



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**ÚSTAV
ŘÍZENÍ A EKONOMIKY
PODNIKU**

Název tématu výukového materiálu

Proces aditivní výroby a jeho kroky

Výukový předmět

MODERNÍ NÁSTROJE VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ

Autoři

Ing. Pavel Scholz

Tvorba výukového materiálu byla podpořena interním grantem Fakulty strojní ČVUT v Praze

Vnitřní soutěž 2015



Obsah

Úvod	3
1 Tvorba konceptu a vytvoření 3D CAD modelu	3
2 Transformace na STL formát	4
3 Práce s STL souborem a jeho přenos do stroje	4
4 Příprava a nastavení stroje, výstavba modelu (výroba součástí/součástí)	5
5 Postprocessing (následné zpracování)	6
5.1 Očistění součásti	6
5.1.1 Přirozená podpěra (opora)	7
5.1.2 Umělá podpěra (opora)	7
5.2 Konečná úprava	8
Závěr	9
Seznam zdrojů	9

Úvod

Samotné vymezení procesu aditivní výroby je důležité z mnoha důvodů. Může se jednat např. o cestu ke snazšímu porozumění celého procesu v rámci vzdělávání se, o cestu ke snazší implementaci, plánování a řízení procesu v podniku nebo např. o nutnost k provedení co nejpřesnější kalkulace nákladů. Když známe proces a jednotlivé etapy výroby, jsme schopni jim přiřadit zdroje a náklady na ně a následně tak určit i náklady na samotný produkt (výrobek, součást).

Proces aditivní výroby je v našem případě složen z 5 kroků (Obr. 1): (1) Tvorba konceptu a 3D modelu, (2) Transformace formátu na STL, (3) Práce s STL, (4) Příprava, nastavení stroje a výstavba součásti a na závěr (5) Postprocessing. Jednotlivé kroky jsou blíže rozebrány v dalších kapitolách. Kroky jsou obecně platné pro všechny aditivní technologie, neznamena to však, že některé technologie nemohou obsahovat další kroky zde nezmíněné.

[2,3,4,5]



Obr. 1 Proces aditivní výroby [1]

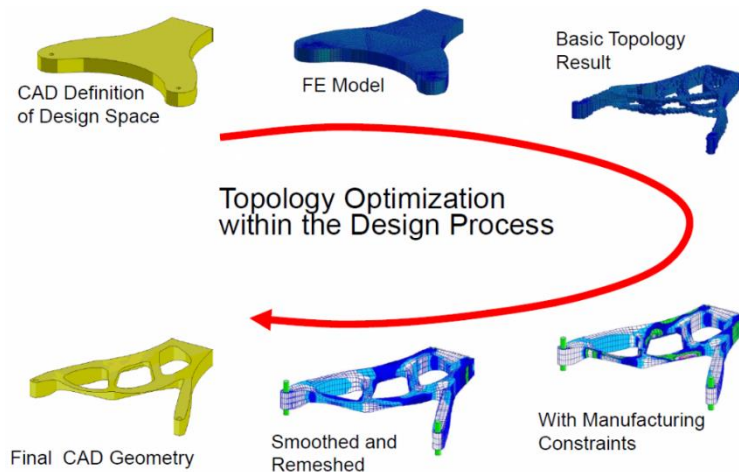
1 Tvorba konceptu a vytvoření 3D CAD modelu

Prvním krokem procesu návrhu součásti (výrobku) a její výroby pomocí aditivní technologie musí být vytvoření konceptu, který bude řešit vzhled a funkčnost. Měl by být tvořen textovou částí, nákresey a skicami. Následně se teprve může přistoupit k vytvoření 3D CAD modelu (včetně topologické optimalizace – Obr. 2), který nebude sloužit pouze pro převedení do STL formátu, ale taktéž k provedení analýzy napětí, FEM analýzy, plánování pro výrobu apod.

Obecně může být model vytvořen přímo uživatelem v 3D CAD softwaru nebo pomocí technologie revers engineeringu. Kvalita 3D modelu je jedním z kritických prvků pro vyrobení kvalitní součásti aditivní technologií. Modelovací techniky používané pro tradiční výrobní technologie nemusí být v tomto případě použitelné. Model nesmí být defektní – v modelu se nesmí objevovat trhliny, mezery nebo další nedostatky, jinými slovy model musí být „uzavřený“. Nekvalitní model může vést ke špatným výrobkům nebo nestabilitě souboru.

Neplatí zde jako u tvorby modelu pro CNC, že: „To, co vidím, je tím, co dostanu“. První etapa je nejdelší v celém procesu návrhu a výroby produktu.

