



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ PROCESU 3D TISKU SOUČÁSTÍ Z PET-G MATERIÁLU

COMPUTATIONAL MODELING OF 3D PRINTING STRUCTURES MADE OF PET-G MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MOJMÍR CYRIL MICHÁLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR VOSYNEK, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Mojmír Cyril Michálek**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce: **Ing. Petr Vosynek, 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 diplomové práce:

Výpočtové modelování procesu 3D tisku součástí z PET–G materiálu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat simulací plastového 3D tisku (metoda FDM – Fused Deposition Modeling), která bude prováděna v programu ANSYS Workbench pomocí ACT rozšíření Additive Manufacturing.

Firma Prusa Research s.r.o. provádí 3D tisk některých plastových součástí svých vlastních 3D tiskáren. Některé díly mají po výtisku vysokou míru zmetkovitosti (až 20 %), a proto firma SVS FEM s.r.o. nabídla pomoc nalézt možné příčiny pomocí simulací v softwaru ANSYS, a umožnit tak snížit tuto míru zmetkovitosti. Simulace se budou týkat samotného procesu 3D tisku. Pro tisk plastových součástí je použit materiál PETG (polyethylentereftalát – glykol). Řešení této problematiky nabízí firma SVS FEM s.r.o. jako téma pro diplomovou práci

Cíle diplomové práce:

Zkoumání okolních vlivů prostředí a vlivu vnitřní struktury modelu geometrie na výsledný výtisk součástí pomocí simulací v softwaru ANSYS.

Provedení a vyhodnocení materiálových zkoušek zkušebních těles vytištěných z materiálu PETG.

Navržení konstrukčních změn tak, aby byla snížena výsledná výrobní imperfekce vytisknuté součásti po zchlazení a odebrání z podložky.

Seznam doporučené literatury:

SCHOINOCHORITIS, Babis, Dimitrios CHANTZIS a Konstantinos SALONITIS. Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2016, 231(1), 96-117. DOI: 10.1177/0954405414567522. ISSN 0954-4054. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405414567522>

DUPAIX, Rebecca B. Temperature and Rate Dependent Finite Strain Behavior of Poly(ethylene terephthalate) and Poly(ethylene terephthalate)- glycol above the Glass Transition Temperature. Massachusetts, 2003. Disertace. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering. Vedoucí práce Mary C. Boyce.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výpočtovým modelováním procesu 3D tisku prováděného metodou FDM z materiálu PETG pomocí metody konečných prvků. V její rešeršní části je obsažen stručný popis možností modelování procesu 3D tisku metodou konečných prvků a jsou shrnuty základní mechanické vlastnosti termoplastů. V praktické části jsou vyhodnoceny tahové zkoušky vzorků tištěných z materiálu PETG. Dále je zde provedena citlivostní analýza rozličných vlivů na vertikální imperfekci tištěné součásti Idler a její konstrukční úprava, která je založena na výsledcích této analýzy.

Summary

Master's thesis deals with computational modeling of 3D printing process done by FDM method made from PETG material using finite element method. Research section contains a brief description of 3D printing process modeling possibilities using finite element method and summarizes fundamental mechanical properties of thermoplastics. In practical section there is an evaluation of specimens printed of PETG material tensile tests. Further there is performed a sensitivity analysis of various influences on vertical imperfection of printed part Idler and is done its design modification, which is based on results of this analysis.

Klíčová slova

3D tisk, aditivní výroba, MKP, výpočtové modelování, ANSYS, PETG, citlivostní analýza

Keywords

3D printing, additive manufacturing, FEM, computational modeling, ANSYS, PETG, sensitivity analysis

MICHÁLEK, M. *Výpočtové modelování procesu 3D tisku součástí z PET-G materiálu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 58 s. Vedoucí Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Vosynka, Ph.D. s využitím odborné literatury, pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů a konzultací s firmou SVS FEM s.r.o.

Bc. Mojmír Cyril Michálek

Rád bych vyjádřil dík vedoucímu této diplomové práce Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D. za pomoc v průběhu jejího psaní a konstruktivní kritiku. Děkuji také firmě SVS FEM s.r.o., která téma diplomové práce nabídla a poskytla vlastní know-how a výpočetní zdroje k provedení časově náročných výpočtů. Dále děkuji firmě Prusa Research s.r.o. za možnost spolupráce a zapůjčení 3D tiskárny. Tato práce by nemohla být zdárně dokončena nebýt ochoty ÚMTMB, jmenovitě doc. Ing. Tomáše Návrata, Ph.D. a Ing. Petra Vosynka, Ph.D., kteří zajistili experimentální měření. Vskutku velký dík patří i Ing. Zdeňku Čadovi, Ph.D., který přinášel nové podněty a mnohými radami pomohl při řešení nastalých problémů. Dále děkuji Bc. Kryštofu Mrázovi za poskytnutí podkladů pro rešeršní část a své manželce za bohaté zásobení výbornou a výživnou stravou nejen po čas psaní této závěrečné práce.

Bc. Mojmír Cyril Michálek

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Analýza problémové situace	2
1.2	Formulace problému a způsob řešení	2
2	Rešeršní část	3
2.1	FDM metoda 3D tisku	3
2.2	Způsoby modelování 3D tisku	4
2.2.1	Metody řešení diferenciální pohybové/teplotní rovnice	4
2.2.2	Silně a slabě sdružená teplotní úloha	4
2.2.3	ANSYS způsob modelování	5
2.2.4	Element Birth and Death	12
2.3	Vlastnosti termoplastů	12
2.3.1	Přechodové teploty polymerů	13
2.3.2	Směrová závislost mechanických vlastností	13
3	Praktická část	16
3.1	Způsob měření vertikální deformace	17
3.2	Výběr modelu materiálu	17
3.3	Materiálové informace	18
3.4	Experimenty	19
3.4.1	Tahové zkoušky materiálu PETG	19
3.4.2	Měření soudržnosti mezi tisknutým vzorkem a podložkou	27
3.4.3	Měření teplotního pole součásti Idler	27
3.4.4	Další dílčí experimenty	28
3.5	Vytváření geometrie	28
3.6	Vytváření konečněprvkové sítě	28
3.6.1	Vliv výšky vrstvy na výslednou deformaci	28
3.6.2	Sít podstavy součásti	29
3.7	Teplotní analýza	30
3.7.1	Teplotní okrajové podmínky	30
3.7.2	Modelování teplotního pole	30
3.8	Strukturální analýza	36
3.8.1	Obecná nastavení strukturální analýzy	36
3.8.2	Simulace měření výchylky - kontaktní úloha	37
3.9	Citlivostní analýza	38
3.9.1	Systém podstatných veličin	39
3.9.2	Výběr faktorů ke zkoumání	41
3.9.3	Zkoumání vybraných faktorů	42
4	Závěr	55
4.1	Shrnutí výsledků citlivostní analýzy	55

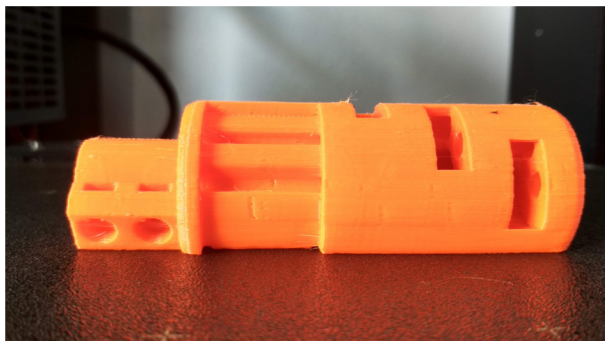
1. Úvod

1.1. Analýza problémové situace

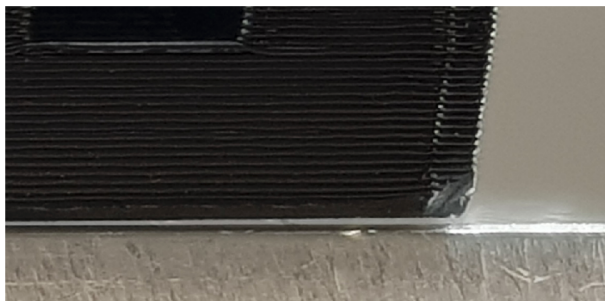
Kontext této diplomové práce je ukotven ve snaze pomoci firmě Prusa Research s.r.o. v řešení problému vysoké zmetkovitosti při tisku konkrétní součásti technologií Fused Deposition Melting (FDM). Tato součást se nazývá Idler (obr. 1.1) a pro její tisk je použit materiál polyethylentereftalát-glykol (PETG). Příčinou zmetkovitosti je deformace součásti po výtisku, ochlazení a odebrání z podložky (tzv. výrobní imperfekce), která vzniká v důsledku tepelné roztažnosti výrobního materiálu. Konkrétně je problematická vertikální výrobní imperfekce podstavy součásti (obr. 1.2), která je příčinou nedodržení podmínky rovinnosti, jež má toleranci 0.1 mm.

1.2. Formulace problému a způsob řešení

Problém, který bude řešen, je velikost výrobní geometrické imperfekce součásti Idler, která je měřena jako odchylka od rovinnosti podstavy. Tento problém bude řešen s pomocí výpočtového modelování metodou konečných prvků, k němuž bude využit software společnosti ANSYS. Tento software byl zvolen z důvodu, že obsahuje potřebné nástroje, a také na doporučení firmy SVS FEM. Bude provedena citlivostní analýza vlivů na výslednou maximální vertikální deformaci podstavy součásti. K jejímu provedení bude nutno provést experiment, na jehož základě bude zvolen model materiálu a určeny jeho parametry. Dále bude provedena konstrukční úprava, která může vést ke snížení výrobní zmetkovitosti.



Obrázek 1.1: Idler



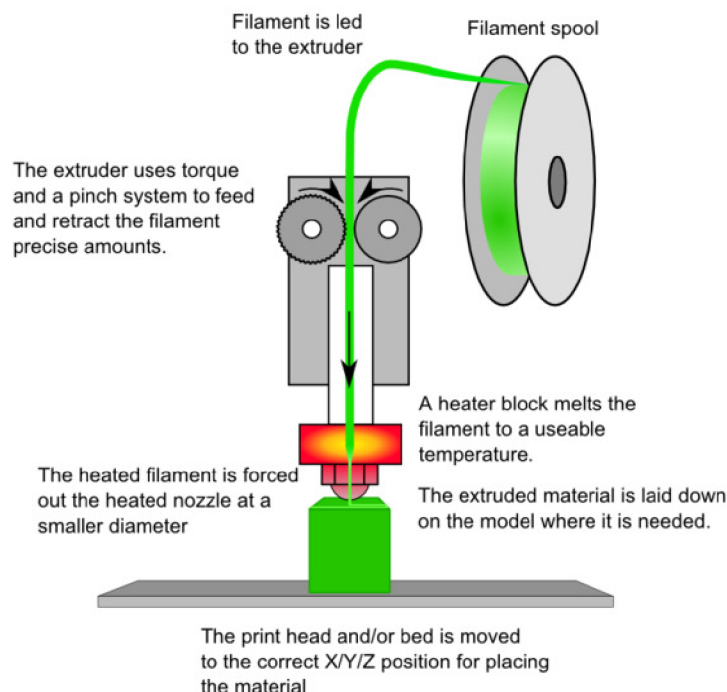
Obrázek 1.2: Ukázka vertikální výchylky součásti Idler

2. Rešeršní část

2.1. FDM metoda 3D tisku

3D tisk je podmnožinou pojmu aditivní výroba, jenž zahrnuje mnoho metod výroby. Pro všechny aditivní metody je však společné to, že na rozdíl od subtraktivních výrobních metod, jako je obrábění apod., které k výrobě konečného produktu dospívají odebráním materiálu ze základního materiálu, aditivní metody využívají postupné přidávání materiálu. Do aditivních metod patří mimo 3D tisk například odlévání nebo svařování. 3D tisk se však vyznačuje postupným kontrolovaným přidáváním vrstev materiálu. Jednotlivé metody 3D tisku se odlišují technologiemi a způsoby, jaké jsou pro přidávání vrstev materiálu použity. Pro různé účely a materiály jsou vhodné různé metody. Tato práce se bude zabývat metodou FDM (Fused Deposit Melting), která je v dnešní době nejlevnější, a proto také nejrozšířenější způsobem tisku. [1]

Metoda FDM je založena na principu pokládání roztaveného materiálu po vrstvách tryskou, do které je vtačován většinou termoplast, avšak zdaleka se nejedná o jediný použitelný materiál. V našem případě se bude jednat o materiál PETG, tedy polyetylen-tereftalát-glykol (více o materiálu v sekci 2.3). Nejčastěji je materiál do tiskárny vtačován ve formě filamentu - vlákno kruhového průřezu namotané na cívku. Rozměry tohoto vlákna mohou být různé. Průměr používaný v našem případě má velikost 1.75 mm, použitý model tiskárny je Prusa i3 MK3S. Filament je pomocí vtačovacího mechanismu vtačován do prostoru pro ohřev, ve kterém je roztaven na požadovanou teplotu a vytlačěn dál do trysky. Schéma této metody je možno vidět na obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Schéma FDM hlavy pro tisk [2]

2.2. ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ 3D TISKU

Řízení pohybu tiskové hlavy v osách X, Z a pohyb podložky v ose Y zajišťují krokové motory a společně s ohřevem trysky a podložky jsou tyto úkony v čase řízeny pomocí vstupního souboru G-code, který je třeba generovat pro každý tisk. Soubor je v našem případě generován programem PrusaSlicer a pro jeho vygenerování je nutná geometrie ve formátu STL a základní parametry nastavení tisku. Tento princip je zděděn ze starší výrobní technologie CNC obrábění.

2.2. Způsoby modelování 3D tisku

V oblasti výpočtového modelování metodou konečných prvků existuje několik způsobů, jakými lze proces 3D tisku modelovat.

2.2.1. Metody řešení diferenciální pohybové/teplotní rovnice

2.2.1.1. Explicitní metoda

Explicitní způsob modelování 3D tisku vychází z explicitní formulace, kde počítaný následující časový krok je funkcí pouze předchozího časového kroku. Jeho výhodou je schopnost poradit si s velkými nelinearitami a schopnost řešit velmi rychle jednotlivé iterace. Nicméně při modelování pomalého děje jako je 3D tisk se projeví spíše jeho základní nevýhoda a tou je podmíněnost stability výpočtu, která je dána délkou časového kroku. Ten musí být kratší než čas, za který tlaková vlna šířící se rychlostí zvuku daného prostředí projde jedním (nejmenším) elementem. Z tohoto důvodu se celý výpočet razantně prodlouží, pakliže modelujeme časově dlouhý děj. [3]

2.2.1.2. Implicitní metoda

Implicitní metoda je oproti explicitní metodě nepodmíněně stabilní, a tak mohou být při výpočtu použity delší časové kroky, jelikož stabilita úlohy není ovlivněna délkou časového kroku. V její formulaci je stav v následujícím časovém kroku vyjádřen implicitně, tedy je vyjádřen jak pomocí předchozího, tak aktuálního časového kroku. Výpočet jednoho časového kroku tak trvá podstatně déle než u explicitní metody. Další nevýhodou jsou potíže v okamžiku, kdy dochází k velkým nelinearitám. I přes tyto nevýhody je pro simulaci 3D tisku implicitní metoda vhodnější, protože se jedná o děj většinou velmi dlouhý (v řádu hodin), byť při podrobně vytvořeném modelu velmi nelineární.

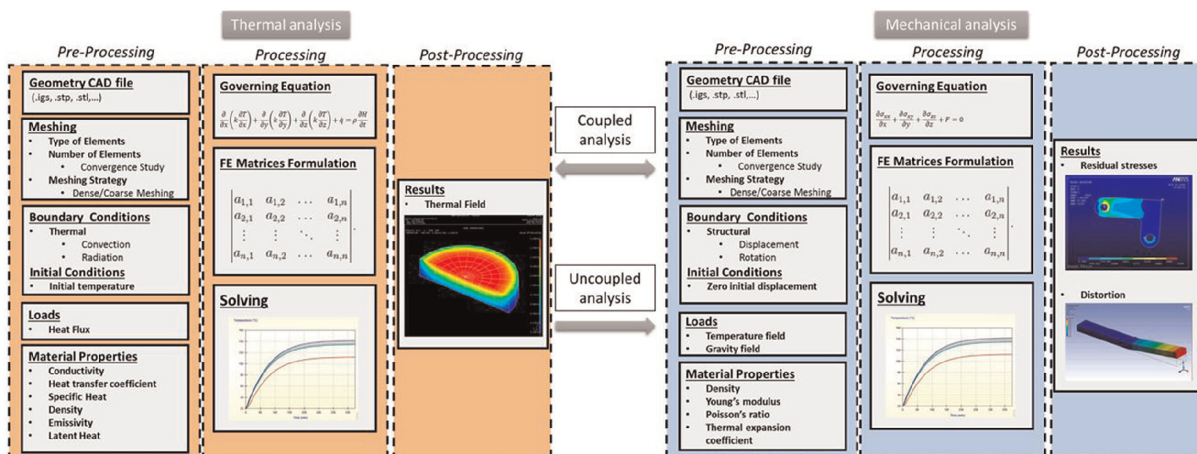
2.2.2. Silně a slabě sdružená teplotní úloha

2.2.2.1. Silně sdružená úloha

Tento typ úlohy se vyznačuje tím, že teplotní i strukturální úloha probíhají současně. Deformace simulované součásti tedy může zpětně ovlivnit teplotní úlohu - vzájemně se ovlivňují. V softwaru ANSYS Mechanical APDL lze tuto silně sdruženou analýzu provádět pomocí speciálních typů elementů, které mají více stupňů volnosti. V případě teplotně-strukturní sdružené úlohy jsou tyto stupně volnosti celkem 4, 3 posuvy (x, y, z) a teplota. Tento způsob řešení je sice přesnější, ale výpočetní čas se tak značně prodlužuje.

2.2.2.2. Slabě sdružená úloha

U tohoto typu úlohy nejdříve proběhne celá teplotní úloha a výsledné teplotní zatížení dané teplotní roztažností materiálu je poté přeneseno do strukturální úlohy, která probíhá zvlášť. Deformace způsobená teplotním zatížením z teplotní úlohy tak již nemůže zpětně teplotní úlohu ovlivnit, což sice nemusí odpovídat skutečnosti, ovšem je tak ušetřena spousta výpočetního času. Výsledky je potřeba vyhodnocovat s ohledem na toto zjednodušení. V aplikaci ANSYS Workbench je pro zprostředkování slabé interakce užíván jednosměrný přenos výsledků z jedné úlohy do druhé. Schéma jak silně (coupled), tak slabě (uncoupled) sdružené úlohy můžeme vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Schéma úlohy 3D tisku [3]

2.2.3. ANSYS způsob modelování

ANSYS Additive Manufacturing (dále jen AM) je soubor nástrojů sloužících k simulaci 3D tisku. Jeho součástí je také nástroj Workbench AM Analysis, který je implementován do prostředí Workbench. Toto rozšíření vytváří workflow, které je založeno na výše zmíněné slabě sdružené implicitně řešené úloze. Můžeme zvolit dva postupy, jak úlohu nastavit. První je s použitím ACT Additive Wizard, tedy nástroje usnadňujícího nastavení úlohy, druhý postup je manuální. Následující popis se týká převážně druhé možnosti, a to proto, že dává lépe proniknout do celého procesu simulace 3D tisku a umožňuje tak jeho snazší pochopení, bez kterého může software na první pohled působit velmi netransparentně.

2.2.3.1. Workflow

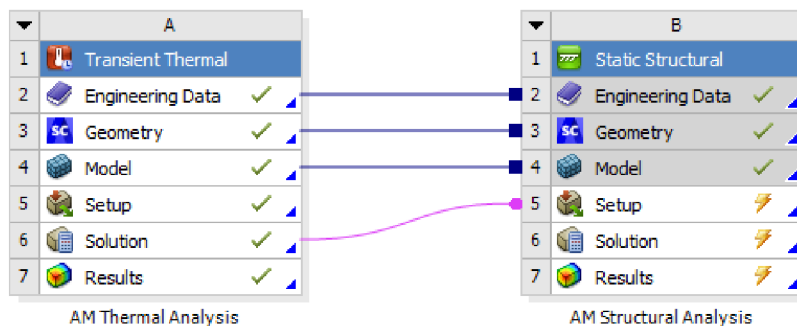
Vytvoření systému úloh

Kliknutím na tlačítko „Additive Manufacturing System“ v prostředí Workbench je vytvořena slabě sdružená teplotně-strukturální úloha (viz. obr. 2.3). Totéž lze provést i manuálně, tedy bez použití tlačítka. [4]

Zadání materiálových parametrů

Proveditelnost výpočtů je podmíněna zadáním potřebných materiálových parametrů.

2.2. ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ 3D TISKU



Obrázek 2.3: Schéma slabě sdružené úlohy vytvořené pomocí Workbench AM

- **nestacionární teplotní úloha**

Je nutné zadat:

- teplotu tavení materiálu
- teplotní vodivost
- hustotu
- měrnou tepelnou kapacitu

Je vhodné tyto parametry zadávat jako teplotně závislé v rozsahu od pokojové teploty po teplotu tání.

- **statická strukturní úloha**

Zde je nutné zadat parametry:

- Youngův modul pružnosti
- Poissonovu konstantu
- koeficient teplotní roztažnosti
- příslušný model plasticity

Opět je vhodné tyto parametry zadávat jako teplotně závislé v rozsahu od pokojové teploty po teplotu tání.

Vložení geometrie

Vložený model geometrie může být rozdělen na pět částí:

- **tisknutá součást**

Součást musí být orientována tak, aby její postupný tisk probíhal v kladném směru osy Z. Může se dotýkat podložky nebo může být celá vyvýšená nad podložku za pomoci podpor.

- **podpory**

Podpory jsou volitelná část geometrie. Podpory i tisknutá součást jsou tisknuty a tvoří tak celek nazvaný stavba (build).

- **podložka pro tisk**

Plocha, na které je tisknuta stavba. Podložka je přítomna z důvodu teplotních a strukturálních okrajových podmínek.

další dvě části jsou nepovinné:

- **geometrie prášku**

Pokud modelujeme metodu tisku, kde je přítomen prášek a zároveň chceme zahrnout jeho ovlivnění vlastní tepelnou vodivostí (typicky uvnitř struktury tisknuté součásti či při vzájemné blízkosti více součástí), můžeme vložit také geometrii prášku se specifikovaným koeficientem tepelné vodivosti.

- **nestavěná geometrie**

Součástí při tisku může být také geometrie, která není součástí stavby, tedy není tisknuta, ale je spolu se stavbou po celou dobu tisku přítomna. Může se jednat o různé svorky, šrouby, měřicí zařízení a podobně.

Jak podpory tak podložka mohou být vytvořeny předem nebo mohou být vygenerovány za pomoci AM Wizard v aplikaci Mechanical.

Pokud mají být přítomny podpory vytvořené předem v CAD softwaru, je nutné sdílet jejich topologii s tisknutou součástí. Toho je možno docílit například v aplikaci Spaceclaim v nastavení Share Topology. Tento krok je důležitý pro správné vytvoření sítě, která musí zaručit, že všechna tisknutá tělesa budou mít stejně vysoké vrstvy.

Přiřazení geometrie

Vloženému modelu geometrie je nutno přiřadit jeho funkci ve výpočetním modelu. Tedy geometrii opor je nutno přiřadit funkci opor, geometrii tisknuté součásti funkci tisknuté součásti apod.

Přiřazení materiálů

Po otevření modelu v aplikaci Mechanical je potřeba přiřadit příslušné materiály k daným geometriím. Celá stavba (build), tedy jak tisknutá součást, tak podpory, musí být z téhož materiálu.

