



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Hliníkové pěny vyrobené metodou
práškové metalurgie**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Jaroslav Plášek

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: N 2301 Strojní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Plášek** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **473604**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hliníkové pěny vyrobené metodou práškové metalurgie

Název diplomové práce anglicky:

Aluminium foam made by powder metallurgy

Pokyny pro vypracování:

1. Kovové pěny, materiály vhodné ke zpěňování, aplikace pěn
2. Rešerše problematiky výroby kovových pěn práškovou metalurgií
3. Návrh experimentu
4. Realizace a vyhodnocení experimentu
5. Závěr a zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Proceedings of the 11th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (MetFoam 2019), Springer International Publishing, ISBN 9783030427986

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Hermana Ph. D, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D., za jeho věnovaný čas, vlídný profesionální přístup, cenné rady, připomínky a za projevenou trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vojtěchu Petrovi, za asistenci a dozor při práci v dílnách. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině a kamarádům za podporu během celého studia.

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na kovové pěny, které za posledních 50 let vývoje získaly takové vlastnosti, že jejich velice rozsáhlé spektrum využití se stále rozšiřuje. Obecně kovové pěny jsou materiály s uměle vytvořenou pórovitou strukturou, které mají velmi výhodné vlastnosti z hlediska poměru pevnosti a váhy. V teoretické části jsou popsány charakteristické vlastnosti, vhodné materiály pro zpěňování, příklady použití a jsou popsány některé metody výroby. V experimentální části práce se provádí pokus o tvorbu hliníkové pěny pomocí metody práškové metalurgie v provozních laboratořích školy.

Název diplomové práce:	Hliníkové pěny vyrobené metodou práškové metalurgie
Autor práce:	Bc. Jaroslav Plášek
Vedoucí práce:	doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.
Konzultant:	Klikněte nebo klepněte sem a zadejte text.
Akademický rok:	2022/23
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph. D
Rozsah práce:	70 stránek, 0 tabulek, 55 obrázků
Klíčová slova:	Hliníková pěna, kovová pěna, struktura, pórovitost, zpěňovací činidlo, TiH ₂ , prášková metalurgie

Annotation

This diploma thesis focuses on metallic foams, which have acquired such properties over the last 50 years of development that their very wide range of applications continues to expand. In general, metallic foams are materials with an artificially created porous structure that have very advantageous properties in terms of strength to weight ratio. In the theoretical part, the characteristic properties, suitable materials for the production of foams, examples of applications and some production methods are described. In the experimental part of the thesis, an attempt is made to produce aluminium foam using the powder metallurgy method in the school's operating laboratories.

Title of the final thesis:	Aluminium foam made by powder metallurgy
Author:	Bc. Jaroslav Plášek
Supervisor:	doc. Ing. Aleš Herman Ph.D.
Consultant:	Klikněte nebo klepněte sem a zadejte text.
Academic year:	2022/23
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph. D
Extent:	70 pages, 0 tables, 55 pictures
Keywords:	Aluminium foam, metal foam, structure, porosity, foaming agent, TiH ₂ , powder metallurgy

Obsah

1.	ÚVOD A CÍL PRÁCE.....	10
1.1	Cíle práce	10
2.	TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2.1	Kovové pěny, materiály vhodné ke zpěňování, aplikace pěn.....	11
2.1.1	Vlastnosti kovových pěn	13
2.1.2	Struktura pórů	15
2.1.3	Mechanické vlastnosti.....	16
2.1.4	Aplikace kovových pěn.....	18
2.1.5	Materiály vhodné ke zpěnění.....	18
2.1.6	Metody výroby kovových pěn.....	19
2.2	Rešerše problematiky výroby kovových pěn práškovou metalurgií	25
	2.2.1 Klíčové aspekty problematiky výroby kovových pěn práškovou metalurgií	28
3.	NÁVRH A POSTUP EXPERIMENTU.....	30
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	31
4.1	Druhý návrh a provedení experimentu	35
4.2	Třetí návrh experimentu – změna materiálu	42
4.3	Čtvrtý návrh experimentu – změna velikosti vzorků.....	47
5.	ZÁVĚR.....	61
6.	BIBLIOGRAFIE.....	64
7.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	67
8.	PŘÍLOHY	70

Seznam zkratek

SLM	Selective Laser Melting (metoda kovového 3D tisku)
T_t	Teplota tavení (specifická hodnota každého materiálu) [°C, K]
Al	Zkratka pro aluminium → hliník

Seznam použité symboliky

P	[%]	Pórovitost
V	[m ³]	Objem pórů ve vzorku
V _s	[m ³]	Objem ve vzorku
ρ _{rel}	[-]	Relativní hustota – bezrozměrná veličina
ρ	[kg/ m ³]	Hustota pěny
ρ _s	[kg/ m ³]	Hustota základního materiálu vzorku
m	[kg; g]	Hmotnost, základní veličina SI
F	[N, kN]	Síla, základní jednotka Newton
F	[t]	Síla, odvozená jednotka tuna, kdy t ≈ 9,81 kN
p	[Pa, MPa]	Tlak
t	[min, sek]	Čas, základní veličina SI
T	[°C]	Teplota

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Pro tuto diplomovou práci jsem si zvolil téma Hliníkové pěny vyrobené metodou práškové metalurgie. Tato problematika mě zaujala v rámci prvního ročníku magisterského studia – v předmětu Projekt 2 jsem měl zadání semestrální práce hliníkové pěny. Bohužel, požadovaný rozsah určeného tématu nedovolil v semestrální práci plně rozebrat problematiku, tak jak bych si představoval. Z tohoto důvodu jsem si při výběru zadání diplomové práce vzpomněl na výše zmíněnou seminární práci.

Myslím si, že by tematika mohla zaujmout i širší veřejnost, a to z hlediska širokého spektra využití hliníkových pěn, ale i jejich výrobou.

V projektu jsem se pokusil vyrábět Al pěny za pomoci slévárenské metody zalití prekurzoru taveninou a metodou Alporas. Tato řešení mi však nepřišla moc perspektivní z několika hledisek, z hlediska špatného rozptýlení a velikosti dutin a z důvodu pevnosti takto vytvořené struktury a špatné reprodukovatelnosti.

Právě z těchto důvodů jsem se začal více zabývat problematikou výroby Al pěn za pomoci práškové metalurgie, jež by měla mít lepší vlastnosti než pěny vyráběné slévárenskými metodami.

Ve svém volném čase pracuji v teamu CTU Lion na stavbě závodního elektrického motocyklu, která je z velké části ze slitin hliníku. Proto bych rád využil získané zkušenosti při odhalování problematiky výroby a použití hliníkových pěn v této práci, i třeba k budoucí výrobě odlehčených málo namáhaných částí motorčky pomocí hliníkových pěn.

1.1 Cíle práce

Cílem této práce je najít technologický postup výroby z hliníkové slitiny pomocí práškové metalurgie v provozních laboratorních podmínkách školy. Teoretická část se zaměřuje na charakteristiku kovových pěn, jejich vlastnosti, metody výroby, materiály vhodné pro zpěnění možnosti aplikace.

V praktické části je napsán navržený plán experimentu a kroky postupu výroby hliníkové pěny vyrobené práškovou metalurgií od navážení a smíchání příměsí až po napěňování v žíhací peci, včetně vyhodnocení vyrobených vzorků.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Kovové pěny jsou porézní materiály, jejichž uplatnění se v současnosti v různých průmyslových odvětvích stále rozrůstá. Lze je vytvořit z různých kovových materiálů, a to za pomoci různých způsobů výroby. Proto se nyní pokusím vysvětlit, proč se kovové pěny využívají, jaké mají přednosti ale i nedostatky. Níže také představím některé způsoby, kterými je lze vytvářet.

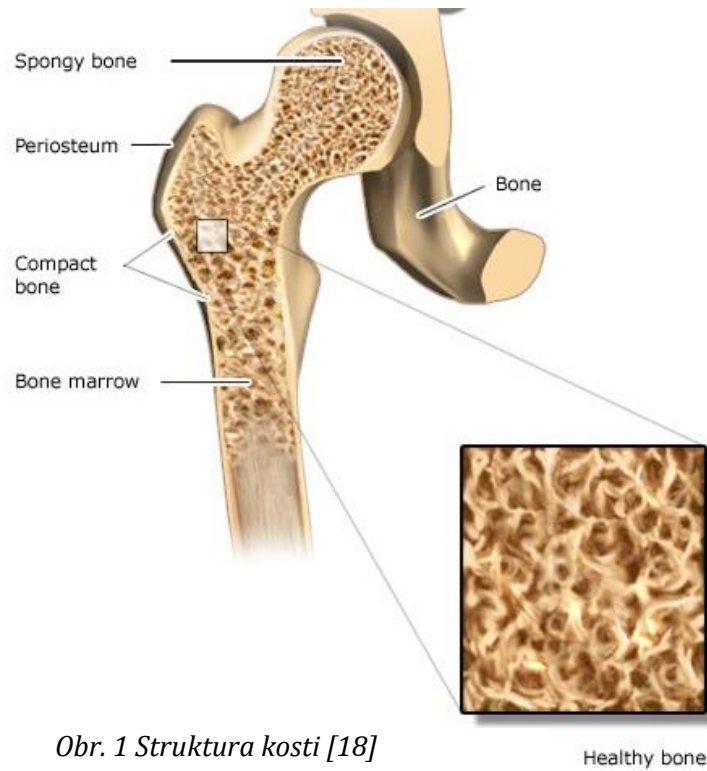
A dále se budu podrobněji zabývat problematikou při výrobě kovových pěn práškovou metalurgií.

2.1 Kovové pěny, materiály vhodné ke zpěňování, aplikace pěn

Obecně pevné pěny jsou materiály s pórovitou strukturou, které mají velmi výhodné vlastnosti z hlediska zatížení a váhy. Tento princip je odvozen z přírodních celulárních struktur například kostí (např. viz. Obr. 1), houbových materiálů či stébel rostlin apod. Tyto struktury mají vysokou pevnost v poměru k jejich váze. Z toho lze usoudit, že využití pevných pěn je výhodné ze zátěžového hlediska, kde je omezeno zatížení vlastní vahou a také přináší další zajímavé vlastnosti jako například akustické nebo tlumící vlastnosti. [1] [2] [3] [4]

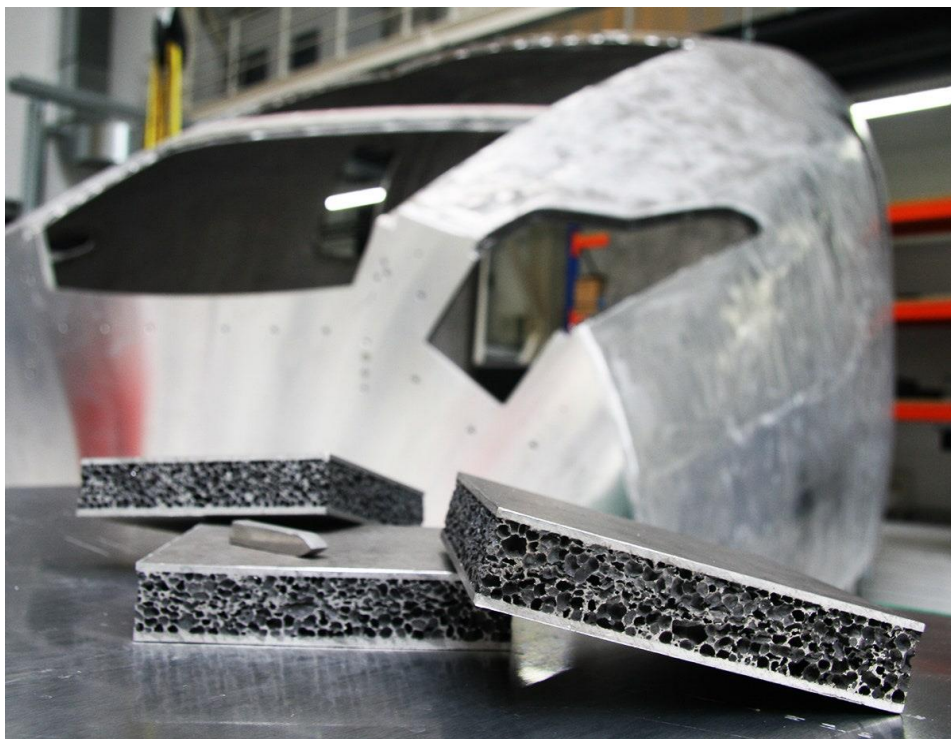
Nejvíce jsou využívány a vyráběny polymerní pěny, u kterých využíváme jejich pružnosti a tlumících vlastností. V historii byla snaha pro získání obdobných vlastností, avšak při vyšších pevnostech pěny. Z toho důvodu vznikl vývoj kovových pěn. [1] [2] [3]

