



Celulární a porézní kovové systémy (kovové pěny)

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Vojtěch Svoboda

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Celulární a porézní kovové systémy (kovové pěny)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Svoboda**
Osobní číslo: S18000367
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou kovových celulárních systémů (kovových pěn).
2. Na základě prostudované literatury se pokuste charakterizovat tyto systémy a jejich rozdělení. Zaměřte se hlavně na systémy, které se týkají především zpracování slitin hliníku.
3. Na základě prostudované literatury se pokuste vybrat jednu z technologií, která by se mohla aplikovat v našich podmínkách. Pokuste se na základě čistého hliníku nebo nějaké slitiny hliníku vyrobit tento systém. Charakterizujte jeho vlastnosti.
4. Zhodnoťte dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.

Seznam odborné literatury:

- [1] NOVÁ, I. a J. MACHUTA. Hliníkové pěny. *MM Průmyslové spektrum*, č. 12, 2007, s. 58.
- [2] BEDNÁŘOVÁ, V., LICHÝ, P. Lité porézní kovy – výroba a vlastnosti. *Slévárství LX*, leden – únor 2012, 1-2, s. 9.
- [3] ASHBY, M.F. et al. *Metal Foams. A Design Guide*. 1. ed., Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] BANHART, J. *Manufacturing Routes for Metallic Foams*. *Solidification Science: Over view Journal JOM* 52 (12) 2000, pp. 22-27.
- [5] RAJAK, D.K. KUMARASWAMIDHAS, L.A. and S. Das. *Technical Overview of Aluminum Alloy Foam*. *Advanced Material Science*. 48 (2017), pp. 68-86.

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2021


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

13. července 2020

Vojtěch Svoboda

Abstrakt

Bakalářská práce je řešena na téma „Celulární a porézní kovové systémy (kovové pěny)“. Je rozdělena do dvou základních částí – teoretické a experimentální. Teoretická část je zaměřena na charakteristiku celulárních a porézních kovových systémů. V dalším kroku jsou popsány jednotlivé technologie pro výrobu těchto lehčených dílů. Následovně je uvedena charakteristika hliníku a jeho slitin. Dále je popsán vliv přísadových prvků pro slitiny pro slitiny hliníku. Je zde popsána i základní charakteristika zinku a jeho slitin včetně vlivu přísadových prvků. Experimentální část se zabývá výrobou porézních vzorků slitin AlSi12 a ZnAl4 za pomoci metody lisování částic chloridu sodného do příslušné taveniny. Dále je zde popsán výpočet parametrů základních a porézních vzorků a vyhodnocení vlastností vyrobených porézních materiálů

Klíčová slova: slitina hliníku, celulární a porézní kovové materiály, chlorid sodný, slitina AlSi12

Abstract

The bachelor thesis is solved on the topic "Cellular and porous metallic systems (metallic foams)". It is divided into two parts - theoretical and experimental. The theoretical part summarizes the characteristics of cellular and porous metallic systems. The next step describes specific types of technology for the production of these lightweight metallic parts. Further, characteristics of aluminium and its alloys are explained. It also mentions influence of additional elements in aluminium alloys. It also describes basic characteristics of zinc and its alloys, including additional elements. The experimental part deals with the production of porous samples of AlSi12 and ZnAl4 alloys, using a method of pressing particles of sodium chloride into an aluminium alloy melt. The following is a calculation of parameters of basic and porous samples and evaluation of the properties of these porous materials.

Key words: aluminium alloy, cellular and porous aluminium materials, sodium chloride, AlSi12 alloy

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval především vedoucí mé bakalářské práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za velkou ochotu, vstřícnost, odborné vedení, cenné rady a trpělivost. Také bych velmi rád poděkoval mé rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

1.	ÚVOD	9
2.	TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	10
2.1	Kovové celulární systémy.....	10
2.1.1	Úvod.....	10
2.2	Charakteristika jednotlivých druhů kovových pěn.....	12
2.3	Jednotlivé druhy celulárních kovových systémů.....	13
2.3.1	Kovové pěny s otevřenými póry	13
2.3.2	Kovové pěny s uzavřenými póry	14
2.4	Charakteristika výroby jednotlivých druhů lehčených kovových systémů	14
2.4.1	Metody vstřikování plynu do taveniny	15
2.4.1.1	Metoda Cymat®.....	15
2.4.1.2	Metoda METCOMB®.....	16
2.4.2	Přimíchávání napěňovadla do taveniny	17
2.4.2.1	Metoda pro výrobu pěny ALPORAS®.....	17
2.4.2.2	Metoda GASAR	18
2.4.3	Výroba pěn z vylisovaných prášků směsí kovu a napěňovacího činidla.....	18
2.4.3.1	Metoda Alulight	18
2.4.3.2	Nízkotlaké odlévání	20
2.4.3.3	Válcování plechů do polotovaru	20
2.4.4	Výroba pomocí polymerové šablony	21
2.5	Výroba celulárních kovových dílů s použitím taveniny kovů a prostorových útvarů.....	22
2.5.1	Metoda EXXCENTIS®.....	22
2.6	Stanovení fyzikálních vlastností porézních materiálů	23
2.6.1	Stanovení hustoty pěny (ρ)	23
2.6.2	Stanovení relativní hustoty	24
2.6.3	Stanovení pórovitosti kovových napěněných vzorků (P).....	24
2.7	Hliník a slitiny hliníku	26
2.7.1	Čistý hliník.....	26

2.7.2	Slitiny hliníku	27
2.7.2.1	Vliv přísadových prvků ve slitinách hliníku	29
2.7.2.2	Slitiny hliníku pro výrobu odlitků	30
2.7.2.3	Slitiny hliníku pro tváření	31
2.8	Zinek a jeho slitiny	32
2.8.1	Vliv přísadových prvků ve slitinách zinku	33
2.8.2	Slitiny zinku	33
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	35
3.1	Charakteristika použitých slitin	35
3.2	Charakteristika chloridu sodného	37
3.3	Charakteristika slévárenské formy	37
3.4	Stanovení množství chloridu sodného a odlévané taveniny	38
3.5	Postup výroby vzorků porézních materiálů	39
3.6	Rozměry a hmotnost vyrobených vzorků	43
3.7	Vyhodnocení vlastností vyrobených porézních materiálů na základě lisování NaCl do taveniny příslušného materiálu	43
3.8	Hodnocení získaných výsledků	47
4.	SHRNUTÍ a DISKUSE VÝSLEDKŮ	48
5.	ZÁVĚR	50
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52

1. ÚVOD

V současné době je věnována značná pozornost materiálům, které mají významné uplatnění. K těmto materiálům se řadí celulární kovové systémy. Kovové celulární systémy (buněčné kovové struktury) neboli kovové pěny jsou dnes do jisté míry relativně novým druhem kovových materiálů. Vyznačují se specifickými vlastnostmi a nalézají uplatnění v celé řadě různých odvětví průmyslu, např. automobilovém a dopravním průmyslu. Konkrétně se jedná především o použití pěn z hliníku a jeho slitin v deformačních zónách a nárazových prvcích silničních a kolejových vozidel. Tyto pěny se uplatňují z důvodu jejich dobré schopnosti pohlcování nárazové energie. Vzhledem k relativně vysoké obtížnosti výroby a složitosti vývoje nových celulárních kovových materiálů, je pro jejich průmyslovou aplikaci velmi důležité stanovování jejich mechanických a fyzikálních vlastností. Zpočátku tyto vlastnosti byly ověřovány náročným experimentálním způsobem, který byl finančně velmi náročný. Postupem času, jak docházelo k vývoji dalších metod začala být vytvářena i metodika jejich zkoušení. V současné době se uplatňují metody zkoušení mechanických vlastností, stanovení Youngova modulu pružnosti a dále se stanovují fyzikální vlastnosti (hustota celulárního systému, relativní hustota, pórovitost, objem podílu tuhé fáze).

V České republice není známý výrobce těchto celulárních kovových systémů, které jsou označovány jako „kovové pěny“. To je asi dáno tím, že výroba těchto systémů je velmi složitá a vyžadovala by značné finanční náklady do jejich vývoje. Pracovníci Vysoké školy báňské – TU Ostrava v roce 2012 začali řešit projekt, který se zabýval výrobou porézniích kovů. Problematikou výroby celulárních kovových systémů, resp. kovových pěn se v současné době začínají zabývat pracovníci FS – Katedra strojírenské technologie, TU v Liberci.

Také s touto problematikou souvisí řešení mé bakalářské práce, která je zaměřena na téma: „Celulární a poréznií kovové systémy“.

2. TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

2.1 Kovové celulární systémy

2.1.1 Úvod

Výroba a výzkum celulárních kovových struktur je pro české strojírenství a metalurgii do jisté míry novinkou, protože v tomto směru u nás neexistuje výzkumná a výrobní instituce, která by se tímto problémem zabývala. Ve světě existuje jen několik institucí, které se výrobou celulárních kovových struktur zabývají, jejich výroba je patentovaná. Je nutné konstatovat, že každá z těchto metod je založena na trochu jiném metalurgickém principu. V širším slova smyslu je nutno uvést, že lehčené kovové systémy se dělí do dvou velkých skupin:

- A) Kovové pěny;
- B) Porézní kovové systémy.

V odborné literatuře je rozdělení výroby „kovových pěn“ dosti nepřehledné, k tomu přispívá i překlad názvů z anglické literatury. Lze tedy provést následující jednoduché rozdělení, podle BANHARTA [1] a doplněné rozdělením RAJAKA [6]:

- 1) Metody vstřikování plynu do taveniny
 - 1.1 Metoda Hydro/Alcan (firma Cymat)
 - 1.2 Metoda Metcomb
- 2) Přimíchávání napěňovadla do taveniny
 - 2.1 Metoda Alporas (Shinco Wire Company, Japonsko)
 - 2.2 Metoda Gasar (Gascar), zpracování v autoklávu.

Základem výroby pěn je prášek kovu (metoda práškové metalurgie)

- 3) Výroba pěn z vylisovaných prášků směsí kovu a pěnidla
 - 3.1 Lisováním práškových směsí a následným spěňováním ve formě v peci za tepla (obchodní názvy pěn Alulight, ASF a ALM, IFAM technologie);
 - 3.2 Nízkotlaké odlévání
 - 3.3 Válcování plechu do polotovaru
- 4) Výroba pěn pomocí polymerové šablony

Historie kovových celulárních systémů (kovových pěn) pochází z čtyřicátých let minulého století [5]. Od 20. století jsou celulární (buněčné) materiály konstruovány ze základních hutných materiálů [2],[3], především ze slitin hliníku. Jejich vlastnosti jsou systematicky zkoumány a podle jejich vlastností se stanovují jejich technické aplikace. Později se tyto buněčné materiály (cellular materials – cellular systems) začaly příznivěji označovat „pěny“ a u kovových systémů „kovové pěny“, [3]. Mnoho patentů bylo vydáno od konce padesátých let do sedmdesátých let a bylo navrženo mnoho variant pěnivých procesů. Zdálo se, že bylo vůbec něco publikováno vedle těchto patentů, je obtížné posoudit. A také zdálo se, že všechny navrhované myšlenky skutečně fungovaly. Podle BANHARTA [5] se od 50. let začala vyvíjet výroba hliníkových pěn, v Bjorksten Laboratories (BRL). Také z konce 50. let jsou zmínky o vývoji hliníkových pěn v USA, kde o 30 let později začala být jejich komercializace pod názvem kovové pěny (celulární kovy), [3]. Druhý prudký nárůst vědeckých aktivit od konce 80. let minulého století vedl k obnově některých starých technik a mnohem vyšší publikační aktivitě.

Jak upozorňuje BANHART [1], použití jazyka v této oblasti výzkumu je často nepřesné. BABANHART [2] pod pojmem „pěna“ rozumí směs plynu a pevné fáze, ve které jsou plynové bublinky navzájem izolovány, zatímco pevná matrice je nahodilá, která pochází z kapalných fází, ve kterých jsou bublinky uspořádány volně.

Velká část z výzkumu a vývojové práce na kovových pěnách v minulosti se zdála být prováděna především empiricky, bez podrobných znalostí základních mechanismů pěnivého procesu, tento postup rychle vedl k omezení. Když se aplikuje na velmi složitou oblast, jako je kovová pěna a žádná skutečná vědecká pochopení bylo někdy vyvinuto.

Je zřejmé, že myšlenka pění kovů je velmi stará a že většina dnes používaných technik byla navržena již v padesátých letech. Postupně od té doby docházelo k základním inovacím, které jsou dnes známé a které vedly k různorodosti způsobů zpracování, jsou neustále přezkoumávány a inovovány. Představují se nejdůležitější mezníky ve vývoji pěnivých technologií a některé pokusy o komercializaci kovových pěn. Soustavné zdokonalování metod umožňuje průmyslové aplikace, které se odehrály teprve nedávno.

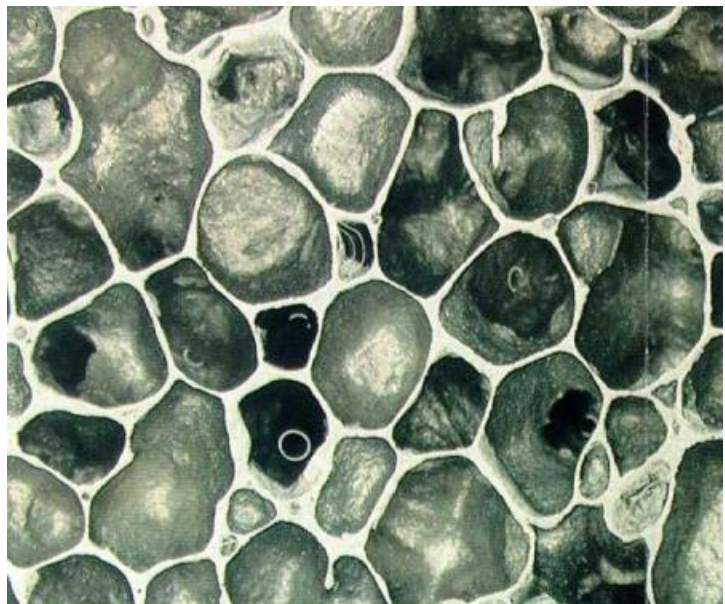
V roce 2000 byla publikována kniha „Metal Foams“ ASHBY et al. [4]. Tato kniha je pro tuto dobu základní a komplexní literaturou. Vznik této knihy byl podporován britskou radou pro vědu a výzkum při řešení ultralehkých kovových konstrukcí. Od té doby uplynulo mnoho času, v současné době je známo mnoho výzkumníků, kteří řeší mechanické vlastnosti celulárních systémů (kovových „pěn“).

