



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

DESIGN AND PRODUCTION OF SELECTED 3D PRINTED METALLIC PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. QUENTIN MASSON

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2019

Master's Thesis Assignment

Institut: Institute of Manufacturing Technology
Student: **Bc. Quentin Masson**
Degree programm: Industrial Engineering
Branch: Industrial Engineering
Supervisor: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Academic year: 2018/19

As provided for by the Act No. 111/98 Coll. on higher education institutions and the BUT Study and Examination Regulations, the director of the Institute hereby assigns the following topic of Master's Thesis:

Design and production of selected 3D printed metallic parts

Brief description:

A study of additive manufacturing technology: bibliographic recherche, nowadays metal technologies, applications, mechanical characteristics, advantages and disadvantages. Work-out of a database for a technical department. Optimization of selected parts to make them fit in an assembly, mechanical characteristics of the original pieces and the parts made via new technology of production.

Master's Thesis goals:

- Study of the system elements and limiting constrains reflecting the life of the parts.
- An analytical or numerical verification of the elements made in the traditional processes (forging, machining) to meet the set constraints.
- Mechanical characteristics of the elements obtained in additive manufacturing and their resistance to mechanical loading.
- A qualification plan, a technical specification to guarantee the quality and reproducibility of the produced parts by additive manufacturing, validation testing.

Recommended bibliography:

TRUBACOVA, P. Advanced fabrication of custom orthopaedics implants using Selective Laser technology. Brno 2016. Diploma thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Manufacturing Engineering. 127 p. 6 appendixes. Head of the work: Prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc, Ing. David Prat, Ph.D.

BOIVIE, K., KARLSEN, R., VAN DER EIJK, C. Material Issues of the Metal Printing Process. Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Trondheim, Norway SINTEF Technology and Society, Product and Production, Trondheim, Norway SINTEF Materials and Chemistry, Metallurgy, Trondheim, Norway [online]. 2011. [01-02-2014]. Available online at:
<http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2006/2006-19-Boivie.p>

CHASTAND, V. Etude du comportement mécanique et des mécanismes d'endommagement de pièces métalliques réalisées par fabrication additive. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Centrale de Lille, 2016. Français. <NNT : 2016ECLI0012>. <tel-01484725>

SALLY, A. Fabrication additive de pièces à base d'alliages métalliques complexes. Université de Lorraine. École Doctorale RP2E Ressources, Procédés, Produits et Environnement. 2013. 143 p. Rapporteurs Pascal Mognol, Constantin Vahlas.

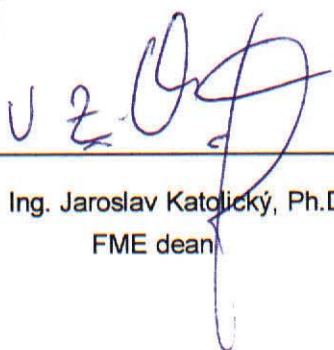
MARGUERAY, C. and L. VOLLARD. Fabrication Additive Métallique Technologies et Opportunités. INSA Rouen, Département Mécanique et Centre Commun d'Usinage, 2015. 36 p. Sous la direction de Thomas Breteau en collaboration avec Fabrice Barbe.

Students are required to submit the thesis within the deadlines stated in the schedule of the academic year 2018/19.

In Brno, 6. 11. 2018



prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Director of the Institute



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
FME dean

Společnost Alpha má v současné době části svého systému, které jsou vyráběny kováním nebo litím. V současné době se nástroje a zařízení pro tyto procesy opotřebovávají, subdodavatelská společnost odpovědná za některé odlitky již nemůže zaručit kvalitu těchto dílů.

Kromě toho společnost Alpha nedávno zřídila závod specializovaný na výrobu kovových aditiv a výrobní politika spočívá v podpoře výroby v této dceřiné společnosti.

Za účelem řešení těchto problémů se společnosti Alpha podařilo připravit svou konstrukční kancelář pro navrhování dílů, které budou vytištěny ve 3D.

Aditivní výroba, známá také jako 3D tisk, je jednou z nejpobulárnějších technologií 21. století a přináší revoluci v tomto odvětví. Výroba aditiv je založena na principu výroby po vrstvách, počínaje 3D modelem a poté je rozdělena na "vrstvy" podle orientace součásti ve stroji. Každý řez je generován podle typu procesu stroje s použitím minimálního požadovaného množství materiálu. V závislosti na specifikacích může tištěná část vyžadovat dokončení. Hlavním zájmem je být schopen vyrábět buď součásti nebo nástroje se složitou geometrií, nebo prototypy, s krátkými dodacími lhůtami, a také potřeba nástrojů a možnost osvětlení se ve srovnání s obvyklými procesy snižuje. Samozřejmě existují limity, které uvidíme později.

Koncept výroby aditiv se objevil na konci 80. let, aby vyhověl potřebě rychlého prototypování. Jeho vývoj jde ruku v ruce s vývojem technologie 3D CAD, protože software je často propojen. Od 90. let 20. století se začaly registrovat patenty a na trh se uváděly stroje. V roce 1995 byla typologie procesů zavedena agenturou pro šíření technologických informací.

První aplikace neměly funkční mechanická předpětí, jejich účel bylo pouze vizuální.

První rychlé obrábění bylo vyrobeno v 2000. letech, poté první funkční části v rychlé výrobě. Byly prodány první průmyslové stroje, objevil se Fablab a lehké stavebnice se staly dostupnými pro soukromé zákazníky. Výzkum v terénu probíhá plnou rychlostí ve všech pokrytých oblastech, od materiálů, návrhových strategií a procesů až po software CAM.

Tato výrobní technologie jde ruku v ruce s novými počítačovými nástroji pro návrh. Například topologická optimalizace, která je součástí těchto nástrojů, může být nyní plně využita. Skutečnost, že vytváří organické tvary, představuje problémy při výrobě s tradičními způsoby výroby. Už to není s aktuálními technologiemi výroby aditiv. V tomto dokumentu jsou popsány různé druhy aditivních technologií.

Předmětem diplomové práce bylo popsat nejmodernější techniku pomocí komplexní bibliografické recenze. Cílem práce bylo zejména napsat technologický popis, který pomůže navrhnout mechanické součásti vyrobené v aditivní výrobě. Jako implementace této metody bylo úspěšně ověřováno několik výrobků.

Dobrá znalost procesů umožňujících výběr nejvhodnějších podle aplikace je nutné provést jasný a výstižný soupis. Různé typy výroby aditiv jsou popsány níže.

Proces fotopolymerace je založen na použití syntetických pryskyřic s vlastností reakce na záření a teplo. V závislosti na své povaze jsou tyto pryskyřice citlivé na různé typy záření: gama záření, rentgenové záření, UV záření, elektronové paprsky a viditelné světlo. Pro stereo litografii se používá viditelné světlo a UV záření. Radiace je řízena dvěma způsoby, buď laserovým skenováním pohybem zdroje, nebo odkloněním zdroje pomocí zrcadla, které lze naklopit velkou rychlostí (může existovat několik laserů), nebo prskáním pryskyřice pomocí šablony.

Model je generován na platformě, která je ovládána vertikálně. Platforma se při vytváření součásti ponoří do stále tekuté pryskyřice. Přesnost vertikální polohy je důležitá, protože definuje tloušťku vrstev. Pokaždé, když je pryskyřice vtlačena do dílu, stěrka / kartáč homogenizuje vrstvu pryskyřice na dílu. Model je tedy generován vrstvu po vrstvě. Jakmile je proces dokončen, je platforma zcela odstraněna z pryskyřice, poté po vypouštěcí fázi jsou zbytky odstraněny v peci a část je podrobena optimálnímu vytvrzování pod UV světlem. Obvyklé dodatečné zpracování spočívá v odstranění nosičů čištěním součásti rozpouštědlem, aby se odstranily všechny stopy nevytvrzené pryskyřice. Pokud se používá model ztraceného vosku, je nutné zahrnout přípravu na tryskání.

Tento proces umožňuje získat součásti s dobrou úrovní detailů, dobrou povrchovou úpravou a dobrou produktivitou. Průhledné, tuhé a pružné části mohou být také vyráběny v široké škále polymerů.

Na druhé straně existuje riziko deformace součástí během fáze po vytvrzení. Rovněž je nutné vytvořit podpěry pro štíhlé části, jejich odstranění může poškodit součást. Vystavení světlu omezuje trvanlivost dílů, které se stanou křehkými a časem ztrácejí stabilitu.

