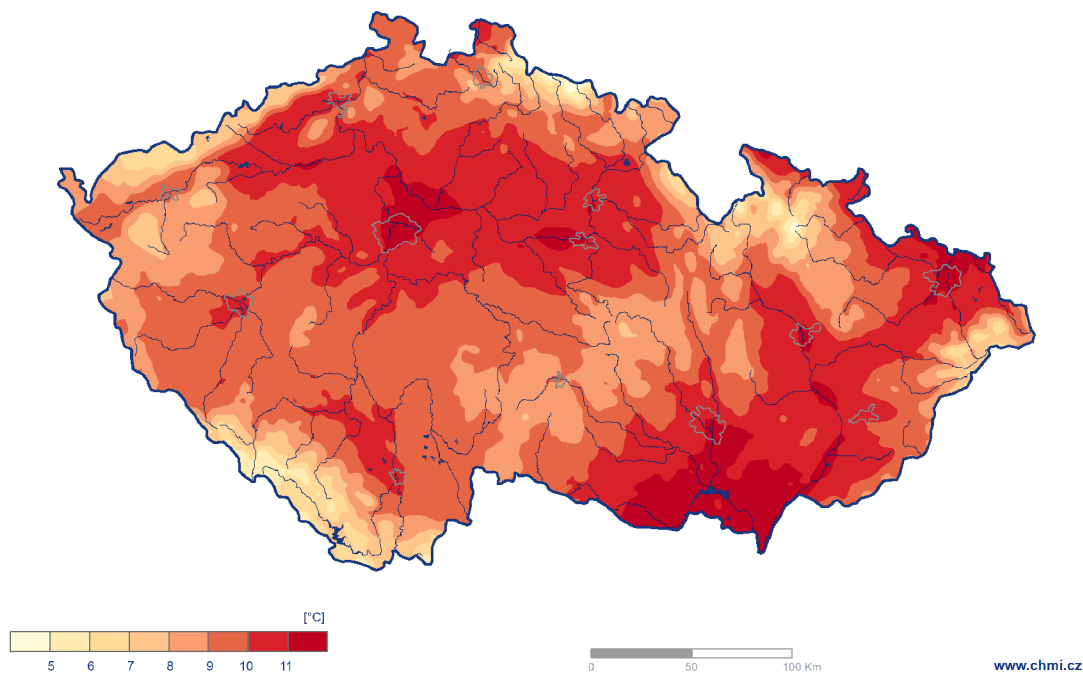
Teplota

Rozdíl teplot, při které by měly mít nekovové lámací spojky zaručenou funkčnost,
je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) [9]. Tyto vztažné teploty by měly být v souladu
s podnebím v místě, kde bude spojka instalována.

Ke stanovení dlouhodobých teplot v dané oblasti, shromažďují hydrometeoro-
logické stanice data denních teplot již několik let. Z těchto dat se následně vytváří
mapy s průměrem těchto teplot za dané období. Dříve se tyto mapy vytvářeli pro
časově dlouhá období např. od roku 1961 do roku 1990, nicméně od roku 2011 se
průměrná teplota zpracovává pro každý rok zvlášť, tak jak je to zobrazeno na obr.
3.3.

Průměrná roční teplota vzduchu v roce 2019

Český
hydrometeorologický
ústav



Obrázek 3.3: Průměrná roční teplota vzduchu v roce 2019.

Zdroj: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/images/T_2019.gif
[cit. 10. 6. 2020]

Z dlouhodobého průměru i historických extrémů dohledatelných na webu Čes-

kého hydrometeorologického ústavu lze usoudit, že rozmezí teplot požadované manuálem jsou dostačující pro správné fungování součástí na území ČR.

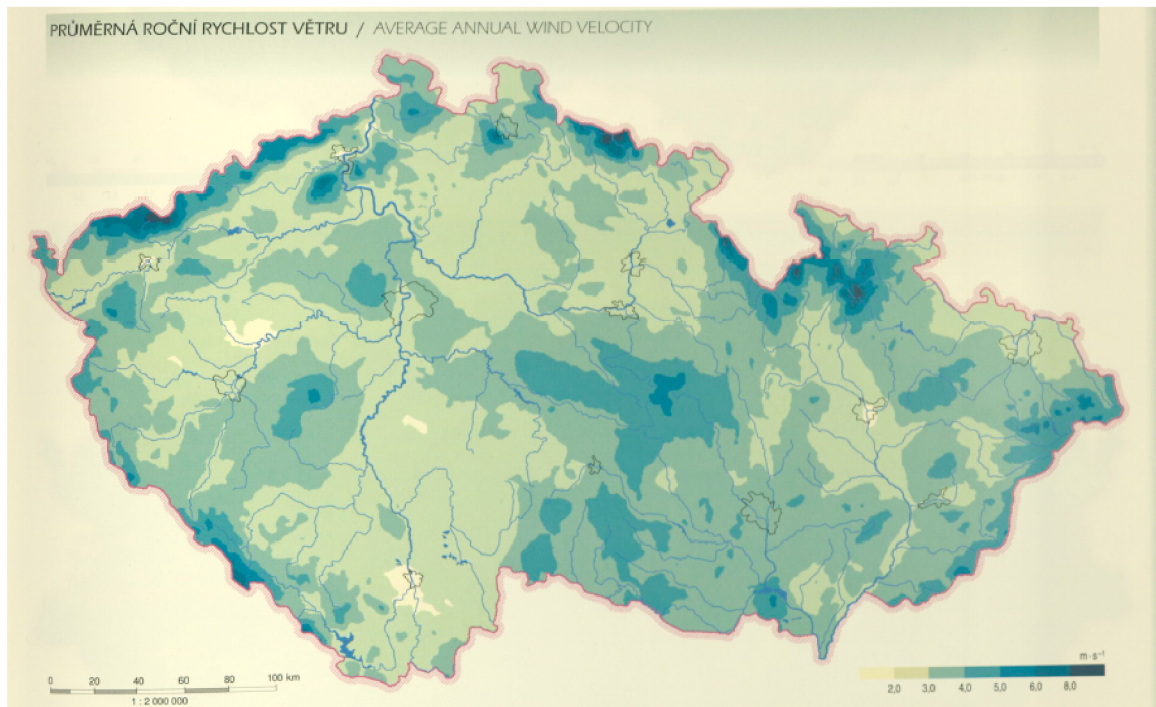
Děšť a sníh

Zde by měl návrh být uzpůsoben možnému vystavení nosné části návěstidla intenzivním deštům, sněhové pokrývce nebo zamrzáání. Zohledněna musí být také relativní vlhkost, která se může pohybovat od 5 do 95 % [9].

Povětrnostní podmínky

Dle manuálu by objekt měl být dostatečně pevný, aby vydržel běžný provoz a zatížená povětrnostními podmínkami. V manuálu je uvedeno, že funkčnost součástí by měla být zachována při působení statického i nárazového větru o rychlosti 133 m/s, případně 67 m/s pro světla nízké intenzity. Pro tuto část je specificky uvedeno, že hodnoty rychlostí větru by pro konkrétní návrh měly být upraveny podle dlouhodobých hodnot rychlostí na konkrétním území [9].

Pro zjištění hodnot rychlostí na území ČR se opět využívá hydrometeorologických stanic, kdy se ze změřených dat opět sestavují mapy. Manuál pro správný návrh požaduje průměrnou hodnotu větru sledovanou v intervalu padesáti let. Ukázka mapy průměrné roční rychlosti větru je na obr. 3.4, nicméně tato mapa byla zpracována pro roky 1961-2000, tudíž nesplňuje požadavek sledovaného intervalu. ČHMÚ proto pro účely této práce poskytl mapu průměrné roční rychlosti větru pro období 1986-2015, kterou však není možné zveřejnit.



