Vysoké učení technické v Brně
Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování /
Odbor Reverzního Inženýrství a Aditivních technologií

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design /
Department of Revers engineering and additive technologies

Zpracování hořčíkových slitin technologií selektivního laserového tavení

[Projekt disertační práce]
[Dissertation work project]

Autor práce: **Ing. Jan Suchý**
Author

Brno 2018

ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

OBSAH

Obsah **3**
1. Název česky a anglicky **4**
2. klíčová slova česky a anglicky **5**
3. Anotace **6**
4. Úvod **7**
5. Shrnutí současného stavu poznání odborné problematiky **9**
5.1. Vývoj procesních parametrů hořčíku a jeho slitin 9
5.2. Mikrostruktura hořčíkových slitin a mechanické vlastnosti 18
6. Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků získaných **21**
6.1. Procesní parametry 21
6.1.1. Vliv výkonu laseru 21
6.1.2. Vliv skenovací rychlosti 21
6.1.3. Vliv vzdálenost návarů 22
6.1.4. Vliv šířka vrstvy 22
6.1.5. Vliv hustoty energie 22
6.1.6. Přehled procesních parametrů pro hořčík a jeho slitiny 23
6.2. Fenomény při výrobě 23
7. Podstata, cíle a přínos disertační práce **26**
8. Vědecká otázka a pracovní hypotézy **27**
9. Způsob řešení a použité vědecké metody zkoumání **28**
9.1. Přestavba stroje 28
9.2. Analýza prášku 29
9.3. Test návarů 30
9.4. Test objemových vzorků 32
9.5. Tahové a únavové zkoušky 32
9.6. Stavba velkorozměrových dílů 31
10. Časový rozvrh a etapy řešení **34**
11. Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení dané problematiky **36**
12. Spolupráce s jinými institucemi **37**
13. Předpokládané náklady spojené s řešením a jejich zdroje **38**
14. Charakteristika předpokládaného výsledku řešení disertační práce **39**
15. Seznam použitých zdrojů **40**
16. Vědecký životopis **44**

1. NÁZEV ČESKY A ANGLICKY

Název

Zpracování slitin hořčíku pomocí selektivního laserového tavení

Title

Processing of magnesium alloys using technology selective laser melting

2. KLÍČOVÁ SLOVA ČESKY A ANGLICKY 2

Klíčová slova

SLM, selective laser melting, hořčík, mechanické vlastnosti, mikrostruktura

Keywords

SLM, selective laser melting, magnesium, mechanical properties, microstructure

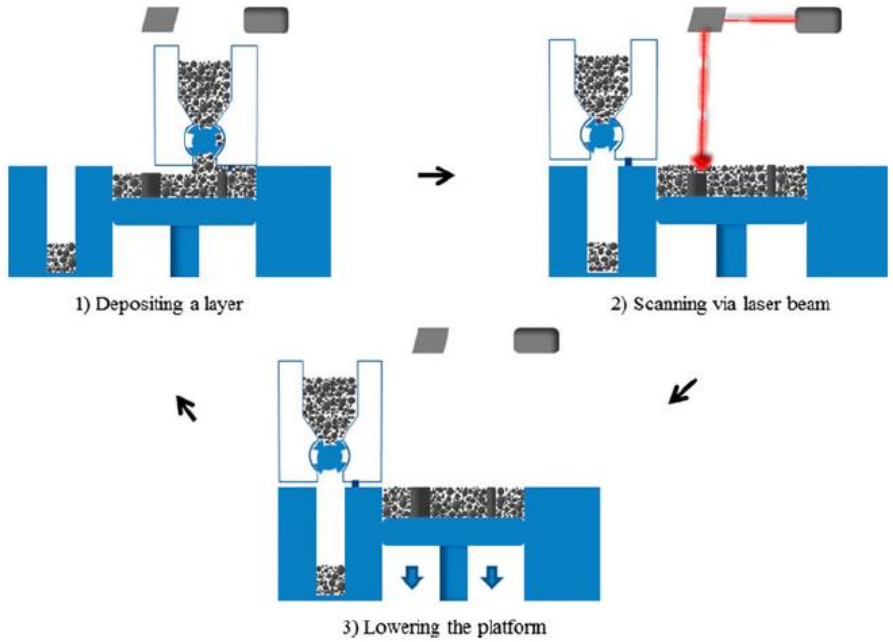
3. ANOTACE

Práce je zaměřena na zpracování hořčíkových slitin technologií selektivního laserového tavení. Shrnuje danou problematiku a propojuje dosažené poznatky do širšího celku. Definuje fenomény vznikající při výrobě pomocí laseru a popisuje vliv hlavních procesních parametrů na relativní hustotu vzorků a výsledné mechanické vlastnosti. Déle určuje meze, v jakých je vhodné se pohybovat při volbě hlavních procesních parametrů. Ze zjištěných poznatků je navržen plán experimentů, který by měl vést k nastavení výrobního procesu a ověření jeho správnosti.

4. ÚVOD

Rychlý rozvoj v oblasti průmyslu a snaha využívat ekonomicky dostupné zdroje vede často na tvorbu speciálních dílců, na které jsou kladeny náročné požadavky. Těmi mohou být konkrétní mechanické, technologické, chemické či fyzikální vlastnosti stejně jako tvarová specifičnost. Částečně tuto problematiku řeší využívání technologie selektivního laserového tavení (SLM), jenž umožní vyrábět díly pro široké portfolio odvětví (letecký a vesmírný průmysl, vojenství, lékařství, aj.). Avšak portfolio materiálů, které jsou takto zpracovatelné, je stále malé, což je doposud jedním z největších limitů této oblasti. Přitom snaha neustálého snižování hmotnosti vede ke zpracovávání hořčíkových slitin. Jejich zpracovatelnost technologií SLM ale doposud není dostatečně popsána.

Při metodě SLM je jako výchozí materiál používán prášek kovu, který je nanášen vrstvu po vrstvě a následně spojován pomocí laseru (Obr. 4.1). Velkou výhodou metody je, že dokáže z kovového prášku produkovat díly s relativní hustotou blížící se 100 %. Pomocí této metody je také možné vyrábět topologicky optimalizované díly, které využívají co nejefektivnější rozmístění materiálu s ohledem na svoji aplikaci. Navíc lze u dílů kontrolovat rozložení porozity nastavením různých procesních parametrů během stavby a řídit tak mechanické vlastnosti po jejich celé délce *(Sing et al., 2016)*. Je vhodná i pro zpracovávání neželezných čistých kovů jako například Al, Cu, Ti aj., které nelze zpracovávat například užitím selektivního laserového sintrování (SLS) *(Gu, 2015)*. Je tedy snaha toto materiálové portfolio rozšířit, což vede ke zpracovávání různých slitiny železa, zinku, chrómu, niklu, wolframu, zlata a v neposlední řadě i hořčíku *(Yap et al., 2015)*.



Obr. 4.1 Schéma SLM procesu *(Loh et al., 2014)*

Přes stále větší zájem o zpracovatelnost hořčíkových slitin technologií SLM existuje pouze velmi málo příkladů, kdy byly stavěny objemové vzorky z hořčíku, či jeho

slitin *(Manakari et al., 2016)*. Uvedeny jsou povětšinou jen úvodní studie testu návarů. Přitom stavba objemových vzorků je dalším nutným krokem k pochopení problematiky zpracování těchto materiálů a umožnění z nich produkovat plnohodnotné díly. Důvodem nedostatku dat ze zpracování hořčíku metodou SLM je pravděpodobně vysoká obtížnost jeho zpracovatelnosti. Hořčík a jeho slitiny mají nízkou hustotu, dobrou tažnost, lepší tlumící schopnosti než hliník, výbornou slévatelnost a dobrou svařitelnost. Zároveň však mají i negativní vlastnosti jako je nižší únavová pevnost než hliník, vysoká reaktivita a velmi nízká odolnost proti korozi *(F.H.Froes, D.Eliezer, 2014)*. Právě vysoká reaktivita materiálu, obzvláště v práškovém stavu, a rychlé podléhání korozi jsou hlavní důvody obtížné zpracovatelnosti kovu.

Z prostudovaných prací vyplívá, že doposud dělané testy byly zaměřeny na testy návarů a tvorbu menších objemových vzorků. V obou případech byl zkoumán jejich tvar a relativní hustota. Občas byly výsledky doplněny o informace o tvrdosti, či mechanické pevnosti vzorků. Doposud ale chybí záznam vývoje relativní hustoty a mikrostruktury v závislosti na vstupních parametrech. Z doposud publikovaných výsledků tedy nevyplývá, že byl výrobní proces optimalizován. Zároveň nebyly nikdy z hořčíkových slitin vyrobeny větší díly než malé kostkové vzorky do 20 mm.

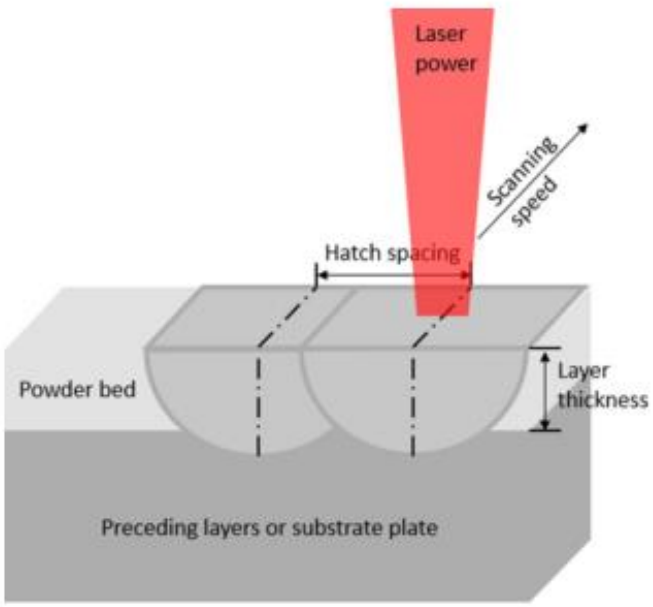
Cílem práce tedy bude odhalení vlivu procesních parametrů na výslednou mikrostrukturu materiálu a relativní hustotu dílu. Zároveň bude snaha umožnit zpracovat větší díly než kostkové vzorky pro sledování vývoje relativní hustoty.

5

5. SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ ODBORNÉ PROBLEMATIKY

5.1. Vývoj procesních parametrů hořčíku a jeho slitin

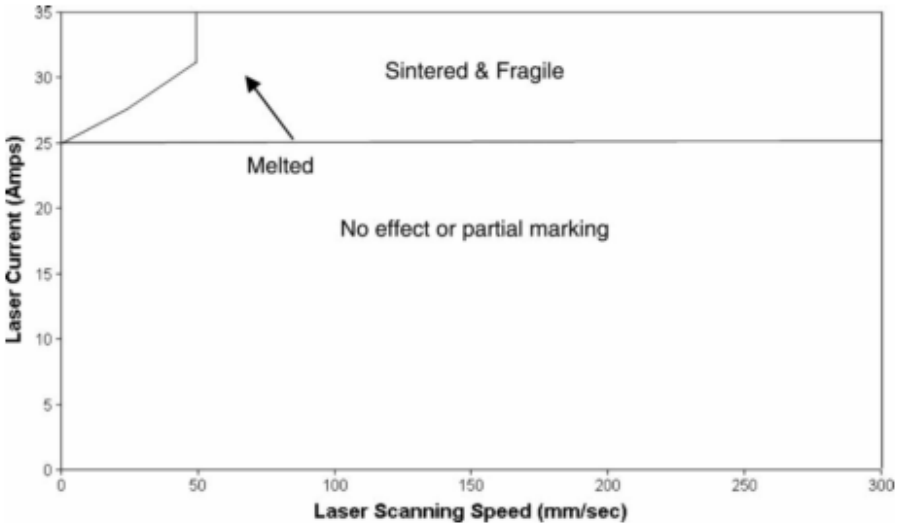
Pro dosažení díly vysoké kvality pomocí metody SLM je nutné správně nastavit výrobní proces. Agarwala a kolektiv popisuje řadu parametrů, které proces ovlivňují, podobně jako u metody selective laser sintering (SLS), z nichž lze uvést například typ použitého laseru, průtok inertní atmosféry, vyhřívání základové desky, délka skenovacího vektoru, skenovaný rádius, viskozita prášku, tepelná vodivost, odrazivost světla, tvar a velikost částic prášku, chemické složení, teplota tuhnutí a vypařování aj. *(Agarwala et al., 1995)*. Mezi hlavní procesní parametry však patří výkon laseru (Lp), skenovací rychlost (Vs), vzdálenost stop laseru (Hd) a šířka nanesené vrstvy (Lt) (Obr.5.1). Obtížnost nastavení procesních parametrů závisí obzvláště na procesech, jako je oxidace prášku, fluktuaci tepla, sbalovací efekt, tvorba trhlin, nestabilita tavného bazénku a odlamování vrstev *(Gu et al., 2012)*. Z důvodu komplexnosti problému jsou procesní data dávána do širších souvislostí pomocí tzv. procesních map. Lze se díky nim dívat na vliv parametrů jednotlivě i sdruženě s ohledem na sledovanou veličinu (šířka návaru, porozita, mechanické vlastnosti…).



Obr. 5.1 Hlavní procesní parametry SLM procesu *(Yap et al., 2015)*

Ng et al., 2010 se zaměřil na zpracování dvou čistých hořčíkových prášků. Prášek A měl distribucí částic 75 – 150 µm. Distribuce prášku B byla 5 – 45 µm. Částice prášku A neměly sférický tvar oproti částicím prášku B. Z obou prášků byly vyrobeny návary pro studium jejich geometrie. Návary z hrubého prášku A se však nepodařilo vytvořit. Laser prášek A kvůli velikosti vůbec neroztavil. Ke špatné zpracovatelnosti přispíval i tvar částic. Natočení podélné částice na její delší stranu může způsobit, že laser musel roztavovat mnohem širší vrstvu než v případě kulové

částice (Kempen et al., 2011). S využitím prášku B byla vytvořena procesní mapa, která ukazuje oblasti, kde se podařilo vytvořit návary (Obr. 5.2). Tavení zoxidovaného prášku Mg uvolňuje z materiálu absorbovaný kyslík. Kyslíkové vrstva nad tavenou vrstvou působí reaktivně na nově utvářenou strukturu dílu a navíc může způsobovat hoření prášku přímo ve výrobní komoře. Proto je nutné kyslík z místa stavby odstranit. Z toho důvodu probíhala stavba v ochranném boxu, kterým proudila během stavby argonová atmosféra rychlostí 20 l/min. Box měl zajistit menší spotřebu inertní atmosféry a lepší možnost odvodu kyslíku.

