



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**MECHANICKÉ VLASTNOSTI SLITINY ALSI9CU3
ZPRACOVANÉHO TECHNOLOGIÍ SLM**

THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALSI9CU3 ALUMINUM ALLOY PROCESSED BY SLM TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Koutný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Filip Koutný
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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:

Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 zpracovaného technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Každý materiál se při zpracování technologií SLM chová odlišně a nalezení procesních parametrů a znalost mechanických vlastností je zásadní pro použití v průmyslových aplikacích. Mezi základní mechanické testy patří tahová zkouška a zkouška únavového života.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem bakalářské práce je porovnání mechanických vlastností hliníkové slitiny ve stavu po odlití a tváření se stavem po zpracování technologie selective laser melting. Práce se zaměří zejména na oblast siluminů, konkrétně na materiál AlSi9Cu3.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše z oblasti hliníkových slitin,
- návrh experimentů a příprava vzorků na základě rešerše,
- vyhodnocení a stanovení závěrů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

YADROITSEV, I. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, iv, 266 s. : obr., čb. fot. tabulky, grafy. ISBN 978-3-8383-1794-6.

TIMELLI, G., A. FABRIZI, S. CAPUZZI, F. BONOLLO a S. FERRARO. The role of Cr additions and Fe-rich compounds on microstructural features and impact toughness of AISi9Cu3(Fe) diecasting alloys. Materials Science & Engineering A [online]. Elsevier B.V, 2014, 603, 58-68 [cit. 2016-11-07]. DOI: 10.1016/j.msea.2014.02.071. ISSN 0921-5093.

PEZDA, J. Heat treatment of the EN AC-AISi9Cu3(Fe) alloy. Archives of Foundry Engineering [online]. 2010, 10(2), 99-102 [cit. 2016-11-07]. ISSN 1897-3310.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností hliníkové slitiny AlSi9Cu3 v odlitém stavu se stavem po zpracování technologií selective laser melting (SLM). Rešeršní část práce pojednává o problematice hliníkových slitin, především o jejich rozdělení, mechanických vlastnostech, tepelné úpravě a zpracování technologií SLM. V diskuzi je řešen návrh optimálního rozsahu procesních parametrů SLM tisku a jsou porovnány mechanické vlastnosti konvenčně odlité slitiny AlSi9Cu3 se slitinou AlSi9Cu3 zpracovanou aditivní technologií SLM

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, hliníková slitina AlSi9Cu3, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This bachelor thesis aims to compare mechanical properties of cast AlSi9Cu3 aluminium alloy with its state after processing by the selective laser melting (SLM) technology. The theoretical part of this work presents general characteristics of aluminium alloys, focusing on their classification, mechanical properties and heat treatment as well as SLM technology processing. In the second part, we further discuss optimal processing parameters of the SLM 3D printing technology and compare mechanical properties of the conventionally cast AlSi9Cu3 alloy and the alloy processed by the SLM technology.

KEYWORDS

Selective laser melting, alluminium alloy AlSi9Cu3, mechanical properties

Bibliografická citace: KOUTNÝ, F. *Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 zpracovaného technologií SLM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za cenné rady, čas strávený na konzultacích a v neposlední řadě za celkovou vstřícnost.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 zpracovaného technologií SLM vypracoval zcela samostatně pod vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D. na základě odborné literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Brně dne 19. Května 2017

.....
Filip Koutný

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
3.1 Rozdělení slitin hliníku	15
3.1.1 Slitiny hliníku pro tváření	15
3.1.2 Slitiny hliníku pro odlitky	16
3.2 Označování hliníku a jeho slitiny podle ČSN EN	16
3.2.1 Označování slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3	16
3.2.2 Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706	17
3.3 Siluminy	17
3.4 Legury a příměsi slitin hliníku	18
3.5 Rafinace a zjemnění struktury slitin hliníku	19
3.6 Tepelné zpracování hliníkových slitin	20
3.6.1 Precipitační zpevnění	20
3.6.2 Žíhání	21
3.7 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 a její tepelná úprava	21
3.8 Hliníkové slitiny zpracované aditivní technologií SLM	25
3.8.1 Procesní parametry	26
3.8.2 Mechanické a porézní vlastnosti hliníkové slitiny AlSi12	27
3.8.3 Mechanické a porézní vlastnosti hliníkové slitiny AlSi10Mg	30
4 DISKUZE	36
4.1 Zvolení vhodného rozsahu procesních parametrů	36
4.2 Porovnání mechanických vlastností	36
5 ZÁVĚR	39
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK SYMBOLŮ A VELIČIN	42
8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	43
9 SEZNAM TABULEK	44

1 ÚVOD

Jedním z dnešních trendů průmyslového trhu je dodávat uživateli produkty přesně odpovídající jeho zvoleným požadavkům. S použitím tradičně dostupných technologií bývá tento individuální přístup často finančně a časově náročný. Velkým přínosem v této oblasti jsou aditivní technologie. Tento plně automatizovaný výrobní proces umožňuje výrobu součástí za pomoci přidávání nebo tavení materiálu ve vrstvách. Mezi nejznámější aditivní technologie zabývající se produkcí kovových součástí patří EBM, SLS a právě SLM.

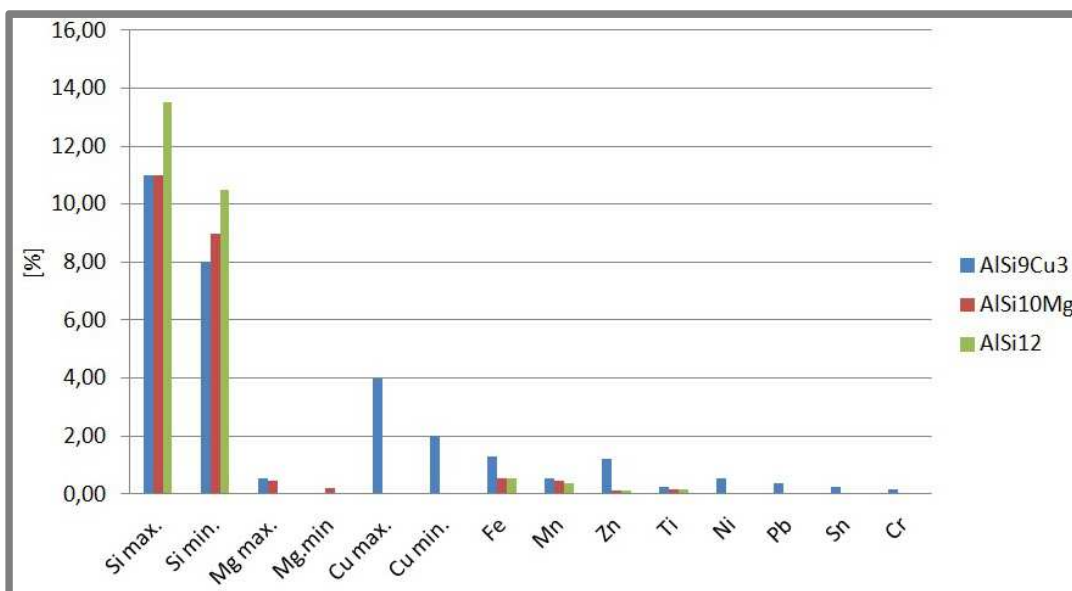
Výsledné vlastnosti produktu vytvořeného metodou SLM jsou závislé na zvolených procesních parametrech výroby, které ovlivňují celkovou kvalitu a v neposlední řadě i cenu vyrobené součásti. Zvolení optimálních procesních parametrů je tedy jedním z nejdůležitějších kroků samotného SLM procesu.

V této práci byla zkoumána hliníková slitina AlSi9Cu3. Tato slitina je jednou z nejběžněji používaných slitin hliníku. Charakterizují ji střední mechanické vlastnosti a poměrně dobrá slévatelnost. Uplatnění nachází především v automobilovém a leteckém průmyslu. AlSi9Cu3 je běžně zpracovávána konvenčními technologiemi lití, nejčastěji pak litím pod tlakem. S nástupem aditivních technologií přichází možnost zpracovat i tuto slitinu metodou SLM. Vědecké práce zabývající se zpracováním slitiny AlSi9Cu3 technologií SLM ovšem doposud nebyly zveřejněny.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Hlavním cílem práce bylo porovnat mechanické vlastnosti hliníkové slitiny AlSi9Cu3 ve stavu po odlití se stavem po zpracování technologií SLM. Studie pojednávající o mechanických vlastnostech této slitiny vyrobené pomocí SLM dosud nebyly zpracované. Na základě získaných znalostí v této práci byl navržen optimální rozsah procesních parametrů, který může být použit při samotném SLM tisku.

Německá firma *SLM Solutions* [1] zabývající se kovovým 3D tiskem nabízí svým zákazníkům vedle tisku titanových, niklových a kobaltových slitin i tisk hliníkových slitin. Přesněji pak AlSi12 , AlSi10Mg , AlSi7Mg a AlSi9Cu3 [1]. V této práci byly popsány mechanické vlastnosti a procesní parametry tisku slitin AlSi12 a AlSi10Mg , které se svým chemickým složením, hlavně pak obsahem křemíku, přibližují slitině AlSi9Cu3 . Slitina AlSi7Mg díky nižšímu obsahu Si nevykazuje takový eutektický charakter jako zbylé dvě slitiny. Porovnání procentuálního zastoupení jednotlivých prvků v kovovém prášku poskytnutém firmou *SLM Solutions* je graficky znázorněno na obr. 1.



Obr. 1 Chemické složení kovového prášku jednotlivých slitin

Z grafu je patrné, že nejmarkantnější rozdíl v chemickém složení těchto tří hliníkových slitin je v zastoupení mědi, která u AlSi9Cu3 dosahuje maximálního obsahu 4 % [1]. Rozsah procesních parametrů pro zpracování slitiny AlSi9Cu3 lze vzhledem jakési podobnosti chemického složení výše zmiňovaných slitin odhadnout na základě znalostí získaných ze studií pojednávajících o zpracování slitin AlSi10Mg a AlSi12 technologií SLM. Předpokládá se tedy přibližně stejné chování hliníku AlSi9Cu3 při jeho zpracování technologií SLM jako u AlSi12 a AlSi10Mg .

Hlavní cíl práce:

Hlavním cílem bakalářské práce je porovnání mechanických vlastností hliníkové slitiny ve stavu po odlití a tváření se stavem po zpracování technologie selective laser melting. Práce se zaměří zejména na oblast siluminů, konkrétně na materiál $AlSi9Cu3$.

Dílčí cíle práce jsou:

- Rešerše z oblasti hliníkových slitin.
- Návrh experimentů a příprava vzorku na základě rešerše.
- Vyhodnocení a stanovení závěru.

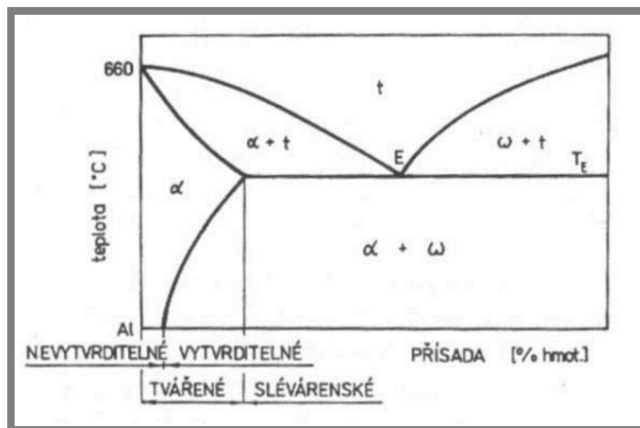
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3

3.1

3.1 Rozdělení slitin hliníku

Nejčastější rozdělení slitin hliníku je dělení podle způsobu zpracování na slitiny pro tváření a slitiny pro odlitky. Další z mnoha kritérií, podle kterých lze rozdělit slitiny hliníku, závisí na schopnosti zvyšování tvrdosti a pevnosti tepelným zpracováním vytvrzováním, na základě této vlastnosti lze slitiny rozdělit na vytvrditelné a nevytvrditelné [2]. Pro binární slitiny jsou tyto způsoby rozdělení znázorněny na obr. 2.



Obr. 2 Obecný rovnovážný diagram binárních Al slitin [2]

3.1.1 Slitiny hliníku pro tváření

3.1.1

Tyto slitiny lze dále rozdělit na nízkopevnostní a vysokopevnostní.