Obrázek 3.4: Průměrná roční rychlost větru v roce 2019. Převzato z [30]

Sjednocením obou map pak lze získat požadovaná data. Maximální průměrná roční rychlost větru dosahuje 7 – 10 m/s v závislosti na nadmořské výšce a ročním období [30]. Maximální denní nárazy větru se pak pohybují okolo 45 m/s [30], kdy absolutní maximum naměřené rychlosti větru dosáhlo cca 100 m/s (12. 3. 2017, Sněžka [31]). I v tomto případě je tak možno navrhovat součást podle manuálem doporučených hodnot.

Proud výtokových plynů motoru

Pro tuto část manuál zmiňuje, že by měla být spojka dimenzována také na rychlost proudu výtokových plynů motoru, které je letiště schopné obsloužit [9]. Hodnota rychlostí proudů výtokových plynů motorů takových letadel je obsažena v manuálem navrhovaných hodnotách odolnosti vůči větru.

Požadavek na zatížení ohybovým momentem

Další požadavek se týká bodu porušení vůči uzemnění nadzemního návěstidla, který musí být maximálně 38 mm nad uzemněním. V tomto bodě by nemělo dojít k poškození spojky při působení ohybového momentu 204 J, lámací mechanismus se však musí aktivovat dříve než zatížení dosáhne hodnoty 678 J. Lámací mechanismus by měl být první a jediný porušený prvek návěstidla [9].

3.1.2 Zohlednění vlastností materiálu

Jestliže konstrukční prvek má splňovat zadané požadavky, velmi závisí na vlastnostech použitého materiálu. Materiál se před použitím na konkrétní součást testuje ke zjištění základních vlastností, které by měli být případně ověřeny výpočtem nebo simulací. Pak může být materiál označen za vyhovující a začleněn do výrobního procesu.

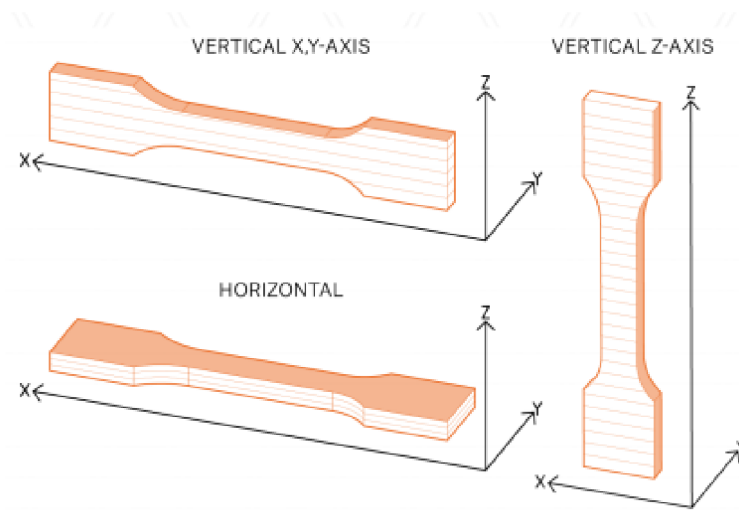
Mechanické vlastnosti

Určením mechanických vlastností plastových materiálů se zabývá norma ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 179-1. První norma popisuje metody, které se používají k vyhodnocení tahových zkoušek a jejich parametrů, konkrétněji pak meze pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu nebo napětí na mezi kluzu [32].

Pro plastové materiály je nutné uvažovat jejich anizotropní vlastnosti, tedy různé chování v různých směrech. Zkoušky se proto provádějí ve třech směrech, kde orientace vláken zkušební tělesa pro jednotlivé směry je ukázána na obr. 3.5.

Druhá norma se věnuje stanovení rázových vlastností metodou Charpy pro plasty při použití různých typů zkušebních těles a různém uspořádání zkoušky. Metoda zkoumá chování zkušebních těles, na jehož základně posuzuje jejich křehkost či houževnatost [33].

Změřené vlastnosti obou zkoušek lze nalézt v katalogových listech (ukázka na obr. 3.6) požadovaného materiálu u daného výrobce. Pro všechny materiály



Obrázek 3.5: Ukázka normovaných plastových vzorků pro tahovou zkoušku s uvažováním anizotropních vlastností plastu. Převzato z [34].

výrobce PrusaResearch uvádí, že všechny výsledky jsou pouze orientační a závislé na okolnostech tisku. Zkoušky materiálu by si tak měl provést každý výrobce sám.

Nastavení tisku

Mechanické vlastnosti jsou značně ovlivněny tiskovým nastavením. Průměr trysky, rychlost tisku, vnitřní výplň i směr vláken může změnit chování vzorku při jednotlivých zkouškách a může být dosaženo rozdílných výsledků.

Pro dosažení hodnot uvedených v katalogovém listu tak výrobce uvádí tiskové nastavení, při kterém bylo změřených hodnot dosaženo. Doporučené nastavení pro tisk ASA materiálu je uvedeno na obr. 3.7a s doplněním, že kvalita tisku byla nastavena na *SPEED* s velikostí vrstvy 0,2 mm a výplň vzorku byla 100 % přímočará [34]. Pro PETG materiál je doporučena kvalita tisku *SPEED* s velikostí vrstvy 0,2 mm, výplň vzorku 100 % přímočará, extruzní multiplikátor 1,07, teplota extruderu 260 °C a vyhřívání podložky na 90 °C [35]. Nastavení vychází z doporučených hodnot tak, jak je to uvedeno na obr. 3.7b.

Vlastnosti / směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Napětí na mezi kluzu [MPa]	42 ± 1	43 ± 1	9 ± 1	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,6 ± 0,1	1,7 ± 0,1	1,4 ± 0,1	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	3,3 ± 0,1	3,3 ± 0,2	0,6 ± 0,1	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ / m ²]	40 ± 10	39 ± 5	-2	ISO 179-1
Rázová houževnatost Charpy vrub. (5) [kJ / m ²]	14 ± 1	13 ± 1	-2	ISO 179-1

(a) Mechanické vlastnosti ASA.

Vlastnosti / směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Napětí na mezi kluzu [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1	2,5 ± 0,5	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (3) [kJ / m ²]	NB. (C) (4)	NB. (4)	5 ± 1	ISO 179-1

(b) Mechanické vlastnosti PETG.

Obrázek 3.6: Mechanické vlastnosti vytištěných testovacích vzorků, výrobce PrusaResearch. Převzato z [34] a [35].

Teplota trysky [°C]	260 ± 5
Teplota vyhřívání podložky [°C]	110 ± 5
Rychlost tisku [mm / s]	až 200
Rychlost ventilátoru chlazení [%]	30 % (0-50 %*)
Výška obrysu	až do výšky tištěné části

(a) Doporučené nastavení tisku pro ASA.

Teplota trysky [°C]	250 ± 10
Teplota vyhřívání podložky [°C]	80 ± 10
Rychlost tisku [mm / s]	až 200

(b) Doporučené nastavení tisku pro PETG.

Obrázek 3.7: Doporučené nastavení tisku pro materiály ASA a PETG. Převzato z [34] a [35].

3.2 Výpočet zatížení ohybovým momentem a zatížení větrem

Se znalostí mechanických vlastností materiálů může být nyní ověřen požadavek manuálu na odolnost lámací spojky při zatížení ohybovým momentem a zatížení větrem.

3.2.1 Zatížení ohybovým momentem

Pro výpočet zatížení ohybového momentu bude použit výpočet napětí v ohybu z teorie Pružnosti a pevnosti. Rovnice pro napětí v ohybu vypadá následovně:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} [\text{MPa}], \quad (3.1)$$

kde M_o je ohybový moment působící na součást, jehož jednotka Nm je ekvivalentní s jednotkou J a W_o je modul průřezu v ohybu s jednotkou mm^3 [36].

