



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM PROVEDITELNOSTI 3D TISKU KOVŮ JAKOŽTO TECHNOLOGIE PRO PROTOTYPOVOU VÝROBU PLASTOVÝCH DÍLŮ

WORKABILITY STUDY 3D METAL PRINTING AS TECHNOLOGY FOR PROTOTYPE PLASTIC PARTS
MANUFACTURING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Sigmund, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Tomáš Kovář
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Marian Sigmund, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Studium proveditelnosti 3D tisku kovů jakožto technologie pro prototypovou výrobu plastových dílů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stávající proces vývoje prototypových nástrojů pro lisování plastů má nevýhodu ve velké časové náročnosti. 3D tisk se jeví jako možná technologie, která by mohla zrychlit výrobu prototypových lisařských nástrojů pro výrobu plastových dílů zvláště pro automobilový průmysl. Zde je jedním z hlavních požadavků krátký dodací termín výroby těchto dílů.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor zadání.

Vhodné materiály pro 3D tisk lisovacích nástrojů.

Literární rešerše vhodných technologií 3D tisku lisovacích nástrojů.

Pokud bude proveditelné, vyrobený vzorek porovnat s nástrojem vyrobeným konvenční technologií.

Vyhodnocení vhodnosti dané technologie 3D tisku kovů a její praktické proveditelnosti s ohledem na nutnost dalších technologických operací (kalení, leštění) nástrojů.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

PAGÁČ, Marek. 3D tisk kovů na Fakultě strojní VŠB-TU Ostrava. MM Průmyslové spektrum. Praha, 2017, 2017, (4). ISSN 1212-2572.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

KOVÁŘ Tomáš: Studium proveditelnosti 3D tisku kovů jakožto technologie pro prototypovou výrobu plastových dílů.

Tato bakalářská práce je zaměřena na proveditelnost kovového 3D tisku. Matrice z nástrojové oceli 90MnCrV8 je časově náročná a nákladná při výrobě konvenční metodou. Při zvážení použití matrice na maximálně 50 ks výlisků je možné volit jiný materiál, než nástrojovou ocel. Z nabízených možností kovového 3D tisk byly vybrány 2 vhodné metody, jde o SLM a WAAM, kde metoda WAAM se jeví jako levnější. Dostupné materiály za náhradu oceli 90MnCrV8 jsou kovový drát G4Si1 pro metodu WAAM a korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 pro metodu SLM. Po uvedení všech možností a vyhodnocení lze vidět, že proveditelnost kovového 3D tisku jako náhrada konvenční výroby nástroje je možná.

Klíčová slova: proveditelnost, 3D tisk kovů, SLM, WAAM, nástrojová ocel

ABSTRACT

KOVÁŘ Tomáš: Workability study 3D metal printing as technology for prototype plastic parts manufacturing.

This bachelor thesis is focused on the feasibility of metallic 3D printing. The 90MnCrV8 tool steel die is time consuming and expensive to manufacture by conventional methods. When considering the use of a die for a maximum of 50 pieces of moldings, it is possible to choose a material other than tool steel. From the offered possibilities of metal 3D printing, 2 suitable methods were selected, namely SLM and WAAM, where the WAAM method appears to be cheaper. Available materials for steel replacement 90MnCrV8 are metal wire G4Si1 for WAAM method and stainless steel X2CrNiMo17-12-2 for the SLM method. After listing all the options and evaluations, it can be seen that the feasibility of metallic 3D printing as a replacement for conventional tool production is possible.

Keywords: feasibility, 3D metal printing, SLM, WAAM, tool steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOVÁŘ, Tomáš. *Studium proveditelnosti 3D tisku kovů jakožto technologie pro prototypovou výrobu plastových dílů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132168>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 22.4.2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Mariánu Sigmundovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování bakalářské práce. Firmě Hanon Systems Autopal Services s.r.o. a panu Ing. Jiřímu Bazalovi za poskytnutá data a informace týkající se mé bakalářské práce. Panu Ing. Tomáši Herčíkovi za připomínky a pomoc při poskytnutí podkladů k řešení bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat rodině, přítelkyni a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

Bibliografická citace

čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Výrobek 3D tisku – matrice	10
1.2 Výlisek z nerezi.....	11
2 TECHNOLOGIE ADITIVNÍCH METOD	12
2.1 Proces AM s práškovým kovem	12
2.1.1 Nástrojová ocel X100CrMoV5-1	13
2.1.2 Vysokopevnostní ocel X3NiCoMoTi18-9-5.....	14
2.1.3 Korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2	15
2.2 Proces AM s kovovým drátem	16
2.2.1 Konstrukční ocel E335	17
3 METODY 3D TISKU	18
3.1 Metoda Selective Laser Sintering (SLS).....	18
3.2 Metoda Selective Laser Melting (SLM)	19
3.3 Metoda Electron Beam Melting (EBM).....	21
3.4 Metoda Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM).....	21
3.5 Navařování metodou Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM)	22
4 VOLBA METODY TISKU A MATERIÁLU	25
4.1 Volba metody 3D tisku	25
4.2 Volba materiálu pro 3D tisk.....	26
5 TECHNICKÉ A EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	28
5.1 Náklady konvenčního obrábění.....	28
5.2 Náklady 3D tisku SLM	29
5.3 Náklady 3D tisku WAAM	30
5.4 Časová náročnost	31
5.5 Technické porovnání	32
6 ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	39
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	41
SEZNAM TABULEK	42

ÚVOD [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]

Aditivní výroba je formalizovaný termín pro to, co se dříve nazývalo Rapid Prototyping a co se dnes lidově nazývá 3D tisk. Tato technologie 3D tisku, jakožto výrobní metoda nejen strojírenských součástí, má v současnosti stále větší popularitu. Jedná se o moderní technologii, kterou lze rychle a levně realizovat myšlenky konstruktérů a designérů. Ti potřebují modely (prototypy) jako nedílnou součást výroby. Prototypy zajišťují včasné a snazší odhalení chyby, zjištění smontovatelnosti sestavy nebo vhodnosti pro sériovou výrobu. Technologie 3D tisku se nejčastěji používá při výrobě prototypů nebo v malosériové výrobě. Díky této technologii lze vyrábět z virtuálních modelů v počítači, modely fyzické v daných rozměrech i kvalitě za relativně krátký čas a cenu. V porovnání s jinými technologiemi výroby prototypů, jako jsou například třískové obrábění, tváření, odlévání, kde je potřeba velkého množství materiálu, nástrojů, forem, jednocelových i víceúčelových strojů a v neposlední řadě také odpovědných pracovníků, má 3D tisk značnou výhodu. Nevýhodou 3D tisku je horší drsnost povrchu a hlavně použití při hromadné výrobě. Charakteristickým znakem 3D tisku je, že materiál se postupně přidává, čímž nevzniká tak velké množství odpadu oproti jiným metodám. Vytisknutí součásti může trvat pár hodin nebo i desítek hodin, záleží na velikosti součásti. Výhodou 3D tisku je rozsáhlá škála aditivních metod Rapid Prototypingu a s tím související i použitelný materiál, jako je například plast, kovy, keramika, beton či pryskyřice a jiné. 3D tiskem můžeme konstruovat složitější tvary i dosahovat nižších hmotností při zachování mechanických vlastností. Z hlediska krátké výrobní doby a možnosti vyrobit téměř cokoliv a v jakékoli oblasti průmyslu je důvod, proč je 3D tisku předpovězen velký rozmach, budoucnost a již nyní je často označován jako počátek „třetí průmyslové revoluce“.

Tato práce je zaměřena na výrobu matrice nástroje určeného pro lisování, který bude vyroben pomocí 3D tisku. Cílem je najít vhodný materiál a metodu výroby 3D tiskem.



Obr.1 Kovové výrobky z 3D tisku [7], [8], [9], [10]

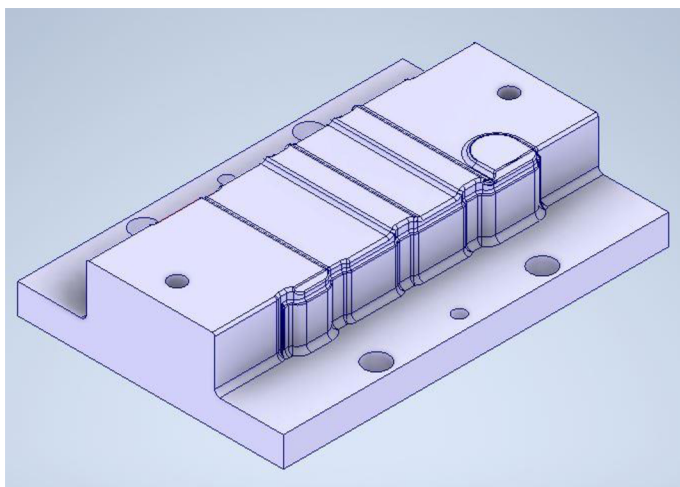
1 ROZBOR ZADÁNÍ [2], [3], [4]

Firma Hanon Systems Autopal Services s.r.o. v Hluku vyvíjí a vyrábí komponenty chlazení hnacího ústrojí; náplně chladiče chlazené jak vzduchem tak vodou; nízkoteplotní radiátory a chladiče na recirkulaci výfukových plynů pro automobilový průmysl. Při vývoji potřebuje fyzické modely (prototypy), které lisuje a ohýbá na lisech. V lisech se nachází klíčové komponenty nástroje, které tváří výlisek. Pokud je výlisek rozměrově i tvarově odlišný od jiných, je potřeba pro něj vyrobit nový nástroj s potřebnými komponenty. Nástroj je složen ze 4 komponent a to ze dvou ohybníků, matrice a přídržovače. Komponenty nástroje jsou vyráběny konvenční technologií. Tento proces výroby nástroje je pro firmu poměrně časově i cenově náročný.

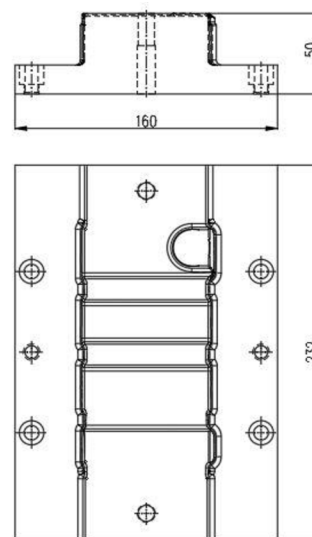
Řešením se jeví vyrobit nástroj technologií 3D tisku, který by mohl být rychlejší a levnější. Při výrobě konvenční metodou je materiál nástroje nástrojová ocel 90MnCrV8. Problém je v tom, že nástrojová ocel pro výrobu pomocí 3D tisku se běžně nepoužívá a je hůře dostupná. Tenhle problém usnadňuje fakt, že se vyrobí malé množství prototypů, přibližně 50ks, díky tomu nahrazený materiál nemusí být nutně nástrojová ocel se stejnými vlastnostmi ani žádná jiná. Cílem je tedy najít materiál pro nástroj s podobnými a vhodnými vlastnostmi, který půjde vytisknout technologií 3D tisku, najít vhodnou metodu 3D tisku a porovnat časovou i cenovou náročnost již se zmíněnou konvenční technologií.

1.1 Výrobek 3D tisku – matrice [11], [12], [13], [14], [15]

Výrobek z 3D tisku je jeden z dílů nástroje pro lisování, konkrétně se jedná o matici. Tento díl byl vybrán z důvodu optimální velikosti, zarovnané spodní plochy a také díky své menší geometrické náročnosti, oproti již zmíněným součástem, jako prototyp pro možný výrobek z 3D tisku. Matrice na obr.2 tvoří spodní část soustavy nástroje, shora na matici dosedá přídržovač, po stranách dosedají ohybníky. Materiál matrice použitý při výrobě konvenční metodou je nástrojová ocel 90MnCrV8 (ČSN 41 9312.3, W. Nr. 1.2842) s mechanickými vlastnostmi v tab.2. Matrice je široká 160 mm s tloušťkou 50 mm v délce 232 mm, viz obr.3.



Obr.2 Matrice



Obr.3 Náskres matrice

Konvenční výroba matrice začíná obráběním polotovaru o rozměrech 60x170x240 mm. Obrábění zahrnuje frézování na obráběcím centru, elektroerozivní obrábění otvorů a složitějších ploch, které fréza nedokáže obrobít. Po obroušení následně obrobek putuje do

kalírny. Z kalírny jde obrobek zpět na dílnu, kde následuje obrobení přídavků frézováním diamantovými frézami a na závěr dochází k leštění povrchu. V tab.1 lze vidět chemické složení oceli.

Tab.1 Chemické složení oceli 90MnCrV8 [14]

C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Si [%]	V [%]	S [%]	P [%]	Fe [%]
0,9	2	0,35	0,3	0,12	<0,03	<0,03	zbytek

Tato nástrojová ocel je nízkolegovaná. Hlavní legující prvek je zde mangan, sice se většinou vyskytuje jako nečistota, ale zajišťuje nám zvýšení pevnosti a odolnosti proti opotřebení, na druhou stranu dělá ocel křehčí. Dalšími legujícími prvky jsou chrom, který taky zvyšuje pevnost a odolnost. Vanad zvyšuje odolnost proti opotřebení, popuštění a přehřátí, zlepšuje únavové vlastnosti, snižuje náchylnost ke stárnutí, naopak snižuje obrobitelnost, je závislý na obsahu uhlíku. Křemík zvyšuje pevnost a tvrdost, ale zhoršuje tvařitelnost a elektrickou a tepelnou vodivost. Síra a fosfor jsou nežádoucí prvky. V tab.2 jsou vypsané některé mechanické vlastnosti oceli.