Proces tryskání materiálu používá stejnou architekturu stroje jako konvenční inkoustová tiskárna, kromě toho, že uložené kapičky jsou kapičky materiálu (pryskyřice nebo vosk jako materiálu), které se ukládají jedna po druhé díky laterálnímu pohybu hlavy. Jsou povrchově upraveny frézováním na konci tisku každé vrstvy. Trisky jsou odsávány, aby se zachoval čistý tiskový povrch.

Používají se kapičky, které ztuhnou ochlazením nebo foto polymerací.

Chladicí stroje používají termoplastické materiály k vytvoření vrstev a nízkého bodu tání nebo rozpustného vosku pro podpěrné prvky. Máme tolik topných nádrží, kolik typů kapalin. Kontrola usazování kapek je automatická i čištění trysek. V případě poruchy je vadná plocha odstraněna povrchovou úpravou.

Neustálého pokroku se dosahuje v řízení depozice kapek, v řízení rychlosti ochlazování a zamezení toku, a tedy špatné kvality povrchu nebo geometrické neshody.

Princip založený na fotopolymeraci používá větší rozprašovací hlavu, která umožňuje jediný krok nanášení kapiček. Ty jsou téměř okamžitě léčeny UV paprskem. Řízení viskozity materiálu a jeho rychlosti polymerace zaručuje vysokou přesnost a kvalitu. Materiál použitý k výrobě nosičů může být buď zředěn nebo rozpuštěn, aby se usnadnilo jejich odstranění.

Navzdory dobré přesnosti a hladké povrchové úpravě je výběr materiálu omezen na voskovité materiály.

Proces tuhnutí prášku působením zdroje energie je jednou z prvních technologií, které mají být komercializovány. Zpočátku na základě fúze polymerních prášků se rychle vyvíjí adaptace na kovové a keramické prášky v nepřímém slinování a poté v přímém slinování. Nepřímá technika zahrnuje fúzi a ztuhnutí polymerní vrstvy obklopující keramická nebo kovová zrna. Přímé tavení způsobí, že se prášek roztaví bez polymeru.

Tento proces je široce používán. Každá vrstva je vytvořena roztavením vzoru skenováním laseru na povrchu prášku, který byl předtím vyrovnán a zhutněn.

V nádrži je prášek udržován těsně pod teplotou tavení, aby se minimalizoval přívod energie laseru.

Stejně jako u fotopolymerace je deska při každé iteraci snížena o jednu tloušťku vrstvy a z nové misky na prášek je nanášena nová.

U nepřímé metody může být v případě ocelového prášku potaženého polymerem infiltrována hotová část bronzem, aby se zničila pórovitost (zpočátku vysoká pro tuto metodu) a aby se zvýšily mechanické vlastnosti (zpočátku nízké pro tuto metodu). Pro přímou metodu se nádoba na prášek zahřeje na vyšší teplotu a zdroj energie je silnější, v některých případech vícenásobný a v jiných nahrazený zdrojem elektronů. Protože fúze je kovová, je pouzdro ponořeno do inertní atmosféry, aby se zabránilo oxidačním problémům.

Jakmile je model hotový, musíme počkat na jeho ochlazení, než začneme s následnou úpravou, pokračujeme v ruční úpravě dílu (opracování podpěr atd.), Poté ji podle potřeby podrobíme žíhání, proces odlehčení stresu, infiltrace, leštění atd.

Tento proces vyžaduje méně podpor, protože podříznutí již obsahuje stlačený prášek jako nosič. Tato metoda nabízí slušné mechanické vlastnosti podobné těm, které byly pozorovány ve slévárenském materiálu, jakož i nízkou úroveň pórovitosti.

Na druhou stranu je instalace složitá a vyžaduje zvláštní infrastrukturu. Prášek je skutečně velmi těžký a pro zajištění hygieny a bezpečnosti je ochrana zdraví dýchacích orgánů nezbytná pro zdraví obsluhy. Přítomnost i nízké porozity někdy vyžaduje infiltraci, aby se zlepšily mechanické vlastnosti. Tento krok je nákladný a zahrnuje rizika praskání a zkreslení.

Tryskání pojiva na práškovitý substrát je směsí mezi technologií stříkání kapek materiálů a tuhnutím prášku působením zdroje energie. Ve skutečnosti je pojivo rozprašováno podle prvního postupu na lože prášku spravované jako ve druhém procesu. Práškové částice jsou pak vázány v oblastech, kde je pojivo uloženo, čímž se vytvoří vrstva modelu. Prášek je dodáván jako v předchozím postupu, součást je snížena o jednu tloušťku vrstvy, jako je nádrž na prášek, která se pohybuje nahoru. Prášek se rozprostře a poté ztuhne.

Při následném zpracování musí být ztuhlý prášek stripován kolem modelu a poté infiltrován tvrdidlem, aby se odstranila porozita a vyhladily se povrchy součástí. U kovové části lze uvažovat o delaminaci v peci s následnou infiltrací bronzem. Tento proces je široce používán pro výrobu slévárenských modelů.

Rychlejší než stříkání materiálů je stříkání pojiv stále méně přesné. Leštění povrchů je obtížné, takže drsnost povrchu není příliš dobrá ani po následném zpracování. Materiály jsou také omezené.

Promítání materiálů do toku energie je vždy konstrukce po vrstvě a technologie je podobná tvrdému laserovému páskování. Místo roztavení kovového prášku, který byl předtím nanesen na lože prášku, jsou prášky transportovány plynem a vstříknuty do laserového paprsku a poté roztaveny na předchozí vrstvě. Proud přiváděného materiálu a předchozí vrstva mají tu výhodu, že jsou dobře taveny. Výsledný materiál je hustý a rychle tuhne. Prášek se v podstatě vstříkuje koaxiálně vzhledem k laserovému paprsku pomocí trysky s kónickým prstencovým výstupem.

Lasery jsou hlavně pevné lasery, jako jsou diodové, vláknové nebo diskové lasery. Jejich výkon se pohybuje od několika stovek wattů do několika kilowattů. Materiál se ukládá rychlostí od několika stovek gramů za hodinu do několika kilogramů za hodinu.

Pokud jde o následné úpravy, přirozeně se jedná o odstraňování substrátů, možné tepelné ošetření a pak otryskávání nebo leštění viditelných povrchů.

Mez rozměrů součástí závisí pouze na rozměrech stroje, takže neexistuje žádný teoretický limit. Materiál může být uložen v různých osách v závislosti na stroji. Numerické řízení umožňuje nastavit hustotu nebo gradienty materiálu ve stejné části. Je tedy možný

široký výběr kombinací, pokud vezmeme v úvahu počet materiálů kompatibilních s tímto procesem.

Navíc, pokud je technologie dobře nakonfigurována, pórovitost dílů je téměř nulová. Mechanické vlastnosti jsou proto pozoruhodné.

Další specifickou výhodou tohoto postupu je to, že je možné přidat materiál k existujícím částem na povrchech, které nemusí být nutně ploché. To umožňuje provádět žebra, výčnělky nebo opravy na částech s vysokou přidanou hodnotou. Povrchová úprava se však může lišit v závislosti na papíru nebo plastovém materiálu, ale k dosažení požadovaného účinku může vyžadovat dodatečné zpracování. Procesy fúze vyžadují více výzkumu, aby se proces dále posunul do hlavního proudu.

Tavení příze topnou tryskou je nejběžnějším procesem na spotřebitelském trhu, princip je jednoduchý, materiál je vytlačován topnou tryskou (hlavně polymery). Roztavený drát se nanáší podle konstrukčního řezu a znovu se nanáší vrstva po vrstvě. Materiál je ve formě drátu o průměru 1,5 až 2 mm na cívce. Je poháněn pohonným zařízením k hubici, která při pohybu v konstrukční rovině roztavený plast nanáší na předchozí vrstvu. Existují varianty, kde je materiál ve formě granulí nebo kde jsou pohyby na osách prováděny u stolu. Nosiče mohou být vyrobeny z rozpustných materiálů pro usnadnění následného zpracování.

To spočívá hlavně v odstranění nebo rozpuštění podpěr a v případě potřeby na vyleštění a lakování dílů.