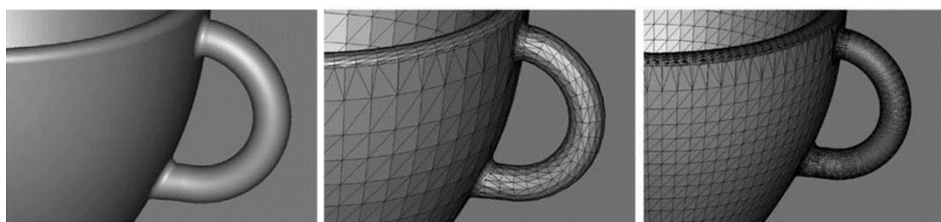
[2,3,4]



Obr. 2 Topologická optimalizace produktu v rámci jeho vývoje [6]

2 Transformace na STL formát

Pro většinu systémů aditivní výroby je nutné převést 3D model do STL formátu^{1,2}, který je oproti běžně využívaným CAD formátům jednodušší, protože obsahuje méně informací. Při exportu do STL formátu je cílem vybalancovat kvalitu a velikost souboru. U STL formátu jsou odstraněna konstrukční data, historie apod. a povrch součásti (modelu) je transformován na síť malých trojúhelníků (Obr.3). Pokud se k exportu do STL formátu nepoužívá málo výkonný počítač, trvá tato etapa pouze několik minut. Na závěr je soubor odeslán do řídicího počítače stroje nebo do počítače s „CAM“ softwarem pro aditivní technologie (např. MAGICS software od belgické společnosti Materialise³). [2,3,4,5]



Obr. 3 Originální CAD model konvertovaný do STL formátu [7]

3 Práce s STL souborem a jeho přenos do stroje

V této fázi je nejprve nutné např. pomocí softwaru MAGICS provést verifikaci vygenerovaného STL souboru, abychom zkontrolovali, zda soubor neobsahuje chyby. U

¹ Název byl odvozen od první aditivní technologie – Stereolithography.

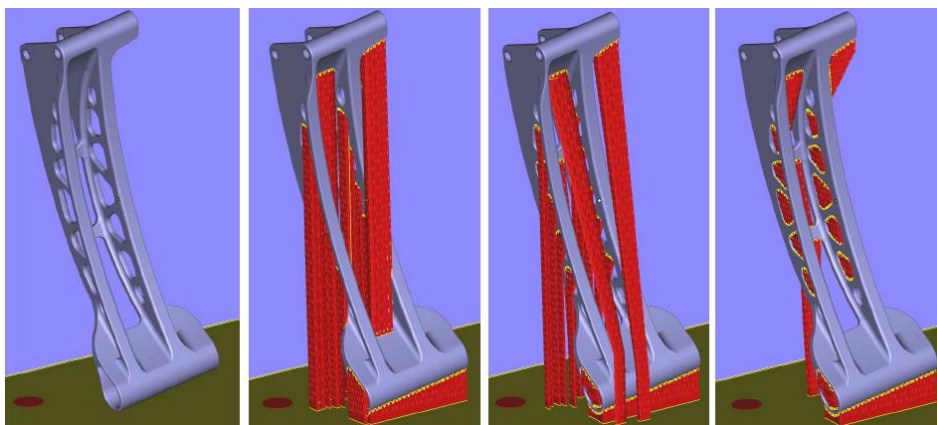
² S STL formátem umí v dnešní době pracovat všechny moderní CAD softwary. V roce 2013 však spatřil světlo světa formát nový, zvaný ISO/ASTM 52915:2013 a založený na STL formátu.

³ www.materialise.com

méně závažných chyb (překrývající se trojúhelníky, shodné trojúhelníky, ...) je uživateli nabídnuta možnost jejich opravy v rámci STL souboru, a to buď automaticky, nebo ručně. U složitějších chyb se uživatel neobejde bez úpravy původního CAD modelu a jeho opětovné transformace na STL formát. K návratu do CAD softwaru se uživatel musí uchýlit také při příliš velkých a moc viditelných fasetách.

Když je STL soubor v pořádku, může se přistoupit k jeho dalšímu zpracování – optimalizace pro výrobu (Obr. 4): umístění součásti v prostoru, orientace součásti pro výrobu, vytvoření podpěr, uspořádání vyráběných součástí na ploše apod. Dále se soubor (součást) rozdělí na jednotlivé vrstvy, např. u technologie SLA se tloušťka vrstev pohybuje v rozsahu od 0,12 mm (minimum) do 0,50 mm (maximum). Podpěry pak mohou mít hrubší nastavení. Již v této fázi je někdy možné také nastavovat technologické parametry jako výkon laseru, hloubku vytvrzování, postup výroby a další fyzikální parametry. Na závěr se vygeneruje výrobní soubor, pro řízení stroje.