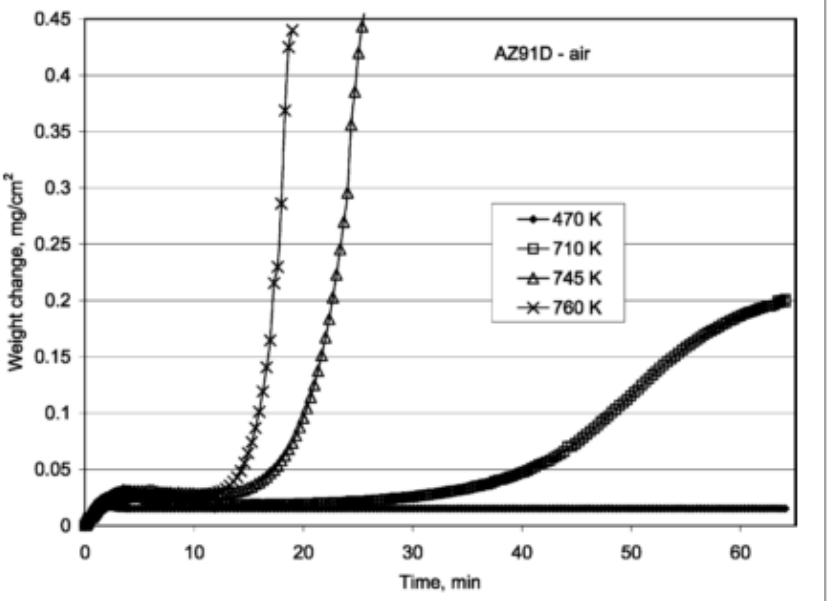


Obr. 5.2 Procesní mapa návarů čistého Mg *(Ng et al., 2010)*

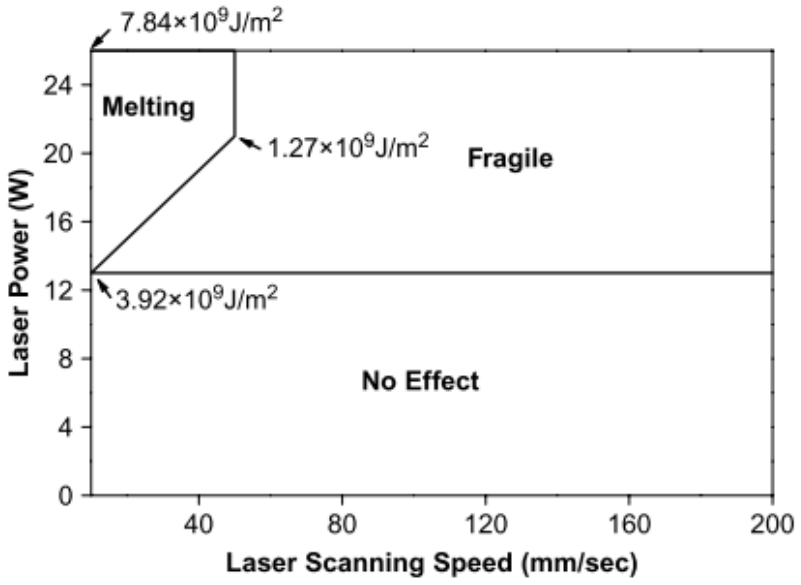
Czerwinski, 2002 provedl studii uvolňování kyslíku ze zaoxidované slitiny AZ91D za zvýšených teplot. Mechanizmus uvolňování kyslíku se vyznačuje v první fázi malým nárůstem hmotnosti (20 – 25 g/cm^2) vlivem urychlené koroze za zvýšených teplot. Následně se ze struktury začal kyslík uvolňovat z oblastí s nepravidelnostmi struktury jako jsou hranice zrn a okolí vměstků. Se vzrůstající teplotou se tento fenomén rapidně zvyšoval. Při teplotě 470 K se hmotnost vzorku nezmělila po více než hodinu. U vzorku v rozmezí teplot 745 a 760 K se ztráta hmotnosti vlivem odpoutání kyslíku projevila již za 15 – 20 min (Obr. 5.3.). Navíšení teploty nevede pouze k rychlejšímu uvolňování kyslíku ze struktury slitiny, ale zvyšuje i její reaktivnost vůči okolí. Vystavením zahřátého vzorku teplotě nad 710 K vzušné atmosféře vedlo k jeho katastrofické oxidaci v řádu minut. Po zaoxidování povrchu se koroze výrazně zpomalila.

Chung Ng et al., 2011 pokračoval ve zpracování čistého hořčíku v ochranném boxu. Vyhodnocoval dvě skupiny návarů. První skupina byla vyrobena kontinuálním módem laseru, druhá pulzním. Základovou desku tvořil plát z korozivzdorné oceli 304SS. Pro udržení hodnoty kyslíku pod 0,5 % držel průtok argonové atmosféry 20 l/min. Procento uvolněného kyslíku bylo se vzrůstající energií v místě stavby vyšší. Nejspíše je to způsobeno ohřátím materiálu na vysokou teplotu a rozrušením jeho struktury, což koresponduje se studiem uvolňování kyslíku z hořčíkových slitin *(Czerwinski, 2002)*. U pulzního módu laseru se uvolnění kyslíku pohybovalo od 7 - 10 % kyslíku obsaženého v povrchu materiálu. Pro roztavení prášku muselo být

použito energií v řádech 10^6 J/mm^2. Návary často nebyly kontinuální v místech, kde se vlivem velké energie prášek vypařil. U kontinuálního módu laseru se uvolnilo pouze 6,5 % kyslíku obsaženého v povrchu materiálu. Použité energie byly nižší než v případě pulzního módu a i návary se jevily pravidelnější. Rozsah použitých energií je uveden v energetické procesní mapě (Obr. 5.4). Z analýzy šířky a velikosti návarů také vyplývá, že proces stavby je podstatně více ovlivněn volbou výkonu laseru než skenovací rychlostí.

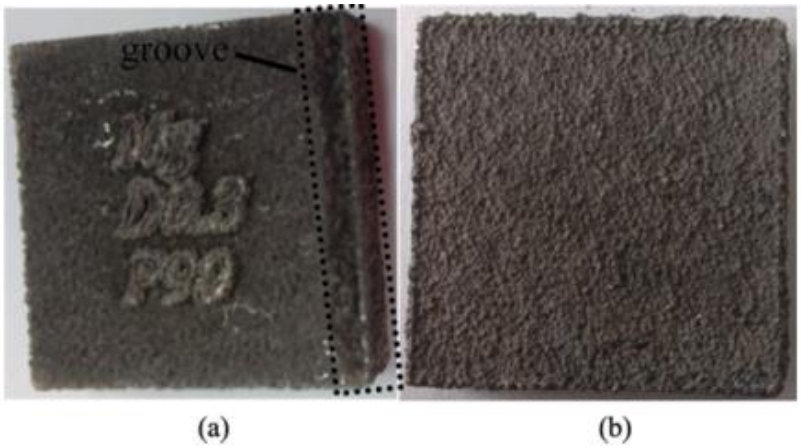


Obr. 5.3 Uvolňování kyslíku ze struktury slitiny AZ91D za zvýšených teplot *(Czerwinski, 2002)*



Obr. 5.4 Energetická procesní mapa čistého Mg *(Chung Ng et al., 2011)*

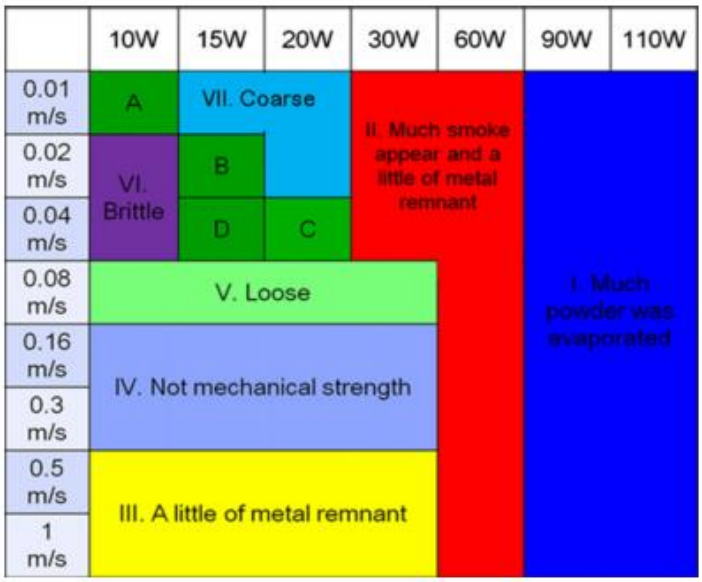
Hu et al., 2015 vytvořil první objemové vzorky z čistého hořčíku. Jednalo se o kostky o rozměrech 20 x 20 x 10 mm. Ke stavbě byl použit Nd:YAG (λ=1,06 μm) laser a platforma ze slitiny AZ31. Výkony laseru byly zvoleny 15 – 150 W, vzdálenost návarů 100 μm, tloušťka nanesené vrstvy 30 μm a skenovací rychlosti 50 – 100 mm/s. Při použití vyšších skenovacích rychlostí byl prášek hořčíku vlivem nízké hustoty a chemické aktivity vyzdvižen a rozptýlen po komoře, kde reagoval se zbytkovým kyslíkem. Tato oxidační reakce způsobila černou mlhu, která znemožňovala stavbu. Průtok argonové atmosféry byl 100 l/min pro udržení kyslíku v komoře pod 0,2 %. Skenovací strategie byla zvolena „cikcak" s rotací každé vrstvy o 63,5 °. Nejlepší výsledek byl dosažen s výkonem laseru 90 W a skenovací rychlostí 100 mm/s. Relativní hustota vzorku byla nad 95 % (Obr. 5.5). Dále byl zkoumán vliv délky skenovacího intervalu na tvrdost a kvalitu povrchu vzorku. Krátký interval vede k nedostatečnému zchlazení vzorku, jeho přehřátí a většímu uvolnění kyslíku. Čímž vznikne „balling" efekt, jelikož je závislý na míře oxidace kovu *(Li et al., 2012)*. Avšak příliš dlouhý skenovací interval vede také k oxidaci a nárůstu „balling" efektu. Ten snižuje jakost povrchu a vnáší do struktury nespojitosti.



Obr. 5.5 Objemové vzorky z čistého Mg za použití prášku D26 (a) a D43 (b) *(Hu et al., 2015)*

Savalani and Pizarro, 2016 navazovali na práci s čistým hořčíkem a zkoumali vliv předehřevu materiálu a tloušťky nanesené vrstvy při použití metody SLM. Při práci používali pulzní mód Nd:YAG (λ=1,06 μm) laseru s rozsahem frekvencí 10 – 60 kHz. Předehřevem materiálu na 180 °C během 30 min nebyl zjištěn žádný vliv oxidace, což odpovídá předešlé práci *(Czerwinski, 2002)*. Změna však byla pozorována při analýze návarů. Návary bez předehřevu obsahovaly nesouměrnosti a porozitu, která neměla také zastoupení u návarů s předehřevem. Předehřev zkvalitnil i povrch návaru z 25 μm na 20 μm. Tloušťka nanesené vrstvy měla přímý vliv na oxidaci během procesu stavby. Menší vrstvy produkovaly více kyslíku nejspíše z dosažení vyšší teploty a tím většího narušení povrchu zaoxidovaných částic prášku. Nižší tloušťka vrstvy také přispívá k celkově nižší porozitě v objemových dílech *(Savalani et al., 2012)*. Šířka i výška návarů se se zvyšující se tloušťkou vrstvy zvyšovala kvůli přivedení většího množství materiálu a snížení úrovně oxidace v komoře.

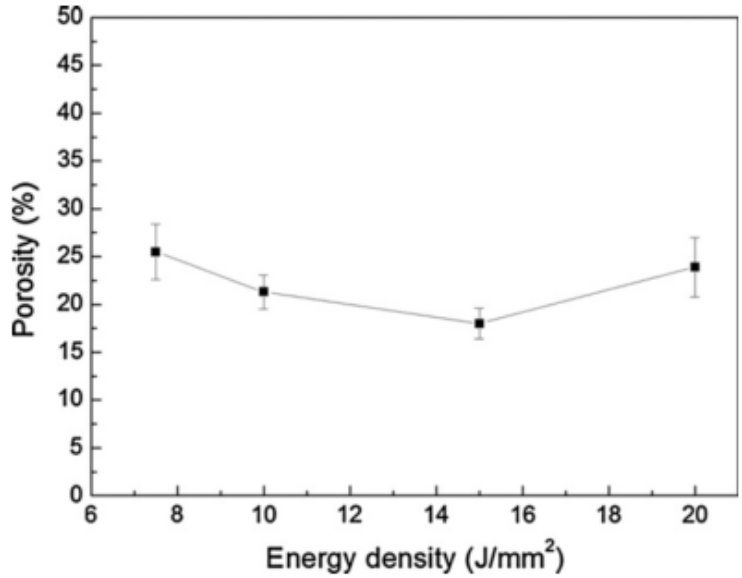
Zhang et al., 2012 vytvořili objemové vzorky ze směsi hořčíku s 9% příměsí hliníku (Mg-9%Al). Velikost vzorků byla 5 x 5 x 5 mm. Komora byla předehřátá na 80 °C s průtokem Ar 7 mbar pro udržení obsahu kyslíku v komoře pod 0,5 %. Tloušťka nanesené vrstvy byla zvolena 50 µm a vzdálenost návarů 80 µm. Rozsah výkonů laseru a skenovacích rychlostí je shrnut v procesní mapě (Obr. 5.6). V oblastech I a II byla zvolena příliš velká energie, většina prášku se vypařila a komoru zahalil černý kouř, jenž se objevuje i při svařování hořčíkových slitin *(Sanders et al., 1999)*. V oblastech III, IV a V byla naopak zvolena nízká energie. Prášek se dostatečně nespojil a vzorky postrádaly mechanické vlastnosti. Až v oblastech A, B, C, D, VI a VII se vzorky vystavěly. V oblasti VI byly vzorky křehké. Naopak v oblasti VII se objevil „balling" efekt, jenž vedl ke zhrubnutí povrchu. Nejvhodněji se jevily vzorky A (20 J/mm^2), B (15 J/mm^2), C (10 J/mm^2), D (7,5 J/mm^2), které byly následně analyzovány. Ve výbrusech vzorků se objevují dva fenomény. Jedním je „balling" efekt. Druhým je výskyt nerovnoměrných zrn, která vznikla kvůli vypařováním hořčíku. Velikost zrn se nejčastěji pohybovala v rozsahu 10 – 20 µm. Relativní hustota vzorků však nepřekročila v nejlepším případě 85 % (Obr. 5.7).