2.2 Charakteristika jednotlivých druhů kovových pěn

Kovové pěny, viz obr. 2.1, jsou materiály se záměrně vytvořenou buněčnou strukturou, viz obr. 2.2, které vynikají výbornými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Díky buněčné struktuře mají kovové pěny nízkou hustotu (měrnou hmotnost). To však neznamená, že by ztrácely mechanickou pevnost a odolnost. Kvůli pórovité struktuře mají kovové systémy nejen nízkou hmotnost a hustotu, ale také výborné akustické vlastnosti, relativně malou tepelnou vodivost (v případě uzavřených pórů) a v neposlední řadě velmi dobře fungují jako absorbatory kinetické energie.



Obr. 2.1 Ukázka hliníkové pěny [1]



Obr. 2.2 Buněčná struktura kovové pěny [1]

Ke vzniku kovových pěn se dají použít různé druhy kovů (hliník, zinek, olovo, nikl, měď, hořčík, železo nebo titan). Nejvhodnější a nejčastěji využívaný je hliník a jeho slitiny. V dnešní době, kdy se hledí na ekologii, bezpečnost a nové technologie, se kovové pěny z hliníku nejvíce používají i díky snadné recyklovatelnosti, nehořlavosti, tlumícím a relativně příznivým deformačním schopnostem.

2.3 Jednotlivé druhy celulárních kovových systémů

Kovové celulární systémy jsou obecným pojmem pro charakteristiku materiálů v podobě kovových pěn. BANHART [1] upozorňuje na správnou identifikaci kovové pěny a je třeba rozlišovat:

Buněčné kovové systémy (cellular metals): nejobecnější termín, odkazující na kovové tělo, ve kterém jsou rozptýleny jakékoliv plynné dutiny. Kovová fáze dělí prostor do uzavřených buněk, které obsahují plynnou fázi.

Porézní kovové systémy - porézní pěny (porous metals): speciální typ buněčného kovu omezený na určitý typ dutin. Póry jsou obvykle kulaté a izolované od sebe.

Kovové houby (metal sponges): morfologie buněčného kovu, obvykle s propojenými dutinami. Obecně však všechny tyto systémy bývají v technické literatuře bez bližšího označení uváděny pod souhrnným označením *kovové pěny*.

Pojem porézní kov je obecný termín popisující materiál s vysokou pórovitostí, zatímco termíny pěnový kov nebo kovová pěna se používají pro pórovitý kov vyrobený napěňováním taveniny, póry nejsou vzájemně propojeny ("struktura s uzavřenými póry"). Kromě toho máme termín kovová houba, toto se používá pro vysoce porézní materiály, ve kterých jsou póry spojeny komplikovaným způsobem a strukturu nelze rozdělit na jednotlivé dutiny ("struktura s otevřenými póry") [1]. Pojem kovová pěna je velmi často používaný dokonce i v odborné literatuře jako obecné označení porézního materiálu.

2.3.1 Kovové pěny s otevřenými póry

Celulární a porézní kovové systémy, jak je výše uvedeno, se často obecně označují jako kovové pěny. Tyto materiály mohou mít otevřené a uzavřené buňky (póry). Kovové pěny s otevřenými póry disponují stochastickým rozložením materiálu v prostou, kde póry jsou navzájem propojené. Díky jednotlivým technologiím výroby se může pórovitost značně lišit. Velikosti jednotlivých pórů se mohou pohybovat od 0,1 až 7 mm.

Kovové pěny s otevřenými póry mají jedinečné vlastnosti. Právě díky otevřeným pórům mají předpoklad k použití jako tepelný výměník, kde z důvodu velkého povrchu dochází k vysoké hodnotě tepelné vodivosti, a tím pádem rychlejšímu přenosu tepla.

Kovové pěny s otevřenými póry se hojně používají i jako deformační prvky u dopravních prostředků, a to především pro svou schopnost výborně pohlcovat deformační energii. Narozdíl od kompaktního kovového bloku, se porézní systém dokáže sám do sebe deformovat a tím

pohltil velkou část kinetické energie. V neposlední řadě se pěny s otevřenými póry využívají díky vzájemnému propojení pórů a velké celkové plochy jako filtry.

2.3.2 Kovové pěny s uzavřenými póry

U kovových pěn s uzavřenými póry jsou jednotlivé póry, které tvoří plyn, navzájem odděleny. Díky tomu se nabízí využití v lodním průmyslu, jelikož, kvůli menší měrné hustotě, dokáže plavat na hladině vody.

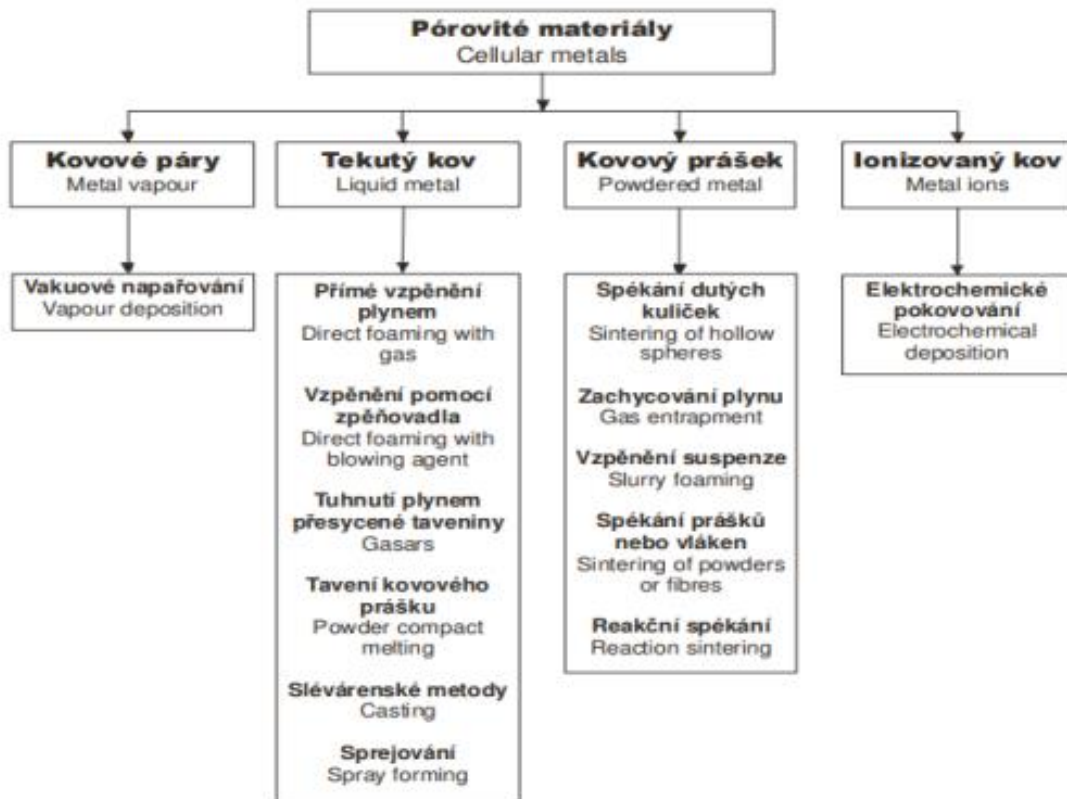
Nespornou výhodou je, že uzavřené póry zajišťují také dobrou akustickou schopnost a schopnost pohlcovat vibrace. Z toho se těší především ve stavebnictví, kde se kovové pěny s uzavřenými póry využívají jako tlumiče vibrací a hluku. Tlumič hluku z kovových pěn bude mít sice horší zvukoizolační vlastnosti než tlumič z polymerní pěny, avšak jeho tuhost a nehořlavost je v tomto případě rozhodujícím faktorem pro jeho využití. Další možností využití je jako protihlukové panely na pozemních komunikacích, které v případě nehody fungují jako deformační prvek.

2.4 Charakteristika výroby jednotlivých druhů lehčených kovových systémů

Technologií výroby kovových pěn je několik. Některé technologie jsou založeny na samotných vlastnostech kovových materiálů, například na schopnosti spékání, jiné se zase podobají výrobě polymerů.

Výběrem správné technologie dosáhneme kýžených vlastností pro aplikaci dané kovové pěny. Technologií výroby kovových pěn můžeme docílit pěny se strukturou s uzavřenými póry, jinou technologií zase například se vzájemně propojenými póry. Ovlivnit se dá jak pórovitost, která se může blížit až 97 %, tak i uspořádání pórů.

Výroba jednotlivých druhů celulárních systémů se od sebe liší stavem, ve kterém se nachází daný kov před zpracováním. Známe celkem čtyři základní skupiny výroby, podle počátečního stavu samotného kovu. Celulární systémy lze vyrobit z kovových par, tekutého kovu, kovového prášku, nebo dokonce z ionizovaného kovu.



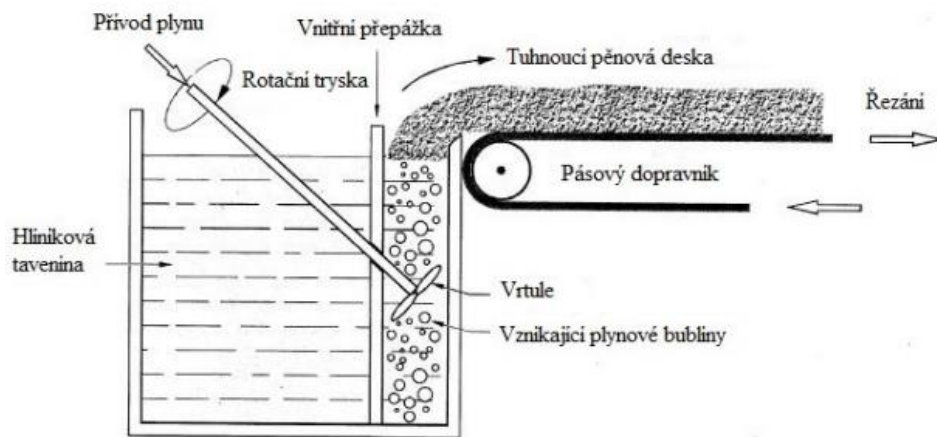
Obr. 2.3 Schéma jednotlivých technologií výroby [1]

2.4.1 Metody vstřikování plynu do taveniny

2.4.1.1 Metoda Cymat®

Je metoda kdy se z externího zdroje do taveniny vhání plyn, využívá kanadská firma Cymat Crop. Tato firma získala patenty od společností Alcan International Inc. a Norsk Hydro. Schéma metody je na obr. 4. U této metody se používají keramické částičky prášku (karbid křemíku, oxid hlinitý, oxid hořečnatý) jako aditivum zajišťující zvýšenou viskozitu, které se do taveniny přimíchává. Tyto keramické částice mají velikost přibližně 5 až 20 μm , což způsobuje rychlejší opotřebení řezných nástrojů a hlavně k velmi obtížné recyklovatelnosti. Pomocí vibrujícího nebo odstředivého dmychadla, které má za úkol vytvořit a rovnoměrně rozložit

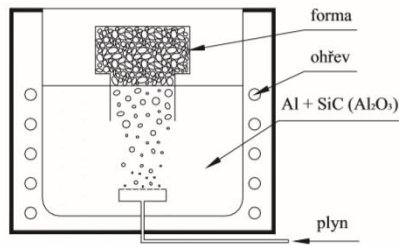
jemné vzduchové bublinky, se vhání plyn (vzduch, argon, dusík). Tato vzniklá hliníková pěna se pohybuje po dopravním pásu z tavicí pece, kde tuhne. Tloušťka takto vyrobené celulární desky se pohybuje kolem 10 cm. Hlavní výhodou spočívá v relativně levné výrobě většího množství porézních desek, avšak neduh této metody je již zmiňovaná problematická recyklovatelnost.



Obr. 2.4 Metoda přímého vstřikování plynů do taveniny se zvýšenou viskozitou [1]

2.4.1.2 Metoda METCOMB®

Je podobného principu využívá metoda s obchodním označením METCOMB®, na jejímž vývoji spolupracovali rakouské firmy LKR (Leichtmetall-kompetenzzentrum Ranshofen) a Hütte-Klein-Reichenbach. Podobnost s Cymatem spočívá ve vytváření pórů z plynů, které se vhání do taveniny. Plyny postupně probublávají taveninou směrem k povrchu taveniny tak, aby se nahromadily v dutině zpeňovací formy. Na rozdíl však od Cymatu, která se využívá především k výrobě horizontálně kontinuálně odlévaných pěnových desek, se tato nízkotlaková metoda lití využívá hlavně k výrobě složitějších strojních tvarů a součástek, kde je povrchová vrstva celistvá s pórovitým jádrem. Do hliníkové pěny se za účelem stabilizace pěny přidávají částice SiC nebo Al_2O_3 .