Mezi hlavní zástupce nízkopevnostních Al slitin patří slitiny soustav Al-Mg a Al-Mn. Jejich výhodou je absence mědi jako legujícího prvku, což zvyšuje jejich korozivzdornost. Tyto slitiny se proto většinou nemusí povrchově ošetřovat proti vzniku koroze. Hlavní předností těchto slitin je dobrá tvářitelnost a svařitelnost. Pevnost R_m slitiny Al-Mg v žíhaném stavu je 140-200 MPa a lze ji zvýšit deformačním zpevněním až na hodnotu 420 MPa, zvýšení pevnosti za pomoci tepelné úpravy vytvrzováním však není možné, kvůli absenci mědi nebo křemíku jako legujícího prvku [2].

Mezi vysokopevnostní slitiny řadíme například soustavy typu Al-Cu-Mg, Al-Cu-Si-Mn, Al-Zn-Mg-Cu nebo Al-Li. Nejpoužívanější slitiny z této skupiny jsou materiály na bázi Al-Cu-Mg, také známé jako duraly, které po tepelném zpracování vytvrzení mohou dosáhnout pevnosti R_m až 530 MPa. Dural se pro svou vysokou pevnost a nízkou měrnou hustotu hojně používá v oborech jako je automobilový, lodní či letecký průmysl. Mezi nejpevnější slitiny hliníku řadíme soustavy typu Al-Zn-Mg-Cu, které mohou dosahovat velmi vysokých hodnot R_m až 730 MPa po úpravě tepelným zpracováním, avšak tyto materiály mají vyšší sklon ke korozi pod napětím a vyšší vrubovou citlivost než již zmiňovaný dural. Slitiny typu Al-Li jsou díky vysoké reaktivnosti lithia velmi složité na výrobu, proto jsou taveny a odlévány pod ochrannou atmosférou argonu nebo ve vakuu. Velkou výhodou těchto slitin je nízká hmotnost při zachování pevnosti srovnatelné s duralem, hmotnost může být až o 10 % menší než u konvenčních hliníkových slitin [2, 3].

3.1.2 Slitiny hliníku pro odlitky

Tyto slitiny se používají převážně k výrobě tvarových odlitků nebo hliníkových pájek, většinou je charakterizuje výborná zabíhavost materiálu ale i poměrně malá pevnost v tahu R_m , která dosahuje hodnot kolem 250MPa. Kvalita a vlastnosti výsledné odlité součásti pak do vysoké míry závisí především na způsobu odlévání, kterým lze vytvořit rozdílnou strukturu materiálu. Nejnižších mechanických vlastností dosahují odlitky, které jsou odlévány metodou litím do písku, takto vzniklá součást má hrubší strukturu než součást odlitá metodou litím pod tlakem nebo litím do kovových forem. Podle slitinových bází lze slitiny hliníku pro odlitky rozdělit do několika skupin [2].

Jednu z nejvýznamnějších skupin tvoří slitiny soustavy Al-Si, také známé pod názvem siluminy. Ty se mohou dále dělit na binární siluminy, tedy slitiny typu Al-Si a speciální siluminy, jejichž nejnámější formou jsou soustavy Al-Si-Mg a Al-Si-Cu. Mezi charakteristické znaky binárních siluminů patří dobrá zabíhavost a odolnost proti korozi, avšak oproti speciálním siluminům mají nízké pevnostní vlastnosti, proto se tyto slitiny ve větší míře používají jen jako pájky. Speciální siluminy je díky přítomnosti hořčíku a mědi možno vytvrzovat, což zásadně zvyšuje jejich pevnostní vlastnosti, které je ještě možné optimalizovat přidáním dalších prvků jako manganu, titanu, zinku nebo niklu. Díky těmto vlastnostem lze ze speciálních siluminů odlévat tvarově složité a tenkostěnné součásti jako například skříně spalovacích motorů a převodovek, písty a hlavy válců, disky kol a podobně [2].

Další důležitou skupinou jsou slitiny na bázi Al-Cu a především slitiny odvozené z této binární soustavy, které obvykle obsahují nikl a železo. Nemají tak dobré slévárenské vlastnosti jako siluminy a vzhledem k přítomnosti mědi jsou náchylné ke korozi. Dovedou však odolávat i vyšším teplotám 350 °C až 450 °C. Používají se pro výrobu pístů větších rozměrů a hlav válců. Nejvyšší měrnou pevnost ze všech slévárenských hliníků mají slitiny Al-Mg. Přidáním křemíku lze zlepšit jejich slévárenské vlastnosti. Obdobně jako u Al-Cu dokáží pracovat i za zvýšené teploty [2].

3.2 Označování hliníku a jeho slitiny podle ČSN EN

Slitiny hliníku mohou být označovány jak podle norem ČSN EN, tak podle norem ČSN, avšak normy ČSN EN bývají v technické praxi upřednostňovány [3].

3.2.1 Označování slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3

„Tyto normy platí pro tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření a stanoví označování písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením. V čtyřmístném číselném označení udává první ze čtyř číslic skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků“ [3].

Řada 1000 - Al minimálně 99,00 % a více

Řada 3000 – slitina AlMn

Řada 5000 – slitina AlMg

Řada 7000 – slitina AlZn

řada 2000 – slitina AlCu

řada 4000 – slitina AlSi

řada 6000 – slitina AlMgSi

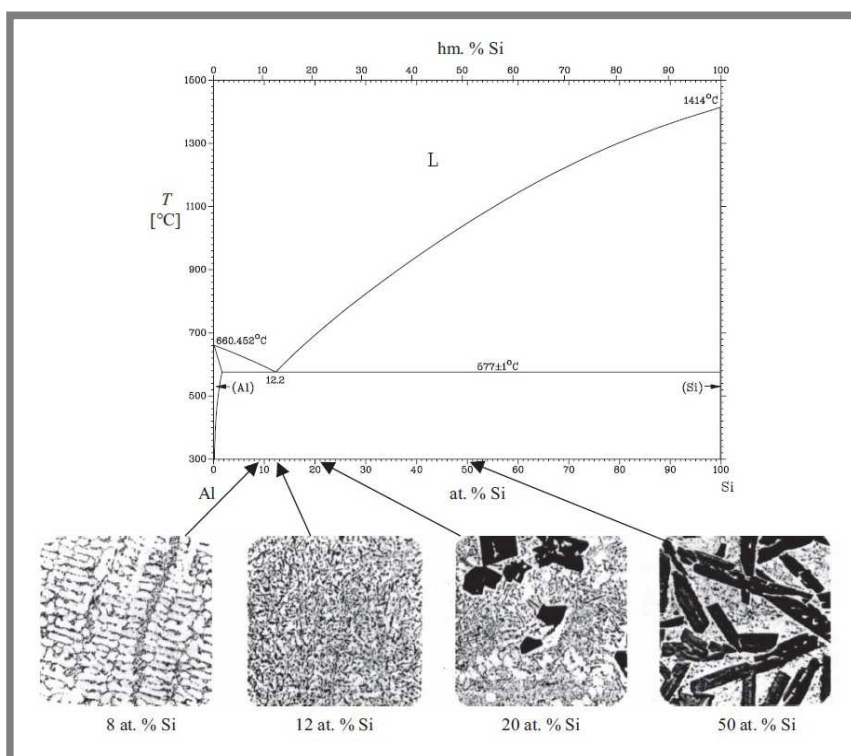
řada 8000 – slitina Al s různými prvky

3.2.2 Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706

„Tato norma platí pro odlitky a stanoví označování písmeny EN AC a pěti číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením. První z pěti číslic v pětimístném číselném označení udává skupinu slitin stejně jako u slitin pro tváření podle hlavních slitinových prvků“ [3].

3.3 Siluminy

Siluminy neboli soustavy Al-Si tvoří nejrozsáhlejší skupinu slitin hliníku. Norma ČSN EN 1706 jich udává celkem 29 [4]. Binární siluminy charakterizuje jednoduchý fázový digram s omezenou rozpustností složek v tuhém stavu a eutektickou reakcí při teplotě 577 ± 1 °C a složení $12,2 \pm 0,1$ at. % Si [3]. Fázový diagram je zobrazen na obr. 3.



Obr. 3 Fázový diagram systému Al-Si [3]

Podle fázového diagramu lze siluminy rozdělit na podeutektické, eutektické a nadeutektické.

„Použití různých druhů podeutektických siluminů se liší podle technologie odlévání.“ [4] Slitiny AlSi10Mg a AlSi7Mg jsou používány při nízkotlakém a gravitačním lití nebo při lití do písku. Soustavy AlSi9Cu3 nebo AlSi8Cu3 jsou zpracovávány technologií vysokotlakého lití. Se zvyšujícím se obsahem Si u podeutektických siluminů se zužuje interval tuhnutí a vzrůstá celková zabíhavost [4].

Pro tenkostěnné odlitky s vysokými nároky na tažnost a plasticitu se používají eutektické siluminy typu AlSi11 či AlSi12, které ovšem nedosahují takových pevnostních vlastností. Pro náročné aplikace, jakými jsou například písky spalovacích

motorů, je využívána eutektická slitina s přísady Mg, Ni a Cu, známá jako pístová slitina AlSi12CuNiMg [4].

U nadeutektických siluminů se obsah Si pohybuje kolem 20 %. Svou typickou strukturou složenou z hrubého primárního Si v eutektiku α AlSi jsou předurčeny k použití pro kluzně namáhané součásti, například písty menších rozměrů [4].

3.4 Legury a příměsi slitin hliníku

Mezi základní legující prvky se řadí Si, Cu, Mn, Mg, Ni a Ti, každý z nich má jiný vliv na výsledné vlastnosti slitiny. Přidáním manganu se zjemňuje zrna a zvyšují se pevnostní vlastnosti materiálu, mangan se také používá pro kompenzaci vlivu Fe, které je u slitin hliníku bráno jako nežádoucí příměs. Slitiny obsahující nikl mají zvýšenou odolnost proti korozi a dobré pevnostní vlastnosti za vysokých teplot. Titan podobně jako Ni vylepšuje žárpevnost a v některých případech je v malém množství používán i jako očkovač [3, 4].

Jako základní příměsi jsou uváděny prvky Fe, Cr, Zn, Pb, Sn. Jak již bylo řečeno, železo je u hliníkových slitin bráno jako běžná nečistota charakterizovaná velmi malou rozpustností v tuhém stavu. Některé prvky, například Cu mohou s železem vytvářet intermetalické fáze, což vede v případě Cu k vytvoření Al7FeCu2 fáze a tuhý roztok α je tím ochuzen o obsah mědi, což má dopad na pevnostní vlastnosti. Většina vysokopevnostních slitin má proto omezený obsah železa. Chrom je používán za účelem zvýšení kalitelnosti vytvrditelných slitin [3, 4]. U komerčních slitin je považován za nečistotu. Jeho vliv na vysokotlaci litou slitinu AlSi9Cu3(Fe) byl popsán v práci *G. Timelliho et al.* [5]. Počáteční obsah Cr v testované slitině byl 0,057 %, následným přidáním předslitiny Al-20Cr do roztaveného kovu byly vytvořeny další tři testovací slitiny s obsahem Cr od 0,087 % do 0,153 %. Na základě provedených zkoušek rázem v ohybu a naměřených dat byly zjištěny hodnoty nárazové práce W_t a maximální síly pevnosti F_m odpovídající mezi pevnosti R_m . Z tab. 1 je patrné, že houževnatost a velikost maximálního zatížení F_m klesala, když množství Cr přesáhlo 0,12 %. S vyšším množstvím Cr se hodnota nárazové práce a velikost zatížení F_m snižovala o 14,6 %, respektive 9,5 %. Obsah chromu ovšem neovlivňoval zpevňování materiálu, které nastává při překročení meze kluzu.