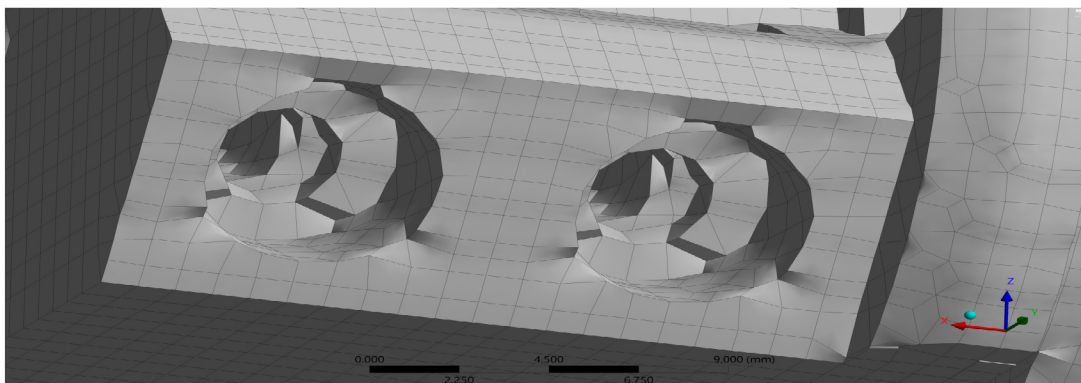
Vytváření sítě konečných prvků

Celá stavba je tisknuta po vrstvách. ANSYS Mechanical pro potřeby výpočtového modelování 3D tisku vyžaduje vrstvenou síť (layered mesh). Výška jednotlivých vrstev musí být shodná. Neočekává se však, že výška vrstvy elementů bude shodná s výškou nanášených vrstev při skutečném tisku. Vrstvy elementů tak reprezentují tzv. „navrstvy“, které mohou být i 10 až 20× vyšší než je skutečná výška vrstev při tisku. Pro vytvoření vrstvené sítě je možno použít dvě metody:

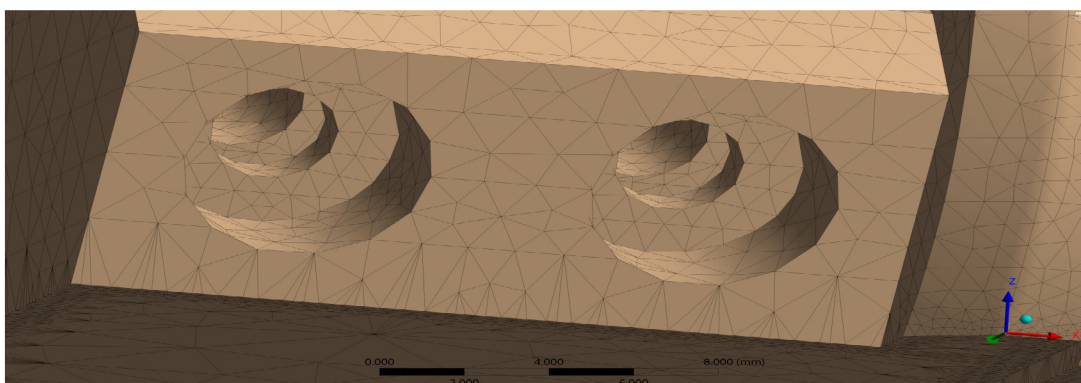
- **cartesian mesh**

Vytváří vrstvenou hexaedrickou síť, která však jen hrubě kopíruje geometrii a při potřebě postihnout geometrické detaily se jeví jako nevyhovující (viz. obr. 2.4 (a)).

2.2. ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ 3D TISKU



(a) cartesian



(b) layered tetrahedrons

Obrázek 2.4: Porovnání síťovacích metod

Velmi vhodná je však pro síťování jednoduchých geometrií. Nabízí možnost nastavení tzv. projekčního faktoru, který nabývá hodnot 0 až 1 a ovlivňuje možnost naklápění stěn prvku pro lepší kopírování geometrie. Pokud je hodnota faktoru 0, bude geometrie síťována dokonalými krychlemi, v jiných případech to budou obecné hexaedry s rovnoběžnou horní a spodní stranou.

- **layered tetrahedrons**

Vytváří vrstvenou tetraedrickou síť. Tato metoda zvládá síťovat dobře i detaily, a to tak, že v jejich místě se síť zjemní aniž by byla porušena výška vrstvy (viz. obr. 2.4 (b)). Nevýhoda této metody vyplývá z nevýhody tetraedrických prvků, tedy jejich tužší chování, a proto nutnosti použití kvadratické bázové funkce, čímž vzrůstá objemnost celé úlohy.

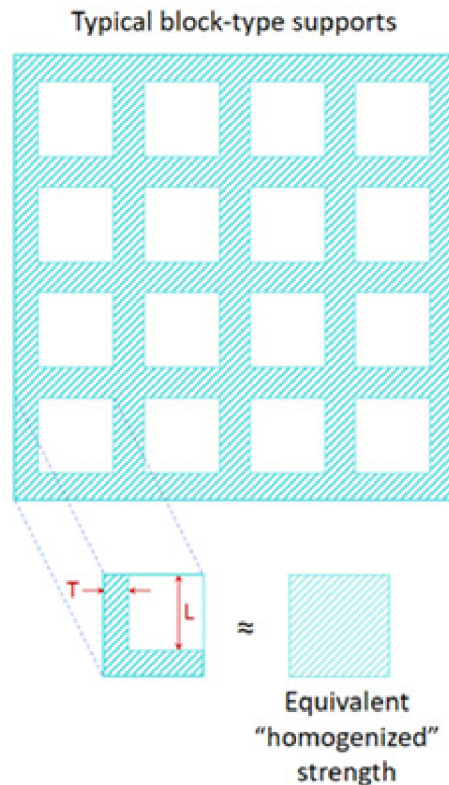
Vrstvenou síť lze vytvořit i manuálně, jen je potřeba zachovat konstantní výšku vrstev, která musí být dodržena velmi přesně. Tento způsob však může být časově velmi náročný a při potřebě síť změnit musíme celý manuální proces opakovat.

Síť podložky pro tisk může být podstatně hrubší než síť stavby.

Homogenizace podpor

Pokud mají podpory nějakou vnitřní strukturu, může být komplikované a zbytečně časově náročné ji modelovat a simulovat ve své skutečné podobě. Proto můžeme detaily vnitřní struktury úplně zanedbat a modelovat je jako plné (obr. 2.5). Poté však musíme

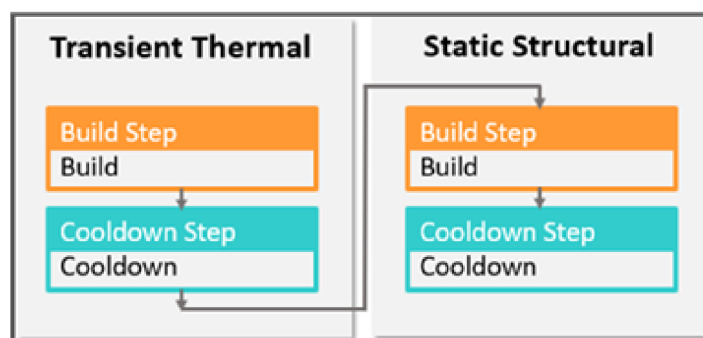
specifikovat tzv. „multiplication factor“, který je poměrem skutečné plochy průřezu podpor ku homogenizované ploše průřezu podpor. Tím zachováme jejich podobnou tuhost.



Obrázek 2.5: Názorná ukázka homogenizace [4]

Procesní kroky

V simulaci je dáno základní pořadí procesních kroků, které vychází ze způsobu simulace (viz. obr. 2.6).



Obrázek 2.6: Základní sekvence procesních kroků [4]

Dále je však možné přidat další kroky a tím úlohu přizpůsobit vlastním potřebám. Těmito kroky jsou:

- odebrání podložky pro tisk
- odebrání podpor

2.2. ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ 3D TISKU

- tepelné zpracování
- uživatelem definovaný krok

Uživatelem definovaný krok může zahrnovat libovolné zatížení a zahrnuje i řešení. Typicky se může jednat o předepnutí.

Zadání parametrů tisku

- **parametry tisku dány nastavením tiskárny**
 - výška vrstvy
 - šířka stopy
 - rychlost pohybu trysky (rychlost tisku)
 - délka prodlevy mezi vrstvami
 - multiplikátor prodlevy mezi vrstvami (při simulaci tisku více totožných součástí)
 - počet tepelných zdrojů (některé tiskárny mají více laserů/trysek, které tisknou současně)
- **nastavitelné podmínky okolí při tisku**
 - teplota přehřátí podložky
 - teplota přehřátí komory, resp. teplota okolí (možno zadat teplotu prášku i teplotu vzduchu, tedy teplotu po stranách součásti i teplotu nad aktuálně nejvyšší vrstvou tisknuté součásti)
 - koeficient konvekce okolního vzduchu/prášku (koeficient konvekce prášku se vypočte z jeho koeficientu kondukce vydělením charakteristickou délkou kondukce)
- **nastavitelné podmínky okolí při ochlazování jsou**
 - teplota okolí
 - koeficient konvekce okolního vzduchu/prášku

Teplotní analýza

- **nastavení analýzy**

Nastavení analýzy je většinou kontrolováno programem, ale je možno nastavit počet nanesených vrstev, pokud nechceme simulovat tisk celé součásti, ale jen její část. Délka časového kroku v teplotní úloze je kontrolována automaticky a nelze do ní zasáhnout jinak než úpravou počtu časových kroků mezi nanášenými vrstvami.

Pro zabránění vzniku velmi velkých výsledkových souborů je ve výchozím nastavení vypnuto ukládání tepelného toku, sil v uzlech, Eulerových úhlů, energií a výsledků označených jako „miscellaneous“.

- **okrajové podmínky**

Přestože již byly nastaveny koeficienty konvekce pro volné povrchy tisknuté součásti, nebyla zatím zahrnuta okrajová podmínka přenosu tepla z podložky pro tisk do součásti. Zde je možno nastavit jak teplotu podložky při tisku, tak teplotu podložky při ochlazování. Pokud chceme, aby byl průběh jejího ochlazování pozvolný, můžeme místo teploty předepsat okrajovou podmínku konvekce. Tyto okrajové podmínky již nastavujeme klasicky, tedy bez použití nástroje Additive Manufacturing, jako tomu bylo při nastavování konvekce pro volné povrchy.

- **výpočet teplotní analýzy**

Dalším krokem je výpočet teplotní analýzy, který bude dále vstupem do následující strukturní analýzy.

Strukturní analýza

- **nastavení analýzy**

Také ve strukturní analýze je většina nastavení kontrolována programem. Je však možno nastavit referenční teplotu, která je nutná pro výpočet teplotních přetvoření. Tato teplota by měla být určena dle stavu, ve kterém v materiálu teplotní přetvoření nejsou. Předpokládá se tedy, že referenční teplota je shodná s teplotou tání nastavenou v modelu materiálu a takto je také určena ve výchozím nastavení automaticky.

Stejně jako v teplotní analýze je i zde možno omezit počet vrstev, které budou v simulaci tisknuty. Ze zřejmých důvodů nesmí být toto číslo vyšší než simulovaný počet vrstev v předcházející teplotní analýze.

A opět rovněž jako v teplotní analýze je i zde doporučeno omezit veličiny ukládané do výsledkových souborů, jejichž velikost velmi narůstá. Pokud je pro vyhodnocení potřeba jen výsledků deformace, je možno vypnout ukládání napětí.

- **okrajové podmínky**

Do úlohy je aplikováno teplotní zatížení z teplotní analýzy pomocí jednostranného přenosu dat. Dále je možno aplikovat další okrajové podmínky, jako je vetknutí spodní strany podložky pro tisk. Tato okrajová podmínka však není jediná možná, jak je možno vidět v sekci 3.9.3.3.

V případě zahrnutí simulace odebrání součásti z podložky pro tisk je nutno zadat okrajovou podmínku, která se bude aplikovat na tisknutou součást po odebrání podložky, aby nedošlo k pohybu součásti jako celku. Pro tento účel je nutno odebrat alespoň 6 stupňů volnosti. Aby bylo zabráněno pohybu součásti jako celku a zároveň nebylo nijak bráněno v její deformaci vlivem vnitřních pnutí, vybere se jeden uzel, kterému jsou odebrány všechny 3 stupně volnosti (x, y, z), druhý uzel, kterému se odeberou 2 stupně volnosti (y, z) a třetí uzel, kterému již stačí odebrat jen jeden stupeň volnosti (z), celkem tedy 6 stupňů volnosti. Této okrajové podmínky docílíme vytvořením „Named Selections“ s příslušnými uzly a vložením příkazu v jazyce APDL, který požadované stupně volnosti v kýženém zátěžovém kroku odebere. Podrobnější popis je možno nalézt v manuálu softwaru ANSYS Mechanical. [4]

- **výpočet strukturní analýzy**

Následuje výpočet strukturní analýzy.

2.3. VLASTNOSTI TERMOPLASTŮ

2.2.4. Element Birth and Death

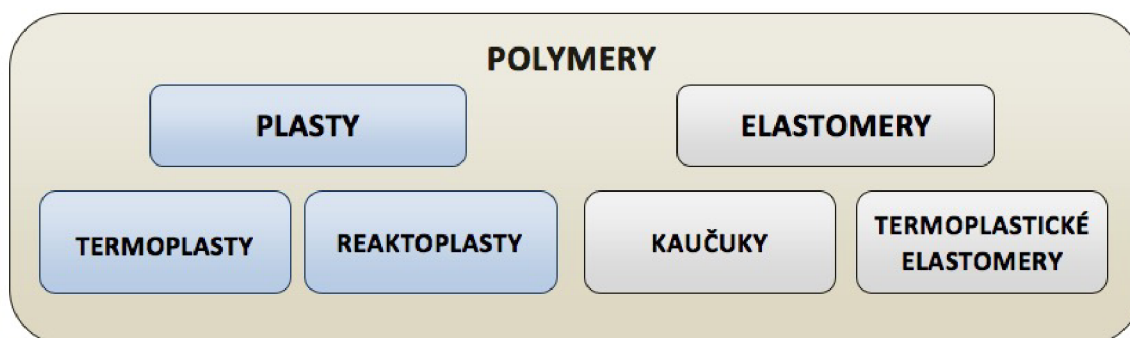
Element Birth and Death je funkce, kterou umožňuje ANSYS Mechanical, a která způsobuje „oživení/umrtvení“ vybraných elementů, tedy vynulování matice tuhosti. V praxi nejde o úplné vynulování matice tuhosti, ale o její vynásobení koeficientem o velmi malé hodnotě. Tento koeficient má výchozí hodnotu 10^{-6} , přičemž tuto hodnotu lze manuálně upravit.[5]

V jazyce APDL je tato funkce pod příkazem EALIVE (oživení) a EKILL (umrtvení). Nastavení koeficientu, kterým je násobena tuhost umrtvených elementů, je pod příkazem ESTIF. Používáním oživení a umrtvení prvku není ovlivňována jen matice tuhosti v případě strukturní úlohy, ale i matici vodivosti u teplotní úlohy. Umrtvené elementy nijak nepřispívají svou hmotností do globální matice hmotnosti. V teplotní úloze mají analogicky nulovou tepelnou kapacitu, a tedy nijak nepřispívají do globální matice tepelné kapacity. Umrtvené elementy nemohou nijak přispívat ani do vektoru zatížení, a tedy na ně nemají žádný vliv objemové síly (gravitace), tlaky, konvekce nebo jiné účinky. Také veškeré výsledné veličiny, jako jsou napětí, přetvoření, plastická přetvoření atd., jsou u těchto elementů automaticky nastaveny jako nulové.

V ANSYS Additive Suite je používána právě metoda Element Birth and Death pro nánášení vrstev. Všechny elementy jsou tedy po celou dobu výpočtu přítomny, ale v počátku v umrtveném stavu, a poté se postupně vrstvu po vrstvě oživují.

2.3. Vlastnosti termoplastů

Termoplasty jsou skupina polymerů (obr. 2.7), která při procesu zahřívání přechází do plastického stavu (měknutí termoplastu) a při svém ochlazení se vrací zpět do původního stavu - proces měknutí i tuhnutí je vratný. [6] Tato vlastnost je způsobena tím, že při jejich zahřívání ani při jejich zpracování neprobíhají žádné chemické reakce, a proto mají změny jejich vlastností, na rozdíl od reaktoplastů, pouze fyzikální charakter. Nejpopulárnějšími termoplasty v oblasti 3D tisku jsou akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polylaktidová vlákna (PLA) či polyethylentereftalát-glykol (PETG), což je glykol modifikace dobře známého materiálu polyethylentereftalát (PET). Firma Prusa používá pro tisk součástí své tiskárny právě materiál PETG, a proto se budeme dále zabývat především tímto materiálem.

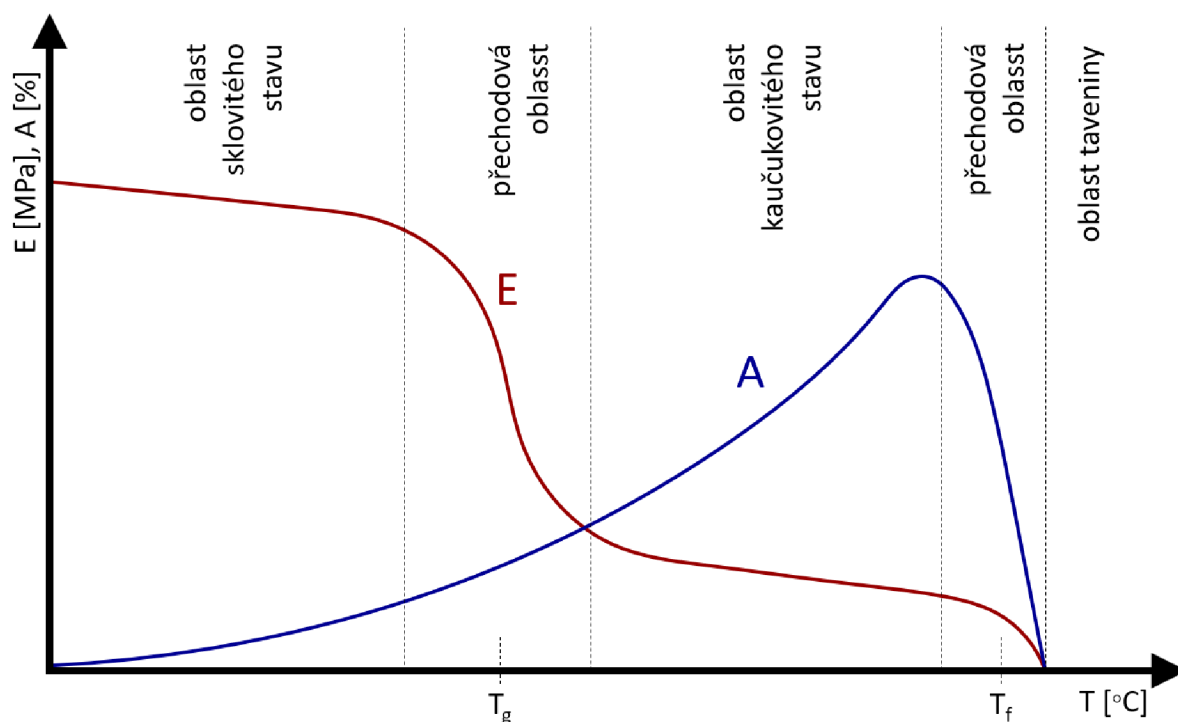


Obrázek 2.7: Rozdělení polymerů [6]

2.3.1. Přechodové teploty polymerů

Pro polymery obecně je typické, že se mohou nacházet ve třech stavech - ve stavu sklovitém, kaučukovitém nebo kapalném. Stav plynný se u nich nevyskytuje, jelikož velikost makromolekul má za důsledek teploty varu vždy vyšší než je teplota rozkladu termoplastu. [6]

Pro amorfní termoplasty, mezi které se řadí i materiál PETG, jsou z hlediska teplotní závislosti typické dvě přechodové oblasti (viz. obr. 2.8). [7] První přechodová oblast se vyskytuje mezi oblastí sklovitého a kaučukovitého stavu a je charakterizována teplotou skelného přechodu (T_g). Druhá oblast se vyskytuje mezi oblastí kaučukovitého stavu a oblastí taveniny a je charakterizována teplotou viskózního toku (T_f). Jak možno vidět na obr. 2.8, z pohledu ztráty mechanických vlastností je pro amorfní termoplasty nejvýznamnější teplota skelného přechodu, při které prudce poklesne nejen modul pružnosti, ale také mez kluzu a mez pevnosti. Tento jev nastává z důvodu poklesu mezimolekulárních sil, čímž se zvýší pohyblivost segmentů makromolekul. Nad teplotou viskózního toku se makromolekuly mohou pohybovat i vůči sobě navzájem a materiál se stává velmi viskózní kapalinou. Nad tuto teplotu je potřeba zahřát materiál filamentu 3D tiskárny, aby mohl být vytlačován tryskou. Obecně se je nutno nad tuto teplotu zahřát termoplasty určené pro technologii vstřikování.



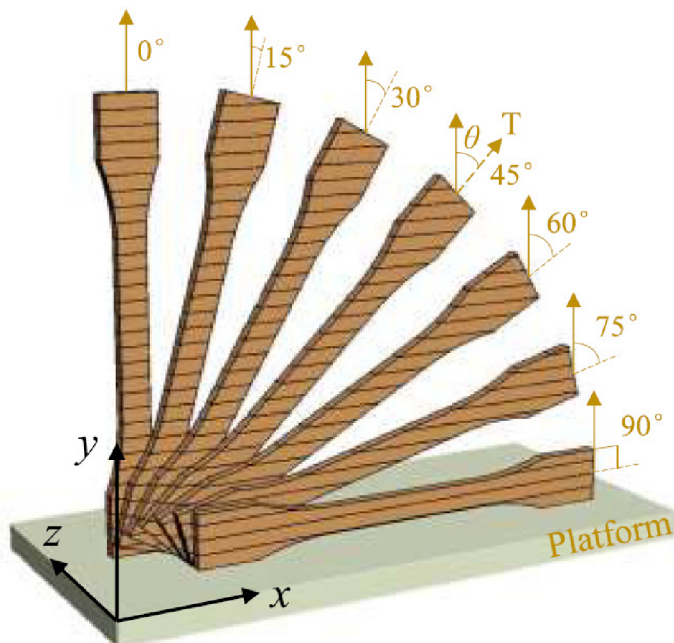
Obrázek 2.8: Přechodové teploty amorfních termoplastů, E... modul pružnosti, A... celková tažnost, převzato z [6] a upraveno

2.3.2. Směrová závislost mechanických vlastností

Součásti tisknuté 3D tiskárnou vykazují směrovou závislost mechanických vlastností. Tato směrová závislost vyplývá z vrstvení nanášeného materiálu. Ve studiích zabývajících se směrovou závislostí tisknutých součástí se typicky vychází z předpokladu transversálně

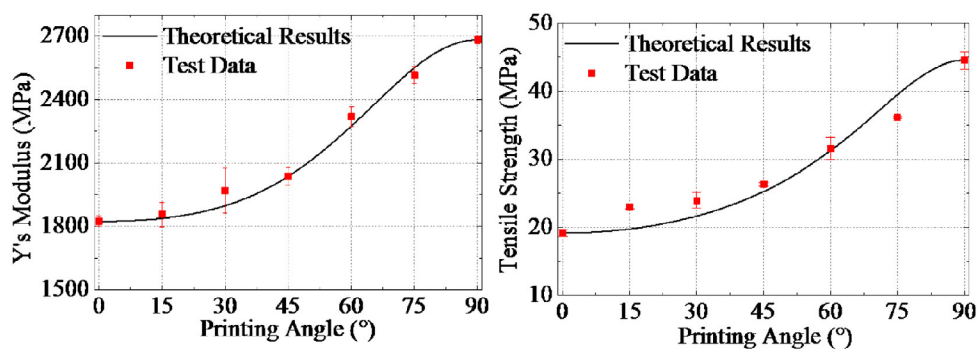
2.3. VLASTNOSTI TERMOPLASTŮ

izotropního modelu materiálu, tedy modelu předpokládajícího stejné materiálové vlastnosti v rovině rovnoběžné s rovinou tisku, ale různé ve směru kolmém na tuto rovinu. Studie [8] z tohoto předpokladu vychází také a na základě silového kritéria Tsai-Hill se snaží se analyticky popsat závislost Youngova modulu pružnosti v tahu a meze pevnosti v tahu v závislosti na směru vrstev (obr. 2.9). Experimentální část této studie je postavena na tahových zkouškách vzorků tištěných z PLA materiálu pomocí metody FDM.



Obrázek 2.9: Ukázka směrů tištěných vzorků [8]

Ze studie vyplývá, že Youngův modul pružnosti v tahu je ve směru kolmém na rovinu vrstev maximálně o 32 % nižší než ve směru rovnoběžném s rovinou vrstev, zatímco mez pevnosti v tahu je ve směru kolmém na rovinu vrstev nižší až o 57 % než ve směru rovnoběžném s rovinou vrstev (obr. 2.10).