Tab.2 Mechanické vlastnosti oceli 90MnCrV8 [15]

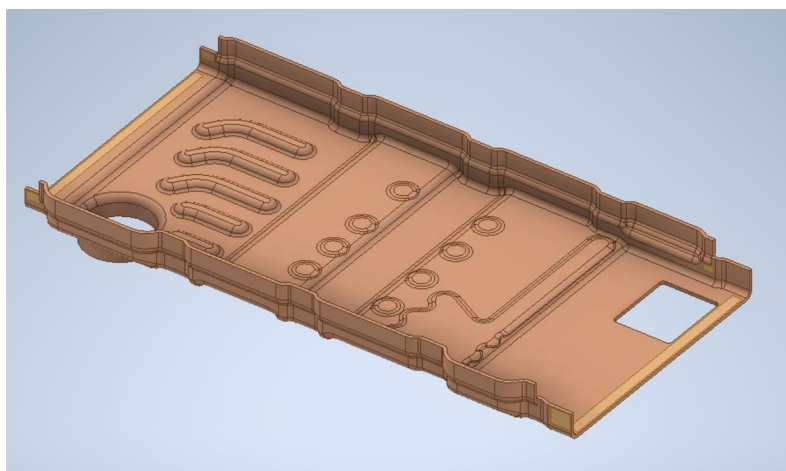
Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tvrdost [HRC]	Drsnost povrchu před obrobením přídavků Ra [μm]
2180	54	0,4

1.2 Výlisek z nerezí [16]

Jedná se o výrobek lisovacího nástroje, který vzniká vložením plechu na matrici a dosednutím ohybníků a přídržovače vznikne výlisek. Materiál výlisku je korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (W. Nr. 1.4301, ČSN 41 7240), viz obr.4, s šířkou 85,1 mm výškou 18,6 mm a délkou 171,5 mm. Tento materiál s chemickým složením v tab.3 má mnohem nižší tvrdost a pevnost než materiál použitý pro nástroj. Hodnoty mechanických vlastností lze vidět v tab.4.

Tab.3 Chemické složení oceli X5CrNi18-10 [16]

Cr [%]	Ni [%]	Mn [%]	Si [%]	N [%]	C [%]	P [%]	S [%]	Fe [%]
18	10	<2	<1	<0,11	0,07	0,045	0,015	zbytek



Obr.4 Výlisek z korozivzdorné oceli

Tab.4 Mechanické vlastnosti výlisku [16]

Pevnost v tahu Rm [MPa]	Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	Tvrdost [HB]	Tažnost A [%]
600	190	215	45

2 TECHNOLOGIE ADITIVNÍCH METOD [4], [17], [42]

Technologie aditivních metod je používána více než 25 let, ačkoliv ji využívá na trhu relativně malé množství firem, poslední dobou povědomí o této oblasti výroby nabývá na významu. Rozmach lze vysledovat pomocí ekonomické stopy na trhu, kdy v roce 2013 se cena produktů a služeb 3D tisku zvýšila na 3,07 miliardy USD, tzn. s roční mírou růstu 34,9 %. V roce 2021 má podle odborníků dosáhnout hodnota trhu na 10,8 miliard USD. Rapid Prototyping má velká očekávání, která jsou založena na zásadních rozdílech v porovnání s tradičními formami výroby.

Zásadní výhodou je tvorba dříve nemyslitelných geometrických tvarů výrobků, kterou konvenční metody nebyly schopné vyrobit. To má za následek větší „volnou ruku“ při návrhu součástí. Lze vyrábět například komponenty připomínající tvarem lidské klouby, díly s dutinami, vnitřně chlazené lopatky turbín a ostatní. Některé úpravy pomůžou výrazně zredukovat hmotnost, to má za následek velmi vhodné použití v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu. Úspora zde může činit více než 70 % hmotnosti. U konvenčních metod se tyto složité konstrukce nepoužívají z důvodu, že zabraňují nástroji dostat se do všech míst na obrobku. Další výhodou je využití tzv. přístupu BTF (buy to fly) v optimálním poměru. Kdy je v poměru „vstupní“ výrobní materiál k materiálu „výstupnímu“, tzn. k materiálu vyrobené součásti. Z přístupu plyne, že na rozdíl například od obrábění vzniká výrazně méně odpadu. Mimo jiné zde nejsou náklady na obráběcí sady nástrojů nebo forem jejich složité nastavování a předvýrobní příprava, což šetří čas i peníze. Obecně má aditivní výroba i několik nevýhod, které se výzkumné společnosti snaží odstranit a kladou si za cíl upravit metodu na konkurenceschopnou konvenčním metodám. Ve většině případů platí, že je velké omezení při použití v hromadné a sériové výrobě, kdy čas výroby je mnohem vyšší než při obrábění nebo odlévání. Obecně výroba součástky pomocí odlévání trvá v praxi běžně několik sekund až minut (záleží na velikosti a složitosti součástky), kdežto použití aditivní metody (AM) pro výrobu by trvalo několik hodin. To samé platí při obrábění, například na CNC, kde čas tisku je mnohem vyšší než čas úběru třísky. Z tohoto obecně plyne, že aditivní metodu je nejlepší využít na prototypovou výrobu nebo na speciální a individuální zakázky.

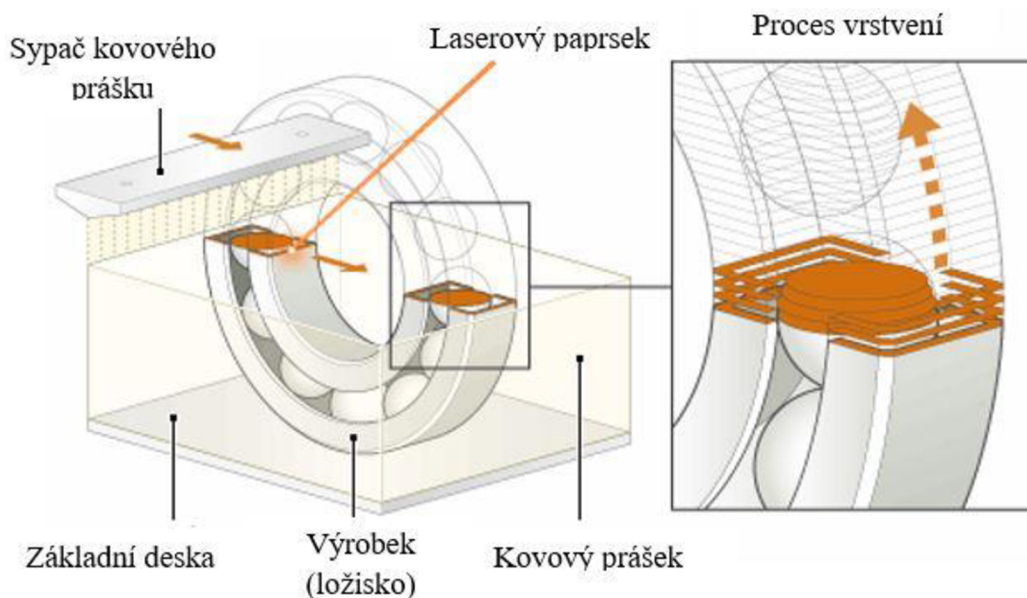
Jak již bylo řečeno, základní princip výroby je, že model lze vyrobit přímo bez nutnosti plánování celého výrobního procesu. Stačí, aby byl vytvořen model součásti. Dále je dnes technologie AM stále více aplikována na výrobu nekovových materiálů, jako jsou keramika, polymery a dokonce i čokoláda. Naproti tomu, u kovových materiálů je proces stále ve vývoji a jedná se tak o méně probádanou oblast, která se ale postupně vyvíjí, modernizuje a rozšiřuje. Avšak odhaduje se, metodě nová budoucnost, která bude mít velký ekonomický i sociální dopad a navíc v roce 2025 má dosáhnout celkového ekonomického dopadu 3D tisku přes 500 miliard eur. Aditivní výroba umožňuje podnikatelům větší šance transformovat myšlenky do reality, které nebudou trvat několik týdnů nebo měsíců, ale budou v řádech dnů a hodin. V současné době lze procesy kovových AM kategorizovaně rozdělit podle způsobu dodávání přídavného materiálu na práškové kovy a podávání kovového drátu.

Uváděné materiály v podkapitolách jsou vybrány jako vhodné pro možnou výrobu matrice nástroje. Nejedná se o výčet nejpoužívanějších materiálů.

2.1 Proces AM s práškovým kovem [4], [18], [19]

U procesů práškovým nanášením, viz obr.5 jsou zdroje tavicí energie hlavně laserový a elektronový paprsek. Díky práškovému materiálu lze přesnost výroby řídit na poměrně vysoké úrovni a to až při 30 μm . Nízká energie lineárního depozitu umožňuje relativně nízké

zkreslení během výroby. Velikost dílů vyrobených touto metodou je však omezena rozměry výrobní komory. Také pro procesy napájené laserem, i když jsou použity plyny pro stínění, je oxidace dílů vyrobených těmito technologiemi velká, což může vést ke snížení mechanických vlastností. Aby se oxidaci zabránilo, výrobní komoru lze vyplnit inertním plynem, nejčastěji argonem a dusíkem, nebo tisknout součásti ve vakuu, jako je tomu u výroby pomocí procesu elektronového paprsku (EBM). Vakuové prostředí zabraňuje vychýlení paprsku a těmito technologickými charakteristickými částmi lze dosáhnout vysoké čistoty. Hlavní výhodou práškového materiálu je přesnost a povrchová úprava, která je v některých situacích srovnatelná s obráběnými povrchy. Nevýhodou je pórovitost, kterou způsobuje prášek. Tu způsobuje tepelné zpracování, které je ale nezbytné pro zvýšení pevnosti a tvrdosti vyrobeného dílu. Jsou pokusy o výrobu prášku, po kterých by výrobek nemusel procházet tepelnou úpravou, ale i to má své nedostatky. Možnost, která se uplatňuje, je přehřátí substrátu, což zaručuje lepší mechanické vlastnosti a také snížení zbytkového napětí. Pro snížení schopnosti tvorby pórů se zvyšuje rychlost dávkování prášku.



Obr.5 Ukázka nanášení prášku [19]

2.1.1 Nástrojová ocel X100CrMoV5-1 [11], [12], [13], [20], [21]

Tato nástrojová legovaná ocel ve formě prášku, má v české normě označení ČSN 41 9571 a jde o vysoce univerzální ocel kalenou na vzduchu, často používaná pro studenou práci. Je souhrnem kombinací, které zahrnují dobré odolnosti proti opotřebení, houževnatosti a nárazuvzdornosti. Je relativně snadno zpracovatelná v žíhaném stavu, má dobrou tvarovou stabilitu při kalení a popuštění a velkou pevnost v tlaku. Používá se pro širokou škálu nástrojů pro tváření za studena, upínek i pro raznice i razidla a taky pro formovací nástroje a pro další vysoce opotřebitelné díly. Ocel v prášku vyrábí americká firma Markforged. Chemické vlastnosti ocelového prášku jsou shrnuty v tab.5 je zde velké zastoupení chromu, molybdenu a uhlíku. Molybden zvyšuje pevnost, prokalitelnost a snižuje popouštěcí křehkost, zvětšuje žárupevnost, pevnost za tepla a odolnost proti korozi i chemickým vlivům. Uhlík je nejdůležitější složkou oceli, ovlivňuje pevnost, tvrdost, kalitelnost, svařitelnost, plasticitu, houževnatost a další vlastnosti.

Tab.5 Chemické složení oceli X100CrMoV5-1 [21]

Cr [%]	Mo [%]	C [%]	Mg [%]	V [%]	Si [%]	P [%]	Fe [%]
5,1	1,15	0,97	0,7	0,35	0,3	0,15	zbytek

Po vytisknutí materiál putuje do slinovací pece, kde se spečením prášku zlepši jeho mechanické vlastnosti, které byly zapsány do tab.6.

Tab.6 Mechanické vlastnosti oceli X100CrMoV5-1 [21]

Mechanické vlastnosti	Po slinování	Po tepelném zpracování
Tvrdość [HRC]	Do 50	50
Smluvní mez kluzu Rp _{0,2} [MPa]	900	1170

2.1.2 Vysokopevnostní ocel X3NiCoMoTi18-9-5 [11], [12], [13], [22], [23]

Tato odolná vysokopevnostní ocel tvořící třídu slitin železa má označení M 300 nebo W. Nr. 1.2709 a také se jí říká „maraging“ z důvodu martenzitické struktury, která se posiluje procesem stárnutí při přibližně 500 °C. Pevnost a tvrdost u těchto slitin je odvozena spíše od srážení intermetalických sloučenin než od obsahu uhlíku, který má zde velmi malé zastoupení. Hlavním legujícím prvkem je nikl, který zvyšuje prokalitelnost, odolnost vůči nízkým teplotám, zvyšuje mez kluzu, zlepšuje hodnoty vrubové houževnatosti. Sekundární intermetalické legující kovy jsou kobalt, molybden a titan. Kobalt je prvek zlepšující odolnost proti popouštění, pevnost za tepla, tepelnou vodivost, je významný pro precipitačně vytvrditelné oceli- maragingy. Titan obstarává zvýšení odolnosti proti korozi a vytvrzuje. Další výčet chemických prvků ve slitině je v tab.7. Materiál se vyznačuje vysokou pevností, únavovou pevností a tvrdostí, má také dobrou obrobiteľnost. Nejčastěji se používá jako materiál pro vložky do nástrojů, forem a matic a celkově v součástkách s vysokou pevností. Ocel v prášku vyrábí německá firma RENISHAW.

Tab.7 Chemické složení vysokopevnostní oceli X3NiCoMoTi18-9-5 [22]

Ni [%]	Co [%]	Mo [%]	Ti [%]	Mg [%]	Si [%]	C [%]	S [%]	P [%]	Fe [%]
18	8,5	4,85	0,75	<0,15	<0,1	<0,03	<0,01	<0,01	zbytek

Po vytištění výtisk dosahuje dobrých pevnostních vlastností, které můžeme ještě téměř skoro dvojnásobně zvýšit procesem umělého stárnutí, kdy atomy uhlíku a dusíku, které jsou volně rozpuštěny ve feritu, se při zvyšování teploty mají snahu dostat do energeticky nejvýhodnější polohy. Dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Nevýhoda tohoto procesu je zvyšování křehkosti, zhoršení tvárnosti a houževnatosti. Nalezené a dohledatelné mechanické vlastnosti jsou zobrazeny v tab.8. Povrch po vytištění má drsnost srovnatelnou s obráběcími operacemi.