Kovové pěny jsou kovové materiály s pórovitou strukturou, a tudíž nízkou hustotou k vnějším rozměrům a velmi zajímavými mechanickými, fyzikálními, tepelnými, elektrickými a akustickými vlastnostmi. Dnes jsou nejčastěji využívány k absorpci energie a k využití jejich tepelných a akustických vlastností. Důvodem využívání k absorpci energie je jejich vysoce pórovitá struktura, díky které jsou kovové pěny schopny pohlcovat velké množství mechanické energie při deformaci. [3] [5]



Obr. 1 Struktura kosti [18]

Díky těmto vlastnostem se používají jako deformační zóny vozidel, pro ochranné obaly přepravovaného zboží, výtahových a dopravníkových zařízení a zásobníky munice lehkých obrněných vozidel či jako součást pancéřové ochrany obrněných vozidel. [3] [5]



Obr. 2 Sendvič hliníkové pěny využitý k výrobě prototypu německého vysokorychlostního vlaku [19]

2.1.1 Vlastnosti kovových pěn

Vlastnosti kovových pěn závisí na morfologii (typu pórovitosti, požadované pórovitosti materiálu, velikosti a tvaru pórů a na celkové vnitřní ploše porézního materiálu), metalurgii (druhu kovu nebo slitiny nebo mikrostruktury) nebo technologii výroby. [6]

Kovové pěny mají veliký potenciál použití a zajímavé vlastnosti, ale jsou dosud relativně neznámé pro odbornou veřejnost. Některé z těchto vlastností jsou:

- **Nízká hustota:** Kovové pěny mají nižší hustotu než plné kovy, což znamená, že jsou lehčí a mohou snižovat hmotnost konstrukcí. [2]
- **Vysoká pevnost a tuhost vůči své váze:** Kovové pěny mají vysokou pevnost a tuhost v poměru k jejich hmotnosti, což znamená, že jsou vhodné pro použití na lehké konstrukce. [2] [5] [7]
- **Vysoká absorpce energie (odolnost proti nárazům a výbuchům):** Kovové pěny mají díky jejich struktuře schopnost pohlcovat velké množství kinetické energie. Proto se začaly využívat v automobilovém i vojenském průmyslu, v deformačních zónách automobilu, či jako součást pancíře obrněných vozidel. [2] [5] [7]
- **Dobrá akustická tlumivost:** Kovové pěny mají dobrou schopnost tlumit vibrace a zvuky, což znamená, že mohou zlepšovat komfort a bezpečnost. [2] [5] [7]
- **Teplená vodivost:** Díky plynovým pórům má nízkou tepelnou vodivost, nedosahují kvalit nekovových pěn. Ale v kombinaci s vyšší tepelnou odolností mohou sloužit jako protipožární ochrana. Naopak pěny s otevřenou strukturou využité jako teplené výměníky dosahují výrazného zlepšení přenosu tepla. [2] [5] [7]
- **Elektrická vodivost:** Ačkoli vodivost kovové pěny je menší než elektrická vodivost kovu z kovu, ze kterého je vyrobena, je více než dostatečná pro zajištění dobrého elektrického uzemnění a stínění kovových materiálů před elektromagnetickým zářením. [5]
- **Dobrá odolnost vůči ohni a korozi:** Kovové pěny mají dobrou odolnost vůči ohni a korozi díky jejich nízké hořlavosti a inertnosti, což znamená, že mohou snášet vysoké teploty a chemické účinky. [2] [5] [7]



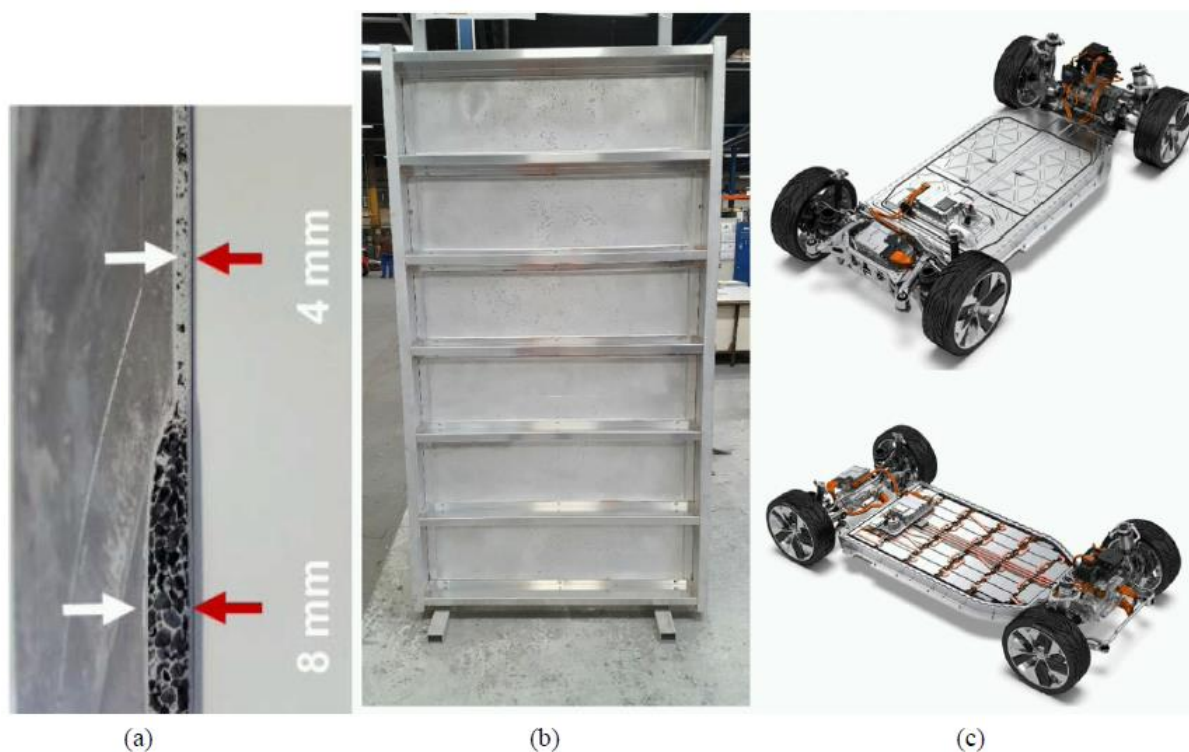
Obr. 3 Vrstvený panel z 8mm silné leštěné granitové desky a 20mm silný pěnový sendvič z hlikové slitny po zasažení projektilem [8]

Jak je psáno výše nízká hmotnost je jednou z hlavních předností kovových pěn. Ale hmotnost je veličina závislá na vnějších rozměrech, proto není vhodná pro porovnávání. Z toho důvodu se charakterizují relativní hustotou ρ_{rel} , což je poměr hustoty pěny ρ a hustoty základního materiálu ρ_s ,

$$\rho_{rel} = \frac{\rho}{\rho_s} < 1 [-] \quad (1)$$

nebo pórovitostí P , která je charakterizována jako poměr objemu pórů V k celkovému objemu pěnového dílu V_s vyjádřenou v procentech. [5] [6]

$$P = \frac{V}{V_s} \cdot 100 < 100 [\%] \quad (2)$$



Obr. 4 Koncept podvozku a bateriového boxu elektrického vozu a) Slisovaný panel AFS použitý k získání utěsněných okrajů, b) modul zahrnující podvozkovou část (zadní strana) a bateriové prostory (přední strana), c) umístění prototypu v elektromobilu (konceptní vůz Jaguar I Pace) [8]

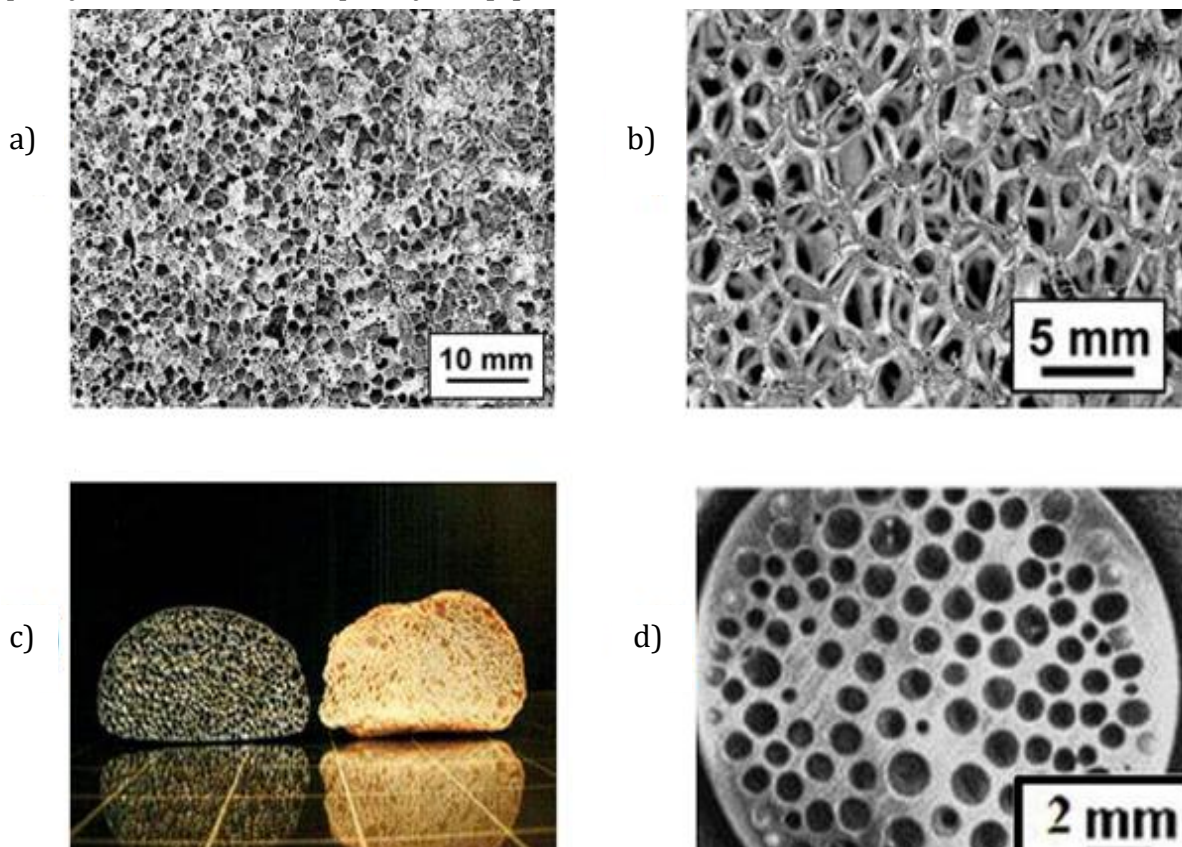
2.1.2 Struktura pórů

Struktura pórů je ve formě velkého množství náhodně rozmístěných nebo usměrněných plynových kapes neboli pórů různých tvarů a velikostí. Lze vyrábět pěny s nepravidelnou, pravidelnou, propletenou, uspořádanou, a dokonce již i se strukturou přesně stanovených tvarů, které jsou ale dost náročné a nákladné na výrobu. [4] [5]

Nejdůležitější druh struktury je „pěnový“ s náhodně a nepravidelně uspořádanými nerovnoměrnými póry. Podle tvaru a velikosti pórů můžeme rozlišit dva základní typy struktury kovových pěn: otevřenou a uzavřenou. [4] [5]

Otevřená struktura kovových pěn se vyznačuje tím, že póry jsou propojeny mezi sebou můstky a tím s nimi tvoří spojitou síť, jak to můžeme vidět na Obr. 5 v pravém horním rohu. Tento typ struktury má vyšší propustnost pro plyny a kapaliny, nižší hustotu, nižší pevnost a vyšší schopnost tlumit zvuk a vibrace vůči uzavřené struktuře. Otevřené kovové pěny se používají například jako filtry, katalyzátory, absorbéry zvuku, výměníky tepla nebo kostní implantáty. [6]

Uzavřená struktura kovových pěn se vyznačuje tím, že póry jsou izolované od sebe a tvoří uzavřené buňky, jak to můžeme vidět Obr. 5 v levém horním rohu. Tento typ struktury má nízkou propustnost pro plyny a kapaliny, vyšší hustotu, vyšší pevnost a nižší schopnost tlumit zvuk a vibrace (vůči otevřené struktuře). Uzavřené kovové pěny se používají například jako lehké konstrukční materiály, tepelné izolace nebo ochranné prvky v automobilovém průmyslu. [6]