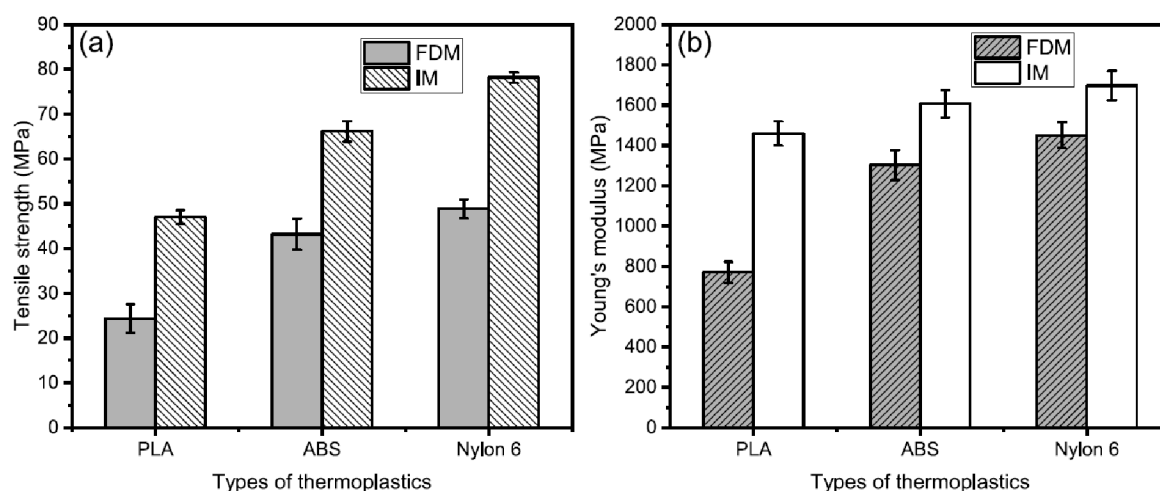
(a) Youngův modul pružnosti v tahu v závislosti na úhlu tisku

(b) Mez pevnosti v tahu v závislosti na úhlu tisku

Obrázek 2.10: Ukázka směrové závislosti mechanických vlastností vzorků z materiálu PLA[8]

Pro různé materiály a parametry tisku, jako je výška vrstvy, tvar výplně, šířka stopy atd. jsou tyto závislosti jiné. Například pro materiál polykarbonát (PC) se dle studie [9] zdají být méně výrazné.

Zajímavé je také srovnání mechanických vlastností vzorků vyrobených vstřikováním plastů a vzorků tištěných metodou FDM. Studie [10] tyto rozdíly zkoumala u vzorků z materiálů PLA, ABS a nylon 6. Zkoumány byly nejen Youngův modul pružnosti a mez pevnosti, ale také viskozita, hustota, absorpce vody, krystalinita a rázová houževnatost. Důležité zjištění, co se týče modulu pružnosti a meze pevnosti, je, že vzorky vyrobené metodou FDM vykazovaly hodnoty těchto mechanických vlastností o cca 50 % nižší než vzorky vyrobené vstřikováním (podrobněji na obr. 2.11). Vzorky vyrobené metodou FDM byly tištěny naležato.



Obrázek 2.11: Porovnání (a) meze pevnosti v tahu a (b) Youngova modulu pružnosti v tahu v závislosti na použité metodě výroby vzorků [10]

3. Praktická část

Společnost SVS FEM a Prusa se domluvili na vzájemné spolupráci a na jejím základě bylo vypsáno téma této práce, která řeší problematiku zmetkovitosti tisknutých součástí, se kterou firma Prusa potýká. Vedení této diplomové práce je pod firmou SVS FEM.

Informace, které nám byly poskytnuty firmou Prusa, jsou tyto:

- geometrie problematické součásti Idler (viz. obrázek 1.1) ve formátu STL
- použitý materiál je PETG
- zmetkovitost je po výtisku přibližně 20 %
- G-code (viz. 2.1), který Prusa používá pro tisk součásti Idler
- součást je tisknuta na tiskárnách Prusa i3 MK3S
- počet paralelně tisknutých součástí: 4 kusy
- doba tisku: 8.5 hodin
- zmetkovitost této součásti je posuzována dle 3.1
- rozložení teplotního pole v průběhu tisku ve formě snímků z termokamery, více v oddílu 3.7.2.2

Informace, které pro komplexní analýzu chyběly, jsou:

- informace o materiálu (některé výrazně teplotně závislé):
 - hustota
 - měrná tepelná kapacita
 - teplotní roztažnost
 - Youngův modul pružnosti
 - mez kluzu
 - tečný modul pružnosti
 - Poissonův poměr
 - teplota skelného přechodu
- podrobnější statistické informace o výtiscích (např. hustota pravděpodobnosti/histogram maximální vertikální deformace podstavy vytisknuté součásti, vliv okolní teploty, vliv pozice součásti na podložce, atd.)

Tyto chybějící informace bylo v případě materiálových charakteristik potřeba získat, aby bylo možné provést potřebné analýzy. O získávání materiálových informací více v části 3.3. Ostatní chybějící informace nebyly pro dokončení závěrečné práce nezbytně nutné, a proto byly oželeny. Důvodem je fakt, že ke sběru těchto informací by bylo nutné změnit způsob, jakým firma Prusa tyto informace o úspěšnosti/neúspěšnosti tisku zpracovává, což není v kompetenci této práce.

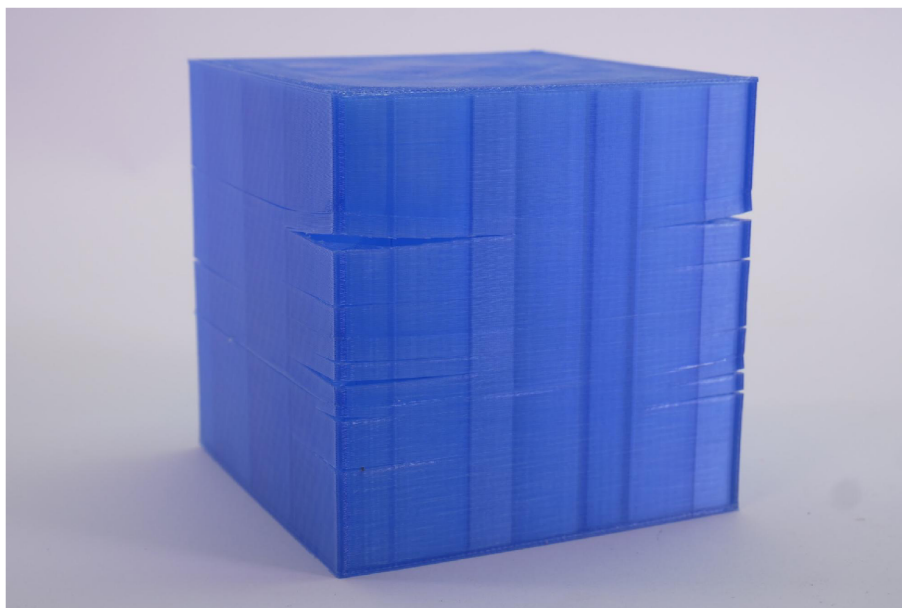
3.1. Způsob měření vertikální deformace

Pro další analýzu je důležité znát způsob, jakým je měřena vertikální výrobní imperfekce podstavy součásti Idler při zjišťování, zda byla splněna podmínka rovinnosti, která je u ní požadována. Měření probíhá takto:

- vytisknutá součást je po ochlazení na pokojovou teplotu odebrána z tiskové podložky
- součást je ve svém středu shora přitisknuta prstem k rovné podložce
- listovou měrkou o tloušťce 0.1 mm je proveden pokus o to, zda projde pod spodní hranou součásti na jejích obou stranách (v podélném smyslu)
- pokud měrka projde alespoň na jedné straně, součást je zmetek

3.2. Výběr modelu materiálu

Z pohledu co nejněpravděpodobnějšího modelování reality by byl pravděpodobně vhodný teplotně závislý transversálně izotropní elasto-viskoplastický model materiálu. Nicméně proto, že takovýto materiálový model by vyžadoval velké množství komplikovaně proveditelných experimentálních zkoušek a zároveň by se nelinearita celé úlohy razantně zvýšila, bylo upuštěno od směrové závislosti modelu materiálu a jeho viskózní části.

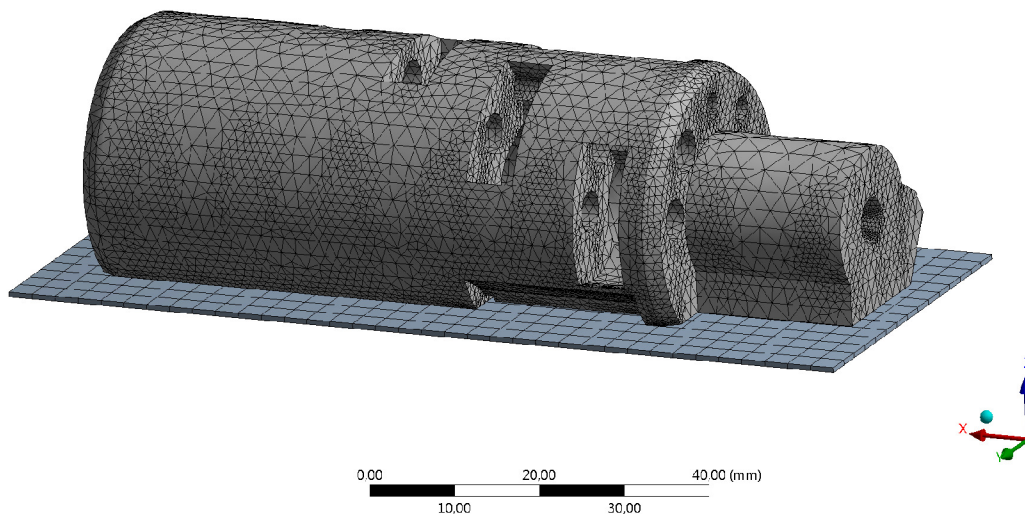


Obrázek 3.1: Ukázka špatné soudržnosti vrstev (delaminace), převzato z [11]

Izotropní předpoklad byl založen na myšlence, že případná anizotropie by se týkala spíše soudržnosti (adheze) nanesených vrstev (obr. 3.1), tedy meze pevnosti ve směru vertikální osy Z (viz. obrázek 3.2), přičemž překročení tohoto mezního stavu v našem případě nenastává a není ho tedy potřeba zahrnovat do našeho modelu. Tento předpoklad byl potvrzen ve studii [8], kde se sice projevila i směrová závislost Youngova modulu pružnosti v tahu, ale v porovnání se směrovou závislostí meze pevnosti podstatně nižší.

Zanedbání viskózního tečení materiálu při vysokých teplotách (okolo 265 °C - teplota nanášeného materiálu), kdy se materiál nachází ve stavu taveniny, bylo opodstatněno na

3.3. MATERIÁLOVÉ INFORMACE



Obrázek 3.2: Orientace konečněprvkové sítě modelu geometrie součásti Idler v prostoru

základě skutečnosti, že množství nanášeného materiálu tryskou je příliš malé, než aby docházelo výraznému roztékání do stran vlivem tíhového zrychlení Země. Diskutabilní by mohlo být viskózní tečení při teplotách výrazně nižších, než je teplota nanášeného materiálu, avšak stále nad teplotou skelného přechodu, tedy ve stavu kaučukovitém. Nad touto teplotou se může nacházet velká oblast tisknuté součásti po poměrně dlouhou dobu a k viskóznímu tečení způsobenému teplotně indukovaným deformačním zatížením (nikoliv však tíhovým zrychlením) tak rozhodně dochází. Nicméně proto, že se jedná o deformační zatížení visko-elastoplastického materiálu, bude v čase nekonečno (v praxi stačí několik sekund) viskózní složka deformace rovna deformačnímu zatížení. Proto můžeme visko-elastoplastický model nahradit bilineárním elasto-plastickým modelem s velmi nízkou hodnotou meze kluzu a tečného modulu pružnosti. Nebudeme tak sice znát časový průběh těchto deformací, ale budeme znát hodnoty jim blízké v čase nekonečno. Na základě předchozích úvah byl tedy vybrán bilineární izotropní elasto-plastický model materiálu.

3.3. Materiálové informace

Řada materiálových informací potřebných jako vstupní parametry do výpočtů byla dohledatelná z internetových zdrojů, nicméně některé bylo potřeba získat ze zkoušek materiálu. Z internetových zdrojů se podařilo získat data v tabulce 3.1:

Hodnota Poissonova poměru μ byla zvolena $\mu = 0.37$. [12].

	zdroj 1 [13]	zdroj 2 [14]	zdroj 3 [15]	zdroj 4 [16]	zdroj 5 [17]	průměr	směrodatná od- chylka [%]
Hustota [kg/m^3]	1255	1290	1270	1300	1270	1277	1.25
Tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	-	0.29	0.21	0.29	0.2	0.25	17.23
Měrná te- pelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	-	1200	1300	1200	1100	1200	5.89
Teplotní roztaž- nost [K^{-1}]	5.7E-5	6.7E-5	-	6.8E-5	6.8E-5	6.49E-5	7.41

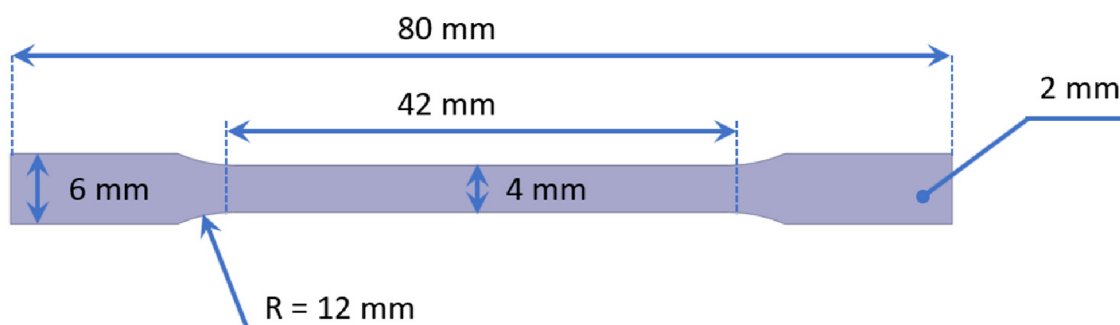
Tabulka 3.1: Materiálová data získaná z internetových zdrojů

3.4. Experimenty

3.4.1. Tahové zkoušky materiálu PETG

K ověření chování materiálu PETG při různých teplotách a získání parametrů materiálového modelu byly provedeny jednoosé tahové zkoušky při různých teplotách. Zkoušky byly provedeny na přístroji ZWICK Z020, na kterém byla extenzometrem snímána deformace mezi upínacími čelistmi a příslušná vyvolaná síla. Byly tak získány hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu, smluvní meze kluzu a smluvní meze pevnosti. Tečný modul pružnosti z tahových křivek bohužel nebyl vyhodnotitelný, a to z důvodu vytvoření krčku mimo oblast vzorku měřenou extenzometrem.

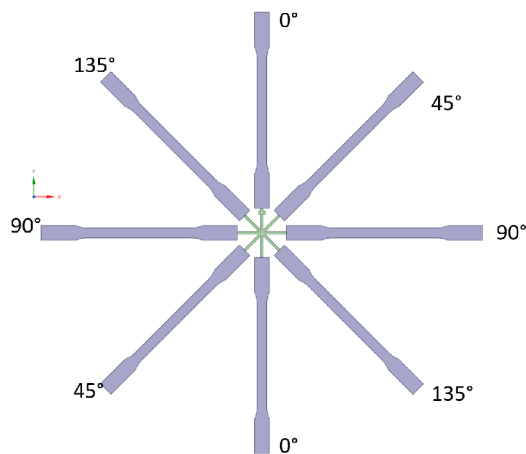
Z PETG materiálu byly vytištěny vzorky s plnou výplní dle modelu geometrie na obr. 3.3. Protože nebylo jisté, zda nejsou mechanické vlastnosti výsledného výtisku výrazně závislé na jeho orientaci při tisku, byly vytvořeny vzorky, které byly tištěny pod úhly 0° , 45° , 90° a 135° (viz. obr. 3.4). Vzorky byly provedeny ve dvou barvách - černá a oranžová. Vyhodnocení zkoušek bylo provedeno pomocí programovacího jazyka Python.



Obrázek 3.3: Model geometrie zkušební vzorku

Z nástřelové zkoušky prováděné s teplotním intervalem $10^\circ C$ začínajíc při teplotě $25^\circ C$ bylo zjištěno, že mezi pokojovou teplotou a $50^\circ C$ se mechanické vlastnosti materiálu měnili poměrně pozvolně (téměř lineárně). Proto bylo možné v tomto intervalu teplot

3.4. EXPERIMENTY



(a) Schéma orientovaně vytištěných vzorků



(b) Fotografie vytištěných vzorků

Obrázek 3.4: Model tištěných zkušebních vzorků

zvolit velký rozestup teplot měření a snížit tak celkový počet potřebných zkoušek. Při teplotách nad 50 °C se mechanické vlastnosti začali měnit výrazněji, a teplotní krok byl proto zvolen menší. Zkouška při teplotě 80 °C byla již na hraně možností měřicí techniky z důvodu tečení zkušebního vzorku pod zatížením tíhového zrychlení. Na základě těchto zjištění tedy byly vybrány následující teploty, při kterých byly vzorky testovány: **30, 50, 55, 60, 65, 70 a 80 °C**.

3.4.1.1. Statistické vyhodnocení tahových zkoušek

Při teplotách 30 - 70 °C byly zkoušky provedeny následovně:

- pro každou teplotu byly provedeny zkoušky 8 vzorků
- polovina z 8 vzorků byla černé barvy, polovina oranžové barvy
- každá barva obsahovala vzorky tištěné pod 4 úhly (0°, 45°, 90° a 135°)

Při teplotě 80 °C však byly z důvodu obtížné proveditelnosti úspěšně provedeny zkoušky již jen 3 vzorků.

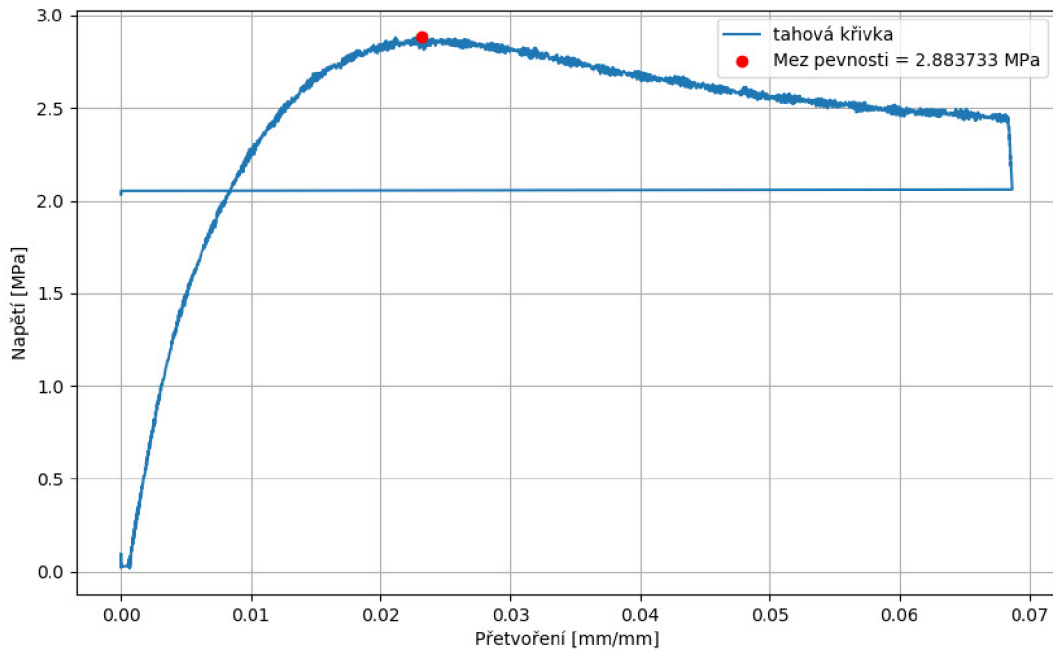
Rozměry průřezu vyrobených vzorků byly v důsledku nepřesnosti tisku oproti rozměrům modelu geometrie větší, konkrétně 2.35×4.1 mm. Při vyhodnocování tahových zkoušek materiálu bylo zjištěno, že na všechny vyhodnocované parametry má barva filamentu vliv v průměru menší než 10 %. V případě orientace tisku vzorku byl vliv posuzován zjednodušeným způsobem, a to dle hodnot směrodatných odchylek, které při teplotách do 65 °C nepřekročily hodnotu 7 %. Při vyšších teplotách již byly hodnoty směrodatných odchylek vyšší, avšak tato skutečnost není přičítána směrové závislosti, nýbrž podstatně vyšší citlivosti na skutečnou teplotu vzorku, která se mohla u každého z nich mírně lišit. Vyšší citlivost mechanických vlastností na teplotu je při teplotách okolo 65 °C a výše způsobená tím, že se materiál nachází v přechodové oblasti mezi sklovitým a kaučukovitým stavem. Pakliže by tato skutečnost byla zohledněna i při vyhodnocování vlivu barvy filamentu, byl by tento vliv vyhodnocen nižší než 5 %.

V jazyce Python bylo pomocí softwaru PyCharm (Python IDE) naprogramováno automatizované vyhodnocení zkoušek. Vyhodnocované parametry byly Youngův modul pružnosti v tahu, smluvní mez pevnosti R_m a smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$. Bylo nutné sjednotit

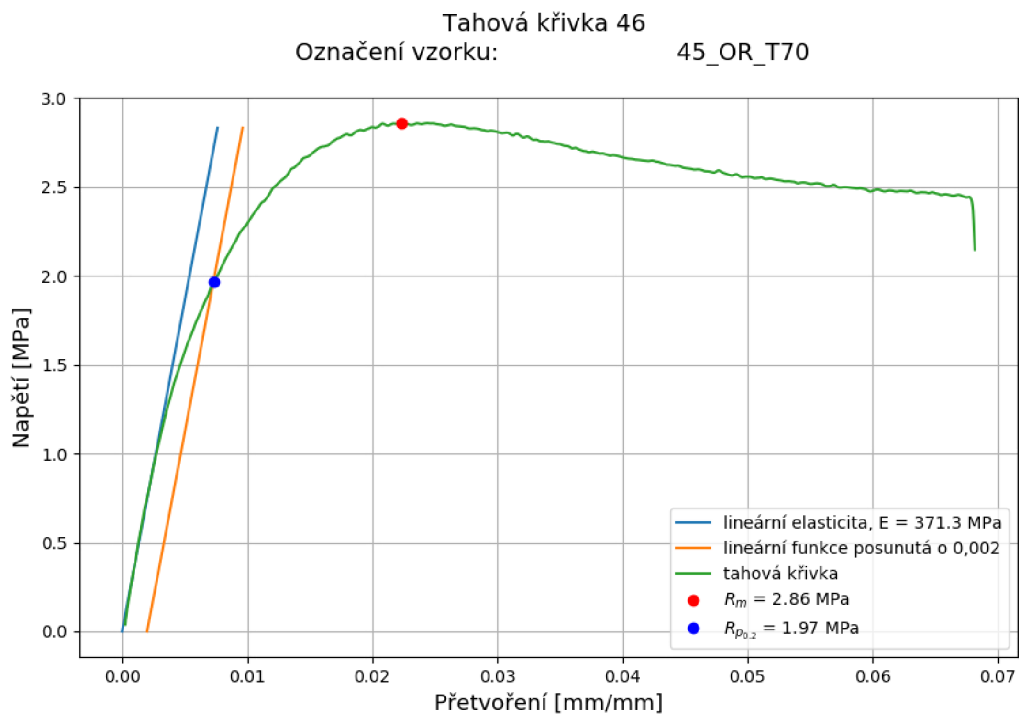
výchozí bod všech zkoušek, jelikož tento bod nebyl v surových datech dobře vystředěn. Dále byla tahová křivka oříznuta v místě, od kterého její hodnoty začaly nabývat pro vyhodnocení daných parametrů nepotřebných hodnot. Poslední úprava byla filtrace vyšších frekvencí, které způsobovaly velkou rozkolísanost křivek. Při této filtraci bylo dbáno na nepřilíšné zkreslení dat a byl pro ni na doporučení firmy SVS FEM použit lowpass Butterworth filtr s propustnou frekvencí 20 Hz. Tahovou křivku v surovém stavu a po úpravě vidíme na obr. 3.5.

Mez pevnosti se stanovila jako maximum napětí tahové křivky a Youngův modul pružnosti byl vypočten ze sečny procházející body, které nabývaly 0.1 a 0.3 hodnoty meze pevnosti. Mez kluzu byla stanovena jako smluvní $R_{p0.2}$, a to výpočtem průsečíku lineární části tahové křivky posunuté o 0.002 na ose přetvoření a tahové křivky. Na obr. 3.6 jsou vykresleny tahové křivky při různých teplotách vzorků. Z grafů 3.7 lze vyčíst teplotní závislosti materiálových vlastností.