Tab. 1 Závislost nárazové práce a maximální síly na obsahu Cr [5]

Slitina	Cr	W_t	F_m
	[%]	[J]	[N]
1	0,057	15,8	9326
2	0,087	15,4	9259
3	0,119	16,0	9423
4	0,153	13,4	8453

Dalším zajímavým aspektem bylo zjištění, že poréznost jednotlivých vzorků nebyla závislá na změně struktury materiálu způsobené rozdílným množstvím Cr ve slitině. Poréznost v tomto případě závisela pouze na zvolené technologii vysokotlakého lití

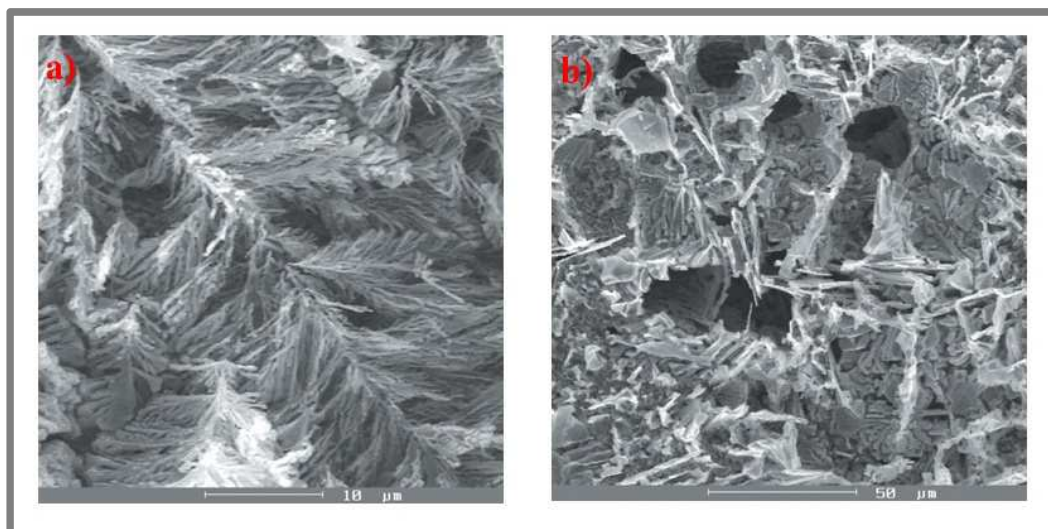
[5]. Nepatrnou změnou procentuálního zastoupení daného prvku ve slitině, v tomto případě Cr, lze docílit viditelných změn mechanických vlastností součásti.

3.5 Rafinace a zjemnění struktury slitin hliníku

3.5

Tavenina slitin hliníku ve své surové podobě obsahuje mnoho kovových a nekovových vměstků, oxidů a jiných rozpuštěných plynů. Nemá tedy dostatečnou chemickou čistotu potřebnou pro další zpracování. Proto musí každá tavenina podstoupit proces zvaný rafinace [3]. „Rafinace je tedy odstranění všech nebo většiny nežádoucích plynných a tuhých příměsí, které nejsou součástí předepsaného složení slitiny“ [4]. Při zpracování roztavené slitiny hliníku ve slévárnách se tavenina nejprve chemicky očistí a poté mohou následovat technologické procesy zjemnění struktury očkovaní nebo modifikace [3].

Princip modifikace je založený na změně způsobu růstu krystalizačních zárodků. Krystalizační proces je ovlivněn přidáním vhodného prvku, který je přítomen v modifikační předslitině. Tato předslitina se ve formě drátu vkládá do taveniny a modifikuje její výslednou strukturu. Mezi často modifikované



Obr. 4 (a) Tyčinky až vlákna eutektického křemíku-modifikovaný stav. (b) Neorientované rozložení desek Si–nemodifikovaný stav [3].

hliníkové slitiny patří siluminy. Modifikací lze dosáhnout výrazné změny struktury eutektika, kdy se modifikovaný křemík již nevyklučuje ve formě hexagonálních desek, ale ve tvaru tyčinek až vláken. Výsledná struktura má tedy jemnější charakter a materiál dosahuje vyšších mechanických vlastností [3]. Prostorová struktura modifikovaného a nemodifikovaného eutektického křemíku slitiny AlSi10MgMn je znázorněna na obr. 4.

Úprava siluminů pomocí očkovaní má za následek ovlivnění počtu krystalizačních zárodků a tím pádem i změnu velikosti primárního zrna. Očkovaní především zjemňuje strukturu materiálu a většinou se jedná o technologickou úpravu podeutektických siluminů s obsahem křemíku 5–7 %. Provádí se podobně jako u modifikace přidáním vhodně zvoleného prvku v podobě předslitiny [3].

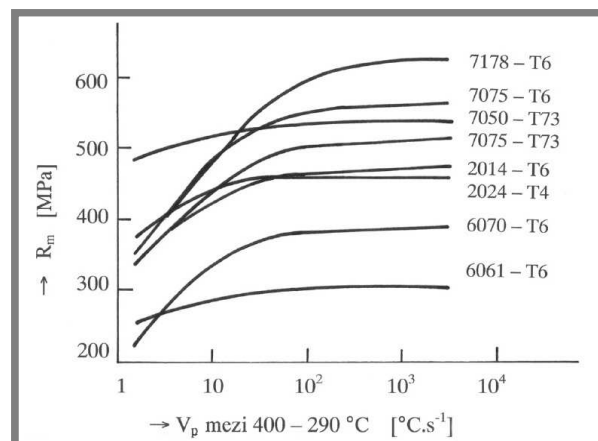
3.6 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Tepelné zpracování se dá popsat jako řízená změna struktury a tím pádem i vlastností materiálů, způsobená jedním nebo více žíhacími cykly. Žíhací cyklus je definován jako změna teploty výrobku v určitém rozmezí v závislosti na čase a skládá se z několika operací. Prvním krokem je ohřev součásti v tuhém stavu na teplotu potřebnou pro další zpracování, poté následuje výdrž na této teplotě po dobu, která je nutná pro získání daných mechanických vlastností. Posledním krokem žíhací operace je ochlazování, tedy snižování teploty součásti na požadovanou teplotu. Tepelná úprava hliníku a jeho slitin se dá rozdělit do dvou základních skupin, jimiž jsou precipitační zpevnění čili vytvrzování a žíhání [3].

3.6.1 Precipitační zpevnění

Precipitační zpevnění má jako tepelné zpracování velký význam, jelikož umožňuje poměrně značnou změnu mechanických, fyzikálních a technologických vlastností slitin. Vytvrzovat se však nedají všechny slitiny hliníku, ale pouze jen ty s výraznou změnou rozpustnosti legujícího prvku. Proto se do siluminů často přidávají legury mědi nebo manganu, právě za účelem vytvrzování. Celkový proces precipitačního zpevnění se pak skládá ze dvou na sebe navazujících technologických úkonů, jimiž jsou rozpouštěcí žíhání a proces zvaný stárnutí [3].

Rozpouštěcí žíhání sestává z ohřevu součásti na danou rozpouštěcí teplotu, následnou výdrží se intermetalické fáze převedou do stavu tuhého roztoku a prudkým



Obr. 5 Závislost rychlosti ochlazování na pevnosti v tahu R_m [3]

ochlazením v kalícím mediu se získává prosycený tuhý roztok α . Důležitým faktorem při tomto procesu je rychlost ochlazování, s kterou úzce souvisí i volba kalícího media. Pro získání prosyceného tuhého roztoku α je nutné ochlazovat rychlostí kritickou nebo nadkritickou. Kritická rychlost ochlazování je tedy nejmenší rychlost ochlazování, při které nedochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Hodnoty kritické rychlosti ochlazování jsou u různých typů slitin rozdílné a mají vliv na výsledné pevnostní a korozní vlastnosti [3]. Závislost rychlosti ochlazování na pevnosti v tahu R_m slitiny AlSi10Mg je zobrazena na obr. 5.

Po procesu rozpouštěcího žíhání následuje cyklus stárnutí čili rozpad přesyceného tuhého roztoku. Technologickým procesem stárnutí se lze dostat na

maximální pevnostní charakteristiky daného materiálu. Podle chemického složení slitiny se stárnutí rozděluje na přirozené, to znamená, že k rozpadu přesyceného tuhého roztoku dochází již za pokojové teploty (např. Al-Cu-Mg), a na stárnutí za zvýšené teploty, kdy je materiál potřeba ohřát na danou teplotu [3].

3.6.2 Žíhání

3.6.2

Hliník a jeho slitiny mohou být tepelně zpracovány hned několika žíhacími způsoby.

Rekrytalizační žíhání je vůbec nejpoužívanějším typem tepelného zpracování hliníkových slitin. Touto žíhací metodou se upravuje struktura materiálu, který byl předtím tvářený za studena. Podstatou rekrytalizačního žíhání je změna deformované struktury vzniklé předchozím procesem tváření za studena na strukturu novou rekrytalizovanou. Rekrytalizační žíhání snižuje pevnostní vlastnosti a zároveň zvyšuje plasticitu součásti. Žíhací teplota je ovlivněna předešlou deformací za studena a pohybuje se v rozmezí 250 °C – 500 °C [3].

Dalšími typy žíhání jsou stabilizační žíhání, žíhání ke snížení pnutí, žíhání s částečnou rekrytalizací a homogenizace. Stabilizační žíhání se většinou provádí u součástí, které mají být v provozu schopny pracovat za zvýšených teplot. Žíhací teplota má vyšší hodnotu než teplota, které bude materiál vystaven při provozu a pohybuje se kolem 240 °C – 350 °C. Žíhání ke snížení pnutí slouží k odstranění zbytkového napětí v materiálu. Používá se u tvarově složitých součástí, které jsou tvářeny za tepla a u odlitků odlitých metodou odlévání do kovových forem [3].

3.7 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 a její tepelná úprava

3.7

Slitina AlSi9Cu3 je jednou z nejběžnějších a nejpoužívanějších slitin hliníku. Vyznačuje se poměrně dobrými mechanickými vlastnostmi, především si uchovává pevnost i za zvýšené teploty (do 200 °C). Pro slitinu v odlitém stavu udává norma minimální hodnoty meze pevnosti R_m 240 MPa a meze kluzu $R_{p0,2}$ 140 MPa. V odlitém stavu je dobře obrobitelná a kvůli přítomnosti mědi špatně odolává korozi. Slitina má také dobré slévárenské vlastnosti, které lze zlepšit zvýšením obsahu křemíku Si. Nejčastější způsob odlévání této slitiny je tlakové lití. AlSi9Cu3 nachází největší uplatnění v automobilovém průmyslu [6].

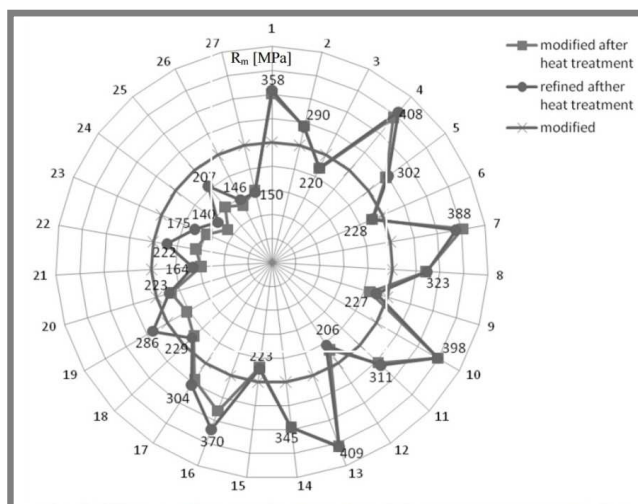
Mechanické vlastnosti se dají vylepšit vhodnou tepelnou úpravou a modifikací. Vliv tepelného zpracování a modifikace slitiny AlSi9Cu3 na pevnost, tvrdost a tažnost byl popsán v práci *J. Pezdy* [7]. Velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje celý proces tepelného zpracování, je stanovení optimální teploty a doby výdrže při rozpouštěcím žíhání a následném stárnutí. Tyto hodnoty se dají odhadnout pomocí metod zvaných ATD a ATND. Tyto metody jsou schopné vykreslit křivky, na základě kterých je možné určit přibližné hodnoty teplot a časů potřebných pro danou tepelnou úpravu. *J. Pezda* [7] ve své práci zkoumal vliv vytvrzování na slitinu AlSi9Cu3 ve stavu po rafinaci a ve stavu modifikovaném. Nejprve surová tavenina podstoupila proces rafinace, kdy se chemicky očistila od nežádoucích prvků a oxidů. Poté byla provedena modifikace stronciem, respektive se do taveniny přidala předslitina AlSr10 (0,05 % Sr). Změna procentuálního zastoupení jednotlivých prvků po provedení těchto úprav je znázorněna v tab. 2.