Modul průřezu v ohybu se vypočítá podle vzorce: [36]

$$W_o = \frac{J_y}{z} [\text{mm}^3], \quad (3.2)$$

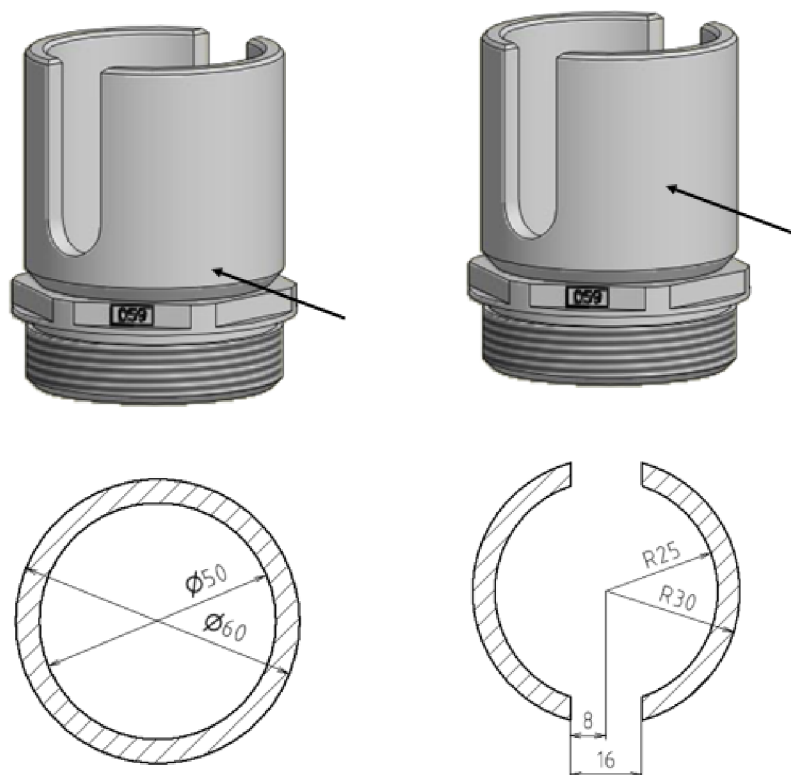
kde J_y značí osový kvadratický moment k ose y s jednotkou mm^4 a z je charakteristický rozměr v mm, respektive J je osový kvadratický moment vzhledem k neutrální ose a z je vzdálenost nejodlehlejšího bodu obrysové čáry od neutrální osy příčného průřezu. Pro výpočet kvadratických momentů jednoduchých geometrických tvarů již existují definiční vztahy a není je třeba odvozovat [36].

Podle manuálu je zadán požadavek, že k deformaci lámacího mechanismu musí dojít maximálně 38 mm nad uzemněním, protože však není ze schématu na obr. 3.1 přesně patrné, jak vysoko je spojka od uzemnění v návěstidlu umístěna, bude předpokládáno, že mohou nastat dvě situace. A to, že se bod, kde se spojka bude deformovat, bude nacházet ve spodní části spojky pod výřezem, nebo že se bod bude nacházet v horní části v místě výřezu. Umístění obou bodů je demonstrováno na obr. 3.8. Přejímová oblast mezi kruhovou úsečí a mezikružím (ukončení výřezu rádiem) nebude považována jako možné místo deformačního bodu, proto nebude dále uvažována.

Mezikruží

Nejprve tedy budeme uvažovat příčný průřez mezikruží s rozměry $D = 60$ mm a $d = 50$ mm, jehož definiční vztah je uveden v [36]. Charakteristický rozměr zde bude nejvzdálenější bod od těžiště, které leží ve středu průřezu, tedy $z = \frac{D}{2} = 30$ mm. Modul průřezu v ohybu se vypočte podle tohoto vztahu: [36]

$$W_{o,a} = \frac{\frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)}{\frac{D}{2}} = \frac{\frac{\pi}{64}(60^4 - 50^4)}{30} = 10\,979,21 \text{ mm}^3. \quad (3.3)$$



(a) Příčný průřez mezikruží.

(b) Příčný průřez kruhové úseče.

Obrázek 3.8: Příčné průřezy v možných bodech zatížení spojky ohybovým momentem.

Vypočtenou hodnotu modulu průřezu dosadíme do vzorce (3.1) pro napětí v ohybu, kde za ohybový moment dosadíme mezní hodnotu 204 Nm zadanou manuálem, pouze převedeme jednotky na Nmm

$$\sigma_{o,a} = \frac{204\,000}{10\,979,21} = 18,58 \text{ MPa}, \quad (3.4)$$

kde výsledkem je napětí způsobené ohybem. Hodnotu napětí pak porovnáme s hodnotou napětí na mezi kluzu udávané katalogovým listem, čímž zjistíme, zda se při zadané hodnotě ohybového momentu materiál deformuje ještě elasticky nebo již plasticky.

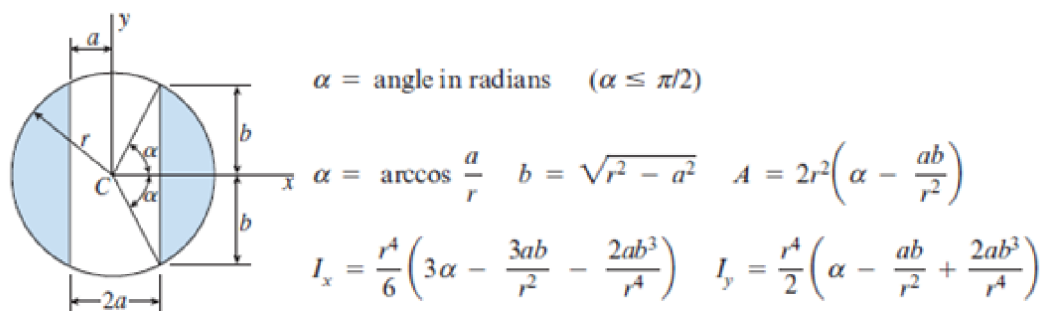
Abychom z katalogového listu materiálu vyčetli správnou porovnávací hodnotu, musíme určit předpokládaný směr tisku součásti. Nejjednodušším řešením se zde nabízí umístit spodní hranu součásti na tiskovou podložku a tisknout směrem vzhůru v ose z . Pokud bychom takto uvažovali, můžeme pozorovat, že materiál ASA má napětí na mezi kluzu v ose z pouze 9 MPa, zatímco PETG disponuje 30 MPa. ASA by se tak v této konfiguraci začal plasticky deformovat mnohem dříve než je stanoveno manuálem a materiál bychom museli shledat nevyhovujícím na rozdíl od PETG, který má ještě dostatečnou rezervu, než by k plastické deformaci

došlo.

Vzhledem ke skutečnosti, že jsou plastové materiály anizotropní, nemusí být materiál ASA hned vyloučen z uvažovaných materiálů. Jeho ostatní vlastnosti jsou totiž velmi vyhovující. Abychom mohli materiál ASA považovat za použitelný, musela by být změněna konfigurace tisku, kde by součást mohla být uložena na podložce např. horizontálně nebo pod úhlem např. 45°, kde se u výtisku poté kombinují vlastnosti více směrů. Napětí na mezi kluzu pro horizontální tisk je pro materiál ASA 42 MPa, v tomto případě by tak materiál dokázal obstát při zatížení ohybovým momentem.

Kruhová úseč

Pro výpočet kvadratického momentu příčného průřezu vzniklé kruhové úseče už nelze využít jednoduché vztahy jako pro mezikružší, nicméně lze použít již odvozené vztahy z lit. [37]. Vztahy pro výpočet kvadratického momentu jsou uvedeny na obr. 3.9. Protože k tomuto příčnému průřezu vznikají již dva osové kvadratické momenty (kvůli nesouměrnosti), budou počítány a porovnány samostatně.



Obrázek 3.9: Vztahy pro výpočet kvadratického momentu kruhové úseče.
Převzato z [37].