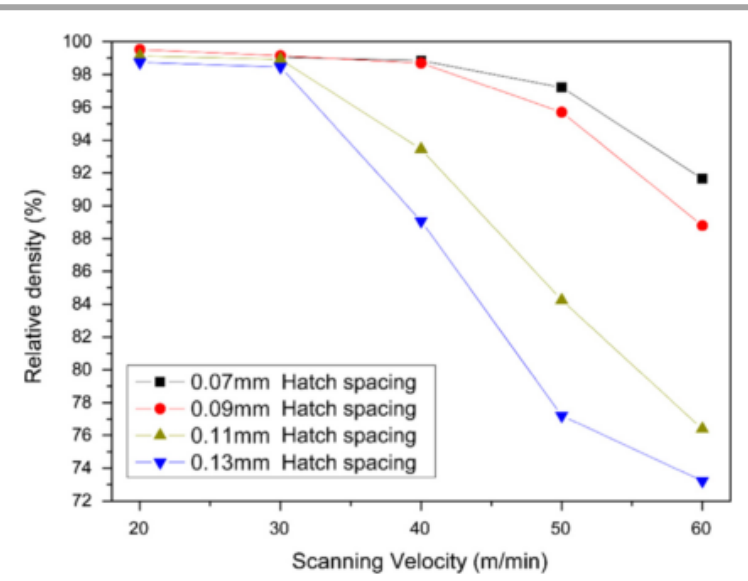
Obr. 5.6 Procesní mapa objemových vzorků Mg-9%Al *(Zhang et al., 2012)*

Wei et al., 2014 se zaměřili na výrobu tahových vzorků z hořčíkové slitiny AZ91D. Vzorky byly vyráběny pod argonovou atmosférou, která kontrolovala obsah kyslíku v komoře pod 0,05 %. Výkon laseru při výrobě byl zvolen 200 W, skenovací rychlosti byly v rozsahu 160 – 1000 mm/s, výška vrstvy 40 µm a vzdálenost návarů 70 – 130 µm. Experiment dokazuje, že dosažením energie vyšší než 214 J/mm^3 se prášek slitiny začíná vypařovat, což odfukuje prášek z nanesené vrstvy a vede ke kolapsu výrobního procesu. Naopak jako vhodné se jeví energie v rozmezí 83 – 167 J/mm^3, s čímž souhlasí i *Zhang et al., 2012*. V rozsahu energií 66 – 77 J/mm^3 se objevoval „balling" efekt. Snížením energie pod hodnotu 55 J/mm^3 vzorky ztratily mechanickou pevnost vlivem nedokonale roztaveného prášku. Hodnota relativní hustoty vzorků se kvůli širokému pásmu energií pohybovala ve velkém rozsahu

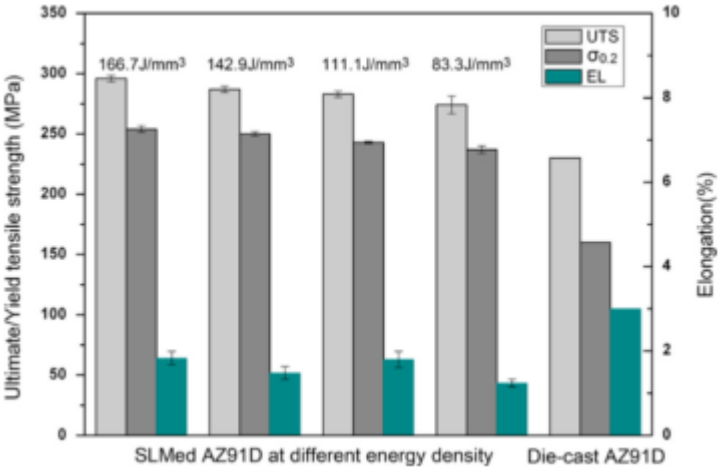
(Obr. 5.8). Díly vyrobené SLM procesem jsou obecně tvrdší, mají vyšší mechanickou pevnost než díly vyrobené konvenčním způsobem, ale jsou křehčí *(Shifeng et al., 2014)*. To koresponduje s autorovými výsledky (Obr. 5.9). Z trendu dat lze vysledovat, že se snižující se relativní hustotou vzorků se snižují i jejich mechanické vlastnosti. Kontrolována byla i hodnota mikrotvrdosti. Ta se shodovala v testu objemových vzorků s mikrotvrdostí vzorků tahových.



Obr. 5.7 Vliv plošné energie na relativní hustotu vzorků z Mg-9%Al *(Zhang et al., 2012)*

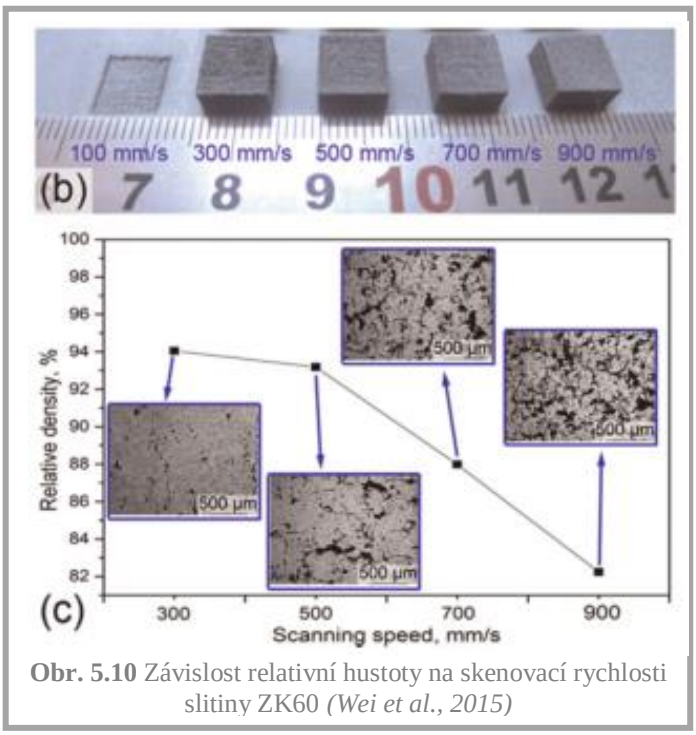


Obr. 5.8 Relativní hustota objemových vzorků ze slitiny AZ91D *(Wei et al., 2014)*



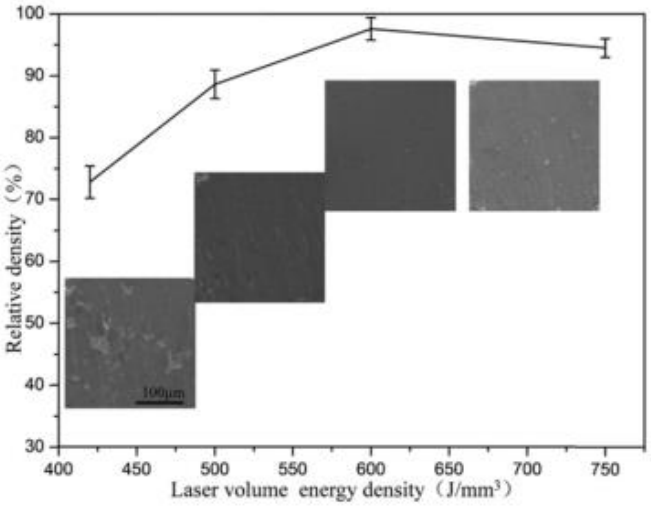
Obr. 5.9 Porovnání mechanické pevnosti a prodloužení SLM vzorků s konvenčním pro slitinu AZ91D *(Wei et al., 2014)*

Wei et al., 2015 přesunul pozornost na hořčíkovou slitinu ZK60. Konkrétně se zabýval vlivem vypařování částic prášku na složení, mikrostrukturu a mechanické vlastnosti vzorků. Experimenty byly prováděny s výkonem laseru 200 W, rozsahem skenovacích rychlostí 100 – 900 mm/s, tloušťkou vrstvy 20 µm a vzdáleností návarů 80 µm. Stavba vzorků probíhala v argonové atmosféře. Analýza vzorků odhalila trend klesání relativní hustoty se vzrůstající skenovací rychlosti vlivem nedostatečného tavení prášku (Obr. 5.10). Se vzrůstající skenovací rychlostí se však snižovalo vypařování prášku, což vedlo k vylepšení jakosti povrchu. Po stavbě bylo překontrolováno chemické složení dílů a poměr Mg:Zn byl vyšší, než jaký odpovídal chemickému složení prášku. Tento poměr byl nejspíše ovlivněn vyšší difuzivitou Zn a naopak vyšším vypařováním Mg. Tento poměr byl postupně snižován vzrůstající skenovací rychlostí.



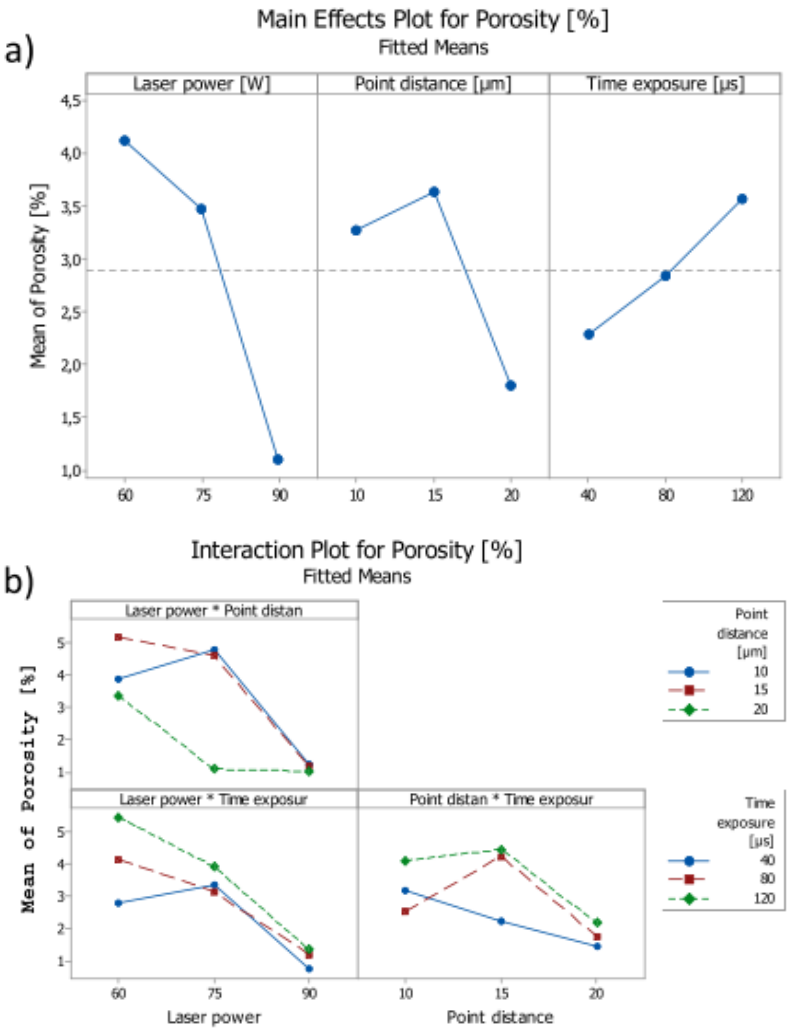
Obr. 5.10 Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti slitiny ZK60 *(Wei et al., 2015)*

Shuai et al., 2017 se zabýval do hloubky redukcí koroze slitiny ZK60 pomocí zpracování laserového tavení. Vycházel z poznatku, že snížením velikosti zrn se podstatně sníží koroze hořčíkových slitin *(Wang et al., 2008 and Alvarez-Lopez et al., 2010)*. Metodou laserového tavení lze dosáhnout jemné a homogenní mikrostruktur, jenž redukuje katodickou fázi a podstatně tak přispívá k redukci galvanické koroze. Tento předpoklad se potvrdil. Dále byla provedena analýza relativní hustoty objemových vzorků (Obr. 5.11.). Použitý výkon byl 50 W, rozsah skenovacích rychlostí 6,7 - 10 mm/s, vzdáleností návarů a šířkou vrstvy 10 µm. Nejvyšší hustoty bylo dosaženo s vysokou hustotou energie 600 J/mm^3 a to 97,4 %.

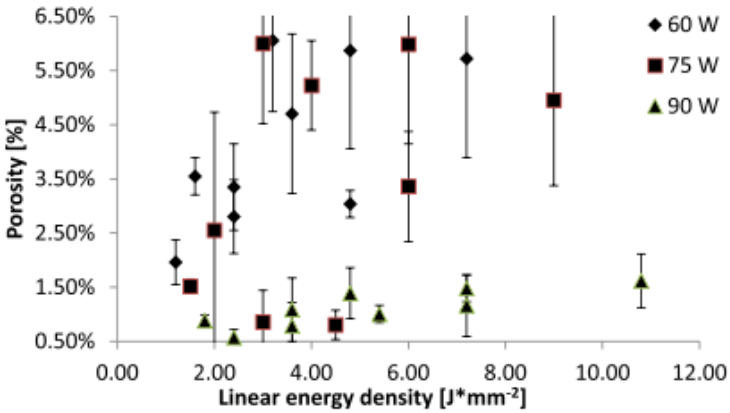


Obr. 5.11 Závislost relativní hustoty na objemové energii *(Shuai et al., 2017)*

Pawlak et al., 2017 se věnoval optimalizaci výrobního procesu hořčíkové slitiny AZ31. K optimalizaci využívá statistické analýzy vypracované v prostředí Minitab. Vyrobil 27 objemových vzorků o rozměrech 5 x 3 x 3 mm^3 pro validaci vlivu výkonu laseru, vzdálenosti návarů a výrobního času na jednu vrstvu. Vzorky byly stavěny s tloušťkou vrstvy 50 µm. Velikost částic prášku AZ31 byla v rozsahu 45 – 100 µm. Výrobní parametry sledoval samostatně i v kombinacích (Obr. 5.12). Výkon laseru 90 W vykazoval z měřených dat nejnižší porozitu, jelikož zpracování hořčíkových slitin vyžaduje obecně vyšší výkony laseru. Důvodem je obsah tvrdých oxidů a vysoké odrazivosti. Z výsledků závislosti porozity na lineární energii lze vyvodit, že vyšší lineární energie implikuje vyšší porozitu (Obr. 5.13). Zároveň však autor dodává, že hodnocení dle lineární energie není signifikantní, ale pouze orientační, jelikož při různých procesních parametrech (ale stejné lineární energii) lze dostat různé hodnoty porozity. Zvyšování lineární energie snížením skenovací rychlosti, vedlo ke zvýšení porozity vlivem vypařování. Klíčovým krokem v optimalizaci bylo navýšení výkonu laseru a následné ladění procesu manipulací se skenovací rychlostí. Analýza porozity pomocí počítačové tomografie (µCT) zpřesnila nalezenou hodnotu porozity, která nepřekročila 0,006 %. Nejnižší nalezená hodnota byla 0,001 %. Mikrostruktura objemových vzorků odhalila teplotní trhliny ve struktuře, které musejí být odstraněny externě.