Tab. 2 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 [7]

AlSi9Cu3	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Ni	Sr	Pb	Cr	Mg
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Surová	7,88	0,6	4,5	0,658	0,12	0,138	0,33	-	0,06	0,04	0,4
Rafinovaná	8	0,75	3,8	0,65	0,17	0,206	0,5	-	0,05	0,08	0,327
Modifikovaná	8,5	0,65	4	0,6	0,18	0,15	0,32	0,035	0,05	0,07	0,3

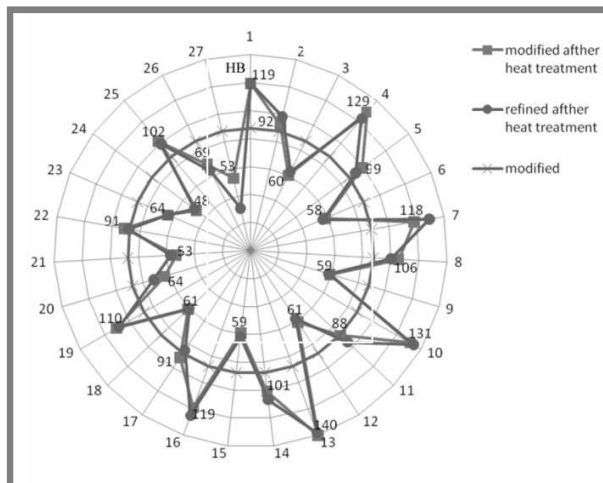
Následně byly provedeny jednotlivé mechanické zkoušky, pro získání hodnot pevnosti v tahu R_m , tažnosti A5 a tvrdosti HB [7].

Pevnost v tahu R_m slitiny v surovém stavu se pohybovala mezi 213 MPa až 243 MPa. Po následné rafinaci nepatrně narostla na 246–249 MPa. Modifikování pak vedlo k největšímu nárůstu pevnosti R_m , a to až na hodnoty 248–272 MPa. Dále byla provedena tepelná úprava modifikované a rafinované slitiny. Bylo provedeno 27 testů při různých teplotách a časech výdrže. Změna pevnosti v tahu R_m je znázorněna na obr. 6.

Obr. 6 Změna pevnosti v tahu R_m slitiny AlSi9Cu3 [7]

Z obrázku je patrné, že modifikace slitiny před tepelnou úpravou neměla téměř žádný vliv na výslednou pevnost. Rafinovaná slitina dosahovala skoro identických hodnot pevnosti R_m jako modifikovaná. Nárůst pevnosti oproti tepelně neupravované slitině byl ovšem 65 %. Nejvyšší pevnosti R_m 409 MPa bylo dosaženo při rozpouštěcí teplotě 510 °C, výdrži na této teplotě 1,5 hod. a teplotě stárnutí 240 °C při výdrži 2 hod. [7]

Naměřená tvrdost surové slitiny byla 94 HB, následnou rafinací klesla na 91HB. Po vykonání modifikace byla obdržena hodnota 87 HB. Stejně jako u pevnosti, i zde neměla modifikace téměř žádný efekt a tepelně upravená modifikovaná slitina dosahovala podobných hodnot jako tepelně upravená rafinovaná, jak je vidět na obr. 7.



Obr. 7 Změna tvrdosti HB slitiny AlSi9Cu3 [7]

Maximální nárůst tvrdosti až na 140 HB byl dosažen za rozpouštěcí teploty 510 °C, výdrže 1,5 hod. a teploty a času stárnutí 240 °C , 2 hod. [7].

Stejně jako u předchozích mechanických zkoušek se hodnoty tažnosti modifikované a rafinované slitiny v zásadě nelišily. Nejvyšší tažnosti 7,8 % bylo dosaženo při parametrech rozpouštěcího žíhání 510 °C – 8 hod. a stárnutí 320 °C 8 hod. [7].

Maximálních parametrů pevnosti R_m a tvrdosti HB bylo dosaženo za identických teplot a časů výdrže. Při těchto teplotách a časech výdrže ovšem tažnost nedosahovala vysokých hodnot. Je tedy zřejmé, že tepelným ošetřením konkrétní slitiny se nemůže dosáhnout maximálních hodnot všech mechanickým vlastností, ale musí se zvolit jakýsi kompromis volby teploty a doby výdrže, aby co nejvíce vyhovoval vlastnostem výsledné součásti, kterých se chce dosáhnout.

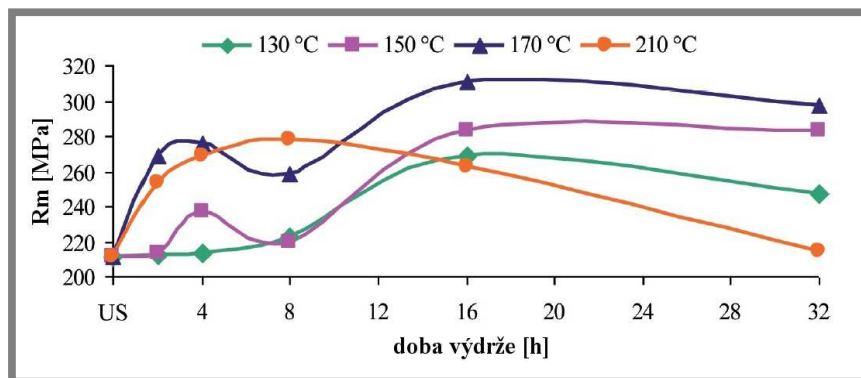
L. Hurtalová et al. [8] ve své práci zkoumala vliv teploty a doby stárnutí na sekundární slitinu AlSi9Cu3. Sekundární slitiny neboli slitiny druhého tavení jsou vyrobeny přetavbou recyklovaného odpadu hliníku a jeho slitin. Tyto slitiny nedosahují takových kvalit jako slitiny prvního tavení, obsahují větší množství nečistot a nežádoucích příměsí, proto je nutná důkladná kontrola jejich mikrostruktury. Sekundární slitiny se dolegovávají příslušnými prvky tak, aby vyhovovaly předepsané normě [4]. Jejich velkou výhodou je nízká cena. Pro výrobu 1 kg primární slitiny se v průměru spotřebuje 45 kWh, zatímco pro vyprodukování sekundární slitiny pouze 2,8 kWh. V práci *L. Hurtalové et al.*[8] byla testována sekundární slitina AlSi9Cu3, která nepodstoupila proces rafinace ani modifikace. Chemické složení slitiny je znázorněno v tab. 3.

Tab. 3 Chemické složení slitiny [8]

AlSi9Cu3	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Ni	Sn	Pb	Cr	Mg
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	9,4	0,9	2,4	1,0	0,04	0,24	0,05	0,03	0,09	0,04	0,28

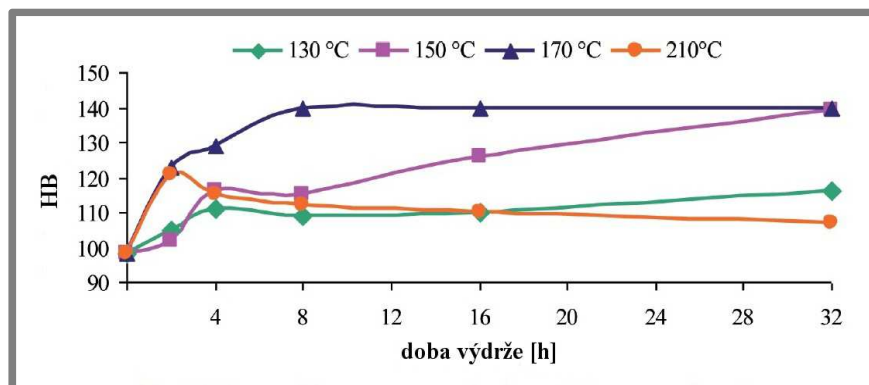
Slitina byla nejprve 4 hod. žhána na teplotě 515 °C a následně zakalena při teplotě 40 °C. Poté byla vystavená odlišným teplotám stárnutí 130, 150, 170 a 210 °C a době výdrže 2, 4, 8, 16 a 32 hod. Na výsledných vzorcích byla změřena pevnost R_m a tvrdost podle Brinella [8].

Závislost pevnosti R_m na různé teploty a časy stárnutí je znázorněna na obr. 8.



Obr. 8 Dopad tepelné úpravy na pevnost R_m [8]

Z obrázku je patrný takzvaný dvojité vrcholový jev charakteristický pro křivky odpovídající teplotám 130 °C a především 150 °C a 170 °C, kdy bylo dosaženo dvou vysokých hodnot pevnosti R_m . První maximum pevnosti bylo obdrženo po 4 hodinách stárnutí a druhé po 16 hodinách. Křivka charakterizující teplotu stárnutí 210 °C má na první pohled odlišný průběh a jediné extrémní hodnoty pevnosti bylo dosaženo po 8 hodinách stárnutí. Nejvyšší pevnost R_m 311 MPa byla naměřena při



Obr. 9 Dopad tepelné úpravy na tvrdost HB [8]

teplotě 170 °C a výdrži 16 hod. Oproti tepelně neupravované slitině pevnost R_m narostla o 47 % [8].

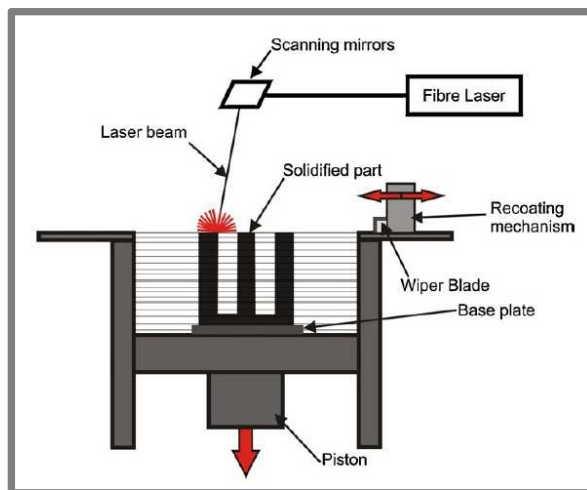
Tvrdost HB vzorku ovlivněná teplenou úpravou stárnutí je znázorněna na obr. 9. Pro teploty 130 °C a 150 °C je charakterizující nárůst tvrdosti do dosažení prvního maxima při 4 hodinách výdrže následovaný nepatrným poklesem. Druhé maximum bylo nabyto po 32hodinové výdrži. Rychlý nárůst tvrdosti byl patrný pro teplotu 210 °C, kde bylo dosaženo jediného maxima při dvouhodinové výdrži, po výdrži delší než 2 hod. došlo k přestárnutí způsobující pokles tvrdosti. Nejvyšší tvrdost 140 HB byla naměřena při teplotě 170 °C a udržovala si konstantní hodnoty mezi dobou výdrže 8 až 32 hod. [8]

Vhodně zvolenými parametry tepelné úpravy jde i u sekundárních slitin, které kvůli své menší chemické čistotě nedosahují takových kvalit jako slitiny primární, dosáhnout relativně dobrých hodnot mechanických vlastností. Pokud součást vyrobená ze sekundární slitiny splňuje požadované vlastnosti pro danou aplikaci, její použití značně sníží výrobní náklady a stává se velmi zajímavým řešením.

3.8 Hliníkové slitiny zpracované aditivní technologií SLM

3.8

Princip technologie SLM je založený na spékání kovového prášku v inertní atmosféře, který je nanášen ve vrstvách o předem stanovené tloušťce na stavěcí desku. Po nanesení první vrstvy na stavěcí plochu projede laser konturu odpovídající tvaru součásti v dané vrstvě a speče kovový prášek. Následně se stavěcí deska posune o velikost odpovídající tloušťce prášku, která se pohybuje kolem 30-80 μm , nanese se prášek a celý postup se opakuje do té doby, než je vytvořena celková geometrie. Celému procesu předchází vytvoření objemového 3D modelu dané



Obr. 10 Schéma výrobního procesu SLM [10]

součásti v CAD systému, za pomoci softwaru je tento 3D model rozřezán na dílčí 2D vrstvy. Každá vrstva odpovídá jednomu nanesení kovového prášku [9]. Obr. 10 popisuje princip výroby pomocí SLM.