Obr. 2.5 Znárodnění metody METCOMB[®] pro výrobu hliníkových pěn [7]

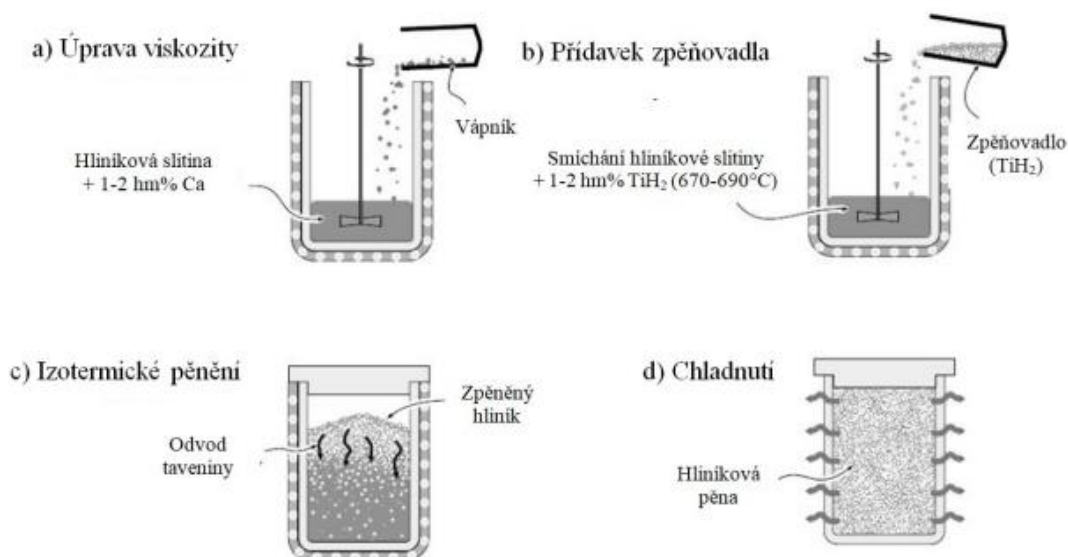
2.4.2 Přimíchávání napěňovadla do taveniny

2.4.2.1 Metoda pro výrobu pěny ALPORAS[®]

Je založená na zpěňování pomocí napěňovacího činidla. Tento způsob výroby byl vyvinut japonskou firmou Shinko Wire Company, která se zabývá problematikou kovových pěn už od roku 1986 a lze jej nalézt pod obchodním názvem ALPORAS[®]. Schéma metody pro výrobu napěňovaných kovových systémů ALPORAS[®] je na obr. 6.

V prvním kroku se při dostatečné teplotě (cca 680°C) přimíchává po dobu asi deseti minut kovový vápník (cca 2 hm. %), který zajistí větší viskozitu. Po dosažení kýžené viskozity se pro získání bublin aplikuje do taveniny hydrid titanu (TiH₂), který se právě při teplotě okolo 680°C začíná rozkládat a umožňuje tak vzniku vodíkových bublinek.

Takto získaná pěna má vysoce homogenní strukturu, kde jednotlivé póry jsou uzavřené a to předurčuje k použití těchto pěn pro účely, kde jsou žádoucí vlastnosti jako dobrá tepelná či zvuková izolace. Časté použití je tedy v designu, lehkých sendvičových panelech nebo odlitků. Hlavním neduhem této metody je malá pevnost v tahu kvůli odřezání povrchové licí vrstvy. Kvůli příměsi kovového vápníku se setkává se špatnou recyklovatelností.



Obr. 2.6 Schéma metody pro výrobu ALPORAS® [4].

2.4.2.2 Metoda GASAR

Je metoda, při které dochází k tuhnutí hliníkové taveniny ve společnosti s přesyceným plynem (vodík). Využívat se dají i jiné kovy (Fe, Mn, Cr a další). Cílem je dosáhnout eutektické koncentrace, která se zajišťuje ve vodíkové atmosféře s řízeným tlakem.

Poté následuje řízené ochlazení taveniny. Výsledný produkt obsahuje velké množství buněk (lotusů). Množství těchto buněk se dá regulovat například samotným chemickým složením, tlakem vodíku, nebo rychlostí chlazení taveniny. Tato metoda je však velmi nákladná a vyžaduje vysokou míru bezpečnosti při výrobě.

2.4.3 Výroba pěn z vylisovaných prášků směsí kovu a napěňovacího činidla

2.4.3.1 Metoda Alulight

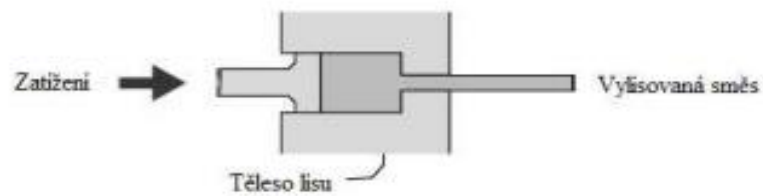
Jedná se o práškovo-metalurgický způsob výroby pěnového hliníku. U této metody je zásadní první krok - důkladné promíchání zpěňovacího činidla (TiH₂, popř. ZrH₂) s práškovým hliníkem. Dalším krokem je izostatické válcování nebo lisování za studena. To dá vzniku polotovaru, ze kterého je následně potřeba za tepla vyrobit pláty nebo tyče (protlačovacím lisováním). Nařezané výlisky pak dáme do uzavřené formy. Tím je docíleno rovnoměrné rozložení pěnícího činidla po celém objemu matrice. Ohříváním směsi nad teplotou solidu způsobuje rozkládání TiH₂, tím dochází k expandování (pění) vodíku v polotuhém stavu.

Celý obsah nádoby se vyplní uzavřenými buňkami o průměru v rozsahu od 1 do 5 mm. Po ztuhnutí vzniká součást z porézního hliníku se souvislou povrchovou vrstvou, která zlepšuje jeho mechanické vlastnosti [16].

Smíchávání přísad



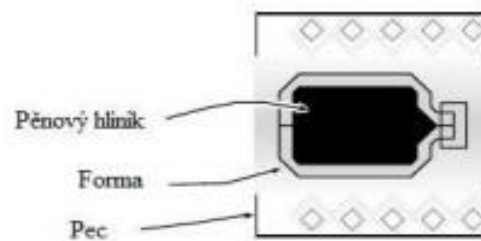
Lisování



Nařezané výlisky



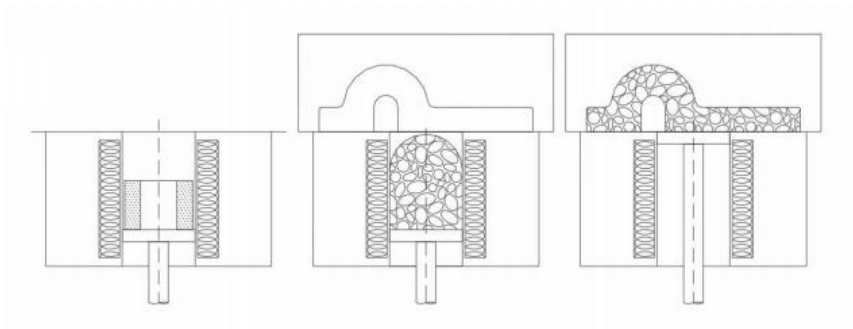
Pěnění



Obr.2.7 Schéma metody pro výrobu Alulight [16]

2.4.3.2 Nízkotlaké odlévání

Tento způsob výroby byl patentován roku 1999. Jedná se o relativně rychlou a jednoduchou metodu pro výrobu lehčených hliníkových součástí, se kterou je možné vyrobit i složitější součásti. Na obr. 2.8 je vidět speciální kontejner, ve kterém dochází k roztavení a následnému zpěňování. Takováto napěněná směs hliníku pomalu vyplní objem kontejneru a následně se pomocí tlaku pístu vžene do již připravené formy požadovaného tvaru.



Obr.2.8 Nízkotlaké odlévání [16]

2.4.3.3 Válcování plechů do polotovaru

Tato metoda se nejčastěji využívá k výrobě sendvičových panelů. Díky plechům má takovýto díl lepší pevnostní vlastnosti. Rovný a celistvý povrch značně usnadňuje jeho použití do různých konstrukčních sestav a zařízení. Jádrem samotného sendviče je z již známé směsi práškového hliníku a napěňovačů (TiH_2). Rozdíl však nastává v lisování za tepla, kdy se do povrchu polotovaru zaválcuje nerezový nebo hliníkový plech. K dokonalému přilnutí plechu s jádrem dojde po opětovném vložení do formy, kde sendvič zahříváme nad teplotu solidu taveniny.

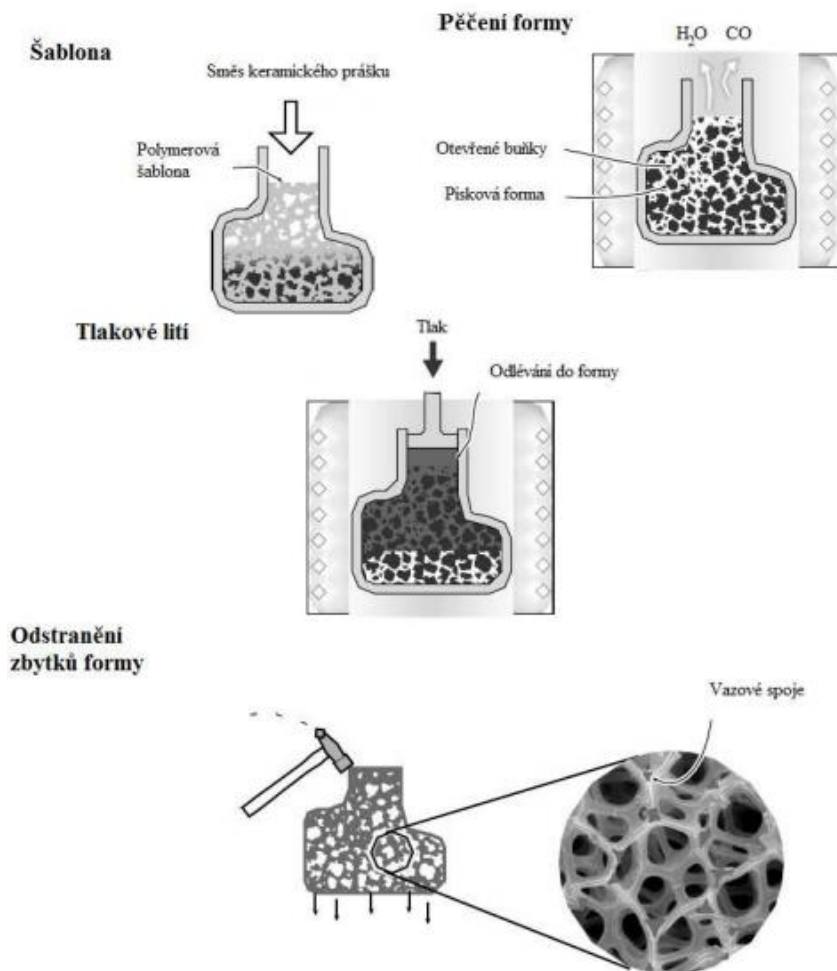


Obr.2.9 Zaválcovaný plech v hliníkové pěně [16]

2.4.4 Výroba pomocí polymerové šablony

U této metody je možné vyrábět porézní díly s minimální hustotou. V extrémním případě může takto vytvořená pěna zaujmout pouze 3% z celkového objemu. Výborně pohlcují nárazovou energii, což se dá výborně uplatnit například v automobilové průmyslu nebo pro armádní účely. Z takovýchto pěn se dají vyrábět kupříkladu i výměníky tepla.

Nejprve se musí vyrobit šablona z polymerní pěny s požadovaným tvarem a velikostí jednotlivých buněk, na kterou se nanese vlhký keramický prášek. Po samovolném vysušení prášek dokonale přilne k polymerové šabloně. Následuje vypékání polymerní pěny v peci až do úplného odpaření. Takto se získá negativ polymerní šablony, kterou poté tlakovým litím vyplníme. Formu s taveninou necháme vychladit a nakonec už jen odstraníme zbytky písku.



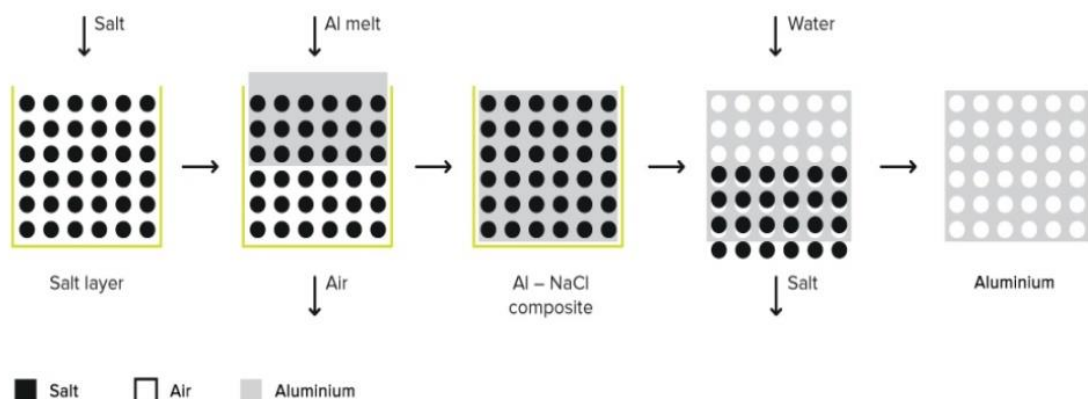
Obr. 2.10 Výroba pomocí polymerové šablony [16]

2.5 Výroba celulárních kovových dílů s použitím taveniny kovů a prostorových útvarů

2.5.1 Metoda EXXCENTIS®

Je metoda, kterou se vyrábí kovové porézní díly, nejčastěji z hliníku a jeho slitin, s využitím částic např. chloridu sodného (NaCl). Schéma metody je na obr. 7. Získání porézního hliníku, se dá dostat i vcelku jednoduchým způsobem, který využívá švýcarská firma EXXCENTIS. Ta tuto problematiku řeší za pomoci solných zrn, která jsou využívána jako jádra samotného porézního systému. Tato technologie vyniká tím, že se dá kontrolovat objemová pórovitost, regulovat velikost pórů zvolením správné krystalické soli, vysokou pevností a nízkou hmotností (až 65% pórů). Porézní hliník má vysoký měrný povrch a je zcela propustný. Kombinace těchto vlastností také dělá pórovitý hliník velmi atraktivním pro výrobu výměníků tepla nové generace. Porézní hliník je díky své otevřené buněčné struktuře a vysoké měrné ploše také materiálem s velmi dobrými zvukově izolačními vlastnostmi. Filtry a filtrační prvky vyrobené z porézního hliníku mají větší objemovou pórovitost než sintrované filtrační prvky. Obzvláště důležitý rozdíl mezi porézním hliníkem a slinutými kovy spočívá ve struktuře pórů. Struktura pórů těchto porézních materiálů je obrácená. Póry ze slinutých kovů jsou kanály mezi kovovými kuličkami. V porézním hliníku jsou kanály mezi částčkami soli a později mezi póry vyplněny hliníkem. Póry z porézního hliníku mají více prostoru, objemu a proto mnohem větší kapacitu nečistot než slinované kovy.