Postupovat budeme tak, že nejprve vypočítáme osový kvadratický moment pro kruh s poloměrem $r_1 = 30$ mm, od kterého následně odečteme osový kvadratický moment kruhu s poloměrem $r_2 = 25$ mm. Nyní vypočítáme všechny dílčí hodnoty pro dosazení do vzorců osových kvadratických momentů.

$$\alpha_1 = \arccos \frac{a}{r_1} = \arccos \frac{8}{30} = 1,3009 \text{ rad}, \quad (3.5)$$

$$\alpha_2 = \arccos \frac{a}{r_2} = \arccos \frac{8}{25} = 1,2451 \text{ rad}, \quad (3.6)$$

$$b_1 = \sqrt{r_1^2 - a^2} = \sqrt{30^2 - 8^2} = 28,9137 \text{ mm}, \quad (3.7)$$

$$b_2 = \sqrt{r_2^2 - a^2} = \sqrt{25^2 - 8^2} = 23,6854 \text{ mm}, \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
J_{x,1} &= \frac{r_1^4}{6} \left(3\alpha_1 - \frac{3ab_1}{r_1^2} - \frac{2ab_1^3}{r_1^4} \right) = \\
&= \frac{30^4}{6} \left(3 \cdot 1,3009 - \frac{3 \cdot 8 \cdot 28,9137}{30^2} - \frac{2 \cdot 8 \cdot 28,9137^3}{30^4} \right) = 358\,316,7469 \text{ mm}^4,
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
J_{x,2} &= \frac{r_2^4}{6} \left(3\alpha_2 - \frac{3ab_2}{r_2^2} - \frac{2ab_2^3}{r_2^4} \right) = \\
&= \frac{25^4}{6} \left(3 \cdot 1,2451 - \frac{3 \cdot 8 \cdot 23,6854}{25^2} - \frac{2 \cdot 8 \cdot 23,6854^3}{25^4} \right) = 148\,536,8507 \text{ mm}^4,
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
J_{y,1} &= \frac{r_1^4}{2} \left(\alpha_1 - \frac{ab_1}{r_1^2} - \frac{2ab_1^3}{r_1^4} \right) = \\
&= \frac{30^4}{2} \left(1,3009 - \frac{8 \cdot 28,9137}{30^2} - \frac{2 \cdot 8 \cdot 28,9137^3}{30^4} \right) = 616\,150,4793 \text{ mm}^4,
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
J_{y,2} &= \frac{r_2^4}{2} \left(\alpha_2 - \frac{ab_2}{r_2^2} - \frac{2ab_2^3}{r_2^4} \right) = \\
&= \frac{25^4}{2} \left(1,2451 - \frac{8 \cdot 23,6854}{25^2} - \frac{2 \cdot 8 \cdot 23,6854^3}{25^4} \right) = 290\,269,8228 \text{ mm}^4,
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$J_x = J_{x,1} - J_{x,2} = 358\,316,7469 - 148\,536,8507 = 209\,779,8962 \text{ mm}^4. \tag{3.13}$$

$$J_y = J_{y,1} - J_{y,2} = 616\,150,4793 - 290\,269,8228 = 325\,880,6565 \text{ mm}^4. \tag{3.14}$$

Poté, co jsme získali hodnoty osových kvadratických momentů tohoto příčného průřezu, můžeme dosadit do vzorců (3.2) a (3.1) a vypočítat napětí v ohybu.

$$W_{o,b} = \frac{J_x}{z} = \frac{209\,779,8962}{30} = 6\,992,66 \text{ mm}^3. \tag{3.15}$$

$$W_{o,c} = \frac{J_y}{z} = \frac{325\,880,6565}{30} = 10\,862,69 \text{ mm}^3. \tag{3.16}$$

$$\sigma_{o,b} = \frac{204\,000}{6\,992,66} = 29,17 \text{ MPa}. \tag{3.17}$$

$$\sigma_{o,c} = \frac{204\,000}{10\,862,69} = 18,78 \text{ MPa}. \tag{3.18}$$

Hodnoty můžeme nyní porovnat stejně jako v předchozím případě s napětím na mezi kluzu pro oba navrhované materiály. Materiál ASA by byl opět v konfiguraci tisku ve směru osy z nevyhovující a znovu by bylo třeba zvolit např. horizontální

konfiguraci. Pro materiál PETG je hodnota napětí na mezi kluzu v ose z 30 ± 5 MPa, tudíž i zde bychom pro jistotu dodržení elastické deformace součásti volili horizontální konfiguraci nebo konfiguraci pod úhlem.

Podobně bychom ověřili, zda se lámací spojka poruší do hodnoty 678 J tak, jak bylo požadováno v manuálu. Napětí na mezi pevnosti není v katalogových listech výrobce PrusaResearch uvedeno a proto budou určena napětí, při kterých musí být dosaženo zlomení lámací spojky. Použijeme opět vzorec (3.1) a budeme uvažovat oba předpokládané deformační body.

$$\sigma_{o,a} = \frac{678\,000}{10\,979,21} = 61,75 \text{ MPa.} \quad (3.19)$$

$$\sigma_{o,b} = \frac{678\,000}{6\,992,66} = 96,96 \text{ MPa.} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{o,c} = \frac{678\,000}{10\,862,69} = 62,42 \text{ MPa.} \quad (3.21)$$

Vypočtená napětí představují nejvyšší hodnoty napětí na mezi pevnosti, které by mohly být stanovené materiálovou zkouškou.

3.2.2 Zatížení větrem

Pro dokázání odolnosti součásti vůči zatížení větrem musí být rychlost větru přepočítána na porovnatelnou hodnotu zatížení. K tomu byl využit obecný vzorec pro zatížení větrem. Z tohoto vzorce získáme sílu, která působí na promítnutý průřez určité stavby. Následně odhadneme nejnebezpečnější působiště síly a vzdálenost od uložení stavby, což bude ve výsledku způsobovat ohybový moment. Tento ohybový moment porovnáme s hodnotami v manuálu, případně přepočítáme odolání součásti na ohybový moment vyšší hodnoty než byla zadána manuálem.

Obecný vzorec pro zatížení větrem má tvar: [38]

$$F = S \cdot P \cdot c_d [\text{N}], \quad (3.22)$$

kde $S [\text{m}^2]$ je promítnutý průřez součásti, $P [\text{Nm}^{-2}]$ je tlak větru a $c_d [-]$ je koeficient odporu součásti. Následují dílčí výpočty pro dosazení do obecného vztahu. Tvar promítnutého průřezu byl zjednodušen na obdélník s rozměry $a = 290$ mm a $b = 165$ mm podle obr. 3.1. Rovnice pro tlak větru vychází z předpisů Americké asociace stavebních inženýrů a konstanta v rovnici byla stanovena výpočtem typických hodnot hustoty vzduchu a tíhového zrychlení [38]. Koeficient odporu byl zde zvolen podle standardizovaných hodnot koeficientů jako $c_d = 0,8$ pro krátkou trubku.

$$S = a \cdot b = 0,29 \cdot 0,165 = 0,048 \text{ m}^2, \quad (3.23)$$

$$P = 0,613 \cdot v^2 = 0,613 \cdot 133^2 = 10\,843,36 \text{ Nm}^{-2}, \quad (3.24)$$

$$F = S \cdot P \cdot c_d = 0,048 \cdot 10\,843,36 \cdot 0,8 = 416,39 \text{ N.} \quad (3.25)$$