Výhodou SLM a všech aditivních technologií je možnost vytváření tvarově složitých součástí, které by běžnými způsoby nebylo možné vyrobit. Další předností je vysoká efektivita využití materiálu. Prášek, který nebyl při výrobě roztavený, se dá dále recyklovat a použít pro další stavbu. Studie dokázaly, že i po 12. až 14. recyklaci nedochází u prášku k významné změně jeho vlastností a celkové kvality vyprodukovaného dílu. Tato možnost recyklace materiálu je z ekologického a finančního hlediska velmi zajímavá. Oproti běžným výrobním procesům hliníkových součástí, jako jsou lití, kování či vytlačování, dosahují produkty vyrobené technologií SLM jemnější struktury, což je způsobeno rychlým ochlazením taveniny. Další výhodou oproti konvenčním technologiím je nižší energetická náročnost. Hlavní nedostatek je ovšem ve výsledné kvalitě povrchu a rozměrové přesnosti, vlastnosti materiálu ještě nedosahují takových parametrů, aby mohly být v průmyslu sériově vyráběny. Pro částečnou eliminaci těchto nedostatků se provádějí dokončovací operace v podobě leštění, nanášení nátěrů či tepelné úpravy. Tento fakt

vede ke zvyšování finančních nákladů a nutnost podstoupit další procesní operace vede k větší časové náročnosti [10].

3.8.1 Procesní parametry

Procesní parametry jsou takové parametry, jejichž nastavení ovlivňuje samotnou stavbu dílů. Většina procesních parametrů spolu úzce souvisí. Optimalizace a vhodné zvolení procesních parametrů tedy přímo určuje výsledné vlastnosti součásti jako kvalita povrchu, mechanické a lomové vlastnosti, relativní hustotu a mnoho dalších. Nastavení optimálních procesních parametrů je jednou z nejdůležitějších operací samotného SLM tisku. Procesní parametry se vztahují k vlastnostem laseru, kovovému prášku, skenování a v neposlední řadě ke zvolené teplotě [11]. Přehled procesních parametrů znázorňuje tab. 4.

Tab. 4 Rozdělení procesních parametrů [12]

Laser	Prášek	Skenování	Teplota
Výkon	Velikost částic	Skenovací rychlost	Teplota stavěcí desky
Rozměr paprsku	Tvar částic	Vzdálenost šraf	Teplota podavače
Doba pulsu	Distribuce částic	Skenovací strategie	Teplotní stejnoměrnost
Frekvence pulsu	Materiálové vlastnosti	Tloušťka vrstvy	

Mezi nejběžněji používané lasery patří Nd:YAG a především CO₂ laser [10]. Hlavní charakteristikou laseru je jeho výkon, který se většinou pohybuje v rozmezí 100 až 1000 W. Výkon laseru spolu s tloušťkou naneseného prášku a vzdáleností šrafování významně ovlivňuje poréznost materiálu, která má u procesu SLM jednu z nejvýznamnějších priorit. Vysoké relativní hustoty součásti lze dosáhnout za pomoci výkonného laseru, malé vzdálenosti mezi šrafami a nízké rychlosti skenování, materiál je tedy schopen důkladného roztavení. Naopak procesní parametry kombinující nízkou skenovací rychlost a relativně malý výkon laseru mnohdy nedokáží vyprodukovat takové množství energie potřebné pro vytvoření adekvátní tekuté fáze, která je zapotřebí pro spojení jednotlivých částic [10]. *Jiaojiao Wu et. al* ve své práci [13] zkoumal vliv doby pulsu laserové paprsku na mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg. Při třech odlišných časech pulsu v rozmezí 100 μ s až 180 μ s dosahoval materiál téměř stejných hodnot meze pevnosti. Doba pulsu paprsku tedy neměla příliš velký dopad na výslednou pevnost [13].

Stavěcí platforma umožňuje změnu její teploty v určitém rozsahu. V práci [9] byly obdrženy dvě odlišné hodnoty R_m součástí z AlSi12, které byly vytvořeny stejnými procesními parametry, ale s jinými teplotami stavěcí desky. Bylo zjištěno, že součást stavěná na desce o teplotě 200 °C dosahovala nižší hodnoty R_m než součást stavěná na desce o teplotě 0 °C. Ohřívání platformy zpomaluje ochlazování roztaveného kovu, což vede k vytvoření hrubší struktury jednotlivých zrn. Tento jev je znám jako Hall-Petchův efekt [9]. Hrubší struktura materiálu při ohřáté stavěcí platformě také způsobuje změnu tvrdosti, jak bylo zjištěno *D. Buchbinerem et al.* ve

studii [14]. Vzorek s jemnější strukturou dosahoval vyšších hodnot tvrdosti než materiál s hrubými zrny zpracovaný na ohřáté desce. V mnoha případech je ovšem předehřívání desky používáno pro dosažení snížení zbytkového napětí v materiálu [10].

Ovlivnění procesu SLM pomocí optimalizace skenovacích vlastností je nejlépe patrné ze vzorce (1) popisující hustotu energie:

$$\Psi = \frac{P}{v \times d \times t} \quad (1)$$

Kde:

Ψ [J/mm³] - hustota energie

P [W] - výkon laseru

v [mm/s] - rychlost skenování

d [mm] - šrafovací vzdálenost

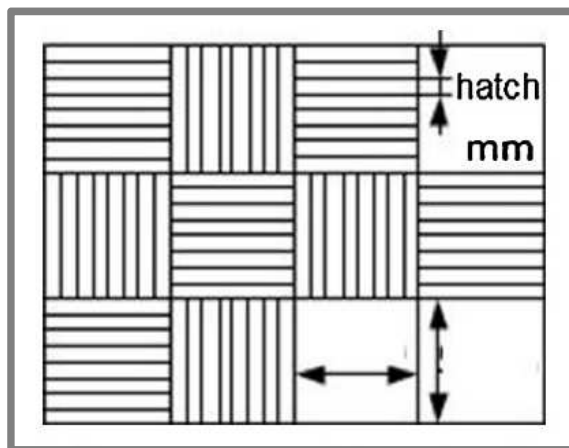
t [mm] - tloušťka vrstvy

Ze vzorce je zřetelné, že hustota energie roste s rostoucím výkonem laseru a klesajícími hodnotami rychlosti, šrafovací vzdálenosti a tloušťky vrstvy. Hustota energie popisující spotřebovanou energii na jednom mm³ objemu je výborným ukazatelem ekonomické a časové náročnosti zvolených procesních parametrů. Snahou je samozřejmě dosáhnout co nejnižších hodnot hustoty energie za účelem snížení finančních nákladů [10]. *Siddique et al.* [9] ovšem zjistil, že součásti vytvořené za pomoci nižší hustoty energie nedosahují takových kvalit.

3.8.2 Mechanické a porézní vlastnosti hliníkové slitiny AlSi12

3.8.2

Výroba hliníkové slitiny AlSi12 s vysokým obsahem eutektika technologií SLM bylo zpracováno v článkách *Siddiqueho et al.* [9] a [15]. *Siddique et al.* vyrobil několik vzorků pomocí různých hodnot výkonu laseru, skenovací rychlosti



Obr. 11 Skenovací strategie chessboard [9]

a šrafovací vzdálenosti. Všechny vzorky vytvořil na tiskárně firmy SLM Solutions SLM 250HL vybavené 400 W laserem. Jako ochranný plyn pro potlačení nežádoucího efektu oxidace použil argon. Všechny vzorky byly při stavbě orientovány svisle a jako skenovací strategie byla zvolen chessboard s délkou hrany

7,47 mm pro každé čtvercové pole, viz obr. 11. Tloušťka vrstvy kovového prášku byla u výroby všech vzorků stejná a to 50 μm . Vzorky se stavěly jak na neohřáté, tak i ohřáté stavěcí platformě a některé z nich po samotné stavbě podstoupily tepelnou operaci za účelem odstranění nežádoucího vnitřního prnutí v materiálu [9, 15]. Procesní parametry všech 8 testovaných vzorků jsou zobrazeny v tab. 5.

Tab. 5 Procesní parametry pro AlSi12 [9]

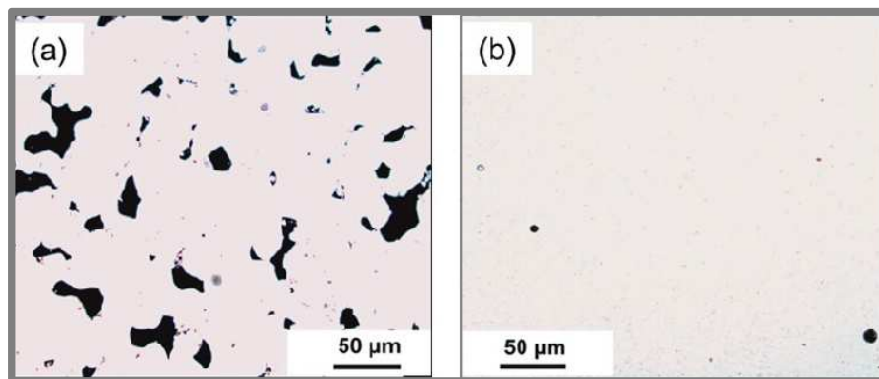
	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Šrafovací vzdálenost	Hustota energie	Rychlost stavby	Ohřátá stavěcí deska	Tepelná úprava
	[W]	[mm/s]	[mm]	[J/mm ³]	[mm ³ /s]	[°C]	[°C]
A	300	1200	0,25	20,0	15,0	0	-
B	300	1200	0,25	20,0	15,0	0	240
C	300	1200	0,25	20,0	15,0	200	-
D	300	1200	0,25	20,0	15,0	200	240
E	350	930	0,19	39,6	8,8	0	-
F	350	930	0,19	39,6	8,8	0	240
G	350	930	0,19	39,6	8,8	200	-
H	350	930	0,19	39,6	8,8	200	240

3.8.2.1 Relativní hustota

Průměrná relativní hustota vzorku s nižší hustotou energie (A-D) byla 92,2 %. U vzorků stavěných s hodnotou hustoty energie 39,6 J/mm³ (E-H) dosahovala průměrná relativní hustota hodnot převyšujících 99 %. Relativní hustota vzorků stavěných na neohřáté platformě (E, F) byla 99,51 % a na ohřáté (G, H) 99,67%. Rozdíl byl tedy minimální. Použití procesních parametrů s vyšší hodnotou hustoty energie tedy vedlo k dosažení větší relativní hustoty materiálu, která se blížila až k 100 % [9]. Na obr. 12 je ukázána mikrostruktura vzorku B a F. U vzorku B byla míra defektů na první pohled patrná, zatímco u vzorku F se vyskytovalo pouze malé množství plynové porozity [15].

3.8.2.2 Mechanické vlastnosti

Vzorky s nižší hustotou energie tedy (A-D) dosahovaly výrazně menších hodnot meze pevnosti R_m , a to až o 45 %, než ty, které byly stavěny za pomoci větší hustoty energie (E-H). Mez kluzu $R_{p0,2}$ nezaznamenala tak markantní pokles a snížila se jen o 20 %. Malý pokles meze pevnosti R_m a meze kluzu $R_{p0,2}$ byl zaznamenán také po tepelné úpravě. Oproti slitinám zpracovaných konvenčními technologiemi litím do písku a litím pod tlakem dosahovala pevnost R_m u vzorků s vysokou hustotou energie (E-H) hodnot až 4krát vyšších a mez kluzu $R_{p0,2}$ až 2krát vyšších. Nižší mechanické



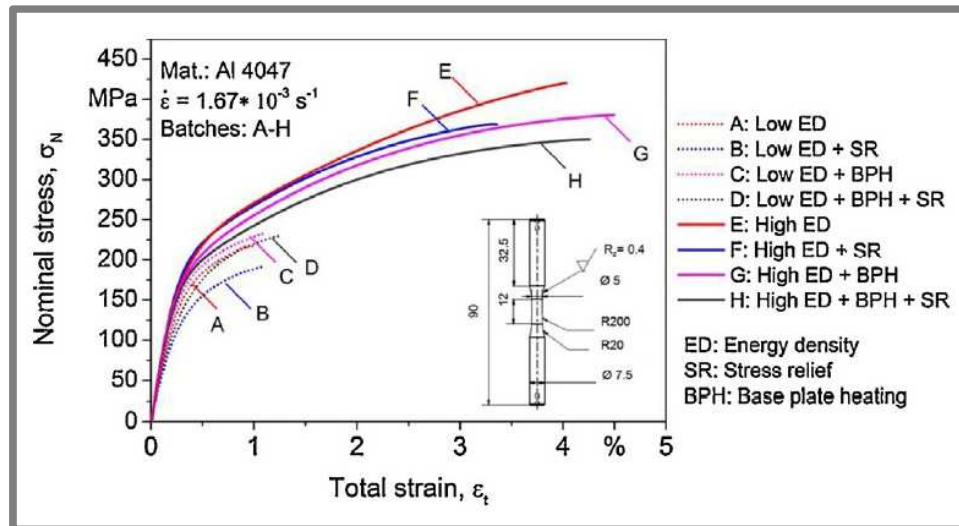
Obr. 12 Povrchová mikrostruktura vzorků B(a) a F(b) [15]

vlastnosti vzorků (A-D) byly stále porovnatelné a v některých případech i lepší než mechanické vlastnosti konvenčně odlitých slitin. Součásti vyrobené pomocí menší hustoty energie mohou být tedy použity v aplikacích, kde vysoké mechanické vlastnosti nejsou hlavní prioritou [9]. Obdržené mechanické vlastnosti jednotlivých testovacích vzorků jsou zpracovány v tab. 6.