Tento proces, i když není příliš drahý, je velmi pomalý a mechanické vlastnosti jsou velmi špatné. Výroba funkčních dílů je velmi omezená, stejně jako výroba velkých dílů. Přesnost je navíc velmi nízká.

Montáž vrstev z řezaných listů nebo desek Tato technologie je jednou z průkopnických technologií v oboru, rozlišuje se ve dvou podkategoriích, tenkých listech a deskách.

Jedná se o proces po vrstvě, vrstvy jsou nařezány, naskládány a fixovány. Spojení mezi vrstvami může být provedeno šroubováním, jednoduchým nebo strukturálním lepením (pájení, svařování). Míra pokroku v tomto procesu je značná, zejména pokud jde o nástroje, které by mohly být řízeny propojeným způsobem.

Přesněji řečeno, výroba laminovaných předmětů je tvořena laserem (často CO₂) nebo řezačkou, která řezá vrstvy modelu vytvořeného pomocí CAD a zarovnáváním oblastí, které do modelu nepatří, což usnadňuje extrakci. V důsledku toho jsou vnitřní mezery možné jen velmi zřídka. Sestavení může být provedeno nástřikem lepidla nebo zahřátím listu lepidlem taveným za tepla.

Další zpracování LOM spočívá v extrakci součásti a následném broušení a lakování. Tento způsob výroby je zvláště vhodný pro slévárenské modely.

Varianta, stratoconception, používá řezání silnějších vrstev na stejné desce, které budou spojeny s pigmenty nebo vložkami. Seznam materiálů je důležitější než pro LOM, stejně jako velikost dílů, které lze vyrobit. Použití tohoto typu procesu je hlavně výroba slévárenských modelů nebo vizuálních modelů.

Tyto procesy jsou robustní a rychlé, seznam dostupných materiálů je velký a velikost dílů je velká. Očekává se však pokrok v následném zpracování, kde by některé kroky mohly být automatizovány.

Existují dva hlavní případy použití, případ, kdy jsou potřeba modely nebo jeden kus, nebo případ, kdy máme výrobní problém a funkční části. Někdy to mohou být oba.

Znalosti o nezbytných destruktivních mechanických vlastnostech byly provedeny dceřinou společností Alpha na čtyřech níže uvedených rodinách materiálů. Zkoušky umožnily zdůraznit anizotropii zkušebních kusů získaných aditivní výrobou a jejich rozdílnost co do hodnoty. Výsledky dávají mechanickou odolnost, elasticitu, Youngův modul, tvrdost podle Brinella a drsnost. Tyto testy byly provedeny nejen na čtyřech skupinách materiálů, ale také na několika metalurgických stavech pro každý ze čtyř kovů.

V diplomové práci jsou uvedeny možnosti procesů a technické údaje nejběžnějších strojů.

Existuje celá řada materiálů kompatibilních s popisovanými procesy, jejich vlastnosti, povaha, cena jsou uvedeny v diplomové práci. Nejpodrobnějšími materiály jsou Inconel 718, 316L, Ti třídy 23 a AlSi7Mg0.6. Budou zvaženy různé stavy každého materiálu.

-Stav „AS-BUILT“ je definován v ASTM F2924 (Ti6Al4V tavením v práškovém loži) takto: „stav součástí vyrobených aditivním procesem před jakýmkoli dodatečným zpracováním, s výjimkou odstranění konstrukční desky nebo odstranění prášků nebo podporuje“. Tohoto stavu je dosaženo, když není aplikováno žádné tepelné zpracování.

-Stav „STRESS RELEASED“ je definován jako stav součásti po tepelném zpracování pro zmírnění stresu. Tento stav se týká pouze následujících slitin: Hliník AlSi7Mg0.6 a titan Ti6Al4V ELI (stupeň 23).

-Stav „ROZMĚRNÁ STABILIZACE“ je definován jako stav součásti po tepelném zpracování pro rozměrovou stabilizaci. Tato podmínka platí pouze pro slitinu z nerezové oceli 316L.

-Stav "HYPERQUENCH" je definován jako stav součásti po tepelném zpracování hyper kalením. Tato zpráva se týká pouze slitiny 316L Steel.

-Stav „CIC“ je definován jako stav součásti po zpracování horkou izostatickou kompresí. Tato podmínka se týká pouze slitiny titanu Ti6Al4V ELI (stupeň 23).

-Stav "T6" je definován jako stav součásti po tepelném zpracování sestávajícím z roztoku a vytvrzení následovaného stárnutím. Tato zpráva se týká pouze slitiny hliníku AlSi7Mg0.6.

-Stav „ROZTOK“ je definován jako stav součásti po tepelném zpracování sestávajícím z roztoku a kalení. Tato zpráva se týká pouze slitiny Inconel 718.

-Stav „SOLUTION + AGED“ je definován jako stav součásti po tepelném zpracování sestávající z roztoku a ztuhnutí, po kterém následuje stárnutí. Tato zpráva se týká pouze slitiny Inconel 718.

Pro mechanického projektanta projekční kanceláře byl vytvořen vývojový diagram rozhodnutí. Účelem je především vést projektanta procesem navrhování a volbou použití aditivního výrobního procesu či nikoliv.

Prvním krokem je hlavně pomoc při výběru preferovaného výrobního procesu aditiva nebo ne. Zohledňuje dostupnost materiálu, velikost součásti a možnost poskytnout požadované množství a valorizaci různých výrobních potenciálů aditiv.

Jakmile je konstruktér přesvědčen, že část, na které pracuje, je přizpůsobena procesu, musí součásti navrhnout. Procesy výroby aditiv vyžadují určité triky v procesu navrhování, aby byla výroba jednodušší a levnější.

Tyto zásady jsou vysvětleny ve druhém kroku vývojového diagramu, pomáhá konstruktérovi upozorněním na limity technologie a ukázáním metody využití maxima procesního potenciálu.

V případě studované aplikace bylo studium prostředků k získání podmnožiny. To byl dobrý příklad, který ukázal, že výroba aditiv není vždy správným způsobem. I když je pro tento kus studie technologicky velmi zajímavé, ukázalo se, že za stejnou aplikaci se cena získávání aditivem zvýšila o 856%. Zatímco obráběním byla cena snížena asi o 30%.

Aditivní výroba umožňuje výrobu velmi složitých dílů, má však své nevýhody. Pro Alpha je většina dotčených dílů vyrobena z kovu, nejpřizpůsobenějším výrobním procesem aditiva je pak selektivní laserové tavení (SLM). Následná pravidla návrhu se týkají pouze procesu SLM.

SLM patří do skupiny „ztuhnutí prášku působením zdroje energie“ a je to jedna z nejběžnějších technologií.

Prášek je nanesen na substrát (stůl stroje pro první vrstvu). Je důležité vyhnout se jakémukoli kolapsu vrstev během jejich stohování. I když není problém skládat podlahy, není to stejné pro stropy. Pokud jsou vodorovné, budou muset být podepřeny a v závislosti na materiálech z určitého mezního úhlu se zemí se má za to, že z mezní hodnoty úhlu se zemí již vrstva prášku nenajde dostatečný substrát pro jeho udržení. Aby se tomuto problému zabránilo, software, který řídí stroj, vytvoří lešení pro připojení vrstvy k prvnímu podlaží (po nalezení nejlepší orientace k omezení výstavby těchto lešení. Toto je proces vytváření médií. Bude jich více nebo méně v závislosti na tvarech, které mají být vyrobeny.

Nosič je síťovina potištěná s částí se zhoršenými výrobními parametry, takže ji lze snadno odstranit. Pokud se hodnoty úhlů změny, může to komplikovat konstrukci součástí. Je běžné obejít střední hodnotu 45° , která pokrývá titan a hliník, a vysokou kvalitu, aby se usnadnil návrh součástí, protože tento úhel se opakuje v číselnících ortonormálního markeru.

V závislosti na umístění součástí ve výrobní nádrži musí být detekovány podlahy a stropy.

Nejčastěji používaným obtokem pro mechanickou část, často ortogonální, je naklonění části o 45° ve výrobní liště. I když nakonec je dodavatel jediným rozhodovatelem konečných tiskových úhlů, úhel 45° je účinným základem pro modelování vyrobitelné součásti.

Otvory rovnoběžné se stolem stroje a o průměru <8 mm nevyžadují podporu. Nejsou ani zaokrouhlování stejné hodnoty. U větších otvorů bude nutné použít klenutý tvar od sklonu 45° . Buďte však opatrní, protože při této mezní hodnotě existuje riziko lokální deformace.