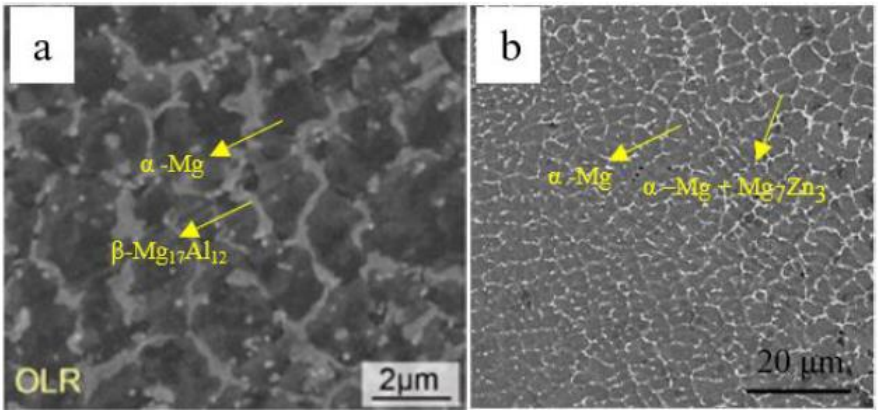
Obr. 5.12 Vliv procesních parametrů na povrchovou porozitu slitiny AZ31 *(Pawlak et al., 2017)*



Obr. 5.13 Vliv lineární energie na porozitu pro slitinu AZ31 *(Pawlak et al., 2017)*

5.2. Mikrostruktura hořčíkových slitin a mechanické vlastnosti

Kvůli velmi vysoké rychlosti tuhnutí taveniny během procesu SLM je výsledná mikrostruktura podstatně jemnější než v případě konvenčních výrobních metod *(Search et al., 2003)*. Jemnost mikrostruktury ovlivňují dva parametry. Jsou to tepelný gradient (R) a teplotní gradient (G). Poměrem G/R se řídí tvar a typ mikrostruktury. Naopak poměrem G x R se určuje celková velikost zrn ve struktuře *(Selcuk, 2011)*. Rozdílnými hodnotami G a R lze v zásadě dosáhnout tři hlavní morfologie zrn. Jednou jsou sloupcová (prodloužená) zrna, druhou sloupcově-rovnoosá a poslední rovnoosá (izotropní) *(Manakari et al., 2016)*. Vyšší rychlostí tuhnutí vznikají ze zrn prodloužených zrna rovnoosá *(Bontha et al., 2006)*, což vede na jemnější strukturu. Konvenčně odlévané hořčíkové slitiny se obvykle skládají z hrubé struktury α-Mg a lamelárního eutektických (α-Mg + intermetalických) fází s velikostí zrn 50 – 150 µm. Při SLM procesu se objevuje struktura založená převážně na α-Mg fázi s velikostí zrn 1 – 20 µm. Eutektikum se tu vyskytuje v samostatných fázích vyloučených podél hranic zrn (Obr. 5.14) *a (Shuai et al., 2017)*.

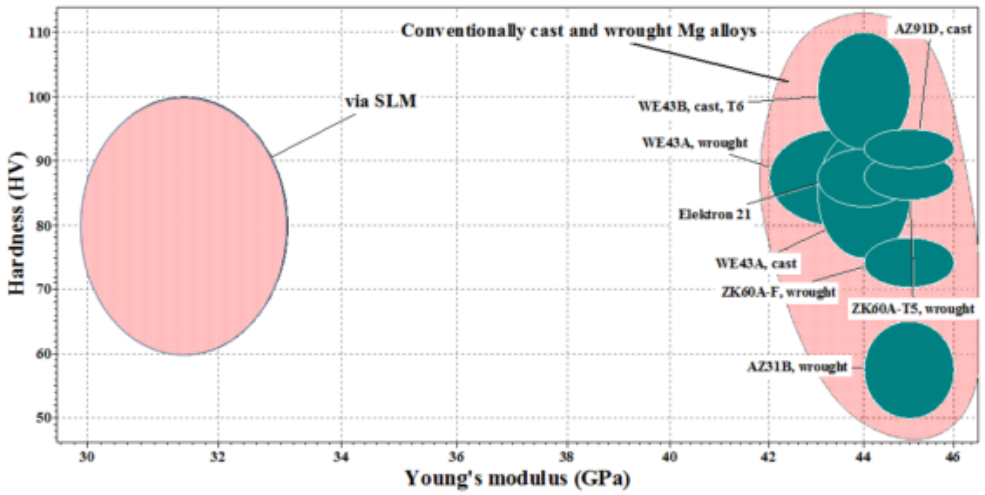


Obr. 5.14 Distribuce precipitátů okolo zrn při SLM procesu (a) slitiny AZ91D při 166,7 J/mm^3 *(Wei et al., 2014)* a (b) ZK60 při 600 J/mm^3 *(Shuai et al., 2017)*

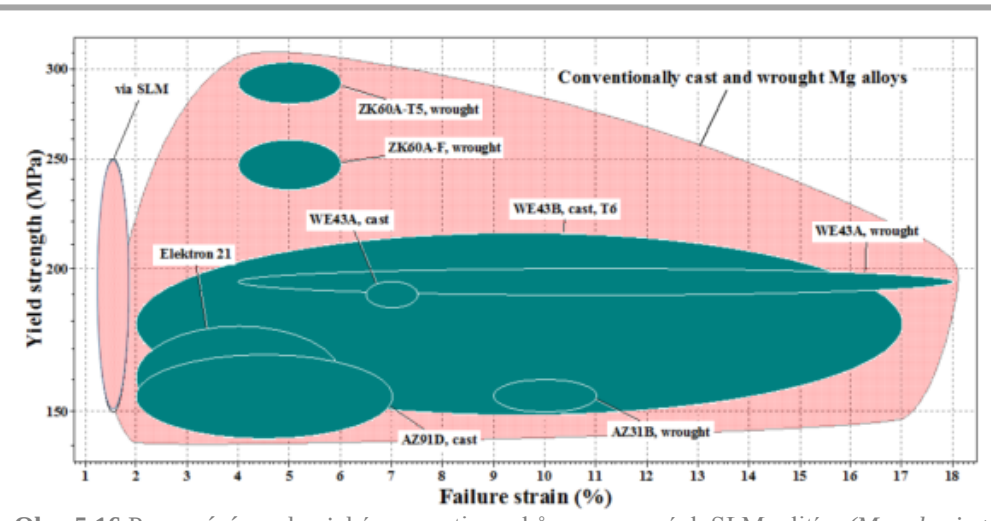
Pozorováním mikrostruktury optickým mikroskopem lze dohledat stopy jednotlivých návarů. Při vybroušení plochy rovnoběžné ke směru laserového záření je rozpoznatelná zvolená výrobní strategie, vzdálenost návarů a tloušťka vrstvy. Čitelná je i délka penetrace návaru. Ta by měla být alespoň taková, aby se přivařovaná vrstva spojila s vrstvou předchozí. Příliš velká penetrační hloubka vede k opětovnému přetavování materiálu, což hraje majoritní roli na výsledné mikrostruktuře *(Wei et al., 2014)*. Překrývání a opětovné přetavování návarů vede ke kumulaci tepla v materiálu a následnému hrubnutí zrna. Také rozdílná teplota tavného bazénku vede k rozdílné mikrostruktuře v řádech několika mikrometrů *(Wei et al., 2015)*. Velký vliv na výslednou mikrostrukturu mají také procesní parametry. Kombinací vyšší skenovací rychlosti a nižšího výkonu laseru je zrno jemnější kvůli vyšší ochlazovací rychlosti. Naopak zvýšením výkonu laseru a snížením skenovací rychlosti je dosaženo nižší ochlazovací rychlostí a tím hrubšího zrna.

U doposud vyrobených vzorků z hořčíkových slitin pomocí SLM bylo dosaženo tvrdosti podobné jako u konvenčně litých slitin (Obr. 5.15). Vždy záleželo na

procesních parametrech. Z procesu SLM se ve slitině často objevují zbytková napětí. Nemusejí však být vždy nevýhodou, pokud struktura neobsahuje vysoké procento porozity nebo trhlin, jelikož zvyšují tvrdost materiálu *(Mercelis and Kruth, 2006)*. Ke zvýšení tvrdosti SLM zpracovaných dílů přispívá i jemnější mikrostruktura. Využití pulzního módu laser přináší další navýšení tvrdosti díky dosažení jemnější mikrostruktury *(Ng et al., 2011)*. Porovnáním mechanické pevnosti obou stavů lze vyvodit, že díky SLM procesu lze dosáhnout vyšších hodnot *(Schleifenbaum et al., 2010; Shifeng et al., 2014)*. Doposud provedené testy s neodladěnými procesními parametry to potvrzují (Obr. 5.16). Zatím nevyšší meze pevnosti bylo dosaženo u slitiny AZ91D a to 296 MPa při hustotě energie 166,7 J/mm^3. Vzhledem k jemnější mikrostruktuře, neodladěnému výrobnímu procesu či mikroporozitě bývá pravidelně u 3D tisknutých dílů nižší schopnost prodloužení a únavové pevnosti. Díly vyrobené technologií SLM vykazují anizotropní chování a záleží tak na jejich způsobu výroby *(Riemer et al., 2014)*. Toto chování lze redukovat správně zvolenou strategií výroby, případně tepelným zpracováním dílu a to včetně hodnoty porozity *(Shamsaei et al., 2015)*.



Obr. 5.15 Porovnání některých mechanických vlastností vzorků zpracovaných SLM a litím *(Manakari et al., 2016)*



Obr. 5.16 Porovnání mechanické pevnosti vzorků zpracovaných SLM a litím *(Manakari et al., 2016)*

Slitiny hořčíku jsou obecně velmi náchylné ke korozi díky jejich vysoké chemické aktivitě a slabé ochranné vrstvě oxidů *(Song and Atrens, 2003; Atrens et al., 2013)*. Zároveň jsou hořčíkové slitiny silnou negativně nabitou elektrodou. Tyto nevýhody jsou jejich největší překážkou pro plnohodnotné nasazení v průmyslu a lékařství. Agresivní látky v lidském těle korozi hořčíkových slitin ještě umocňují a brání tak jejich nasazením jako lékařským implantátů *(Agarwal et al., 2016)*. Proto je věnována velká pozornost vylepšení korozních vlastností hořčíkových slitin. Dosažení rychlého způsobu tuhnutí laserem se ukazuje jako potenciální cesta, jak vylepšit odolnost slitin proti korozi *(Zhang et al., 2013)* vlivem modifikace, homogenizace a zjemnění struktury *(Guan et al., 2010; Singh and Harimkar, 2012)*. Tento postup byl úspěšně aplikován pomocí metody laser surface melting (LSM) na slitinách AZ31B, AZ91 a AM60 *(Taltavull et al., 2014; Cui et al., 2015; Liu et al., 2015)*. Na odolnost proti korozi mají samozřejmě vliv i legující prvky, které mohou její citlivost posouvat oběma směry *(Liu et al., 2016)*. U slitiny ZK60 se podařilo zvýšit odolnost proti korozi pomocí LSM až 80krát *(Gu et al., 2011)*. Vylepšení korozivzdorných vlastností pomocí LSM s SLM procesu však nebylo zpozorováno na slitinách jiného prvku. Kupříkladu zpracováním titanové slitiny Ti-6Al-4V pomocí SLM došlo naopak ke snížení odolnosti proti korozi *(Dai et al., 2016a; Dai et al., 2016b)*. Má se za to, že u ostatních prvků je mechanizmus koroze u laserem zpracovaných povrchů rozdílný od mechanizmu u hořčíkových slitin. Tato oblast však doposud není natolik prozkoumaná, aby v ní byly pevné závěry.

6. ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH

6.1. Procesní parametry

6.1.1. Vliv výkonu laseru

Jedná se o základní parametr, který se nastavuje primárně. Zpracování hořčíkových slitin vyžaduje vyšších výkonů laseru než kupříkladu oceli a to i přes to, že mají nižší teplotu tání. Je to z důvodu podstatně vyšší odrazivosti světla a tvorby tvrdých oxidačních vrstev, které je nutné rozbít pro roztavení materiálu. V rešeršní části je potvrzeno, že použitím vyššího výkonu laseru je dosahováno vyšší relativní hustoty vzorků *(Pawlak et al., 2017)*. Zpracování hořčíkových slitin vykazuje vysokou citlivost na použitý výkon laseru *(Chung Ng et al., 2011)*. Výkon laseru je však nutné volit i s ohledem na nízký výparný bod hořčíku (1091 °C). Přílišné navýšení výkonu laseru vede k vypařování hořčíku a tvorbě černé mlhy *(Zhang et al., 2012)*, jenž rozostřuje laserový svazek. Vypařený hořčík pak není přítomný v nanesené vrstvě, aby se spojil s předešlou vrstvou. V místě stavby se tedy objevuje kráter místo přibývajícího dílu *(Wei et al., 2015)*. Výkon laseru je volen individuálně pro každou hořčíkovou slitinu. Doposud však zvolený výkon u žádné slitiny nepřekročil 200 W.