Použití NaCl, jako výplně porézního systému, má různé výhody, kupříkladu výbornou rozpustnost v různých roztocích a vodě, ale hlavní výhodou je však teplota tání, která je 801°C. Proto se velmi hodí pro použití s kovy, jejichž teplota tání je nižší než teplota tání soli, například s hliníkem.



Obr. 2.11 Schematický postup firmy Exxentis dosažení porézního systému pomocí krystalické soli [18]

2.6 Stanovení fyzikálních vlastností porézních materiálů

2.6.1 Stanovení hustoty pěny (ρ)

Hustota hustoty pěny se stanovuje fyzikálním výpočtem podle známého vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} [kg \cdot m^3], \quad (2.1)$$

kde značí: V – objem vzorku pěny [m^3], m – hmotnost vzorku pěny [kg].

Z fyzikálního vztahu (2.1) lze hustotu stanovit přímo, na základě zjištění hmotnosti tělesa m vážením a současně zjištění objemu tělesa V . U jednoduchých geometrických tvarů, lze zjistit objem vypočteme na základě změřených délkových rozměrů tělesa. V ostatních případech se objemy těles stanovují z přímého měření objemů kapalin. Do těchto kapalin se ponořují sledovaná tělesa, na kterých se stanovuje objem. Je nutné mít kapalinu v odměrné nádobě (např. odměrný válec). Pokud však se musí ke stanovení objemu použít odměrná nádoba, bývá přímá metoda měření hustoty málo přesná (relativní chyba při měření objemu bývá nejméně 1 % a více; přesnost vážení, která se pohybuje zhruba kolem 0,1 %, zůstane tak nevyužita). Proto při přesnějším sledování hustoty nahrazujeme málo přesnou přímou metodu metodami nepřímými, u kterých měření objemu se zpravidla nahrazujeme tzv. druhým vážením (úloha se také nazývá hydrostatická). Hydrostatická metoda je metoda vhodná pro určování hustoty těles nepravidelného tvaru. Je založena na platnosti Archimedova zákona. Měření spočívá ve dvojnásobném vážení daného tělesa na upravených laboratorních vahách. První vážení vyšetřovaného tělesa se provádí ve vzduchu, hmotnost se označuje m_v .

Pro rovnováhu na vzduchu platí:

$$V \cdot g \cdot (\rho - \rho_v) = m_v \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_z}\right), \quad (2.2)$$

kde značí: ρ - zjišťovanou hustotu tělesa [$kg \cdot m^{-3}$]; V – objem sledovaného tělesa [m^3]; ρ_v – hustotu vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$]; ρ_z – hustotu závaží [$kg \cdot m^{-3}$]; m_v - hmotnost tělesa stanovenou vážením na vzduch [kg].

Při druhém vážení je sledované těleso zcela ponořeno do kapaliny o známé hustotě ρ_k . Nejčastěji používanou kapalinou je destilovaná voda, jejíž hustota je tabelovaná. Těleso vyvážíme závažím o hmotnosti m_k .

Pro rovnováhu po druhém vážení lze psát:

$$V \cdot g \cdot (\rho - \rho_K) = m_K \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_V}{\rho_Z}\right), \quad (2.3)$$

Po matematických úpravách rovnice (2.3) lze stanovit vztah pro určení hustoty sledovaného tělesa:

$$\rho = \left(\frac{\rho_K \cdot m_V - \rho_V \cdot m_K}{m_V - m_K}\right), \quad (2.4)$$

kde značí: ρ_K – hustota známé kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; m_K – hmotnost známého závaží při vážení v kapalině [kg]; ρ_V – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; m_V – hmotnost známého závaží při vyvážení na vzduchu [kg].

2.6.2 Stanovení relativní hustoty

Stanovení relativní hustoty pěny (ρ_{REL}) – je podílem hustoty napěněného materiálu (hliníkové pěny – Al. P.) k hustotě nenapěněného materiálu (B.M.):

$$\rho_{REL} = \frac{\rho_{ALP.}}{\rho_{B.M.}}, \quad (2.5)$$

kde značí: ρ_{REL} - relativní hustotu kovové pěny [1]; $\rho_{ALP.}$ – hustotu pěny (porézního kovového materiálu) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; $\rho_{B.M. (Al)}$ – hustotu základního (nenapěněného) materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

2.6.3 Stanovení pórovitosti kovových napěněných vzorků (P)

Pórovitost - je podílem rozdílu hustoty nenapěňovaného materiálu a napěněného materiálu (hliníkové pěny – Al. P.) k hustotě nenapěněného materiálu (B.M.):

$$P = \left(\frac{\rho_{B.M.} - \rho_{ALP.}}{\rho_{B.M.}}\right) \cdot 100 [\%] \quad (2.6)$$

V tabulce 2-1 jsou empirické vztahy pro stanovení hodnot veličin mechanických vlastností celulárních systémů (kovových pěn), které jsou rozděleny do dvou skupin, podle charakteru buněk pěny (otevřených a uzavřených).

Tabulka 2-1 Vztahy pro výpočet mechanických vlastností kovových celulárních systémů podle ASHBYHO [4]

<i>Vztahy pro stanovení mechanických vlastností kovových celulárních systémů</i>		
<i>Veličina</i>	<i>Pěny s otevřenými Buňkami</i>	<i>Pěny s uzavřenými buňkami</i>
Youngův modul pružnosti E [MPa]	$E = (0,1 \div 4)E_S \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^2$	$E = (0,1 \div 4)E_S \cdot \left[0,5 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^2 + 0,3 \cdot \frac{\rho}{\rho_S}\right]$
Modul ve smyku G [MPa]	$G \approx \frac{3}{8} \cdot E$	$G \approx \frac{3}{8} \cdot E$
Modul stlačitelnosti K [MPa]	$K \approx 1,1 \cdot E$	$K \approx 1,1 \cdot E$
Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]	$E_f \approx E$	$E_f \approx E$
Poissonovo číslo μ [1]	0,32 ÷ 0,34	0,32 ÷ 0,34
Pevnost v tlaku σ_c [MPa]	$\sigma_c = (0,1 \div 1,0) \cdot \sigma_{c,S} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^{3/2}$	$\sigma_c = (0,1 \div 1,0) \cdot \sigma_{c,S} \cdot \left[0,5 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^{2/3} + \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)\right]$
Pevnost v tahu σ_t [MPa]	$\sigma_t \approx (1,1 \div 1,4) \cdot \sigma_c$	$\sigma_t \approx (1,1 \div 1,4) \cdot \sigma_c$
Napětí na mezi únavy σ_E [MPa]	$\sigma_E \approx (0,5 \div 0,75) \cdot \sigma_c$	$\sigma_E \approx (0,5 \div 0,75) \cdot \sigma_c$
Deformace do zhutnění ε_D	$\varepsilon_D = (0,9 \div 1,0) \cdot [(1,0 - 1,4) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right) + \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^3]$	$\varepsilon_D = (0,9 \div 1,0) \cdot [(1,0 - 1,4) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right) + \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^3]$

Ztrátový součinitel η [1]	$\eta = (0,95 \div 1,05) \cdot \frac{\eta_s \cdot \rho_s}{\rho}$	$\eta = (0,95 \div 1,05) \cdot \frac{\eta_s \cdot \rho_s}{\rho}$
Tvrdoost H [MPa]	$H = \sigma_c \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{\rho_s}\right)$	$H = \sigma_c \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{\rho_s}\right)$
Iniciace lomu J_{IC} [J·m ⁻²]	$J_{IC} = (0,1 \div 0,4) \cdot \sigma_{y,s} \cdot l \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{(1,3 \div 1,5)}$	$J_{IC} = (0,1 \div 0,4) \cdot \sigma_{y,s} \cdot l \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{(1,3 \div 1,5)}$

Tabulka 2-2 Vztahy pro výpočet elektrických vlastností kovových celulárních systémů, podle ASHBYHO [4]

<i>Vztahy pro stanovení tepelných vlastností kovových celulárních systémů</i>		
<i>Veličina</i>	<i>Pěny s otevřenými buňkami</i>	<i>Pěny s uzavřenými buňkami</i>
Teplota tání T_{TA} [°C]	jako u nenapěněných materiálů	jako u nenapěněných materiálů
Maximální provozní teplota T_{MAX} [K]	jako u nenapěněných materiálů	jako u nenapěněných materiálů
Minimální provozní teplota T_{MAX} [K]	jako u nenapěněných materiálů	jako u nenapěněných materiálů
Měrná tepelná kapacita c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	jako u nenapěněných materiálů	jako u nenapěněných materiálů
Tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{1,8} < \frac{\lambda}{\lambda_s} < \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{1,65}$	$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{1,8} < \frac{\lambda}{\lambda_s} < \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{1,65}$
Koeficient teplotní roztažnosti α [K ⁻¹]	jako u nenapěněných materiálů	jako u nenapěněných materiálů
Latentní teplo L [J·kg ⁻¹]	jako u nenapěněných materiálů	jako u nenapěněných materiálů
<i>Vztahy pro stanovení elektrických vlastností kovových celulárních systémů</i>		
Elektrický odpor R [10 ⁻⁸ ·Ω·m]	$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{-1,6} < \frac{R}{R_s} < \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{-1,85}$	$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{-1,6} < \frac{R}{R_s} < \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{-1,85}$

2.7 Hliník a slitiny hliníku

2.7.1 Čistý hliník

Hliník je nejrozšířenější kov v zemské kůře, podle posledních dostupných údajů hliník je zastoupen v zemské kůře z 7,5 až 8,3 %. Jeho průmyslová výroba byla patentována až

v roce 1886 a to z důvodu jeho poměrně složitého způsobu výroby. Je to především z toho důvodu, že elementární hliník nelze jednoduše metalurgicky vyredukovat z jeho rudy ve vysoké peci jako např. železnou rudu za přítomnosti koksu ve vysoké peci. Teprve s objevením elektrického proudu a následným zvládnutím průmyslové elektrolýzy přečištěného bauxitu a kryolitu o teplotě cca 950 °C na katodě vylučuje hliník a na grafitové anodě vzniká kyslík, který ihned reaguje s materiálem elektrody za vzniku toxického plynného oxidu uhelnatého CO, MICHNA [7].

V současné době je v technické praxi velké uplatnění slitin hliníku. Důvodem je především velmi výhodná kombinace fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností. Slitiny hliníku patří kromě ocelí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Největší část produkce hliníku se spotřebovává v dopravě (60%), následuje stavební, strojírenský, elektrotechnický a potravinářský průmysl [7].

Čistý hliník je stříbrobílý nepolymorfní kov krystalizující v soustavě FCC, s nízkou hustotou 2700 kg·m⁻³ a teplotou tání 660°C. Jeho hlavními výhodami jsou dobrá elektrická a tepelná vodivost, vysoká měrná tepelná kapacita, dobrá tvárnost za studena i za tepla a dobrá svařitelnost v ochranné atmosféře. Mechanické vlastnosti hliníku ovlivňuje stupeň čistoty a způsob zpracování. Ve vyžíhaném (měkkém) stavu má hliník pevnost v tahu 60 MPa a tažnost 25 %, tvářením za studena lze jeho pevnost zvýšit. Vykazuje dobrou tepelnou a elektrickou vodivost a relativně dobře odolává korozi v atmosféře a slabším kyselinám. To však neplatí u alkalických látek. Mezi nevýhody můžeme zařadit nízkou tvrdost 15 až 23 HB (snadné zhmoždění povrchu) a obtížné třískové obrábění. Naopak slitiny hliníku však mohou dosáhnout tvrdost až 170 HB a také vysokou pevnost a to až 550 MPa. Na vzduchu je hliník stálý. Vykazuje velkou slučivost s kyslíkem za vzniku Al₂O₃ (teplota tání cca 2000 °C), která se vytváří na jeho povrchu a chrání ho před další oxidací. Hliník poměrně dobře odolává i mořské vodě, slabším kyselinám, koroduje však ve styku se zásaditými látkami, [7].

2.7.2 Slitiny hliníku

S ohledem ke skutečnosti, že čistý hliník nemá v některých případech zcela vhodné mechanické a technologické vlastnosti, je snaha k hliníku přidat další vhodné prvky a získat jeho slitiny. V souvislosti s příslušným chemickým složením se slitiny hliníku dělí na:

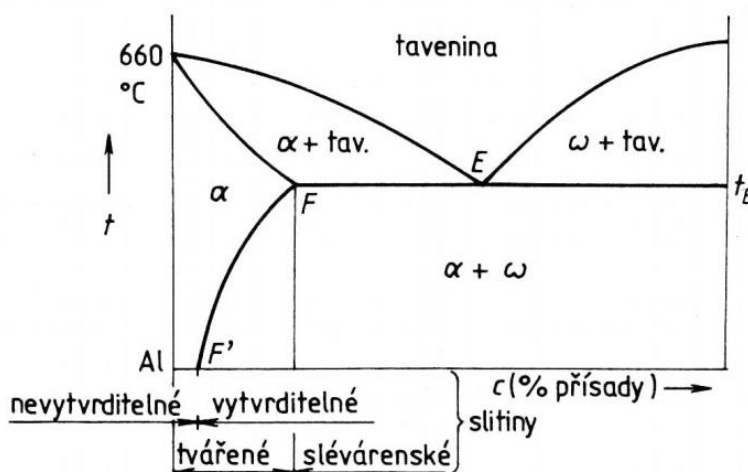
- slitiny pro tvářením,

- slitiny pro odlévání.

Podle možnosti precipitačního vytvrzování se slitiny hliníku dělí na:

- slitiny vytvrditelné,
- slitiny nevytvrditelné.