Optimalizace je matematický proces zaměřený na dosažení cíle při přizpůsobení parametrů, topologie spočívá v aplikaci matematiky na geometrii místa a na vlastnosti prostoru.

Topologická optimalizace může být popsána následovně, je to dobré množství dobrého materiálu na správném místě z dobrého důvodu.

Topologický optimalizační software pomáhá návrhářům definovat neoptimálnější tvar své mechanické části podle použitých omezení. Proces topologické optimalizace navíc vyžaduje, aby byly při řízení funkčních potřeb a reakcí přísnější, kontrolovanější, sebevědomější a obvyklé.

Lidé, kteří tento proces používají, jsou mechaničtí konstruktéři, kterým pomáhají inženýři projektu a simulace. Proces topologické optimalizace se stává stále běžnějším,

protože požadavky zákazníků stále rostou. Proto se stává opakující se, aby byl zajištěn maximální výkon.

Tento proces není určen k použití ve všech částech mechanického systému, ale na 20% částí, které ovlivňují 80% hmotnosti a pevnosti, tuhosti celého systému. V předběžném návrhu je použitelný jak pro existující část, tak pro neexistující část. Kromě toho je důležité vyhodnotit zisk, který přinese aplikace tohoto procesu ve srovnání s vynaloženou energií, protože proces může být z hlediska doby výpočtu dlouhý. Technologická optimalizace nefunguje přidáním materiálu mezi rozhraními.

Funguje tak, že odstraní materiál na předdefinovaném objemu mezi rozhraními. Nelze začít od prázdného listu papíru, definovat rozhraní a použít proces k vytvoření součásti. K odstranění materiálu potřebujeme počáteční objem materiálu. K popisu tohoto nového procesu se používají specifické termíny.

Non-design space: Geometrická doména části, ve které software nemá právo optimalizovat.

Návrhový prostor: Geometrická doména součásti přidělené softwaru k optimalizaci množství materiálu.

Studijní obor: Studijní obor je mechanická část tvořená nenavrhovacím prostorem a konstrukčním prostorem, který lze sestavit tak, aby prvky vzájemně interagovaly a byly použity v jeho prostředí.

Návrh podle topologie: Toto je proces návrhu využívající topologickou optimalizaci. Designéři vytvářejí konceptovou část, kterou pak optimalizují pomocí počítačových nástrojů.

Návrh musí být regulován parametry stanovenými technikem odpovědným za architekturu systému, který bude součástí přijímat.

Optimalizace, snížení hmotnosti mechanického systému může mít dopad na celkový systém. Je také možný opačný přístup. Hledáme snížení výkonu akčního členu potřebného k optimalizaci hmotnostní bilance a výkonu systému. Za tímto účelem hledáme parametry vlivu, abychom dosáhli našich cílů.

Robustnost mechanického systému souvisí se stabilitou jeho výkonu a odolností proti únavě. Během optimalizace se můžeme rozhodnout zvýšit nebo snížit robustnost systému. Z tohoto důvodu je možné optimalizovat mechanický systém bez snížení jeho hmotnosti. Může dokonce zvýšit hmotnost. Obecně bude topologická optimalizace poskytovat systému hladší tvary s méně koncentracemi napětí, což zvýší jeho robustnost.

Pokud systém není dostatečně robustní a každý rok prochází údržbou, je možné použít topologickou optimalizaci, aby se zvýšila jeho robustnost. Údržba systému by pak mohla být prováděna každé dva roky, což by snížilo náklady na údržbu o polovinu.

Pokud je systém jednou součástí, bude jediným kandidátem na optimalizaci. Po optimalizaci získáme monoblokovou geometrii, ale bude možné ji později rozdělit na několik detailních částí, které mezi nimi nemají žádné relativní pohyby.

Pokud je systém sestavou pevných částí, je možné omezit optimalizaci na jednu nebo více částí.

Jsou-li díly pohyblivé mezi nimi, je nejprve nutné určit zatěžovací stavy v průběhu času podle pohybů, aby bylo možné provést optimalizaci.

Jedním z případů využití topologické optimalizace bylo přepracování součásti za účelem zlepšení jejích mechanických vlastností. Vstupní data již neexistovala, pro vyřešení problému bylo nutné znovu provést základní výpočty. Byly použity numerické nástroje (rychlá dynamická studie, konečné prvky, statický výpočet, topologická optimalizace a redesign). Tento přístup umožnil lokalizovat oblasti nepoužitého materiálu v případě použití systému a snížit hmotnost systému přibližně na 30% použitím koeficientu bezpečnosti 1,5.

Závěry

Generativní design je zcela nový způsob navrhování mechanických součástí. To bylo umožněno pokrokem v oblasti informačních technologií a zvýšením výpočetního výkonu. Pokud vezmeme v úvahu tradiční způsob navrhování, například topologická optimalizace, vyžaduje to alespoň inženýra, kterému je nápomocen počítač a možná nějaký software. Tímto způsobem můžeme získat omezený počet řešení v daném časovém období.

Pro generativní návrh je stále zapotřebí inženýr, který díky algoritmu AI a výpočetnímu výkonu cloudu dokáže generovat tisíce možností návrhu pro přizpůsobení určených parametrů. Proces, který je třeba dodržet, je nejprve pomocí softwaru CAD konstruktér stanoven cíle a omezení návrhu. Poté definuje parametry, jako je materiál, hmotnost, síla a náklady. Poté počítač začne pracovat s algoritmy a vlastním procesem, aby vytvořil tisíce možností a analyzoval účinnost každého z nich. Jakmile je hotovo, designér zhodnotí možnosti a přehodnotí cíle a omezení. Je proveden další výpočet. Lidská intuice kombinovaná se statistickou umělou inteligencí identifikuje nejvíce přizpůsobené řešení.

Návrhář vyrábí prototyp s rychlým prototypováním. Prototyp je testován a vyhodnocen a pokud prototyp nevyhovuje, musíte se vrátit zpět ke kroku přehodnocení. V dnešní době se generativní design spojuje a začíná ho používat průmyslová odvětví, jako je Airbus, Under Armour nebo Hack Rod, ale stále se to vyvíjí. Časem by generativní návrh mohl ušetřit čas oceněním času, který designér stráví studiem, zatímco počítač generuje možnosti. Tento způsob technologického řešení byl v diplomové práci úspěšně ověřen a odzkoušen.

Alpha possède actuellement des pièces de ses systèmes qui sont fabriquées par forge ou fonderie. Aujourd'hui, les outils et les équipements de ces procédés sont en fin de vie, la société sous-traitance en charge de certaines pièces coulées ne peut plus garantir la qualité de ces pièces.

Par ailleurs, Alpha a récemment créé une usine spécialisée dans la fabrication additive métallique et la politique de l'entreprise est d'encourager la production par cette filiale.

Pour répondre à ces enjeux, Alpha a préparé son bureau d'études pour la conception des pièces qui seront imprimées en 3D.

La fabrication additive, aussi appelée impression 3D est une des technologies les plus populaires du 21ème siècle et elle est en passe de révolutionner l'industrie.

La fabrication additive est basée sur le principe de fabrication couche par couche, on part d'un modèle 3D puis on le décompose en « tranches » selon l'orientation de la pièce dans la machine. Chaque tranche est générée selon le type de procédé de la machine utilisant le minimum de matière nécessaire. Selon le cahier des charges la pièce imprimée peut avoir besoin d'un parachèvement.

L'intérêt premier est de pouvoir soit réaliser des pièces ou outillages à géométrie complexe, ou des prototypes et ce avec de brefs délais. Bien sûr il y a des limites que nous verrons plus tard.

Le concept de fabrication additive émerge à la fin des années 1980 pour répondre au besoin du prototypage rapide. Son évolution va de concert avec les progrès de la CAO 3D. A partir des années 1990 des brevets commencent à être déposés et des machines arrivent sur le marché. En 1995 la typologie des procédés est mise en place par l'agence de diffusion des informations technologiques.

Les premières applications n'ont aucune prétention fonctionnelle d'un point de vue mécanique, leur but est uniquement visuel.

Les premières réalisations d'outillage rapide arrivent durant les années 2000 suivies des premières pièces fonctionnelles en fabrication rapide.

Les premières machines industrielles sont vendues, les Fablabs apparaissent et les machines légères en kit deviennent disponibles pour les particuliers.