[2,3,4,5]



Obr. 4 Optimalizace pozice pro výrobu včetně řešení podpěr [8]

4 Příprava a nastavení stroje, výstavba modelu (výroba součásti/součástí)

Před zahájením výroby je nutné stroj připravit a nastavit (Obr. 5). V rámci přípravy stroje se stroj vyčistí, doplní se materiál do zásobníků, v některých případech (u starších strojů) může být vyžadováno nastavení zásobníku do provozního stavu. Případně se ověří, zda je k dispozici dostatek plynů pro ochrannou atmosféru, pokud je k výrobě potřeba. Následně se na ovládacím panelu stroje vybere požadovaný STL soubor a nastaví se parametry výrobního procesu. Počet nastavovaných parametrů závisí na typu stroje, nejčastěji se jedná o rozlišení, tloušťku vrstvy, počet kopií, rozmístění součástí, x-y souřadnice apod. V závislosti na typu a stáří stroje je nutné hodnoty parametrů buď přímo doplnit, nebo jsou již strojem načteny automaticky jako defaultní (v závislosti na typu stroje a materiálu) nebo jsou načteny z řídicího souboru tak, jak byly určeny v 3. kroku. Zkušené operátory mohou načtené údaje pozměnit pro zvýšení kvality a zkrácení doby výroby. Na závěr se parametry potvrdí a spustí se stroj. (Soubor STL je samozřejmě možné zasílat vzdáleně po síti nebo k němu po síti přistupovat. Podobně i spustit stroj, pokud je připraven – naplněn materiálem atp.)



Obr. 5 Příprava a nastavení stroje [9]

Jednou z největších výhod aditivních technologií je, že ve většině případů je výroba automatická a není tudíž v jejím průběhu vyžadována přítomnost obsluhy. Stroj se tedy často spouští tak, aby výroba běžela přes noc. Doba výroby závisí na typu, velikosti a počtu vyráběných součástí a nastavených parametrech výrobního procesu. Skládá se ze samotného výrobního času, času chladnutí (pro minimalizaci deformací) a někdy také z času předehřevu pracovní komory či laseru na provozní teplotu. Stroje jsou obvykle vybaveny varovným systémem, který může prostřednictvím prvků elektronické komunikace varovat obsluhu při změně teploty, výkonu apod. stejně tak při dokončení výroby. Po vychladnutí je součást (nebo celá komora) vyjmuta ze stroje a odnesena na pracoviště postprocessingu.

[2,3,4]

5 Postprocessing (následné zpracování)

Některé filmy, články apod. zabývající se problematikou aditivních technologií občas vytvářejí u pozorovatele (čtenáře) představu, že součásti vyrobené aditivními technologiemi jsou po vyjmutí ze stroje již hotové a připravené k použití. Není tomu tak zcela. Ve většině případů následuje tzv. postprocessing, jenž zahrnuje očištění součástí a někdy také konečnou úpravu (dokončovací operace). Při postprocessingu může vznikat poměrně velké riziko poškození součástí a k dosažení odpovídající přesnosti a kvality povrchu je tak při zacházení se součástí nutná maximální ostražitost. Z toho plyne, že pracovníci musí být zkušení a kvalitně proškolení, protože výsledná kvalita záleží na nich. Výsledná náročnost pak značně závisí na tvaru a účelu použití součásti⁴, a také rychlosti samotné výroby⁵.

5.1 Očištění součástí

Očištění součástí je nejčastěji využívanou etapou postprocessingu (Obr. 6). Obvykle se provádí manuálně a představuje oddělení součástí od pracovní desky, odstranění podpěr a

⁴ Čím složitější součást je – obsahuje dutiny, díry, vnitřní kanály, výstupky apod., čím přesnější geometrii má mít a čím kvalitnější povrch má mít, tím únavnější a časově náročnější je postprocessing.