Obr. 5 Vnitřní struktury kovových pěn. a) Uzavřená, b) Otevřená, c) Houbovitá, d) Lotosovitá (orientované póry) [7]

2.1.3 Mechanické vlastnosti

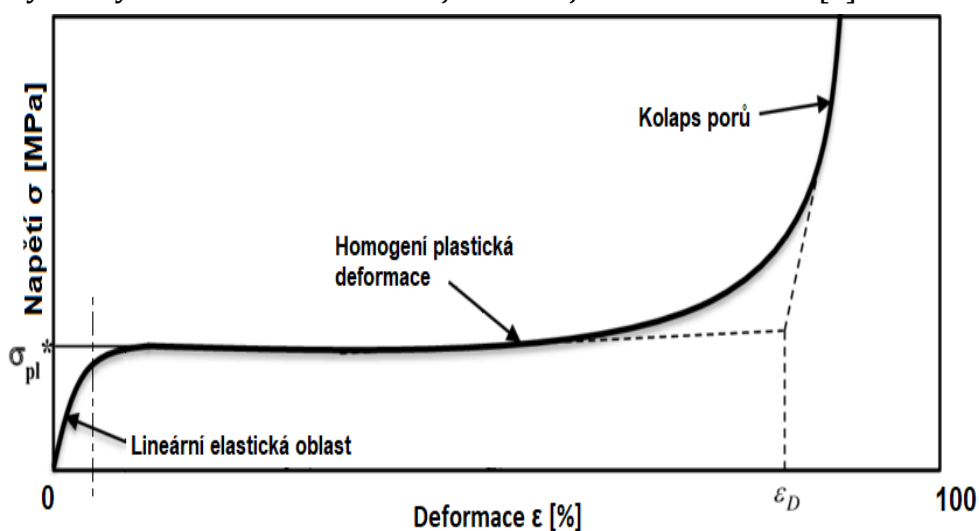
Mechanické vlastnosti jsou pro každé parametry a způsoby výroby různé. Teoreticky se mají chovat jako na Obr. 6, ale to se liší od reálného průběhu. Na Obr. 7 je reálná tahová zkouška hliníkové pěny vyrobené způsobem Alporas s relativní hustotou 0,11 s otevřenými póry. [5]

Kovové pěny s otevřenými póry běžně vykazují křivky plastické deformace, které jsou stejného tvaru a nijak se neodlišují kus od kusu při stejném výrobním procesu, protože otevřené póry se deformují zpravidla v ohybu. V uzavřených pórech je oblast plastické deformace komplikovanější a může docházet k napětovým špičkám, protože plochy uzavřených pórů jsou namáhány tahem i tlakem a chovají se jako membrány.

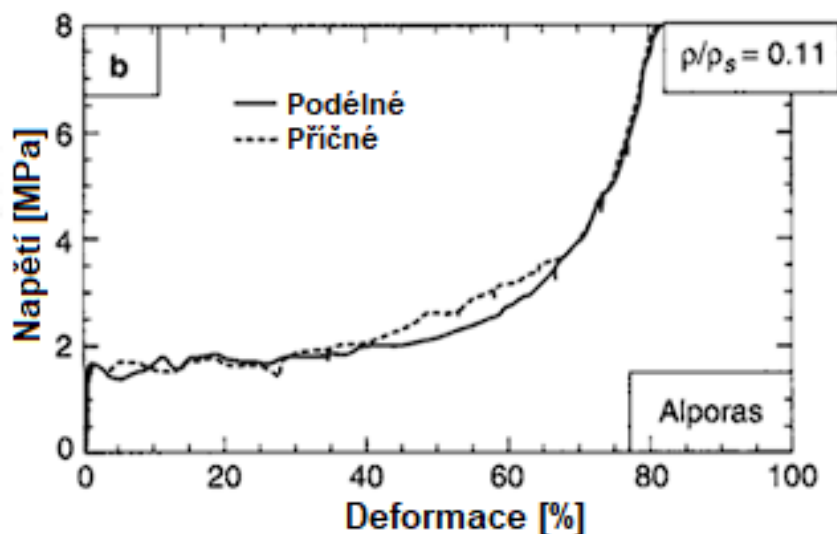
V těchto pěnách je obvykle docela velká anizotropie mechanických vlastností. To je ovlivněno nejvíce strukturou, která bývá mírně usměrněná z výroby. Takto lze dosáhnout anizotropie až 30 %. [5]

Sklon křivky napětí-deformace před deformací na mezi kluzu je nižší než Youngův modul pružnosti E , což znamená značnou mikroplasticitu při velmi nízkých napětích. Nad mezí kluzu σ_y kovové pěny tvrdnou až do maximální pevnosti v tahu σ_{ts} (viz Obr. 6). Youngův modul pružnosti E se určuje jiným způsobem, protože křivka elastického průběhu není lineární a její tvar je kus od kusu jiný. To je ovlivněno strukturou a defekty pórů. [5]

Proto se Youngův modul pružnosti určuje například zatížením do plastické oblasti a poté odlehčením a odečtením E z křivky odlehčení z plastické deformace. Také se liší modul v tlaku a v tahu a to tak, že E tah je přibližně o 10 % větší. Pro hlubší poznatky a číselné výsledky a informace se odkazují na zdroj tohoto odstavce. [5]



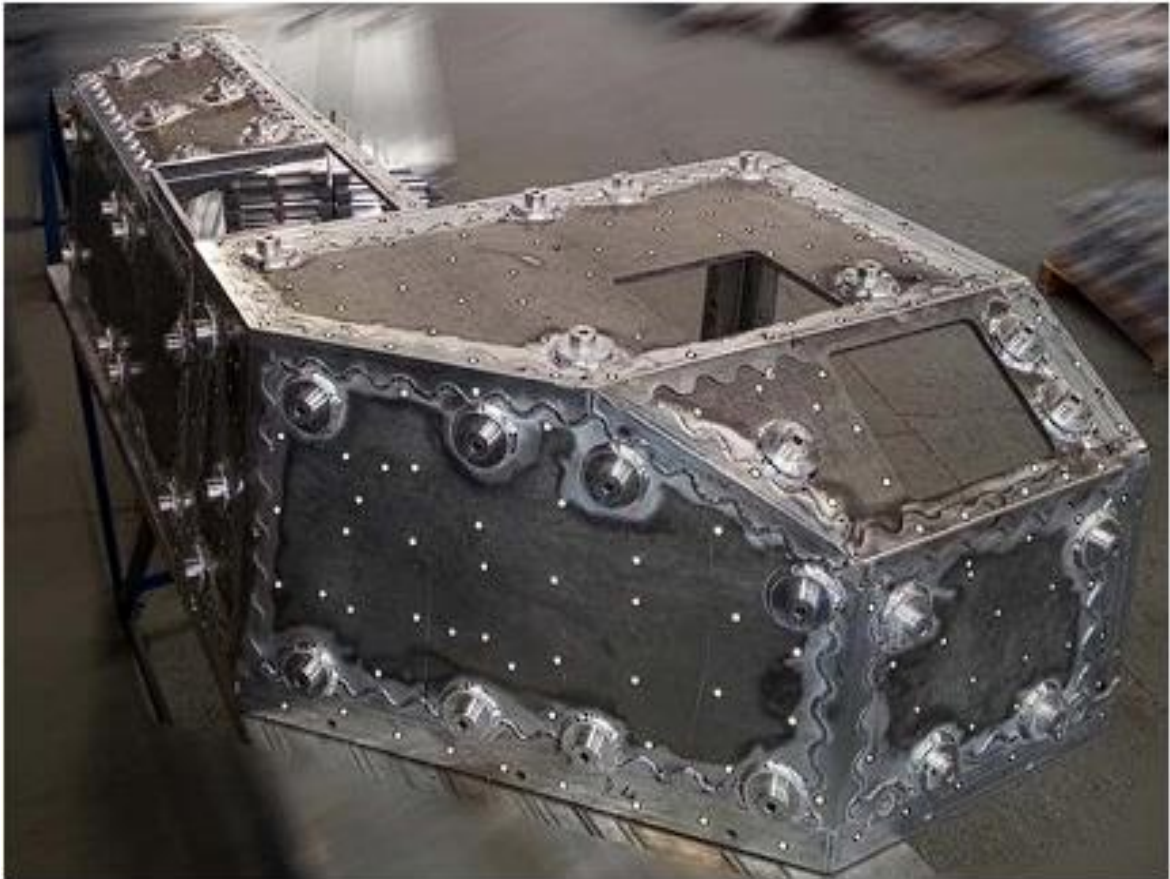
Obr. 6 Teoretický průběh tahové zkoušky Al pěn [12]



Obr. 7 Reálný průběh tahové zkoušky Al pěn [5]

2.1.4 Aplikace kovových pěn

Jak již bylo nastíněno dříve, kovové pěny se využívají v různých oblastech, jako je automobilový průmysl, letecký průmysl, stavebnictví, biomedicína a energetika. Některé z možných aplikací kovových pěn jsou například výztuže nárazníků, tlumiče zvuku, tepelné výměníky, kostní implantáty a elektrody, filtry, katalyzátory, jádra sendvičových konstrukcí, a další. [2] [4] [8]



Obr. 8 Zásobník munice z lehkého obrněného vozidla svařený z hliníkového pěnového sendviče [8]

2.1.5 Materiály vhodné ke zpěnění

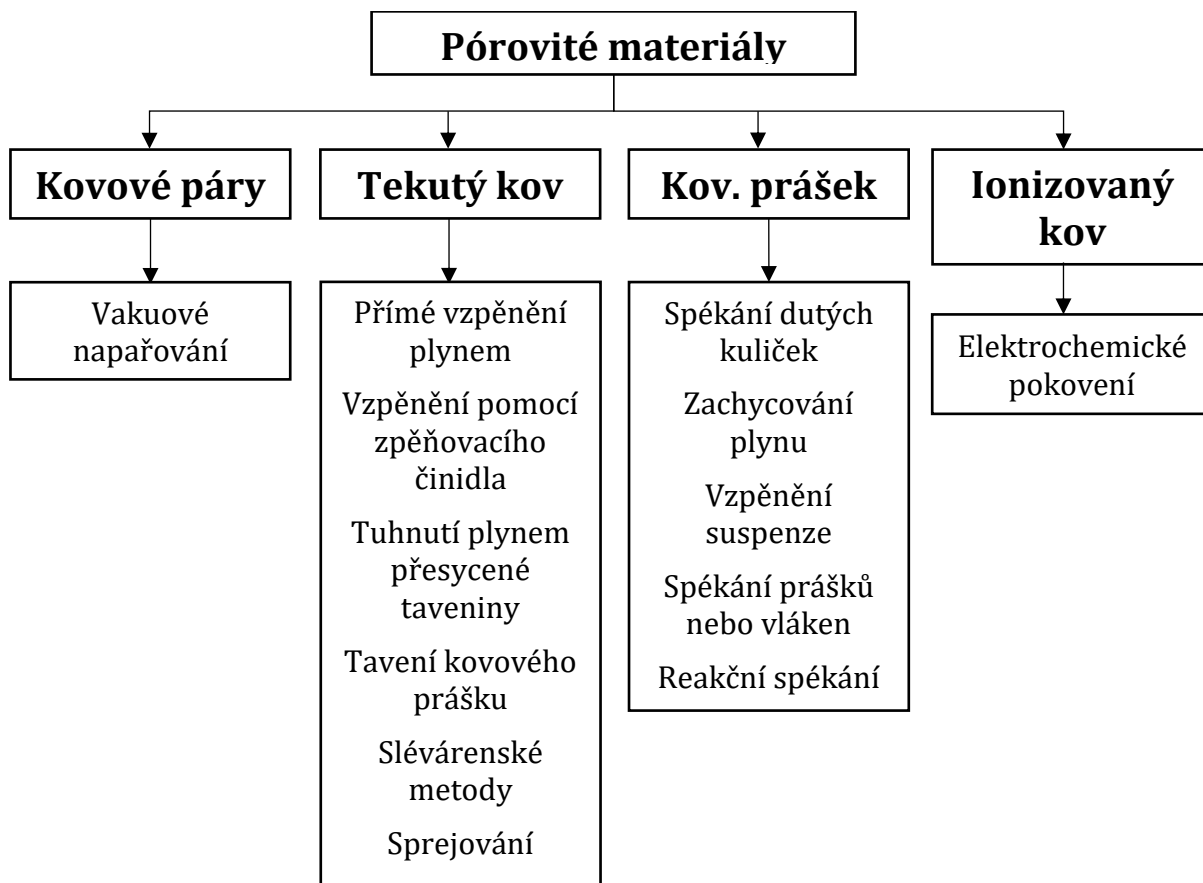
Pro výrobu kovové pěny je třeba zvolit vhodný kovový materiál, který splňuje požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti. Některé z možných materiálů (a jejich slitin) jsou:

- **Hliník:** V současnosti nachází největší uplatnění. Hliníková pěna je lehká, levná a snadno zpracovatelná. Hliník má také dobrou tepelnou vodivost a elektrickou vodivost. Hliníková pěna se vyrábí například přidáváním zpěňovačů do taveniny nebo metodou práškové metalurgie, kdy se slisuje (slinuje) hliníkový prášek s přidáním zpěňovačů a následně nechá v peci napěnit. [1] [4] [5]

- **Ocel:** Ocelová pěna je pevná, tuhá a odolná vůči opotřebení a nárazům. Ocel má také vysokou teplotní stabilitu a odolnost vůči korozi. Ocelová pěna se vyrábí například metodou práškové metalurgie, kdy se smíchají ocelový prášek a pórovitý materiál, který se po spékání odstraní. [5]
- **Titan:** Titanová pěna je lehká, pevná a biokompatibilní. Titan má také vysokou odolnost vůči teplotě a korozi. Titanová pěna se vyrábí například metodou depozice v plynné fázi nebo elektro depozice kovu na polymerní pěnu prekurzoru, který je následně vypálen, přičemž okraje buněk jsou duté. [5]
- **Nikl:** Niklové pěny se vyznačují vysokou pevností, odolností proti korozi, tepelnou stabilitou a dobrými elektrickými vlastnostmi. Niklové kovové pěny se obvykle vyrábějí pomocí metod jako je elektro depozice, replikace, metalurgie prášků nebo chemická redukce. [5]
- **Další materiály,** ze kterých lze také vytvářet pěny jsou hořčík, zinek, slitiny mědi, olova atd. Záleží na výrobními procesu, avšak výroba pěn z materiálu jiného, než hliník není perspektivní. [5] [7]

2.1.6 Metody výroby kovových pěn

Výše byly specifikovány obecné informace ke kovovým pěnám, které se skládají z poznatků nalezených v literatuře. Dále bude práce zaměřena na specifikovaný materiál (hliník a jeho slitiny), a také metodiku výroby Al pěn, která je poměrně rozsáhlá. Téměř všemi metodami výroby kovových pěn lze vyrábět i hliníkové pěny. Na Obr. 9 jsou znázorněny výrobní metody kovových pěn.



Obr. 9 Přehled výrobních postupů pórovitých kovových materiálů [10]

Jak lze z Obr. 9 výše vyčíst, lze výrobní procesy rozdělit do čtyř skupin, a to dle stavu základní kovového materiálu:

- kovové pěny se mohou vyrábět z tekutého kovu,
- kovového prášku,
- ionizovaného kovu,
- kovové páry.

Pro tuto práci jsou stěžejní kovové pěny vyráběné z kovového prášku, ostatní metody jsou však více či méně používány také, proto bychom na ně neměli zapomínat. V následující části práce se budu věnovat nejpoužívanějším metodám výroby kovových pěn v praxi s výjimkou těch z prášku.

Přidání zpěňovadla uvolňující plyn do taveniny

Tato metoda se nazývá Alporas a využívá jí Japonská firma Shinko Wires. Napěnění je v tomto výrobním procesu dosaženo přidáním napěňovacího činidla do taveniny. Napěňovací činidlo se za působení tepla rozkládá a vznikají plyny, které se v tavenině zachycují a tím tvoří pěnu. Ke stabilizaci a zvětšení viskozity taveniny se používá vápník a jako činidlo se používá nejčastěji hydroxid titanu TiH_2 nebo $CaCO_3$. [1] [7] [9]

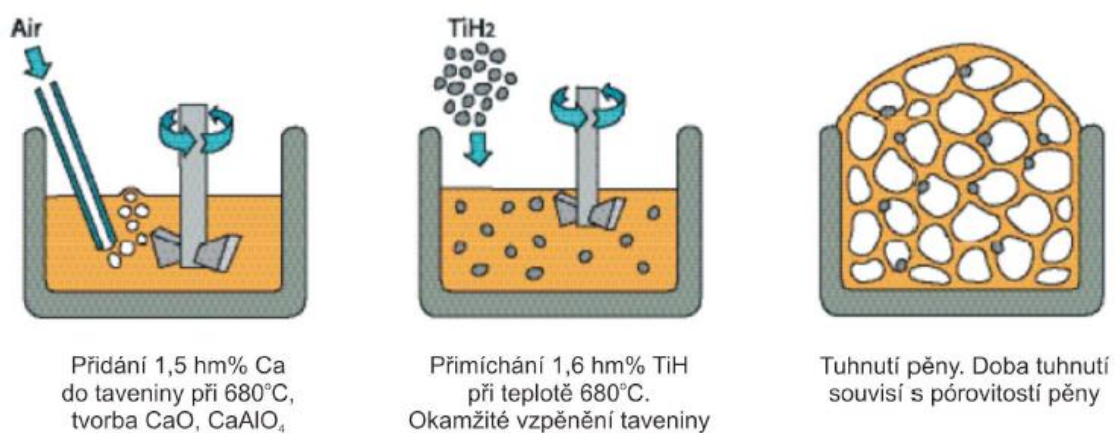
Vzniklá struktura může obsahovat jak uzavřené, tak otevřené póry. Nevýhodou této metody je nízká pevnost, proto se tyto pěny využívají převážně jako tepelné a zvukové izolace nebo v designu. [1]

Kvůli stabilizování taveniny keramickými částicemi ale vzniká problém s rychlejším opotřebením řezných nástrojů, a hlavně s recyklovatelností pěn vyrobené touto metodou. [7]

Proces výroby následuje tyto kroky:

1. Tavení kovové matrice.
2. Přidání Ca a Al_2O_3 , Al_4Ca , $CaCO_3$ apod. do taveniny.
3. Přidání napěňovacího činidla.
4. Expanze pěny uvnitř uzavřené formy.
5. Ztuhnutí pěny ve formě.

V případě použití zpěňovadla $CaCO_3$ lze krok 2 a 3 sloučit



Obr. 10 Přímé zpěňování taveniny metodou Alporas [9]

Injektáž plynu do roztaveného kovu

Tuto metodu využívá kanadská firma Cymat. Jedná se o jeden z nejvíce produkčních způsobů výroby kovových pěn, díky relativně levnému a „jednoduchému“ způsobu výroby. Pomocí této metody jdou vytvářet kovové pěny z různých typů kovů, jako jsou hliník, hořčík, měď nebo ocel. [7] [9] [10]

Proces výroby touto metodou je následující:

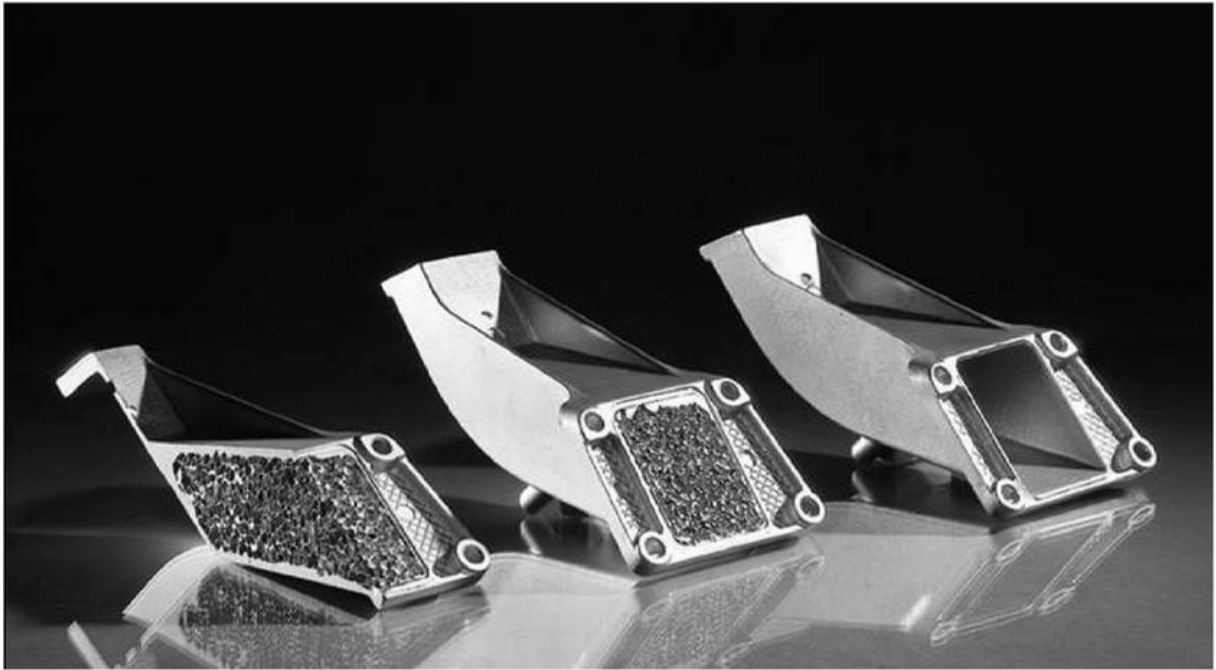
1. Roztavení zvoleného typu kovu na taveninu.
2. Přidání vyztužujících částic do taveniny (10-20 % SiC, MgO nebo Al₂O₃).
3. Vstříkování plyn do taveniny.
4. Vytahování vyvzlínané pěny z povrchu taveniny.



Obr. 11 Proces výroby injektáží plynu do taveniny [7]

Zpěnění je dosaženo vstříkováním plynu (vzduch, argon, dusík) do stabilizované taveniny za pomoci rotačního nebo vibračního míchadla, které zajišťuje rovnoměrné rozložení jemných bublinek plynu v tavenině. Stabilizovaná tavenina je tavenina s přidanými keramickými částicemi (karbid křemíku, oxidu hořečnatý), které zabraňují kolaboraci pěny, než ztuhne. [7] [9] [10]

Vzniklá pěna vyvzlíná na hladinu a je za pomoci dopravníkového pásu kontinuálně vytahována z pece nebo vtlačována do formy, kde dochází k tuhnutí. Vyrobenu pěnu lze upravit do požadovaného tvaru, ale pouze velmi jemně aby došlo k destrukci relativně křehké struktury pěny. Kvůli stabilizování taveniny keramickými částicemi ale vzniká problém s rychlejším opotřebením řezných nástrojů, a hlavně s recyklovatelností pěn vyrobené touto metodou. [7] [9] [10]



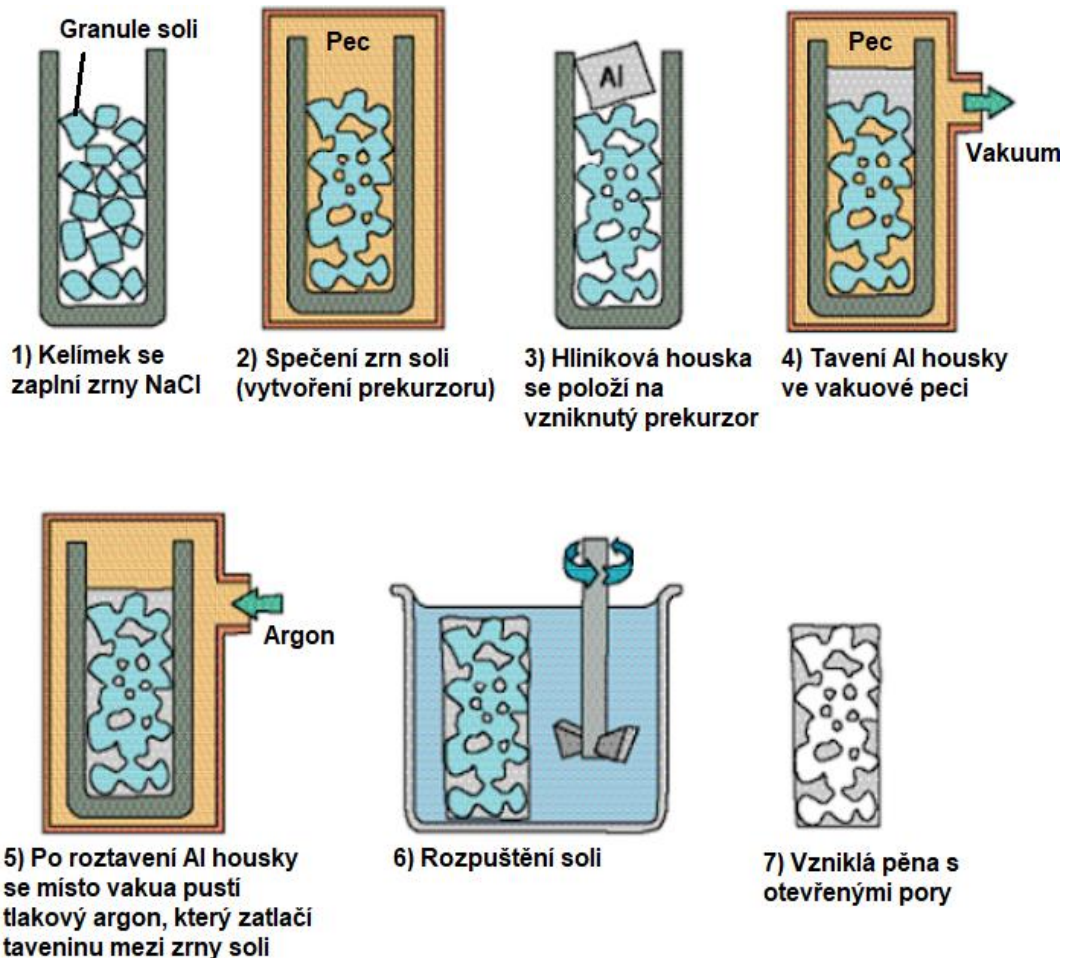
*Obr. 12 Prototyp držáku motoru BMW vyrobený společností LKR Ranshofen.
Zprava: prázdný odlitek, kompozitní díl složený z pěnového jádra a odlévané skořepiny a řez kompozitním dílem. [2]*