3.4. EXPERIMENTY



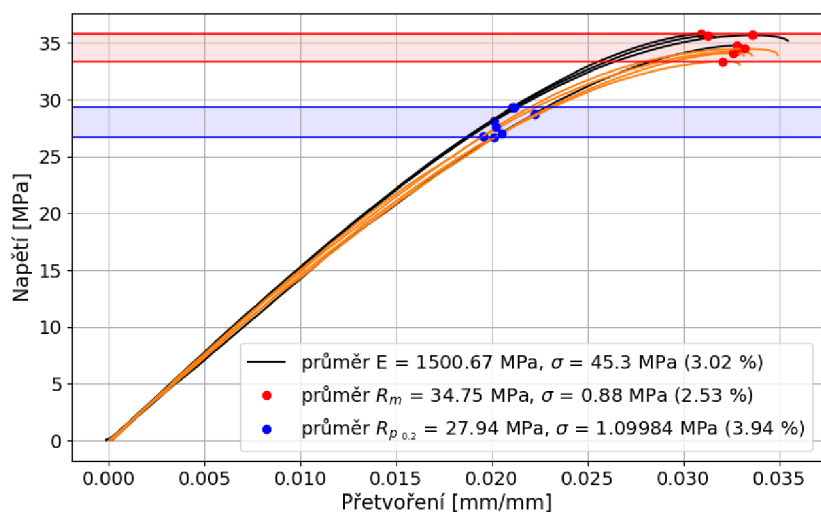
(a) Vykreslení tahové křivky v surovém stavu



(b) Vykreslení upravené tahové křivky

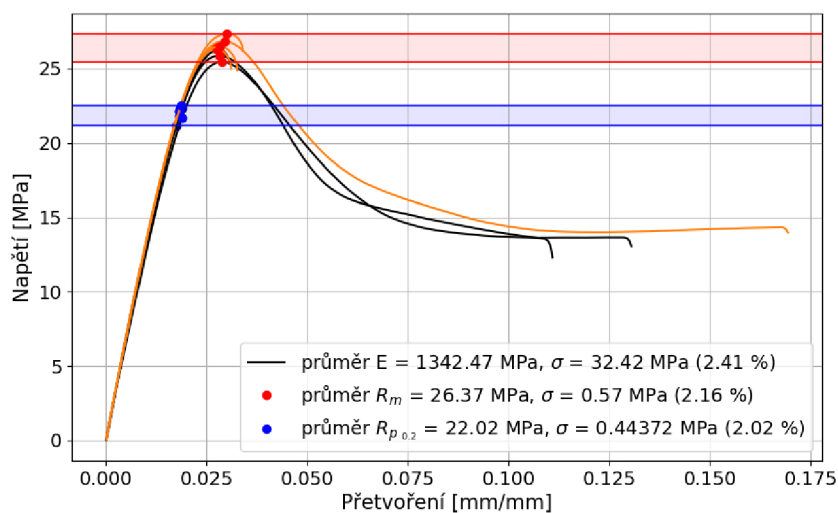
Obrázek 3.5: Porovnání tahové křivky v surovém stavu a po zpracování

Teplota 30 °C



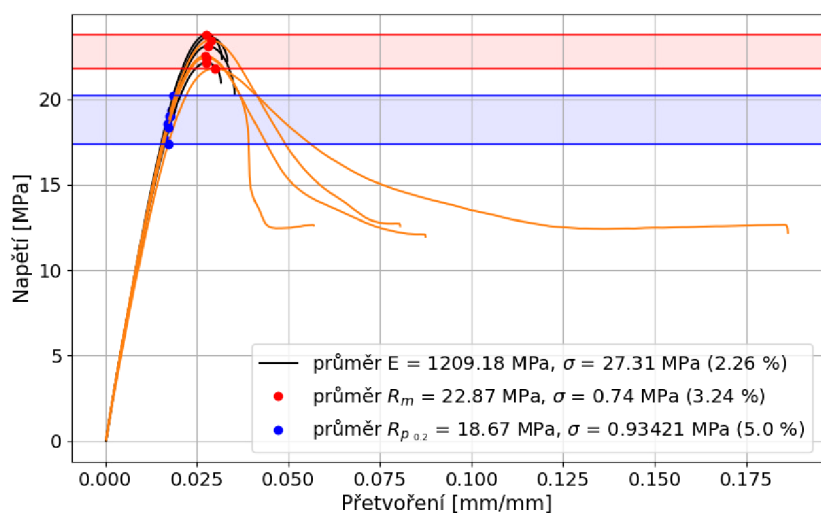
(a) Teplotní závislost Youngova modulu pružnosti v tahu

Teplota 50 °C



(b) Teplotní závislost smluvní meze kluzu

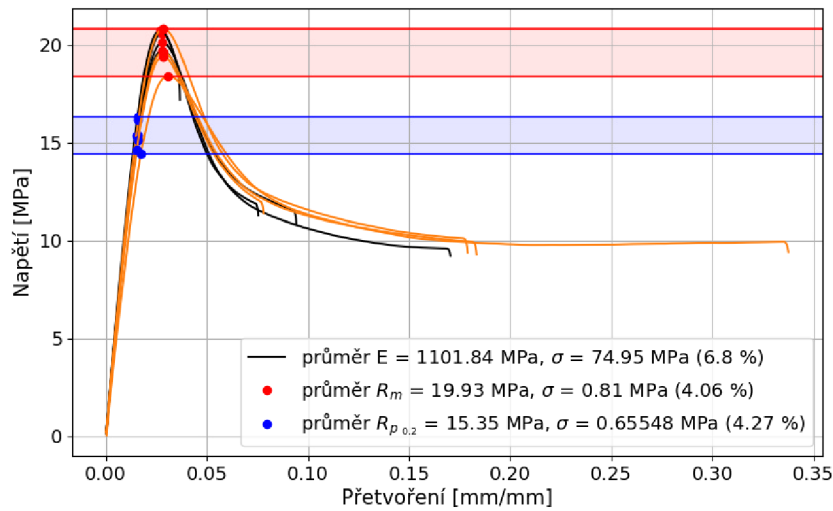
Teplota 55 °C



(c) Teplotní závislost smluvní meze pevnosti

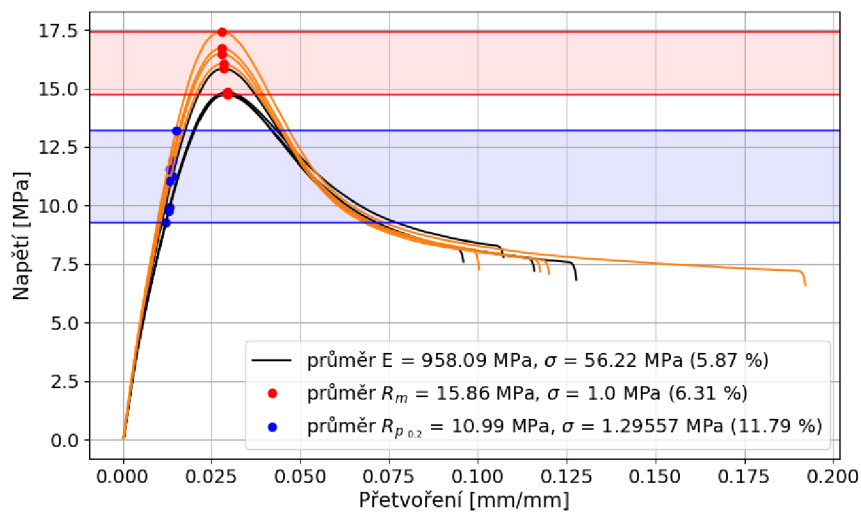
3.4. EXPERIMENTS

Teplota 60 °C



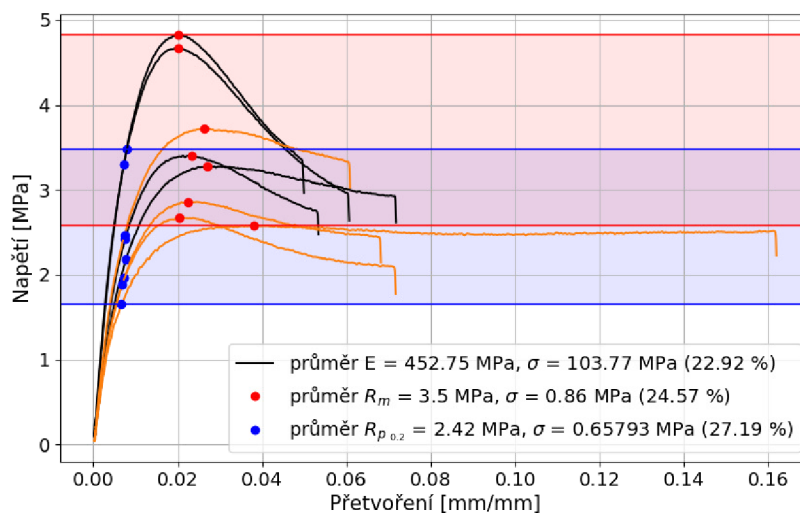
(d) Teplotní závislost Youngova modulu pružnosti v tahu

Teplota 65 °C

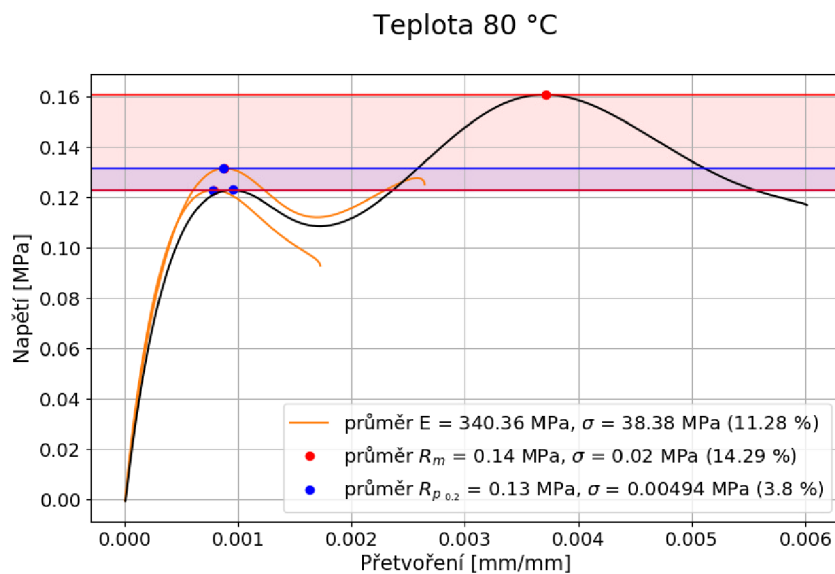


(e) Teplotní závislost smluvní meze kluzu

Teplota 70 °C

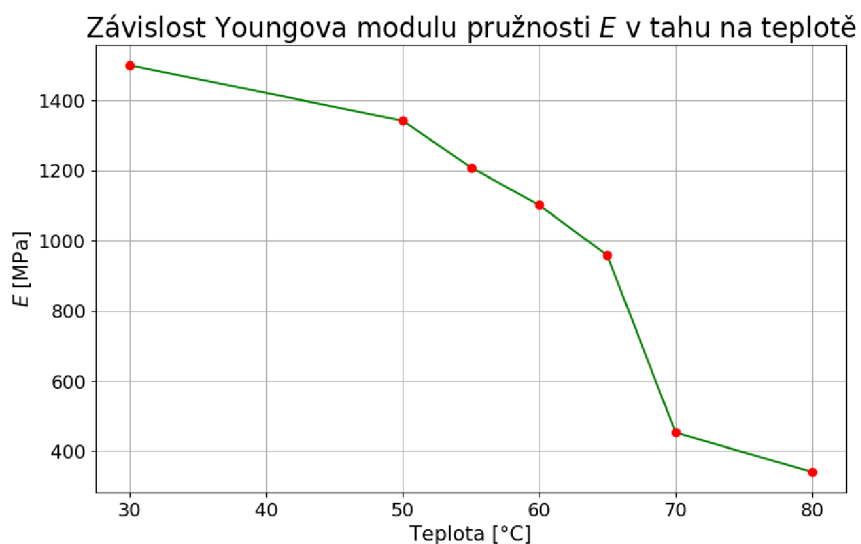


(f) Teplotní závislost smluvní meze pevnosti



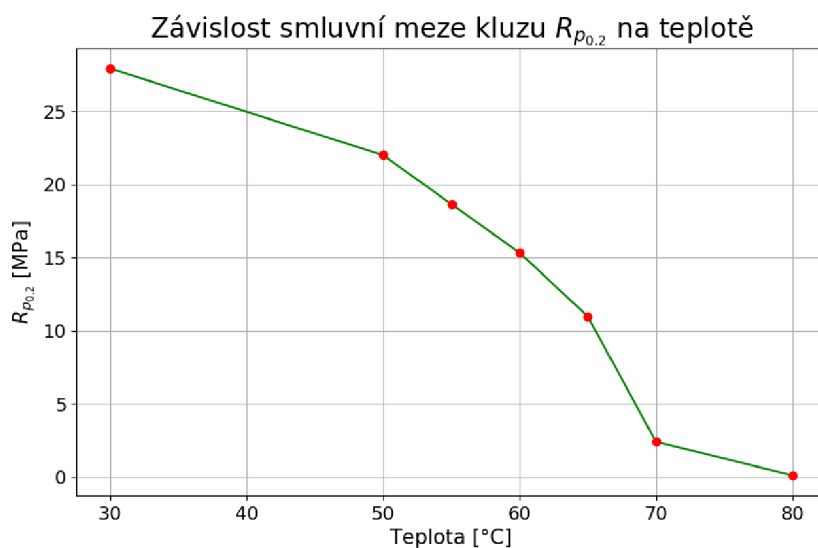
(g) Teplotní závislost smluvní meze pevnosti

Obrázek 3.6: Tahové křivky při různých teplotách, σ ... směrodatná odchylka, černá/oranžová barva značí vzorky černé/oranžové barvy, průměr i σ počítány pro obě barvy sjednoceně

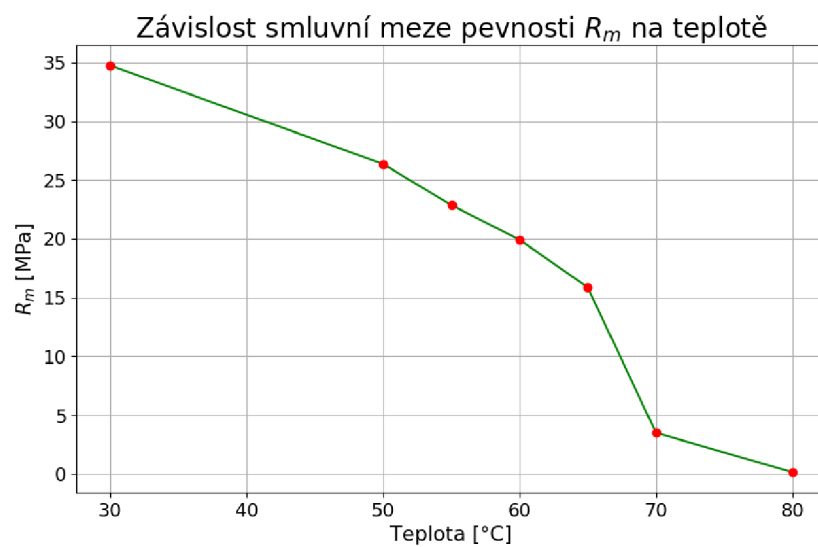


(a) Teplotní závislost Youngova modulu pružnosti v tahu

3.4. EXPERIMENTY



(b) Teplotní závislost smluvní meze kluzu



(c) Teplotní závislost smluvní meze pevnosti

Obrázek 3.7: Teplotní závislosti vybraných materiálových vlastností

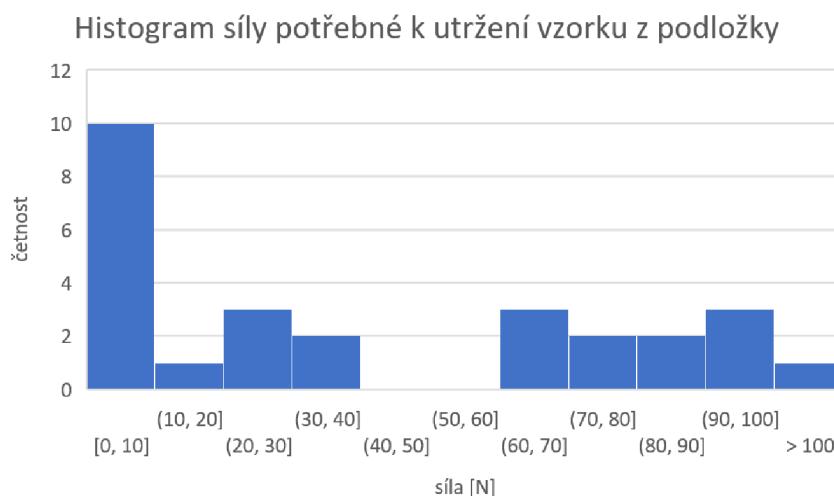
3.4.2. Měření soudržnosti mezi tisknutým vzorkem a podložkou

Pokud by se nějakým způsobem podařilo zjistit hodnotu kontaktního tlaku, při kterém dojde k utržení součásti z podložky, bylo by možné již ze simulace s určitou pravděpodobností posuzovat, zda při tisku dojde k utržení součásti z podložky či nikoliv. Byl proto vytvořen model geometrie vzorku, který byl poté tisknut na podložce po 9 kusech (3x3) a ihned po výtisku byl při udržování stálé teploty podložky každý zvlášť ručně tažen silou kolmou na podložku. Síla byla měřena siloměrem. Přestože byla podložka před každým experimentem řádně očištěna, pohybovala se síla nutná pro utržení ve velkém rozmezí 1 až 120 N. Celý experiment byl proveden 3krát, tedy počet zkoušených vzorků byl 27. Na obr. 3.8 lze vidět model geometrie vzorku a jeho rozmístění na podložce. Na obr. 3.9 vidíme histogram síly potřebné k utržení vzorku.



(a) Model geometrie vzorku, průměr podstavu 13.68 mm (b) Rozmístění vzorků na podložce pro tisk

Obrázek 3.8: Vzorek pro měření soudržnosti s podložkou



Obrázek 3.9: Histogram síly potřebné k utržení vzorku z podložky

3.4.3. Měření teplotního pole součásti Idler

Pro správnou volbu konstant, které jsou vstupem do teplotní analýzy, bylo nutné provést měření teplotního pole součásti Idler v průběhu tisku. Toto měření je podrobněji popsáno v části 3.7.2.

3.5. VYTVÁŘENÍ GEOMETRIE

3.4.4. Další dílčí experimenty

V průběhu tvorby této práce byla provedena celá řada dílčích experimentů formou tisku součástí různých geometrií za různých nastavení tisku. Součástí byly tištěny na tiskárně Prusa i3 MK3S z materiálu PETG. Účelem těchto experimentů bylo postupné ověřování jednotlivých předpokladů a výsledků výpočtového modelování. Jedním z nich je například testování vlivu výšky tištěné součásti na směr vertikální deformace, který je podrobněji popsán v části 3.9.3.6. Rozbor dalších z nich je však nad rámec rozsahu této diplomové práce, a proto zde nebude uveden.

3.5. Vytváření geometrie

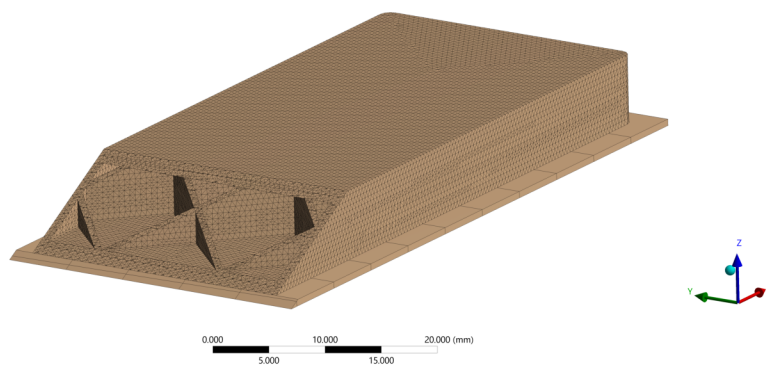
Jelikož společnost Prusa dodala geometrii ve formátu STL, bylo potřeba geometrii přemodelovat do CAD formátu. Formát STL totiž vykazoval problémy při tvoření konečněprvkové sítě, kde software ANSYS Mechanical nebyl schopen správně vysítovat vnitřní dutiny dané mřížkovitou strukturou. Tento problém nastal pravděpodobně z důvodu, že ANSYS Mechanical špatně rozpoznal normály ploch, tedy špatně určil, jestli jsou plochy trojúhelníků uvnitř dutin vnitřní či vnější. Popsané problémy souvisejí se skutečností, že podpora formátu STL je v ANSYS Mechanical je relativně novinkou.

3.6. Vytváření konečněprvkové sítě

Jak již bylo řečeno v 2.2.3.1, síť pro AM analýzu lze vytvářet dvěma automatizovanými metodami či manuálně. V případě součásti Idler byla použita automatická metoda layered tetrahedrons, protože jako jediná zvládla vysítovat složitou vnitřní strukturu modelu geometrie.

3.6.1. Vliv výšky vrstvy na výslednou deformaci

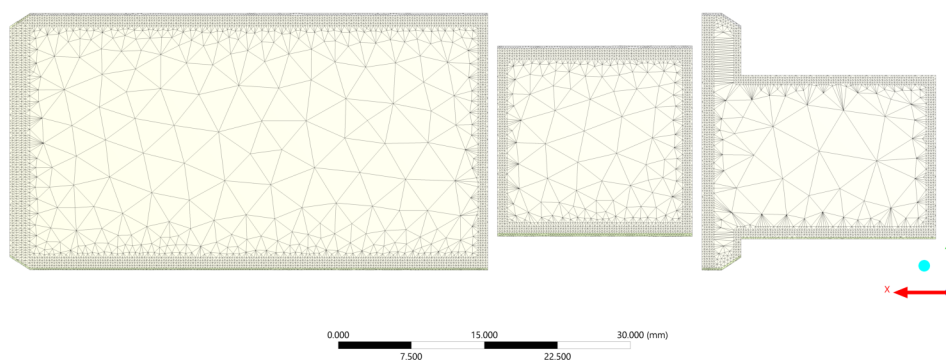
Na zjednodušeném modelu Idleru, který byl ve tvaru nízkého (výška 6 mm) kvádrů s mřížkovou vnitřní výplní (obr. 3.10), jakou má i Idler, byl testován vliv výšky vrstvy na výslednou deformaci po tisku. Model větší výšky testován být nemohl z důvodu vysoké výpočetní náročnosti (nedostatku operační paměti), která s rostoucím počtem vrstev roste kvadraticky. Tato kvadratická závislost je způsobena tím, že s počtem vrstev elementů roste lineárně jak počet stupňů volnosti, tak počet iterací, to znamená, že v každé iteraci je provedena rozměrnější úloha. Testované výšky vrstvy jsou 2.0, 1.0 a 0.5 mm, kde skutečná výška vrstvy při tisku je 0.25 mm. Tisk s výškou vrstvy nižší než 0.5 mm však opět nebylo možné simulovat z důvodu nedostatku operační paměti. Vysledovaná závislost ukazuje, že výška vrstvy v tomto rozsahu má vliv maximálně 7 %. Je možné, že pokud by analýza byla provedena pro rozměrově vyšší model geometrie, byla by závislost na výšce vrstev elementů výraznější, avšak proto, že všechny následující analýzy budou provedeny s totožnou výškou vrstev elementů, budou výsledky vzájemně porovnatelné, přestože jejich absolutní přesnost může být nižší. Pro výpočty součásti Idler tedy bude použita výška vrstev elementů 2 mm a maximální velikost elementu 5 mm.



Obrázek 3.10: Model pro zjištění vlivu výšky vrstvy elementů na deformaci po výtisku, rozměry 25×95×6 mm

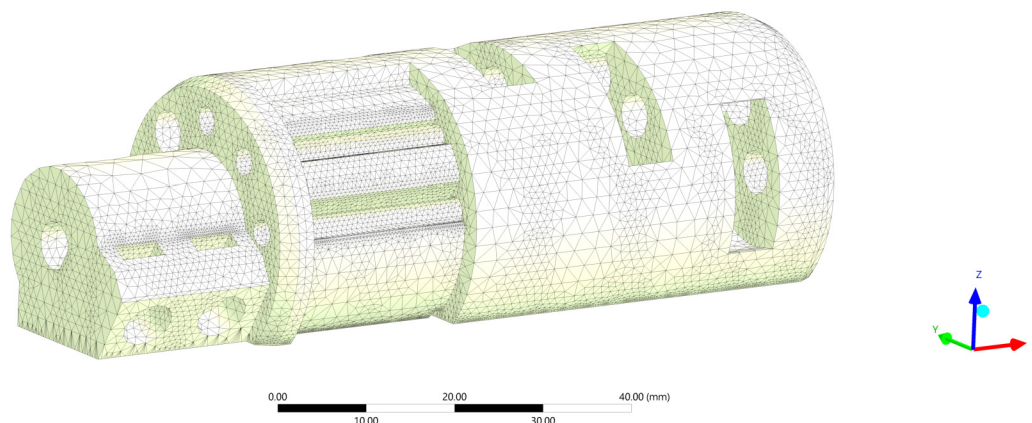
3.6.2. Síť podstavy součásti

Aby bylo možné přesněji vyhodnotit kontaktní tlaky mezi tiskovou podložkou a tisknutou součástí, bylo potřeba zjemnit síť podstavy. Protože však u metody layered tetrahedrons nelze použít nástroj „sizing“ pro lokální změnu velikosti sítě, bylo nutné síť zjemnit manuálně přímo v modeláři Spaceclaim rozdělením podstavy na menší plochy. Tímto byla také zaručena velmi podobná síť kontaktních ploch všech konstrukčních úprav a porovnávání kontaktních tlaků proto bylo věrohodnější. Tuto síť podstavy lze vidět na obr. 3.11. Síť celé součásti Idler je na obr. 3.12.