6.1.2. Vliv skenovací rychlosti

Druhý nejdůležitější procesní parametr. Volba jejího rozsahu má přímý vliv na velikost tavného bazénku. Ten má rozdílnou teplotu vně a na okrajích *(Wei et al., 2015)*. Nízká skenovací rychlost vede k velkému hromadění energie v místě stavby a tím k nárůstu tavného bazénku. Přílišná velikost tavného bazénku vede k jeho nestabilitě vlivem rozdílných teplot a jeho následném rozstřiku *(Louvis et al., 2011)*. Rozstříknuté kapičky taveniny spékají prášek do koulí, což je vede k „balling“ efektu. Nízká skenovací rychlost prodlužuje také dobu odvodu tepla z tavného bazénku. To vede k hrubší mikrostruktuře a snížení pevnostních vlastností materiálu. Naopak volba vysokých skenovacích rychlostí přináší vlivem nižší akumulace tepla jemnější mikrostrukturu. Díky tomu lze dosáhnou lepších mechanických vlastností než při konvenčně používaných výrobních procesech *(Schleifenbaum et al., 2010; Shifeng et al., 2014)*. Zároveň její homogenizovaná, zpevněná struktura u hořčíkových slitin zvyšuje odolnost proti korozi *(Taltavull et al., 2014; Cui et al., 2015; Liu et al., 2015; Shuai et al., 2017)*. Navýšením odolnosti proti korozi se sníží přírůstek kyslíku v komoře během stavby. Snížením nárůstu kyslíku je zamezeno reakci kyslíku s taveninou a tím snížení porozity v objemu dílu *(Savalani and Pizarro, 2016)*. Posledním benefitem vysokých skenovacích rychlostí je vyšší rychlost stavby při komerčním využití technologie SLM v průmyslu. Ovšem navýšení skenovací rychlosti nad únosnou mez sníží energii v místě stavby a což vede k nestabilitě tavného bazénku a „balling“ efektu *(Louvis et al., 2011)*. V případě dalšího navyšování skenovací rychlosti prášek není dostatečně roztaven a proces stavby není možný. U hořčíkových slitin se objevuje ještě jeden fenomén. Jelikož je hořčíkový prášek velmi lehký (1760 kg/m^3) je při příliš vysoké skenovací rychlost zvedán do prostoru komory, kde následně reaguje se zbytky kyslíku *(Hu et al., 2015)*. Tímto způsobem se jednak odnáší prášek z místa stavby a zároveň mlha

prášku rozostřuje laser. Zkoumané rychlosti byly do 1000 mm/s avšak s relativně nízkým výkonem.

6.1.3. Vliv vzdálenost návarů

Volí se na základě testu návarů. Standardně se volí tak, aby překryv návarů byl v rozmezí 20 – 50 % jejich šířky. Překryv vede k přetavování návarů a kumulaci energie v materiálu. To ve správné míře může přispívat k zahlazení menších pórů a defektů ve struktuře. Příliš velký překryv je ale iniciátorem staženin vlivem přehřátého objemu a rychlého chladnutí povrchu dílu. Kumulace tepla v materiálu snižuje jeho rychlost chladnutí a vede k hrubnutí zrna. Navíc menší překryv urychluje výrobní proces a tím snižuje náklady. V doposud zkoumaných slitinách se vzdálenost návarů pohybovala okolo hodnoty 100 µm. Je však závislá na zvolené šířce vrstvy, výkonem laseru a skenovací rychlostí.

6.1.4. Vliv šířka vrstvy

Velikost šířky vrstvy se volí dle distribuce částic prášku. Standardně se volí v rozmezí 20 – 100 µm. Menší šířka vrstvy vyžaduje jemnější distribuci částic. Čím jsou částice prášku drobnější, tím jsou reaktivnější. Navíc jsou příliš malé částice vlivem Wan der Waalsovy síly přitahovány k sobě. To nepříznivě ovlivňuje nanesenou vrstvu, jelikož částice prášku po sobě navzájem šplhají a tvoří shluky. Benefit nízké šířky vrstvy je ve zvýšení relativní hustotu vyráběného dílu *(Savalani et al., 2012)*. U hořčíkových slitin navíc menší šířka vrstvy generuje během stavby méně kyslíku, jelikož je taveno méně materiálu *(Savalani and Pizarro, 2016)*. Vyšší šířka nanesené vrstvy zrychluje stavbu. Limitem pro šířku nanesené vrstvy je výkon laseru, který má vrstvu prášku roztavit, a distribuce prášku. Navíc větší množství naneseného prášku vede k produkci větších návarů a tím možnosti navýšit i jejich vzdálenost *(Savalani and Pizarro, 2016)*.

6.1.5. Vliv hustoty energie

Pro roztavení materiálu je nutné dodat do něj určité množství energie pro daný objem. Tuto hodnotu udává právě hustota energie. Vypočítá se pomocí energetické rovnice, jenž zahrnuje všechny výše uvedené procesní parametry. Nalezením vhodné hladiny hustoty energie je základním krokem v naladění výrobního procesu. Zafixováním hustoty energie na určité hodnotě se omezí volba procesních parametrů do určitých mezí. Prozkoumáním těchto mezí lze popsat trend změny na výrobní proces a nastavit tak parametr na správnou hodnotu. Hustota energie může být plošná a objemová. Plošná energie se používá k prvotní rozvaze při testu návarů. Slouží ale pouze jako orientační hodnota, jelikož nepodává informaci o chování při výrobě objemového vzorku *(Pawlak et al., 2017)*. Může se tedy stát, že při dosažení stejné energie ale různých procesních parametrech je výsledek signifikantně rozdílný. Rozdíl tepelné energie v dílu může vést k teplotním trhlinám a dalším defektům v mikrostruktuře *(Pawlak et al., 2017)*. Předehřevem výrobního prostoru na vyšší teplotu může vést k eliminaci těchto teplotních rozdílů a tím snížení počtu defektů ve slitině *(Savalani and Pizarro, 2016)*. U hořčíkových slitin je však třeba dát pozor na kritickou hodnotu teploty, při které se rapidně zvýší rychlost koroze slitiny *(Czerwinski, 2002)*. Tato kritická hodnota se nachází někde v rozmezí 200 – 400 °C. Hodnota hustoty energie u hořčíkových slitin se pohybuje v širokém rozmezí podle

zpracovávané slitiny. Obecně má však pozitivní vliv na relativní hustotu volba vyšších energií. Ty se pohybují v blízkosti 167 J/mm^3.

6.1.6. Přehled procesních parametrů pro hořčík a jeho slitiny

Technologií SLM byly doposud vyrobeny z hořčíku a jeho slitin pouze menší objemové vzorky. Na těchto vzorcích byl zkoumán vliv procesních parametrů na výslednou relativní hustotu, případně na mikrostrukturu. Na výrobu vzorků byly pro jednotlivé slitiny použity rozdílné procesní parametry (Tab. 6.1), což mělo dopad na jejich mechanické vlastnosti (Obr. 5.15, Obr. 5.16). Z přehledu procesních parametrů je vidět snaha využívat vyšších energií, kterých je dosahováno převážně malou šířkou nanesené vrstvy a nižší volbou skenovací rychlosti. Výkon laseru je volen v menších hodnotách z důvodu vypařování prášku.

Tab. 6.1 Přehled procesních parametrů hořčíkových slitin pro metodu SLM, *čas pro tvorbu jedné vrstvy *(Manakari et al., 2016)*

Materiál	Výkon laseru [W]	Skenovací rychlost [mm/s]	Vzdálenost návarů [µm]	Šířka vrstvy [µm]	Hustota energie [J/mm^3]	Relativní hustota [%]
Mg	15 – 150	50 – 100	100	30	50 – 1000	95
Mg-9%Al	10 – 110	10 – 1000	80	50	27 – 250	85
AZ91D	200	160 – 1000	70 – 130	40	38 – 446	99,7
ZK60	50 200	6,7 – 10 100 - 900	80 80	10 20	400 – 750 139 – 1250	97,4 94
AZ31	60 – 90	*40 s	10 – 20	50	x	99,5

Procesní parametry se budou s největší pravděpodobností nacházet v těchto oblastech:

- Hustota energie se bude nejspíše nacházet v rozmezí 83 – 167 J/mm^3 *(Zhang et al., 2012;Wei et al., 2014)*
- Výkon laseru okolo hodnoty 200 W *(Wei et al., 2014; Wei et al., 2015)*
- Skenovací rychlosti okolo hodnoty 300 mm/s *(Wei et al., 2014; Wei et al., 2015)*
- Šířka návarů 80 – 100 µm *(Zhang et al., 2012;Wei et al., 2014; Wei et al., 2015)*
- Šířka nanesené vrstvy v rozmezí 20 – 50 µm *(Chung Ng et al., 2011; Zhang et al., 2012; Wei et al., 2014; Pawlak et al., 2017)*.

6.2.Fenomény při výrobě

V průběhu SLM procesu se lze setkat u hořčíkových slitin s výrazným množstvím černého kouře. Tento kouř má základ ve dvou jevech. Prvním z nich je rozptýlení hořčíkového prášku v prostoru výrobní komory *(Hu et al., 2015)*. To je možné díky jeho velmi nízké hustotě a volbě vysoké skenovací rychlosti. Místo tavby pak nejen

hladoví po materiálu, ale do prostoru komory je zvedána mlha tvořena částicemi prášku hořčíkové slitiny. Rozptýlený prášek rozostřuje zacílení laseru, čímž nepříznivě ovlivňuje výrobní proces. Zároveň ve výrobní komoře reaguje se zbytkovým kyslíkem za vzniku MgO, jenž vypadá jako černý kouř. Nepřekročením kritické hodnoty skenovací rychlosti lze tomuto zvedání zabránit. Dalším možným opatřením může být předehřátí výrobního prostoru. To může vést k natavení částic prášku k sobě a základové desce, čímž by jim byl zabráněn vzlet do prostoru komory. Teplotou předehřevu však nesmí být překročena hodnota, při které se urychluje koroze hořčíkových slitin. Dalším důvodem černého kouře je vypařování prášku hořčíkových slitin *(Zhang et al., 2012)*. Díky nízkému výparnému bodu hořčíku (1091 °C) je snadné jeho prášek vypařit přivedením laserového svazku o vysokém výkonu. Vypařený prášek má také vzhled černého dýmu. Vypaří-li se prášek z nanesené vrstvy, vznikne v ní výduť, která se s každým dalším opakováním prohlubuje. V místě stavby tak vzniká postupně kráter místo vrstvení vyráběného dílu *(Wei et al., 2015)*.

Hořčík a jeho slitiny podléhají značné korozi, která se ještě urychluje za zvýšených teplot *(Czerwinski, 2002)*. Nízká odolnost vůči korozi je způsobena vysokou afinitou hořčíku ke kyslíku a velmi tenkou ochrannou oxidační vrstvou. Zvýšením teploty nad určitou hodnotu je z defektů, nehomogenit a hranic zrn uvolňován kyslík navázaný na hořčík. Vyvěrání kyslíku ze struktury kovu na povrch vede k odlamování tenké ochranné oxidační vrstvy *(Czerwinski, 2002)*. Odhaluje se tak proti korozi nechráněný prostor, který ihned reaguje s uvolněným kyslíkem. Proces koroze je tak výrazně urychlen. Tento proces zároveň vede k uvolňování kyslíku do okolní atmosféry. Při procesu SLM je bodově zoxidovaný hořčíkový materiál zahřát a roztaven, čímž se kyslík uvolní. Během procesu výroby je vyžadováno držet hladinu kyslíku pod 0,2 %. Větší obsah kyslíku ve výrobní atmosféře může vést k reakci s hořčíkem, případně až k hoření během výroby. Z toho důvodu je nutné generovaný kyslík odvádět silným proudem argonové atmosféry. Na generování kyslíku měla přímý vliv šířka nanesené vrstvy. Čím menší vrstva byla, tím více kyslíku se do okolní atmosféry uvolnilo *(Savalani and Pizarro, 2016)*.

Proces zpracování hořčíkových slitin metodou SLM je velmi závislý na vstupní energii. Obecně její vyšší hodnoty vedou k dosažení vyšší relativní hustoty avšak pouze do určitého stupně. Během procesu stavby se objevuje „balling“ efekt *(Hu et al., 2015; Zhang et al., 2012; Wei et al., 2014)*. Jedná se o sbalování materiálu do kuliček místo toho, aby se rolně spojil s předchozí vrstvou. Dochází k němu vlivem povrchového napětí a snahy zaujmout energeticky nejméně náročný tvar – kouli. „Balling“ efekt se objevuje při dosažení příliš velkého (nestabilního) tavného bazénku vlivem vysoké hustoty energie. Nekontrolovatelný tavný bazének se rozstřikuje a kapky taveniny se následně na nesené vrstvě balí do kuliček. Druhý způsob dosažení „balling“ efektu je navýšení skenovací rychlosti na příliš velkou hodnotu. Vlivem nedostatečné energie nedochází ke spojení roztaveného prášku s předchozí vrstvou a roztavený materiál se pouze sbalí do kuliček. Nevhodně zvolená hustota energie, zbytečné přetavování vrstev a kumulace tepla v materiálu může vést až ke vzniku staženin a teplotních trhlin v jeho struktuře *(Pawlak et al., 2017)*. To lze částečně kompenzovat předehřevem výrobního prostoru. Předehřevem je snížen teplotní gradient v díle a lze tak předcházet jeho teplotním šokům.

6.3.Definice problému

Z prostudovaných prací vyplívá, že doposud dělané testy byly zaměřeny na testy návarů a tvorbu menších objemových vzorků. V obou případech byl zkoumán jejich tvar a relativní hustota. Občas byly výsledky doplněny o informace o tvrdosti, či mechanické pevnosti vzorků. Doposud ale chybí záznam vývoje relativní hustoty a mikrostruktury v závislosti na vstupních parametrech. Z doposud publikovaných výsledků tedy nevyplývá, že byl výrobní proces optimalizován. Navíc testy, které byly doposud udělány, se zaměřovaly na nízké skenovací rychlosti, které jsou z průmyslového hlediska nevyužitelné, kvůli příliš vysokým výrobním nákladům. Zároveň nebyly nikdy z hořčíkových slitin vyrobeny větší díly než malé kostkové vzorky do 20 mm. Práce se tedy bude zabývat popsáním vlivu procesních parametrů na výslednou mikrostrukturu se snahou dosáhnout co nejvyšších mechanických vlastností.