⁵ Vyšší rychlost výroby je dosažena aplikací tlustších vrstev materiálu, což může mít negativní dopad na kvalitu povrchu.

přebytků materiálu, které zůstaly na součásti. Některé aditivní technologie pak mohou vyžadovat další operace. Princip očištění se liší v závislosti na tom, zda jde o Přirozenou podpěru nebo o Umělou podpěru. [2,3,4]



Obr. 6 Očištění součásti od materiálu ve formě prášku [10]

5.1.1 Přirozená podpěra (opora)

Tento typ podpěry se vyskytuje u práškových technologií a technologií využívajících materiál ve formě fólie. Podpěra je tvořena materiálem obklopujícím výslednou součást a vzniká tedy přirozeně v průběhu procesu výroby součásti. U práškových technologií může být součást ze sypkého materiálu vyjmuta až po jejím vychladnutí, aby se zabránilo deformacím způsobeným rozdílným chladnutím – na „očišťovací“ pracoviště se tedy dostane celý blok (součást včetně sypkého materiálu). Součást se zde vyjme a očistí se. K očištění pouze přilnutého materiálu se využívá kartáčů, štětek, stlačeného vzduchu nebo otryskání lehkými předměty (kuličkami apod.). Připečený materiál se opracovává dřevěnými nástroji nebo zubními čistícími nástroji. U dutin a děr je nutné počítat s delším časem čištění. V poslední době se také objevují automatické samostatné či integrované čistící jednotky (Newer ZCorp, MTT SLM). U technologií využívajících fólii se odstraňují strojem nařezané bloky spojených fólií. U vnitřních kanálů nebo jiných vnitřních částí je nutné vrstvy rozštípnout, provést očištění a následně vrstvy opět slepit. [2,3,4]

5.1.2 Umělá podpěra (opora)

Jde o pevné struktury navrhované a vyráběné čistě za účelem podepření před zborcením nebo uchycení k pracovní desce. Podpěry mohou být ze stejného materiálu jako součást. Toho se využívá u polymerů (FDM a SLA technologie), které jsou křehké a je možné tyto podpěry jednoduše ručně odlomit. U technologií spékajících kovový nebo keramický prášek nejdou podpěry snadno odstranit a je nutné jejich odstranění frézováním, ořiznutím, ostřížením, elektroerozivním obráběním apod.

K tvorbě podpěr se dá využít také sekundárních materiálů, jenž byly vyvíjeny čistě za účelem zjednodušení a zkrácení očištění. U polymerů jde o polymerové materiály, které se rozpustí a/nebo roztaví v rozpouštědlech na bázi vody – může být tryskána nebo ultrasonicky rozvibrována. Zde je nutné dbát maximální opatrnosti, aby se součást nezkroutila – pozor na správný postup výroby a agresivní rozpouštědla. U kovů jde o slitiny, které jsou lehce roztavitelné při nízkých teplotách nebo rozpouštěny v rozpouštědle.

Vzhledem k tomu, že na povrchu součástí obvykle zůstávají stopy po podpěrách, je důležitá správná orientace a umístění podpěr např. tam, kde jejich pozůstatky nebudou vadit (ideálně mimo funkční plochy).

[2,3,4]

5.2 Konečná úprava

V závislosti na účelu, pro který je součást navržena, je potřeba rozhodnout o případném provedení konečných úprav. Z důvodů estetických nebo provozních může být požadováno odstranění přilnutého práškového materiálu, schodovitosti jednotlivých výrobních vrstev, stop po podpěrách apod. V závislosti na požadované kvalitě povrchu je možné využít nátěr (snižuje porezitu, vyhlazuje schody) pískování nebo ruční leštění (Obr. 7). Dají se použít i automatické techniky v podobě omílání v bubnu, odjehlení abrasivem nebo elektrolytického leštění. Z důvodu potřeby získání vyšší přesnosti, které nemohlo být dosaženo již aditivní technologií, či dodělání dalších prvků na součásti a nástroje se využívá frézování, vrtání, řezání závitů apod. Pro zlepšení vlastností je možné aplikovat tepelné zpracování a např. u photopolymerů také netepelné zpracování (vytvrzování pomocí UV a viditelného záření pro odstranění křehkosti).

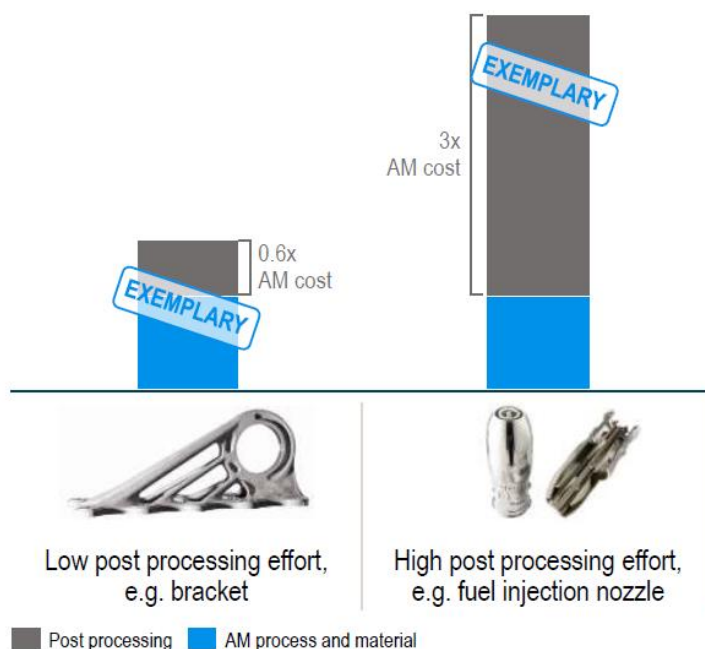


Obr. 7 Konečná úprava součásti [11]