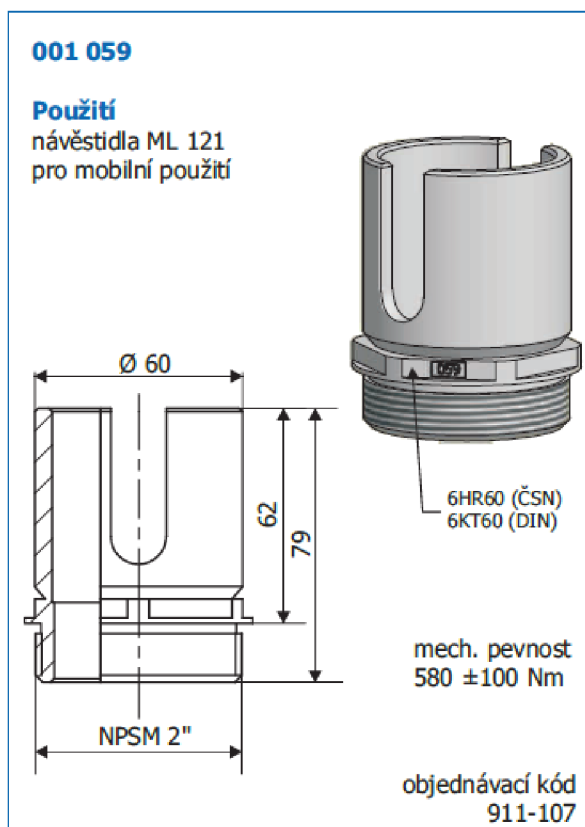
Jako nejnebezpečnější bod bude zvolen bod působící na vrchní část světelné hlavice nadzemního návěstidla. Důvodem je představení si výsledných vnitřních účinků jako reakci na vnější zatížení na návěstidlo (pro zjednodušení můžeme návěstidlo považovat za prut), kde ve vetknutí neboli uzemnění návěstidla nemůže vznikat žádná reakce, protože je zde návěstidlo uloženo nepohyblivě. V největší vzdálenosti od tohoto uložení bude naopak vznikat reakce největší. Pokud tedy zvolíme krajní bod jako působiště, jeho vzdálenost k uložení je $l = 290 \text{ mm}$. Ohybový moment je následně vypočten jako velikost síly a vzdálenosti od uložení podle vzorce: [36]

$$M_o = F \cdot l = 416,39 \cdot 290 = 120\,751,66 \text{ Nmm} = 121 \text{ J.} \quad (3.26)$$

Z výsledku můžeme usoudit, že moment vzniklý zatížením větrem je menší než manuálem požadovaný moment, kterému musí lámací spojka odolat, proto nebude nutné přepočítat odolnost součásti vůči tomuto momentu.

3.3 Počítačový model

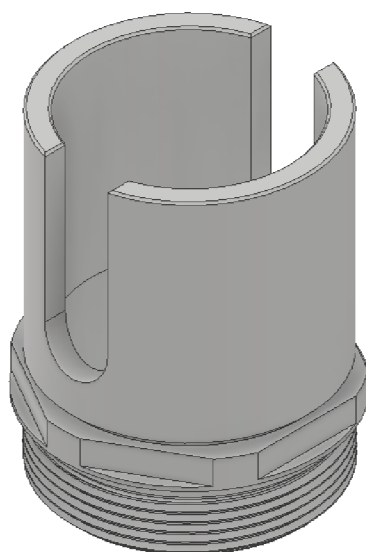
Pro navržení modelu v CAD systému jsou potřebné přesné rozměry součástí. Protože však výrobce udává v katalogovém listu vyráběných spojek pouze základní rozměry tak, jak lze vidět na obr. 3.10, ostatní rozměry byly voleny orientačně ve snaze dodržet měřítko. Ke zhotovení modelu byly použity 2 softwary a to Autodesk Inventor verze 2018 a verze 2020. Výsledný model spojky lze vidět na obr. 3.11.



Obrázek 3.10: Rozměry lámací spojky podle katalogového listu výrobce Transcon.

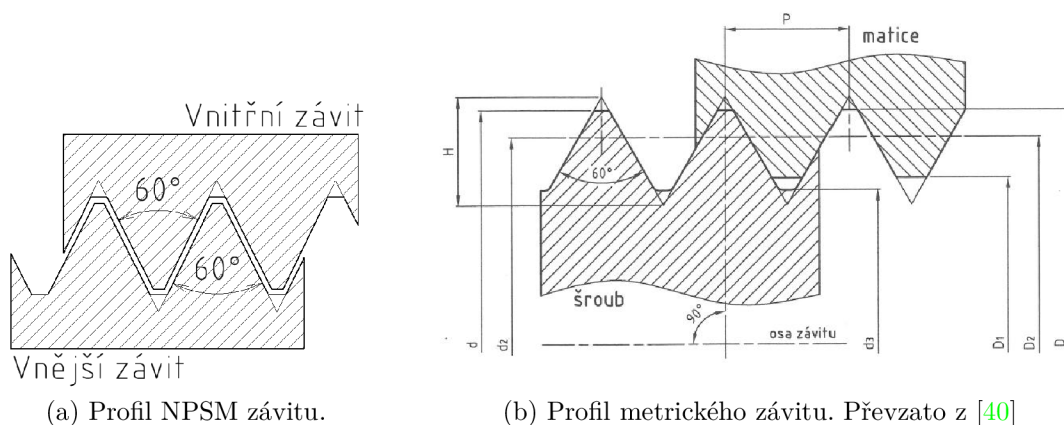
Zdroj: <https://www.transcon.cz/cz/docman-list/catalog/czech/svetelne-systemy-szz/132-05-07-01-lamaci-spojky-katalogovy-list/file/>
[cit. 10. 6. 2020]

Při vytváření modelu bylo nutné ručně vymodelovat závit, protože přednastavené závity v Inventoru se na součásti nevytvoří přímo, pouze se na povrchu plochy zobrazí jejich přibližný tvar, tudíž by závit nebylo možné vytisknout. Zkratka závitu NPSM, který je zakótovaný v katalogovém listu, vyjadřuje americký válcový trubkový palcový závit, který se však běžně nepoužívá a nebylo tak možné dohledat všechny potřebné rozměry a profily závitu. Závit tak byl vytvořen na základě profilu metrického závitu s odpovídajícími hodnotami pro závit NPSM 2" (rozteč $P = 2,209$ mm, počet závitů na palec $TPI = 11,5$ a velký průměr závitu $D = 60,325$ mm [39]), avšak pro reálné použití musí být závit přepracován.



Obrázek 3.11: Model lámací spojky v CAD systému Autodesk Inventor 2020.

Rozdílná geometrie obou závitů je zobrazena na obr. 3.12.



(a) Profil NPSM závitu.

(b) Profil metrického závitu. Převzato z [40]

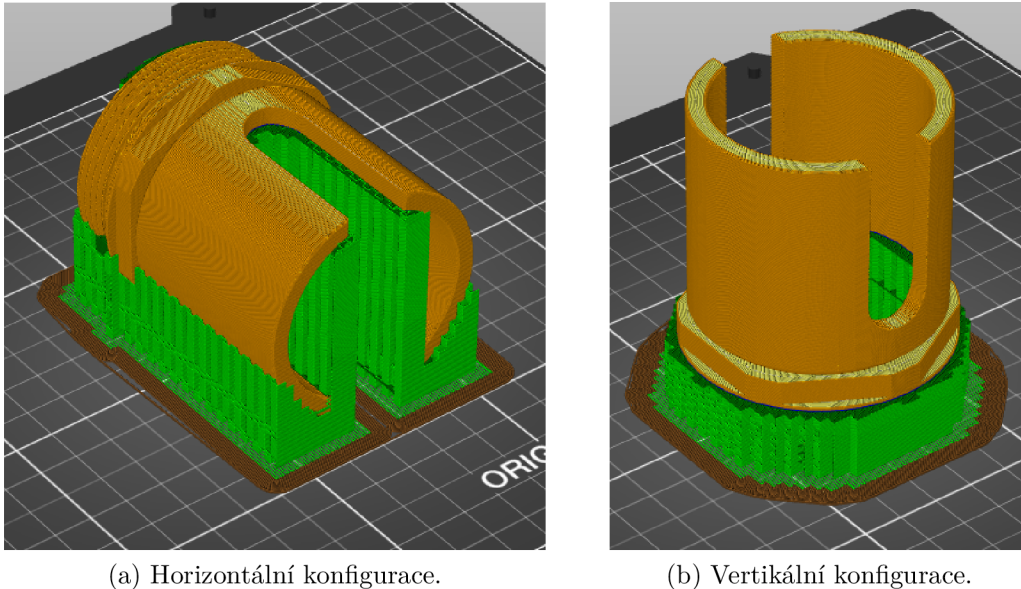
Obrázek 3.12: Profily závitů použitých pro návrh lámací spojky.

3.4 Tiskový model

3D model je nyní třeba převést do systému, který předá informace o tisku 3D tiskárně tak, jak bylo popsáno v podkapitole 2.1. K tomu byl použit software PrusaSlicer 2.1.1, který je doporučený pro tisk na všech tiskárnách společnosti PrusaResearch, tedy i na MK3 S.