Tab.8 Mechanické vlastnosti vysokopevnostní oceli [22]

Mechanické vlastnosti	Po vyrobení	Po procesu stárnutí
Pevnost v tahu Rm [MPa]	1122	1794
Mez kluzu Re [MPa]	999	1730
Tvrdość [HV0.5]	355	542
Tažnost A [%]	7,5	7
Drsnost povrchu Ra [μm]	5	

2.1.3 Korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 [11], [12], [24], [25], [26]

Austenitická nerezová ocel s označením v americké normě AISI 316L, odpovídá v české normě oceli ČSN 41 7349. Ocel je ve formě prášku (obr.6), která obsahuje železo legované chromem, se vyznačuje vysokou tvrdostí a houževnatostí, také odolností proti korozi a možnost slitinu vysoce leštit. Nízký obsah uhlíku nám zajišťuje odolnost vůči senzibilizaci (srážení karbidů na hranicích zm). Ocel je velmi odolná proti plošné korozi a mezikrystalové korozi. Slitina se vyznačuje velice dobrou svařitelností, obrobitelností a odolností proti neoxidujícím kyselinám, nejvíce proti kyselině sírové a fosforečné, proto ji můžeme použít v chemickém, farmaceutickém, potravinářském a textilním průmyslu. Oproti tomu má nízké napětí na prasknutí a pevnost v tahu při vysokých teplotách. Slitina se používá pro výrobu forem na vstřikování plastů, vytlačování a pro formy na tlakové lití, dále chirurgických nástrojů, příborů, vřeten, šroubů, tlakových nádob, námořních komponent a u součástek kde je kladen vysoký požadavek na pro leštění a vysoký lesk. Tloušťka vrstvy může dosáhnout až 0,05 mm. Prášek pro kovový 3D tisk se uskládá v nádobách. Tuto korozivzdornou ocel v prášku vyrábí německá firma RENISHAW. Hlavní legující prvek je chrom s niklem, tato kombinace s obsahem 18 % Cr, 12 % Ni a 2,5 % Mo má za následek prudké zvýšení odolnosti proti korozi. Chrom dále určuje zda se jedná o nerezovou ocel či nikoliv, minimální požadavek je 12,5 % Cr aby byla ocel kvalifikována jako nerezová. Další prvky jako například nežádoucí kyslík nebo dusík jsou vypsány v tab.9.



Obr.6 Korozivzdorná ocel v prášku [26]

Tab.9 Chemické složení korozivzdorné oceli X2CrNiMo17-12-2 [24]

Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Mg [%]	Si [%]	P [%]	N [%]	O [%]	C [%]
18	12	2,5	<2	<1	<0,045	<0,1	<0,1	<0,03
S [%]	Fe [%]							
<0,03	zbytek							

V tab.10 jsou mechanické vlastnosti oceli X2CrNiMo17-12-2, materiál má nízkou tvrdost a také velké prodloužení. Dosažená drsnost povrchu odpovídá obráběcím operacím jako je například soustružení, frézování, vrtání atd.

Tab.10 Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli [24]

Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tvrdost [HV]	Tažnost A [%]	Drsnost povrchu Ra [μm]
624	494	198	43	5

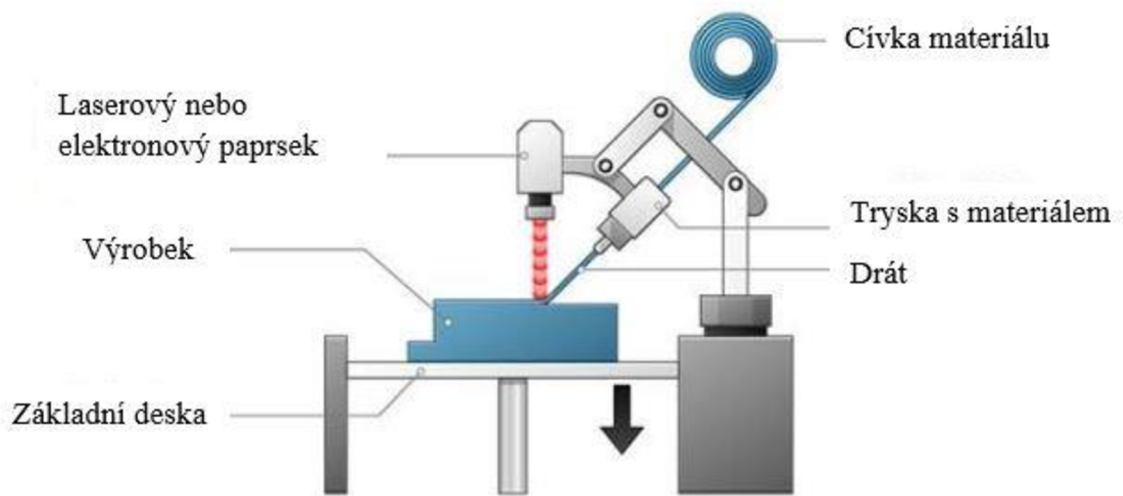
2.2 Proces AM s kovovým drátem [4], [27]

Druhou metodou je proces vytváření výtisku pomocí kovového drátu, viz obr.7. Tato metoda využívá podávání svařovacích drátů, které jsou vrstveny po předem naprogramovaných trajektoriích. Výhodou tohoto způsobu výroby je oproti použití prototypování práškového kovu schopnost přímé výroby funkčních částí s vysokou strukturální integritou. Použité materiály, ale musí dosahovat potřebné svařitelnosti pro proces svařování. Ve srovnání se stylem práškového kovu jsou procesy podávání drátu charakteristické vyšší hustotou a depoziční energií, výhodou je, že zároveň nemají omezenou velikost a lze je tedy používat na výrobu pro střední nebo dokonce velké funkční součásti. Také obecně platí, že dojde k nižší kontaminaci materiálu teplem při používání drátu než u použití prášku, tím je zajištěna lepší kvalita materiálu po drátové metodě. Kromě toho jsou náklady na zařízení a materiály drátu značně nižší než u procesu s kovovým práškem.

Avšak proces s kovovým drátem má také své nevýhody. Jde o vysokou depoziční energii a teplotu, která způsobuje nerovnoměrné teplotní pole na nosném podkladu a na nahromaděných vrstvách, to způsobuje nevyhnutelně indukovaný svar se zbytkovým napětím a zkreslením. U AM všech kovových procesů přidávání další vrstvy a následné uložení energie, mění rozložení teploty v předchozí vrstvě a výsledkem jsou sekundární vrcholy po jejich teplotním nahromadění. Horní vrstvy dosahují stabilnějších teplot, oproti prvním několika vrstvám, které jsou v kontaktu se substrátem. Následné přidání vrstev zvyšuje zkreslení platformy.

Další nevýhodou je samotný materiál v drátu, jehož jednotková velikost je mnohem větší než prášek. Z tohoto důvodu je použití pro velmi malé součásti nemyslitelné, ale pro velké součásti je to výhodou. V procesech podávání drátu je šířka jednotlivých housenek obvykle alespoň 5 mm, aby byla zajištěna kvalita svaru. Kvůli přechodovým vrstvám jsou na vyrobených površích v procesech s posuvem drátu vyžadovány další procesy, jako je obrábění, broušení nebo leštění. Ačkoli další obrábění zvýší pracovní zátěž, stále ve srovnání s konvenčními procesy řezání a obrábění, je aditivní výroba s kovovým drátem mimořádně efektivní a navíc při nižší spotřebě materiálu.

Zatřetí, při výrobě výrobků 3D tiskem procesem podávání drátu, mimo vakuovou komoru, může nastat problém s oxidací, která je nevyhnutelná. Přestože je svařovací oblouk a roztavená lázeň během výroby chráněna ochranným plynem, vysokoteplotní materiál výrobku by mohl přijít do styku s otevřeným vzduchem a vytvářet oxidový kryt na materiálu. Kontaminace v procesech AM s podáváním drátu je stále srovnatelná s procesy nanášení práškového kovu. Je to proto, že i když probíhají procesy nanášení práškového kovu v komorách, kontaktní plocha prášku se vzduchem před výrobou je mnohem větší, navíc svařovací oblouk také může na určité úrovni vyčistit a odpařit oxidový kryt na předchozích vrstvách.



Obr.7 Proces metody podávání drátu [27]

2.2.1 Konstrukční ocel E335 [28], [29], [30]

Drát z materiálu s označením G4Si1 (obr.8), je ekvivalentem ke konstrukční oceli ČSN 41 1600 dle české normy, používá se nejčastěji při opravě automobilů a komponentů, dále při robotické nebo tvrdé automatizaci. Drát se vyznačuje vyšší pevností, vynikající smáčivostí špičky a následným optimálním vzhledem patky. Vyrábí se jak s měděným povlakem, tak i bez něj. Tento měděný povlak zajišťuje vynikající vlastnosti pro zažehnutí oblouku a delší životnost kontaktního hrotu, dále podporuje zkratový, kulový a pulzní přenos rozprašování. Jako ochranný plyn při svařování, který chrání navařovanou vrstvu před oxidací a nečistotami je použit ArCO₂ s různým procentuálním zastoupením argonu a oxidu uhličitého. Drát se vyrábí v několika možných průměrech a je skladován v cívkách. Tab.11 zobrazuje chemické složení slitiny bez zastoupení legujících prvků, protože se jedná o konstrukční ocel.



Obr.8 Drát G4Si1 na cívce [29]

Tab.11 Chemické složení drátu [28]

Mn [%]	Si [%]	Cu [%]	C [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	S [%]
1,67	0,87	0,2	0,09	0,02	0,02	0,01	0,008
P [%]	Fe [%]						
0,007	zbytek						

Mechanické vlastnosti v tab.12 nedosahují skvělých pevnostních vlastností jako nástrojové oceli a materiály s příměsí legur, ale stále mají dostatečné vlastnosti pro použitelnost při lisování prototypových výrobků.

Tab.12 Mechanické vlastnosti drátu [28], [30]

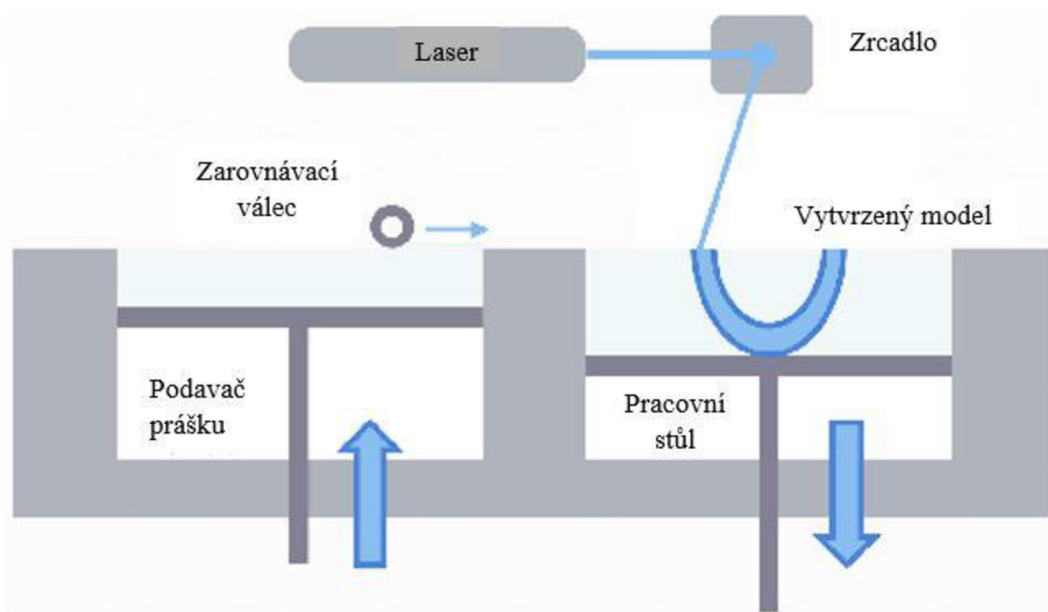
Pevnost v tahu Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tvrдость [HB]	Tažnost A [%]	Drsnost povrchu Ra [μm]
620	520	274	23	25

3 METODY 3D TISKU [31]

V současnosti existuje mnoho metod, jak vyrábět pomocí 3D tisku. Jedná se například o metody vhodné pro plastové výrobky, jako jsou známé metody FDM, SLA, LOM, MJF, SLS, ale i pro kovové výrobky. Zde můžeme zařadit technologii LAM, která je laserovou technologií pod kterou spadají metody jako SLS, SLM, DMLS, ADAM. Dále se používá finančně náročná švédská metoda EBM, založená na působení elektronového paprsku, a nebo o typ technologie DED, navařování pomocí metody WAAM, která je pro svou výhodu vyrábět i velké komponenty rozšířená. K vytvoření modelu součásti je možné využít programy jako například Inventor, Solid Edge, SolidWorks, Catia, 3Dcrafter, ScetchUP, 123D Design, Fusion 360 a spoustu dalších. Před samotnou výrobou se musí dodělat finální úpravy. Hlavní úpravou je proces „slicing“, jedná se o rozdělení jednotlivých vrstev dle rozměrů (tloušťka, šířka) na offsetové křivky, které tvoří trajektorii depoziční hlavy. Pro rozdělení vrstev existuje spousta těchto programů, které se nazývají slicery. Na světě existuje mnoho těchto programů z nichž k nejpoužívanějším patří Slic3r, Simplify3D, Cura a pro plastové výrobky se jedná například o program PrusaSlicer. Po rozdělení modelu získáme G-kód, se kterým tiskárna již dokáže pracovat a zadaný model vyrobí. Následují některé metody 3D tisku pro kovové materiály.

3.1 Metoda Selective Laser Sintering (SLS) [31], [32], [33]

Selektivní laserové spékání práškových materiálů, neboli v praxi označení termínem „sintrování“ je jednou z populárních technologií rychlého prototypování kovových součástí vhodná pro maloobjemovou výrobu. Technologii vyvinuli v polovině osmdesátých let vědci na texaské univerzitě v Austinu. Princip metody spočívá ve spékání práškového materiálu, jako je např. kov, plast nebo také sklo, či keramika, který je po tenkých vrstvách spékán v ploše řezů vysoce výkonným laserem, který je naváděným digitálním modelem na obr.9.