Obrázek 3.11: Síť podstavy

3.7. TEPLOTNÍ ANALÝZA



Obrázek 3.12: Konečněprvková síť součásti Idler

3.7. Teplotní analýza

3.7.1. Teplotní okrajové podmínky

V systému podstatných veličin (3.9.1) byly jako způsoby přenosu tepla uvedeny přenos kondukcí, konvekcí i radiací. Přenos tepla radiací je však obtížné zahrnout, a proto bylo teplotní pole laděno pouze za pomoci kondukcce a konvekce. Z toho zjednodušení vyplývá nemožnost modelovat vzájemné teplotní ovlivnění součástí radiací při tisku více součástí zároveň.

Na tiskovou podložku byly aplikovány teplotní okrajové podmínky odpovídající teplotě jejího ohřevu. Po dobu tisku byla teplota podložky nastavena na 90 °C a při ochlazování po tisku se teplota podložky skokově snížila na teplotu 22 °C. V aplikaci Mechanical je možné docílit i postupného ochlazování podložky pomocí konvekce, avšak výpočet je tím prodloužen a nebyl zjištěn výrazný vliv způsobu ochlazování podložky na výslednou deformaci - rozdíl ve výsledné vertikální výchylce po odebrání z podložky byl 0.02 %.

Okrajová podmínka konvekce okolo tisknuté součásti je ve Workbench AM aplikována automaticky na všechny volné povrchy. Míra konvekce je zadávána ve formě koeficientu konvekce $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$.

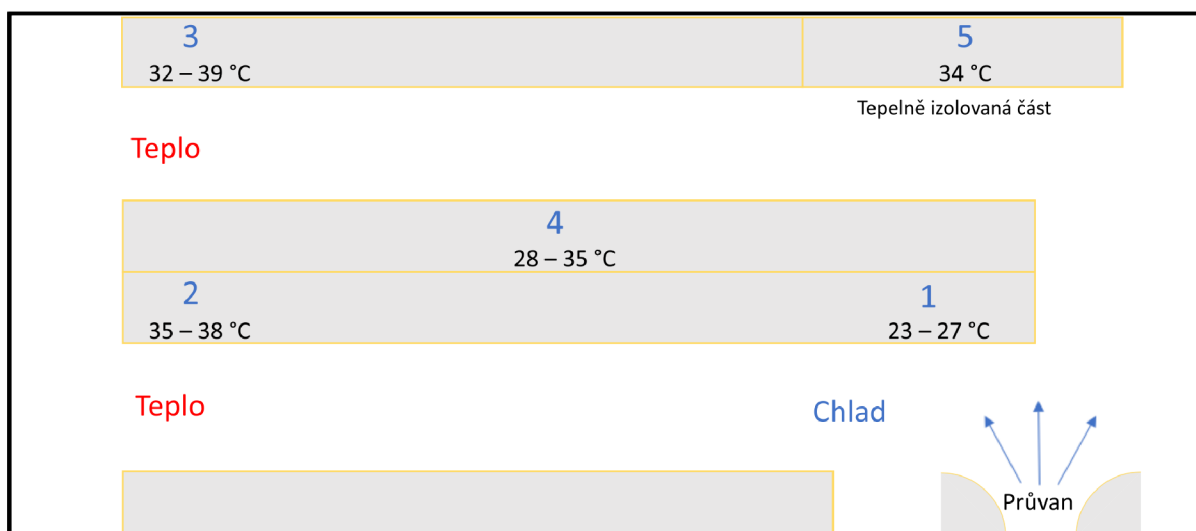
3.7.2. Modelování teplotního pole

Aby bylo možné zvolit vhodné parametry nastavení výpočtu teplotního pole pro dosažení co nejlepší shody (dále jen „ladění“) teplotního pole ze simulace a měřeného teplotního pole v průběhu tisku, je nutné změřit teplotní pole součásti v několika časových okamžicích. Proto bylo učiněno měření přímo na farmě (místo, firma Prusa součást Idler tiskne). Toto měření bylo zvoleno jako referenční.

3.7.2.1. Podmínky na farmě

Nejdříve bylo provedeno měření teploty v jednotlivých částech farmy, která je tvořena jednou místností (obr. 3.13).

Tiskárny jsou na této farmě umístěny ve třech patrech nad sebou (obr. 3.14) a celkem jich zde v současné době je 500 kusů. Rozmezí teplot na různých místech farmy, která



Obrázek 3.13: Schéma farmy, její části jsou značeny čísly 1-5

jsou uvedena na obr. 3.13, odpovídají naměřeným rozmezím teplot mezi prvním a třetím patrem. Nejvyšší teplota byla, až na ojedinělý případ ovlivněný ventilací, vždy ve třetím patře.



Obrázek 3.14: Uspořádání tiskáren na farmě [18]

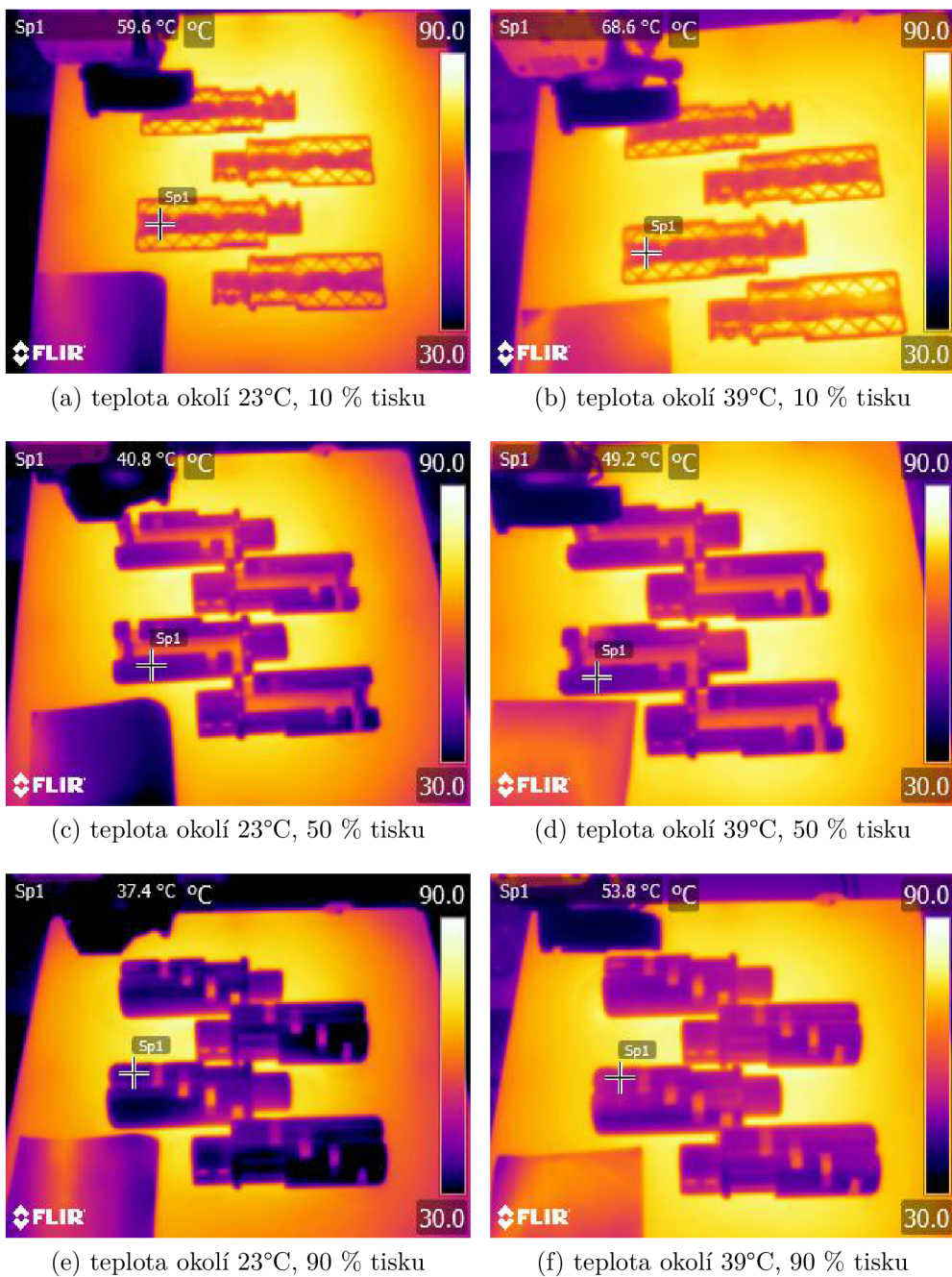
3.7.2.2. Snímky z termokamery

Snímky z termokamery byly pořízeny přístrojem Flir E63900, jehož specifikace jsou následující:

- rozlišení: 160×130
- rozlišení úhlu: $5.2 \cdot 10^{-3}$ rad
- přesnost měření: ± 2 °C nebo ± 2 %

Pro měření termokamerou je nutné zadat parametry měřeného materiálu a okolních podmínek, kterými jsou **emisivita** e a **odražená teplota** T . Pro zadaný materiál (PETG) a místní podmínky byly parametry:

3.7. TEPLOTNÍ ANALÝZA



Obrázek 3.15: Porovnání termosnímků

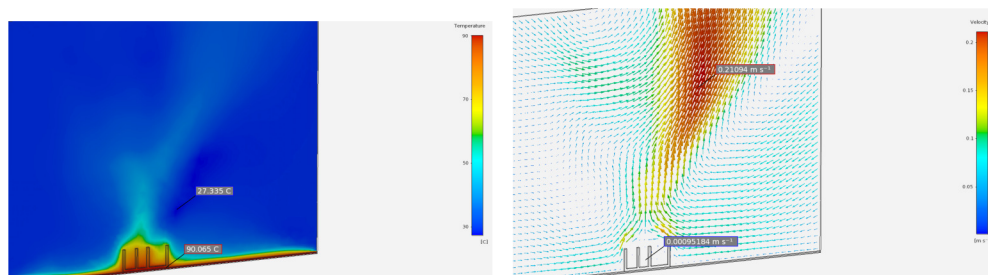
$$e = 0.95$$

$$T = 27^{\circ}\text{C}$$

Tyto parametry byly zvoleny na základě zkušenosti firmy Prusa. Snímky z termokamery byly pořízeny v 10, 50 a 90 % tisku v každé části farmy. Na obr. 3.15 lze vidět porovnání snímků z nejchladnějšího a nejteplejšího místa na farmě.

3.7.2.3. Teplotní simulace

Termosnímky byly využity k ladění nestacionárního teplotního pole teplotní analýzy.



(a) Teplotní pole okolo tisknuté součásti (b) Proudění buzené sáláním okolo tisknuté součásti

Obrázek 3.16: Simulace v software ANSYS Discovery AIM

Ladění konstant

Ladění konstant bylo provedeno při dvou teplotách okolí, které odpovídají nejnižší a nejvyšší naměřené teplotě na farmě, tedy 23 a 39 °C. Laděné konstanty byly koeficient konvekce a teplota okolí. Šlo o poměrně zdlouhavou práci, kdy bylo potřeba sledovat a porovnávat teplotní pole simulace s termosnímkou ve třech fázích tisku (10, 50 a 90 %). Zpočátku byla pro naladění pole snaha měnit také koeficient kondukce, ale jeho změna k naladění nijak nepomáhala, a tak byla vložena důvěra v internetové zdroje, ze kterých byly hodnoty koeficientu kondukce čerpány. Ladění koeficientu konvekce vedlo k jeho snížení k poměrně nízkým hodnotám, až $2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, a i přesto nepřesnému naladění některých fází tisku. Při tisku je přitom součást ofukována ventilátorem, což by konvekci mělo zvyšovat. Obvykle uváděný koeficient volné konvekce má hodnotu $5 - 37 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. [19] Proto byla snaha tento koeficient zvýšit, čehož bylo možné dosáhnout jedině zvýšením okolní teploty v simulaci. Přestože jsme teplotu okolí na farmě měřili, bylo zjištěno, že abychom úlohu lépe sladili s realitou, je třeba ji korigovat. Důvod je pravděpodobně nezahrnutí účinků radiace a také specifické proudění vzduchu okolo součásti vyvolané sáláním podložky a tisknuté součásti. Toto specifické proudění vzduchu je zobrazeno na obr. 3.16, který zachycuje proudění vzduchu okolo zjednodušeného modelu geometrie simulované v software ANSYS Discovery AIM. Snímek poskytl Ing. Zdeněk Čada Ph.D. Lze na něm pozorovat, že konvekce v dutinách je podstatně menší než na vnějších površích, avšak v simulaci tuto skutečnost zatím bohužel rozumným způsobem zahrnout nelze. Proto byla v simulacích použita teplota okolí o 10 °C vyšší, než byla teplota naměřená. Koeficient konvekce byl naladěn na hodnotu $4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Nastavení analýzy

V teplotní analýze bylo potřeba zadat parametry pro tisk. Jelikož je software zaměřen na tisk kovový, tak parametry odpovídají parametrům tiskárny pro kovový tisk. Jsou to:

- výška skutečné vrstvy = 0.25 mm
- šířka návarové stopy = 0.4 mm
- rychlost tisku - parametr, který je poněkud nesmyslně citlivý na jemnost/hrubost sítě modelu, je tedy volen tak, aby čas tisku odpovídal skutečnému času tisku, nikoliv rychlosti tisku
- časová prodlevy mezi vrstvami = 1 s (zanedbatelná)

3.7. TEPLOTNÍ ANALÝZA

- počet zdrojů tepla (pokud je použito více laserů/nanášejších hlavic) = 1

Parametry okolních podmínek:

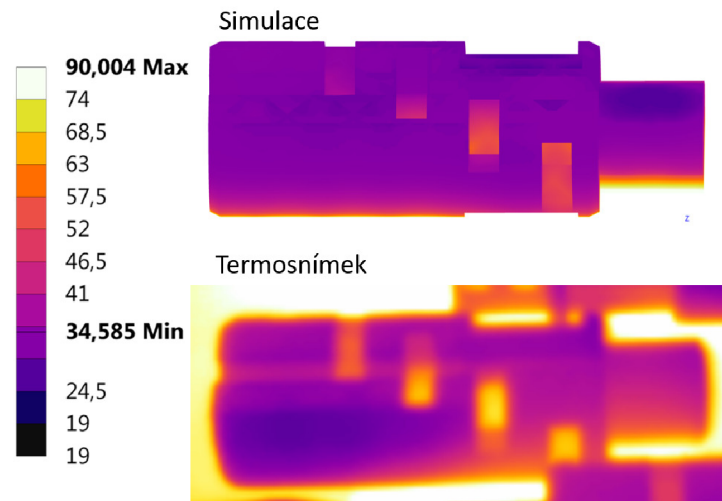
- teplota podložky pro tisk = 90 °C
- teplota okolního vzduchu - proměnná podle konkrétní simulované situace
- koeficient konvekce vzduchu = $4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
- koeficient konvekce kovového prášku (pro jeho nepřítomnost uvažován tentýž jako koeficient konvekce vzduchu) = $4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Podmínky ochlazení po tisku:

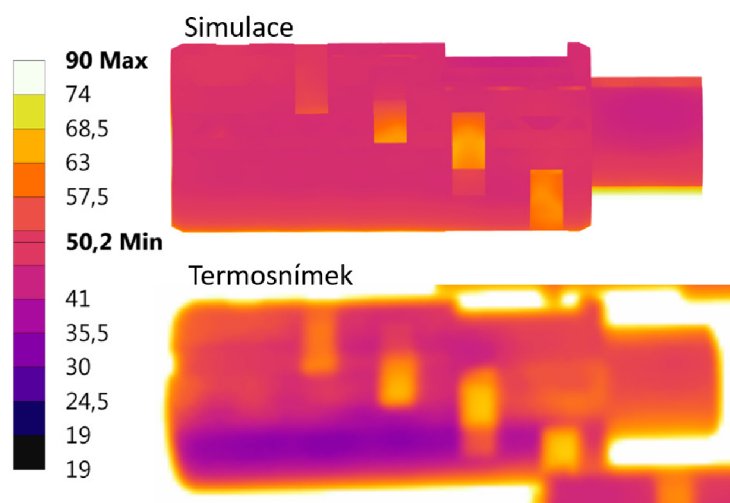
- teplota okolí = 22 °C
- koeficient konvekce vzduchu = $4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
- koeficient konvekce kovového prášku (pro jeho nepřítomnost uvažován tentýž jako koeficient konvekce vzduchu) = $4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Teplotní výsledky a porovnání s termosnímkou

Teplotní pole se podařilo naladit s maximální odchylkou 5 °C od termosnímků. Co z důvodu nezahrnutí vlivu radiace a modelu proudění v doméně okolního vzduchu (tedy vlivu proměnné konvekce na povrchu součástí) naladit možné nebylo, je nižší teplota odlehlejších míst tisknutých součástí (viz. obr 3.17). Nicméně i tato místa jsou naladěna s maximální odchylkou 5 °C. Z termosnímků je zřejmé, že tento jev je způsoben vzájemným ovlivněním paralelně tisknutých součástí. Místa na okrajích jsou více vystavena proudění okolního vzduchu a zároveň z nich teplo vyzařuje pryč do okolí, zatímco v oblastech, kde jsou součásti blízko sebe, je vyzářené teplo jedné součásti pohlceno povrchem druhé součásti, který je v blízkosti a naopak, takže se v těchto oblastech teplo udržuje lépe.



(a) teplota okolí 23°C, 90 % tisku



(b) teplota okolí 39°C, 90 % tisku

Obrázek 3.17: Porovnání teplotního pole simulace a termosnímků

3.8. Strukturální analýza

3.8.1. Obecná nastavení strukturální analýzy

Pro strukturální analýzu byla, pokud nebude uvedeno jinak, použita vždy následující nastavení:

- teplota okolí = 23 °C
- koeficient konvekce vzduchu = $4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
- koeficient konvekce kovového prášku (pro jeho nepřítomnost uvažován tentýž jako koeficient konvekce vzduchu) = $4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

3.8.1.1. Okrajové podmínky

Použité okrajové podmínky jsou vetknutí podložky pro tisk po celé spodní ploše a „Bonded“ kontakt mezi podložkou a tisknutou součástí a zatížení teplotním polem přeneseným z teplotního výpočtu.

3.8.1.2. Model materiálu

Výběr modelu materiálu je opodstatněn v sekci 3.2. Použitý model materiálu je tedy bilineární isotropní teplotně závislý. Byl sestaven na základě tahových zkoušek materiálu PETG, viz. sekce 3.4. Konkrétní hodnoty nastavení jsou na obr. 3.18.

3.8.1.3. Vliv zanedbání velkých deformací

Ve Workbench AM jsou velké deformace ve výchozím nastavení vypnuty. Dle manuálu Workbench AM je vhodné velké deformace zapnout v případě potřeby zachytit boulení tenkostěnných součástí.[4] Jelikož u součásti Idler není potřeba boulení stěn zachytit, protože u ní nenastává, můžeme velké deformace ponechat vypnuty a vyhnout se tak obtížím s konvergencí. Potíže s konvergencí mohou nastat také z důvodu, že při zapnutí velkých deformací se jednotlivé vrstvy elementů ožívují metodou Birth and Death v deformovaném stavu, a při skutečně velkých deformacích mohou vznikat elementy se záporným objemem a další s tímto jevem související potíže.

3.8.1.4. Vliv zanedbání závěrečného ochlazování podložky konvekcí

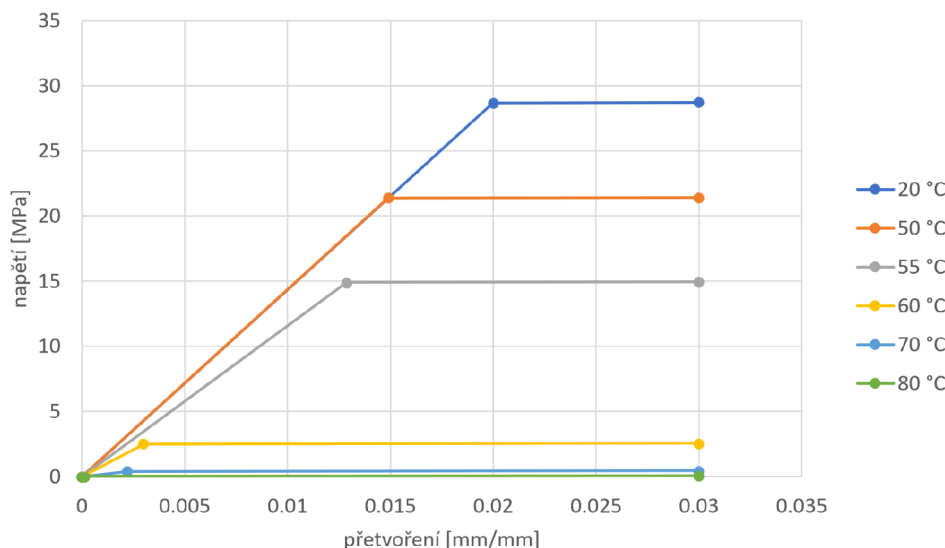
Aby byl ušetřen výpočetní čas, byla fáze závěrečného ochlazování modelována skokovou změnou teploty podložky. Ve skutečnosti je však celý proces ochlazování postupný a probíhá především konvekcí. Proto bylo otestováno, zda tento způsob zjednodušení nezpůsobí nezanedbatelnou chybu ve výsledcích. Bylo však zjištěno, že vliv je velmi malý, pouhá 0.02 %, a toto postupné ochlazování tedy může být bez obav zanedbáno.

3.8.1.5. Zavedení parametru absolutní nerovnovážná síla

Parametr absolutní nerovnovážná síla byl zaveden proto, aby bylo možné lépe popsat velikost kontaktních tlaků mezi podložkou a tištěnou součástí. Při vyhodnocení kontaktních tlaků jen na základně jejich hodnot se totiž ukázalo, že v místech, kde jsou okraje tisknuté

teplota [°C]	modul pružnosti [MPa]	mez kluzu [MPa]	tečný modul pružnosti [MPa]
20	1435	28.7	2.0
50	1435	21.4	2.0
55	1156	14.9	2.0
60	833	2.5	2.0
70	181	0.4	2.0
80	70	0.01	2.0

(a) použité hodnoty teplotně závislého bilineárního elasto-plastického izotropního modelu materiálu



(b) závislost napětí na deformaci pro různé teploty použitého modelu materiálu

Obrázek 3.18: Použitý model materiálu

součásti, vznikají singularity, tedy místa, kde kontaktní tlaky rostou na nereálně vysoké hodnoty. Zároveň byly hodnoty maximálních kontaktních tlaků v těchto místech velmi citlivé na změny konečněprvkové sítě. Získané hodnoty tak neměly správnou vypovídající hodnotu a bylo nutné zvolit jiný způsob jak kontaktní tlaky vyhodnotit. Právě proto byl zaveden parametr absolutní nerovnovážná síla, který je dán součtem absolutních hodnot kontaktních sil v uzlech podstavy tisknuté součásti dle vzorce

$$F_{ANS} = \sum_{i=1}^n |F_i|$$

kde F_i je kontaktní síla jednotlivých uzlech podstavy a n je počet uzlů podstavy tisknuté součásti.