Ve *sliceru* se nastaví umístění modelu na tiskové podložce, případně jeho natočení. Nastavení tiskových vlastností bylo ponecháno tak, jak bylo doporučeno

v katalogovém listu, byl přidán límec neboli *brim* pro lepší přilnavost filamentu na podložku a byly přidány podpěry na tiskové podložce, aby bylo zabráněno tzv. tisku do vzduchu. Byly vytvořeny dva modely pro dvě různé konfigurace, které byly navrženy ve výpočtové části. *Naslicované* modely spojky lze vidět na obr. 3.13.



Obrázek 3.13: Model lámací spojky připravený na tisk, vytvořený v CAM systému PrusaSlicer 2.1.1. Oranžovou barvou je znázorněn vnější obrys součásti, žlutou barvou vnitřní výplň součásti, zelenou barvou nutné podpěry a hnědou barvou límec.

Při procesu *slicování* se také propočítává předpokládaná délka tisku a spotřeba materiálu. Díky těmto informacím může být vyhodnoceno, kolik spojek bude vyrobeno z jedné cívky materiálu a jak velké náklady by stála výroba jedné spojky. K porovnání je nutné znát cenu jedné cívky materiálu a její gramáž. Cívka materiálu ASA může být zakoupena za 699 Kč s gramáží 850 g². 1 kg cívky materiálu PETG může být pořízeno taktéž za 699 Kč³.

Níže byly sestaveny dvě tabulky (tab. 3.1 a tab. 3.2), které srovnávají spotřebu materiálu, tiskový čas, množství a cenu vyrobených spojek při rozdílném uvažování deformačního bodu spojky, jak bylo ukázáno na obr. 3.8.

Spojka na podložce nemusí být umístěna jedna, ale je možné tisknout několik spojek najednou. Pokud jsou spojky vhodně umístěné lze i nepatrně ušetřit materiál, nicméně se jedná o setiny, maximálně desetiny gramů. Časová úspora se ani v tomto ohledu zvláště neprojeví. Je však důležité uvážit, že čím dále je umístěn model od středu tiskové podložky, tím více se mohou projevit nepřesnosti tisku.

²<https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/977-prusament-asa-prusa-orange-850g.html>

³<https://shop.prusa3d.com/en/prusament/801-prusament-petg-prusa-orange-1kg.html>

Tabulka 3.1: Porovnání tiskových parametr spojek při předpokládaném deformačním bodě v mezikruží.

Materiál	Konfigurace	Spotřeba	Délka tisku	Kusů spojek	Cena spojky
ASA	horizontální	78,64 g	8 h 23 m 28 s	10	70 Kč
PETG	vertikální	72,72 g	6 h 17 m 41 s	13	54 Kč

Pozn.: Gramáž cívky materiálu ASA je 850 g jak bylo uvedeno výše. Pokud známe spotřebu materiálu pro jeden výtisk, můžeme vhodným podělením získat počet spojek, které je možné z jedné cívky materiálu vyrobit. Stejně tak, pokud známe cenu jedné cívky a počet vyrobených spojek, můžeme odvodit cenu jedné spojky. Stejný postup byl proveden pro materiál PETG, jehož gramáž jedné cívky je 1 kg.

Tabulka 3.2: Porovnání tiskových parametrů spojek při předpokládaném deformačním bodě v kruhové úseči.

Materiál	Konfigurace	Spotřeba	Délka tisku	Kusů spojek	Cena spojky
ASA	horizontální	78,64 g	8 h 23 m 28 s	10	70 Kč
PETG	horizontální	93,34 g	8 h 27 m 39 s	10	70 Kč

Z tohoto důvodu je vhodnější umístit na podložku méně modelů co nejbližší středu podložky a provést více tisků.

Z porovnání je tedy patrné, že vhodnějším materiálem je materiál PETG, který by v případě deformačního bodu umístěného na mezikruží mohl být tisknut vertikálně a byl by ušetřen materiál a čas. Ve vertikální konfiguraci vzniká i větší prostor na umístění více kusů na tiskovou podložku a je v této konfiguraci použito mnohem méně materiálu na nutné podpěry.

Pokud by však bylo nutné uvažovat s deformačním bodem umístěným na kruhové úseči, oba materiály mají v podstatě stejné tiskové parametry. Pro PETG materiál sice vzroste spotřeba materiálu, ale protože cívka tohoto materiálu má větší gramáž než cívka ASA materiálu, vyrobený počet spojek i jejich cena je totožná.

Který z materiálů by bylo výhodnější použít by tak mělo být vyhodnoceno na základě testování křehké součásti popsané v další podkapitole. Vyrobené součásti se totiž budou testovat pod rozsahem teplot, čímž mohou být zásadně ovlivněny pevnostní vlastnosti materiálu. Pokud by oba materiály byly testem označeny za vyhovující, bylo by dále potřeba zhodnotit jejich další vlastnosti a vhodnost použití (odolnost vůči UV záření, vodotěsnost apod.).

3.5 Testování křehké součásti

Každá součást nebo křehký objekt by měl být testován a schválen dříve než bude použit pro potřeby letiště. Pro prokázání křehkých vlastností musí být součást

velmi podrobně testována. Testování může být provedeno i numerickou simulací, avšak tato simulace musí být porovnatelná s daty vycházejícími z testování [9].

Statické testy se provádí pro vizualizační prostředky lehké hmotnosti, jejichž výška nepřekročí hodnotu 1,2 m. Dynamické testy se doporučují pro navigační pomůcky s výškou větší než 1,2 m a mohou být zasaženy letadlem v letu [9].

Numerické metody umožňují komplexní testování, pokud jde o kombinaci rychlosti zatěžování, směru zatěžování i velikosti zatěžování. Moderní technologie umožňují pokročilé analýzy k předpovědi odezvy materiálu s poměrně vysokou přesností. Nevýhodou jsou zde různé výpočetní programy, které většinou mají unikátní nastavení a metody pro výpočet [9].

Pokud je třeba navrhnout celý řetězec výrobního procesu křehké součásti od začátku, mohou být testovány i předvýrobní jednotky nebo nástroje určené k výrobě. Konečný výrobek je však přesto nutné podrobit komplexnímu testování [9].

3.5.1 Testování křehkého prvku nadzemního návěstidla

Výrobce by měl při testování funkčnosti návěstidla předložit všechny zprávy o zkoušce, že zařízení splňuje všechny požadavky uvedené v manuálu. Všechny zkoušky by měly být provedeny se zcela smontovanou světelnou jednotkou v nominální výšce a namontovanou na pevně zajištěnou základovou desku [9].

Průběh zkoušky by měl mít následující postup. Zatížení by mělo působit na návěstidlo v bodě těsně pod čočkou maximální silou 220 N za minutu, dokud nebude dosaženo minimálního ohybové momentu, jak bylo popsáno v 3.1.1. Po dokázání, že návěstidlo dokáže přenést toto zatížení bez poškození, zatížení by mělo pokračovat stejnou rychlostí, dokud nedojde k deformaci součásti na mezi kluzu [9].

Zkouška by se měla opakovat celkem na pěti křehkých prvcích. Pokud je prvek vyrobený z plastu, zkouška musí probíhat v intervalu teplot $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) [9]. Pokud během zkoušky kterýkoli z prvků nedokáže splnit požadavky manuálu, nebo se poškodí jiná část návěstidla před porušením křehké součásti určené k prvotní deformaci, je zkouška označena za neúspěšnou.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala možným využitím 3D metod pro výrobu nosných částí leteckého nadzemního návěstidla, které by bylo alternativou ke stávající výrobě. Na nadzemní návěstidlo jako leteckou stavbu a jeho nosnou část jsou kladeny přísné požadavky obsažené v leteckých předpisech a konstrukčních manuálech. Nosná část návěstidla totiž zajišťuje, že při případné kolizi letadla s návěstidlem, nesmí dojít k poškození letadla, nýbrž k deformaci návěstidla.