La recherche dans le domaine est à plein régime dans tous les domaines couverts, les matériaux, les stratégies de conception, les procédés ou encore la partie logicielle et FAO.

Cette technologie de fabrication va de pair avec de nouveaux outils de conception assistée par ordinateur. Par exemple, l'optimisation topologique qui fait partie de ces outils peut maintenant être utilisée à son plein potentiel. Le fait qu'il génère des formes organiques pose des problèmes de fabrication avec les modes de production traditionnels. Cela n'en pose plus avec les technologies actuelles de fabrication additive.

Le travail attendu de ma part en tant que stagiaire était d'effectuer un état de l'art à l'aide d'une synthèse bibliographique approfondie. Le but étant de rédiger un guide d'aide à la conception de pièces mécaniques fabriquées en fabrication additive. En guise de mise en application de cette méthode plusieurs supports d'étude ont été abordés.

La bonne connaissance des procédés permettant de bien sélectionner le plus adapté en fonction de l'application il est nécessaire d'en faire un inventaire clair et concis. Les différents types de fabrication additive sont décrits ci-après.

Le procédé de photopolymérisation est basé sur l'utilisation de résines synthétiques présentant la propriété de réagir à un rayonnement et à la chaleur. Ces résines sont selon leur nature, sensibles à différents types de rayonnements : rayons gamma, rayon X, rayons UV, faisceau d'électrons et lumière visible. Pour la stéréolithographie, la lumière visible et les UV sont utilisés.

Le pilotage du rayonnement se fait de deux façons, soit par balayage laser en bougeant la source ou en déviant la source à l'aide d'un miroir inclinable avec une grande célérité (il peut y avoir plusieurs lasers), soit par « flashage » de la résine au travers d'un pochoir.

Le modèle est généré sur une plateforme qui est pilotée verticalement. La plateforme s'immerge dans la résine encore liquide au fur et à mesure de la création de la pièce. La précision de position verticale est importante car elle définit l'épaisseur des couches. A chaque enfoncement dans la résine, un racloir/balai vient homogénéiser la couche de résine sur la pièce. Le modèle est ainsi généré couche par couche. Une fois le processus terminé, la plateforme sort entièrement de la résine, puis après une phase d'égouttage, les résidus sont éliminés en étuve, et la pièce subit un durcissement optimal sur éclairage UV.

Le post traitement usuel consiste en l'enlèvement des supports et le nettoyage de la pièce avec du solvant pour enlever toute trace de résine non polymérisée. En cas d'utilisation du modèle en cire perdue, une préparation pour la mise en sable.

Ce procédé permet d'obtenir des pièces avec un bon niveau de détail, un bon état de surface avec une bonne productivité. On peut également réaliser des pièces transparentes, rigides, souples dans une large de gamme de polymères.

En revanche on risque une déformation des pièces lors des étapes de post polymérisation. Il faut également construire des supports pour les parties élancées, le retrait de ceux-ci peut dégrader la pièce. L'exposition à la lumière limite la durabilité des pièces qui se fragilisent et perdent en stabilité dans le temps.

Le procédé de projection de gouttes de matériaux utilise la même architecture machine qu'une imprimante jet d'encre classique à ceci près que les gouttelettes déposées sont des gouttelettes de matière qui sont déposées l'une après l'autre grâce au déplacement latéral de la tête. Elles sont surfacées par fraisage à la fin de l'impression de chaque couche. Les copeaux sont aspirés pour avoir une surface d'impression propre.

On utilise des gouttelettes qui solidifient par refroidissement ou par photopolymérisation.

Les machines mettant en œuvre la solidification par refroidissement utilisent des matériaux thermoplastiques pour former les couches et de la cire bas point de fusion ou soluble pour les éléments de supports. On a autant de réservoir chauffant que de type de liquide. Le contrôle du dépôt de goutte est automatique tout comme le nettoyage de la buse. En cas de dysfonctionnement, la surface défectueuse est ôtée par surfaçage.

Des progrès sont constamment réalisés sur le contrôle du dépôt de gouttes, pour maîtriser la vitesse de refroidissement et éviter l'écoulement et ainsi un mauvais état de surface ou une non-conformité géométrique.

Le principe basé sur la photopolymérisation utilise une tête de projection plus large qui permet une seule étape de dépôt de gouttelettes. Celles-ci sont quasi instantanément durcis par un rayon UV. La maîtrise de la viscosité du matériau et de leur vitesse de polymérisation garantit une précision et une qualité importante. Le matériau utilisé pour réaliser les supports sont soit diluables soit dissolvables pour faciliter leur retrait.

Certaines machines peuvent construire une pièce en deux types de matériaux (rigide et souple par exemple) afin de réaliser une sorte de composite.

Le post-traitement consiste principalement en la suppression des supports puis en le nettoyage de la pièce.

S'il s'agit d'un modèle de cire perdue la pièce, il faut une préparation avant moulage.

Le procédé offre une bonne fidélité de la géométrie pour les détails fins, cependant, le temps d'impression est très long ce qui limite la taille des pièces à réaliser. De plus il n'existe pas beaucoup de matériaux compatibles avec ce procédé.

Le procédé de solidification de poudre sous l'action d'une source d'énergie est l'une des premières technologies commercialisées. Initialement basée sur la fusion de poudres polymères, une adaptation pour poudres métalliques et céramiques est rapidement développée en frittage indirect puis en frittage direct. La technique indirecte réalise la fusion et la solidification d'une couche de polymère enveloppant les grains de céramique ou de métal. La directe occasionne la fusion de la poudre sans polymère.

Ce procédé est largement utilisé. Chaque couche est générée par la fusion d'un motif par le balayage d'un laser sur la surface d'une poudre qui est précédemment égalisée puis compactée.

Dans le bac la poudre est maintenue juste en dessous de la température de fusion pour minimiser l'apport d'énergie du laser.

Comme pour la photopolymérisation, à chaque itération, le plateau est descendu d'une épaisseur de couche et une nouvelle est déposée depuis le bac de poudre neuf.

Pour la méthode indirecte, on peut pour de la poudre acier revêtu de polymère, infiltrer la pièce finie avec du bronze pour annihiler la porosité (initialement élevée pour cette méthode) et augmenter les propriétés mécaniques (initialement faibles pour cette méthode). Pour la méthode directe, le bac à poudre est porté à une température plus élevée et la source d'énergie est plus puissante, elle est dans certain cas multiple et dans d'autre remplacée par une source d'électrons. La fusion étant métallique, l'enceinte est plongée dans une atmosphère inerte pour éviter les problèmes d'oxydation.

Une fois le modèle achevé, on doit attendre son refroidissement avant de procéder au post-traitement, on procède à la finition manuelle de la pièce (usinage des supports etc.) puis selon les besoins on la soumet à un recuit, un procédé de relaxation de contraintes, une infiltration, un polissage etc.

Ce procédé nécessite moins de supports car les contre-dépouilles ont déjà la poudre compactée comme appui. Cette méthode offre des propriétés mécaniques se rapprochant de celles observée dans un matériau de fonderie ainsi qu'un faible niveau de porosité.

En revanche, l'installation est complexe, et nécessite des infrastructures spéciales. En effet la poudre est extrêmement volatile et dans un souci d'hygiène et de sécurité, des protections respiratoires sont essentielles pour la santé des opérateurs. La présence de porosité même faible, nécessite parfois des infiltrations pour parfaire les caractéristiques mécaniques. Cette étape est couteuse et induit des risques de fissuration et de distorsion.

La projection de liant sur un substrat de type poudre est un mixte entre la technologie de projection de gouttes de matériaux et la solidification de poudre sous l'action de source d'énergie. En effet on projette du liant selon le premier procédé sur un lit de poudre géré comme dans le second procédé. Les particules de poudre sont alors liées dans les zones où le liant est déposé formant ainsi une couche du modèle. L'approvisionnement en poudre se fait comme pour le procédé précédent, la pièce descend d'une épaisseur de couche et le bac de poudre monte d'épaisseur de couche. La poudre est étalée puis tassée.

En post-traitement il faut dépoudrer la poudre tassée autour du modèle puis infiltrer la pièce avec du durcisseur pour enlever la porosité et lisser les surfaces de la pièce. Pour une pièce métallique un déliantage au four suivi d'une infiltration de bronze peut être envisagée. Ce procédé est très utilisé pour la fabrication de modèles de fonderie.