Obr.9 Schéma metody SLS [33]

Po nahrání programu do tiskárny se výroba spustí a začne se nanášet vrstva prášku v celé ploše stavěcí platformy. Stroj tento materiál predehřeje na teplotu blízkou jeho bodu tání. Tím laseru umožní využít veškerou jeho energii ke spečení materiálu v ploše právě vytvářeného

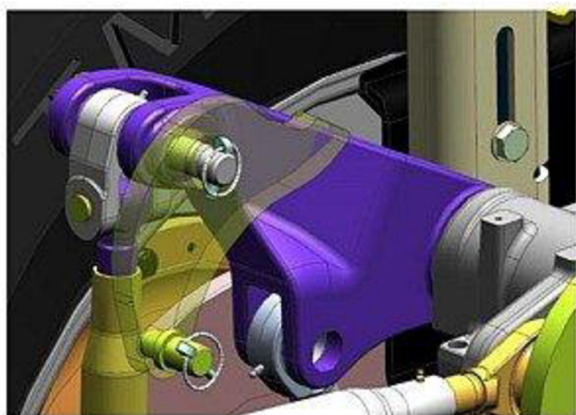
řezu modelem. Při další vrstvě, po osvětlení příslušné plochy laserem, klesne stavěcí platforma v ose "Z" o tloušťku jedné stavební vrstvy níže, po té se nanese další vrstva materiálu a takto se celý proces opakuje až do dokončení výrobku. Minimální velikost vrstvy je 0,06 mm. Tenhle proces nám zajišťuje výhodu, kdy je vytvářený model neustále obklopen zbytkovým práškovým materiálem. Díky tomu není potřeba použití dočasných podpor. Zbytkový prášek z podpor je možné dále využít při dalším tisku. Technologie SLS dokáže poskytnout výrobky srovnatelných kvalit, jako konvenční výrobní metody, na rozdíl od nich však může z kovu, keramiky nebo dalších materiálů vytvářet i velmi složité struktury.

Hlavní přednosti této metody jsou v nízké ceně pořizovaného materiálu, přebytečný prášek z podpor je možné dále využít, relativně nízká pořizovací cena tiskárny, okolo 5 mil. Kč, v porovnání s ostatními metodami, široká nabídka druhu materiálu.

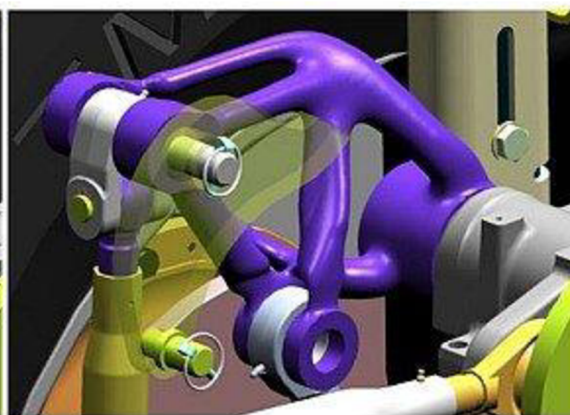
Nevýhody spočívají v nedokonalém povrchu a díky pouhému spékání prášku je výrobek nehomogenní a také se vyznačuje nižší pevností, houževnatostí a tvrdostí.

3.2 Metoda Selective Laser Melting (SLM) [7], [31], [34], [35], [36]

Selektivní laserové tavení práškových kovů je oblíbenou metodou rychlého vyrobení prototypových kovových součástí. V principu se tato metoda podobá metodě SLS, zde ale nedojde pouze ke spékání, ale dojde k úplnému roztavení práškového kovu. Tak vzniká výtisk s lepšími fyzikálními vlastnostmi, protože není tvořen jednotlivými částicemi spečenými dohromady, ale je to celistvý homogenní výrobek. Proto se výtisky mohou použít jako funkční finální výrobky. Tuto metodu lze označit jako víceoborovou s několika etapami a procesy, které ovlivňují finální výrobek. První etapa je vývoj, výroba a testování prášku. Další je předvýrobní a výrobní. Zde se navrhuje součásti s ohledem na topologickou optimalizaci, což je snižování hmotnosti s ohledem na pevnostní podmínky a vyrobitelnost. Hmotnost se může snižovat na tzv. bionickou konstrukci, to je označení pro díly a sestavy, za kterými stojí složité výpočty. Výsledné navrhnuté modely mají netechnické tvary, kde je vidět porovnání klasického návrhu na obr.10, a bionické konstrukce na obr.11, které mohou připomínat biologické struktury. Poslední třetí etapa je postprocesing, neboli dokončovací operace, která zahrnuje tepelné zpracování, povrchové úpravy, kontrolu a měření. Označení SLM je pro materiály, které tvoří čistý kov, naproti tomu pro 3D tisk kovových slitin se používá označení DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Těmito postupy je možné vyrábět výrobky z nejrůznějších materiálů, od nástrojové, chirurgické či nerezové oceli přes měď nebo hliník až po titan, wolfram, kobalt, chrom nebo zlato.



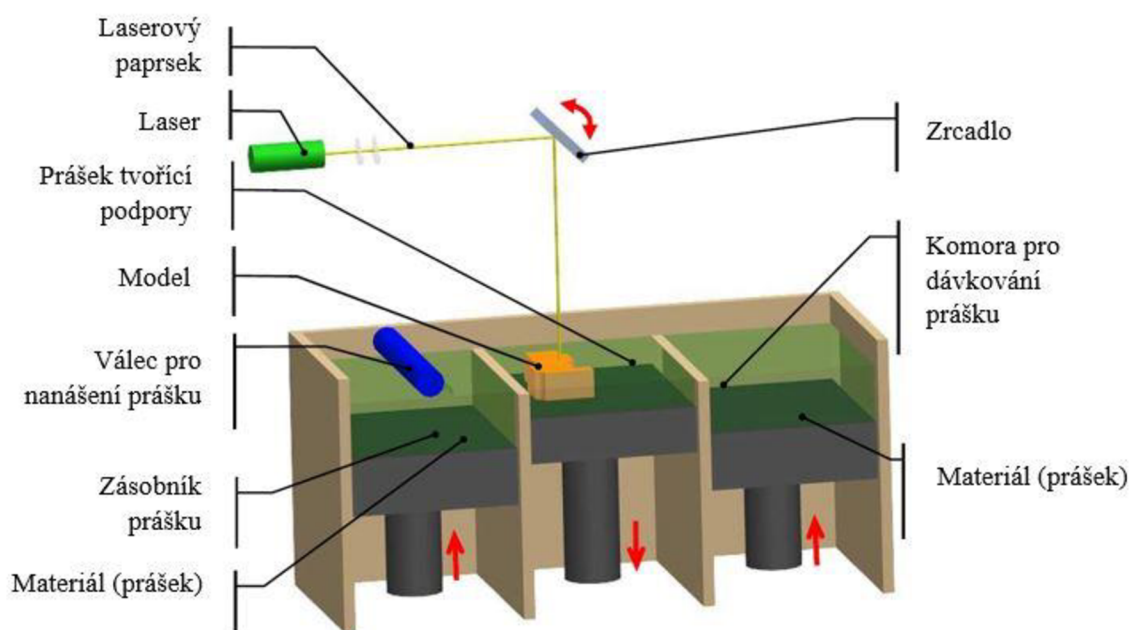
Obr. 10 Klasická konstrukce vahadla[36]



Obr. 11 Bionická konstrukce vahadla[36]

Obecně se zařízení skládá z pracovní komory, filtračního systému, počítače, sestavy mechanismu pro pohyb základové desky, elektronické části, laseru se soustavou zrcátek a válečkem nanášející další vrstvu materiálu na obr.12. Při procesu tavení musí být v pracovní komoře přísně regulovaná atmosféra. Pracovní komora je před začátkem procesu zbavena vzduchu a vlhkosti (v prostoru komory je téměř stoprocentní vakuum). V dalším kroku je komora vyplněna inertním plynem nejčastěji argonem, popřípadě dusíkem. Při dosažení vyšší účinnosti je třeba použít argon, který má vyšší protonové číslo a je těžší než dusík, tím dochází k většímu vytlačení zbytkového vzduchu s koncentrací kyslíku pod 0,1 %, při tavení titanu a jiných reaktivních materiálů je koncentrace kyslíku pod 0,01 %. Po přípravě komory a kalibraci desky před 3D tiskem je nasypán ze zásobníku kovový prášek, který je rovnoměrně nanesen na platformu.

V následující části procesu dochází k tavení vrstvy laserem, který je řízený počítačem. Velikost laserového paprsku se pohybuje přibližně kolem hodnoty 70 mikrometrů a je směřována dvěma vysokofrekvenčními snímacími zrcátky. Energie laseru je silná natolik, aby umožnila úplné roztavení práškového kovu. Tloušťka vrstvy u použitého práškového kovu se pohybuje v rozmezí 20 až 100 mikrometrů, záleží na druhu kovu. Pro korozivzdornou ocel je standardně uváděná výška vrstvy 50 mikrometrů. Dokončení každé plochy vrstvy znamená, že se platforma posune níže v ose "Z" (o výšku další vrstvy) a celý proces se opakuje do doby, než je výroba celého modelu dokončena. Jakmile je výrobek hotov, kontaminovaný nebo natavený prášek, se vysaje mokřým odlučovačem práškového kovu. Prášek, který tvoří nosnou část výrobku a obklopuje ho, je smeten do otvoru, odkud putuje dále do nádob pro manipulaci umístěné ve spodní části stroje. Kovový prášek je poté zpracováván a připravuje se na další použití. Po vyjmutí výtisku z komory se odstraní zbylý prášek a odstraní se platforma pásovou pilou nebo konvenční technologií. Po očištění je možné výtisk dále obrobřit přídatky konvekční technologií. Tisknout tímto způsobem je možné z různých kovů jako je měď, hliník, chirurgická ocel, kobalt, chrom, titan, platina nebo wolfram. Tyto kovy musí být napřed rozemlety na úroveň super jemného prášku.



Obr.12 Schéma metod SLM a DMLS [31]

Přednosti této metody spočívají v možnosti výroby složitých tvarů, a to i bez použití podpor, laser zajišťuje kvalitní povrch s vysokým rozlišením (nejsou potřeba velké přídavky na obrábění). Nevýhody oproti SLS metodě je pořizovací cena tiskárny (obr.13), která je zde mnohem vyšší (přibližně 10 milionů Kč) a pro velkou část firem nedostupná, proto se tenhle tisk hodí především pro profesionální použití. Další nevýhoda je omezená velikost dílů kvůli velikosti pracovní komory. Materiál dílů není možné při tisku kombinovat.



Obr.13 Tiskárna metody SLM [7]

3.3 Metoda Electron Beam Melting (EBM) [37], [38]

Tato metoda 3D tisku výroby kovových dílů, byla vyvinuta a je patentována švédskou společností Arcam. Metoda není pro svou náročnost příliš rozšířená. Jedná se, ale o velmi kvalitní metodu, která nám zajišťuje vysokou přesnost a vynikající technické vlastnosti vytištěných dílů. Tato metoda je však velmi drahá. Uplatňuje se v implantologii, astronautice, leteckém a automobilovém průmyslu.

Princip spočívá v navařování materiálu roztaveného vlivem působení elektronového paprsku, který může přídavný materiál roztavit až na 2 000 °C. Výrobní proces vyžaduje předehřev prášku, před samotným tavením, tím se dosáhne lehkého slinování a stabilizace. Díky těmto dějům se sníží teplotní gradient a taky vnitřní napětí. Celý proces probíhá v pracovní komoře ve vakuu, aby nedocházelo k vychýlení elektronového paprsku, a proto je metoda vhodná pro použití při výrobě součástek z reaktivních materiálů jako je například titan a jeho slitiny. Postupným vrstvením vrstvy po vrstvě vzniká celý výrobek. Výchozí materiál může být ve formě prášku nebo drátu. Práškový materiál je, ale nutné předehřívát, dochází tím ke slinování před procesem tavení, to má za následek snížení teplotního gradientu a také vnitřního napětí v součástce.

Hlavní předností elektronového paprsku je vysoká přesnost výrobků a možnost využít jak kovový prášek tak i kovový drát, s tím souvisí minimální přídavky na obrábění.

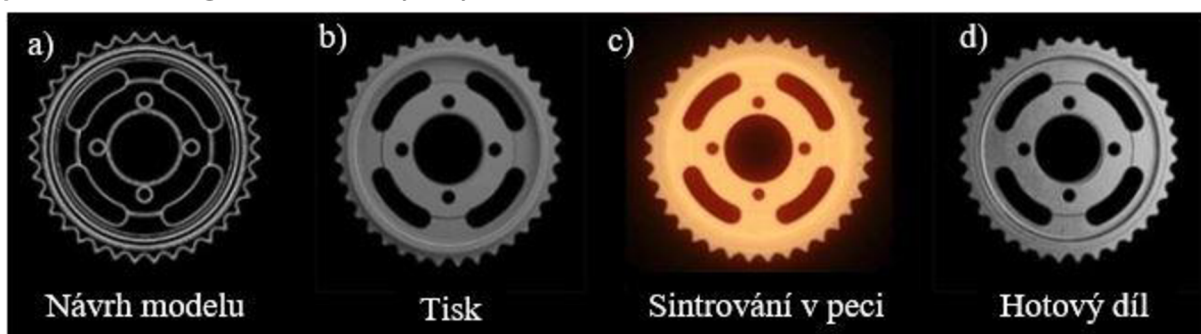
Metoda má také nevýhody, kterými jsou velmi vysoká až astronomická cena tiskárny, vyšší náročnost na údržbu, nutnost dodržovat čistotu materiálu. Tisk je velmi citlivý na celkové podmínky procesu, jako je vzdálenost od konstrukční desky a velikost dílu.

3.4 Metoda Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) [20], [39], [40]

Jedná se o novou metodu, která využívá technologii osvědčenou u proslulých amerických 3D tiskáren Markforged. Na první pohled můžeme říct, že tato metoda je stejná jako metoda FDM, akorát se zde používá kovový prášek. Oproti náročnějším metodám spékáním laserem, se tato metoda stále modernizuje a stává se dostupnější. Po závěrečném sintrování v peci se stává nejprve křehký výtisk vysoce pevným homogenním dílem.