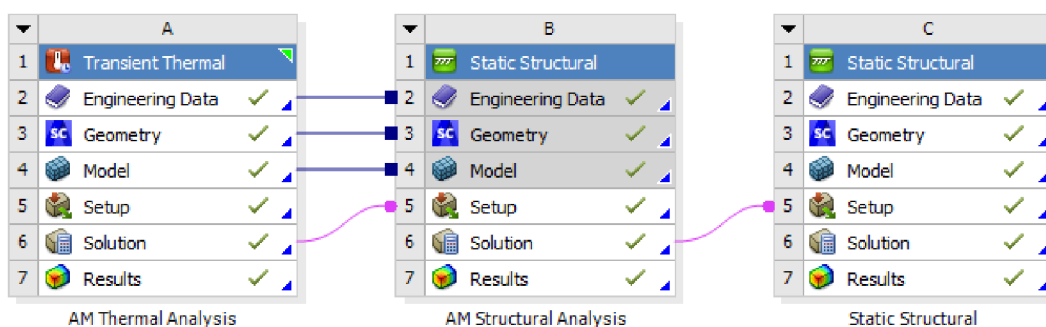
3.8.2. Simulace měření výchylky - kontaktní úloha

Pro porovnání deformace získané ze simulace s hodnotami měřeními experimentálně byla pro věrnější vystižení a pochopení toho, co se při měření odehrává, zvolena simulace tohoto měření. To bylo provedeno v další statické strukturální úloze. V této nové úloze byla použita geometrie nedeformované součásti a na její podstavu bylo namapováno deformační zatížení z posledního kroku předchozí strukturální úlohy - tedy deformace součásti

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

po výtisku a odebrání z podložky (viz. obr. 3.19). Pro lepší vizuální názornost celkové deformace součásti by bylo lepší namapovat deformační zatížení na všechny povrchy součásti, ovšem tím se velmi zkomplikovala konvergence celé kontaktní úlohy, a proto byly deformace namapovány pouze na podstavu, jejíž výchytku od podstavy chceme znát a je to tedy zatížení dostačující.

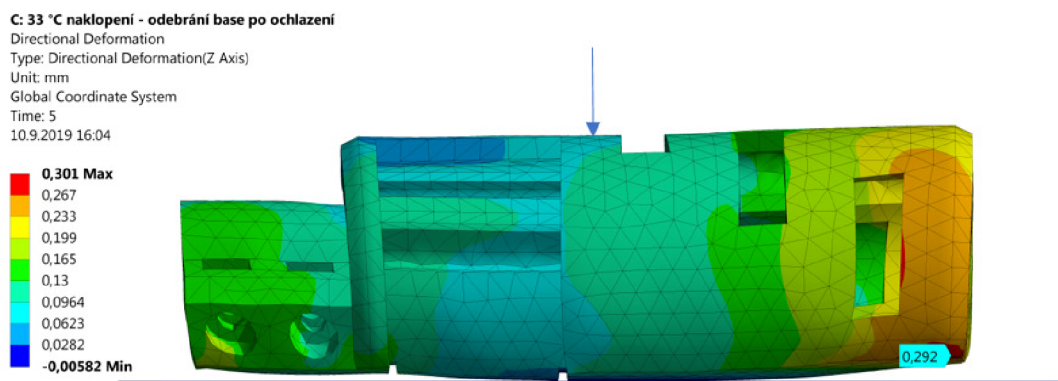
Abychom v simulaci mohli deformovanou součást silově přitlačit k podložce (viz. obr. 3.20), bylo potřeba odebrat deformační zatížení namapované na podstavu součásti (aplikovaná síla by jinak neměla účinek přitlačení k podložce). Aby však po odebrání deformačního zatížení nedošlo k elastickému odlehčení, kdy by se deformace součásti vrátily do původního stavu, bylo potřeba zajistit aby veškerá aplikovaná deformace měla plastický, tedy trvalý účinek. Toho bylo dosaženo metodou Element Birth/Death (viz. sekce 2.2.4). Umrtnění elementů celé součásti bylo aplikováno před mapováním deformačního zatížení, součást se tak stala velmi poddajná. Po namapování deformačního zatížení byly elementy opět oživeny, a tím byla zafixována aplikovaná deformace. Deformační zatížení tak mohlo být odebráno a vyvolaná deformace zachována. V následujícím kroku mohlo být aplikováno silové zatížení o velikosti 10 N, reprezentující přitlačení součásti prstem k podložce (obr. 3.20), a byla řešena nelineární kontaktní úloha. Použitý typ kontaktu byl „Frictional“ s koeficientem tření $f = 0.2$ a zvolená metoda řešení kontaktu byla „Penalty“ metoda. Při řešení úlohy byly velké problémy s konvergencí v okamžiku odebírání importovaného deformačního zatížení. Tento problém byl vyřešen vazbou části Idleru a následným postupným odebráním této vazby, které umožnilo postupné dosednutí kontaktu a konvergence tak byla výrazně snadnější. Maximální hodnota penetrace byla podstatně nižší než maximální hodnota vertikální výchytky od podložky, proto je získané výsledky možno považovat za dostatečně přesné a zvolenou metodu řešení těchto kontaktních úloh tedy budeme používat ve všech dalších případech. Doba výpočtu kontaktní úlohy se pohybovala okolo 5 minut. Byl testován také vliv velkých deformací a dle očekávání bylo zjištěno, že na úlohu tohoto typu vliv nemají (výsledek se lišil v řádu 10^{-6} mm). Proto velké deformace nebudou uvažovány.



Obrázek 3.19: Schéma modelovacího workflow

3.9. Citlivostní analýza

Smyslem provedení citlivostní analýzy je získání informace o tom, které faktory výrazně ovlivňují výslednou vertikální imperfekci podstavy tisknuté součásti. Zde se jeví výhodné vytvoření systému podstatných veličin, tedy faktorů ovlivňujících kýžený výstupní parametr. Z těchto faktorů budou následně vybrány ty, které budou považovány za nej-

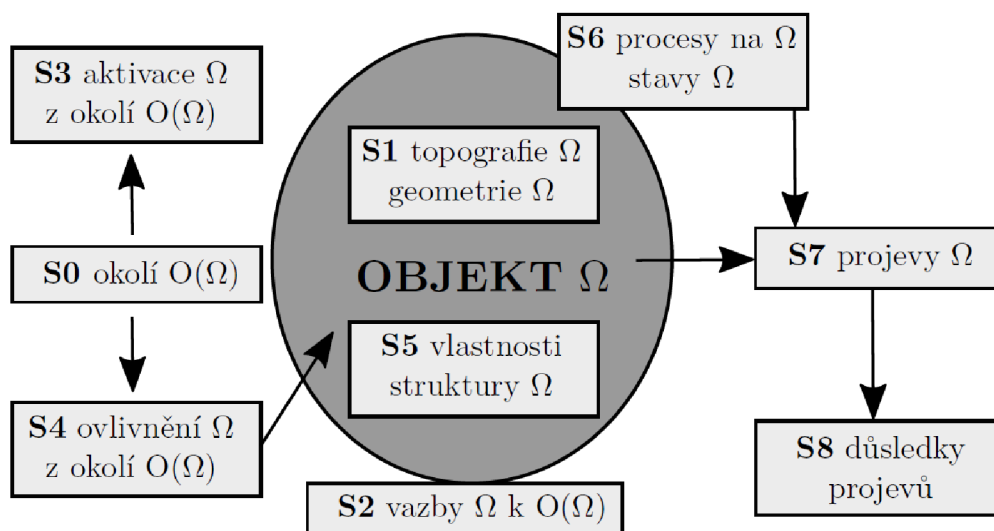


Obrázek 3.20: Přitisknutí součásti v podložce silou o hodnotě 10 N aplikovanou ve středu součásti

významnější a u nich bude zkoumána citlivost odezvy výstupního parametru (maximální vertikální deformace podstavy tisknuté součásti) na změny parametrů vybraných faktorů. Vzhledem ke složitosti parametrizace změn jednotlivých okrajových podmínek či geometrie byl zvolen ruční typ citlivostní analýzy někdy nazývaný také „What-If“ analýza.

3.9.1. Systém podstatných veličin

Tento systém bude vypracován dle schématu na obr. 3.21



Obrázek 3.21: Schéma systému podstatných veličin [20]

3.9.1.1. Podmnožina S0 – okolí objektu

Veličinami v0 vyjadřujícími okolí objektu jsou:

- okolní vzduch
- spolu tisknuté součásti
- podložka pro tisk

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

3.9.1.2. Podmnožina S1 – geometrie a topologie objektu

Veličinami v1 vyjadřujícími geometrii a topologii objektu jsou:

- tvar a rozměry tělesa
- vnitřní struktura tělesa

3.9.1.3. Podmnožina S2 – podstatné vazby objektu v okolí

Veličinami v2 popisujícími vazby objektu k okolí jsou:

- vazba mezi tisknutým tělesem a podložkou vetknutím
- vazba mezi tisknutým tělesem a podložkou vedením tepla
- vazba mezi tisknutým tělesem a okolním vzduchem konvekcí
- vazba mezi tisknutým tělesem a okolím radiací

3.9.1.4. Podmnožina S3 – aktivace objektu z okolí

Veličinami v3 vyjadřujícími aktivní působení na objekt z okolí jsou:

- zahřívání nanášením roztaveného materiálu

3.9.1.5. Podmnožina S4 – ovlivňování objektu z okolí

Veličinami v4 vyjadřujícími ovlivnění objektu jsou:

- proudění okolního vzduchu
- vedení tepla z podložky
- radiace tepla z podložky
- radiace tepla z případných spolu tisknutých součástí
- vliv tuhosti podložky

3.9.1.6. Podmnožina S5 – vlastnosti prvku struktury objektu

Veličinami v5 vyjadřujícími vlastnosti objektu jsou:

- Youngův modul pružnosti v tahu E
- Poissonova konstanta
- mez kluzu
- hustota materiálu
- tepelná vodivost
- měrná tepelná kapacita
- teplotní roztažnost
- viskózní tečení nanášeného roztaveného materiálu
- směrová závislost vlastností materiálu
- teplotní závislost některých vlastností materiálu

3.9.1.7. Podmnožina S6 – procesy na objektu a jeho stavy

Veličinami v6 popisujícími procesy, které probíhají ve struktuře objektu a jsou vyvolány působením na objekt, jsou:

- nanášení roztaveného materiálu
- změny skupenství stavebního materiálu

- změny materiálových vlastností
- vedení tepla materiálem

3.9.1.8. Podmnožina S7 – projevy objektu

Veličinami v7 popisujícími projevy objektu jsou:

- deformace tisknuté součásti způsobená teplotní roztažností materiálu
- nestacionární teplotní pole

3.9.1.9. Podmnožina S8 – důsledky projevu

Veličinami v8 vyjadřujícími důsledky jsou:

- deformovaná součást

3.9.2. Výběr faktorů ke zkoumání

Pokud by měly být zkoumány všechny z faktorů uvedených v systému podstatných veličin, jednalo by se o velmi komplexní a rozsáhlou analýzu, na kterou by byla potřeba provést další náročné experimenty (určení teplotně závislých viskózních parametrů, teplotně závislé teplotní roztažnosti, ...). V programu ANSYS Workbench by byla potřeba vyvinout pomocí jazyka APDL či Python nové nástroje, které by byly schopné do současného řešení simulace 3D tisku zakomponovat například, proměnlivost konvekce na površích tisknuté součásti. Ve Workbench AM je možnost modelování geometrie prášku, která by mohla v našem modelu zaujmout pozici vzduchu ve vnitřních dutinách součásti - tedy v místě, kde je konvekce nižší. Tato možnost se však ukázala téměř nerealizovatelná v případě komplikované geometrie Idleru, a to z důvodu potřeby zahrnout kontakty mezi geometrií vzduchu a Idleru, dále z důvodu obtíženého síťování, velkého nárůstu časové náročnosti úlohy, a nakonec také z důvodu obtížné konvergence vyplývající z velkých rozdílů mechanických vlastností materiálu PETG a vzduchu, kterému musí být přiřazeny vlastnosti tuhých materiálů (velký rozdíl tuhostí). Dále by byla potřeba si poradit s nekonvergencí v případě zahrnutí viskózního tečení, protože již zahrnutí velkých deformací často vede k velkým problémům s jejím dosažením. Proto byla učiněna následující zjednodušení:

- nezahrnutí radiace z/do okolí
- nezahrnutí proměnlivosti konvekce v závislosti na poloze a čase
- nezahrnutí modelu materiálu zohledňujícího časovou závislost viskózního tečení
- nezahrnutí teplotní závislosti Poissonovy konstanty, hustoty materiálu, tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a teplotní vodivosti
- nezahrnutí anizotropních vlastností materiálu

Zkoumané faktory budou:

- teplota okolí při tisku
- teplota součásti při odebrání součásti z podložky

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

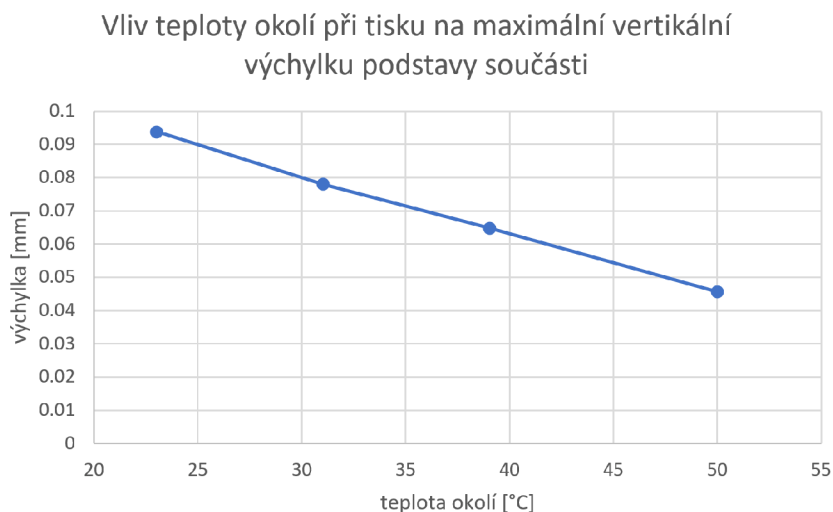
- poddajnost podložky
- ztráta soudržnosti mezi podložkou a tištěnou součástí při tisku (dále jen utrnutí při tisku)
- doba tisku
- vnitřní struktura

3.9.3. Zkoumání vybraných faktorů

Pokud nebude uvedeno jinak, všechna modelování byla provedena za podmínek uvedených v 3.7.2.3 a 3.8.1.

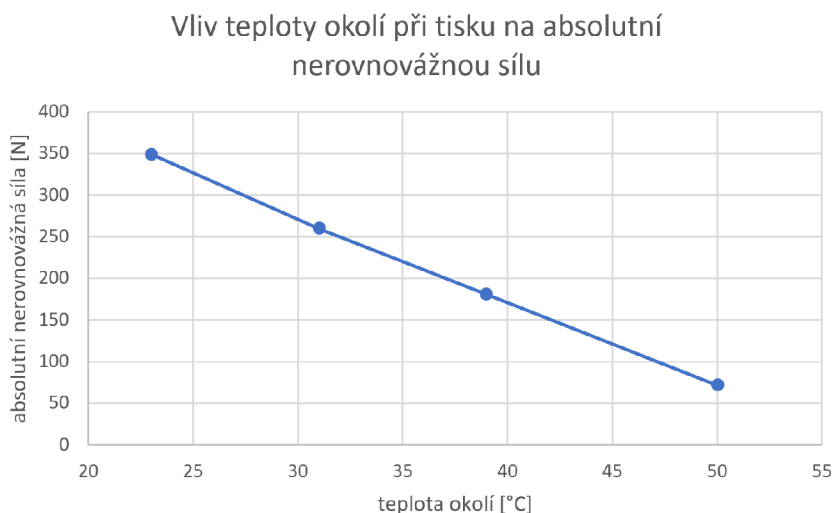
3.9.3.1. Teplota okolí při tisku

Obecně je známo, že na proces tisku má vliv teplota okolí. Míra vlivu tohoto faktoru byla modelována za použití originálního modelu geometrie (tj. neupravený model geometrie tisknutý ve firmě Prusa) v teplotním rozmezí, které odpovídá rozsahu naměřených teplot na farmě. Toto rozmezí bylo v době referenčního měření (květen 2019) 23 - 39 °C. Numerické modelování bylo provedeno při teplotách 23, 31 a 39 °C, tedy při rovnoměrném rozložení teplot. Následně byla přidán výpočet pro okolní teplotu 50 °C, aby byl vidět trend deformací součásti po odebrání z podložky za předpokladu zvýšení teploty na farmě. Výsledky simulace jsou na obr. 3.22 a 3.23.



Obrázek 3.22: Závislost maximální vertikální výchylky podstavy součásti po ochlazení a odebrání z podložky na okolní teplotě

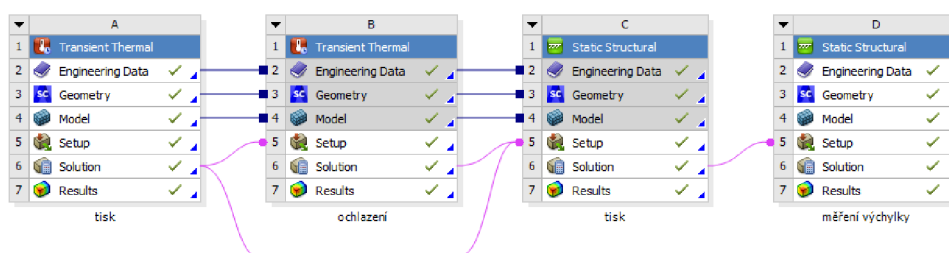
Výsledky ukazují, že zvýšením okolní teploty lze snížit jak vertikální deformaci, tak kontaktní tlaky mezi podložkou a součástí. Pokud by se okolní teplota zvýšila na 50 °C, mohla by vertikální deformace klesnout až o 50 % a kontaktní tlaky až o 80 %.



Obrázek 3.23: Závislost absolutní nerovnovážné síly v kontaktu mezi součásti a podložkou před ochlazením na okolní teplotě

3.9.3.2. Teplota součásti při odebrání z podložky

Cílem této analýzy je zjistit, jak silný může být vliv okamžitého odebrání součásti z podložky po tisku. Pro její provedení byla využita možnost uspořádání a přidání procesních kroků aplikace Workbench AM. Byly tedy modelovány dva postupy. První postup je klasický, tedy odebrání součásti z podložky po výtisku a ochlazení. Druhý postup je odebrání součásti z podložky hned po výtisku, až poté následuje ochlazení. První postup byl totožný jako v předchozích analýzách. Druhý vyžadoval následující řešení, které je znázorněno na obr. 3.24. Na první tranzientní teplotní úlohu modelující teplotní pole v průběhu tisku byla navázána druhá tranzientní teplotní úloha modelující chladnutí tisknuté součásti. Tato druhá teplotní analýza měla počáteční teplotní podmínky importovány z konečného kroku první teplotní analýzy. Ve strukturní analýze, označené na obr. 3.24 jako tisk, jsou tři zátěžné kroky. Prvním je proces tisku, druhým odebrání podložky a třetím ochlazování.



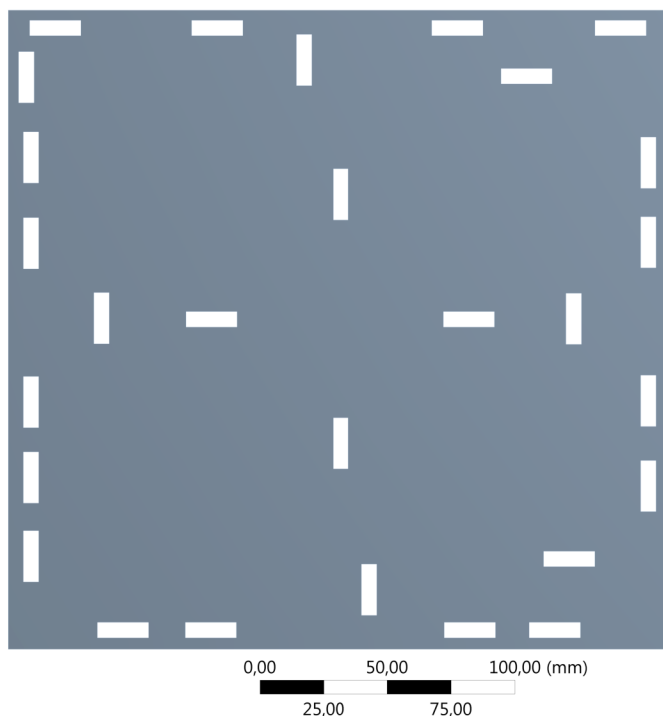
Obrázek 3.24: Schéma návaznosti jednotlivých úloh

Tato analýza ukázala, že teplota součásti při odebrání z podložky má výrazný vliv. Pokud součást nenecháme před odebráním z podložky vychladnout, může být nárůst deformace až 20 % za předpokladu, že se v průběhu ochlazování součást, která byla ponechána chladnout na podložce, neodtrhne sama vlivem chladnutím vyvolané napjatosti, což se obvykle stává. V praxi tedy nebude nárůst tak výrazný, a to také z důvodu poddajnosti podložky, která se při ochlazování může mírně prohnut, zatímco simulace uvažuje absolutně tuhoun podložku držící součást naprosto rovně po celou dobu chladnutí.

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

3.9.3.3. Poddajnost podložky

Přestože je konstrukce tiskárny Prusa poměrně bytelná, je možné, že přesnost tisku může být ovlivněna poddajností podložky pro tisk. Je to dáno konstrukčním řešením, kde podložka pro tisk, která je z oceli, má tloušťku 0.6 mm a k podkladu je připevněna magnety, které se vyskytují na konkrétních místech, viz obr. 3.25. Je tedy zřejmé, že tam, kde není podložka přichycena, je možný její průhyb ve směru nahoru.

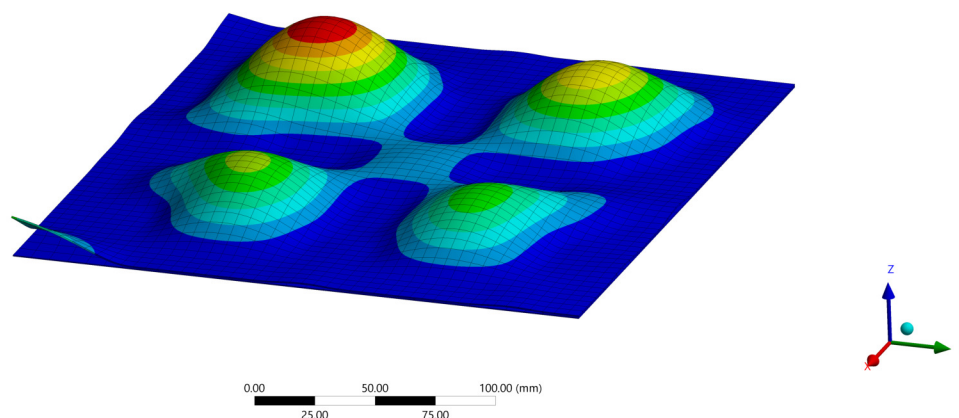


Obrázek 3.25: Rozmístění magnetů na podkladu pro podložku

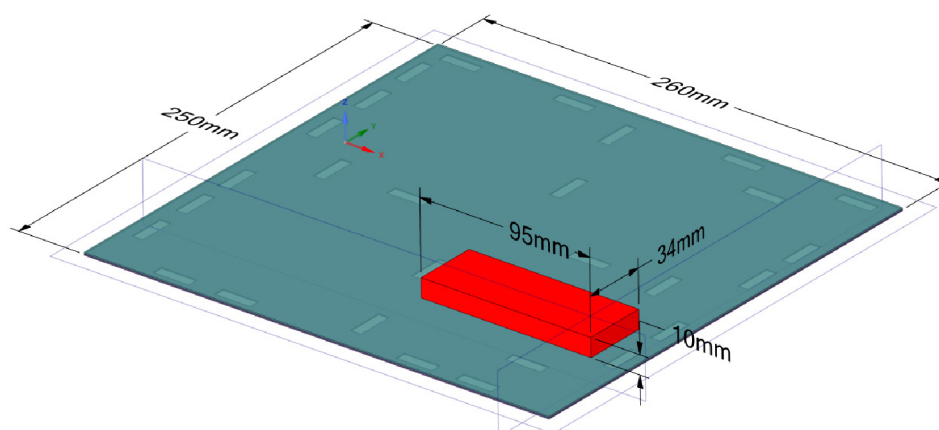
Nastavení úlohy

Proto byl vytvořen model podložky, který byl pevně přichycen v místech uložení magnetů (vetknutí), tedy předpokladem bylo, že nebude porušena soudržnost magnetu a podložky. Pod podložkou byl vymodelován podklad, jehož poddajnost již byla brána jako zanedbatelná, a proto mohl být po celé spodní ploše zavazben pomocí vetknutí. Mezi podkladem a podložkou je použit kontakt typu „Frictional“ s koeficientem tření 0.2. Tím je zabráněno průhybu podložky v opačném směru. Na obr. 3.26 je názorně ukázáno, jakým způsobem se podložka deformuje při zatížení rovnoměrně rozloženým tahovým napětím.

Tisknutá součást musela být zpočátku zjednodušena, jelikož součást Idler v této rozšířené úloze znemožňovala konvergenci. Byl tedy vytvořen model geometrie ve tvaru jednoduchého kvádrů o rozměrech podobných součásti Idler (viz. obr. 3.27).