Tab. 6 Mechanické vlastnosti testovacích vzorků [9]

	Hustota energie	Ohřátá stavěcí deska	Tepelná úprava	R_m	$R_{p0,2}$
	[J/mm ³]	[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]
A	20	0	-	231,2±5,2	183,9±9,0
B	20	0	240	219,5±6,1	180,3±6,5
C	20	200	-	190,1±3,4	153,7±4,7
D	20	200	240	230,4±3,7	186,5±3,4
E	39,6	0	-	418,9±9,6	220,5±9,4
F	39,6	0	240	372,3±7,2	218,0±6,9
G	39,6	200	-	369,3±3,4	202,2±4,3
H	39,6	200	240	361,1±4,5	201,5±3,7
Vytvořeno litím do písku				130	55
Vytvořeno litím pod tlakem				230	110

Z tabulky je patrné, že nejvyšších mechanických vlastností bylo dosaženo u tepelně neupraveného vzorku (E) stavěného na neohřáté platformě, u tohoto vzorku bylo ovšem zaznamenáno největší zbytkové napětí. Pokles pevnosti u vzorků stavěných pomocí nízké hustoty energie byl způsoben tím, že kovový prášek se díky menší dodané energii důkladně neroztavil [9]. Záznam tahové zkoušky je na obr. 13.



Obr. 13 Tahová zkouška vzorků A-H [9]

3.8.3 Mechanické a porézní vlastnosti hliníkové slitiny AlSi10Mg

Slitina AlSi10Mg je hojně využívána pro mnoho aplikací v leteckém či automobilovém průmyslu pro svou nízkou hmotnost, schopnost recyklace a v neposlední řadě pro své vysoké mechanické vlastnosti [16]. Tato slitina hliníku patří vůbec k nejvíce studovaným hliníkovým materiálům zpracovaných technologií SLM, a to především díky schopnosti produkovat součásti o téměř 100 % relativní hustotě a velice jemné mikrostruktúře [14]. Tepelně neupravená součást vytvořená z této slitiny pomocí SLM dosahuje excelentních pevnostních vlastností, avšak její tažnost je relativně nízká oproti konvenčně odlévaným produktům [16].

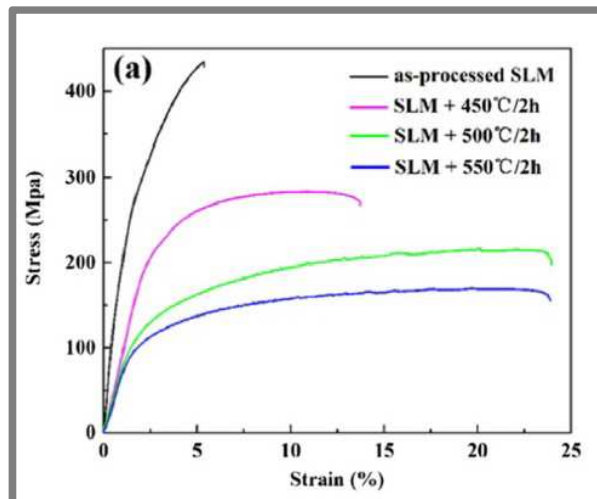
Wei Li *et al.* ve své práci [16] zkoumal efekt tepelné úpravy na mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg. Všechny testovací vzorky vytisknul na tiskárně SLM250 HL vybavené 400 W laserem pod ochrannou atmosférou argonu. Zvolené procesní parametry jsou přehledně znázorněny v tab. 7.

Tab. 7 Procesní parametry pro AlSi10Mg [16]

Výkon laseru	Rychlost skenování	Tloušťka vrstvy	Šrafovací vzdálenost	Hustota energie	Rychlost stavby
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	[J/mm ³]	[mm ³ /s]
350	1140	50	170	36,12	9,69

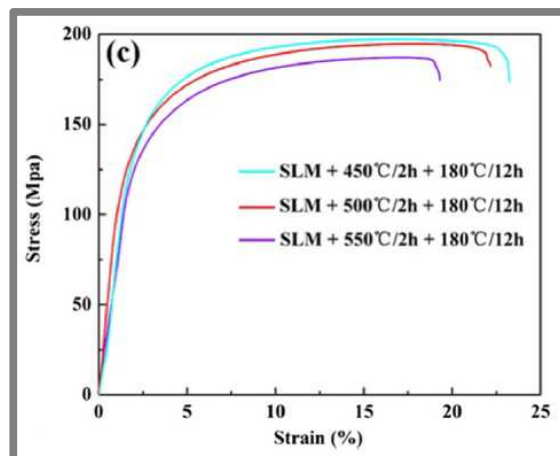
Vyrobené testovací vzorky následně podstoupily tepelnou úpravu rozpouštěcího žíhání, a to při různých teplotách 450 °C, 500 °C a 550 °C a výdrž 2 hod. Po tomto tepelném ošetření bylo provedeno umělé stárnutí po dobu 12 hod. při teplotě 180 °C. Bylo zjištěno, že s rostoucí rozpouštěcí teplotou od 450 °C do 550 °C vykazovala mikrostruktúra hrubšího charakteru. Po umělém stárnutí došlo ještě k výraznějšímu zhrubnutí zrna [16].

Tepelně neupravený vzorek vykazoval nejvyšších hodnot R_m $434,25 \pm 10,7$ MPa a R_e $322,17 \pm 8,1$ MPa, avšak nízké hodnoty tažnosti $5,3 \pm 0,22$ %. Rozpouštěcí žíhání mělo velký dopad na mechanické vlastnosti vzorku. U vzorku žíhaného teplotou 450 °C došlo k dramatickému poklesu obou pevnostních charakteristik, kdy mez pevnosti R_m poklesla na $282,36 \pm 6,1$ MPa a mez kluzu R_e na



Obr. 14 Tahový diagram tepelně neupraveného a žíhaných vzorků [16]

$196,58 \pm 3,6$ MPa. Na úkor poklesu pevnostních charakteristik ovšem vrostla tažnost na $13,4 \pm 0,51$ %. Dalším nárůstem rozpouštěcí teploty se pevnost dále zmenšovala a tažnost naopak rostla. Vysoká pevnost tepelně neupraveného vzorku může být vysvětlena jemnozrnnou strukturou [16]. Obr. 14 a 15 znázorňují tahovou zkoušku pro různě tepelně ošetřené vzorky.

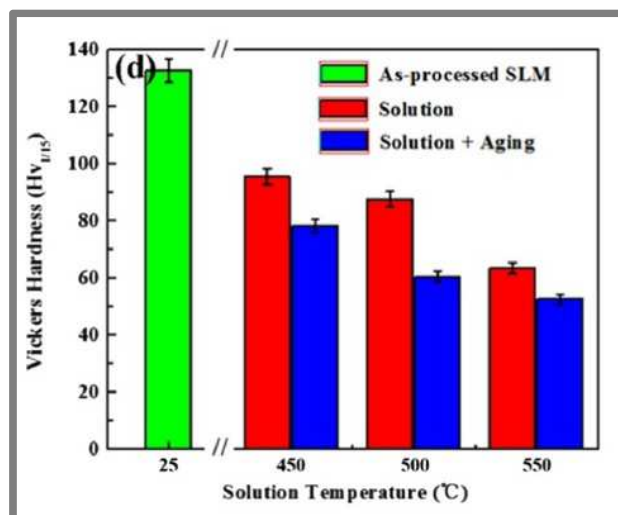


Obr. 15 Tahový diagram vzorků zpracovaných umělým stárnutím [16]

Tvrdoost HV tepelně ošetřených vzorků dokazovala nižších hodnot než tvrdoost tepelně neupraveného vzorku. Maximální tvrdoost $132,55 \pm 5,3$ HV byla obdržena pro tepelně neupravený vzorek. Po rozpouštěcím žíhání na teplotě 450 °C dosahoval tvrdoost $95,65 \pm 3,6$ HV. Následným zvyšováním rozpouštěcí teploty tvrdoost opět

klesala [16]. Hodnoty tvrdosti pro jednotlivé tepelné úpravy jsou zobrazeny na obr. 16.

Bylo tedy zjištěno, že zvyšování žíhací teploty vede k poklesu pevnostních vlastností a nárůstu tažnosti. Tento efekt byl způsoben změnou velikosti jednotlivých zrn v materiálu.



Obr. 16 Závislost tepelné úpravy na tvrdosti HV [16]

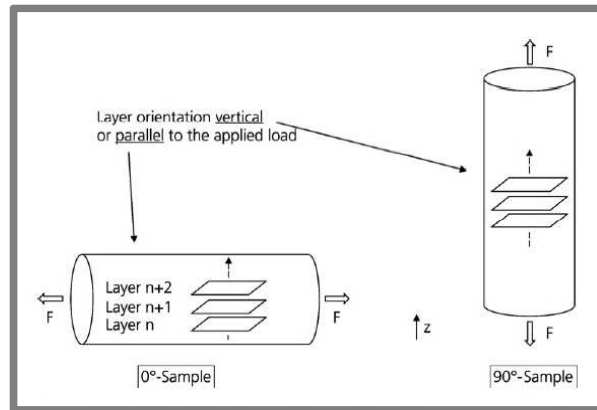
V práci *D.Buchbindera et al.* [14] byla testovaná závislost procesních parametrů na mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg. Pro stavbu byl použit kovový prášek o velikosti zrna 25–45 μm . Chemické složení prášku odpovídalo toleranci podle normy DIN EN 1706 [14]. Zvolené procesní parametry jsou znázorněny v tab. 8.

Tab. 8 Procesní parametry pro AlSi10Mg [13]

Výkon laseru	Rychlost skenování	Tloušťka vrstvy	Šrafovací vzdálenost	Hustota energie	Rychlost stavby
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	[J/mm ³]	[mm ³ /s]
240	500	50	160	60	4
960	1000	50	400	48	20

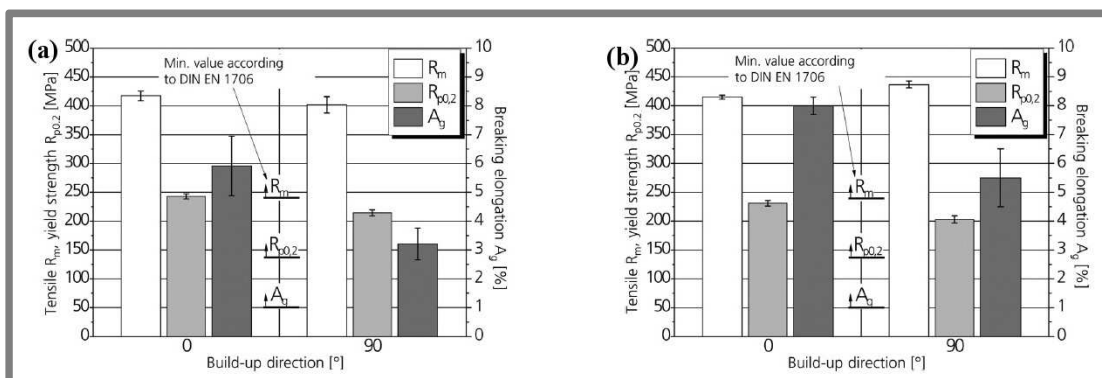
Vzorky pro tahovou zkoušku byly tisknuty ve dvou stavěcích směrech (0° a 90°) viz obr. 17 a stavba probíhala na neohřáté i ohřáté (220 °C) stavěcí platformě. Mikrostruktura obou vzorků stavěných za pomoci odlišných rychlostí stavby a výkonu laseru neprokazovala žádné zásadní odlišnosti. Dosažená relativní hustota jak u prvního, tak i u druhého vzorku přesahovala hodnotu 99 % [14].