Zalítí výplňového materiálu

Tato metoda spočívá v zalévání preformy, která má tvar negativu pěny a je dostatečně žáruvzdorná. Poté se preformy buď nechávají uvnitř pěny anebo se chemicky odstraní. V této metodě je rozhodující preforma, která se vyrábí běžně z granulí soli (NaCl), kuliček z pěnového skla, kuliček oxidu hlinitého apod. V případě použití keramiky nebo oxidu hlinitého, vzniká spíše kompozit nežli pěna, který se využívá jako např. balistická ochrana pro bojová vozidla. [9] [11]

Pokud se vyrobí preforma z granulátu, které se spojí například spékáním tak lze získat otevřené póry, které se kompletně chemicky vymyjí od preformy a zbude čistá kovová pěna. Velikost a struktura je nejvíce ovlivněna tvarem a velikostí granulátu, který bývá v rozmezí od 10um do 10mm. Problém s touto metodou je, že granuláty nechávají kolem sebe velmi malá a nepravidelná místečka kde vzniká problém se zabíhavostí tekutého kovu. Toto se řeší zaléváním výplňového materiálu tekutým kovem pod tlakem. [9] [11]

Dalším problémem u této metody může být uzavření výplňového materiálu v kovu který pak nelze z pěny odstranit a vzniká tedy kompozit, a ne odlehčená struktura. Na Obr. 13 je schematicky znázorněn výrobní postup metody zalítí výplňového materiálu.



Obr. 13 Výrobní proces zalití výplňového materiálu [9]

2.2 Rešerše problematiky výroby kovových pěn práškovou metalurgií

Výroba kovových pěn pomocí práškové metalurgie je inovativní proces, který umožňuje vytvářet materiály s unikátními vlastnostmi. Tento postup spočívá ve zpracování kovového prášku a jeho proměně v pěnovou strukturu. [12]

Metod, kterými lze vytvořit pěnovou strukturu z kovu v podobě prášku je více. Já se zaměřím převážně na metodu výroby kovových pěn z vylisovaného prášku a napěňovacího činidla která je komerčně nazývána Alulight. Jedná se o jednu z nejnovějších a nejperspektivnějších metod která spočívá v přímém pění hliníkových slitin pomocí titanového hydridu. [10] [12]

Metoda Alulight byla vyvinuta ve spolupráci mezi rakouskou firmou Alulight International GmbH a německým Fraunhoferovým institutem pro výrobní techniku a aplikovaný výzkum materiálů. Metoda Alulight spočívá v tom, že se do roztavené hliníkové slitiny přidává malé množství titanového hydridu (TiH_2 , popř. ZrH_2), který se začne rozkládat na titan a vodík při teplotách nad $450\text{ }^\circ\text{C}$. Vodík pak tvoří bubliny v kapalném kovu, které se udržují na povrchu pomocí tenké oxidické vrstvy. Tímto způsobem se vytváří kovová pěna s uzavřenou strukturou, která se poté ochlazuje a tuhne. Na *Obr. 15* je schematicky znázorněn výrobní postup metody. [5] [11] [13]



Obr. 14 Řez nosníku motoru vyplněný Alulight pěnou po čelním nárazu [13]

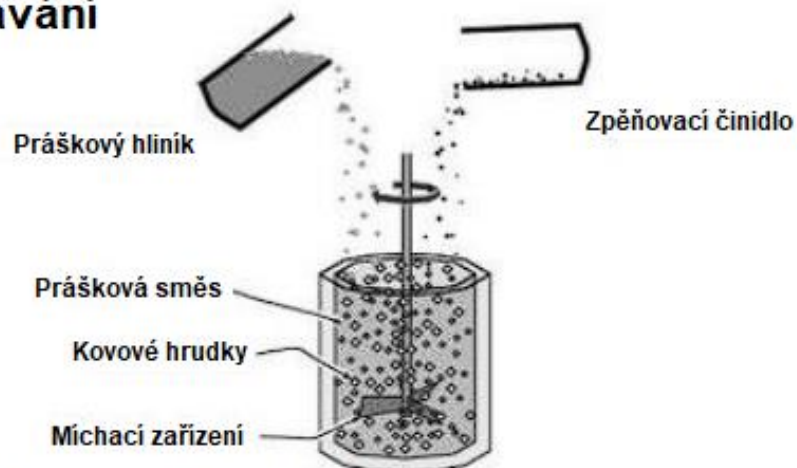
Kovové pěny vyrobené metodou Alulight mají řadu výhod oproti jiným metodám. Jednou z nich je možnost regulace hustoty a velikosti buněk pěny pomocí množství a velikosti zrn TiH_2 . Další výhodou je možnost použití různých hliníkových a hořčíkových slitin, jako je například AlSi10Mg , AlSi12 nebo AlMg5Si2Mn . [14] [13]

Tyto slitiny mají lepší mechanické a korozní vlastnosti než čistý hliník. Kovové pěny vyrobené metodou Alulight také vykazují dobrou tepelnou stabilitu a homogenitu struktury. [14] [13]

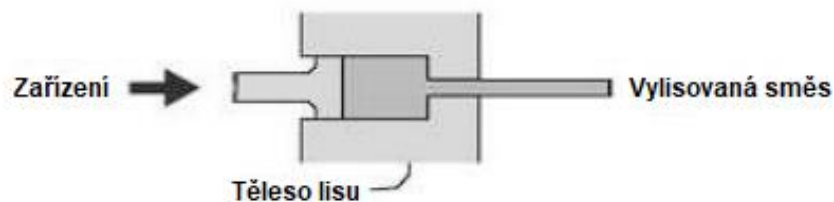
Patentovaný proces výroby touto metodou je následující:

1. Smíchání přísad (práškový hliník + zpěňovací činidlo).
2. Lisování směsi za studena.
3. Protlačování za tepla do podoby plátů nebo tyčí.
4. Vložení do uzavřené formy.
5. Proces pěnění v peci.

Smíchávání přísad



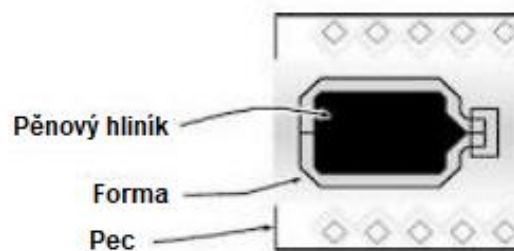
Lisování a protlačování



Nařezané výlisky



Pěnění

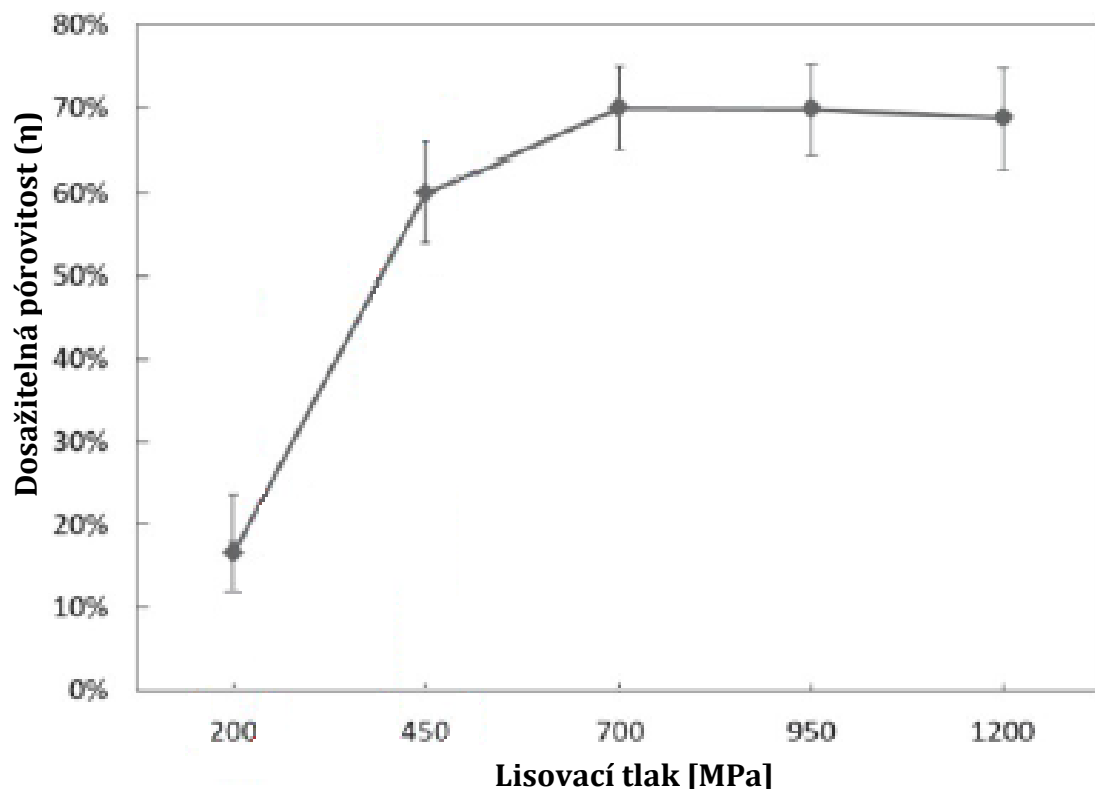


Obr. 15 Proces výroby kovové pěny metodou Alulight [7]

2.2.1 Klíčové aspekty problematiky výroby kovových pěn práškovou metalurgií

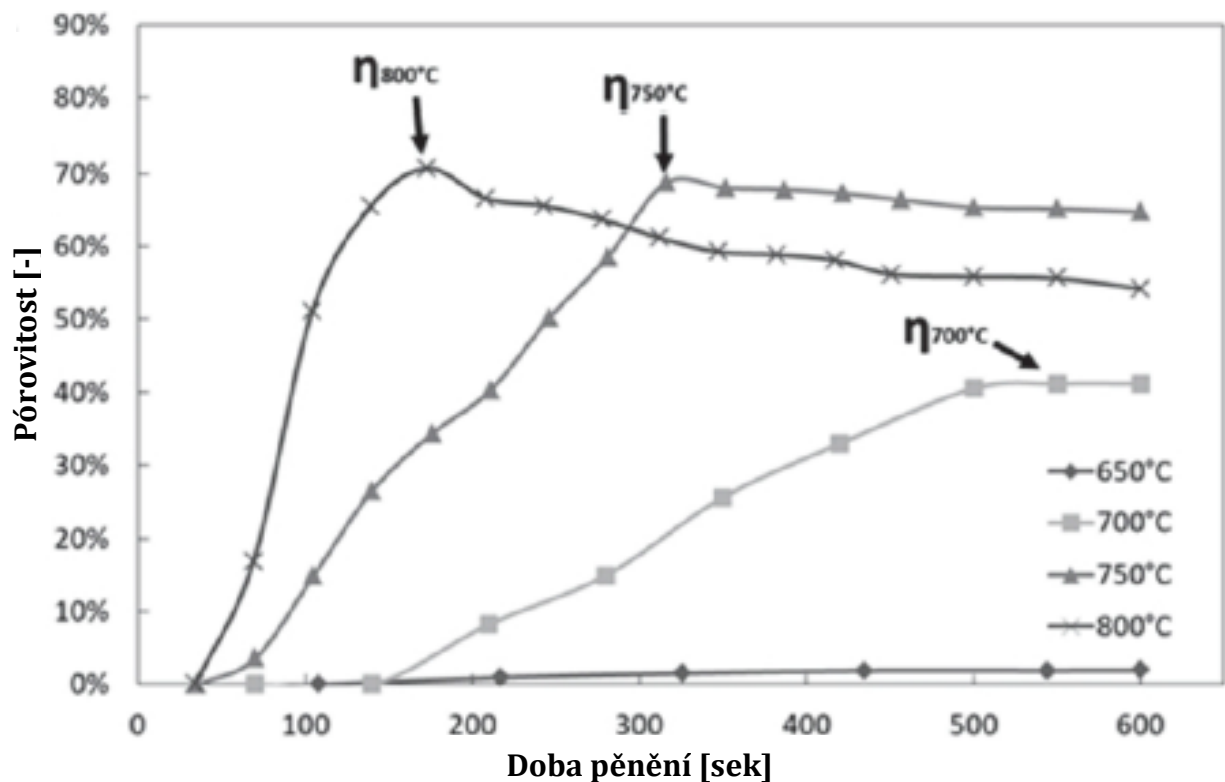
Výroba kovové pěny metodou Alulight, je oproti jiným metodám poměrně náročná. Proto níže uvedu klíčové aspekty problematiky výroby pěny metodou Alulight:

- 1. Výběr vhodného kovového prášku a zpěňovacího činidla:** Jedná se o základní krok, který má největší vliv na celkový průběh výroby a výsledné vlastnosti aluminiové pěny. Je možné využít běžně dostupné hliníkové slitiny, které se používají pro kovový 3D tisk (SLM). [13] [12] [15]
- 2. Míchání práškové směsi:** Dalším důležitým stádiem výroby je přesné naměření hmotnostních poměrů a důkladné promíchání práškového hliníku se zpěňovacím činidlem. Běžně se používá 0,4 až 1,5% hmotnostního podílu zpěňovadla. [13] [12] [15]
- 3. Lisování směsi za studena:** Zhutnění směsi. Výrazně ovlivňuje výslednou pórovitost pěny. Nejvyšší pórovitosti se dosahuje při zhutnění tlakem přibližně 700MPa viz graf na Obr. 16. [12] [13] [15]



Obr. 16 Graf závislosti účinnosti pěnění na lisovacím tlaku pro Al99,5 [15]

4. **Protlačování za tepla:** Jeden z nejvíce komplikovaných úkonů. Slouží ke rovnoměrnému rozptýlení zpěňovacího činidla, dále by měl tento krok také pomáhat s rozbíjením oxidového filmu na povrchu hliníkového prášku. Protlačování probíhá přibližně při 400-480°C [13]
5. **Proces pění:** Finální krok, při kterém dochází vytvoření napěněné struktury. Na napěnění má velký vliv jak teplota, tak čas výdrže na teplotě (viz Obr. 17). Proces napěňování není rovná přímka. Ve chvíli, kdy dojde k ukončení rozkladu titanu a vodíku z obsaženého TiH₂, dochází ke zmenšování objemu pěny. [12] [13] [15]



Obr. 17 Graf závislosti pórovitosti na čase pění pro různé teploty pění pro Al99,5 [15]

6. **Bezpečnost práce:** Velmi důležitým aspektem při práci s práškovým hliníkem je bezpečnost práce. Hliníkový prášek o rozměrech v desítkách mikrometrů se velice snadno dokáže dostat do lidského těla vdechnutím nebo přes póry na kůži, a způsobit značné zdravotní komplikace (až smrt). Proto je třeba pracovat dobře větrané místnosti s omezeným přístupem, nosit ochranou masku s filtry P3, nebo alespoň respirátor FFP3. Dále také ochranné brýle, antistatický oblek a jednorázové rukavice. [16]

3. NÁVRH A POSTUP EX+PERIMENTU

V experimentu budeme vytvářet hliníkové pěny s výrobním postupem inspirovaným metodou Alulight. Oproti metodě Alulight nebudu provádět protlačování za tepla, protože je tento krok příliš náročný, aby byl zvládnutelný ve školních laboratořích. Jako výchozí materiál bude tedy použit hliníkový prášek a zpěňovadlo. Hliníkový prášek zastoupí prášek ze slitiny AlSi10Mg, jenž se běžně používá při kovovém tisku metodou SLM, a dá se tedy snadno získat. Velikost částic hliníkové slitiny se pohybuje od 25 do 70 μm . Jako zpěňovadlo použijeme prášek TiH_2 , jehož velikost částic se pohybuje okolo 5 μm .

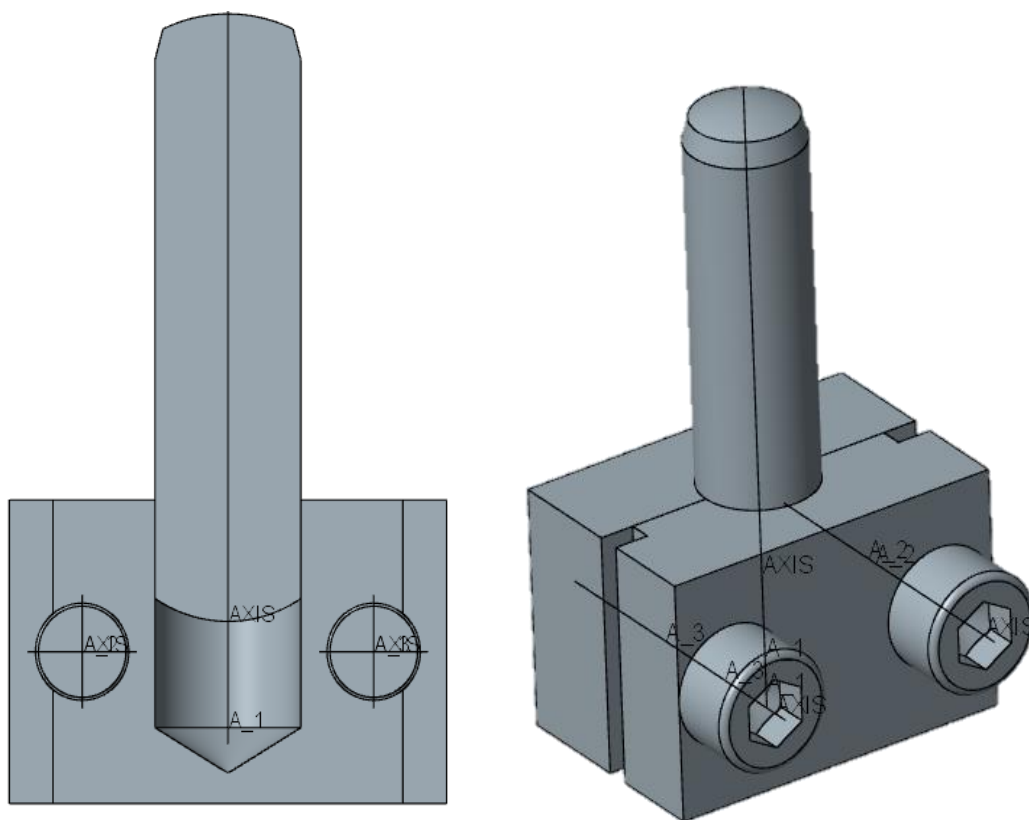
Experiment se bude skládat ze dvou na sebe navazujících částí – a to lisováním a následným napěněním. V první části je třeba připravit a smíchat směs prášků. Do hliníkového prášku se odměří a přidá cca 1% hmotnostní podíl TiH_2 . Směs se musí pořádně promíchat. Z takto připravené směsi odměříme 1,5 gramu a přesypeme ji do připravené lisovací formy. Směs před slisováním by neměla být připravena déle než 24h.

Lisovací forma bude dvoudílná s otvorem o $\varnothing 10\text{mm}$. Lisovací forma se vloží do lisu, kde dojde pomocí pýchovacího trnu a tlaku vyvolaného lisem o tlaku v rozmezí 400-700MPa, ke zhutnění (slisování práškové směsi) s výdrží na tlaku přibližně 5s. Díky půlené formě by vzorky měly jít snadno vyndat a vložit do zpěňovací formy. Zpěňovací forma bude také složena ze dvou půlek + víčka, aby došlo ke zpěnění v uzavřeném variabilně velkém prostoru. Forma se vzorkem bude vložena do studené žíhací pece, kterou budeme postupně ohřívat na zpěňovací teplotu (600-800 $^{\circ}\text{C}$) s dobou pění v rozmezí 5 až 12 minut.

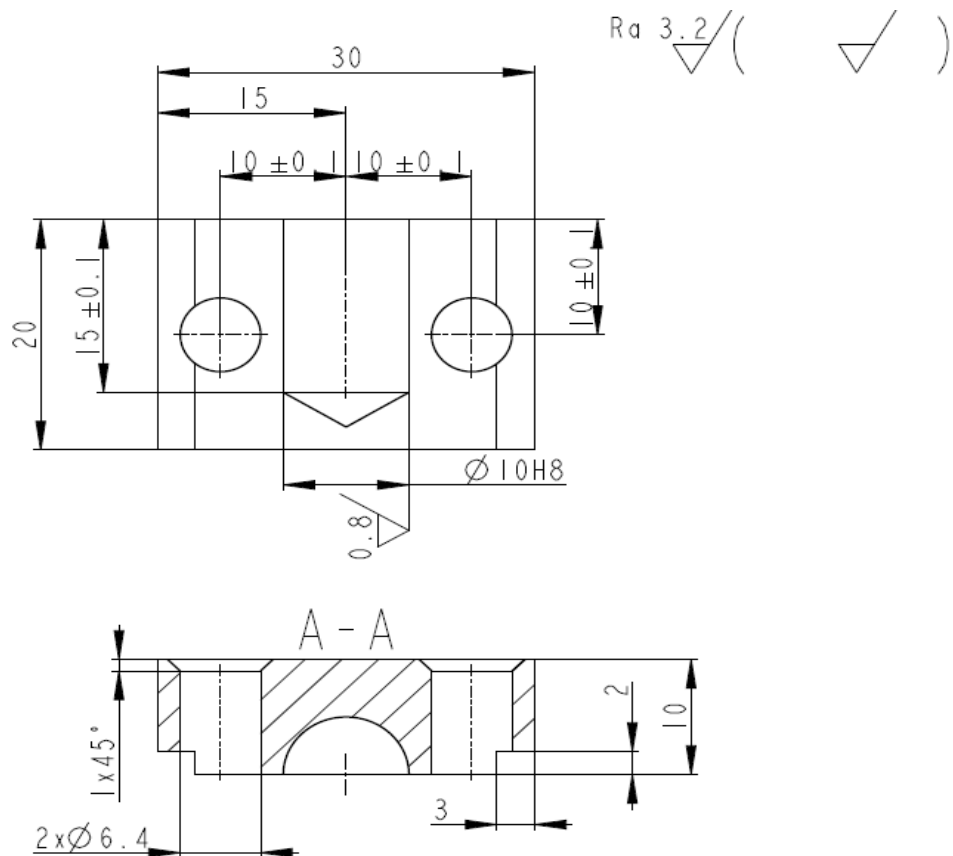
V případě že experiment bude úspěšný a povede vytvořit vzorky s pěnovou strukturou, tak na nich budou provedeny mechanické zkoušky dle ISO 13314.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci návrhu experimentu byla navržena, vymodelována a nechána vyrobit dvoudílná lisovací forma s vystruženým otvorem $\varnothing D = 10H8$, přičemž v jedné z polovin byly vytvořeny drážky v dělicí rovině, aby po lisování šly poloviny formy snadněji rozevřít (viz. Obr. 19). Poloviny formy jsou spojeny pomocí dvou šroubů DIN 912 M6x20 a závitových děr v jedné z polovin. Forma je doplněna lisovacím trnem v podobě kaleného válcového kolíku DIN 6325 10m6x40. Další podrobnosti viz. výkresy v příloze.



Obr. 18 První verze lisovací formy; vlevo řez dělicí rovinou; vpravo izometrický pohled na formu
[Zdroj: vlastní]



Obr. 19 Část zakótovaného výkresu levé poloviny první verze formy [Zdroj: vlastní]

Díky kolegům, kteří obsluhují 3D tiskárnu jsem získal hliníkový prášek ze slitiny AlSi10Mg. Na digitální váze KERN EMB 600-2 (viz. Obr. 20) s rozlišením 0,01g jsem tedy odměřil 6g hliníkového prášku, 0,05g TiH₂ a vložil je do míchací nádoby.