Výrobní proces se na začátku od ostatních metod moc neliší. Vytváří se 3D model z řešení CAD ve formátu STL na obr.14a). Pomocí aplikace Eiger se díl připraví pro výrobu. Samotný

tisk probíhá v uzavřené komoře, na ní závisí maximální velikost výtisku, která je 250×183×150 mm a maximální hmotnost je 10kg. Na tisk se používají 2 trysky, které postupně vrství materiál. Jedna na kovový prášek vázaný voskovými polymery ve vodiči a druhá na keramický materiál, který nám slouží jako podpora a nosič kovových vrstev. Po nanesení všech vrstev se výtisk očistí od nečistot a částí voskového pojiva na obr.14b). V další fázi probíhá sintrování na obr.14.c) v peci za vysoké teploty až 1300°C, kde dojde k promísení kovu, odtavení zbytku voskového polymeru, smrštění dílu na požadovaný rozměr a vzniká celistvý zpevněný díl, viz obr.14d). Výtisk je poté připraven k použití nebo může být dle potřeby povrchově upraven stejnými postupy jako u jiných metod 3D tisku kovů, nebo jako u technologií konvenční výroby.

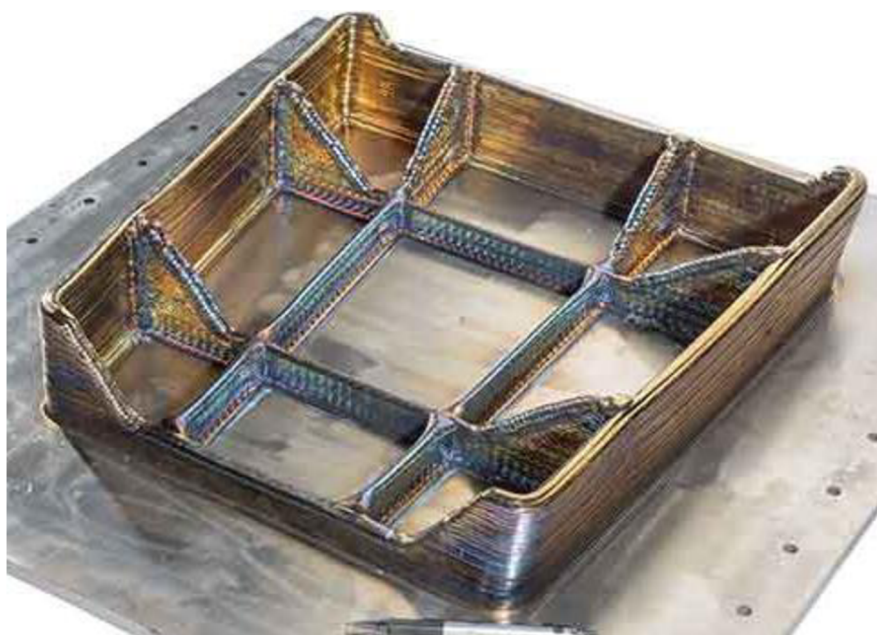


Obr.14 Schéma výrobního postupu [40]

Díky keramické podpůrné vrstvě se nemusí výrobek nijak složitě odřezávat. Další výhody spočívají v možnosti použití několika druhů slitin kovových materiálů například nástrojové, nerezové oceli, mědi, titanu a Inconelu. Hotové díly vykazují vysokou pevnost, avšak metoda je velmi drahá a teprve se postupně modernizuje. Oproti laserovým technologiím použitelným pro velmi náročné aplikace v automobilovém nebo leteckém průmyslu, například tisk výrobků s velkým objemem se metoda ADAM nehodí.

3.5 Navařování metodou Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) [4], [10], [17], [41], [42], [43], [44], [45], [46]

Metoda WAAM, která se velmi rozvíjí, používá pro výrobu součástí a komponentů (obr.15) svařovací procesy. Jde o vyspělý technologický proces výroby, který pomáhá snižovat spotřebu energie, materiálu a uhlíkové stopy, zatímco metody konvenčního obrábění mají velký dopad na životní prostředí. Je použito standardní obloukové svařování a podávání přídavného materiálu ve formě drátu. Tento materiál je ve formě kovového drátu a jedná se o běžné svařovací dráty. Může vyrábět výrobky různých tvarů a větších rozměrů, oproti neekonomické a těžko dosažitelné konvenční výrobě jako jsou například odlehčené nebo duté profily, příp. rotační součásti s výztuhami a další. Dokáže vyrábět i výrobky více než z jednoho materiálu, díky tomu má tato metoda lepší mechanické vlastnosti než předešlé. Důležitým faktorem je také nižší cena výroby i nákladů, v některých případech až o 50 %. Metoda WAAM se využívá v celé řadě oborů. Je to typ technologie DED (Direct Energy Deposition). Oproti metodám, které používají laser při natavování nebo elektronový paprsek, je metoda WAAM ideální proces pro výrobu velkých komponent a je méně náchylná k pórovitosti. Dnes jsou dostupné tři hlavní techniky použití WAAMu, jde o svařování elektrickým obloukem, plynovým wolframovým obloukovým svařováním a plazmovým obloukovým svařováním.



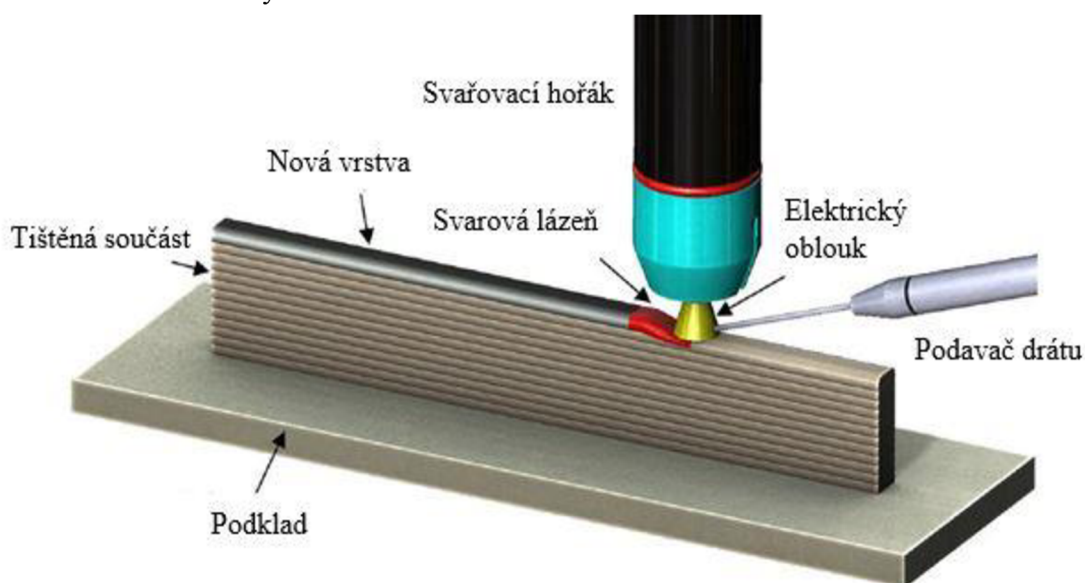
Obr.15 Součást vyrobená metodou WAAM [10]

Tvorba vrstev probíhá v ochranných atmosférách za pomoci svařovacích metod – TIG a MIG/MAG. Proces výroby spočívá v navařování velkého množství jednotlivých návarových housenek vedle sebe a na sebe na obr.17, první vrstva je navařena na základovou desku, kterou je po dokončení výrobku třeba odřezat. Hardware metody WAAM je složen ze svařovacího zařízení, svařovacího zdroje energie, systémů podávání drátu a z hořáků. Pro metodu WAAM běžně používá jeden podávací drát, který vytváří uloženou strukturu stejného složení jako je drát. Proces však může používat podávání například i dvou drátů, aby bylo možné vyrobit binární slitiny s předem navrženým chemickým složením. Výrobek je tedy tvořen postupným navařováním vrstvy po vrstvě na základovou desku, kdy počítačem naváděný hořák je veden po trajektorii budoucího obrysu součásti. Housenky mají konstantní nebo adaptivní tloušťkou návarové „stěny“, případně pokud jde o plnou součást, materiál vyplňuje vnitřní prostor součásti. Rychlost navařování pro metodu WAAM může být při použití pomoci metody TIG okolo jednoho 1 kg/h, naproti tomu při použití metody MIG/MAG to může být o několik kilogramů za hodinu více. Nevýhodou použití MIG/MAG je nižší stabilita oblouku a rozstřík během procesu navařování, případně zvýšená porozita. Tyto nedostatky se dají snížit při použití modifikovaných procesů těchto metod, které sníží vnesené teplo a mají bezrozstříkový charakter. Jde například o metody Cold Metal Transfer (CMT) od firmy Fronius dále o Cold Arc firmy EWM nebo Intelligent Arc Control firmy Migatron. Základní techniky a i procesy se všemi modifikacemi automatizují za použití univerzálních robotických pracovišť, viz obr.16, nebo se můžou použít i na CNC, jejichž velikost pak limituje velikost pracovní plochy.



Obr.16 Pracoviště metody CMT [17]

Systém CMT je díky vnesenému teplu a tedy teploty interpass široce používán jako efektivní metoda depozice k nižší akumulaci tepla při navařování. Aby se tohoto efektu dosáhlo, je potřeba přesná kontrola úrovně proudu a délky oblouku. Oblouk odráží vizuální vzhled. Na základě výzkumných prací se jasně ukazuje, že CMT a další podobné modifikace mají při použití metody WAAM celou řadu výhod. Jedná se například o vysokou kvalitu a bezroztříkové navařování, nízký tepelný příkon, velmi dobrou reprodukovatelnost, vysoký výkon navaření, možnost tvorby menších tloušťek a také jemnější mikrostrukturu. Dále jsou výrobky omezeny pouze dosahem ramene robota a ne komory jak je to u již výše zmíněných metod. Nevýhodou je nižší rychlost navařování a také nižší přesnost, je potřeba větší přídavky na obrábění než u laserových metod.



Obr.17 Popis metody WAAM [45]

4 VOLBA METODY TISKU A MATERIÁLU

Při výběru vhodné metody a materiálu 3D tisku pro výrobu matrice bylo třeba přihlídnout k několika důležitým faktorům. Za prvé, vyrobená matrice je v nástroji používána lisem k lisování maximálně 50 ks prototypů a z toho důvodu je možné volit materiál i s horšími mechanickými vlastnostmi. Dalším faktorem je rozšíření, probádání, cena a dostupnost metod v České republice, protože firma nemá v plánu kupovat svoji 3D tiskárnu. Materiál také nemůže být příliš měkký s nízkou pevností, aby se při první operaci lisu nezdeformoval, měl by být cenově dostupný. Na volbu metody má vliv i rychlost výroby a dodání hotového výrobku (výtisku). Neméně důležitá je i zkušenost s objemovým tiskem, protože způsob práce prostřednictvím neobjemového tisku je v ČR více běžný. Vedlejšími faktory jsou například drsnost povrchu po vytištění a s tím související velikost přídatku na dokončovací obrábění.

4.1 Volba metody 3D tisku [47]

První metoda laserového sintrování (SLS) je oproti ostatním poměrně levná, přesto ji nelze použít z důvodu nehomogenitě materiálu a s tím související nízkou pevností, tvrdostí, houževnatosti a také potřebné úrovně odolnosti materiálu proti opotřebením.

Druhá metoda elektronového paprsku (EBM) má vysokou kvalitu povrchu, nejsou nutné tak velké přídatky na obrábění, má i velkou možnost výběru materiálu v drátu i v prášku a po téhle stránce je možné ji použít. Avšak nevýhody převyšují výhody, náklady na použití metody jsou astronomicky vysoké a z dostupných informací se v České republice ani nevyskytuje.

Další je metoda ADAM. Jedná se o stále rozvíjející se moderní metodu, kterou se zabývá pražská firma 3Dwiser s.r.o. Nabízí i materiál pro 3D tisk matrice a to nástrojovou ocel X100CrMoV5-1. Jedná se o nejlepší možnou náhradu za vyráběnou matici konvenční metodou z materiálu 90MnCrV8. Ale aplikace metody ADAM je kvůli vysoké ceně nevhodná.

Metoda laserového spékání (SLM) je oproti metodě SLS sice dražší, ale má velkou výhodu v homogenitě materiálu, s tím souvisí zvýšená pevnost, tvrdost a houževnatost. Ve srovnání s metodami EBM a ADAM má podobnou škálu použitelnosti různých materiálů a je levnější, v praxi rozšířenější a dostupnější. Tato metoda výroby byla poptávána u laboratoře Protolab na VŠB Technické univerzitě v Ostravě. Laboratoř však nemá zkušenost s tiskem objemových dílů. Předpokládá se, že je zde vysoké vnitřní napětí, které je možné odstranit vyplněním vnitřku matrice strukturou, což může snížit potřebnou pevnost. Protolab po zadání zakázky poskytne více informací, včetně potřebné analýzy a propočtů, které jsou zahrnuty v ceně tisku. Šance použití této metody je mnohem vyšší než u předchozích.

3D tisk metodou WAAM s technikou CMT se jeví, v porovnání s ostatními metodami, jako nejvhodnější metoda. Předností klasického navařování materiálu na sebe je jednoduchost, dostupnost, přijatelná cena i náročnost výroby oproti laserovým metodám. Nevýhodou je větší přírůstek než u laserových metod. 3D tisk kovů by byl proveden u Akademie věd ČR v Brně. Následně by pracovníci VUT v Brně provedli potřebné analýzy a pokud by firma chtěla tak i fázové analýzy výtisku. U této metody je i vyřešen tisk objemových dílů, Akademie věd objemový tisk odzkoušela v režimu CMT, kde bylo na podložku z oceli S235 navařeno několik vrstev housenek různými svařovacími parametry. Ukázalo se, že je důležité hlídat teplotu interpass. Při vysoké teplotě svary můžou téct a tím dochází k deformaci vyráběné součásti. Teplota byla kontrolována termokamerou. Z názorné

ukázky návarů na obr. 18 je vidět, že na prvních pokusech č. 1-9 bylo odzkoušeno v první řadě hlavně rychlost podávání drátu, velikost proudu s následnými směry navařování. Pokusy č. 10-12 se zabývají překrýváním vrstev jednotlivých housenek a až teprve pokus č. 12 je správný. Při tomto pokusu je v každé vrstvě navařeno 5 housenek. Tisk touto metodou je možný a vyhovující.