Největší dopad na mechanické vlastnosti měl proces tuhnutí materiálu. Pomalé tuhnutí způsobené malou skenovací rychlostí a ohřátou stavěcí deskou vedlo k hrubnutí mikrostruktury a tím pádem k nárůstu tažnosti. Na úkor zvýšení tažnosti ovšem klesaly pevnostní vlastnosti. Mez pevnosti R_m a mez kluzu $R_{p0,2}$ u obou vzorků (240 W a 960 W) stavěných na neohřáté platformě dosahovaly téměř identických hodnot v rozsahu 400–450 MPa pro R_m a 210–240 MPa pro $R_{p0,2}$ a to

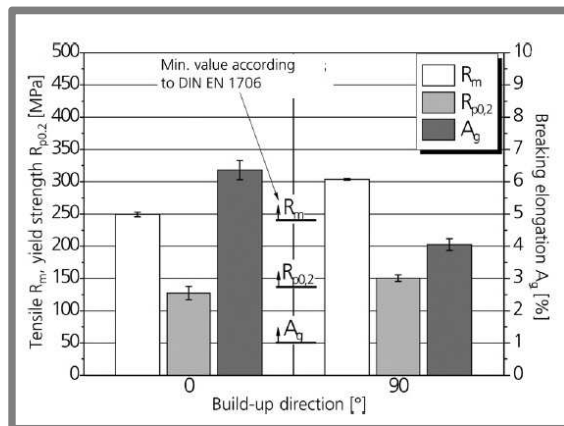


Obr. 17 Schematické znázornění směru stavby [14]

nezávisle na zvolené orientaci stavby. I přes téměř totožnou mikrostrukturu obou vzorků byla tažnost vzorku postaveného 960W laserem o 25 % vyšší než u vzorku zpracovaného 240W laserem. Což se dá odůvodnit vyšší intenzitou 960W laseru, díky které dojde k odpaření většího množství křehkých částic, které negativně ovlivňují tažnost materiálu. Na rozdíl od pevnostních vlastností byla zjištěna závislost velikosti tažnosti na orientaci stavby (0° a 90°). Vzorky s vertikální orientací vrstev (90°) dosahovaly až 2x menších hodnot tažnosti, než vzorky stavěné paralelně (0°) [14]. Grafické znázornění mechanických vlastností je zobrazeno na obr. 18.

Obr. 18 (a) mechanické vlastnosti vzorku ($P=240\text{W}$, $v=500\text{ mm/s}$), (b) mechanické vlastnosti vzorku ($P=960\text{W}$, $v=1000\text{ mm/s}$) [14]

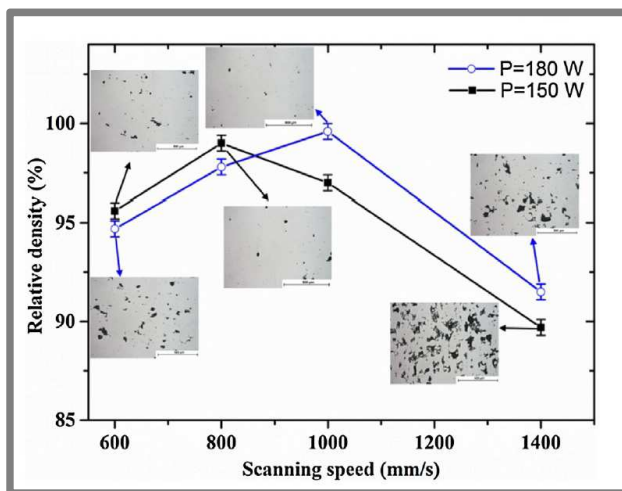
Změna orientace stavby neprokazovala žádné větší změny pevnostních vlastností, ale ovlivňovala celkovou tažnost materiálu. Vzorky stavěné na ohřáté desce pak díky pomalejšímu procesu tuhnutí a tím pádem hrubšímu zrnu zaznamenaly znatelný pokles pevnostních vlastností, což lze vidět na obr. 19.



Obr. 19 Mechanické vlastnosti vzorku (P=960W, v=1000mm/s, T=200°C) [14]

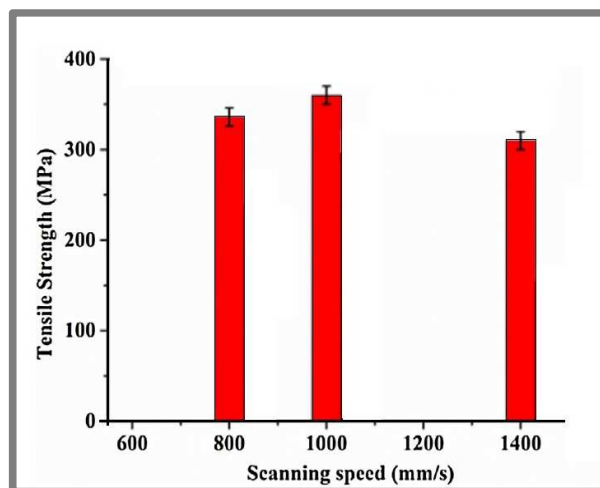
V práci *W. Pei et al.* [17] byla zkoumána porozita a pevnostní vlastnosti vzorků z AlSi10Mg, vytvořených laserem o poměrně nízkém výkonu. Tloušťka vrstvy naneseného prášku 40 μm a šrafovací vzdálenost 50 μm byla pro všechny vzorky zvolena stejně. Rozsah výkonu laseru a skenovací rychlosti byl 150-180 W a 600-1400 mm/s. *W. Pei et al.* tisknul všechny vzorky na vlastní tiskárně SLM 150 pod inertní atmosférou argonu. Pro větší snížení porozity byla použita skenovací strategie random rotation [17].

Nejvyšší relativní hustota 99,6 % byla obdržena při výkonu laseru 180 W a skenovací rychlosti 1000 mm/s. Z obr. 20 je patrný nárůst porozity při použití vyšších skenovacích rychlostí. Při nárůstu skenovací rychlosti z 1000 mm/s na 1400 mm/s u 180 W laseru klesla relativní hustota na hodnotu 91,8 %, což může být způsobeno poklesem hustoty energie z 90 J/mm^3 na 64 J/mm^3 . Zajímavé bylo, že pro oba výkony laseru byl zaznamenán nárůst porozity při použití nižších rychlostí než 800 mm/s [17].



Obr. 20 Závislost relativní hustoty na výkonu laseru a skenovací rychlosti [17]

Maximální pevnosti R_m 360 MPa dosahoval materiál stavěný 180 W a skenovací rychlosti 1000 mm/s. Skenovací rychlost měla velký vliv na pevnostní vlastnosti. Při nárůstu rychlosti na 1400 mm/s mez pevnosti R_m markantně poklesla až na hodnotu 305 MPa. Tento pokles může být vysvětlen přítomností částic prášku, které se díky vysoké rychlosti dostatečně neroztavily. Závislost skenovací rychlosti na pevnosti R_m je zobrazena na obr. 21 [17].



Obr. 21 Závislost pevnosti R_m na skenovací rychlosti [17]

4 DISKUZE

4.1 Zvolení vhodného rozsahu procesních parametrů

Z výše uvedené rešeršní části je patrné, že nejmarkantnější vliv na výsledné mechanické vlastnosti součásti vyrobené metodou SLM má výkon laseru, skenovací rychlost, šrafovací vzdálenost a tloušťka vrstvy naneseného prášku. Všechny tyto parametry také vystupují ve vztahu (1), který popisuje velikost hustoty energie.

V materiálovém katalogu firmy *SLM Solutions* [1] se jako doporučená tloušťka vrstvy pro stavbu hliníkových součástí udává hodnota 50 μm shodně pro hliníky AlSi9Cu3 , AlSi10Mg a AlSi12 . Tento parametr zvolené tloušťky koresponduje s tloušťkou vrstvy naneseného prášku v pracích [9, 14, 15, 16] a jeví se jako ideální.

Ve studii [17] byl použit laserový výkon 180 W a skenovací rychlost 800 mm/s. V závislosti na menším výkonu laseru byla zvolena poměrně malá šrafovací vzdálenost 50 μm . Slitina AlSi10Mg zpracovaná těmito parametry, dosahovala maximální pevnosti R_m 360 MPa při použití poměrně vysoké hodnoty hustoty energie 90 J/mm^3 . Pevnost R_m této slitiny, kterou udává firma *SLM Solutions* [1] ve svém katalogu je 397 ± 11 MPa. Společnost *EOS* [18] uvádí dokonce hodnotu 460 ± 20 MPa. Je patrné, že použitím příliš nízkého výkonu laseru a relativně vysoké skenovací rychlosti nelze dosáhnout takových hodnot mechanických vlastností. Jako optimální výkon laseru se jeví 350 W, při kterém dosahovaly slitiny AlSi10Mg a AlSi12 v pracích [9, 16] stejných ne-li vyšších mechanických vlastností, než které jsou udávané v katalogu *SLM Solutions*. Větší výkon také umožňuje aplikaci vyšší skenovací rychlostí, která při stavbě součásti redukuje strojní čas.

V návaznosti na informace nabyté z [9, 14, 15, 16] se ideální rozsah hustoty energie pohybuje kolem 35-60 J/mm^3 . Na této hladině hustoty energie byly obdrženy relativně vysoké mechanické vlastnosti a nízká porozita. Při použití vyšších výkonů laseru například 350-400 W se v závislosti na této hustotě energie jeví optimální nastavení skenovacích rychlostí a šrafovacích vzdáleností v rozsah 800-1200 mm/s a 120-180 μm . Ve studii [10] bylo zjištěno, že poměrně vysoké relativní hustoty dosahoval materiál AlSi12 při hodnotách hustoty energie v rozmezí 25-65 J/mm^3 .

Doporučená velikost částic prášku pro stavbu dílů o výšce vrstvy 50 μm je 20-80 μm [10]. Pro výrobu součástí z AlSi9Cu3 používá společnost *SLM Solutions* prášek o velikosti částic 20-63 μm .

Aplikace výše popsaných procesních parametrů by měla zaručit získání dostačujících mechanických a poréznych vlastností slitiny AlSi9Cu3 při jejím zpracování technologií SLM.

4.2 Porovnání mechanických vlastností

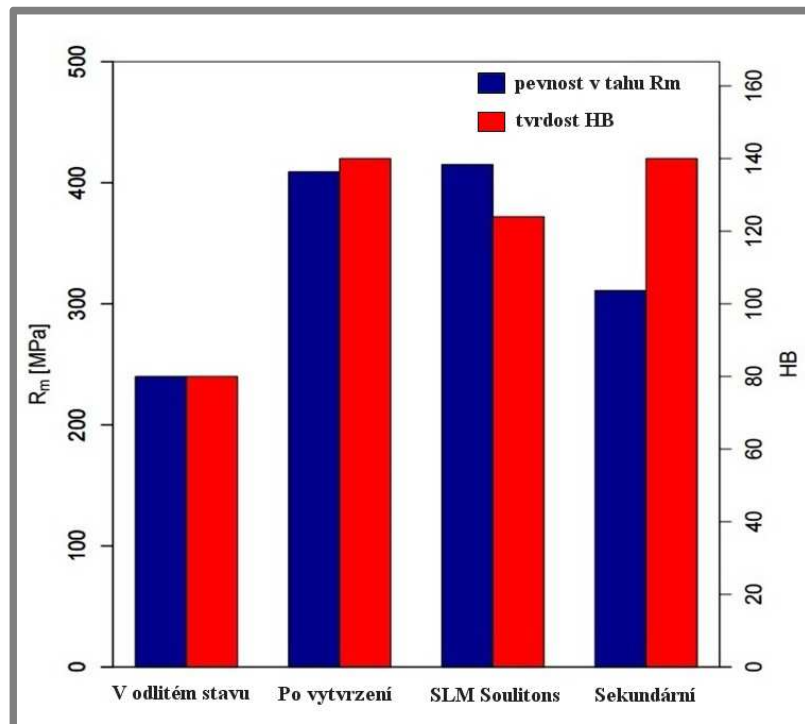
Mez pevnosti R_m a mez kluzu $R_{p0,2}$ odlité slitiny AlSi9Cu3 udávaná normou je stanovena na 240 MPa pro R_m a 140 MPa pro $R_{p0,2}$ [6], což je oproti hodnotám, které uvádí *SLM Solutions*, téměř o 42 % méně u obou pevnostních charakteristik. Ve studii *J.Pezdy* [7] byla slitina AlSi9Cu3 modifikována. Po modifikaci vzrostla mez pevnosti R_m na maximální hodnotu 272 MPa. Nejvyšší dosažené mechanické vlastnosti odlité slitiny byly obdrženy po technologickém procesu vytvrzování při rozpouštěcí teplotě 510 $^{\circ}\text{C}$, teplotě stárnutí 240 $^{\circ}\text{C}$ a době výdrže na těchto teplotách 1,5 hod. pro rozpouštěcí žíhání a 2 hod. pro stárnutí. Mez pevnosti v tahu takto

upravené slitiny narostla na 409 MPa [7], což je porovnatelné s velikostí R_m 415 \pm 15MPa, kterou udává *SLM Solutions*. Odlitá slitina musí ovšem podstoupit několik technologických procesů, aby tyto vlastnosti byla schopna dosáhnout, a to u většiny případů vede k větší časové náročnosti.