Plus rapide que la projection de matériaux, la projection de liants est tout de même moins précise. Le polissage des surfaces étant difficile, la qualité n'est pas très bonne même après post-traitement. Les matériaux sont également limités.

La projection de matériaux dans un flux d'énergie est toujours un procédé de construction couche par couche et la technologie est similaire au rechargement par laser. Au lieu de fondre le matériau préalablement étalé sur un lit de poudre, les poudres sont transportées par un gaz et injectées dans un faisceau laser puis déposées fondues sur la couche précédente. Le flux de matériau apporté et la couche précédente ont l'avantage d'être bien fusionnés. Le matériau obtenu est dense et se solidifie rapidement. La poudre est essentiellement injectée de façon coaxiale par rapport au faisceau laser, au moyen d'une buse avec sortie annulaire conique.

Les lasers sont principalement des lasers solides, de type lasers à diodes, fibre ou disque. Leur puissance va de quelque centaine de watts à plusieurs kilowatts. La matière est déposée à un débit allant de quelques centaines de gramme par heure à plusieurs kilogrammes par heure.

En termes d'opération de post traitement, on compte naturellement le retrait de supports, un éventuel traitement thermique puis un sablage ou polissage des surfaces visibles.

La limite de dimension des pièces ne dépend que de des dimensions de la machine il n'y a donc pas de limite théorique. Le dépôt de matière peut se faire selon différents axes selon la machine. La commande numérique permet de mettre en place des gradients de densité ou de matière au sein d'une même pièce. Un large choix de combinaisons est donc possible s'il on considère le nombre de matériaux compatible avec ce procédé.

De plus si la technologie est bien paramétrée, la porosité des pièces est quasi nulle. Les caractéristiques mécaniques sont donc remarquables.

Un autre avantage spécifique à ce procédé est que l'on peut rajouter de la matière à des pièces déjà existantes sur des surfaces pas nécessairement planes. On peut ainsi réaliser des nervures, des bossages ou des réparations sur des pièces à forte valeur ajoutée.

La fusion de fil au travers d'une buse chauffante est le procédé le plus représenté sur le marché du grand public, le principe est simple, on vient extruder un matériau au travers d'une buse chauffante (principalement des polymères). On dépose le fil fondu selon la tranche de modèle en construction et on procède une fois de plus couche par couche. Le matériau est sous forme de fil de diamètre 1.5 à 2 mm en bobine. Il est conduit par un dispositif d'entraînement jusqu'à la buse qui en se déplaçant dans le plan de construction, va déposer le plastique fondu sur la couche précédente. Des variantes existent où le matériau est sous forme de granulés et où les déplacements sur les axes se font au niveau de la table. Les supports peuvent être en matériaux dissolvables pour faciliter le post-traitement.

Celui-ci consiste principalement en le retrait ou la dissolution des supports puis en le polissage et la peinture éventuelle des pièces.

Ce procédé bien que peu onéreux est très lent et les caractéristiques mécaniques sont très mauvaises. La production de pièces fonctionnelles est très limitée tout comme la production de pièces volumineuses. De plus la précision est assez mauvaise.

Cette technologie fait partie des technologies pionnières dans le milieu, elle se distingue en deux sous catégories, les feuilles fines et les plaques.

Il s'agit d'un procédé couche par couche, les couches sont découpées puis empilées et fixées. Les liaisons entre les couches peuvent être assurées par vissage, collage simple ou structural (brasage, soudage). La marge de progression de ce procédé est importante, notamment au niveau des outillages qui pourraient être gérés de manière connectée.

Plus concrètement, le LOM, est constitué d'un laser (souvent Co2) ou d'un cutter qui découpe les feuilles en suivant la coupe transversale du modèle CAO et en quadrillant les zones n'appartenant pas au modèle. Pour faciliter l'extraction. De ce fait les vides intérieurs ne sont que très rarement possibles. L'assemblage peut se faire par pulvérisation de colle ou par chauffage de la feuille munie d'une colle thermofusible.

Le post traitement de la LOM consiste en l'extraction de la pièce puis en l'éventuel ponçage et vernissage. Ce mode d'obtention convient particulièrement bien aux modèles de fonderie.

Une variante, la stratoconception, utilise la découpe de strates de plus fortes épaisseurs au sein d'une même plaque qui seront assemblées avec des piges ou des inserts. La liste de matériaux est plus importante que pour la LOM comme la dimension des pièces réalisables. L'utilisation de ce type de procédés est essentiellement la production de modèles de fonderie ou de maquettes visuelles.

Ces procédés sont robustes et rapides à réaliser, la liste des matériaux disponibles est variée et la dimension des pièces est grande. Cependant des progrès sont attendus en post-traitement où certaines étapes pourraient être automatisées.

Il y a deux principaux cas d'application, le premier est un moyen d'obtention de maquettes géométriques pour des salons par exemple, le second est un moyen d'obtenir un prototype fonctionnel ou une pièce unitaire. Dans certains cas on peut considérer les deux éventualités.

La connaissance des propriétés mécaniques étant primordiales, des essais destructifs ont été réalisés par une filiale d'Alpha sur quatre familles de matériaux évoquées ci-dessous. Les essais ont permis de mettre en lumière l'anisotropie des éprouvettes obtenues par fabrication additive ainsi que leur disparité en termes de valeur. Les résultats donnent les résistances mécaniques, élastiques, le module d'Young, la dureté brinell et la rugosité. Ces essais ont non seulement été fait sur quatre familles de matériaux mais également sur plusieurs états métallurgiques pour chacun des quatre métaux.

Les capacités des procédés et les données techniques des machines les plus courantes se trouvent dans le mémoire de fin d'études.

Il existe une large gamme de matériaux compatibles avec les procédés décrits, leurs propriétés, leur nature, leur prix sont mentionnés dans le mémoire de fin d'études. Les matériaux les plus détaillés sont l'Inconel 718, 316L, Ti grade 23 et AlSi7Mg0.6. Différents états de chaque matériau seront pris en compte.

-L'état "AS-BUILT" est défini dans la norme ASTM F2924 (Ti6Al4V par fusion en lit de poudre) comme suit : "l'état des pièces fabriquées par procédé additif avant tout post-traitement, à l'exception de l'enlèvement de la plaque de construction ou de l'enlèvement des poudres ou des supports". Cette condition est remplie lorsqu'aucun traitement thermique n'est appliqué.

-L'état "relaxation des contraintes" est défini comme l'état d'une pièce après traitement thermique pour soulager le stress. Cet état ne concerne que les alliages suivants : Aluminium AlSi7Mg0.6 et titane Ti6Al4V ELI (Grade 23).

-L'état "STABILISATION DIMENSIONNELLE" est défini comme l'état d'une pièce après traitement thermique pour la stabilisation dimensionnelle. Cette condition ne s'applique qu'à l'alliage d'acier inoxydable 316L.

-L'état "HYPERQUENCH" est défini comme l'état d'une pièce après traitement thermique par hyper durcissement. Ce rapport ne concerne que l'alliage d'acier 316L.

-L'état "CIC" est défini comme l'état d'une pièce après un traitement de compression isostatique à chaud. Cette condition ne concerne que l'alliage Titane Ti6Al4V ELI (Grade 23).

-L'état "T6" est défini comme l'état d'une pièce après un traitement thermique consistant en une solution et un durcissement suivi d'un vieillissement. Cette condition ne concerne que l'alliage d'aluminium AlSi7Mg0.6.

-L'état "SOLUTION" est défini comme l'état d'une pièce après un traitement thermique consistant en solution et durcissement. Cette condition ne concerne que l'Inconel 718.

-L'état "SOLUTION+AGED" est défini comme l'état d'une pièce après traitement thermique consistant en solution et durcissement, suivi du vieillissement. Cette condition ne concerne que l'Inconel 718.

Le logigramme d'aide à la décision a pour objectif de guider le concepteur ou l'ingénieur dans le choix d'utiliser ou non la fabrication additive comme moyen d'obtention pour une pièce déjà existante ou non. Il indiquera à la personne concernée les questions à se poser pour identifier le potentiel de différents aspects de la fabrication additive, la présence des matériaux envisagés, le volume de fabrication possible ou encore la précision géométrique des procédés.