Obr.18 Ukázka objemového 3D tisku kovů WAAM metodou CMT [47]

4.2 Volba materiálu pro 3D tisk [48]

Možnost použití práškového materiálu z nástrojové oceli X100CrMoV5-1 je malá. Materiál je drahý, nemá sice o tolik nižší pevnost a tvrdost než konstrukční nebo nerezová ocel, ale pro nástroj, který se použije jen pro prototypovou výrobu se zdá být zbytečný. Navíc nelze zaručit dobrý tisk objemových dílů. Rozhodnutí o případné investici do tohoto materiálu je na firmě Hanon Systems Autopal Services s.r.o.

Prášková korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 je použitelný a vhodný materiál pro metodu SLM. Přestože je zde větší rozdíl v pevnosti i tvrdosti s porovnáním proti nástrojové oceli 90MnCrV8, pro lisování prototypů by měl být tento materiál matrice dostačující. Protolab také nabízí možnou náhradu za nástrojovou ocel, vysokopevnostní ocel X3NiCoMoTi18-9-5 (M300), která má sice lepší mechanické vlastnosti a po provedení procesu stárnutí se pevnost a tvrdost blíží již použité nástrojové oceli, ale je mnohem dražší než korozivzdorná ocel.

Materiál v drátu G4Si1 odpovídající konstrukční oceli E335, má sice horší pevnost, tvrdost i odolnost proti opotřebení než nástrojová ocel, ale je levnější a při použití matrice by měl být dostatečný. Materiál disponuje potřebnou svařitelností, kterou lze určit pomocí uhlíkového ekvivalentu. Ten pokud se dostane pod hodnotu $C_{ekv} < 0,45 \text{ hm.}\%$ a zároveň pokud platí podmínka $C < 0,2 \text{ hm.}\%$, tak je svařitelnost zaručená. Lze ho vypočítat pomocí vztahu níže.

Uhlíkový ekvivalent:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}, \quad (4.2)$$

kde: C_{ekv} – uhlíkový ekvivalent [%]

C, Mn, Cr, Mo, V, Cu, Ni – obsah jednotlivých chemických prvků [%]

$$C_{ekv} = 0,09 + \frac{1,67}{6} + \frac{0,02 + 0,01 + 0}{5} + \frac{0,2 + 0,02}{15} = 0,389 \%$$

Díky svařitelnosti je zaručená možnost výroby a následná náhrada za nástrojovou ocel. Navařování probíhá v ochranné atmosféře s argonem a oxidem uhličitým s poměrem 82 % Ar a 18 % CO₂. Použitý drát má průměr 1 mm.

5 TECHNICKÉ A EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Jedno z nejdůležitějších hledisek pro výběr vhodné metody a materiálu je celkové ekonomické porovnání. Ve výčtu nákladů jsou zahrnuty jak náklady na opracování výrobku, tak náklady na obsluhu. V celkových nákladech nejsou započítány převozy obrobků.

Po technické stránce je nejdůležitější vybrat metody a materiály, které zajišťují určitou tvrdost a pevnost vytištěného dílu v porovnání s výliskem, na který bude matrice použita. Pokud dojde k nižší pevnosti nebo tvrdosti u matrice než u výlisku může dojít k nedokonalému lisování, popřípadě až k deformaci matrice. V nejlepším možné případě by se mechanické vlastnosti měli přibližovat již použité nástrojové oceli.

5.1 Náklady konvenčního obrábění [49]

Náklady matrice, vyrobené konvenční metodou, zahrnuje koupi polotovaru z materiálu oceli 90MnCrV8, obrábění před kalením, obrábění po kalení a dokončovací operace (broušení, leštění), včetně mzdových nákladů pro pracovníky.

Polotovar o rozměrech 60x170x240 mm má hmotnost 19,1 kg a cena za 1 kilogram polotovaru je 90 Kč/kg. Jednoduchým výpočtem se dostane cena polotovaru.

Cena polotovaru:

$$C_p = m_p \cdot C_{1kg}, \quad (5.1)$$

kde: C_p - cena polotovaru [Kč]

m_p - hmotnost polotovaru [kg]

C_{1kg} - cena za 1 kilogram polotovaru [Kč/kg]

$$C_p = m_p \cdot C_{1kg} = 19,1 \cdot 90 = 1719 \text{ Kč}$$

Hmotnost po obrobení činí 10,5 kg, kalírna si účtuje 70 Kč/kg za kilogram zakaleného materiálu. Obdobně jako v předchozím případě se spočítá cena za kalení.

Cena za kalení:

$$C_k = C_{k1kg} \cdot m_o, \quad (5.2)$$

kde: C_k - cena za kalení [Kč]

m_o - hmotnost polotovaru po obrobení [kg]

C_{k1kg} - cena za kilogram kalení materiálu [Kč/kg]

$$C_k = C_{k1kg} \cdot m_o = 70 \cdot 10,5 = 735 \text{ Kč}$$

Celková cena obrábění je 35546 Kč. Celkové náklady matrice lze dostat sečtením všech předchozích cen (cena polotovaru, cena za kalení).

Celkové náklady:

$$C_{Kon} = C_p + C_o + C_k, \quad (5.3)$$

kde: C_{Kon} - celkové náklady konvenční metody [Kč]

C_o - cena obrábění [Kč]

$$C_{Kon} = C_p + C_o + C_k = 1719 + 35546 + 735 = 38\,000 \text{ Kč}$$

Dále je možné porovnat odpad materiálu, který je u konvenční metody největší.

Odpad materiálu:

$$m_{w1} = m_p - m_o, \quad (5.4)$$

kde: m_{w1} - odpad materiálu [kg]

$$m_{w1} = m_p - m_o = 19,1 - 10,5 = 8,6 \text{ kg}$$

Odpad je 8,6 kg což na ceně polotovaru zvyšuje cenu o 774 Kč, který je potřeba obrobit a pak se vyhodí do šrotu ve formě třísky.

5.2 Náklady 3D tisku SLM [49], [50]

Protolab nacenil nabídku na vytisknutí matrice, kde jsou zahrnuty i potřebné analýzy a výpočty. Výsledná cena obsahuje materiál i sazbu 3D tiskárny, obsluhu pracoviště. Zůstal by jen 0,5 mm přídavek na obrábění, který by si firma Hanon Systems Autopal Services s.r.o. následně obrobila sama.

Cena tisku je vyčíslena na 80 000 Kč, náklady na obrobení přídavků jsou 22 000 Kč. Po sečtení lze dosáhnout celkových nákladů tisku metodou SLM.

Cena tisku:

$$C_{SLM} = C_{t2} + C_{o2}, \quad (5.5)$$

kde: C_{SLM} - celkové náklady na za tisk metodou SLM [Kč]

C_{t2} - cena tisku SLM [Kč]

C_{o2} - cena obrobení 0,5 mm přídavků [Kč]

$$C_{SLM} = C_{t2} + C_{o2} = 80000 + 22000 = 102000 \text{ Kč}$$

Nabízený vysokopevnostní materiál ocel X3NiCoMoTi18-9-5 zvyšuje cenu tisku o 40 %, ale informace k ceně přídavků z tohoto materiálu nebyly k dispozici, proto je vyčíslena pouze cena výtisku bez konečného obrobení přídavků. Cena je i tak velmi vysoká a následné obrobení přídavků ji ještě velmi zvýší.

Cena tisku za vysokopevnostní materiál:

$$C_H = C_{t2} \cdot K_{1,4}, \quad (5.6)$$

kde: C_H - cena tisku za vysokopevnostní materiál [Kč]

$K_{1,4}$ - konstanta pro navýšení ceny tisku [%]

$$C_H = 80000 \cdot 1,4 = 112000 \text{ Kč}$$

Odpad u metody SLM je nejmenší z díky malému přídavku. Celkový přibližný odpad je možné spočítat jednoduchým a známým vzorcem pro výpočet hmotností, kde znám hustotu nerezové oceli, která je 8 000 kg/m³ a objem přídavků i s dírami na obrobení, který byl vyčíslen přibližně na 75 445,8 · 10⁻⁶ m³.

Odpad materiálu:

$$m_{w2} = V_{C0,5} \cdot \rho_{NO}, \quad (5.7)$$

kde: m_{w2} - odpad materiálu při metodě SLM [kg]

$V_{C0,5}$ - objem odpadu při 0,5 mm přídavku [m³]

ρ_{NO} - hustota nerezové oceli [kg/m³]

$$m_{w2} = V_{C0,5} \cdot \rho_{NO} = 75445,86 \cdot 10^{-9} \cdot 8000 = 0,604 \text{ kg}$$

5.3 Náklady 3D tisku WAAM [49], [51]

Poptávka u Akademie věd ČR v Brně byla naceněna následovně. Hodinová sazba navařování technikou CMT je 1 000 Kč/hod. Čas výroby matrice se odhaduje na přibližně 6 hodin. Cena zahrnuje i mzdové náklady a musí být počítáno i s možnými komplikacemi při výrobě. Celkové náklady tisku tak mohou být mnohem větší než se předpokládá.

Náklady na tisk jsou vyčísleny na 10 000 Kč. Firma Hanon Systems Autopal Services s.r.o. si 2 milimetrový přírůstek obrobí sama. Cena obrobení přírůstků činí 25 000 Kč. Následné provedení analýz na VUT v Brně zahrnuje kontrolu geometrie, měření rozměrů a tolerancí, vizuální a penetrační kontrolu povrchu, dále měření kontury a drsnosti povrchu, případně je možné provést i metalografickou analýzu (makro a mikro strukturu), pokud budou nalezeny vady (vměstky) v mikrostrukturu je možnost provést fázové analýzy. Celková cena za provedení analýz činí 8 000 Kč bez fázových analýz a s fázovými analýzami je to 12 000 Kč. Ceny jsou uvedeny bez DPH, dále k těmto cenám mohou být účtovány náklady na mzdy pracovníků VUT, jejich případné služební cesty a věci potřebné k řešení tohoto projektu. Celkové náklady na pracovníka VUT tak mohou činit 600 Kč/hod.

Celkové náklady bez fázových analýz:

$$C_{aWAAM} = C_{t3} + C_{o3} + C_a, \quad (5.8)$$

kde: C_{aWAAM} – celkové náklady za metodu WAAM bez fázových analýz [Kč]

C_{t3} – cena tisku WAAM [Kč]

C_{o3} – cena obrobení 2 mm přírůstků [Kč]

C_a – cena za provedení analýz po obrobení [Kč]

$$C_{aWAAM} = C_{t3} + C_{o3} + C_a = 10000 + 25000 + 8000 = 43\,000 \text{ Kč}$$

Celkové náklady s fázovými analýzami:

$$C_{afWAAM} = C_{t3} + C_{o3} + C_{af}, \quad (5.9)$$

kde: C_{afWAAM} – celkové náklady za metodu WAAM s fázovými analýzami [Kč]

C_{af} – cena za provedení analýz po obrobení včetně fázových analýz [Kč]

$$C_{afWAAM} = C_{t3} + C_{o3} + C_{af} = 10000 + 25000 + 12000 = 47\,000 \text{ Kč}$$

Celkový přibližný odpad u metody WAAM je možné spočítat vzorcem pro výpočet hmotnosti, kde známe hustotu konstrukční oceli, která je $7\,850 \text{ kg/m}^3$ a objem přírůstků i s dírami na obrobení, který byl vyčíslen přibližně na $246\,582,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

Odpad materiálu:

$$m_{w3} = V_{C2} \cdot \rho_{KO}, \quad (5.10)$$

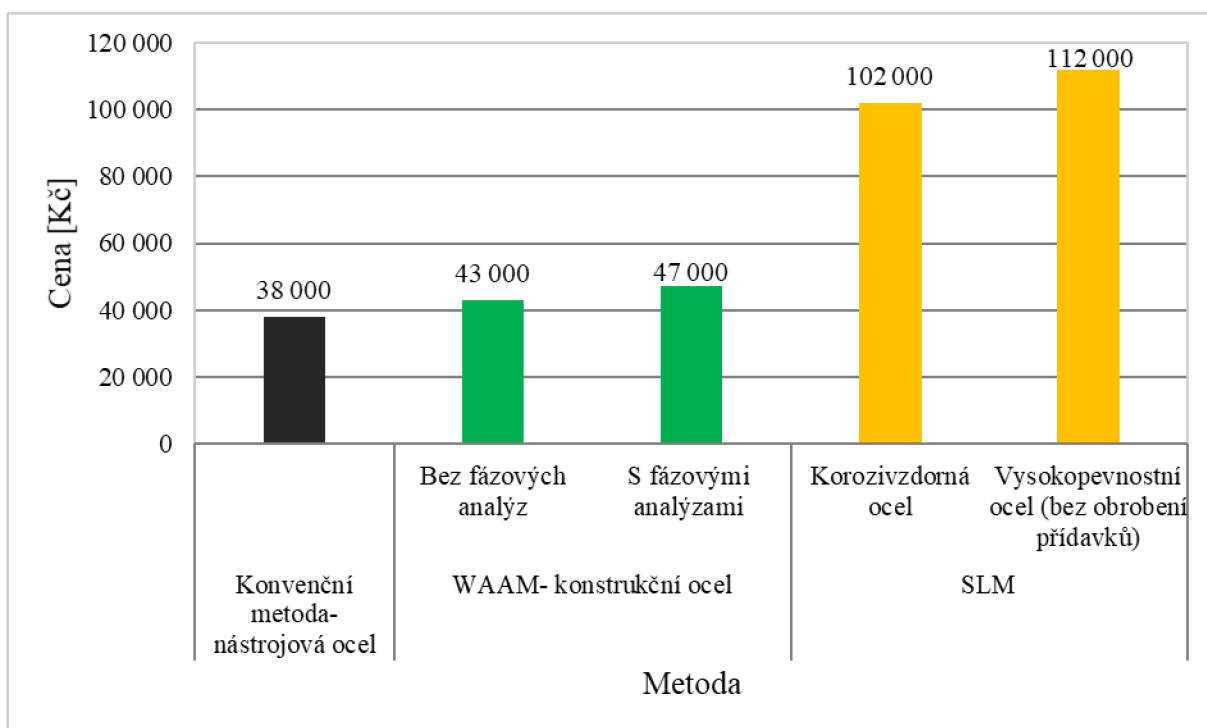
kde: m_{w3} - odpad materiálu při metodě WAAM [kg]