Na obr. 2.12 je schematicky naznačeno rozdělení slitin hliníku. Z obr. 2.12 je patrné, že pro tváření jsou vhodné slitiny s nižšími obsahy přísadových prvků. To je do koncentrace, která odpovídá bodu F na diagramu, viz obr. 2.12. To znamená, že v mikrostruktuře těchto slitin bude převládat tuhý roztok (α) přísadového prvku v hliníku. U slitin s vyšším obsahem přísadového prvku, než odpovídá bodu F, se v jejich mikrostruktuře vyskytuje eutektikum, (jsou méně tvárné za tepla), vykazují velmi dobré slévárenské vlastnosti. Jak je obecně známo, nejlépe slévateľné jsou slitiny eutektického složení. Precipitačním vytvrzováním se zlepšují mechanické vlastnosti především u slitin v rozmezí koncentrací F' a F . Ze slitin k odlévání jsou pro vytvrzování vhodné pouze ty, které obsahují v mikrostruktuře menší množství eutektika a současně je možnost na základě jejich chemického složení predikovat precipitační fázi, např. Al_2Cu , jako je tomu při použití slitiny $AlSi9Cu3$.



Obr. 2.12 Obecné schéma rovnovážného diagramu s částečnou rozpustností v tuhém stavu, s vyznačením základního rozdělení slitin hliníku [8]

Nejčastější dělení slitin hliníku bylo podle způsobu tepelného zpracování, respektované normami ČSN. Podle těchto norem bylo registrováno 18 slitin hliníku pro tváření a 16 slitin hliníku pro slévárství, resp. výrobu odlitků, [9]. Od roku 2000 jsou slitiny hliníku normovány podle evropské normy ČSN EN. Slitiny pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3.

Slitiny hliníku pro výrobu odlitků podle ČSN EN 1706. Tyto normy nahradily naše dřívější normy ČSN 4243xx a 4245xx.

2.7.2.1 Vliv přísadových prvků ve slitinách hliníku

Slitiny hliníku díky jejich hlavním přísadovým prvkům, vykazují lepší technologické i mechanické vlastnosti. Hlavními přísadovými prvky ve slitinách hliníku jsou Si, Mg, Cu, Mn, a Zn.

- Křemík je jedna z nejpoužívanějších přísad především u slévárenských slitin a to díky zlepšování technologických vlastností – odolnější na vznik trhlin, lepší tekutost. S rostoucím procentem obsahu křemíku ve slitinách se zlepšuje tvrdost, ale zároveň se snižuje obrobitelnost a tvárnost těchto slitin.
- Hořčík umožňuje vytvrditelnost, zvyšuje korozní odolnost a zlepšuje pevnost - přísadách 0,25 až 0,7 % Mg umožňuje vytvrzování slitin Al-Si, kterým lze více než zdvojnásobit jejich pevnost.
- Měď patří k velmi častým přísadám ve slitinách hliníku. Zvyšuje tepelnou vodivost, tvrdost a pevnost. Zlepšuje obrobitelnost hliníkových slitin. Má špatnou odolnost proti korozi, zhoršuje tvárnost a je větší možnost vzniku trhlin.
- Mangan zvyšuje pevnost, tvárnost a odolnost proti korozi. Zjemňuje strukturu a eliminuje negativní vliv železa.
- Zinek je vhodný především v kombinaci s dalšími prvky (Cu, Mg). Takovéto slitiny je možné tepelně zpracovávat a vytvrzovat. Ve slitinách určených pro tváření ho bývá až do 8 %, ve slévárenských slitinách maximálně do 6 %.
- Železo ve slitinách zvyšuje pevnost, avšak snižuje korozní odolnost. Přísady 0,9 až 1,0 % železa se používají převážně pro tlakové lití – potlačení lepení slitiny na formu. Vyšší obsah železa způsobuje horší tvárnost a obrobitelnost. Maximální podíl železa je 1,6% pro tvářecí slitiny a 1% železa pro slitiny slévárenské.

- Nikl zvyšuje pevnost a houževnatost. Napomáhá také k lepší korozní odolnosti. Nikl s obsahem do 2% v kombinaci s Si nebo Cu zvyšují pevnost a tvrdost za vyšších teplot. Tyto slitiny se často využívají například pro výrobu hlav válců spalovacích motorů.

Další prvky se používají jen v malých množstvích. Dokáží například zjemňovat zrna, zlepšovat obrobitelnost nebo zlepšit vylepšit vlastnosti u ložiskových slitin.

2.7.2.2 Slitiny hliníku pro výrobu odlitků

Slitiny hliníku pro výrobu odlitků, jsou v podstatě slévárenské slitiny hliníku. Tyto slitiny se vyznačují řadou vlastností, které jsou: dobrá slévatelnost, která se výrazně zvyšuje podílem příslušného eutektika podle chemického složení, nízká teplota tavení, malý interval teplot při krystalizaci a tuhnutí odlitků, obsah vodíku v tavenině slitiny hliníku je jediným rozpustným plynem v hliníku, který lze minimalizovat vhodnými technologickými podmínkami odplyňování, nízká náchylnost k tvorbě trhlin, atd.

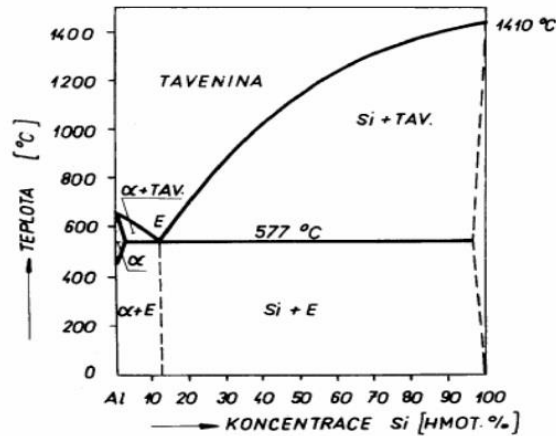
Taveniny těchto slitin lze odlévat do pískových, keramických, sádrových a kovových slévárenských forem. Hlavní přísadou slévárenských slitin hliníku je křemík. Mechanické hodnoty odlitků nedosahují hodnot tvářených výrobků a velmi závisí na způsobu odlévání. Pevnost v tahu bývá maximálně 250 MPa a to především u odlitků vyrobených litím do kovových forem gravitačním způsobem, kdy se dosahuje jemné struktury. Výroba odlitků vysokotlakým způsobem je spojena s jejich mikroporozitou. Naopak u lití do písku vzniká hrubá struktura, která snižuje pevnost výrobku.

Slitiny Al-Si se označují pod obchodním názvem *Siluminy*, viz rovnovážný diagram Al-Si na obr. 2.2. Siluminy jsou nejdůležitější slitiny hliníku pro odlévání. Podle obsahu křemíku se rozdělují na podeutektonické (pod 11,7% Si), eutektonické (přibližně 11,7% Si) a nadeutektonické (11,7% až 24% Si). Jak je z obr. 2.2 patrné, rozpustnost křemíku v hliníku je nepatrná, při eutektické teplotě 577 °C činí 1,65 hmot. % křemíku. S klesající teplotou rozpustnost křemíku v hliníku klesá. Eutektický bod odpovídá 11,7 hmot. % křemíku. Nejlepší vlastnosti pro slévání mají siluminy s eutektickým složením. To byl důvod, proč při experimentech této bakalářské práce byla použita slitina hliníku AlSi12 (viz kapitola 3 této bakalářské práce). Hustota hliníkové slitiny AlSi 12 je 2650 kg·m⁻³. Výborně odolávají korozi, avšak pro použití pro složité tvarové odlitky jsou nevhodné. K odlévání tvarových odlitků se

používají speciální siluminy, které obsahují další přísady a a tím jsou pevnější. Zvýšené pevnosti dosáhneme přidáním Mg a Cu, kdy tyto slitiny lze poté vytvrzovat.

Obr. 2.13 Rovnovážný binární diagram soustavy Al-Si [9]

Slitiny Al-Mg, tyto slitiny nacházejí uplatnění především tam, kde se vyžaduje vysoká měrná



pevnost a rázová houževnatost. Její obrobiteľnosť je dobrá, avšak nevyniká slévarenskými vlastnostmi. Přidáním křemíku se dá docílit lepší zabíhavosti a zvýšení hustoty odlitků. Přidáním zinku zase zlepšíme její korozní odolnost. Uplatnění nachází například v automobilovém průmyslu, kde se využívají na dílech náprav dopravních prostředků.

Slitiny Al-Cu, slitiny tohoto druhu jsou vhodné na použití součástí, které jsou tepelně zatěžovány. Mají velmi malou teplotní roztažnost a kluznost, která roste s obsahem křemíku ve slitině. Odlitek z této slitiny nachází použití například u hlavy válců spalovacího motoru automobilu.

2.7.2.3 Slitiny hliníku pro tváření

Slitiny hliníku pro tváření se rozdělují do dvou základních skupin. Slitiny nízkopevnostní a slitiny s vyšší a vysokopevnostní. Zpravidla mají nízkopevnostní slitiny dobrou odolnost proti korozi a vysokopevnostní slitiny nízkou.

Nízkopevnostní slitiny hliníku, do této skupiny patří například Al-Mg a Al-Mn, které neobsahují měď, což jim zaručuje dobrou odolnost proti korozi bez nutnosti povrchové ochrany, avšak je dále nelze tepelně vytvrzovat. Díky svým korozivzdorným vlastnostem mají uplatnění pro použití v mořské vodě, zdravotnictví a chemickém průmyslu.

Do nízkopevnostních slitin řadíme i slitiny Al – Mg – Si. Ty se vyznačují tím, že mají jen malý podíl přísadových prvků (do 1,5%). Díky Si lze (na rozdíl od Al-Mg) tyto slitiny

vytvrzovat, což napomáhá k dosažení lepší meze pevnosti v tahu, která může být až 350 MPa. Jsou dobře svařitelné, tvárné a mají dobrou korozní odolnost.

Slitiny Al – Cu – Mg, jak už bylo napsáno v úvodu, vysokopevnostní slitiny nemají příliš dobrou korozní odolnost. To nevyjímá ani slitiny Al – Cu – Mg, které představují nejvíce používané materiály této podskupiny. Jsou to především duraly, dosahující značné pevnosti v tahu (až 530 Mpa) po vytvrzení tepelném zpracováním.

Slitiny Al – Zn – Mg – Cu, jedná se o nejpevnější slitinu hliníku. Pevnost zde významně ovlivňuje obsah Mg, který se pohybuje od 1 do 3%. Zinku může obsahovat maximálně 8% a Cu až 2%. Vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi a to i ve svarech a to díky malé citlivosti na rychlost ochlazování při rozpouštěcím žíhání. Nevýhodou je (kvůli Cu) špatná korozní odolnost.

Slitiny Al – Li, pevnost těchto slitin je srovnatelná s pevností duralů. Díky lithiu, které je nejlehčím kovem vůbec, jsou slitiny Al – Li lehčí (až o 10%) a mají zvýšeném modulu pružnosti v tahu – toho se využívá především v letectví. Mezi zápory této slitiny patří ve složitějším procesu výroby a to kvůli lithiu, které na vzduchu rychle oxiduje, proto je nutné tyto taveniny tavit a odlévat v ochranné atmosféře (vakuum, argon).

2.8 Zinek a jeho slitiny

Zinek bílo šedý kov s namodralým kovovým leskem, který se však působením vzdušné vlhkosti ztrácí. Zinek krystalizuje v hexagonální, těsně uspořádaná krystalické mřížce. Jeho teplota tavení je 420 °C. Hustota zinku je 7200 kg·m. Vykazuje malou tvrdost, za pokojové (normální) teploty teplot je poměrně křehký. V rozmezí teplot 100 až 150 °C je tažný, nad teplotou 200 °C se stává opět křehkým. Zinek nelze tvářením zpevňovat kvůli nízké rekrytalizační teplotě. Je velmi snadno tavitelný, slitiny zinku mají dobré slévárenské vlastnosti a výbornou zabíhavost. Pro výrobu odlitků se používají slitiny zinku. Odlitky mají velmi dobré mechanické vlastnosti, ale většinou jsou křehké, nelze dále upravovat tvářením. Jsou také poměrně špatně obrobitelné, protože se „mažou“ - nalepují se na obráběcí nástroj. Zinek patří k nejsnáze těkajícím kovům, což souvisí s jeho toxicitou v kyselém prostředí.

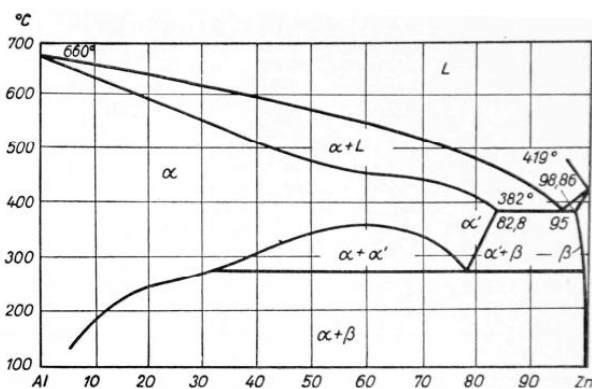
2.8.1 Vliv přísadových prvků ve slitinách zinku

Hliník je ve slévárenských slitinách zinku přísadovým prvkem. Hliníkem zjemňuje krystalizaci litého zinku a zlepšuje slévatelnost. Rovnovážený diagram, viz obr. 2.14 ukazuje, že nejvýhodnější přísada je asi 3,8 až 4,3 % Al v blízkosti eutektika. Teplotní interval tuhnutí je 387 až 382 °C. Rozpustnost hliníku v zinku je malá a klesá s teplotou. Eutektikum je tvořeno fázemi α' a β . Fáze α' je však stabilní jen do 275 °C a při této teplotě se rozpadá: $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$. Při ještě nižších teplotách přibývá v rovnovážném stavu fáze β na úkor fáze α , která je s klesající teplotou bohatší na hliník. Při rychlém ochlazení do kovové formy jsou tyto reakce téměř potlačeny [10].

Měď, stejně jako hliník, zmenšuje velikost zrna, zlepšuje také zabíhavost slitin, zvyšuje mechanické vlastnosti slitin, zvláště pevnost nebo tažnost a rázovou houževnatost. Závisí na procentuálním obsahu mědi ve slitině. Při obsahu nad 0,7 % Cu se zlepšuje odolnost proti korozi. Hlavní nevýhodou přítomnosti mědi ve slitině je, že zhoršuje rozměrovou stabilitu slitin zinku s hliníkem. Lineární kontrakce při optimální přísadě hořčíku je asi 0,09 % u slitin s 1 % Cu, tedy asi o 0,02 % větší než u slitin bez mědi. Vliv větší přísady mědi je ještě nepříznivější. nevhodné slitiny, které obsahují 1 %, nebo dokonce 3 % mědi, jež má příznivý vliv na pevnost a tvrdost, ale nepříznivý vliv na houževnatost,[11].