La méthodologie se divise en deux parties principales, une première concernant la disponibilité des matériaux, le volume de fabrication et les potentiels liés aux procédés. Il s'agit d'une partie d'aide à la décision de choisir ou non la fabrication additive comme procédé d'obtention. Une seconde partie aborde la phase de conception, elle aborde la prise en compte de l'anisotropie des matériaux, des limites du procédé, les risques technico-commerciaux. Elle guide également le concepteur au travers des différentes règles concernant l'intégration fonctionnelle ainsi que les optimisations mécaniques et structurelles.

Un cas d'application étudié fut l'étude du moyen d'obtention d'un sous ensemble. Ce fut un bon exemple pour montrer que la fabrication additive n'est pas toujours le bon moyen d'obtention. En effet, bien que technologiquement très intéressante pour cette pièce des études ont montré que pour une même demande le prix d'obtention était augmenté de 856% par fabrication additive. Tandis que par usinage le prix était baissé d'environ 30%.

La fabrication d'additifs permet la production de pièces très complexes, mais elle a ses inconvénients. Pour Alpha, la plupart des pièces concernées sont en métal, le procédé

de fabrication additif le plus adapté étant alors la fusion sélective laser (SLM). Les règles de conception à suivre décrites ci-après ne concernent que le processus de GDT.

Le SLM appartient à la famille des "solidifications de poudres sous l'action d'une source d'énergie" et c'est l'une des technologies les plus courantes.

La poudre est déposée sur un substrat (la table de la machine pour la première couche). Il est important d'éviter tout effondrement des couches lors de leur empilement. S'il n'y a pas de problème d'empilage des planchers, il n'en va pas de même pour les plafonds. S'ils sont horizontaux, ils devront être supportés et selon les matériaux, à partir d'un certain angle limite avec le sol, on considère qu'à partir d'une valeur limite d'angle avec le sol une couche de poudre ne trouve plus de substrat suffisant pour l'entretenir. Pour éviter ce problème, le logiciel qui pilote la machine va créer un échafaudage pour relier la couche au premier étage (après avoir trouvé la meilleure orientation pour limiter la construction de ces échafaudages. C'est le processus de création moyen. Il y en aura plus ou moins selon les formes à réaliser.

Le support est une maille imprimée avec la pièce dont les paramètres de fabrication sont dégradés afin qu'elle puisse être facilement enlevée.

Si les valeurs angulaires changent, cela peut compliquer la conception de la pièce. Il est courant de travailler autour de la valeur médiane de 45° qui couvre le titane et l'aluminium et la haute qualité pour faciliter la conception d'une pièce car cet angle est répété dans les cadrans d'un repère orthonormal.

En fonction de l'emplacement de la pièce dans le réservoir de fabrication, les planchers et les plafonds doivent être détectés.

La technique la plus couramment utilisée pour une pièce mécanique, souvent orthogonale, est d'incliner la pièce de 45° dans le plateau de fabrication. Même si en fin de compte le fournisseur est le seul décideur des angles d'impression finaux, l'angle de 45° est une base efficace pour modéliser une pièce à fabriquer.

Les trous parallèles à la table de la machine et d'un diamètre inférieur à 8 mm ne nécessitent pas de support. Les arrondis ne sont pas non plus de la même valeur. Pour les trous plus grands, il sera nécessaire d'utiliser une forme voûtée à partir d'une inclinaison de 45° . Attention cependant, car à cette valeur limite, il existe un risque de déformation locale.

L'optimisation est un processus mathématique visant à atteindre un but tout en ajustant des paramètres, la topologie consiste à appliquer les mathématiques à la géométrie du lieu et aux propriétés de l'espace.

L'optimisation topologique peut être décrite comme suit, c'est mettre la bonne quantité de bons matériaux au bon endroit pour la bonne raison.

Le logiciel d'optimisation topologique aide les concepteurs à définir la forme la plus optimale de leur pièce mécanique en fonction des contraintes appliquées. De plus, le processus d'optimisation topologique exige qu'ils soient plus rigoureux, contrôlés, confiants et habituels dans la gestion des besoins fonctionnels et des réponses.

Les personnes qui appliquent ce processus sont les concepteurs mécaniques assistés par les ingénieurs de projet et de simulation. Le processus d'optimisation topologique

devient de plus en plus courant à mesure que les besoins des clients augmentent. Elle devient donc récurrente afin d'assurer une performance maximale.

Ce procédé n'est pas destiné à être appliqué à toutes les parties d'un système mécanique, mais à 20% des parties qui affectent 80% de la masse, de la résistance et de la rigidité d'un système complet. Elle s'applique aussi bien à une pièce existante qu'à une pièce inexistante, en avant-projet préliminaire. De plus, il est important d'évaluer le gain apporté par l'application de ce procédé par rapport à l'énergie dépensée car le procédé peut être long en terme de temps de calcul, l'optimisation topologique ne fonctionne pas en ajoutant du matériel entre interfaces.

Il fonctionne en enlevant du matériel sur un volume prédéfini entre les interfaces.

Il ne peut pas partir d'une feuille de papier vierge, définir des interfaces et appliquer le processus pour créer la pièce. Nous avons besoin d'un volume initial de matériel pour enlever le matériel.

Des termes spécifiques sont utilisés pour décrire ce nouveau processus.

Espace de non design : Domaine géométrique de la partie dans laquelle le logiciel n'a pas le droit d'optimisation.

Espace de design : Domaine géométrique de la pièce attribuée au logiciel pour optimiser la quantité de matière.

Domaine d'études : Le champ d'étude est une partie mécanique composée d'un espace non design et d'un espace design, qui peut être assemblé avec les éléments en interaction les uns avec les autres et utilisé dans son environnement.

Conception par topologie : Il s'agit d'un processus de conception utilisant l'optimisation topologique. Le concepteur crée une partie concept qu'il optimise ensuite à l'aide d'outils informatiques.

La conception doit être régulée par des paramètres définis par l'ingénieur en charge de l'architecture du système qui recevra la pièce. L'optimisation, la réduction de la masse d'un système mécanique peut avoir des répercussions sur l'ensemble du système.

L'approche inverse est également possible. Nous cherchons à réduire la puissance d'un actionneur nécessaire pour optimiser le bilan massique et les performances du système. Pour ce faire, nous recherchons des paramètres d'influence afin d'atteindre nos objectifs.

La robustesse d'un système mécanique est liée à la stabilité de ses performances et à sa résistance à la fatigue. Nous pouvons décider d'augmenter ou de diminuer la robustesse d'un système lors d'une optimisation. C'est pourquoi il est possible d'optimiser un système mécanique sans réduire sa masse. Elle peut même augmenter en masse. En général, l'optimisation topologique fournira au système des formes plus lisses avec moins de concentrations de contraintes qui augmenteront sa robustesse.

Si un système n'est pas assez robuste et subit un entretien annuel, il est possible d'appliquer une optimisation topologique pour augmenter sa robustesse. L'entretien du système pourrait alors être effectué tous les deux ans, ce qui réduirait de moitié le coût de l'entretien.

-Si le système en est une partie, il sera le seul candidat à l'optimisation. Après optimisation, nous obtiendrons une géométrie monobloc mais il sera possible de la séparer ultérieurement en plusieurs parties détaillées qui n'ont pas de mouvements relatifs entre elles.

-Si le système est un assemblage de pièces fixes, il est possible de limiter l'optimisation à une ou plusieurs pièces.

-Si les pièces sont mobiles entre elles, il faut d'abord déterminer les cas de charge dans le temps en fonction des mouvements afin de pouvoir réaliser l'optimisation.

Un cas d'application de l'optimisation topologique fut la reconception d'une pièce en vue d'une amélioration des propriétés mécaniques de cette dernière. Les données d'entrées n'existant plus il a fallu réeffectuer les calculs de base pour résoudre le problème. Des outils numériques ont été utilisés (étude de dynamique rapide, éléments finis, calcul statique, optimisation topologique et reconception). Cette démarche a permis de situer les zones de matières inutilisées dans les cas d'utilisation du système et de réduire la masse du système jusqu'à environ 30% en appliquant un coefficient de sécurité de 1.5.

Le design génératif est une toute nouvelle façon de concevoir des pièces mécaniques. Cela a été permis par les progrès de la technologie de l'information et l'augmentation de la puissance de calcul.

Si l'on considère la façon traditionnelle de concevoir, comme l'optimisation topologique par exemple, il faut au moins un ingénieur assisté par un ordinateur et éventuellement un logiciel. De cette façon, nous pouvons obtenir un nombre limité de solutions dans un intervalle de temps donné.