V_{C2} – objem odpadu při 2 mm přírůstku [m^3]

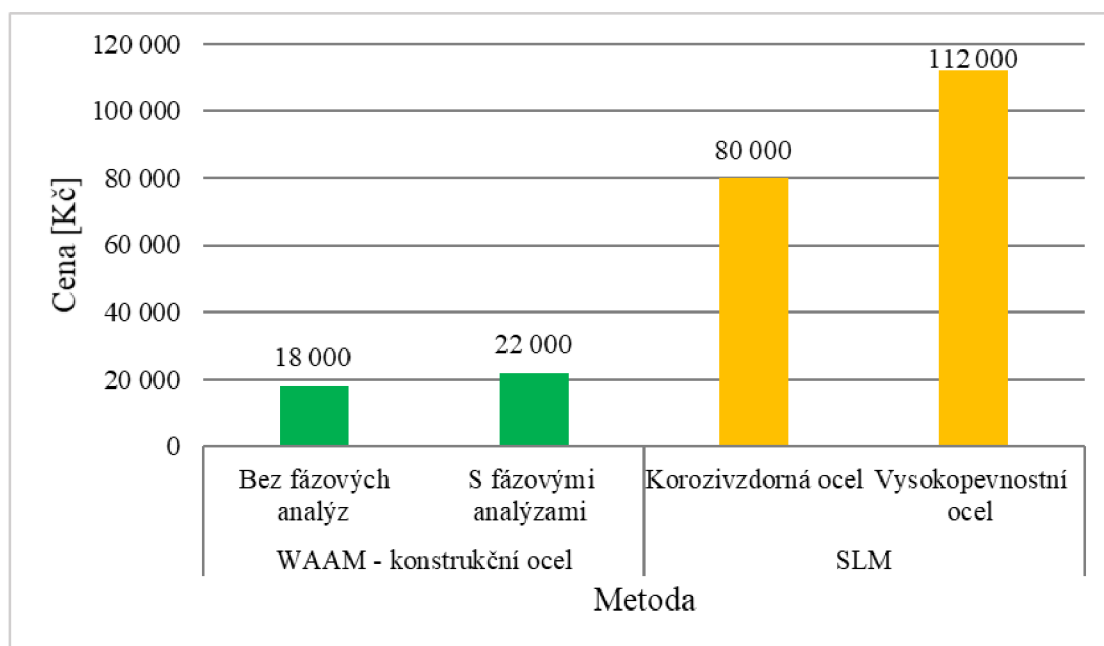
ρ_{KO} – hustota konstrukční oceli [kg/m^3]

$$m_{w3} = V_{C2} + \rho_{KO} = 246\,582,4 \cdot 10^{-9} \cdot 7850 = 1,936 \text{ kg}$$

Pro lepší a rychlejší orientaci je porovnání cen tisku a konvenční metody zobrazeno v grafech. Celkové náklady výroby 3D tisku a konvenční metody jsou na obr.19. Lze vidět, že v celkových nákladech je nejlevnější konvenční metoda, ale cenový rozdíl s metodou WAAM není tak velký. Naproti tomu metoda SLM je drahá při použití obou vhodných materiálů. Na obr.21 je grafické znázornění cen tisku i s potřebnými analýzami, kde metoda WAAM disponuje větší výhodou oproti metodě SLM.



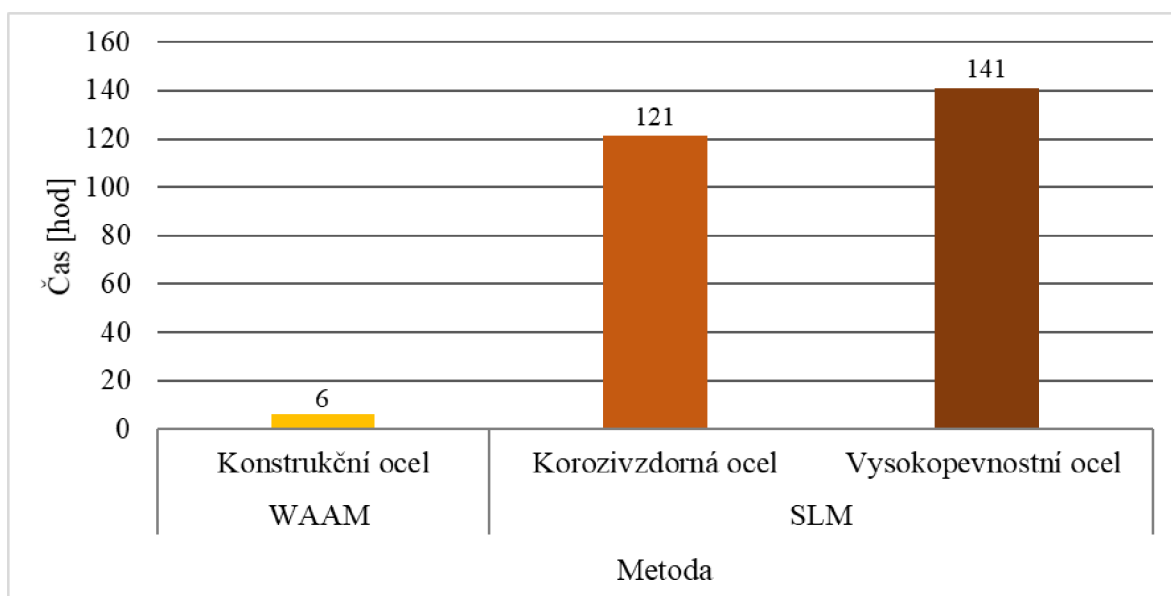
Obr.19 Porovnání celkových nákladů



Obr.20 Porovnání nákladů na tisk s analýzami

5.4 Časová náročnost

Neméně důležitým faktorem pro výběr metody a materiálu, je čas výroby. Dle dostupných informací z Akademie věd je čas tisku odhadován pro metodu WAAM s materiálem E335 na 6 hodin. Oproti tomu ze zprávy z Protolabu má metoda SLM při korozivzdorné oceli čas tisku 121 hodin a pro vysokopevnostní ocel je to 141 hodin. Tento čas ale zahrnuje vytisknutí celého plného dílu. Pokud firma zadá zakázku u Protolabu, je možné řešit vnitřek matrice formou skořepin a tím snížit i čas tisku. Při pohledu na tyto hodnoty má metoda WAAM značnou výhodu, grafické porovnání lze vidět na obr.19.



Obr.21 Porovnání času tisku

5.5 Technické porovnání [52]

Z tab.13 lze vyčíst, že téměř všechny materiály splňují pevnostní vlastnosti potřebné k použití. Pevnostně se nejvíce nástrojové oceli použité při konvenční metodě blíží po procesu stárnutí vysokopevnostní ocel. Největší rozdíl v pevnosti stálého materiálu a náhrady je při použití drátu G4Si1 a také nerezové oceli X2CrNiMo17-12-2, kdy se pevnost blíží pevnosti výlisku. U oceli X100CrMoV5-1 je zaznamenána jen smluvní mez kluzu, která je, ale o dost vyšší než mez pevnosti výlisku, navíc v kombinaci s velkou tvrdostí, takže při použití problém v pevnosti nenastane.

Co se týká tvrdosti nástrojové materiály ji splňují s dostatečnou hodnotou. Dobrou tvrdost však také vykazuje drát G4Si1, který převyšuje ohýbaný výlisek o 10 HRC, to nám zaručuje lepší výdrž matrice z této konstrukční oceli. Korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 má však nižší tvrdost než výlisek z materiálu X5CrNi18-10, u matrice z této korozivzdorné oceli může dojít při opakovaném a častém používání k poškození povrchu vlivem snahy proniknout tvrdšího materiálu do měkčího, velkou roli však hraje také tloušťka lisovaného materiálu a s ní související odpor, který bude menší při menší tloušťce.

Tab.13 Porovnání pevnosti a tvrdosti materiálů [52]

Metoda	Označení materiálu	Mechanické vlastnosti		
		Mez pevnosti v tahu [MPa]	Tvrdost	Převedená tvrdost [HRC]
-	X5CrNi18-10	600	215 HB30	18
Konvenční	90MnCrV8	2180	54 HRC	54
WAAM (CMT)	E335	620	274 HB	28
SLM	X100CrMoV5-1	-	50 HRC	50
	X2CrNiMo17-12-2	624	198 HV0.5	12
ADAM	X3NiCoMoTi18-9-5	1122	355 HV0.5	36
		1794 ⁽¹⁾	542 HV0.5 ⁽²⁾	52

1- pevnost po procesu stárnutí

2- tvrdost po procesu stárnutí

V následující tab.14 byly porovnány další mechanické vlastnosti zmíněných materiálů. Co se týče meze kluzu, největší dosahuje vysokopevnostní ocel X3NiCoMoTi18-9-5 po procesu stárnutí. U nástrojových materiálů, které dosahují velkých tvrdostí se mez kluzu zjišťuje jen velmi těžce, proto se uvádí mez pevnosti, nebo smluvní mez kluzu. Při pohledu na tuto hodnotu lze s jistotou říci, že nástroj z těchto materiálů vydrží odpor výlisku. Hodnoty meze kluzu u konstrukční oceli a korozivzdorné oceli jsou dostačující, protože jsou větší než hodnota smluvní meze kluzu u výlisku.

Největší tažnost má materiál výlisku ocel X5CrNi18-10 následně také i korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2, ta ale nastává až při překročení meze kluzu, která je zde mnohem vyšší než u výlisku a proto dojde dříve k deformaci výlisku než nástroje, navíc výlisek má i mnohem menší tloušťku, tím pádem i menší objemový odpor materiálu. Tažnost nástrojových ocelí je složité vyčíst z tahové zkoušky, ale je obecně známo, že tahle tažnost je nízká. Drsnost povrchu je nejhorší při použití drátu G4Si1, kde je potřeba největších přídavek na obrábění. Laserové technologie jsou mnohem přesnější, proto je jejich drsnost lepší a nejsou potřeba tak velké přídávky.

Tab.14 Porovnání meze kluzu a tažnosti materiálů

Metoda	Označení materiálu	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A [%]	Drsnost Ra [μm] po obrobení (před obrobení přídavek)
-	X5CrNi18-10	190 Rp _{0,2}	45	-
Konvenční	90MnCrV8	-	-	0,4
WAAM (CMT)	E335	520	23	-
SLM	X100CrMoV5-1	1170 Rp _{0,2}	-	-
	X2CrNiMo17-12-2	494	43	5
ADAM	X3NiCoMoTi18-9-5	999	7,5	5
		1730 ⁽¹⁾	7 ⁽²⁾	5

1- mez kluzu po procesu stárnutí

2- prodloužení po procesu stárnutí

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zjistit, zda lze nahradit konvenční metodu výroby nástroje za technologii kovového 3D tisku. Za podmínek, že nástroj je používán na maximálně 50ks, je možné použít i materiál s horšími mechanickými vlastnostmi než jaké má již použitá nástrojová ocel 90MnCrV8. Bylo představeno několik možných vhodných a dostupných materiálů i s nezbytnými charakteristikami. K materiálům bylo uvedeno několik možných způsobů výroby kovových dílů pomocí 3D tisku. Po prezentování informací bylo zjištěno, že proveditelnost kovového 3D tisku jako náhrada za konvenční metodu je možná.

Při zohlednění ekonomického a technického hlediska vyšlo najevo, která metoda a materiál je nejlepší jako náhrada. Z ekonomického hlediska byly vybrány 2 možné metody v porovnání s konvenční metodou, která stojí 38 000 Kč. První je metoda SLM, která má na výběr z korozivzdorné oceli X2CrNiMo17-12-2 a pak vysokopevnostní oceli X3NiCoMoTi18-9-5. Cena SLM s materiálem korozivzdornou ocelí činí 102 000 Kč, vysokopevnostní ocel má pak cenu 112 000 Kč, ale bez obrobení přídavků. Je vidět, že aditivní výroba pomocí SLM je pro firmu dost drahá, nicméně metoda je přesnější a ušetří se zde nejvíce materiálu. Stále je ale nejvýhodnější použití metody WAAM, kde cena činí 47 000 Kč i s provedením fázových analýz výrobku.

Hledisko technické nám nabízí širší možný výběr materiálů. Splňují ho téměř všechny představené materiály ve všech ohledech, z nichž některé velmi dostatečně. Nejméně technické vlastnosti splňuje korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2, kde se hodnota tvrdosti dostala dokonce pod hodnotu tvrdosti výlisku a může dojít k poškození nástroje. Je třeba ale zohlednit velikost a hmotnost nástroje a výlisku, kde je výhoda na straně nástroje. V neposlední řadě je žádoucí přihlídnout na způsoby tisku, některé aditivní metody jsou více přesnější, zejména laserové technologie, kdy není tak potřeba velkých přídavků na obrábění a šetří se materiál.