Minimální tvrdost odlité slitiny AlSi9Cu3 je stanovena na 80 HB [6]. Vytvrzením lze dosáhnout nárůstu tvrdosti až na 140 HB viz [7]. Slitina nabízená *SLM Solutions* dosahuje maximální tvrdosti 124 HB.

Tažnost tepelně neupraveného hliníku AlSi9Cu3 zpracovaného technologií SLM dosahuje hodnot 5 ± 1 %. Konvenčně odlitá slitina je charakterizována poměrně nízkou tažností menší jak 1 %. Vhodnou tepelnou úpravou viz [7] lze ovšem dosáhnout nárůstu až na 7,8 %.

Nespornou výhodou SLM procesu je možnost aplikace již použitého kovového prášku. Součásti vytvořené z použitého prášku dosahují téměř identických mechanických vlastností jako součásti stavěny nepoužitým práškem [10], zatímco odlité produkty ze sekundární slitiny, čili slitiny vyrobené přetavbou recyklovaného



Obr. 22 Závislost tvrdosti HB a pevnosti R_m slitiny AlSi9Cu3 na zvolené technologii zpracování

odpadu hliníku a jeho slitin, charakterizuje výrazný pokles mechanických vlastností. Pro vytvrzenou odlitou sekundární slitinu AlSi9Cu3 v práci [8] byla obdržena mez pevnosti R_m 311 MPa, což je o 25 % méně, než udává společnost *SLM Solutions*. Grafické porovnání pevnosti v tahu R_m a tvrdosti HB slitiny AlSi9Cu3 v závislosti na rozdílném technologickém procesu zpracování je zobrazeno na obr. 22.

Dá se předpokládat, že stejně jako slitina AlSi10Mg zpracovaná technologií SLM i hliník AlSi9Cu3 bude měnit svoje mechanické vlastnosti v závislosti na tepelné úpravě. V práci [16] byla slitina AlSi10Mg vystavena rozpouštěcímu žíhání při maximální teplotě 550 °C a době výdrže 2 hod. Její pevnostní vlastnosti rapidně

poklesly. Na druhé straně ovšem narostla tažnost materiálu. Tento efekt byl způsoben výrazným zhrubnutím mikrostruktury.

Slitiny AlSi12 a především AlSi10Mg zpracované technologií SLM v pracích [9, 14, 15, 16] dosahovaly vyšších mechanických vlastností než jaké udává *SLM Solutions* a to v průměru o 8 % vyšší meze pevnosti R_m a 5 % vyšší meze kluzu $R_{p0,2}$. Dá se očekávat, že vhodným zvolením procesních parametrů lze dosáhnout vyšších mechanických vlastností, než jaké udává *SLM Solutions* u slitiny AlSi9Cu3. Na základě této predikce by slitina AlSi9Cu3 mohla dosahovat velmi vysoké meze pevnosti R_m až 464 MPa a meze kluzu $R_{p0,2}$ 257 MPa, což je téměř o 50% více u obou pevnostních charakteristik, než normou udávané hodnoty pro litou slitinu.

5 ZÁVĚR

V této práci byly porovnány mechanické vlastnosti hliníkové slitiny AlSi9Cu3 zpracované technologií SLM se slitinou AlSi9Cu3 konvenčně odlitou.

Byl navrhnout rozsah procesních parametru , při kterém se dá očekávat dosažení vysokých mechanických vlastností a nízké porozity. Jako optimální nastavení procesních parametrů se jeví použití vyššího výkonu laseru 350-400 W, šrafovací vzdálenosti 120-180 μm , výšky vrstvy 50 μm a skenovací rychlosti 800-1200 mm/s. Díky většímu výkonu laseru je možné stavět za pomoci vyšší skenovací rychlosti a lze použít větší hodnotu šrafovací vzdálenosti, což vede ke snížení strojního času celého procesu, který je z ekonomického hlediska velmi významný.

Obecně lze říct, že hliníkové slitiny, AlSi9Cu3 nevyjímaje, zpracované technologií SLM, jsou při správné kombinaci procesních parametrů schopny díky užšímu intervalu tuhnutí materiálu a tím pádem vzniku jemnozrné struktury, dosáhnout opravdu excelentních mechanických vlastností a relativní hustoty blížící se 100 %. Diference meze kluzu $R_{p0,2}$ tepelně neupravené konvenčně odlité slitiny AlSi9Cu3 se slitinou zpracovanou technologií SLM dosahovala až 42 %.

Bylo by vhodné experimentálně ověřit navrhnutý rozsah procesních parametrů a najít optimální nastavení, které kombinuje nízkou hodnotu hustoty energie, vysoké mechanické vlastnosti a relativní hustotu blížící se 100 %.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *SLM Solutions* [online]. 2017 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slm-metal-powder>
- [2] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN: 8072042483.
- [3] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. 700 s. : il. ISBN: 8089041884.
- [4] NĚMEC, M., PROVAZNÍK, R. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2008. 137 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 9788001041161.
- [5] TIMELLI, G., FABRIZI, A., CAPUZZI, S., BONOLLO, F., FERRARO, S. The role of Cr additions and Fe-rich compounds on microstructural features and impact toughness of AlSi9Cu3(Fe) diecasting alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2014, **603**, 58-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.071>. ISSN 09215093. Dostupné také z: 1url.cz/htj2Z
- [6] *CSN EN 1706 Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: Úrad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [7] PEZDA, J. Heat treatment of the EN AC-AlSi9Cu3(Fe) alloy. *Archives of Foundry Engineering* [online]. 2010, **10**(2), 99-102 [cit. 2017-03-28]. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <http://1url.cz/itVG0>
- [8] HURTALOVÁ, L., TILLOVÁ, E., CHALUPOVÁ, M. Identification and Analysis of Intermetallic Phases in Age-Hardened Recycled AlSi9Cu3 Cast Alloy. *Archive of Mechanical Engineering* [online]. 2013, 385–396 [cit. 2017-03-28]. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10180-012-0020-3>. ISSN 0004-0738. Dostupné z: <http://1url.cz/DtVGw>
- [9] SIDDIQUE, S., IMRAN, M., WYCISK, E., EMMELMANN, C., WALTHER, F. Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, **221**, 205-213. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.023>. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615000667>
- [10] OLAKANMI, E.O., COCHRANE, R.F., DALGARN, K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*. 2015, **74**, 401-477. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.03.002>. ISSN 00796425. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642515000389>
- [11] LOUVIS, E., FOX, P., SUTCLIFFE, C. J. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, **211**(2), 275-284. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019>. ISSN 09240136. Dostupné také z: 1url.cz/ctj2h

- [12] MĚCHURA, L. *Zpracování hliníkových slitin 3D technologií selective laser melting* [online]. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce David Paloušek [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60285>.
- [13] WU, J., WANG, L., Xuguang, A. N. Numerical analysis of residual stress evolution of AlSi10Mg manufactured by selective laser melting. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 2017, **137**, 65-78. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.02.060>. ISSN 00304026. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402617302036>
- [14] Buchbinder, D., Meiners, W., Wissenbach, K. Selective laser melting of aluminum die-cast alloy—Correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties. *Journal of Laser Applications*. 2015, **27**(2), 29205. DOI: 10.2351/1.4906389. ISSN 1042346x. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.2351/1.4906389>.
- [15] SIDDIQUE, S., WYCISK, E., FRIELING, G., EMMELMANN, C., WALTHER, F. Microstructural and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Al 4047. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2015, **752-753**, 485-490. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.485. ISSN 16627482. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMM.752-753.485>
- [16] LI, W., LI, S., LIU, J., ZHANG, A., ZHOU, Y. WEI, Q., YAN, Ch., SHI, Y. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, **663**, 116-125. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.088>. ISSN 09215093. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509316303033>
- [17] WEI, P., WEI, Z., CHEN, Z., DU, J., HE, Y., LI, J., ZHOU, Y. The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior. *Applied Surface Science*. 2017, **408**, 38-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.215>. ISSN 01694332. Dostupné také z: 1url.cz/Ptj2U
- [18] EOS [online]. 2017 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.eos.info/material-m>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK SYMBOLŮ A VELIČIN

Symbol/zkratka	Jednotka	Popis
R_m	[MPa]	Pevnost v tahu
R_e	[MPa]	Mez kluzu
W_t	[J]	Nárazová práce
F_m	[N]	Maximální síla pevnosti
Ψ	[J/mm ³]	Hustota energie
P	[W]	Výkon laseru
v	[mm/s]	Rychlost skenování
d	[mm]	Šrafovací vzdálenost
t	[mm]	Tloušťka vrstvy
<i>EBM</i>		Electron beam melting
<i>SLS</i>		Selective laser sintering
<i>SLM</i>		Selective laser melting
<i>3D</i>		Trojdimenzionální
<i>2D</i>		Dvoudimenzionální
<i>CAD</i>		<i>Computer aided design</i>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Chemické složení kovového prášku jednotlivých slitin	13
Obr. 2 Obecný rovnovážný diagram binárních Al slitin [2].....	15
Obr. 3 Fázový diagram systému Al-Si [3].....	17
Obr. 4 (a) Tyčinky až vlákna eutektického křemíku-modifikovaný stav. (b) Neorientované rozložení desek Si–nemodifikovaný stav [3].....	19
Obr. 5 Závislost rychlosti ochlazování na pevnosti v tahu R_m [3]	20
Obr. 6 Změna pevnosti v tahu R_m slitiny AlSi9Cu3 [7]	22
Obr. 7 Změna tvrdosti HB slitiny AlSi9Cu3 [7]	23
Obr. 8 Dopad tepelné úpravy na pevnost R_m [8]	24
Obr. 9 Dopad tepelné úpravy na tvrdost HB [8].....	24
Obr. 10 Schéma výrobního procesu SLM [10].....	25
Obr. 11 Skenovací strategie chessboard [9]	27
Obr. 12 Povrchová mikrostruktura vzorků B(a) a F(b) [15].....	29
Obr. 13 Tahová zkouška vzorků A-H [9]	30
Obr. 14 Tahový diagram tepelně neupraveného a žíhaných vzorků [16].....	31
Obr. 15 Tahový diagram vzorků zpracovaných umělým stárnutím [16]	31
Obr. 16 Závislost tepelné úpravy na tvrdosti HV [16]	32
Obr. 17 Schematické znázornění směru stavby [14]	33
Obr. 18 (a) mechanické vlastnosti vzorku ($P=240W$, $v=500$ mm/s), (b) mechanické vlastnosti vzorku ($P=960W$, $v=1000$ mm/s) [14]	33
Obr. 19 Mechanické vlastnosti vzorku ($P=960W$, $v=1000$ mm/s, $T=200^\circ C$) [14]	34
Obr. 20 Závislost relativní hustoty na výkonu laseru a skenovací rychlosti [17]	34
Obr. 21 Závislost pevnosti R_m na skenovací rychlosti [17].....	35
Obr. 22 Závislost tvrdosti HB a pevnosti R_m slitiny AlSi9Cu3 na zvolené technologii zpracování.....	37

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Závislost nárazové práce a maximální síly na obsahu Cr [5]	18
Tab. 2 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 [7]	22
Tab. 3 Chemické složení slitiny [8]	23
Tab. 4 Rozdělení procesních parametrů [12].....	26
Tab. 5 Procesní parametry pro AlSi12 [9].....	28
Tab. 6 Mechanické vlastnosti testovacích vzorků [9].....	29
Tab. 7 Procesní parametry pro AlSi10Mg [16]	30
Tab. 8 Procesní parametry pro AlSi10Mg [13]	32