Si l'on considère la façon traditionnelle de concevoir, comme l'optimisation topologique par exemple, il faut au moins un ingénieur assisté par un ordinateur et éventuellement un logiciel. De cette façon, nous pouvons obtenir un nombre limité de solutions dans un intervalle de temps donné.

Pour la conception générative est encore nécessaire un ingénieur qui, grâce à l'algorithme AI et la puissance de calcul d'un nuage est capable de générer des milliers de possibilités de conception pour les paramètres désignés pour s'adapter.

Le processus à suivre est le suivant, dans un premier temps, à l'aide d'un logiciel de CAO, le concepteur définit les objectifs et les contraintes de la conception. Il définit ensuite les paramètres tels que le matériau, le poids, la résistance et les coûts.

Ensuite, l'ordinateur commence à calculer avec des algorithmes et son propre processus pour générer des milliers de possibilités et analyser l'efficacité de chacune.

Une fois cela fait, le concepteur examine les possibilités et réévalue les objectifs et les contraintes. Un autre calcul est fait. L'intuition humaine combinée à une intelligence artificielle statistique identifie la solution la plus adaptée.

Le concepteur fabrique un prototype avec un procédé de prototypage rapide. Le prototype est testé et évalué et si le prototype n'est pas satisfaisant, vous devez retourner à l'étape de réévaluation.

Aujourd'hui, le design génératif est en train d'émerger, il commence à être utilisé par des industriels comme Airbus, Under Armour ou Hack Rod mais il a encore des progrès à faire.

Avec le temps, la conception générative pourrait faire gagner du temps en valorisant le temps qu'un concepteur consacre à une étude pendant que l'ordinateur génère des possibilités.

SUMMARY

Alpha currently has parts of their system that are manufactured by forging or casting. Nowadays the tools and equipment for those processes are getting worn, the subcontracting company in charge of some of casted parts can't guarantee the quality of those parts anymore.

Moreover, Alpha recently has set up a plant specialized in metallic additive manufacturing and the policy of production is to encourage the production in that subsidiary.

In order to adress those issues, Alpha managed to prepare his design office for designing parts that will be 3D printed.

My function is to establish a methodology for the mechanical design of parts that will be manufactured in additive manufacturing.

Once the researches about the process and the different technologies will be done, I will establish steps that must be achieve for the mechanical design of a piece or a system. The methodology will take into account the physical properties that can be guaranteed by the process and their flaws such as the porosity for instance, the constraint linked to the technology and if possible apply to the part a topological optimization.

Key Words

3D Printing, Mechanical part, Physical properties, Topological optimization, Generative design, Prototyping, Industry, Spare parts.

CITATION

Quentin, Masson . Design and production of selected 3D printed metallic parts
Master's thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering,
Institute of Manufacturing Technology. 44p. La Ferté Saint Aubin 2019. Supervisor: Prof.
Ing. Miroslav Píška, CSc.

Declaration

I declare that I am the only author of this Diploma Thesis on the title of Diploma Thesis **Design and production of selected 3D printed metallic parts** using the literature and sources listed on the list attached to this thesis.

09/08/2019

date

Bc. Quentin Masson

Title, first name,last name
signature

Content

Summary.....	3
declaration.....	4
Content.....	5
introduction.....	7
1 Current state of technology.....	8
1.1 Photo polymerization.....	8
1.2 Material Jetting.....	9
1.3 Solidification of powder under the action of an energy source.....	10
1.4 Jetting a binder on a powder-like substrate.....	11
1.5 Projection of materials into an energy flow.....	12
1.6 Melting of yarn through a heating nozzle.....	13
1.7 Assembly of layers from cut sheets or plate.....	14
1.8 Summary table.....	15
1.9 Process compatible materials.....	16
1.10 Magnitude of the material cost.....	17
1.11 Machine abilities.....	17
1.12 Costs and productivity.....	18
1.13 Synthesis.....	19
2 Decision support flowchart.....	20
3 Design rules.....	23
3.2 Control of holders.....	23
3.3 Control of internal shapes.....	25
4 Material Properties.....	27
4.2 State and heat treatment.....	27
4.3 Physical properties and typical use.....	29
4.4 Chemical composition.....	29
4.5 Physical properties.....	30
5 Topological optimization.....	33
5.1 Introduction to topological optimization.....	33
5.2 Main steps topological optimization.....	35
5.3 Eligibility criteria of a part.....	37
5.3.1 Mass criteria.....	37
5.3.2 Robustness criteria.....	37
5.3.3 Number of parts criteria.....	37

5.4	Process.....	38
5.4.1	Functionnal analysis	38
5.4.2	Creation of the field of study	38
5.5	Calculation	39
5.6	Rebuild of the model.....	40
5.7	Validation.....	41
5.8	Example.....	42
6	Generative design	45
conclusion	46
Figures	4
Tables	4
References	5

References

-
- ⁱ TRUBAČOVÁ, Pavlína. Advanced fabrication of custom orthopaedics implants using Selective Laser technology. Brno 2016. Diploma thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Manufacturing Engineering. 127 p. 6 appendixes. Head of the work: Prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc, Ing. David Prat, Ph.D.
- ⁱⁱ Joël Rosenberg, Pascal Morand, Dominique Turcq. L'impression 3D: porte d'entrée dans l'industrie du 21ème siècle.
- ⁱⁱⁱ Thales. Règles de conception pour l'utilisation de la technologie SLM.
- ^{iv} Victor Chastand. Etude du comportement mécanique et des mécanismes d'endommagement de parts métalliques réalisées par fabrication additive. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Centrale de Lille, 2016. Français NNT : 2016ECLI0012.
- ^v BOIVIE, K., KARLSEN, R., VAN DER EIJK, C. Material Issues of the Metal Printing Process. Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Trondheim, Norway SINTEF Technology and Society, Product and Production, Trondheim, Norway SINTEF Materials and Chemistry, Metallurgy, Trondheim, Norway [online]. 2011. [01-02-2014].
- ^{vi} Adrene Sakly. Fabrication additive de parts à base d'alliages métalliques complexes. 2013, Ressources, Procédés, Produits et Environnement, Ecole Doctorale RP2E, Université de Lorraine.
- ^{vii} Clément Margueray et Loïc Vollard. Fabrication additive métallique technologies et opportunités. Mechanical department INSA Rouen, 2016.
- ^{viii} David Santos Gonzalez, Almudena Gonzalez Alvarez. Additive Manufacturing Feasibility Study & Technology Demonstration EDA AM State of the Art & Strategic Report. 2018.
- ^{ix} Claude Barlier et Alain Bernard. FABRICATION ADDITIVE Du prototypage rapide à l'impression 3D, 2015.
- ^x Norm NF E67-005, ISO/ASTM 52921
- ^{xi} Thanh Hoang Vo. La démarche de conception pour la fabrication additive : choix des modes de représentation dans la phase d'analyse. Génie des procédés. Université Grenoble Alpes, 2017. Français.
- ^{xii} www.fictiv.com/hwg/fabricate/recommended-wall-thickness-for-3d-printing
- ^{xiii} <https://formlabs.com/fr/3d-printers/form-2/design-specs/>
- ^{xiv} <http://www.rapidmade.com/sla-guidelines/>
- ^{xv} <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-biender-jetting-3d-printing>
- ^{xvi} <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/pa-12-sls/design-guidelines>
- ^{xvii} <https://www.renishaw.com/en/design-formetal-am-a-beginners-guide--42652>
- ^{xviii} https://cdn2.hubspot.net/hubfs/.../Xometry_DesignGuide_FDM.PDF
- ^{xix} <http://forerunner3d.com/dmls-3d-printing-design-guide/>
- ^{xx} <https://3faktor.com/en/3d-printing-materials-technologies/direct-metal-3d-printing-aluminum-stainless-steel-titanium/>
- ^{xxi} <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/alumide/design-guidelines>
- ^{xxii} THALES. Guide de choix des matériaux métalliques pour la fabrication additive, 87210810-DDQ-GRP-FR, 2017.
- ^{xxiii} THALES. Introduction to topological optimization
- ^{xxiv} <https://www.autodesk.fr/redshift/definition-conception-generative/>
- ^{xxv} <https://www.wired.com/2015/12/airbus-newest-design-is-based-on-slime-mold-and-bones/>