Po zohlednění všech zobrazených metod, materiálů a s přihlédnutím na technické a ekonomické parametry poutá pozornost metoda WAAM při použití techniky CMT, kde cena je „jen“ o několik tisíc vyšší než u konvenčního obrábění. Mechanické vlastnosti při použití drátu G4Si1 jsou vyhovující ve všech ohledech, také odpad je zde minimální oproti konvenční metodě. Je zde jen větší přídavek na obrábění. Výhodou je zde také čas tisku, kdy tento čas by mohl překonat i čas výroby konvenční metody. Firma si sice musí dodělat dokončující procesy obrábění a broušení, leštění, ale i s přihlédnutím k těmto menším nevýhodám doporučuji volit metodu WAAM s materiálem G4Si1.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. CITACE PRO, 2013. *Generátor citací* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
2. 3D tisk v kostce, 2015. *Materialpro3D* [online]. Brno [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
3. Jak funguje stolní 3D tiskárna: Základní technologie 3D tisku. *TonerPartner* [online]. TonerPartner [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-funguje-stolni-3d-tiskarna-zakladni-technologie-3d-tisku-24967cz39332/>
4. CHEN, Shen, 2016. *Application of wire-arc additive manufacturing (WAAM) process in in-situ fabrication of iron aluminide structures*. School of Mechanical, Materials, and Mechatronic Engineering, University of Wollongong. Dostupné také z: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=5865&context=theses>. Akademická práce. University of Wollongong.
5. GIBSON, Ian, D. W. ROSEN a B. STUCKER, [2015]. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* [online]. Second edition. New York: Springer [cit. 2021-04-18]. ISBN 978-1-4939-2112-6. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.com/additive-manufacturing-technologies-3d-printing-rapid-prototyping-and-direct-digital-manufacturing-d184608194.html>
6. Rapid prototyping, 2016. *3D Tech spol. s r.o.* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/>
7. 3D tisk metodou Selective Laser Melting (SLM). In: *Protolab* [online]. Ostrava [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://protolab.cz/3d-tisk-kovovych-slitin/>
8. 3D tisk kovů: V čem spočívají výhody odlehčených kovových konstrukcí, 2017. In: *Konstrukter* [online]. 2017 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-k-cemu-slouzi-odlehcene-kovove-konstrukce/>
9. 3D tisk – budoucnost nástrojů pro elektromobilitu, 2019. In: *Technický portál* [online]. Praha: Technický týdeník [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/3d-tisk-budoucnost-nastroju-pro-elektromobilitu_48203.html
10. Demo parts. In: *Waammat* [online]. Waammat [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://waammat.com/about/demo-parts>
11. Chemické složení materiálu. *Killich s.r.o.* [online]. Liberec: Killich [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.killich.cz/stranky/technicke-info/ocelovy-spojovaci-material/chemicke-slozeni-materialu>
12. Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí, 2011. *TumliKOVO* [online]. TumliKOVO, 2011 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vliv-jednotlivych-prvku-na-vlastnosti-oceli/>
13. BRÍZA, Michal, 2017. *Oceli na nástroje* [online]. Brno, 45 s. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=150112. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP.

14. BONGER EDELSTAHL. *W.Nr. 1.2842*. Dostupné také z: http://www.bogner.cz/files/files/Materialovy_list_1.2842.pdf
15. JANKŮ NÁSTROJOVÉ OCELI S.R.O., 2019. *CENÍK OBROBENÉ NÁSTROJOVÉ OCELI*. nástrojove-oceli. Dostupné také z: http://www.nastrojove-oceli.com/rc_images/cenik.pdf
16. METALCOR. *1.4301, AISI 304*. Německo: Metalcor. Dostupné také z: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/5/>
17. SIMÕES, Ricardo José Marcos Bacelar, 2017. *Evaluation of WAAM parts by NDT* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.com/evaluation-of-waam-parts-by-ndt-mechanical-engineering-d101152934.html>. Técnico Lisboa. Vedoucí práce Prof. Inês da Fonseca Pestana Ascenso Pires and Prof. Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida.
18. ADEBAYO, Adeyinka, 2013. *Characterisation of integrated WAAM and machining processes* [online]. Cranfield University [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.com/cranfield-university-adeyinka-adebayo-characterisation-of-integrated-waam-e50308323.html>. Cranfield University. Vedoucí práce Dr Jörn Mehnen and Dr Xavier Tonnellier.
19. *3D tisk vstupuje do doby železné* [online], 2013. ATOMinfo, **2013** [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2013/10/3d-tisk-vstupuje-do-doby-zelezne/>
20. Kovy ADAM. *3Dwiser s.r.o.* [online]. Praha: 3Dwiser s.r.o. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/kovy/markforged-metal-x/#materials>
21. MARKFORGED, 2020. *A2 Tool Steel*. Dostupné také z: <https://static.markforged.com/downloads/A2-tool-steel.pdf>
22. RENISHAW, 2017. *Maraging steel M300 powder for additive manufacturing*. Dostupné také z: <https://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>
23. Stárnutí konstrukčních materiálů, 2006. *MM Průmyslové spektrum* [online]. ČZU v Praze, Technická fakulta, 2006, (6) [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/starnuti-konstrukcnich-materialu>
24. RENISHAW, 2017. *SS 316L-0407 powder for additive manufacturing*. Dostupné také z: <https://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>
25. Legovaná ušlechtilá ocel, austenitická s velmi nízkým obsahem uhlíku, 2018. *AK 1324, s.r.o.* [online]. Studénka: AK 1324, 2018 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.ak1324.cz/jakost-1-4404/>
26. SLM (Selective Laser Melting). In: *Protocast* [online]. Praha: Protocast [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.protocast.cz/cz/materialy/3d-tiskovy-material/#katalog>
27. *The DED additive manufacturing process, in this case using an electron beam | Figure from Dassault Systèmes* [online], 2019. In: . 3D natives [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
28. LINCOLN ELECTRIC, 2019. *SUPERARC G4Si1*. Cleveland: Lincoln Global. Dostupné také z: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWire-SuperArc-SuperArcG4Si1/c41025.pdf

29. Drát pro svařování v ochranném plynu G4Si1 (SG 3). In: *Foerch* [online]. Praha: Förch [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.foerch.cz/pajeni-svarovani/draty-pro-svarovani-svarovaci-tycinky-a-elektrody/draty-pro-svarovani/schweissdraht-schutzgas-g4si1-sg-3>
30. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA, 2008. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra. ISBN 978-80-7361-051-7.
31. *Přehled technologií 3D tisku* [online], 2018. Libhošť: dk metal prominent [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
32. HOMOLA, Jan, 2019. *Selective Laser Sintering* [online]. Nová média [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/selective-laser-sintering/>
33. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology, 2016. *Korean J Radiol* [online]. **2016**(17 (2)), 182-197 [cit. 2021-04-15]. ISSN 2005-8330. Dostupné z: doi:<http://dx.doi.org/10.3348/kjr.2016.17.2.182>
34. SLM (Selective Laser Melting). *Cotu s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/metoda-slm>
35. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM), 2016. *3D TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
36. PAGÁČ, Marek, 2017. 3D tisk kovů na Fakultě strojní VŠB-TU Ostrava. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, **2017**(4) [cit. 2021-04-08]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/3d-tisk-kovu-na-fakulte-strojni-vsbtu-ostrava>
37. MIRONE, Giuseppe a spol, 2020. Analysis and modelling of tensile and torsional behaviour at different strain rates of Ti6Al4V alloy additive manufactured by electron beam melting (EBM). *Materiály Věda & Inženýrství A* [online]. Elsevier, 2020, 793 [cit. 2021-04-17]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139916>
38. EBM (Electron Beam Melting). *Cotu s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/122/ebm-electron-beam-melting>
39. ŠPRDLÍK, Vojtěch, 2019. Dostupnější 3D tisk kovů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, **2019**(4) [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dostupnejsi-3d-tisk-kovu-14210>
40. HAWORTH, Jesse, 2019. ATOMIC DIFFUSION ADDITIVE MANUFACTURING. In: *Hawk Ridge Systems* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://hawkridgesys.com/blog/the-markforged-metal-x-an-introduction-to-metal-3d-printing>
41. KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ, 2018. Navařování metodou WAAM. *MM Průmyslové spektrum* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, **2018**(1,2) [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam>
42. CHEN, Jian, 2012. *Hybrid Design based on Wire and Arc Additive Manufacturing in the Aircraft Industry* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/9637395.pdf>. Cranfield University. Vedoucí práce Dr. Jörn Mehnen and Dr. Helen Lockett.

43. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials, 2020. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-04-18]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030>
44. SCOTTI, M. Fernando a spol., 2020. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. Elsevier, **2020**(57), 23-35 [cit. 2021-04-08]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>
45. MCANDREW, R. Anthony a spol., 2018. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing* [online]. Cranfield University, (Svazek 21), 340-349 [cit. 2021-04-08]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>
46. DI GIANDOMENICO, Vincenzo, 2014. *Surface structured bonded composite-metal joint* [online]. CRANFIELD UNIVERSITY [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/9308/Di_Giandomenico_Vincenzo_Thesis_2014.pdf?sequence=1. Cranfield university, School of Applied Science Advanced Materials. Vedoucí práce Andrew R. Mills and David Ayre.
47. SIGMUND, Marian. *3D tisk* [e-mailová komunikace]. 16.03.2021 12:34. [cit. 2021-04-18].
48. ČÍP, Tomáš, 2010. *SVAŘOVÁNÍ VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ LASEREM* [online]. Brno [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30307255.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.
49. BAZALA, Jiří. *Bakalářka-3D tisk* [e-mailová komunikace]. 01.03.2021 13:00. [cit. 2021-04-18].
50. SIGMUND, Marián. *3d tisk kovů prototyp nástroje_poptávka* [e-mailová komunikace]. 25.02.2021 8:47. [cit. 2021-04-18].
51. SIGMUND, Marián. *Bakalářka-3D tisk* [e-mailová komunikace]. 17.02.2021 11:55. [cit. 2021-04-18].
52. BUREŠ, Jiří. Převodník tvrdosti. *ConVERTER* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/tvrдост-online.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
AM	aditivní metoda	[-]
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing	[-]
CMT	Cold metal transfer	[-]
C_{1kg}	cena za 1 kilogram polotovaru	[Kč/kg]
C_a	cena za provedení analýz po obrobení	[Kč]
C_{af}	cena za provedení analýz po obrobení včetně fázových analýz	[Kč]
C_{aWAAM}	celkové náklady za metodu WAAM bez fázových analýz	[Kč]
C_{afWAAM}	celkové náklady za metodu WAAM s fázovými analýzami	[Kč]
C_{ekv}	uhlíkový ekvivalent	[%]
C_H	cena tisku za vysokopevnostní materiál	[Kč]
C_k	cena za kalení	[Kč]
C_{k1kg}	cena za kilogram kalení materiálu	[Kč/kg]
C_{Kon}	celkové náklady konvenční metody	[Kč]
C_{02}	cena obrobení 0,5 mm přídavků	[Kč]
C_{03}	cena obrobení 2 mm přídavků	[Kč]
C_o	cena obrábění	[Kč]
C_p	cena polotovaru	[Kč]
C_{SLM}	celkové náklady na za tisk metodou SLM	[Kč]
C_{t2}	cena tisku SLM	[Kč]
C_{t3}	cena tisku WAAM	[Kč]
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	[-]
EBM	Electron Beam Melting	[-]
FDM	Fused Deposition Modeling	[-]
GMAW	Gas Metal Arc Welding	[-]
GTAW	Gas tungsten arc welding	[-]
$K_{1,4}$	konstanta pro navýšení ceny tisku	[-]
LAM	Liquid Additive Manufacturing	[-]
LOM	Laminated Object Manufacturing	[-]
MAG	Metal Active Gas	[-]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
MJF	Multi Jet Fusion	[-]
m_o	hmotnost polotovaru po obrobení	[kg]
m_p	hmotnost polotovaru	[kg]
m_{w1}	odpad materiálu	[kg]
m_{w2}	odpad materiálu při metodě SLM	[kg]
m_{w3}	odpad materiálu při metodě WAAM	[kg]
PAW	Plasma arc welding	[-]
Ra	drsnost povrchu	[μ m]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
SDM	Shaped Metal Deposition	[-]
SLA	Stereolithography	[-]
SLM	Selective Laser Melting	[-]
SLS	Selective Laser Sintering	[-]

TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
$V_{C0,5}$	objem odpadu při 0,5 mm přídavku	[m ³]
V_{C2}	objem odpadu při 2 mm přídavku	[m ³]
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacture	[-]
ρ_{KO}	hustota konstrukční oceli	[kg/m ³]
ρ_{NO}	hustota nerezové oceli	[kg/m ³]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kovové výrobky z 3D tisku [7], [8], [9], [10]	9
Obr. 2 Matrice.....	10
Obr. 3 Nákres matrice.....	10
Obr. 4 Výlisek z nerezů	11
Obr. 5 Ukázka nanášení prášku [19].....	13
Obr. 6 Korozivzdorná ocel v prášku [26]	15
Obr. 7 Proces metody podávání drátu [27]	17
Obr. 8 Drát G4Si1 na cívce [29]	17
Obr. 9 Schéma metody SLS [33]	19
Obr. 10 Klasická konstrukce vahadla[36].....	20
Obr. 11 Bionická konstrukce vahadla[36]	20
Obr. 12 Schéma metod SLM a DMLS [31].....	21
Obr. 13 Tiskárna metody SLM [7]	22
Obr. 14 Schéma výrobního postupu [40].....	23
Obr. 15 Součást vyrobená metodou WAAM [10]	24
Obr. 16 Pracoviště metody CMT [17]	24
Obr. 17 Popis metody WAAM [45].....	25
Obr. 18 Ukázka objemového 3D tisku kovů WAAM metodou CMT [47]	27
Obr. 19 Porovnání celkových nákladů	31
Obr. 20 Porovnání nákladů na tisk s analýzami	31
Obr. 21 Porovnání času tisku.....	32

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 90MnCrV8 [14].....	11
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 90MnCrV8 [15]	11
Tab. 3 Chemické složení oceli X5CrNi18-10 [16]	11
Tab. 4 Mechanické vlastnosti výlisku [16].....	11
Tab. 5 Chemické složení oceli X100CrMoV5-1 [21].....	14
Tab. 6 Mechanické vlastnosti oceli X100CrMoV5-1 [21]	14
Tab. 7 Chemické složení vysokopevnostní oceli [22]	14
Tab. 8 Mechanické vlastnosti vysokopevnostní oceli [22].....	15
Tab. 9 Chemické složení korozivzdorné oceli [24]	15
Tab. 10 Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli [24].....	16
Tab. 11 Chemické složení drátu [28].....	17
Tab. 12 Mechanické vlastnosti drátu [28], [30].....	18
Tab. 13 Porovnání pevnosti a tvrdosti materiálů [52]	32
Tab. 14 Porovnání meze kluzu a tažnosti materiálů	33