7

7. PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

Podstata
Podstatou práce je umožnit zpracovávat slitiny hořčíku pomocí 3D tisku kovů pro průmyslové aplikace a popsat způsob výroby a řešení problémů s ním souvisejícím tak, aby mohl každý tento výrobní postup použít a aplikovat pro danou třídu laserů.

Hlavní cíl
Hlavním cílem práce bude odladit výrobní proces hořčíkových slitin pro třídu laserů Ng-YAG s ohledem na dosažení co nejvyšších mechanických a únavových vlastností.

Dílčí cíle

- Odhalení vlivu hlavních procesních parametrů na stabilitu výrobního procesu
- Naladit výrobní proces pro vyšší skenovací rychlosti
- Popis mikrostruktur vznikajících při různých nastaveních laseru
- Nalezení mikrostruktury vhodné pro vysoké mechanické vlastnosti

Přínos práce
V oblasti zpracovatelnosti hořčíkových slitin pomocí metody SLM bylo zatím publikováno poměrně malé množství testů. Mnoho z nich se týkalo pouze testu návarů a jen málo se věnovalo popsání objemových vzorků. Z doposud publikovaných výsledků vyplývá, že výrobní proces doposud nebyl optimalizován a obsahuje mnoho nevyřešených problémů. Hlavním přínosem této experimentální práce bude umožnit zpracovávat další materiálovou rodinu metodou SLM. Díky rozšířenému poznání o zpracovatelnosti hořčíkových slitin bude možné vyhovět náročnějším požadavkům (biodegradibilita tělních náhrad, nízká hmotnost strojírenských dílů, redukce chvění leteckých a vesmírných konstrukcí…) a to ve spojení s výhodami, které poskytují aditivní technologie (tvarová volnost, vyšší mechanické vlastnosti…). Cíle práce bude dosaženo vypracováním a vyhodnocením testů návarů a objemových vzorků, kdy bude popsán vliv hlavních procesních parametrů na výrobní proces. Bude zaznamenán jejich vliv na relativní hustotu, mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Dále bude nalezena nejvhodnější strategie stavby a tepelné zpracování pro dosažení co nejvyšších mechanických vlastností, což je žádoucí pro strojírenské aplikace. Popsáním vlivu procesních parametrů a tepelného zpracování na strukturu materiálu bude možné pružně měnit výrobní proces dle požadavků na výsledné mechanické vlastnosti. Bude tak možné produkovat díly volných tvarů s širokou škálou mechanických vlastností, které bude možné upravovat s ohledem na aplikaci dílu v praxi.

8. VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

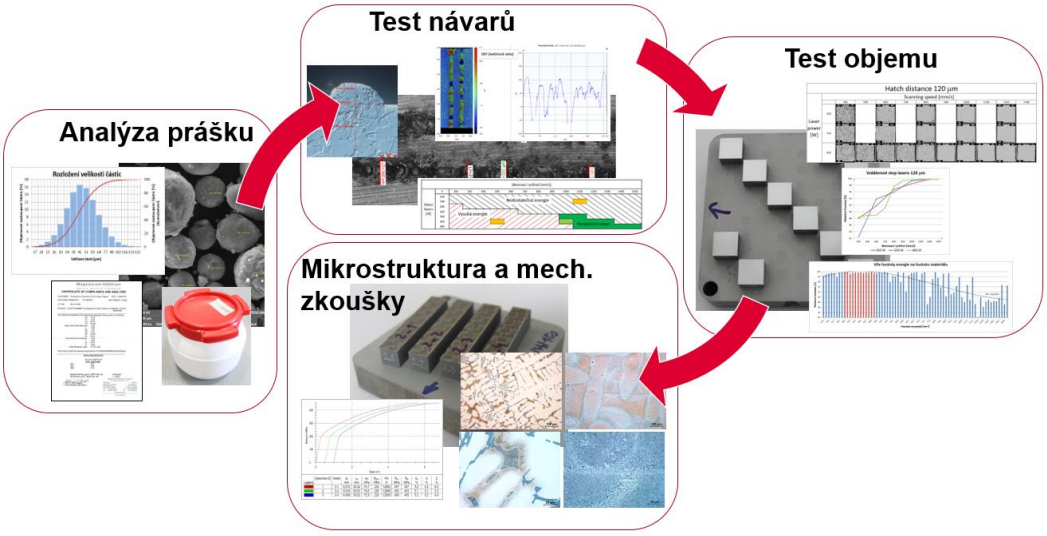
Vědecká otázka:
„Jakou kombinací hlavních procesních parametrů lze dosáhnout stabilního procesu výroby a zároveň vyšších mechanických vlastností, než při konvenčních způsobech výroby dílů z hořčíkových slitin?“

Hypotéza:
„Zvolená kombinace procesních parametrů leží někde v rozsahu hustoty energie 83 – 167 J/mm^3 a zvolená skenovací rychlost a vzdálenost mezi jednotlivými návary musí být nejvyšší, jakou stabilita procesu snese.“

Proces tisku může být stabilní při mnoha kombinacích parametrů, to je vidět z výsledků autorů zabývajících se zpracovatelností materiálů pomocí SLM *(Hu et al., 2015 a Shuai et al., 2017)*. Lze tedy nastavit stabilní proces jak s nízkými výkony a skenovacími rychlostmi, tak i s vysokými. Nutné je však dodržet hodnotu hustotu energie, která je v při nízkých i vysokých hodnotách procesních parametrů stejná. Nejlepších doposud publikovaných výsledků u hořčíkových slitin bylo dosaženo s energiemi 83 – 167 J/mm^3 *(Zhang et al., 2012 a Wei et al., 2014)*. Mikrostruktura materiálu je v případě použití metody SLM podstatně jemnější než u konvenčních výrobních metod *(Search et al., 2003)*. Navíc, čím vyšší je skenovací rychlost, tím je proces roztavení a tuhnutí prášku rychlejší a vzniká tak jemnější mikrostruktura *(Bontha et al., 2006)*. Ta má přímý vliv na mechanické vlastnosti. Čím je mikrostruktura jemnější, tím je dosahováno vyšší mechanické pevnosti *(Schleifenbaum et al., 2010; Shifeng et al., 2014)*. Dalším faktorem, který ovlivňuje velikost zrn v materiálu je opakované přetavování jednotlivých vrstev dílu. Díky přetavování vrstev se v dílu udržuje tepelná energie, která zpomaluje proces tuhnutí a zvětšuje tak velikost zrn. Z toho důvodu je nutné nevrstvit jednotlivé návary zbytečně blízko k sobě ale pouze tak, aby byl proces výroby ještě stabilní.

9

9. ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ

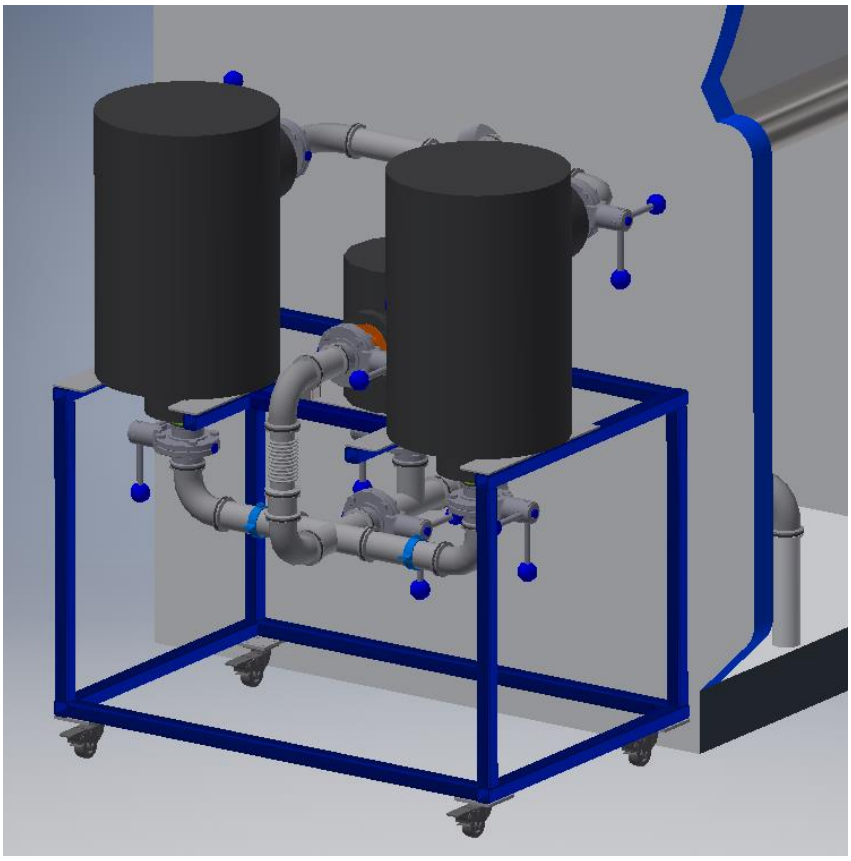


Obr. 9.1 Blokové schéma metodiky řešení práce

9.1. Přestavba stroje

Z důvodu generace oblaku spalin a vzletu zaoxidovaného prášku z nanesené vrstvy je nutné upravit zařízení SLM 280^{HL}, na kterém budou testy prováděny. Nutné bude sestrojit novou filtrační jednotku pro lepší filtraci jemného prášku hořčíkových slitin (Obr. 9.2). Tato jednotka bude vybavena vícestupňovou filtrací s možností odstavení jednotlivých filtrů i během procesu výroby. Reaktivnost hořčíkových slitin může vést až ke vzplanutí papírových filtrů. Mít možnost takový filtr uzavřít, udusit a nepustit vytvořené spaliny do okruhu s inertní atmosférou bez přerušení stavby může být důležitým benefitem. Kvalitnější filtrace spalin z výrobní komory také pomůže zvýšit životnost zařazené pumpy inertní atmosféry.

Z důvodu generace kyslíku bude do oběhu inertní atmosféry zařazena druhá výkonnější pumpa, která bude odsávat inertní atmosféru z komory. To urychlí odtok generovaného kyslíku z místa stavby a nenechá ho vystoupat do prostoru komory. Zařazením druhé pumpy bude navíc usměrněn tok spalin z komory a nebudou se rozptylovat v komoře. Díky tomu by bylo možné využívat vyšší skenovací rychlosti a snížit tak vysoké výrobní náklady na hořčíkové slitiny. V případě nutnosti lze také upravit vstup a výstup inertní atmosféry pro ještě větší usměrnění toku spalin a odvodu kyslíku.

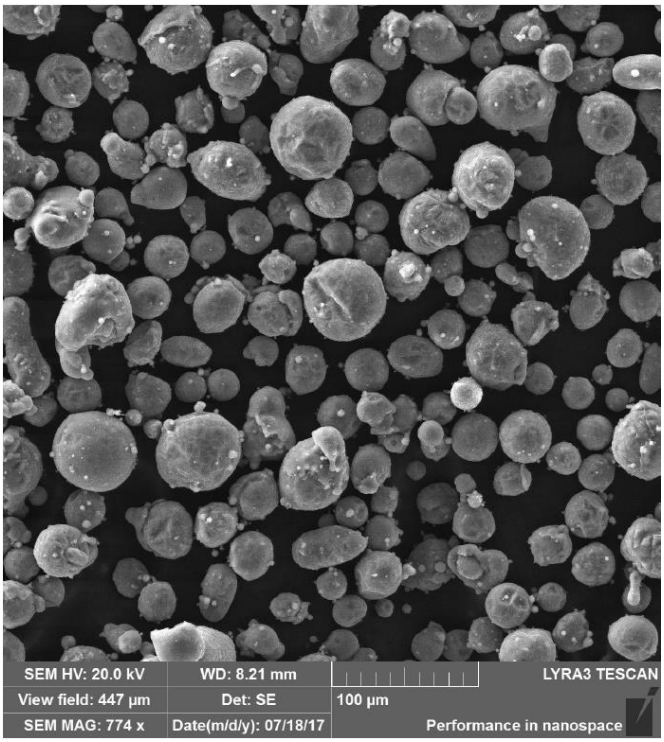


Obr. 9.2 Sestrojená vícestupňová filtrační jednotka

Pokud silnější a usměrněnější průtok inertní atmosféry nebude schopen kyslík z výrobního procesu odvádět, bude nutné vyvinout kyslíkový filtr pro zařízení SLM 280^{HL}. Ten by měl fungovat na chemické bázi. Ve filtru bude obsažen prvek, jenž bude mít ke kyslíku vysokou afinitu a v případě průletu kyslíkových molekul tímto filtrem, by se na něj navázaly. Zanesený filtr by se pak jednoduše vyměnil za jiný.

9.2. Analýza prášku

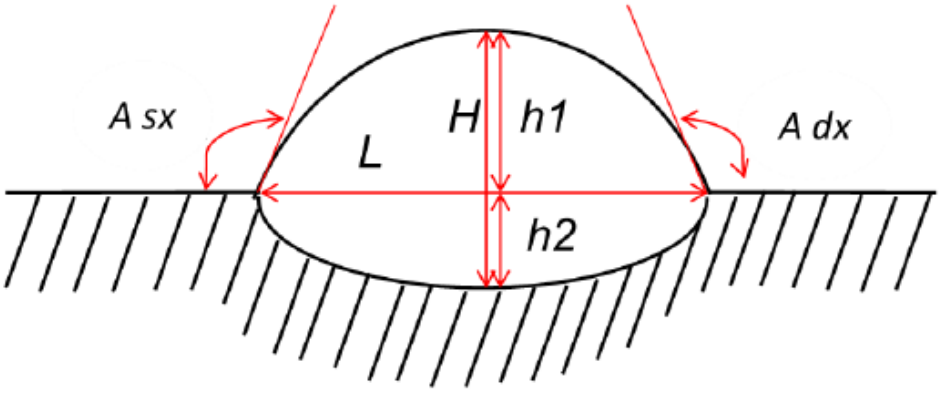
Signifikantní vliv na výrobní proces má i prášek, který je technologií selektivního laserového tavení zpracováván. Je nutné validovat distribuci prášku, jeho tvar a chemické složení. Distribuce prášku bude validována pomocí laserového analyzátoru Horiba LA-960. Tvar částic bude sledován a hodnocen pomocí elektronového mikroskopu Zeiss Ultra-Plus (SEM). Tvar částic by měl být povětšinou kulový (Obr. 9.3). Chemické složení prášku je nutné kontrolovat, jelikož materiálová norma umožňuje rozptyl některých hlavních legur i více než procento. To při zpracování prášku metodou SLM může mít značný vliv. Chemické složení prášku bude kontrolováno pomocí ICP metody. Podle zjištěné distribuce částic je zvolena nanášená vrstva. Navýšit výrobní vrstvu není problém. Pokud by však měla být snižována, tak je nutné příliš velké částice z prášku odstranit. Velké částice se z prášku nejčastěji odstraňují přesíváním na jemných sítech za přítomnosti inertní atmosféry.