Postprocessing představuje jednu z bariér pro větší rozšiřování aditivních technologií k domácímu a kancelářskému použití, protože vyžaduje odpovídající vybavení, chemikálie apod., které vyžadují odpovídající prostředí. Zároveň je postprocessing jedním z rozhodujících faktorů pro cenu, takže společnosti, které si zakládají na nízké ceně, ho mnohdy zanedbávají.

[2,3,4]

Náklady spojené s posledním krokem, tedy postprocessingem, mohou přesahovat náklady na výrobu a materiál i několikrát. Ukázkou je např. tryska vstřikování paliva (Obr. 8), kde tyto náklady jsou 3x větší. [12]



Obr. 8 Porovnání nákladů na postprocessing a nákladů na výrobu a materiál [12]

Závěr

Ve chvíli, kdy je celý proces aditivní výroby vymezen a správně pochopen, je teprve možné jej efektivně implementovat, plánovat a řídit v rámci podniku. Stejně tak je možné zajistit co nejpresnější kalkulaci nákladů na výrobek. V souvislosti s ním se jako nejzajímavější a nejkomplikovanější jeví krok 4. „Příprava a nastavení stroje, výstavba modelu (výroba součásti/součástí)“, protože se zde bude vyskytovat množství různých finančních i nefinančních vstupů. Kalkulaci pro ostatní kroky je pak možné provést analogicky. Ukázka kalkulace nákladů na vybraný výrobek – závěs volantu formule CTU CarTech je rozebrána v rámci odborného článku [13].

Seznam zdrojů

1. COTTELEER, Mark, Monika MAHTO, Jonathan HOLDOWSKY a John COYKENDALL. *3D opportunity for aerospace and defense: Additive manufacturing takes flight* [online]. 2014. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-aerospace.html>
2. GIBSON, I., ROSEN, D. W. a STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, ©2010. xxii, 459 s. ISBN 978-1-4419-1119-3.
3. GRIMM, Todd. *User's guide to rapid prototyping*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2004, xvi, 404 p. ISBN 0872636976.
4. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. xxviii, 518 pages. ISBN 9789814571418.
5. KAMRANI, Ali K. a Emad Abouel NASR. *Rapid prototyping: theory and practice*. New York: Springer, c2006. Manufacturing systems engineering series. ISBN 978-0387232904.
6. NAUDÉ, Paul. *Design by Volume, Mass and Load* [online]. 2013. Dostupné z: <https://simteq.co.za/blog/design-volume-mass-load/>
7. SAXENA, Shubham. CAD conversion and STL file in additive manufacturing. *Additive manufacturing/ 3D-printing: think beyond the possibilities* [online]. 2018. Dostupné z: <https://additivemanufacturingindia.blogspot.com/2018/04/cad-conversion-and-stl-file-in-additive.html>
8. *Prezentace Concept Laser CZ* [online]. Concept Laser CZ, 2015. 62 s.
9. *Metal Additive Manufacturing: Capabilities to Enhance Innovative Motion Control Solutions* [online]. Moog, 2018. Dostupné z: <https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-AdditiveManufacturing-Overview-en.pdf>



10. HITCH, John. *Five Secret Costs of 3D Post-Processing* [online]. New Equipment Digest, 2016. Dostupné z: <https://www.newequipment.com/research-and-development/article/22058954/five-secret-costs-of-3d-postprocessing>
11. How to sand your 3D prints [online]. MakerBot Industries, 2015. Dostupné z: www.makerbot.com/professional/post-processing/
12. *Additive Manufacturing – next generation AMnx: Study* [online]. Roland Berger, 2016. Dostupné z: <https://docplayer.net/39208444-Additive-manufacturing-next-generation-amnx.html>
13. SCHOLZ, Pavel a František Freiberg. *Economic Evaluation of Preparation and Building Stage of Additive Manufacturing Process*. Grant Journal. 2015, 4(2), 122-127. ISSN 1805-0638. Dostupné z: <https://www.grantjournal.com/issue/0402/PDF/0402scholz.pdf>