Obrázek 3.26: Deformace podložky při zatížení rovnoměrně rozloženým tahem ve směru osy Z



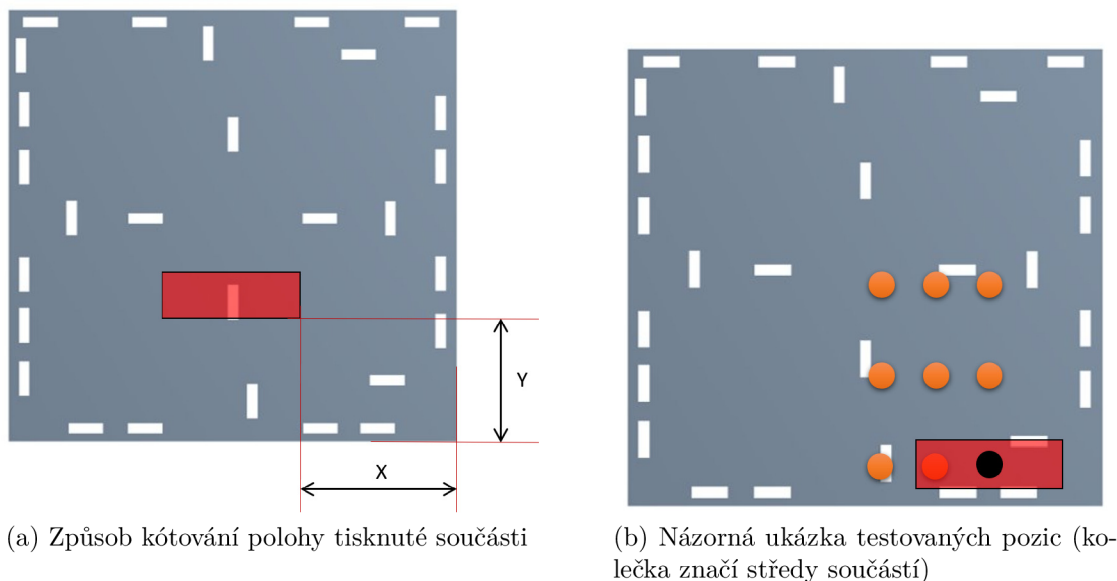
Obrázek 3.27: Model geometrie zjednodušené součásti na poddajné podložce

Výpočty

Analýza poddajnosti podložky byla provedena pomocí parametrické úlohy, kde vstupní parametr byl poloha tisknuté součásti na podložce a výstupní parametr byl maximální vertikální průhyb podstavy po odebrání z podložky (pozor na rozdílnost pojmů podstava a podložka). Poloha tisknuté součásti byla měřena od pravého dolního okraje podložky k pravému dolnímu okraji tisknuté součásti, viz. obr. 3.28(a), a byla určena dvěma parametry - vzdálenost v ose X a vzdálenost v ose Y. Simulovaných poloh bylo provedeno 9, viz. obr. 3.28 (b).

Provedením této parametrické úlohy byla vyhodnocena místa s největší a nejmenší vertikální výchylkou podstavy. Výsledky můžeme vidět na obr. 3.29 a 3.30. Zajímavé je, že

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA



Obrázek 3.28: Pozice na podložce

na místě, kde byla vytisknuta součást s minimální deformací, se podložka v průběhu tisku deformuje podstatně více než na místě, kde byla tisknuta součást s maximální deformací.

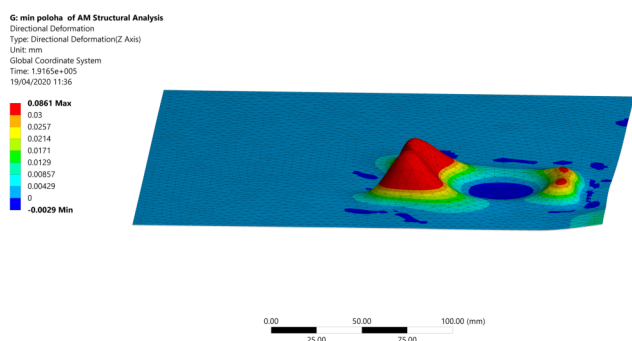
Jakmile byly zjištěny polohy součásti dávající maximální a minimální deformace podstavy, povedlo se naladit úlohu tak, aby byla počitatelná s velkými deformacemi i s geometrií součásti Idler. Proto pro tato vyhodnocená místa byly provedeny výpočty i s touto součástí a byly zkoumány deformace podložky a absolutní nerovnovážná síla.

Maximální vertikální deformace součásti Idler tisknuté na místě dávající maximální vertikální výchylku byla 0.25 mm, tedy o téměř 100 % větší než na místě dávajícím minimální vertikální výchylku, která byla 0.12 mm. Absolutní nerovnovážná síla však byla větší na místě dávající minimální vertikální výchylku a to o 13 % (330 a 291 N).

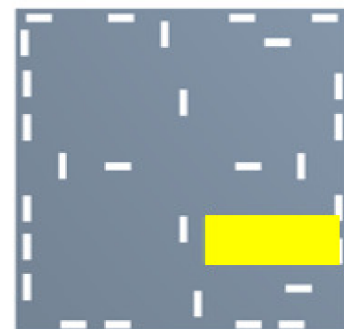
Vyhodnocení

Vertikální deformace součásti s maximální výchylkou je téměř **2 krát** vyšší než vertikální deformace součásti s minimální výchylkou. Z toho vyplývá, že volba polohy pravděpodobně hraje roli a že lze správnou volbou pozice součásti na podložce snížit deformace v ideálním případě až o **49 %**. Avšak tento závěr může být mylný proto, že nebere v potaz fakt, že při tisku na místě, kde má součást po výtisku menší výchylky, jsou v průběhu tisku vyšší kontaktní tlaky, které mohou způsobit utržení od podložky, což může mít podstatně horší následky než samotná volba polohy tisku. Posuzovat, zda kvůli vyšší kontaktním tlakům skutečně dojde k odtržení, je však bez podrobných experimentálních dat velmi obtížné. Přestože byl proveden experimentální test soudržnosti tisknutých součástí a podložky pro tisk (viz. 3.4.2), jeho výsledek měl obrovský rozptyl a získané informace nejsou pro vyhodnocení použitelné.

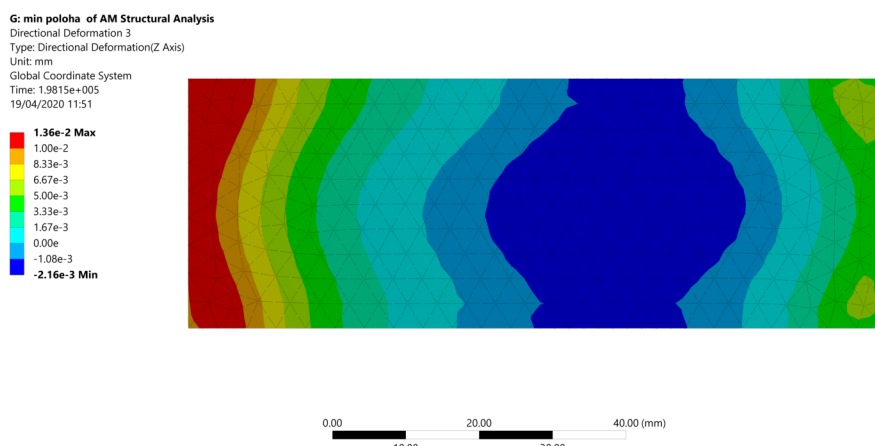
3. PRAKTICKÁ ČÁST



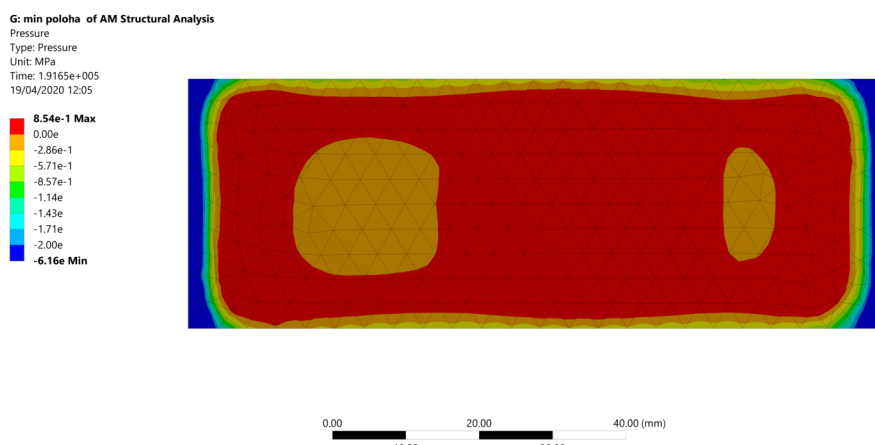
(a) Deformace podložky po ochlazení před odebráním součásti, deformace zvětšeny 300×



(b) Umístění



(c) Vertikální deformace podstavy tisknuté součásti, pohled zespodu

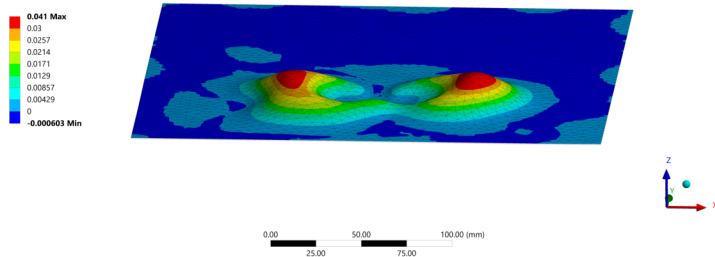


(d) Kontaktní tlak po výtisku a ochlazení, pohled zespodu

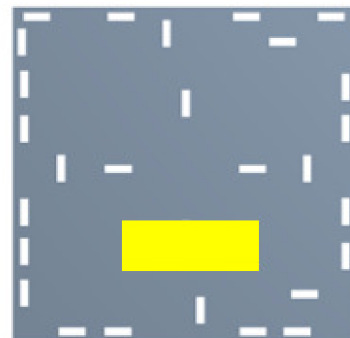
Obrázek 3.29: Výsledky výpočtu na místě vykazujícím minimální vertikální imperfekci tisknuté součásti

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

J: max poloha of AM Structural Analysis
 Directional Deformation 3
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1.9165e+005
 19/04/2020 11:37

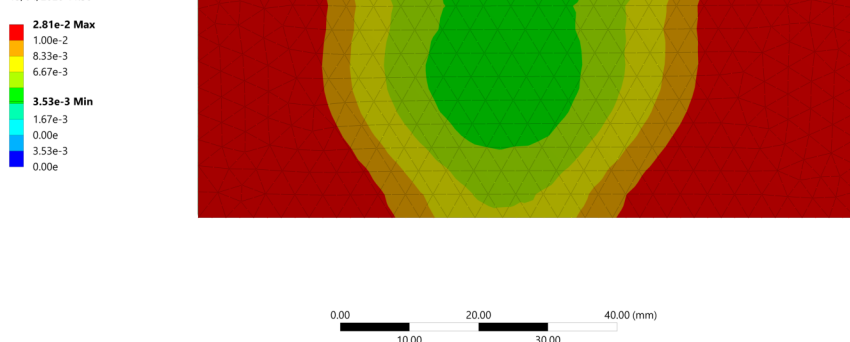


(a) Deformace podložky po ochlazení před odebráním součásti, deformace zvětšena 300×



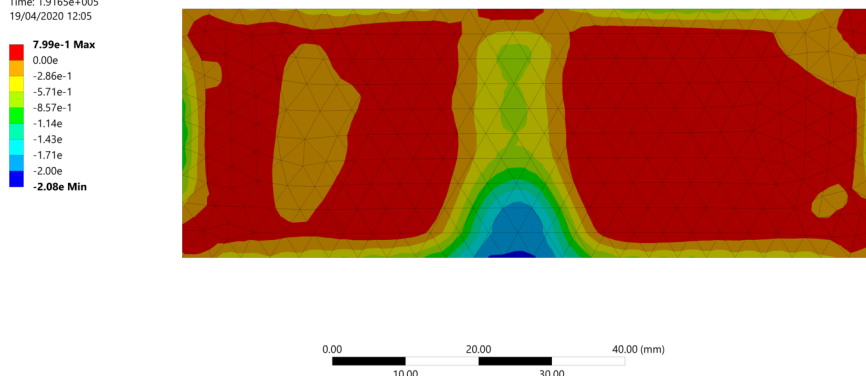
(b) Umístění

J: max poloha of AM Structural Analysis
 Directional Deformation
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1.9815e+005
 19/04/2020 11:50



(c) Vertikální deformace podstavy tisknuté součásti, pohled zespodu

J: max poloha of AM Structural Analysis
 Pressure
 Type: Pressure
 Unit: MPa
 Time: 1.9165e+005
 19/04/2020 12:05



(d) Kontaktní tlak po výtisku a ochlazení, pohled zespodu

Obrázek 3.30: Výsledky výpočtu na místě vykazujícím maximální vertikální imperfekci tisknuté součásti

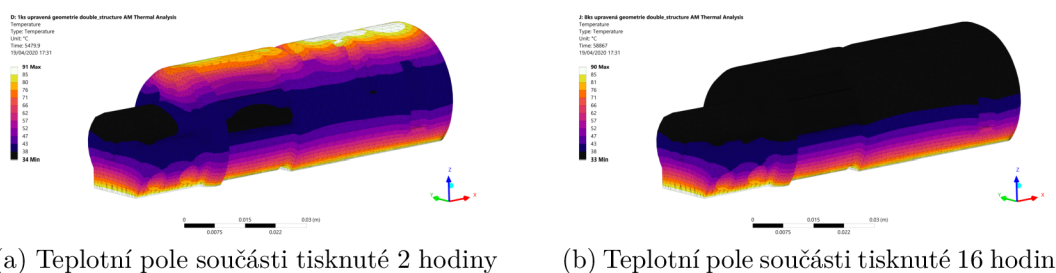
3.9.3.4. Utrhnutí z podložky při tisku

Vliv utrnutí součásti z podložky při tisku vychází z extrémního případu předchozí analýzy, a to z předpokladu nekonečné poddajnosti podložky. Tento případ byl vyhodnocen za předpokladu utržení hned na začátku tisku. Časová závislost utržení při tisku nebyla zkoumána. Vliv utržení součásti se ukázal být velmi významným faktorem. Přestože s přibývajícím časem bude tento faktor jistě ubývat na váze, i z praktických zkušeností s tiskem je zřejmé, že přesto bude po většinu času tisku velmi významný.

Tato zjištění nás mohou přivést k myšlence, že má význam zabývat se velikostí kontaktních tlaků mezi podložkou a tisknutou součástí a snažit se tyto kontaktní tlaky snížit. Více k této problematice v oddílu 3.9.3.6.

3.9.3.5. Doba tisku

Dalším faktorem, který by mohl být významný z pohledu deformace součásti při tisku, je doba tisku. Jelikož má však firma Prusa své specifické nastavení tisku, které je optimalizované z pohledu rychlost/kvalita, není možné zasahovat do parametrů samotného tisku. Jediné, co je možné ovlivnit je počet paralelně tisknutých součástí. Přípustný rozsah tiskového času je tak dán přibližně celočíselnými násobky času tisku jedné součásti Idler, přičemž maximální počet součástí, které se vejdu na jednu podložku, je 8. Proto budou testovány časy 1, 2, 3, 4 a 8 násobek tisku jedné součásti, to je přibližně 2, 4, 6, 8 a 16 hodin tisku. Čas hraje roli v rozložení teplotního pole, je tedy možné, že pozvolnější rozložení tisku v čase povede k obecně nižším teplotním gradientům. Nižší teplotní gradienty povedou přímo k nižšímu gradientu teplotních roztažností a ty zas k nižším napětím. Tato představa je však mylná, protože nebere v potaz jinou možnost, a to tu, že nižší ustálenost teplotního pole, tedy kratší doba tisku, může mít přesně opačný vliv. Abychom lépe pochopili důvod tohoto neintuitivního závěru, je nutné porovnat teplotní pole součásti tisknuté 2 hodiny (1 ks) a součásti tisknuté 16 hodin (8 ks), které vidíme na obr. 3.31.

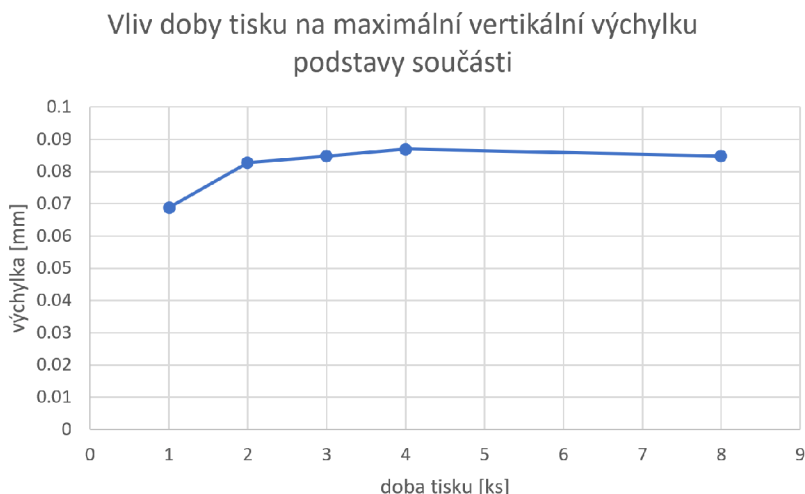


Obrázek 3.31: Porovnání teplotního pole v čase těsně po výtisku

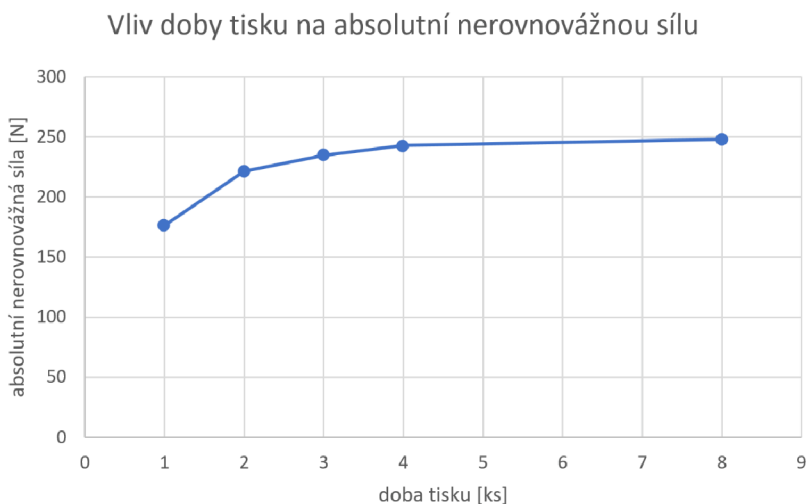
Protože je doba tisku přibližně přímo úměrná objemu materiálu tisknutých součástí, je možné v simulaci měnit dobu tisku změnou parametru rychlosti pohybu tiskové hlavy - přidáním další tisknuté součásti se doba tisku prodlužuje, tedy je možné snížit rychlost tisku a docílit stejné doby tisku bez potřeby přítomnosti více modelů geometrie. Tím dochází k velké úspoře výpočetního času. Na obrázcích vidíme, že při rychlejší tisku je ve středu výšky součásti nižší teplota než v její horní části. To je způsobeno rychlým kladením vrstev v horní části, kde se zmenšuje plocha jednotlivých vrstev, a tedy i zkracuje čas potřebný pro položení vrstvy. Tím dojde k nakumulování většího tepla v horní části. Při chladnutí toto víceméně symetrické rozložení okolo střední výšky součásti způsobí

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

vzájemné vyrovnání deformací. Na obr. 3.32 a 3.33 je zobrazena závislost maximální vertikální výchylky podstavy a absolutní nerovnovážné síly v kontaktu mezi podložkou a tištěnou součástí. Můžeme si všimnout, že s rostoucí dobou tisku mají oba parametry snahu blížit se ke konečné hodnotě. Důvod je zřejmý a to ten, že teploty se při pomalém pokládání vrstev stihnou ustálit. Při skutečném tisku může být vliv ještě výraznější, jelikož použitý model materiálu není schopen postihnout viskózní relaxaci napětí v průběhu tisku.



Obrázek 3.32: Vliv doby tisku na maximální vertikální výchylku podstavy tisknuté součásti po odebrání z podložky

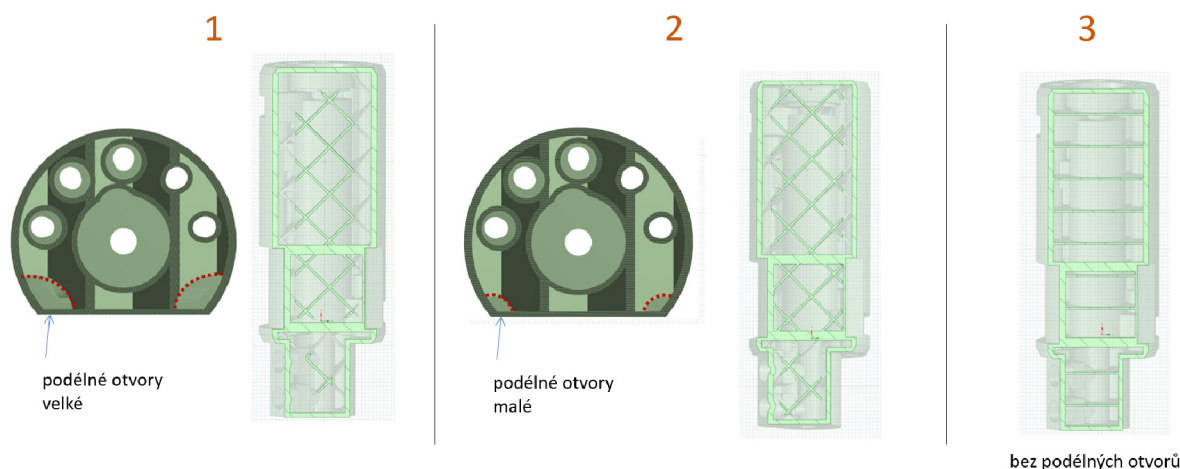


Obrázek 3.33: Vliv doby tisku na absolutní nerovnovážnou sílu v kontaktu před ochlazením součásti

3.9.3.6. Struktura vnitřní výplně

Měnit vnější geometrii součásti Idler nebylo v naší kompetenci, a proto se nabízela možnost změny struktury vnitřní výplně, která má na deformaci při tisku také vliv. Je potřeba říct, že volba vhodné vnitřní struktury není tak intuitivní, jak by se mohlo na první pohled zdát. To uvidíme na konkrétních testovaných strukturách, u kterých se ukázalo, že dané

úpravy měly často jiný účinek, než který se u nich očekával. Byly testovány celkem 4 různé úpravy vnitřní struktury. První tři z nich vidíme na obr. 3.34.