Obr. 9.3 Morfologie prášku hořčíkové slitiny WE43 s distribucí 20 – 63 µm

9.3. Test návarů

Výroba vzorků bude probíhat na zařízení SLM 280^{HL} v1.0 s dodatečnými úpravami (viz. přestavba stroje). Zařízení využívá Ng-YAG laser se zaostřením na 82 µm s Gaussovým profilem. Vlnová délka laseru je 1060 nm. Inertní atmosférou při testech bude zajišťovat konstantní průtok argonu pro udržení přítomnosti kyslíku pod hodnotu 0,2 %. Test bude probíhat za konstantní nanesené vrstvy, která je stanovena na základě analýzy prášku. Pomocí tohoto testu budou vyrobeny jednotlivé návary při různých procesních parametrech. Pro zvolené procesní parametry budou



Obr. 9.4 Zkoumaná geometrie návaru *(Kempen and L. Thijs , E. Yasa, M. Badrossamay, W. Verheecke and J.-P. Kruth, 2011)*

vytvořeny vždy dva návary – jeden ve směru průtoku inertní atmosféry, druhý proti směru. Návary jsou následně analyzovány. Bude na nich zkoumána jejich hloubka, šířka, výška a úhel vůči základové desce (Obr. 9.4). Zkoumáním dvou stejných návarů v různých směrech toku inertní atmosféry lze zjistit stabilitu návaru. V případě velkých odchylek na obou návarech se nejedná o stabilní procesní parametry a nemůže s nimi být zajištěna opakovatelnost výroby. Hloubka návaru by měla být taková, aby spojila nanesenou vrstvu s vrstvou předchozí. Úhel návaru se základovou deskou musí být tupý a výška co největší z důvodu rychlosti stavby. Podle šířky návaru lze nastavit hodnotu vzdálenosti návarů při stavbě, kdy by jejich překryv neměl překročit 50 %. Dle tvaru návarů lze i zjistit prvotní informaci o zvolených výkonech a skenovacích rychlostech.
Dále bude proveden test návarů se šikmě nanesenou vrstvou. Výkon laseru a skenovací rychlost bude zvolena podle nejslibnějšího vzorku z předchozího testu návarů s konstantní šířku nanesené vrstvy. Díky tomu lze sledovat vliv výšky šířky na geometrii návarů a je tak možné optimalizovat její šířku a případně upravit distribuci prášku.
Test návarů dává první informaci o zvolených procesních parametrech. Při výrobě návarů ale nedochází ke kumulaci energie vlivem přetavování návaru. Ta povede jak ke změně vnitřní struktury návarů, tak ke změně jejich geometrie. Proto je test návarů pouze orientační. Mezistupněm mezi testem návarů a objemových vzorků je test tenkých stěn. Při tomto testu jsou návary při zvolených procesních parametrech navařovány postupně na sebe až do určité výšky. Tímto způsobem je možné sledovat jeden návar, který je vystaven procesu přetavování a podává tak reálnější informaci o své geometrii během procesu stavby. Na základě takto korelované geometrie je pak volena vzdálenost návarů při stavbě objemových dílů.
Geometrie návarů bude vyhodnocována z výbrusů a pomocí elektronového mikroskopu GX 51. Výškový profil návaru bude kontrolován z výbrusu a pomocí profilometru ConturGT-X. Aby při tvorbě výbrusu v řezu návaru nemusela být rozřezána základová deska, byla na ní provedena úprava (Obr. 9.5). V desce jsou vyfrézovány tři drážky, do kterých lze vsadit ližiny z různých materiálů. Každá ližina je k desce přišroubovaná třemi šrouby M4, aby nedošlo k jejímu posunutí, či uvolnění. Návary vyrobené na ližiny bude pak možno snadno vyjmout a rozřezat pro další zkoumání.

Obr. 9.5 Upravená deska s ližinami pro výrobu návarů

9.4. Test objemových vzorků

Výroba vzorků probíhala s použitím stejného vybavení jako v testu návarů. Z testu návarů je známá šířka vrstvy, vzdálenost mezi návary a ze sestavených procesních map jsou známy i oblasti, kde se proces zdá stabilní při zvolené skenovací rychlosti a výkonu laseru. Test objemových vzorků bude mít za úkol zpřesnit parametry právě z těchto slibných oblastí. Kvalitu nastavení procesních parametrů je možné validovat podle procenta porozity ve vyrobených vzorcích. Se snižující se porozitou se proces výroby stává stabilnějším a zvolené procesní parametry vhodnější. Velikost prvních objemových vzorků bude 8 x 8 x 10 mm. Cílem bude vzorky postupně zvětšovat, čímž se v nich bude měnit rozložení tepelné energie. V důsledku toho se bude snižovat jejich relativní hustota ať již v důsledku přehřátí, či nedostatku energie. Zvětšeným vzorkům bude nutné přizpůsobit procesní parametry. Tímto iterativním způsobem budou postupně zpracovány i vzorky velikosti 13 x 13 x 10 mm a obdélníkové vzorky 30 x 20 x 10 mm. Porozita ve vzorcích je validována obrazovou analýzou, kdy jsou kontrovány rozdíly mezi černými a bílými pixely na fotografii.. Ta bude pořízena elektronovým mikroskopem Zeiss Ultra-Plus (SEM) z výbrusu vzorků. Jako analyzační nástroj bude použit program ImageJ Tato plošná porozita bude pak porovnávána s hodnotou objemové porozity, která bude získána pomocí počítačové tomografie (μCT). Jelikož je na povrchu vzorků jiný odvod tepla než v objemu vzorku, bude třeba volit jiné procesní parametry pro kontury a objem. Vhodnost procesních parametrů pro kontury bude hodnocena podle kvality povrchu. Jeho jakost bude měřena na profilometru ConturGT-X. Při optimalizaci parametrů bude zvolen podobný iterativní postup jako v případě ladění objemových parametrů.
Při zpracovávání obdélníkových vzorků 30 x 20 x 10 mm již bude nutné nastavit skenovací strategii pro rovnoměrné přivádění energie do vzorku. Zkoumaná strategie bude „meander“, „chessboard“ a „hull nad core“. Při strategiích je nutné volit úhel natočení a posunutí každé další vrstvy. Zároveň je volen i velikost a orientace kroku každé strategie. Pro udržení stejnoměrnější tepelné energie ve vzorcích je možné základovou desku předehřát na určitou teplotu. Předehřev by měl zabránit vzniku teplotních trhlin a porozity. Budou tedy provedeny testy za zvýšených teplot a bude popsán jejich vliv na porozitu, mikrostrukturu a mechanické vlastnosti vzorků.
Na vzorcích, jenž budou obsahovat minimální množství porozity a budou tak mít predispozici nutnou k dobrým mechanickým vlastnostem, bude následně vyhotovena metalografická analýza. Nízké porozity lze dosáhnout s různými procesními parametry a jejich změna přímo ovlivňuje strukturu materiálu, která je rozdílná od kupříkladu litých nebo kovaných struktur. Jelikož rozdílná mikrostruktura vede k rozdílným mechanickým vlastnostem, je nutné tuto změnu popsat a analyzovat. Popisem mikrostruktury budou predikovány struktury, které budou mít potenciál na vysoké hodnoty mechanických vlastností. S procesními parametry, kterými bude dosaženo těchto struktur, budou následně vystavěny vzorky pro mechanické testování.

9.5. Tahové a únavové zkoušky

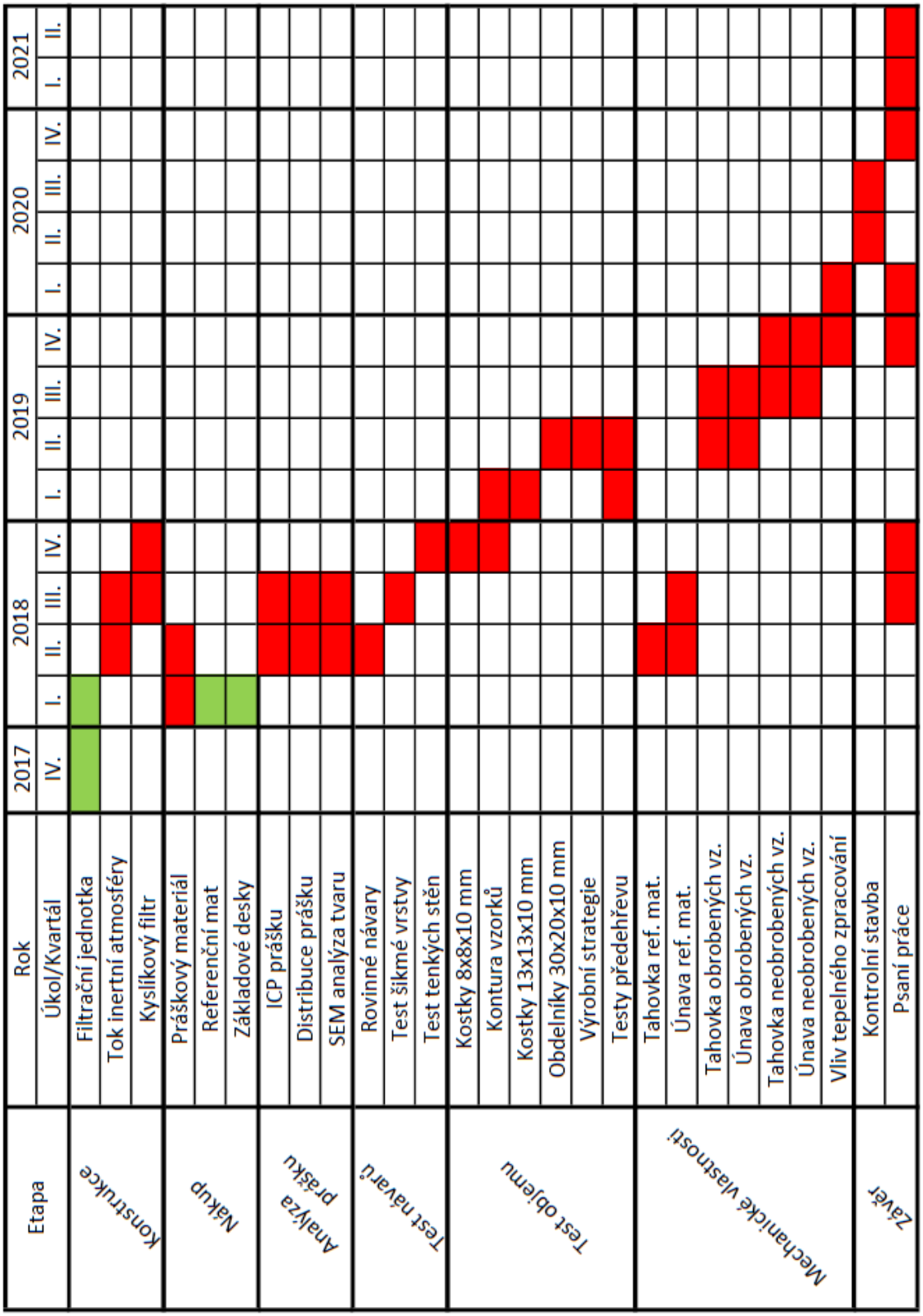
Důležitým faktorem při zpracování materiálu 3D tiskem kovu jsou výsledné mechanické vlastnosti vyrobeného dílu. Mechanické zkoušky budou provedeny nejdříve pro referenční stav, ke kterému budou výsledky z 3D tisku porovnávány. Tahová zkouška bude probíhat na zařízení Zwick Z250 za pokojové teploty. Pro vyhotovení únavových testů bude použito zařízení RUMUL Cractronic 8204.

Referenční stav byl stanoven na odlitý, tepelně nezpracovaný. Vzorky vytvořené metodou SLM budou dvojího druhu. Jedny budou vytištěny ve formě kvádrů, které budou sloužit jako polotovary pro výrobu tahových a únavových vzorků. Druhé budou vytištěny již přímo ve tvarech, které budou testovány. Předpokládá se, že neobrobené vzorky budu mít mechanické vlastnosti horší než obráběné a to z důvodu horší kvality povrchu. Testovány budou následně i vzorky, jenž projdou tepelným zpracováním. Výsledky mechanických zkoušek budou dávány do souvislostí s metalografickými výbrusy, pomocí, kterých budou popisovány vzniklé fáze v materiálu. Díky tomu bude možné říci, jak různé fáze v materiálu ovlivňují jeho mechanické vlastnosti. Tento proces hledání vhodné mikrostruktury se bude opakovat do okamžiku, kdy bude nalezena taková mikrostruktura, která bude mít mechanické vlastností vyšší než mikrostruktury dosahované konvenčními způsoby výroby.

9.6. Kontrolní stavba

Dosavadní testy měly za úkol popsat vliv jednotlivých parametrů na kvalitu výrobního procesu a nastavit ho pomocí stále se zvětšujících vzorků a výrobních strategií tak, aby byl neměnný pro libovolně velké díly. Při správně zvolené strategii stavby a určité velikosti dílu se tok tepelné energie v dílu ustálí a přestane vytvářet nehomogenity v materiálu. Kontrolní stavbou dílu, který bude mít větší zástavbový prostor než doposud vyrobené vzorky, bude validována správnost nastavení procesních parametrů. Rozměrová přesnost dílu bude porovnána s CAD modelem a výsledky z optického skeneru Atos TripleScan 8M .

10. ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ



11. ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY

Vzrůstající trend snižování hmotnosti nutně vede k používání stále lehčích hořčíkových slitin jak v dopravním průmyslu (převážně letecký a automobilní) tak ve vesmírných aplikacích. Dostatečné mechanické vlastnosti materiálů se doposud získávají tepelným zpracováním. Možnost využívání stále lehčích a dražších materiálů je však silně omezena. Spojením vlastností hořčíku s aditivním způsobem výroby vede na jinou logiku práce s materiálem. Při použití aditivních technologií již není nutné do značné míry uvažovat o tvarové vyrobitelnosti součásti. To umožňuje využívat materiál pouze v místech, kde se skutečně přenáší napětí. Jako nástroj k predikci zatěžování dílů slouží MKP analýzy a topologická optimalizace. Takováto optimalizace tvaru součásti může ušetřit až několik desítek hmotnosti oproti konvenčním tvarům dílů *(Walton and Moztarzadeh, 2017)*.

Další oblastí použití hořčíkových slitin je lékařství. Jejich mechanické vlastnosti jsou daleko bližší lidským kostem než standardně používané titanové slitiny a korozivzdorné oceli. Díky tomu by nedocházelo k vydření povrchu kosti o příliš tvrdou náhradu a potřebná opětovná operace pacienta by se oddálila. Tyto vlastnosti, spolu s jejich nezávadným chemickým rozpadem je to řadí jako potenciální materiál pro biodegradabilní lékařské implantáty *(Walker et al., 2014)*. I zde je možnost využití aditivních technologií dalším krokem k dosažení komplexnějších a kvalitnějších náhrad, ať již se jedná o části nenávratně zlomených kostí, zubů nebo kloubů.

Velkým problémem hořčíkových slitin je jejich vysoká afinita vůči kyslíku a tím katastrofální rychlost koroze. To brání plnému nasazení hořčíkových dílů v mnoha aplikacích a vede k vysokým nákladům za neustálé vyměňování zničených dílů. Zpracování hořčíkových slitin laserem vede k homogenizaci jejich struktury. To podle doposud provedených výzkumů výrazně zvyšuje odolnost hořčíkových slitin proti korozi. Podle některých autorů až 80krát oproti konvenčním stavům zpracování *(Gu et al., 2011)*.

Doposud bylo publikováno na téma zpracování hořčíkových slitin pouze malé množství článků, jelikož se jedná o velmi obtížně zpracovatelný materiál. Největším úspěchem doposud bylo vyrobení pouze malých objemových vzorků. Avšak nepopiratelné výhody, které by tento objev přinesl, vede stále nové autory před tuto výzvu.

12. SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

Vzhledem k tématu a cílům disertační práce je navázaná spolupráce s následujícími institucemi:

Ústav materiálových věd a inženýrství – příprava vzorků, popis mikrostruktury, mechanické zkoušky materiálu

Ústav fyzikálního inženýrství – počítačová tomografie

CEITEC, výzkumné středisko – analýza prášku

13. PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE

13

Konstrukce filtrace..... 100 000,- Kč
Pumpa inertní atmosféry..... 150 000,- Kč
Kyslíkový filtr..... 80 000,- Kč
Práškový materiál..... 250 000.- Kč
Referenční materiál..... 10 000,- Kč
Analýza prášku..... 20 000,- Kč
Využívání metalografické laboratoře..... 50 000,- Kč
Mechanické zkoušky..... 20 000,- Kč
Mzda..... 975 000,- Kč
Celkové náklady..... 1 655 000,- Kč

Výzkum bude hrazen z projektů školitele - MPO, ESA.

14. CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Předpokládaným výsledkem bude sepsání tří impaktovaných článků na téma zpracování hořčíkových slitin technologií selektivního laserového tavení.

Časopisy, do kterých se předpokládá výsledky publikovat, jsou:

Rapid Prototyping Journal (IF = 1,733)
Journal of Materials Processing Technology (IF = 3,147)

15

15. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., Jaiswal, S., 2016. Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. Mater. Sci. Eng. C 68, 948–963. https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.020

Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., Barlow, J., 1995. Direct selective laser sintering of metals. Rapid Prototyp. J. 1, 26–36. https://doi.org/10.1108/13552549510078113

Alvarez-Lopez, M., Pereda, M.D., Del Valle, J.A., Fernandez-Lorenzo, M., Garcia-Alonso, M.C., Ruano, O.A., Escudero, M.L., 2010. Corrosion behaviour of AZ31 magnesium alloy with different grain sizes in simulated biological fluids. Acta Biomater. 6, 1763–1771. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.04.041

Atrens, A., Song, G.L., Cao, F., Shi, Z., Bowen, P.K., 2013. Advances in Mg corrosion and research suggestions. J. Magnes. Alloy. 1, 177–200. https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.09.003

Bontha, S., Klingbeil, N.W., Kobryn, P.A., Fraser, H.L., 2006. Thermal process maps for predicting solidification microstructure in laser fabrication of thin-wall structures. J. Mater. Process. Technol. 178, 135–142. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.155

Cui, Z.Q., Shi, H.X., Wang, W.X., Xu, B.S., 2015. Laser surface melting AZ31B magnesium alloy with liquid nitrogen-assisted cooling. Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed. 25, 1446–1453. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63744-X

Czerwinski, F., 2002. The oxidation behaviour of an AZ91D magnesium alloy at high temperatures 50, 2639–2654.

Dai, N., Zhang, L.-C., Zhang, J., Chen, Q., Wu, M., 2016a. Corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution. Corros. Sci. 102, 484–489. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.041

Dai, N., Zhang, L.C., Zhang, J., Zhang, X., Ni, Q., Chen, Y., Wu, M., Yang, C., 2016b. Distinction in corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy on different planes. Corros. Sci. 111, 703–710. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.06.009

F.H.Froes, D.Eliezer, E.A., 2014. The Science, Technology, and Applications of Magnesium. Mater. Sci. Eng. A 50, 250–256. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00413-9

Gu, D., 2015. Laser additive manufacturing of high-performance materials. Laser Addit. Manuf. High-Performance Mater. 1–311. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4

Gu, D.D., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R., 2012. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. Int. Mater. Rev. 57, 133–164. https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014

Gu, X.N., Li, N., Zheng, Y.F., Ruan, L., 2011. In vitro degradation performance and biological response of a Mg-Zn-Zr alloy. Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol. 176, 1778–1784. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.05.032

Guan, Y.C., Zhou, W., Zheng, H.Y., Li, Z.L., 2010. Solidification microstructure of AZ91D Mg alloy after laser surface melting. Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.

101, 339–344. https://doi.org/10.1007/s00339-010-5880-0

Hu, D., Wang, Y., Zhang, D., Hao, L., Jiang, J., Li, Z., Chen, Y., 2015. Experimental Investigation on Selective Laser Melting of Bulk Net-Shape Pure Magnesium. Mater. Manuf. Process. 30, 1298–1304. https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025963

Chung Ng, C., Savalani, M., Chung Man, H., 2011. Fabrication of magnesium using selective laser melting technique. Rapid Prototyp. J. 17, 479–490. https://doi.org/10.1108/13552541111184206

Kempen, K., L. Thijs , E. Yasa, M. Badrossamay, W.V., J.-P. Kruth, D., 2011. Process Optimization and Microstructural Analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg 484–495.

Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W., 2012. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 59, 1025–1035. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3566-1

Liu, C., Li, Q., Liang, J., Zhou, J., Wang, L., 2016. Microstructure and corrosion behaviour of laser surface melting treated WE43 magnesium alloy. RSC Adv. 6, 30642–30651. https://doi.org/10.1039/C5RA27010C

Liu, C., Liang, J., Zhou, J., Wang, L., Li, Q., 2015. Effect of laser surface melting on microstructure and corrosion characteristics of AM60B magnesium alloy. Appl. Surf. Sci. 343, 133–140. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.067

Loh, L.E., Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Mapar, M., Sing, S.L., Chua, C.K., Yeong, W.Y., 2014. Selective Laser Melting of aluminium alloy using a uniform beam profile: The paper analyzes the results of laser scanning in Selective Laser Melting using a uniform laser beam. Virtual Phys. Prototyp. 9, 11–16. https://doi.org/10.1080/17452759.2013.869608

Louvis, E., Fox, P., Sutcliffe, C.J., 2011. Selective laser melting of aluminium components. J. Mater. Process. Technol. 211, 275–284. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019

Manakari, V., Parande, G., Gupta, M., 2016. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders: A Review, Metals. https://doi.org/10.3390/met7010002

Mercelis, P., Kruth, J., 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyp. J. 12, 254–265. https://doi.org/10.1108/13552540610707013

Ng, C.C., Savalani, M.M., Lau, M.L., Man, H.C., 2011. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted magnesium. Appl. Surf. Sci. 257, 7447–7454. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.03.004

Ng, C.C., Savalani, M.M., Man, H.C., Gibson, I., 2010. Layer manufacturing of magnesium and its alloy structures for future applications. Virtual Phys. Prototyp. 5, 13–19. https://doi.org/10.1080/17452751003718629

Pawlak, A., Rosienkiewicz, M., Chlebus, E., 2017. Design of experiments approach in AZ31 powder selective laser melting process optimization. Arch. Civ. Mech. Eng. 17, 9–18. https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.007

Riemer, A., Leuders, S., Thöne, M., Richard, H.A., Tröster, T., Niendorf, T., 2014. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. Eng. Fract. Mech. 120, 15–25. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.03.008

Sanders, P.G., Keske, J.S., Leong, K.H., Kornecki, G., 1999. High power Nd: YAG

and CO laser welding of magnesium. J. Laser Appl. 11, 96.
Savalani, M.M., Hao, L., Dickens, P.M., Zhang, Y., Tanner, K.E., Harris, R.A., 2012. The effects and interactions of fabrication parameters on the properties of selective laser sintered hydroxyapatite polyamide composite biomaterials. Rapid Prototyp. J. 18, 16–27. https://doi.org/10.1108/13552541211193467
Savalani, M.M., Pizarro, J.M., 2016. Effect of preheat and layer thickness on selective laser melting (SLM) of magnesium. Rapid Prototyp. J. 22, 115–122. https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0076
Search, H., Journals, C., Contact, A., Iopscience, M., Appl, P., Address, I.P., 2003. Laser material processing — an overview 3.
Selcuk, C., 2011. Laser metal deposition for powder metallurgy parts. Powder Metall. 54, 94–99. https://doi.org/10.1179/174329011X12977874589924
Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S.M., 2015. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. Addit. Manuf. 8, 12–35. https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002
Shifeng, W., Shuai, L., Qingsong, W., Yan, C., Sheng, Z., Yusheng, S., 2014. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts. J. Mater. Process. Technol. 214, 2660–2667. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.002
Shuai, C., Yang, Y., Wu, P., Lin, X., Liu, Y., Zhou, Y., Feng, P., Liu, X., Peng, S., 2017. Laser rapid solidification improves corrosion behavior of Mg-Zn-Zr alloy. J. Alloys Compd. 691, 961–969. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.019
Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., Hinke, C., 2010. Individualized production by means of high power Selective Laser Melting. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 2, 161–169. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.005
Sing, S.L., An, J., Yeong, W.Y., Wiria, F.E., 2016. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. J. Orthop. Res. 34, 369–385. https://doi.org/10.1002/jor.23075
Singh, A., Harimkar, S.P., 2012. Laser surface engineering of magnesium alloys: A review. Jom 64, 716–733. https://doi.org/10.1007/s11837-012-0340-2
Song, G., Atrens, A., 2003. Understanding magnesium corrosion. A framework for improved alloy performance. Adv. Eng. Mater. 5, 837–858. https://doi.org/10.1002/adem.200310405
Taltavull, C., Torres, B., Lopez, A.J., Rodrigo, P., Otero, E., Atrens, A., Rams, J., 2014. Corrosion behaviour of laser surface melted magnesium alloy AZ91D. Mater. Des. 57, 40–50. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.069
Walker, J., Shadanbaz, S., Woodfield, T.B.F., Staiger, M.P., Dias, G.J., 2014. Magnesium biomaterials for orthopedic application: A review from a biological perspective. J. Biomed. Mater. Res. - Part B Appl. Biomater. 102, 1316–1331. https://doi.org/10.1002/jbm.b.33113
Walton, D., Moztarzadeh, H., 2017. Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation. Procedia CIRP 60, 205–210. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.027
Wang, H., Estrin, Y., Zúberová, Z., 2008. Bio-corrosion of a magnesium alloy with different processing histories. Mater. Lett. 62, 2476–2479. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.052

Wei, K., Gao, M., Wang, Z., Zeng, X., 2014. Effect of energy input on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted AZ91D magnesium alloy. Mater. Sci. Eng. A 611, 212–222. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.092

Wei, K., Wang, Z., Zeng, X., 2015. Influence of element vaporization on formability, composition, microstructure, and mechanical performance of the selective laser melted Mg-Zn-Zr components. Mater. Lett. 156, 187–190. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.074

Yap, C.Y., Chua, C.K., Dong, Z.L., Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Loh, L.E., Sing, S.L., 2015. Review of selective laser melting: Materials and applications. Appl. Phys. Rev. 2. https://doi.org/10.1063/1.4935926

Zhang, B., Liao, H., Coddet, C., 2012. Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9%Al powder mixture. Mater. Des. 34, 753–758. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.061

Zhang, H.J., Zhang, D.F., Ma, C.H., Guo, S.F., 2013. Improving mechanical properties and corrosion resistance of Mg-6Zn-Mn magnesium alloy by rapid solidification. Mater. Lett. 92, 45–48. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.10.051

16. VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

Vzdělání
2015 – 2017: Magisterský studijní program Konstrukční inženýrství, fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

2011 – 2015: Bakalářský studijní program Strojní inženýrství, fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

Odborná praxe
2014: ŽDAS, a.s., Strojírenská 675/6, Žďár nad Sázavou: Konstrukční práce a CNC programování

2017: JULI Motorenwerk, s.r.o., Modřická 65, Moravany: Konstrukční práce

Pedagogická činnost:
Bakalářské studium: CAD – 3CD
Bakalářské studium: Základy konstruování - 1K
Bakalářské studium: Konstruování - 2K
Bakalářské studium: Konstruování a CAD - 4KC
Magisterské studium: Parametrické modelování – ZM1

Vědecká činnost
2016 – 2017: V rámci diplomové práce spolupráce na projektu GAČR 15-23274S: Vývoj pokročilých materiálů s využitím metody laserového spékání

2017 – 2019: MPO FV20232 – Biodegradovatelné strukturované implantáty vyrobené metodou 3D tisku kovů