Obr. 20 Digitální váha KERN EMB 600-2 [22]

Běžně se k míchání prášku využívají speciální mísící stroje, jako např. Turbula Wab T2F, které využívají komplexní pohyby k míchání nebo mlecí mlýny. Bohužel, žádný takový není na ústavu k dispozici. Z toho důvodu jsem k mísení prášků využil větší hladkou nádobu, s kterou jsem otáčel a třepal jednu minutu. Následně byla z nádoby odměřeno 1,5g směsi a vložena do lisovací formy.

K lisování byl použit dílenský lis WP45H od firmy Holzmann (viz Obr. 21). Jedná se o ruční lis s jednočinným hydraulickým válcem, jenž dokáže vyvolat maximální sílu 45t (přibližně 441,3 kN). Pohyb válce je zajištěn pomocí ruční pumpy (podobně jako je u hydraulického heveru). Vyvolanou sílu lisem lze odečítat z kruhové stupnice s nejmenším dílkem 1 tuna (přibližně 9,81 kN).

Do lisovací formy se směsí jsem vložil trn a dal do lisu. Pro první pokus byl zvolen lisovací tlak cca 600MPa (lisem vyvolána síla 7 tun). Jelikož se jednalo o testovací pokus, nechtěl jsem z důvodu bezpečnosti využít horní hranici zvoleného lisovacího tlaku, ale zároveň jsem potřeboval otestovat, zdali snese forma alespoň takovéto zatížení.



Obr. 21 Dílenský hydraulický lis Holzmann WP45H [20]

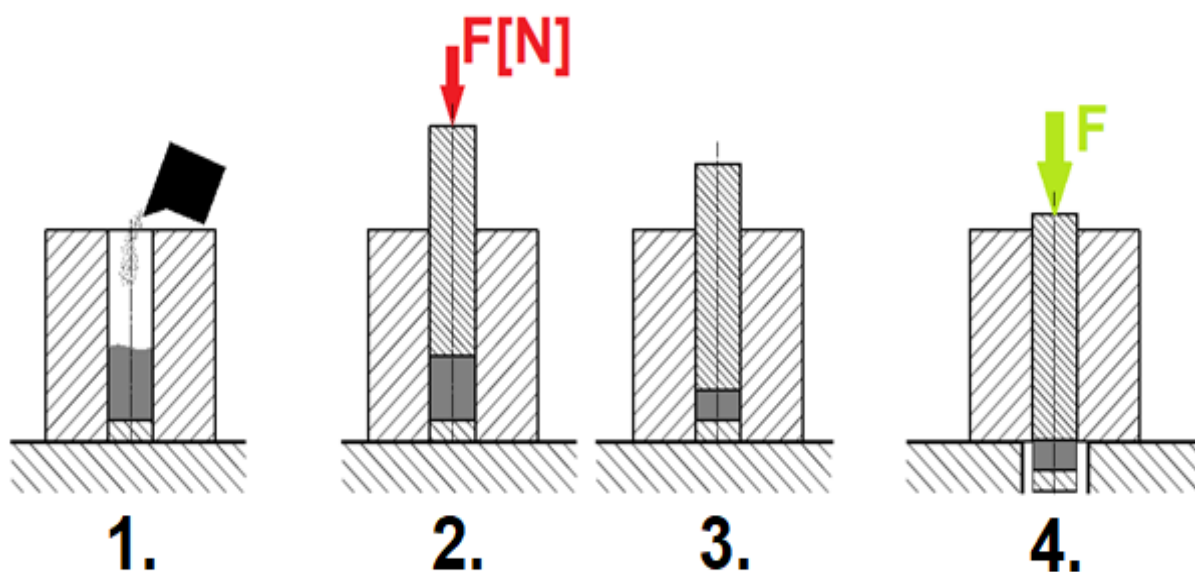
Lisovací forma vydržela, a tak jsem ji rozevřel. Stalo se ale něco, s čím jsem nepočítal. Slisovaný prášek měl menší soudržnost, než byla síla potřebná k vyndání z formy. A tak se slisovaný váleček rozdělil na dvě části v dělicí rovině formy (viz. Obr. 22). Toto samé se stalo i při druhém pokusu, kdy byla navíc vymazána forma plastickým mazivem, aby se snížila síla potřebná pro vyndání slisovaného válečku. Bohužel výsledek byl stejný a pochopil jsem, že je třeba jiný systém lisování.



Obr. 22 Lisovací forma po první pokusu lisování [Zdroj: vlastní]

4.1 Druhý návrh a provedení experimentu

Potřeba druhého návrhu provedení experimentu vznikla z důvodu, že byl první návrh experimentu špatně navrženy, kvůli druhému kroku – lisování. Z toho důvodu jsem pouze modifikoval stávající formu tak, že jsem stávající otvor provrtal naskrz. Otvor jsem zaplnil z jedné strany válečkem o stejném průměru, tedy 10mm. To z toho důvodu, že prvním krokem ztuhnu směs Al prášku s TiH_2 . V druhém kroku formu podepřu pouze na jejích krajích tak, aby vznikl pod formou prostor, a následně celý objem (zátka i slisovaný váleček směsi) vytlačil lisovacím trnem. Viz nákres níže.



Obr. 23 Schématický postup lisování [Zdroj: vlastní]

Parametry experimentu se oproti prvnímu pokusu nezměnily, a tak jsem tedy 1,5 gramu směsi nasypal do formy. Do naplněné formy dal lisovací trn a vložil celek do lisu. Lisem jsem vyvodil sílu o velikosti 7 tun (lisovací tlak cca 600MPa) na formu.

Lisování šlo z počátku dobře, ale postupně se trn začal naklánět. Lisování jsem tedy přerušil a začal zjišťovat zřejmý důvod proč se to dělo. Došlo k destrukci formy.

Forma byla vytvořena z konstrukční oceli S235JR (11 373). Již z označení materiálu je očividné, že forma takového zatížení nemohla vydržet.



*Obr. 24 Upravená první verze lisovací formy (zdeformovaná po lisovacím pokusu)
[Zdroj: vlastní]*

Proto byla vytvořena nová forma, která již byla přizpůsobena druhému návrhu experimentu a z materiálu s označením dle americké normy 17-4PH (evropský ekvivalent označení je X5CrNiCuNb16-4). Tento by měl zvládnout i lisování tlakem 700MPa, jelikož smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ by měla být větší než 1170MPa.

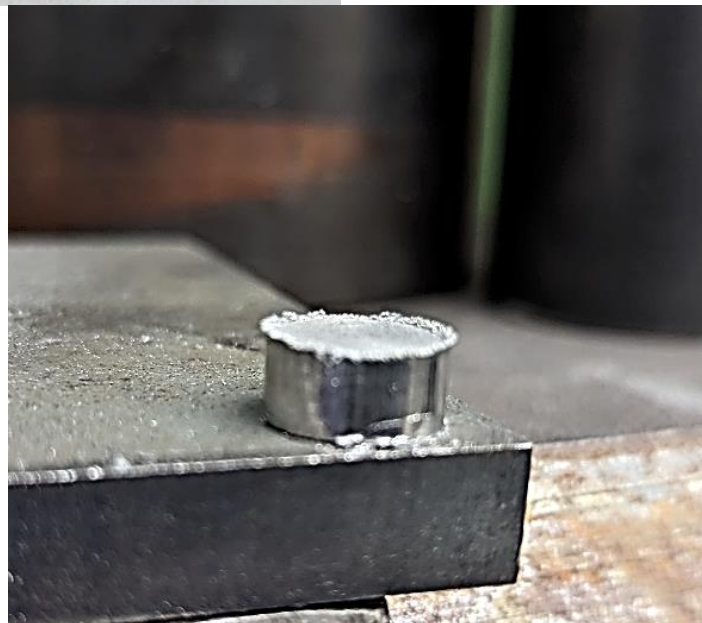
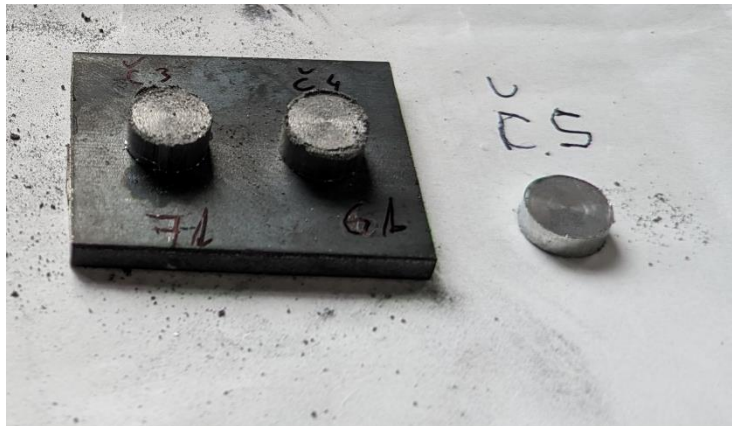
Druhou verzi formy lze vidět na Obr. 25 pod textem vlevo v rozloženém stavu a vpravo ve stavu složeném. Skládá se z hlavního neděleného těla s vystruženým lisovacím otvorem $\varnothing D = 10H8$, vytvořenou z tyčového polotovaru o průměru 50mm, zátky a lisovacího trnu. Předchozí pokus také ukázal, že válcový kolík nemá vhodný tvar, aby byl využíván jakožto lisovací trn. A to kvůli zaobleným koncům na obou stranách. Zaoblení způsobovalo špatné navedení trnu a lehkou deformaci na pohyblivých čelistech lisu. Proto po několika neúspěšných pokusech, kdy vybrané materiály trnu nevydržely potřebný tlak, byl trn vytvořen z vyhazovače odlitků E1710 od firmy Meusburger. Vyhazovač je z tepelně zpracované a následně broušené nástrojové oceli 115CrV3 (19 421). Jelikož byl, ale vyhazovač $\varnothing 12\text{mm}$, musela být na tento rozměr upravena i forma.



Obr. 25 Lisovací forma $\varnothing 12\text{mm}$; vlevo rozložená, vpravo složená [Zdroj: vlastní]

Novou formu jsem složil pro lisování a naplnil opět 1,5g práškové směsi. Formu uzavřel lisovacím trnem a vložil do lisu, kde jsem zhutnil prášek silou 7 tun. Vše vypadlo v pořádku, a tak jsem přistoupil k druhému kroku – vylisování. Formu jsem otočil o 180° a mezi spodní část formy a horní čelisti lisu jsem vložil silnostěnnou trubku, která podpírala kraje formy, ale vnitřní část byla volná, aby mohlo dojít k vylisování. Formu jsem otočil, aby došlo k šetrnějšímu vylisování a nedošlo k destrukci vylisovaného válečku z práškové směsi.

Tento postup byl správný, jelikož se podařilo vylisovanou směs bez poškození vyndat z formy, a následně tento proces replikovat i pro dalších osm vzorků. Vzorek měl v průměru 12mm (jak vyplývá z lisovací formy) a byl vysoký 5,8mm). Jelikož se udává lisovací tlak v MPa a síla z lisu se odečítá v tunách s maximální rozlišovací schopností po 0,5 t, nelze lisovací tlak přesně rozdělit po 50 MPa. Proto budu vzorky lisovány silou od 4,5t (přibližně 390MPa) po 0,5t do síly 8t (přibližně 694MPa).



Obr. 26 Vylisované vzorky z práškové směsi [Zdroj: vlastní]

Ve chvíli, kdy jsem měl vylisované použitelné vzorky a nalezený správný postup lisování, postoupil jsem k dalšímu kroku – pění.

Pro napění vzorků je třeba je zahřát nad teplotu rozkladu pěního činidla TiH_2 (400°C) a zároveň teplotu tání použité slitiny hliníku (pro AlSi10Mg je $T_t \approx 580^\circ\text{C}$). Z literatury (viz. Obr. 17 v teoretické části), kdy byl použit téměř čistý hliník ($T_t \approx 660^\circ\text{C}$) začalo napěňování až přibližně 40°C nad T_t . Z Toho důvodu budu zkoušet napěňovat vzorky v předehřáté peci od 600 do 800°C po 40°C . Výdrž na teplotě zatím zafixuji na 5 minut (480 sekund) a v případě rychlejší či pomalejší reakce tento čas upravím.

K napěnění jsem využil elektrickou žíhací pec, která má termostat pro držení konkrétní teploty v rozmezí od 100 do 1200°C. Byl jsem, ale upozorněn kovářským mistrem, že velice záleží na umístění v peci. Mohou se tam vyskytovat teploty $\pm 50^\circ\text{C}$ od nastavené hodnoty. Proto jsem vybral konkrétní místo, kam budu pokládat vzorky a umístil tam termočlánek pro zjištění odchylky od udávané hodnoty na termostatu. Provedl jsem několik měření a naměřil odchylku přibližně $+30^\circ\text{C}$ od zadané teploty na termostatu.