2.8.2 Slitiny zinku

Slitiny zinku mají uplatnění při výrobě odlitků. Jak již bylo uvedeno, hlavním přísadovým prvkem je hliník. Na obr. 2.14 je rovnovážný diagram Al-Zn. Slitiny zinku se u nás se nevyrábí, mají různá obchodní označení, např. Zamak, Mazak, atd.



Obr. 2.14 Rovnovážený binární diagram Al-Zn [10]

Mazak je britský alternativní název pro slitiny zinku označované Zamak. Původně Mazak označoval slitinu na stejném principu jako Zamak, ale zinek obsažen v této slitině měl čistotu jen 99,95 %. To bylo na počátku výroby zinku (30. léta 20. Století) a ve Velké Británii nebyl zinek o vyšší čistotě. Z tohoto důvodu byla přejmenována na název Mazak (Morris Ashby Zinc Alloy Castings). V současné době již oba názvy označují stejnou slitinu, závisí na výrobci slitin zinku, který název používá.

Zamak je slitina zinku s hlavním legujícím prvkem hliníkem, dále hořčíkem a mědí. Každý typ slitiny Zamak obsahuje 4 % hliníku. Název Zamak je zkratka z německých slov Zink (zinek), Aluminium (hliník), Magnesium (hořčík) a Kupfer (měď), která vyjadřují hlavní složky slitiny. Slitiny Zamak plní nejvyšší kvalitní standardy. V Evropě jsou jejich mechanické vlastnosti a chemické složení pro odlitky charakterizovány podle normy EN 12844. Ve slévárenské praxi se nejvíce používá slitina Zamak 3, dále jsou používány Zamak 2, Zamak 5 a Zamak 7. Zamak 3 a 5 nechází hlavní uplatnění při vysokotlakém lití.

Zamak 2 je slitiny zinku ($ZnAl_4Cu_3$), hustota je $6700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, která se používá pro gravitační lití do kovových forem. Tato slitiny vysokou tvrdost, pevnost a slévateľnost, vysoký obsah mědi (3 %) má za následek nižší rozměrovou stálost. Velký obsah mědi také zapříčiňuje nižší tažnost a pomalejší tuhnutí, takže se prodlužuje doba výroby jednoho odlitku. Slitina je také vhodná pro odlévání ložiskových pouzder a vložek kluzných ložisek. Ze slitiny Zamak 2 je odvozena slitina, která se označuje ZCC.

Zamak 3 je slitina zinku ($ZnAl_4$), hustota je $6600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [12], teplota tání 380 až 386 °C. Je nejpoužívanější slitinou pro tlakové lití, asi 70 % všech odlitků ze slitin zinku je z této slitiny. Má vyvážený poměr mechanických a fyzikálních vlastností, slévárenských vlastností, korozní odolnosti a dlouhodobé rozměrové stability, nabízí širokou škálu dokončovacích úprav. Zamak 3 je slitina zinku, podle které jsou porovnávány ostatní slitiny zinku. Její použití je pro výrobu odlitků používaných v automobilním a zbrojní průmyslu. Tato slitina se používá pro odlévání stavebních kování, částí zámků, hraček a dekorativních předmětů.

Zamak 5 je slitina zinku ($ZnAl_4Cu_1$), hustota je $6600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pevnější a tvrdší než Zamak 3. Má také lepší slévárenské vlastnosti, jako tekutost a zabíhavost. Tato slitina není tak běžně používaná, protože je dražší než Zamak 3.

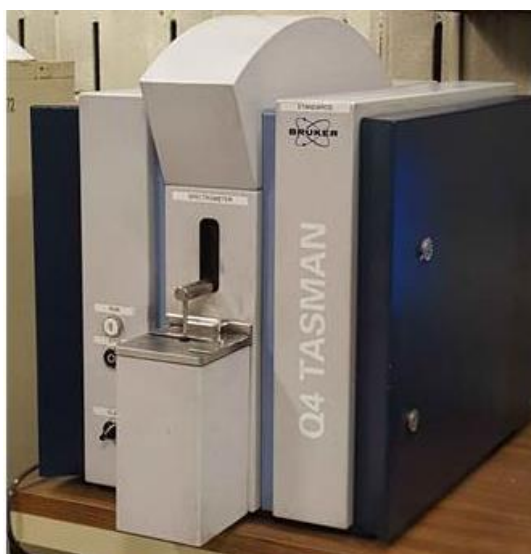
V této souvislosti je nutno uvést, že z ryze výzkumných cílů byla v experimentální části také pro výrobu porézních kovových materiálů mimořádně použita slitiny zinku Zamak 3 ($ZnAl_4$). Z tohoto důvodu je v této bakalářské práci uvedena kapitola o zinku a jeho slitinách.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Experimentální část bakalářské práce byla zaměřena na výrobu porézních materiálů ze slitiny hliníku a z ryze experimentálních důvodů i ze slitiny zinku. Experimenty byly provedeny i vyhodnoceny na pracovišti Katedry strojírenské technologie, FS – TU v Liberci. Vzorke obou typů porézních materiálů byly zhotoveny lisování chloridu sodného do taveniny těchto slitin s použitím hydraulického lisu. Před lisováním byla tavenina příslušného kovu nalita do jednoduché slévárenské formy. Forma byla ohřátá na teplotu 550 °C. Po vyvaření chloridu sodného z příslušných kovových vzorků byla stanovena jejich hmotnost vážením. Následně byly vypočítány vlastnosti podle vztahů (2.1), (2.4), (2.5), (2.6) a vybraných vztahů uvedených v tabulce 2.1 a v tabulce 2.2.

3.1 Charakteristika použitých slitin

Jak bylo výše uvedeno, pro výrobu porézních materiálů byly použity dvě odlišné slitiny. *Slévárenská slitina hliníku* AlSi12 a z ryze experimentálních důvodů slévárenská slitina zinku ZnAl4. Jejich chemické složení je uvedeno v tabulce 3-1 a v tabulce 3-2. Chemické složení slitiny AlSi12 bylo stanoveno na optickém emisním spektrometru Brucker Q4 TASMÁN, viz obr. 3.1. Tato slitina je charakterizována v kapitole 2.6.2.1 (*slitiny Al-Si*).



Obr. 3.1 Optický emisní spektrometr Brucker Q4 TASMÁN

Tabulka 3-1 Stanovené chemické složení slitiny AlSi12

<i>Chemické složení slitiny AlSi12 [hmot. %]</i>										
Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Ti	V	Mg	Na	Pb	Al
11,9	0,45	0,41	0,05	0,11	0,1	0,008	0,001	0,005	0,005	86,96

Slitina zinku ZnAl4 (Zamak 3), je charakterizována v kapitole 2.8.2. Tato slitina pro experimenty byla zvolena z důvodů, že vykazuje velmi dobré slévárenské vlastnosti, korozní odolnost a dlouhodobou rozměrovou stabilitu. Stanovené chemické složení je v tabulce 3-2.

Tabulka 3-2 Stanovené chemické složení slitiny ZnAl4

<i>Chemické složení slitiny ZnAl4 [hmot. %]</i>									
Al	Cu	Mg	Pb	Cd	Sn	Fe	Ni	Si	Zn
4,1	0,03	0,05	0,003	0,003	0,001	0,02	0,001	0,02	95,77

Obě slitiny byly nataveny v elektrické odporové peci „Classic“, viz obr. 3.2.



Obr. 3.2 Elektrická odporová pec Classic pro tavení slévárenských slitin

Obě slitiny byly použity pro své velmi dobré slévárenské vlastnosti, které je potřeba uplatnit při složité výrobě porézních materiálů. Teplota tání hliníkové slitiny AlSi 12 je 577 °C a po namodifikování taveniny je tato teplota nižší, činí 560 °C. Teplota tání slitiny zinku ZnAl 4 je v intervalu teplot 386 až 380 °C. Teploty odlévání tavenin obou byly vyšší. Teplota odlévání slitiny hliníku AlSi12 byla 720 °C a teplota odlévání slitiny zinku ZnAl 4 byla cca 450 °C.

3.2 Charakteristika chloridu sodného

Chloridy jsou čiré až bílé krystalické látky s dobrou rozpustností ve vodě. Většinou se vyskytují běžně v přírodě. Chlorid sodný je jeden z nejběžnějších chloridů, který má rozpustnost ve vodě 360 g.l^{-1} , hustotu 2165 kg.m^{-3} , teplotu tání 800°C a teplotu varu 1413°C . Běžně jej můžeme najít například v mořské vodě, která obsahuje necelé 3% chloridu sodného.

3.3 Charakteristika slévárenské formy

Slévárenská forma pro výrobu porézního materiálu byla vyrobena z legované nástrojové oceli chrom-molybden-křemíko-vanadové pro práci za tepla EN 10027 (1.2343), ČSN 19 552, chemické složení podle ČSN ISO 4957, viz tabulka 3-3.

Tabulka 3-3 Chemické složení legované chrom-molybden-křemíko-vanadové nástrojové oceli

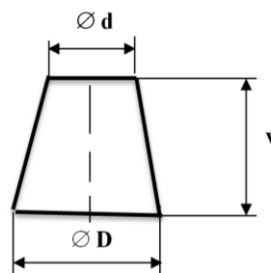
<i>Chemické složení legované chrom-molybden-křemíko-vanadové oceli [hmot. %]</i>								
C	Cr	Mo	Si	V	Mn	P	S	Fe
0,33- 0,41	4,8-5,5	1,1-1,5	0,80-1,20	0,3-050	0,20-0,50	max. 0,03	max. 0,02	zbytek

Na obr. 3.3 je forma pro výrobu porézních kovů (vlevo), vnitřní dutina byla tvaru komolého kužele, viz obr. 3.3 (vpravo). Forma se skládá ze tří dílů, jak je patrné z obr. 3.4.

Válcový díl: vnější průměr 90 mm, výška 110 mm, \varnothing díry pro razník 40 mm, \varnothing díry 47 mm pro vytlačení porézního dílu z formy z formy.

Razník: \varnothing 38 x 80 mm

Vymezovací podložka s komolým kuželem: \varnothing 100 x 45 mm, komolý kužel: $\varnothing D_1 = 51$ mm, $\varnothing D_2 = 46$ mm, výška 25 mm.



$$\varnothing D = 0,047 \text{ m}; \varnothing d = 0,040 \text{ m}; v = 0,040 \text{ m}$$

Obr. 3.3 Použitá slévárenská forma pro výrobu porézních kovů (vlevo); schéma její dutiny (vpravo)



Obr. 3.4 Pohled na díly ocelové formy

Před výrobou porézních materiálů forma byla opatřena ochranným nástřikem *Molybkombin UMF T4*, předehřev formy 550 °C.

Výpočet objemu dutiny formy komolého kužele byl proveden s použitím známého vzorce:

$$V_F = \frac{\pi \cdot v}{12} \cdot (D^2 + d^2 + D \cdot d), \quad (3.1)$$

kde značí: V_F – objem vnitřku formy na vzorky [m^3] v – výška vzorku [m], D – větší průměr vzorku [m], d – menší průměr vzorku [m].

3.4 Stanovení množství chloridu sodného a odlévané taveniny

Při výrobě hliníkového porézního materiálu byl předpoklad, že 50 % objemu formy bude zaplněno chloridem sodným (NaCl) a 50 % objemu formy bude zaplněn hliníkovou slitinou (AlSi12), nebo slitinou zinku (ZnAl4). Dosazením potřebných hodnot podle obr. 3.3, do rovnice (3.1) lze vypočítat objem formy (V_F), který se rovná $5,9575 \cdot 10^{-3} m^3$. Na základě výše uvedené úvahy, lze vypočítat, že objem pro chlorid sodný (V_{NaCl}) je:

$$V_{NaCl} = 0.5 \cdot V_F = 2.978 \cdot 10^{-5} [m^3], \quad (3.2)$$

kde značí: V_{NaCl} – objem použitého chloridu sodného [m^3], V_F – objem vnitřku formy [m^3].

$$V_{SLIT} = 0.5 \cdot V_F = 2.978 \cdot 10^{-5} [m^3], \quad (3.3)$$

kde značí: V_{SLIT} – objem použité slitiny hliníku (AlSi12) nebo slitiny ZnAl4 [m^3], V_F – objem vnitřku formy na vzorky [m^3].

Dále byla vypočítána hmotnost m , jak chloridu sodného, tak hmotnost obou slitin. Pro výpočet byl použit známý vztah:

$$m = \rho \cdot V, \quad (3.4)$$

kde značí: m – hmotnost [kg], ρ – hustotu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], V – objem [m^3].

Dle vzorce (3.4) byly vypočítány hmotnosti slitiny (AlSi12) a chloridu sodného (NaCl), které přijdou do formy tak, aby dle objemu obě přísady zaujímaly 50 %. Vypočtené hmotnosti přísad jsou zaznamenány v tabulce 3-4. Podle téhož vzorce (3.4) byly vypočítány hmotnosti slitiny (ZnAl4) a chloridu sodného (NaCl), které jsou uvedeny v tabulce 3-5.