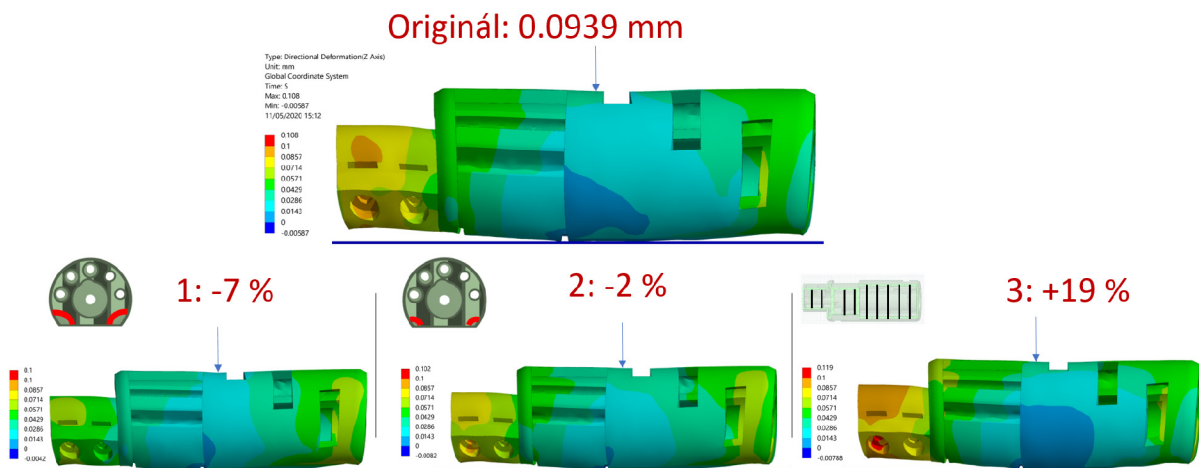


Obrázek 3.34: Uvažované geometrie s rozdílnou vnitřní strukturou

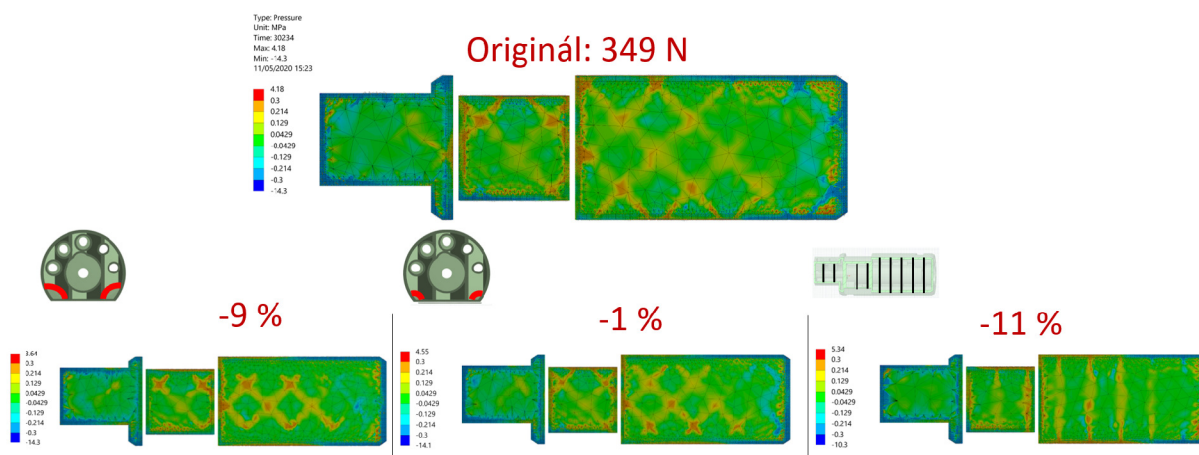
První dvě úpravy byly vytvořeny za účelem snížení kontaktních tlaků. Jejich smyslem bylo odebrat materiál v místech, kde dochází k největší kumulaci kontaktních tlaků, tedy na krajích. Předpokladem bylo, že odebráním materiálu budou kontaktní tlaky nuceny změnit své rozprostření, jelikož se nebudou moct opřít tam, kde materiál chybí. Byly provedeny dvě varianty - první s větším odebráním a druhá s menším odebráním materiálu. Na těchto dvou variantách bylo modelováno, jaký vliv má velikost odebrání materiálu v okrajích na absolutní nerovnovážnou sílu v kontaktu. Tato síla byla sledována v okamžiku **těsně po výtisku a zároveň před ochlazováním**. Výsledky analýzy ukázaly, že tato úprava vliv má a že velikost odebraného materiálu je podstatná. Zatímco v prvním případě, kde bylo materiálu odebráno více, klesla absolutní nerovnovážná síla oproti originální geometrii o 9 %, ve druhém případě s menším odebráním materiálu klesla absolutní nerovnovážná síla o pouhé 1 %. Přesto je zřejmé, že úprava má smysl.

U třetí úpravy geometrie byl účel snížit vertikální deformaci součásti. Smyslem úpravy bylo snížit velikost síly, jež je vyvolaná teplotní deformací součásti, a která způsobuje ohybový moment jenž součást při tisku ohýbá. Toho mělo být dosaženo změnou vnitřní struktury výplně. Mřížkovitá výplň, oproti výplni použité v této úpravě, zvyšuje velikost plochy průřezu, který přenáší sílu v podélném směru. Za předpokladu, že teplotně vyvolaná deformace bude pro různé geometrie totožná (předpoklad stejného teplotního pole), lze očekávat, že síla v podélném směru, kterou tato deformace vyvolá, bude přímo úměrná velikosti plochy průřezu kolmého na podélný směr. Ačkoliv se tato úprava zdála být logická, výsledek simulace ukázal, že její vliv byl opačný. Maximální vertikální deformace podstavy součásti vzrostla o **19 %**. Pro zajímavost je možné zmínit, že absolutní nerovnovážná síla klesla o **10 %**. Je tedy zřejmé, že tato úprava ke snížení vertikální deformace součásti nevede. Důvodem je pravděpodobně zanedbání skutečnosti, že zatímco vyvolaná síla (potažmo ohybový moment) roste přímo úměrně velikosti plochy průřezu součásti, tak ohybová tuhost, která může klást odpor zatížení vyvolanému ohybovým momentem, roste se třetí mocninou výšky součásti. Na obr. 3.35 a 3.36 jsou porovnány jednotlivé úpravy geometrie s originální geometrií.

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA



Obrázek 3.35: Porovnání vertikálních deformací jednotlivých úprav, jednotná škála, deformace zvětšeny 30×

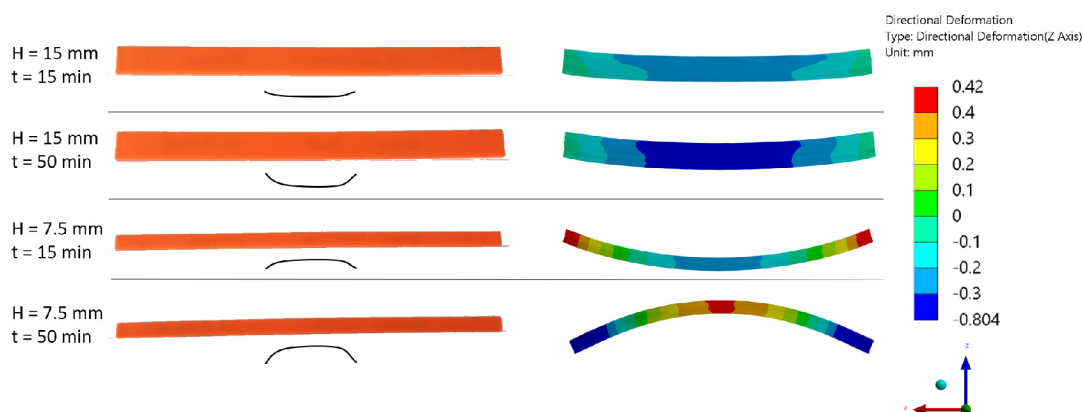


Obrázek 3.36: Porovnání kontaktních tlaků jednotlivých úprav, jednotná škála

Vliv výšky tištěné součásti na směr vertikální deformace

Aby mohla být opodstatněna další geometrická úprava, je potřeba uvést několik následujících informací. Při simulaci tisku součásti jednoduché geometrie ve tvaru nízkého trámku (výška cca 5 mm) byl získán neočekávaný výsledek deformace po výtisku a odebrání z podložky. Okraje součásti se prohýbaly na opačnou stranu, než bylo obvyklé, tedy směrem dolů. Výsledek simulace nebyl brán příliš vážně, ale přece jen byl proveden experiment a součást s totožnou geometrií byla vytisknuta i na skutečné tiskárně. O to překvapivější bylo zjištění, že vytištěná součást skutečně měla tendenci prohýbat se v opačném smyslu než je obvyklé. Experimentálně i pomocí simulací bylo dále zjištěno, že směr a velikost deformace neovlivňuje pouze výška součásti, ale také doba tisku. Na obr. 3.37 můžeme porovnat výsledky simulace a experimentu. Na experimentálních snímcích je průhyb naznačen prohnutou křivkou, jelikož nebylo možné jej vyfotit tak, aby byl dobře viditelný. Lze vidět, že přesto, že simulace přesně neodpovídá experimentu (především co se týče hodnot vertikální deformace z absolutního hlediska), podařilo se v ní daný jev

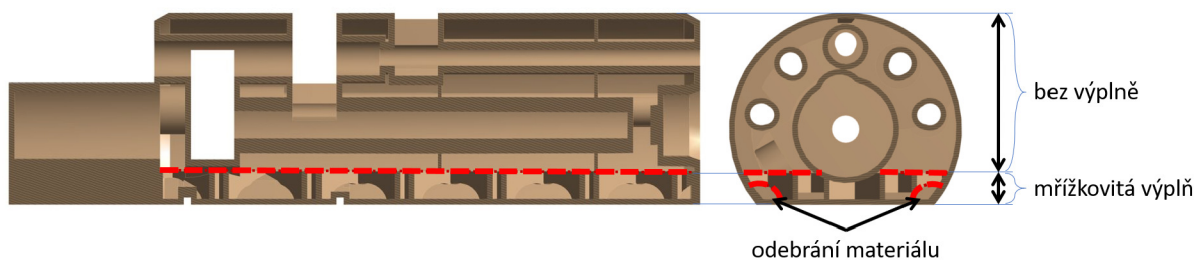
modelovat. Z uvedeného vyplývá, že parametry jako výška součásti a doba tisku ovlivňují teplotní pole tisknuté součásti a to dokáže ovlivnit i směr deformace.



Obrázek 3.37: Porovnání vertikálních deformací trámek z experimentu a simulace, rozměry $200 \times 2 \times H$, H... výška, t... čas, simulace $10 \times$ scale

Finální úprava

Na základě předchozího zjištění závislosti směru ohybu na výšce tisknuté součásti byla vytvořena úprava geometrie součásti Idler, která tuto závislost využila ke snížení vertikální deformace. Myšlenka byla taková, že pakliže má součást do určité výšky tendenci ohýbat se v opačném smyslu než zbytek součásti, můžeme zvýšit efekt ohybu v opačném směru tím, že zvýšíme tuhost části, která má tendenci se v tomto opačném směru ohýbat a naopak snížit tuhost zbytku součásti, která má tendenci ohýbat součást klasickým způsobem, tedy do tvaru U. Proto byl vytvořen model geometrie, který lze vidět na obr. 3.38. Tento model má do výšky 6 mm typickou mřížkovou výplň s vysokou tuhostí a dále již nemá výplň žádnou, tedy jde pouze o skořápku. Zároveň byla použita stejná úprava geometrie jako je na obr. 3.34 u úpravy číslo 2, která měla mírně odlehčit kontaktním tlakům na okrajích podstavy součásti.



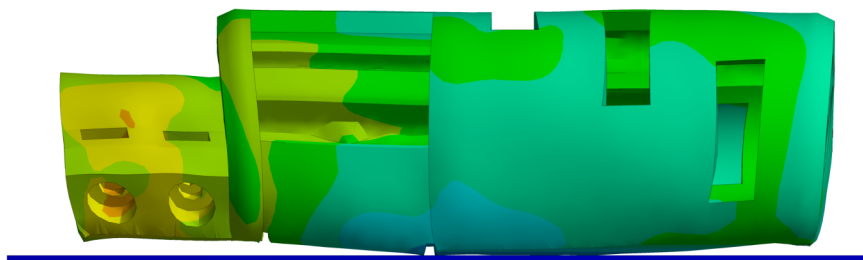
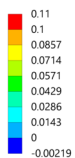
Obrázek 3.38: Finální úprava modelu geometrie součásti Idler

Tato finální úprava dle předpokladů vykazala nižší vertikální deformace i absolutní nerovnovážnou sílu v kontaktu s podložkou. Výsledky lze vidět na obr. 3.39 a 3.40. Maximální vertikální deformace podložky je 0.078 mm, což je o 17 % nižší hodnota než deformace originálního modelu geometrie a absolutní nerovnovážná síla v kontaktu mezi podložkou a podstavou je 243 N, což je o 30 % nižší hodnota než u originálního modelu geometrie. Zda je upravená geometrie vyhovující z hlediska pevnosti a tuhosti při provozním zatížení v této práci nebylo ověřováno, jelikož v tomto směru aktuálně nejsou známy téměř

3.9. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

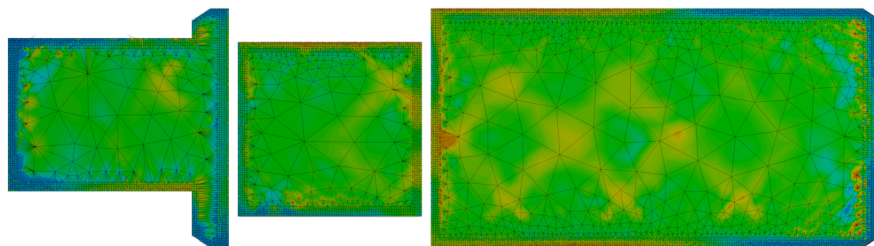
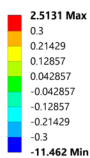
žádné požadavky ze strany firmy Prusa. Předpokládá se diskuze s návrhovým oddělením a spolupráce na vývoji dalšího konstrukčního návrhu.

P: naklopení, up.geom.4ks DOUBLE STRUCTURE - odebrání base po ochlazení
Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 5
Max: 0.11
Min: -0.00219
11/05/2020 14:21



Obrázek 3.39: Vertikální deformace finální úpravy součásti Idler

O: 4ks upravená geometrie double_structure AM Structural Analysis
Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa
Time: 26914
11/05/2020 14:29



Obrázek 3.40: Kontaktní tlaky finální úpravy součásti Idler

4. Závěr

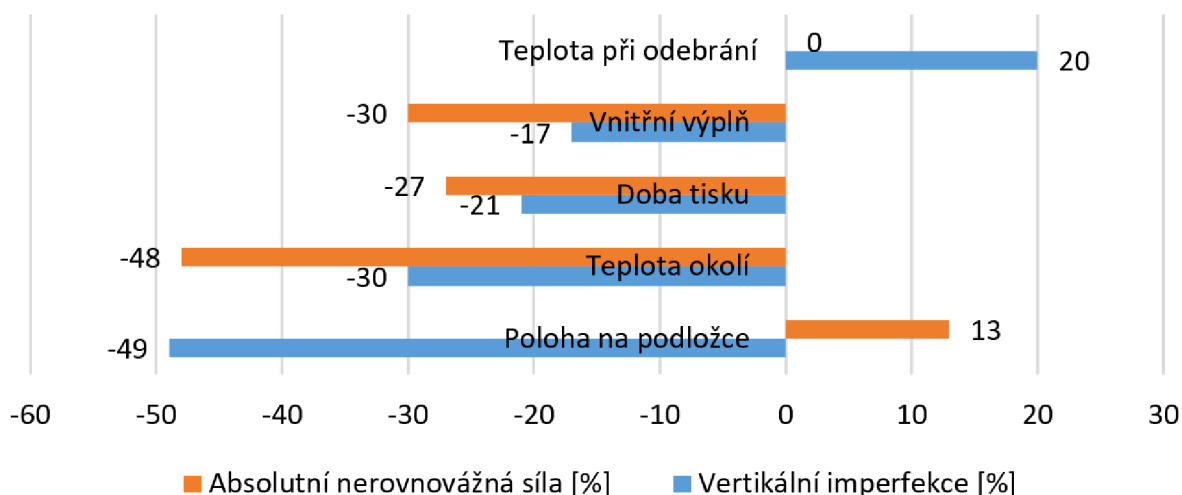
V práci byla provedena citlivostní analýza různých vlivů na velikost vertikální deformace podstavy tisknuté součásti Idler a na velikost kontaktních tlaků mezi tisknutou součástí a podložkou pro tisk. Vertikální deformace byla zkoumána po výtisku, ochlazení a odebrání z podložky (geometrická výrobní imperfekce měřená jako odchylka od rovinnosti podstavy). Kontaktní tlaky byly zkoumány po výtisku a zároveň před ochlazením tisknuté součásti. Velikost kontaktních tlaků je reprezentována v této práci zavedenou veličinou absolutní nerovnovážná síla. Zkoumané vlivy byly tyto: vliv teploty okolí při tisku, vliv teploty součásti při odebrání z podložky, vliv polohy součásti na podložce při tisku, vliv utržení při tisku, vliv doby tisku a vliv konstrukční úpravy vnitřní výplně součásti Idler. Zároveň byl testován vliv některých zjednodušení na velikost vertikální imperfekce součásti Idler. Testovaná zjednodušení byla použití větší výšky vrstev elementů než je skutečná výška vrstev, zanedbání velkých deformací a zanedbání závěrečného ochlazení podložky pomocí konvekce. Pro naladění teplotního pole tranzientní teplotní úlohy byly použity snímky z termokamery pořízené přímo na farmě firmy Průša Research. Pro naladění modelu materiálu pro strukturální část modelování procesu tisku byly při různých teplotách provedeny tahové zkoušky zkušebních vzorků vytištěných z materiálu PETG a jejich vyhodnocení pomocí programovacího jazyka Python. Dále byl proveden experiment, jehož cílem bylo vyhodnotit velikost kontaktního tlaku nutného pro utržení vytisknuté součásti z podložky. Tento experiment se však ukázal být obtížně proveditelný, pokud by jeho výsledky měly být skutečně reprezentativní. Proto bylo od vyhodnocení tohoto experimentu upuštěno.

4.1. Shrnutí výsledků citlivostní analýzy

Výsledky citlivostní analýzy jsou shrnuty v tabulce na obrázku 4.1. V této tabulce je vyjádřeno, jaký maximální vliv může mít změna daného parametru na výslednou vertikální imperfekci a absolutní nerovnovážnou sílu. U všech parametrů je vyčísleno maximální možné zlepšení (snížení vertikální imperfekce/absolutní nerovnovážné síly) oproti dosažitelným nejhorším podmínkám na farmě. Tedy až na parametr **teplota při odebrání**, který naopak vyjadřuje zhoršení, které by nastalo, pokud bychom vytisknutou součást nenechali plně vychladnout na pokojovou teplotu. U parametru **poloha na podložce** je pro absolutní nerovnovážnou sílu uvedeno zvýšení kontaktního tlaku, a to proto, že při nejmenších hodnotách vertikální deformace dosahuje tato síla vyšších hodnot. Rozmezí parametru **teplota okolí** je dáno naměřenými podmínkami na farmě, tedy 23-39 °C. Parametr **doba tisku** je porovnáván vůči (v současnosti) používané době tisku, která je 8.5 hodin (4 kusy tisknuté paralelně).

Z tabulky vyplývá, že největšího zlepšení výrobní přesnosti lze dosáhnout vhodným rozmístěním součástí na podložce pro tisk. Nicméně proto, že se firma Průša potýká i s problémy utržení (ztráta soudržnosti mezi součástí a podložkou) při tisku, které následně vyústí v nesplnění výrobní tolerance, je možné součásti rozmístit tak, aby byly minimalizovány kontaktní tlaky. Jelikož je však změnou tohoto parametru možno dosáhnout zlepšení maximálně 12 %, je pro snížení kontaktních tlaků lepší využít parametry jako je teplota okolí, doba tisku či vnitřní struktura. Zkrácení doby tisku je však nevhodné z hlediska efektivity provedené práce, a to z důvodu nutnosti provedení procesních kroků

4.1. SHRnutí VÝSLEDKŮ CITLIVOSTNÍ ANALÝZY



Obrázek 4.1: Porovnání možných zlepšení/zhoršení vertikální imperfekce a absolutní nerovnovážné síly v závislosti na vybraných parametrech

jako je čištění podložky pro tisk, nastavování tisku atd. po každém tisku. Efektivitu práce lze ovšem zvýšit větším počtem paralelně tisknutých součástí, jelikož od počtu 4 paralelně tisknutých kusů již doba tisku výrazně vertikální deformaci ani velikost kontaktních tlaků neovlivňuje. Co se týče vlivu teploty okolí, dle výpočtů jde o velmi vlivný faktor, jehož změnou lze dosáhnout velkého snížení vertikálních deformací a především kontaktních tlaků. Pro firmu Průša se tak nabízí možnost vzít tento vliv v potaz a provést řádný experiment, který by výsledky simulací potvrdil či vyvrátil.

Jednotlivá procentuální snížení imperfekce ani kontaktních tlaků nelze sčítat, protože jsou vztaheny ke zvolenému výchozímu nastavení. Vhodně zvolenou kombinací zavedených změn by však mělo být možné dosáhnout zlepšení 50-70 procent, přičemž tento odhad je učiněn na základě zkušeností získaných touto prací. Co se zmetkovitosti týče, je obtížné převést zlepšení na konkrétní hodnotu snížení zmetkovitosti, protože firma Průša aktuálně nevede podrobnější statistické údaje týkající se výrobních imperfekcí a sledování vlivů. O jejich zavedení na základě této práce však významně uvažují.

Obecně lze říct, že výsledky této práce mohou být pro firmu Průša podnětem k dalšímu vývoji dílu a ověřování při výrobě na jejich výrobní farmě. Z hlediska přesnosti bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. Napočítané výrobní imperfekce jsou v rozmezí běžně naměřených hodnot firmou Průša, a to i přes komplikovanost teplotně-strukturálních výpočtů v časové oblasti s postupným aktivováním vrstev, kdy bylo třeba použít materiálový model, který zohledňuje tečení materiálu PETG (teplotně závislý bilineární elasto-plastický izotropní model materiálu). I přesto se zde však nabízí možnost zpřesňování výpočtových modelů a modelu materiálu. Prostor je zde jak v oblasti odvodu tepla konvekcí, kvality sítě, viskózního chování v časové oblasti, tak i anizotropie materiálu, avšak zahrnutí těchto oblastí by bylo nad rámec rozsahu této práce. Je tedy zřejmé, že výsledky dosažené použitým způsobem modelování mohou být pobídkou k vývoji perspektivního odvětví simulace plastového 3D tisku či tisku z jiných materiálů, které vykazují vysoce nelineární, anizotropní a časově závislé chování. Největší přínos této práce je spatřován v oblasti malosériové výroby, kde optimalizace konstrukce výrobků a procesu tisku může ušetřit nemalé náklady.

Literatura

- [1] Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. *Live Science* [online]. New York: Future US, 2012 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [2] FDM. In: *Studio da Giacomo* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.studiodagiacomio.it/wordpress/wp-content/uploads/2014/11/FDM.png>
- [3] SCHOINOCHORITIS, Babis, Dimitrios CHANTZIS a Konstantinos SALONITIS. Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016, **231**(1), 96-117. DOI: 10.1177/0954405414567522. ISSN 0954-4054. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405414567522>
- [4] AM Process Simulation Workflow. *ANSYS Help* [online]. 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/add_ag/def_amprocess_steps_wowiz.html
- [5] Understanding Element Birth and Death. *ANSYS Help* [online]. ANSYS, 2020 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/ans_adv/Hlp_G_ADV6_1.html
- [6] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Liberec: Code Creator, 2016 [cit. 2020-04-04]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [7] DUPAIX, Rebecca B. *Temperature and Rate Dependent Finite Strain Behavior of Poly(ethylene terephthalate) and Poly(ethylene terephthalate)- glycol above the Glass Transition Temperature*. Massachusetts, 2003. Disertace. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering. Vedoucí práce Mary C. Boyce.
- [8] ZHAO, Yu, Yuansong CHEN a Yongjun ZHOU. Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses. *Elsevier* [online]. 2019, **181** [cit. 2020-04-04]. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108089. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127519305271>
- [9] DOMINGO-ESPIN, Miquel, Josep M. PUIGORIOL-FORCADA, Andres-Amador GARCIA-GRANADA, Jordi LLUM-, Salvador BORROS a Guillermo REYES. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Elsevier* [online]. 2015, **83**, 670-677 [cit. 2020-04-04]. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515004244>
- [10] LAY, Makara, Nuur Laila Najwa THAJUDIN, Zuratul Ain Abdul HAMID, Arjuzan RUSLI, Muhammad Khalil ABDULLAH a Raa Khimi SHUIB. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B* [online]. 2019, **176** [cit. 2020-04-04]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107341. ISSN 1359-8368.

LITERATURA

- [11] Nesoudružnost vrstev. In: *Prusa Research* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://cdn.prusa3d.com/wp-content/uploads/2019/01/image27.jpg>
- [12] Polyethylene Terephthalate Key Properties. In: *Phoenix Technologies* [online]. Phoenix: Phoenix Technologies, 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.phoenixtechnologies.net/media/371/PET%20Properties%202008.pdf>
- [13] Overview of materials for PETG Copolyester. *MatWeb* [online]. Blacksburg: MatWeb, 2011 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0
- [14] PETG Technical Data Sheet. In: *SD3D* [online]. San Diego, CA: SD3D, 2013 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PETG_01.pdf
- [15] PETG DATA SHEET. In: *Rigid.ink* [online]. Wetherby: Rigid.ink, 2014 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: https://devel.lulzbot.com/filament/Rigid_Ink/PETG%20DATA%20SHEET.pdf
- [16] Glycol-Modified Polyethylene Terephthalate (PETG, PET-G). *Material Properties Database* [online]. 2009 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Glycol-Modified-Polyethylene-Terephthalate-PETG-PET-G>
- [17] PETG data sheet. In: *Righton Blackburns* [online]. Kingswinford [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <http://www.righton.co.uk/PDF/PETG/PETG%20-%20Clear.pdf>
- [18] Uspořádání tiskáren na farmě. In: *Josef Průša* [online]. Praha: Prusa Research, 2018 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/wp-content/uploads/2018/02/farm01.jpg>
- [19] OSAMA, Mohammed. *Solution of Problems in Heat Transfer* [online]. Saarbrücken: Lap Lambert Publishers, 2017. ISBN 978-3-659-66822-7.
- [20] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-887-8.