V teoretické části práce proto byly popsány zákony, předpisy a manuály, kterými se musí konstruktér řídit při návrhu leteckého nadzemního návěstidla a jeho nosné části. Dále se práce zabývala popisem 3D technologií a jejich metod, na jehož základě byla vybrána FDM metoda založená na tisku na bázi pevných materiálů. Následoval popis a výběr materiálu 3D metody, kde byl kladen důraz na takové vlastnosti materiálů, které mohou obstát při aplikacích v letovém provozu. Z uvedených materiálů tak byly vybrány PETG a ASA.

Detailním popisem nosné části návěstidla a přesnými požadavky, které musí být zohledněny při návrhu nosné části, se zabývá poslední kapitola. Nosná část návěstidla, konkrétněji lámací spojka, musí být schopna vydržet zatížení způsobené běžným provozem ve venkovním prostředí jako je vítr, déšť nebo sníh bez jakékoli deformace, musí se však porušit nebo deformovat po dosažení určité hodnoty ohybového momentu, který by mohl být vyvolán případnou kolizí s letadlem. Výpočtová část se proto věnuje posouzením tohoto požadavku vzhledem k mechanickým vlastnostem vybraných materiálů.

Z výpočtové části bylo zjištěno, že oba materiály jsou vyhovující z hlediska zatížení ohybovými momenty i zatížení větrem, pokud bude lámací spojka umístěna na tiskové podložce v horizontální poloze. Následně byl vytvořen 3D počítačový model lámací spojky podle existujícího tvaru, který byl použit pro vytvoření tiskových souborů spojky. Existující tvar spojky obsahuje několik tvarových prvků, které se nyní vyrábějí konvenčními způsoby obrábění jako je frézování nebo soustružení. Výroba spojky pomocí 3D metody však redukuje všechny výrobní operace pouze do jednoho kroku - samotného tisku.

Tiskové soubory obsahují informace o spotřebovaném materiálu při tisku a o délce tisku, podle kterých byla porovnána výrobní cena jedné spojky z vybraných materiálů. Protože je však horizontální konfigurace tisku náročnější na spotřebovaný materiál, ve výsledku je tak výrobní cena lámací spojky z obou materiálů stejná. Výrobce, který je srozuměn se všemi kroky současné výroby a vynaloženými investicemi pro výrobu lámacích spojek, pak může posoudit ekonomickou stránku navrhované výroby 3D metodou z hlediska počtu operačních kroků, prvotních investic do výrobních strojů, nutné obsluhy těchto strojů apod.

Pro výběr konkrétního materiálu by vyrobené lámací spojky dále musely projít popsáním testovacím procesem, který by ukázal, který z materiálů má lepší odezvu na zatěžovací parametry v požadovaném rozsahu teplot, případně by byl vybrán materiál s lepšími vlastnostmi významnými pro venkovní použití (ASA je odolný vůči UV záření, PETG je vodotěsný apod.). Z důvodu časové náročnosti

bude vyroben pouze protoyp lámací spojky, nebylo už však provedeno komplexní testování pro ověření způsobilosti spojky.

LITERATURA

- [1] KAZDA, Antonín a Robert E. CAVES. *Airport design and operation*. 2nd ed. Bingley: Emerald, c2008. ISBN 978-0-08-045104-6.
- [2] PRUŠA, Jiří. *Svět letecké dopravy*. Praha: Galileo CEE Service ČR, 2007. ISBN 978-80-239-9206-9.
- [3] Úřad pro civilní letectví. *EASA* [on-line]. [cit. 4. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.caa.cz/dokumenty/easa/>>
- [4] Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: CODEXIS [právní informační systém]. ATLAS consulting, © 2019 [cit. 4. 6. 2020]
- [5] Legislativní helpdesk. *Prováděcí předpis* [on-line]. [cit. 4. 6. 2020]. Dostupné z URL: <https://help.odok.cz/vykladovy-slovník/-/wiki/Výkladový%20slovník/Prováděcí%20předpis?fbclid=IwAR0bJgt6wik5Hy0JTE_AKo1JvnwfTv16ybTIzwy1L8fI670BjPuzWUWpqgc>
- [6] Úřad pro civilní letectví. *Letecký předpis L14 - Letiště*. Ministerstvo dopravy České republiky. Číslo jednací 641/2009-220-SP/4. Dostupné také z URL: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/data/print/L-14_cely.pdf>
- [7] *ICAO Doc 9157: ADM, Part 4 - Visual Aids*. Kanada: International Civil Aviation Organization (ICAO) Pub, 2004.
- [8] *ICAO Doc 9157: ADM, Part 1 - Runways*. Kanada: International Civil Aviation Organization (ICAO) Pub, 2006.
- [9] *ICAO Doc 9157: ADM, Part 6 - Frangibility*. Kanada: International Civil Aviation Organization (ICAO) Pub, 2006.
- [10] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. The 5th edition of Rapid prototyping : principles and applications. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte., [2017]. ISBN 978-981-3146-75-4.
- [11] FRANCE, Anna Kaziunas. *Make: 3D printing*. Sebastopol: Maker Media, 2013. ISBN 978-1-457-18293-8.
- [12] PRUŠA, Josef, Ondřej STRÍTESKÝ a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research a. s., 2019. [cit. 10. 4. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>>

- [13] CUSTOMPART.COM. *Stereolithography* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 14. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>
- [14] materialise. *Stereolitografie*. [on-line]. [cit. 30. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/stereolitografie>>
- [15] FROES, Francis. BOYER, Rodney (Eds.). *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Amsterdam: Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-814062-8.
- [16] materialise. *Laserové sintrování*. [on-line]. [cit. 30. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/laserove-sintrovani>>
- [17] materialise. *Fused Deposition Modeling (FDM)*. [on-line]. [cit. 30. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>>
- [18] MATERIALPRO3D. *PLA* [on-line]. [cit. 20. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>>
- [19] MATERIALPRO3D. *ABS* [on-line]. [cit. 20. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>>
- [20] MATERIALPRO3D. *PETG* [on-line]. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>>
- [21] prusa3d. *NITKOVÁNÍ (STRINGOVÁNÍ)* [on-line]. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.prusa3d.cz/stringing-and-oozing/>>
- [22] MATERIALPRO3D. *ASA* [on-line]. [cit. 22. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>>
- [23] prusa3d. *Prusament ASA* [on-line]. [cit. 9. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/976-prusament-asa-natural-850g.html>>
- [24] MATERIALPRO3D. *PEEK* [on-line]. [cit. 29. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/peek/>>
- [25] MATERIALPRO3D. *ULTEM* [on-line]. [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/ultem/>>
- [26] 3DXTECH. *THERMAX™ PEI, MADE USING ULTEM™ 9085* [on-line]. [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.3dxtech.com/thermax-pei-made-using-ultem-9085/>>