Tabulka 3-4 Vypočítaná hodnota objemu taveniny AlSi12 a objemu chloridu sodného

Výpočet hmotnosti slitiny hliníku AlSi 12		
Hmotnost AlSi12 m_{AlSi12} [kg]	Objem AlSi12 V_{AlSi12} [m^3]	Hustota AlSi12 ρ_{AlSi12} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
0.079	$2.978\cdot 10^{-5}$	2650
Výpočet hmotnosti chloridu sodného		
Hmotnost NaCl m_{NaCl} [kg]	Objem NaCl V_{NaCl} [m^3]	Hustota NaCl ρ_{NaCl} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
0.065	$2.978\cdot 10^{-5}$	2165

Tabulka 3-5 Vypočítaná hodnota objemu taveniny ZnAl4 a objemu chloridu sodného

Výpočet hmotnosti slitiny zinku ZnAl4		
Hmotnost ZnAl4 m_{ZnAl4} [kg]	Objem ZnAl4 V_{ZnAl4} [m^3]	Hustota $\rho_{Zn Al 14}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
0.19	$2.978\cdot 10^{-5}$	6600
Výpočet hmotnosti chloridu sodného		
Hmotnost NaCl m_{NaCl} [kg]	Objem NaCl V_{NaCl} [m^3]	Hustota NaCl ρ_{NaCl} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
0.065	$2.978\cdot 10^{-5}$	2165

3.5 Postup výroby vzorků porézních materiálů

Pro výrobu vzorků porézních materiálů by použita netradiční metoda jejich výroby - lisován chloridu sodného do taveniny příslušné slitiny. Ve světě k těmto účelům se používána infiltrační metoda, která je založena na principu vakua, viz [13], [18].

Jak je výše uvedeno, k výrobě těchto vzorků se z ryze výzkumného záměru použily dvě slitiny: slitina hliníku AlSi12 a slitina zinku ZnAl4. U obou slitin tavení probíhalo v grafitovém kelímku v odporové peci Classic. Po natavení byly taveniny metalurgicky ošetřeny rafinační

solí T3, z hladiny tavenin byla stažena struska, po změření teploty digitálním teploměrem GTH 1100 (byl použit termočlánek NiCr – Ni) byla tavenina nalita do slévárenské formy. Slitina AlSi12 byla odlévána z teploty 720 °C a slitina ZnAl4 byla odlévána z teplota 450 °C. Současně byla také předehřátá slévárenská forma na teplotu cca 500 °C. Před nalitím taveniny do dutiny slévárenské formy byl její líc ošetřen ochranným nástřikem – Molybkombin UMF T4 . Po nalití příslušné taveniny do dutiny slévárenské formy bylo do dutiny formy nasypáno potřebné množství chloridu sodného, který byl předehřátý na teplotu 150 °C. Pak byla forma s taveninou příslušné slitiny a s chloridem sodným vložena pod tvářecí hydraulický lis CB 300/63, viz obr. 3.5.



Obr. 3.5 Pohled na hydraulický lis CB 300/63 a na jeho monitor s nastavením potřebných hodnot lisovacích parametrů

Před lisováním soli do příslušné taveniny byl hydraulický lis nastaven na potřebné hodnoty lisovacích parametrů. Pro lisování byla použita síla **100000 N**, plocha razníku $\pi \cdot 40^2 / 4 = 1256 \text{ mm}^2$ lisovací tlak byl $p = 100000 : 1256 = 80 \text{ MPa}$

Na obr. 3.6 (vlevo) je detail částic chloridu sodného, který byl použit pro výrobu vzorků porézních materiálů. Dále je na obr. 3.6 (vpravo) ukázka práce s naléváním taveniny příslušné slitiny do formy. Na obr. 3.7 je uveden pohled na lisování chloridu sodného do taveniny příslušné slitiny. Na obr. 3.8a) a na obr.3.8b) jsou ukázky vyrobených vzorků porézních materiálů. Jeden vzorek je ze slitiny AlSi12, druhý vzorek je ze slitiny ZnAl4, vzorek dole je pro srovnání a byl vyrobený firmou Exxcentis.



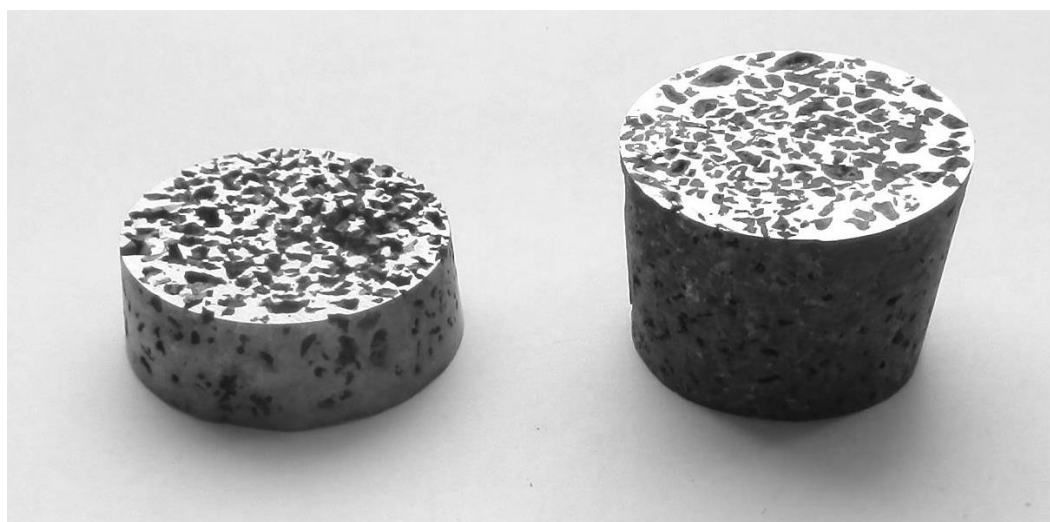
Obr. 3.6 Detail částic chloridu sodného, velikost 3-5 mm, ukázka práce s naléváním taveniny příslušné slitiny do formy (vpravo)



Obr. 3.7 Pohled na lisování chloridu sodného do taveniny příslušné slitiny za pomoci hydraulického lisu CB 300/63



Obr. 3.8 a) Půdorysný pohled na vyrobené vzorky porézních materiálů, ze slitiny AlSi12 – vlevo a ze slitiny ZnAl4 – vpravo



Obr. 3.8 b) Pohled na vyrobené vzorky porézních materiálů, ze slitiny AlSi12 – vlevo a ze slitiny ZnAl4 – vpravo, vzorek vyrobený firmou Exxentis

3.6 Rozměry a hmotnost vyrobených vzorků

Na získaných vzorcích 1, 2 porézniích materiálů, které byly z důvodu jejich snadného vyjímání z formy tvaru komolého kužele. Na těchto materiálech byly stanoveny jejich rozměry d - malý průměr [m]; D - velký průměr [m], h - výška [m], viz obr. 3.3. Dále byl vypočítán objem vzorků. Vzorky byly zváženy a byla stanovena jejich hmotnost. Výpočtem byla zjištěna hustota. Naměřené a zjištěné hodnoty vzorků jsou uvedeny v tabulce 3-5.

Tabulka 3-5 Přehled fyzikálních veličin vyrobených vzorků pro stanovení jejich hustoty

Číslo vzorku	Materiál vzorku	Rozměry vzorku [m]			Objem V [m ⁻³]	Hmotnost m [kg]	Hustota ρ [kg·m ⁻³]
		D	d	h			
<i>Hodnoty porézniího materiálu</i>							
1	AlSi12	0,046	0,044	0,016	2,54·10 ⁻⁵	0,0295	1160
2	ZnAl4	0,046	0,041	0,031	4,61·10 ⁻⁵	0,1250	2710
<i>Hodnoty základniího materiálu</i>							
1	AlSi12	0,045	0,045	0,016	2,54·10 ⁻⁵	0,0673	2650
2	ZnAl4	0,0435	0,0435	0,031	4,61·10 ⁻⁵	0,304	6595

Poznámka: Vzorky základniího materiálu byly sledovány na základě fyzikálních výpočtů

3.7 Vyhodnocení vlastností vyrobených porézniích materiálů na základě lisování NaCl do taveniny příslušného materiálu

Pro hodnocení vlastností vyrobených porézniích materiálů ze slitiny hliníku a slitiny zinku (AlSi12, ZnAl4) byla vypracována metodika pro stanovení příslušných fyzikálně-materiálových charakteristik, resp. příslušných veličin. Tato metodiky vychází ze vztahů: (2.1), (2.2), (2.4), (2.5), (2.6) a dalších vztahů uvedených v tabulce 2-1, které jsou uvedeny v tabulce 2-1. Pro jednodušší orientaci, zde je uveden přehled fyzikálních veličin použitých pro vyhodnocení vlastností vzorků vyrobených porézniích materiálů:

A) Stanovení hustoty porézniího materiálu (ρ_P), se stanovuje fyzikálním výpočtem podle známého vztahu:

$$\rho_P = \frac{m_P}{V_P}, \quad (3.1)$$

kde značí: ρ_P – hustotu porézního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]; m_P – hmotnost porézního materiálu [kg]; V_P – objem porézního materiálu [m^{-3}].

B) Stanovení relativní hustoty porézního materiálu (ρ_{REL})

$$\rho_{REL} = \frac{\rho_P}{\rho_{Z.M.}}, \quad (3.2)$$

kde značí: ρ_{REL} – relativní hustota (porézní/základní) [1]; ρ_P – hustota porézního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]; $\rho_{Z.M.}$ – hustota základního materiálu (bez porozity) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

C) Stanovení hustoty diskretizované struktury porézního materiálu:

$$\rho_P = \frac{\rho_{Z.M.} \cdot V_P}{V_{Z.M.}} \quad (3.3)$$

kde značí: V_P – objem porézního materiálu [m^3]; $V_{Z.M.}$ – objem základního materiálu [m^3].

D) Stanovení pórovitosti (porezity) materiálu (P), je podílem rozdílu hustoty základního materiálu a porézního materiálu k hustotě základního (neporézního) materiálu ($Z.M.$):

$$P = \left(\frac{\rho_{Z.M.} - \rho_P}{\rho_{Z.M.}} \right) \cdot 100 [\%] = \left(1 - \frac{\rho_P}{\rho_{Z.M.}} \right) \cdot 100 [\%]. \quad (3.4)$$

E) Stanovení Youngova modulu pružnosti v tahu porézního materiálu, stanoveného podle [11] a [15].

$$E_P = k \cdot E_{Z.M.} \cdot \left(\frac{\rho_P}{\rho_{Z.M.}} \right)^m, \quad (3.5)$$

kde značí: E_P – Youngův modul pružnosti porézního materiálu [MPa], $E_{Z.M.}$ – Youngův modul pružnosti základního materiálu [MPa], ρ_P – hustotu porézního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]; $\rho_{Z.M.}$ – hustotu základního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]; k – konstanta pro výpočet modulu pružnosti $k = (0,1 \text{ to } 4)$, m je konstanta pro výpočet modulu pružnosti $m = 2$ [15], $m = 1.5 \text{ to } 1.7$ [14].

F) Výpočet součinitele teplené vodivosti porézního materiálu

$$\lambda_p = \lambda_{z.M.} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_{z.M.}} \right)^a, \quad (3.6)$$

kde značí: $\lambda_{z.M.}$ – součinitel tepelné vodivosti základního materiálu (pro AlSi12 $\lambda_{z.M.} = 150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; pro ZnAl4 $\lambda_{z.M.} = 113 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); a – konstanta ($a = 1.65 - 1.85$) [15], $a = 2$ [14].

Na základě rovnic (3.1) až (3.6) byly vypočítány vybrané hodnoty vlastností vyrobených materiálů. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3-6 a 3-7.

Tabulka 3-6 Přehled hodnot pro charakteristiku porézního materiálu AlSi12

Číslo vzorku 1, slitina AlSi12	
Velikost částic chloridu sodného [mm]	3-5
Hustota vzorku základního materiálu AlSi 12, $\rho_{z.M.(AlSi12)}$ [kg·m ³]	2650
Objem vzorku AlSi 12, (základní materiál) Ø 45,0 x 16 mm $V_{z.M.(AlSi12)}$ [m ³]	$2,54 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost základního materiálu AlSi Ø 45,0 x 16 mm; $m_{B.M.(AlSi12)}$ [kg]	0.0673
Objem porézního AlSi12; D = 0.046 m; d = 0,044 m; h = 0,016 m; $V_{P.(AlSi12)}$ [m ³]	$2,54 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost vzorku porézního materiálu AlSi 12; D = 0.046 m; d = 0,044 m; h = 0,016 m; $m_{P.(AlSi12)}$ [kg]	0.0295
Hustota vzorku porézního materiálu AlSi 12; D = 0.046 m; d = 0,044 m; h = 0,016 m; $\rho_{P.(AlSi12)}$ [kg·m ³]	1160
Relativní hustota porézního materiálu AlSi 12 (porézní/základní); $\rho_{REL.(AlSi12)}$ [1]	0.44
Porozita materiálu AlSi 12; D = 0.046 m; d = 0,044 m; h = 0,016 m; P [%]	56
Youngův modul pružnosti porézního materiálu AlSi 12; D = 0.046 m; d = 0,044 m; h = 0,016 m; $E_{P.(AlSi12)}$ [MPa]	1437
Koeficient tepelné vodivosti porézního materiálu AlSi 12; D = 0.046 m; d = 0,044 m; h = 0,016 m; $\lambda_{P.(AlSi12)}$ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	29

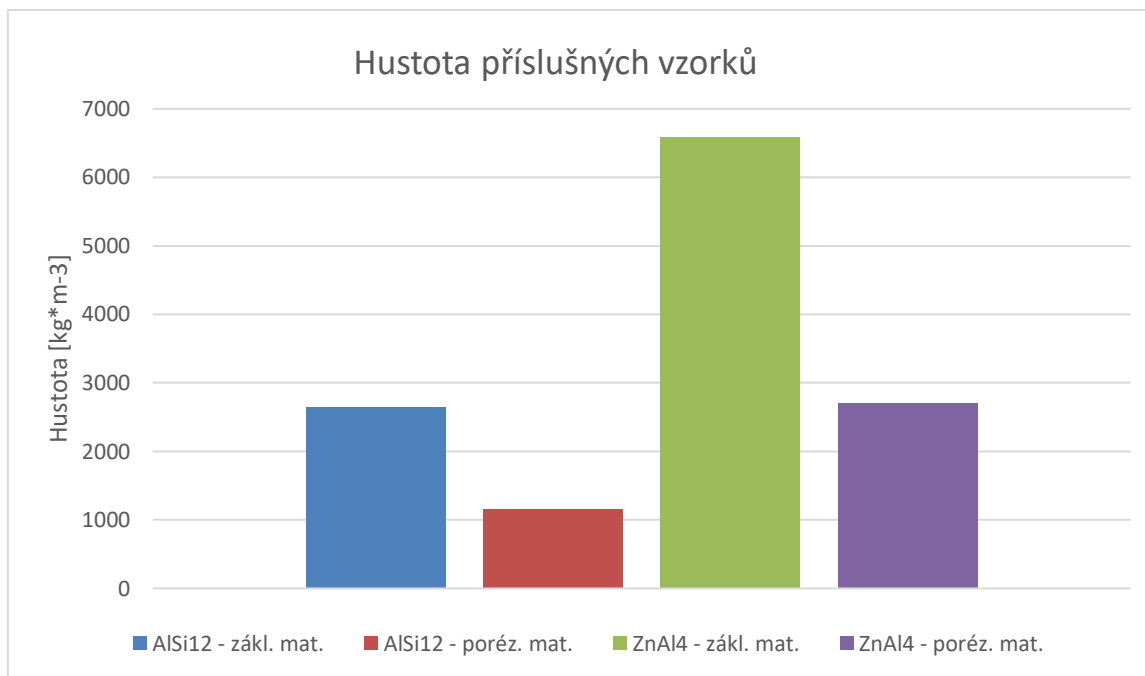
Poznámka: Youngův modul pružnosti $E_{(AlSi12)} = 75\,000 \text{ [MPa]}$; Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{(AlSi12)} = 150 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$; $k = 0.1$; $m=2$; $a=2$.

Tabulka 3-7 Přehled hodnot pro charakteristiku porézního materiálu ZnAl4

Číslo vzorku 2, slitina ZnAl4	
Velikost částic chloridu sodného [mm]	3-5
Hustota vzorku základního materiálu ZnAl4 $\rho_{(ZnAl4)}$ [kg·m ³]	6600
Objem vzorku ZnAl4, (základní materiál) Ø 44.50 x 22.5 mm $V_{B.M.(AlSi12)}$ [m ³]	$3.500 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost základního materiálu ZnAl4 Ø 44.50 x 22.5 mm; $m_{(ZnAl4)}$ [kg]	0,231
Objem porézního materiálu ZnAl4; D = 0,046 m; d = 0,041 m ; h = 0,031 m; $V_{P(ZnAl4)}$ [m ³]	$3.500 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost vzorku porézního materiálu ZnAl4; D = 0,046 m; d = 0,041 m ; h = 0,031 m; $m_{P.(ZnAl4)}$ [kg]	0,1250
Hustota vzorku porézního materiálu ZnAl4; D = 0,046 m; d = 0,041 m ; h = 0,031 m; $\rho_{P.(ZnAl4)}$ [kg·m ³]	2711
Relativní hustota porézního materiálu ZnAl4 (porézní/základní); $\rho_{REL(ZnAl4)}$ [1]	0,41
Porozita porézního materiálu ZnAl4; D = 0,046 m; d = 0,041 m ; h = 0,031 m; P [%]	59
Youngův modul pružnosti porézního materiálu ZnAl4; D = 0,046 m; d = 0,041 m ; h = 0,031 m; $E_{P.(ZnAl4)}$ [MPa]	1619
Koeficient tepelné vodivosti porézního materiálu ZnAl4; D = 0,046 m; d = 0,041 m ; h = 0,031 m; $\lambda_{P.(ZnAl4)}$ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	19

Poznámka: Youngův modul pružnosti $E_{(ZnAl4)} = 96\ 000$ [MPa]; Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{(ZnAl4)} = 113$ [W·m⁻¹·K⁻¹]; $k = 0.1$; $m=2$; $a = 1.65$

Na obr. 3.9 jsou uvedeny hustoty příslušných základních materiálů (AlSi12 a ZnAl4) a hustoty obou vzorků porézních materiálů vyrobených s použitím částic chloridu sodného o velikosti 3-5 mm.



Obr. 3.9 Hustoty příslušných základních materiálů (AlSi12 a ZnAl4) a hustoty obou vzorků porézních materiálů vyrobených s použitím částic chloridu sodného o velikosti 3-5 mm.

3.8 Hodnocení získaných výsledků

S ohledem na publikované výsledky [13] velmi přínosné je použití menších částic chloridu sodného pro výrobu kovových porézních materiálů. Pro při řešení této bakalářské práce byla zvolena velikost částic chloru sodného 3-5 mm. Při použití větších částic dojde k jejich nahromadění a zborcení stěn porézního materiálu. Při výrobě vzorků porézních materiálů s použitím 50 % částic NaCl a 50 % příslušné slitiny kovu je z dosažených výsledků patrné, že slitina AlSi12 dosahuje hustotu (ρ_P) 1160 [kg·m⁻³], relativní hustotu (ρ_{REL}) 0,44, porezitu (P) 56 %, Youngův modul pružnosti (E_P) je 1437 [MPa] a hodnota součinitele tepelné vodivosti (λ_P) je 29 [W·m⁻¹·K⁻¹]. Slitina ZnAl4, který byla použita z ryze experimentálních důvodů dosahuje (ρ_P) 2711 [kg·m⁻³], relativní hustotu (ρ_{REL}) 0,41, porezitu (P) 59 %, Youngův modul pružnosti (E_P) je 1619 [MPa] a hodnota součinitele tepelné vodivosti (λ_P) je 19 [W·m⁻¹·K⁻¹].

4. SHRNUTÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ

Řešení bakalářské práce přináší informaci o netradiční možnosti výroby porézních materiálů na bázi chloridu sodného, tj. lisováním částic chloridu sodného do taveniny vhodné slitiny. Jak uvádí a také prezentuje [13], v současné době se pro výrobu porézních materiálů používá metoda infiltrace taveniny mezi zrna chloridu sodného. K tomuto účelu je nutné speciální vybavení slévárenské formy. To je možnost přívodu argonu a současně vytvoření vakua v prostoru slévárenské formy. Za těchto podmínek tavenina příslušné slitiny proteče (infiltruje) mezi částice chloridu sodného, [13]. Z důvodu, že na Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci je k dispozici hydraulický lis, byla navržena a vyvinuta právě metoda lisování chloridu sodného do taveniny příslušné slitiny kovu. Nejprve byl zkoušen obrácený postup výroby vzorků porézních materiálů. To znamená, že do vyhřáté formy byla vsypána ohřátá sůl a teprve potom byla nalita tavenina. V důsledku velkého povrchového napětí slitin hliníku byla ztížena výroba porézních vzorků. Tento postup vyžadoval ohřev slévárenské formy na vysoké teploty.

V rámci řešení této bakalářské práce lze napsat tyto skutečnosti:

- 1) V rámci výroby celulárních kovových systémů je uváděno poměrně velké množství metod, které jsou zaměřeny především na výrobu „kovových pěn“. Tyto metody v některých případech nerozlišuje rozdíl mezi „kovovou pěnou“ a porézním materiálem. Více tyto metody se zaměřují na skutečnost, zdali se vyrábí celulární kovový systém s otevřenými nebo uzavřenými buňkami.
- 2) Navržená a odzkoušená metodiky pro výrobu porézních materiálů s použitím lisování chloridu sodného do taveniny slitiny hliníku (AlSi 12) a slitiny zinku (ZnAl4) byla realizována za podmínek pro slitinu AlSi12, teplota předehřevu formy 550 °C, teplota předehřevu soli 150 °C, teplota odlévané slitiny AlSi12 720 °C. Pro slitinu ZnAl4 byla teplota předehřevu formy 500 °C, teplota předehřevu chloridu sodného na teplotu 150 °C a teplota lití slitiny ZnAl4 byla 450 °C. Při těchto podmínkách bylo možno aplikovat minimální tlak razníku, který vtlačoval částice chloridu sodného do obou typů taveniny (AlSi 12 i ZnAl4) na hodnotu 80 MPa.
- 3) V rámci výroby výše uvedených vzorků porézních systémů bylo nutno dbát na metalografickou přípravu taveniny, její ošetření rafinační solí T3, na měření teploty taveniny před jejím odléváním. Dále bylo nutné před každým odléváním provést ošetření pracovního líce slévárenské formy lubrikačním nástřikem – Molybkombin UMF T4 .

- 4) Získané výsledky této bakalářské práce potvrdily, že lisováním chloridu sodného d taveniny příslušné slitiny kovu je další způsob kovových porézních materiálů jednoduchých geometrických tvarů, resp. tvaru komolého kužele.
- 5) S použitím částic chloridu sodného o velikosti částic 3-5 mm, který zaplňuje 50 % objemu dutiny slévárenské formy lze získat porézní materiál ze slitiny AlSi12, který dosahuje 44 % hustoty slitiny AlSi12. Dále lze získat porézní materiál ze slitiny ZnAl4, který dosahuje 41 % hustoty slitiny ZnAl4.
- 6) Výroba porézního materiálu, která je uvedena v této bakalářské práci je v podstatě výroba kovových celulárních materiálů s otevřenými buňkami. Tyto materiály lze aplikovat jako např. filtry různých disperzních systémů.

5. ZÁVĚR

Bakalářská práce je řešena na téma: Celulární a kovové porézní systémy. Tyto netradiční, lehčené kovové materiály mají velké průmyslové uplatnění [1], [2], [3]. V posledních letech se u nás jejich výrobou zabývají pracovníci na VŠB – TU Ostrava. Nedávno se touto problematikou začínají zabývat i pracovníci Fakulty strojní ČVUT v Praze. U nás není žádný výrobce těchto materiálů. To lze vysvětlit poměrně velkou technickou náročností pro získání konkrétních konstrukčních tvarů.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě důležité části – rešeršní a experimentální. Teoretická část popisuje rozdělení a základní metody výroby celulárních kovových systémů. Dále je zde provedena charakteristika vybraných slitin hliníku a zinku, které se týkají jejich uplatnění v části experimentální.

Hlavní experimentální část bakalářské práce je zaměřena na výrobu celulárních kovových systémů s využitím částic chloridu sodného, které byly lisovány do tavenin dvou druhů kovů, slitiny AlSi12 a ZnAl4. Experimenty obsažené v této bakalářské práci byly prováděny na pracovišti Katedry strojírenské technologie FS – TU v Liberci. Na tomto pracovišti byla navržena a aplikována metodika pro výrobu celulárních kovových systémů s použitím částic chloridu sodného. Chlorid sodný vykazuje teplotu tání 801 °C a lze ho pro tuto výrobu velmi dobře použít. O to více s přihlédnutím k jeho ekologické výhodnosti.

Na základě řešení a výsledků obsažených v této bakalářské práci lze formulovat tyto dílčí závěry:

- 1) Pro lisování chloridu sodného o velikosti částic 3-5 mm do taveniny kovů je možno použít minimální lisovací tlak 80 MPa. Za předpokladu ohřevu slévárenské formy na teplotu 550 °C pro slitinu AlSi12 a 500 °C pro slitinu ZnAl4 (při ohřevu chloridu sodného na teplotu 150 °C).
- 2) Pro experimenty musí být taveniny kovů dostatečně metalurgicky ošetřeny (především slitiny hliníku musí být rafinovány solí T3).
- 3) Lisování chloridu sodného do tavenin kovů, resp. taveniny AlSi12 a taveniny ZnAl4 lze vyrábět lehčené, resp. celulární kovové systémy, které dosahují relativní hustotu 0,44 a 0,41.
- 4) Vyrobené vzorky v této bakalářské práci jsou srovnatelné se vzorky, které vyrábí profesionálním způsobem švýcarská firma Exxentis.

- 5) Pro pokračování řešení této problematiky v následující bakalářské práci doporučuji se zaměřit na výrobu více vzorků od jedné skupiny vzorků, aby bylo možno provést statistické hodnocení.
- 6) Z důvodu, že se jednalo o výzkum a výrobu netradičních lehčených materiálů, proto není uvedeno ekonomické hodnocení této bakalářské práce.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BANHART John. Manufacturing Routes for Metallic Foams. *Solidification Science: Overview Journal JOM* 52 (12) 2000, pp. 22-27.
- [2] BANHART John. *Progress in Material Science*, 2001, 46, p. 559.
- [3] BANHART John. and D. WEAIRE: *Physics Today* 55 (2002) pp. 37- 42.
- [4] ASHBY, M.F. et al. Metal Foams. A Design Guide. 1. ed. *Butterworth-Heinemann* 2000.
- [5] BANHART John. Light-metal-foams - history of innovation and technological challenges. *Advanced Engineering materials*. 2013, 15, No. 3 pp 82-111.
- [6] RAJAK, D.K. KUMARASWAMIDHAS, L. A and S. DAS. Technical Overview of Aluminum Alloy Foam. *Material Science* 48 (2017) pp. 68-86.
- [7] MICHNA, Š. et al. Encyklopedie hliníku. Adin, s.r.o Prešov, ISBN 80-89041-88-4
- [8] KŘÍŽ, R. a P. VÁVRA. Strojírenská příručka-3.svazek. Praha : Scientia, 1993. 254 s. ISBN 80-85827-23-9.
- [9] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. s.r.o. Brno : CERM, 2002. 396 s.
- [10] Píšek, F. Nauka o materiálu I: Nauka o kovech. 3. svazek. Neželezné kovy. 2. přepracované vydání. Praha: Academia, 1973. 595 s.
- [11] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [12] European standard, EN 1774 - Zinc alloys.
- [13] LUNA, E.M.E. at al. (2014). Casting Protocols for the production of open cell aluminium foams by the replication technique and the effect on porosity. *Journal of Visualized Experiments*. (94), e52568. www.jove.com.
- [14] JERZ, J. Foamed Aluminium and Aluminium Alloys Prepared by Powder Metallurgy. Ph.D thesis, TU Vienna, (1995).
- [15] MORENO, F.G. (2016) Commercial Application of metal Foams: Their properties and production. *Materials*, 9. 85, pp. 1 – 27.
- [16] KŘIVÁNEK, R. Vlastnosti a použití kovových pěn. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2018-04-20]. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D]
- [17] RADKOVSKÝ, F., GEBAUER, M., KROUPOVÁ, I., LICHÝ, P. Production of cast metal foams with a regular internal structure. In METAL 20, Conference proceedings, 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Tanger Ltd., Ostrava, 25. - 27. 5. 2016, Hotel Voroněž I, Brno.

[18] Technické podkladové materiály firmy Exxentis (Technical material EXXENTIS AG, www.exxentis.com).