- [27] SIMPLIFY3D. *Filament Properties Table* [on-line]. [cit. 21. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/?filas=petg,asa>>
- [28] transcon. *Lámací spojky* [on-line]. [cit. 10. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.transcon.cz/cz/produkty-a-sluzby/svetelne-systemy-letiste/upevnovaci-prvky/item/lamaci-spojky>>
- [29] Úřad pro civilní letectví. *Letecký předpis L2 - Pravidla létání*. Ministerstvo dopravy České republiky. Číslo jednacích 153/2014-220. Dostupné také z URL: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf>
- [30] TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [31] in-pocasi. *Sněžka*. [on-line]. [cit. 25. 6. 2020]. Dostupné z URL: <http://www.in-pocasi.cz/archiv/snezka/?detailed_typ=vitr_naraz&detailed_usek=720#daily_graph>
- [32] technicke-normy-čsn. *ČSN EN ISO 527 1*. [on-line]. [cit. 25. 6. 2020]. Dostupné z URL: <http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=640604-csn-en-iso-527-1&kat=510009>
- [33] technicke-normy-čsn. *ČSN EN ISO 179 1*. [on-line]. [cit. 25. 6. 2020]. Dostupné z URL: <http://www.technicke-normy-csn.cz/640612-csn-en-iso-179-1_4_87396.html>
- [34] prusa3d. *TECHNICKÝ LIST Prusament ASA od Prusa Polymers* [on-line]. [cit. 21. 6. 2020]. Dostupné z URL: <https://shop.prusa3d.com/fotky/ASA_DataSheet_CZE.pdf>
- [35] prusa3d. *TECHNICKÝ LIST Prusament PETG od Prusa Polymers* [on-line]. [cit. 21. 6. 2020]. Dostupné z URL: <https://shop.prusa3d.com/fotky/PETG_TechSheet_CZE.pdf>
- [36] JANÍČEK, Přemysl a spol. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. 3. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2592-X.
- [37] GERE, James M. a Barry J. GOODNO. *Mechanics of Materials*. Cengage Learning. 8 edition, January 1, 2012. ISBN 978-1111577735.
- [38] wikiHow. *How to Calculate Wind Load* [on-line]. [cit. 25. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.wikihow.com/Calculate-Wind-Load>>
- [39] Gewinde Normen. *NPSM Pipe Thread ANSI B 1.20.1-1983 (R1992)* [on-line]. [cit. 21. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.gewinde-normen.de/en/npsm-pipe-thread.html>>

- [40] e-konstrukter. *METRICKÝ ZÁVIT M0,25-M600 rozměry* [on-line]. [cit. 25. 6. 2020]. Dostupné z URL: <<https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/metricky-zavit-m0-25-m600-rozmary>>

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Nadzemní návěstidlo s všesměrovým vyzařováním typ TLE 20, výrobce Transcon.	4
2.1	Program PrusaSlicer 2.1.1 používaný pro převedení modelu do tiskového kódu určený pro tisk na bázi pevného materiálu.	12
2.2	Schéma procesu SLA technologie. Převezato z [13].	13
2.3	Stereolitografická tiskárna Form 2, výrobce FormLabs.	15
2.4	Schéma procesu SLS technologie. Převezato z [10].	16
2.5	Tiskárna pro technologii SLS, výrobce Sintratec.	17
2.6	Schéma procesu FDM technologie. Převezato z [10].	18
2.7	Typy 3D tiskáren pro pevný materiál firmy Prusa Research. Převezato z [12].	19
2.8	3D tiskárna I3 MK3S, výrobce PrusaResearch.	20
3.1	Schéma všesměrového nadzemního návěstidla. Převezato z [1].	25
3.2	Typy lámacích spojek výrobce Transcon. Převezato z [28].	26
3.3	Průměrná roční teplota vzduchu v roce 2019.	27
3.4	Průměrná roční rychlost větru v roce 2019. Převezato z [30].	28
3.5	Ukázka normovaných plastových vzorků pro tahovou zkoušku s uvažováním anizotropních vlastností plastu. Převezato z [34].	30
3.6	Mechanické vlastnosti vytištěných testovacích vzorků, výrobce PrusaResearch. Převezato z [34] a [35].	31
3.7	Doporučené nastavení tisku pro materiály ASA a PETG. Převezato z [34] a [35].	31
3.8	Příčné průřezy v možných bodech zatížení spojky ohybovým momentem.	33
3.9	Vztahy pro výpočet kvadratického momentu kruhové úseče. Převezato z [37].	34
3.10	Rozměry lámací spojky podle katalogového listu výrobce Transcon.	38
3.11	Model lámací spojky v CAD systému Autodesk Inventor 2020.	39
3.12	Profily závitů použitých pro návrh lámací spojky.	39
3.13	Model lámací spojky připravený na tisk, vytvořený v CAM systému PrusaSlicer 2.1.1. Oranžovou barvou je znázorněn vnější obrys součásti, žlutou barvou vnitřní výplň součásti, zelenou barvou nutné podpěry a hnědou barvou límec.	40

SEZNAM TABULEK

2.1	Porovnání pořizovacích cen tiskáren různých 3D metod a průměrné ceny nejběžnějších tiskových materiálů.	21
3.1	Porovnání tiskových parametr spojek při předpokládaném deformačním bodě v mezikruží.	41
3.2	Porovnání tiskových parametrů spojek při předpokládaném deformačním bodě v kruhové úseči.	41

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3D	trojdimenzionální/trojrozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
CAD	Computer-Aided Design (počítačem podporované projektování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora obrábění)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DED	Directed Energy Deposition (technologie 3D tisku)
DLP	Digital Light Processing (technologie 3D tisku)
EASA	European Aviation Safety Agency (Evropská agentura pro bezpečnost letectví)
FDM	Fused Deposition Modeling (technologie 3D tisku)
FFF	Fused Filament Fabrication (technologie 3D tisku)
FST	Fire, Smoke and Toxicity (oheň, kouř a toxicita)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Mezinárodní organizace pro civilní letectví)
LCD	Liquid Crystal Display (displej z tekutých krystalů)
LED	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)
MSLA	Mask Stereolithography (technologie 3D tisku)
NPSM	American National Pipe Thread – Straight Mechanical (trubkový závit)
PEEK	PolyEtherEtherKetone
PETG	Polyetyléntereftalát – glykol
PLA	Kyselina polyléčná
RWY	Runway (ranvej)
SD	Secure Digital (datová sběrnice)
SDL	Selective Deposition Lamination (technologie 3D tisku)
SLA	Stereolitografie (technologie 3D tisku)
SLS	Selective Laser Sintering (technologie 3D tisku)
UAV	Bezpilotní letadlo
USB	Universal Serial Bus (datová sběrnice)
UV	Ultrafialové
VFR	Let za viditelnosti

SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK A SYM- BOLŮ

π	Ludolfovo číslo
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň celsia
a, b	strany obdélníku, strany kruhové úseče
A	ampér
α	úhel kruhové úseče
c_d	koeficient odporu
cd	candela
cm	centimetr
CO ₂	Oxid uhličitý
d	malý průměr
D	velký průměr, velký průměr závitu
F	síla
g	gram
h	hodina
J	joule
J_x	osový kvadratický moment k ose x
J_y	osový kvadratický moment k ose y
Kč	koruna česká
kg	kilogram
km/h	kilometr za hodinu
kt	knot (uzel)
l	vzdálenost
l	litr
m	metr
m	minuta
m/s	metr za sekundu
M_o	ohybový moment
mm	milimetr
MPa	megapascal
N	newton
Nm	newtonmetr
Nmm	newtonmilimetr
Nm ⁻²	newton na metr čtvereční
P	tlak větru, rozteč
s	sekunda
S	průřez
TPI	počet závitů na palec
v	rychlost větru
W_o	modul průřezu v ohybu
z	charakteristický rozměr
σ_o	napětí v ohybu

PŘÍLOHA A

Obsahem přiloženého souboru jsou počítačové modely lámací spojky, tiskové modely jednotlivých konfigurací a materiálů v souborech umožňující úpravu ve *sliceru* a tiskové soubory, ze kterých může být rovnou proveden tisk spojky.

```
/ ..... BP - Tereza Búliková - přílohy.rar
├── spojka-asa-horizont.3mf Tiskový model spojky v horizontální konfiguraci pro
    materiál ASA
├── spojka-petg-horizont.3mf ... Tiskový model spojky v horizontální konfiguraci
    pro materiál PETG
├── spojka-petg-vertical ..... Tiskový model spojky ve vertikální konfiguraci pro
    materiál PETG
├── spojka-asa-horizont-0.2mm-ASA-MK3S-8h23m.gcode ..... G-code horizontální
    konfigurace pro ASA
├── spojka-petg-horizont-0.2mm-PETG-MK3S-8h28m.gcode ... G-code horizontální
    konfigurace pro PETG
├── spojka-petg-vertical-0.2mm-PETG-MK3S-6h18m.gcode ..... G-code vertikální
    konfigurace pro PETG
├── spojka.ipt ..... Počítačový model spojky v Autodesk Inventor 2020
└── spojka.stp ..... Počítačový model spojky v univerzálním formátu
```