Obr. 27 Ilustrativní obrázek žíhací/kalící pece [21]

Pro první pokusy pění jsem vybral šest vzorků, jenž byli slisovány silou 7 tun, u kterých provedu proces pění pro vybraný rozsah teplot.

Pro první vzorek jsem nechal přehřát pec na teplotu 570°C (600°C v místě položení vzorku) a vložil ho do pece na vybrané místo. Vzorek jsem každé dvě minuty kontroloval, ale po pěti minutách nenastala žádná změna. Nechal jsem tedy vzorek déle v peci a pozoroval, zda dojde k nějaké změně. Asi po deseti minutách (celkem 15minut) jsem vzorek vytáhl z pece. Termočlánek jsem ověřil, že v peci bylo kolem 600°C , ale po ochlazení, a podrobném zkoumání vzorku jsem nenašel žádné objemové změny na vzorku.

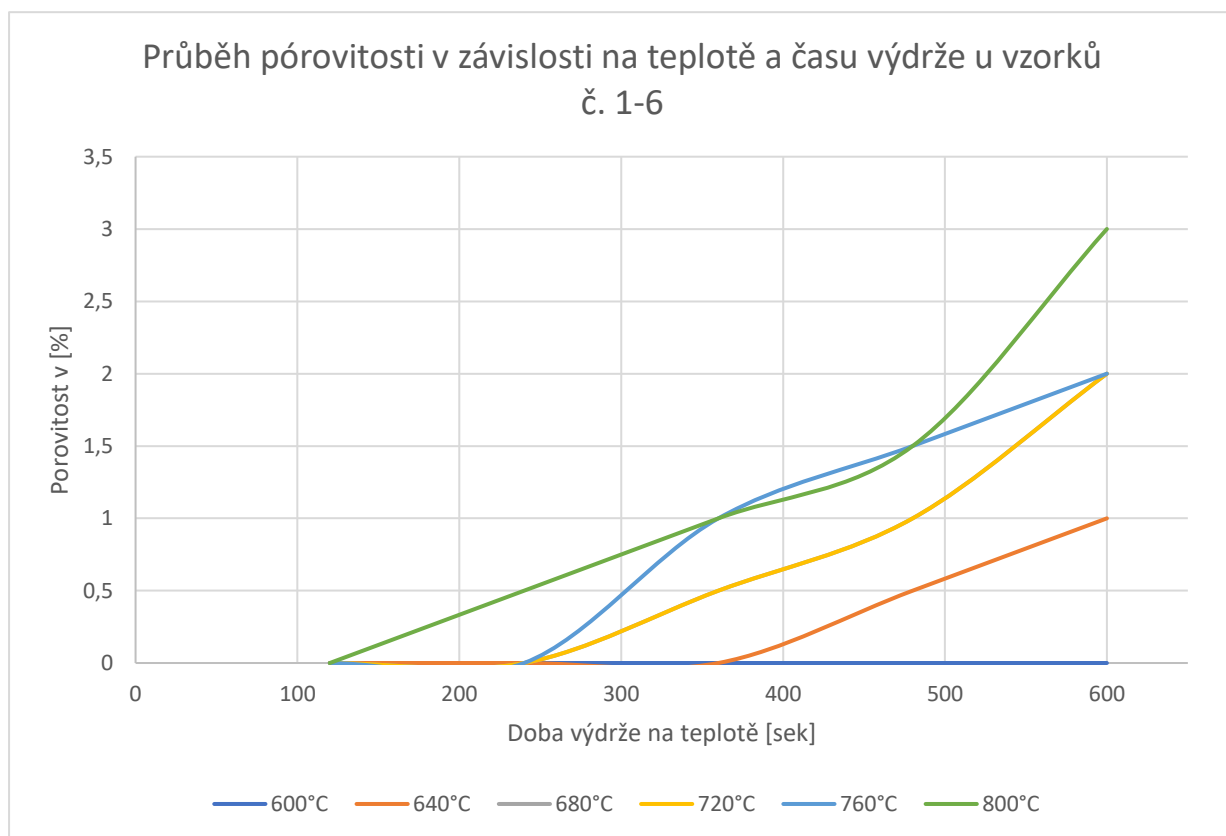
Zvýšil jsem teplotu v peci na 610°C (640°C v místě položení vzorku) a vložil ho do pece na stejné místo jako první vzorek. Po prvních pěti minutách opět neproběhla žádná změna. Znovu jsem nechal vzorek v peci déle a každé dvě minuty ho kontroloval. Po celkově 15 minutách strávených v peci jsem vzorek vytáhl a ochladil. Při zkoumání jsem zpozoroval, že se povrchu vzorku zlehka „orosil“ hliníkem, jinak ale nedošlo k žádným objemovým změnám.

U dalších vzorků č.3, 4, 5 a 6, u kterých byl praktikován stejný postup akorát se změněnou teplotou (680, 720, 760 a 800°C). Ani u jednoho vzorku, jak je vidět na Obr. 28 nedošlo k napěnění. Pouze se zvyšující teplotou docházelo k efektu orosení povrchu hliníkem. Další důsledkem zvýšení teploty byla změna struktury povrchu a jeho barva. To přisuzuji tvorbě oxidu hlinitého po povrchu.



Obr. 28 Vzorek č. 1, 2 a 4 po fázi "pěnění" [Zdroj: vlastní]

Pro tuto sérii vzorků, jsem ze zaznamenaných údajů vytvořil graf průběhu závislosti pórovitosti na čase pění pro mnou zvolené teploty pění. Ačkoli se ve vzorcích nevytvořily póry, vlivem „orosení“ vzorku hliníkovými kapičkami došlo ke zvětšení jeho objemu.



Obr. 29 Graf průběhu závislosti pórovitosti na čase pění u vzorků č. 1-6 [Zdroj: vlastní]

Jak lze z grafu (Obr. 29) vyčíst, došlo k velice malému zvýšení pórovitosti, a to především u vzorků, které byly napěňovány nad teplotou 700°C.

Abych si byl jistý, že problém není v malém lisovacím tlaku, vytvořil jsem pár vzorků na vyzkoušení slisované silou 8 tun. A ty vložil do žíhací pece s nastavením teploty v okolí středu navrženého rozsahu teplot a to na 680 a 720°C. Bohužel ani u těchto vzorků nedošlo k napěnění. Z toho jsem vyvodil závěr, že problém bude v materiálu.

4.2 Třetí návrh experimentu – změna materiálu

Po předchozích neúspěšných experimentech, z nichž jsem vyvodil závěr, že problém bude v materiálu, jsem objednal hliník čistoty min. 99,7 % s průměrnou velikostí částí 50 μ m. Tento materiál je téměř identický jako v literatuře, z níž lze vyčíst vhodné teploty a časy pro napěnění vzorků (viz. *Obr. 17*).

Z tohoto grafu závislosti pórovitosti na čase pění jsem vybral křivku za teploty pění 700°C jako nejvhodnější pro tento experiment, kdy dosáhneme vrcholu napěnění přibližně za 10 minut. Ačkoli touto teplotou nedosáhneme maximálního možného napěnění, reakce probíhá delší dobu než při vyšších teplotách, a díky tomu budu schopen lépe pozorovat proces napěnění. Z tohoto důvodu jsem zvolil dvě teploty a to 680 a 720°C, při kterých budu napěňovat vzorky.

Ostatní fáze experimentu, tedy proces smíchání prášků a lisování zůstává stejný. A tak tedy do šesti gramů odměřeného hliníkového prášku Al99,7 přidám 1% hmotnostní podíl (0,05g) hydridu titanu a ve společné nádobě je po dobu jedné minuty otáčením a protřepáváním smíchám.

Odměřím 1,5g směsi a vložím do lisovací formy. Lisem slisuji prášek silou šesti tun, a následně vylisovaný prášek vytlačím z formy ven. Tímto způsobem jsem vytvořil 8 vzorků s tím, že čtyři vzorky (č. vzorku 10-13) byli slisovány silou 7t (cca 600MPa) a zbylé čtyři (č. vzorku 14-18) silou 8t (cca 700MPa). Aby vždy pro jednu teplotu byli vytvořeny dva vzorky se stejnými parametry lisování.

Takto připravené vzorky jsem vkládal vždy po jednom do předehřáté pece na teplotu (v místě položení vzorku) 680°C (respektive 720°C). Kontroloval jsem opět po dvou minutách proces pění v peci.

Již po šesti minutách v žíhací peci začaly změny na vzorku. Vzorek změnil tvar z válečku na soudeček, následně začal nabývat na objemu. Po deseti minutách jsem se pokusil vytáhnout vzorek ven z pece. Bohužel třes mých rukou z žáru pece v kombinaci s malou pevností napěněné struktury hliníku v peci se ukázal jako problém, a proto se první tři vzorky nepovedlo vytáhnout z pece vcelku.



*Obr. 30 Žíhací pec se vzorkem č.10 po 6 minutách při 680°C
[Zdroj: vlastní]*

Naštěstí u dalších pokusů se mi již podařilo vyndat z pece napěné vzorky bez jejich zničení. Dle literatury [17] by po napěnění mělo proběhnout rychlé ochlazení. Ale při vložení napěněné struktury do vody, došlo k jejímu zhroucení (viz Obr. 31). Proto u jiného pokusu jsem nechal vzorek zchladnout na vzduchu. U tohoto vzorku došlo také k částečnému zhroucení pěny, ale jak je vidět na obrázku Obr. 32 tak po jeho rozříznutí byl nalezen jeden pór.



Obr. 31 Vzorek č.13 po zhroucení pěnové struktury [Zdroj: vlastní]



Obr. 32 Řez vzorkem č.14 [Zdroj: vlastní]

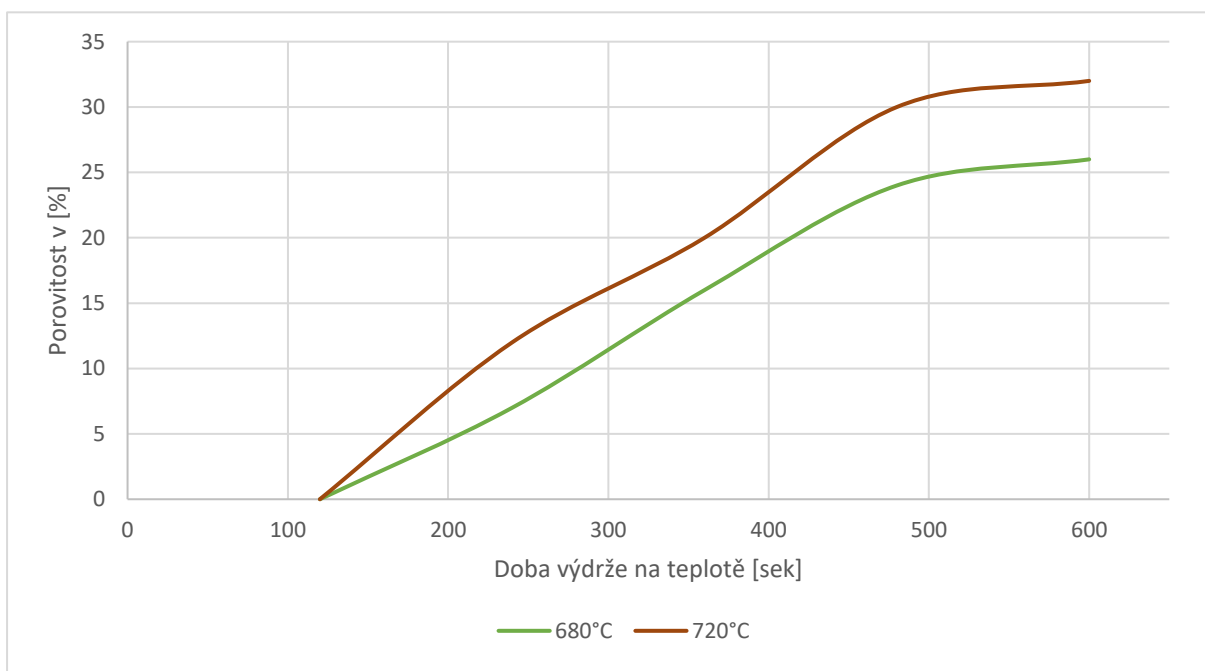
U dalšího pokusu jsem zkusil zchladit o pouze lehkým položením na hladinu vody. Tímto způsobem se podařilo zachování napěněné struktury i po zchlazení. U tohoto vzorku došlo k největšímu zvětšení objemu (viz Obr. 33). Ale po jeho rozříznutí byl nalezen opět pouze jeden pór.



Obr. 33 Vzorek č. 16 vlevo a č.14 vpravo [Zdroj: vlastní]

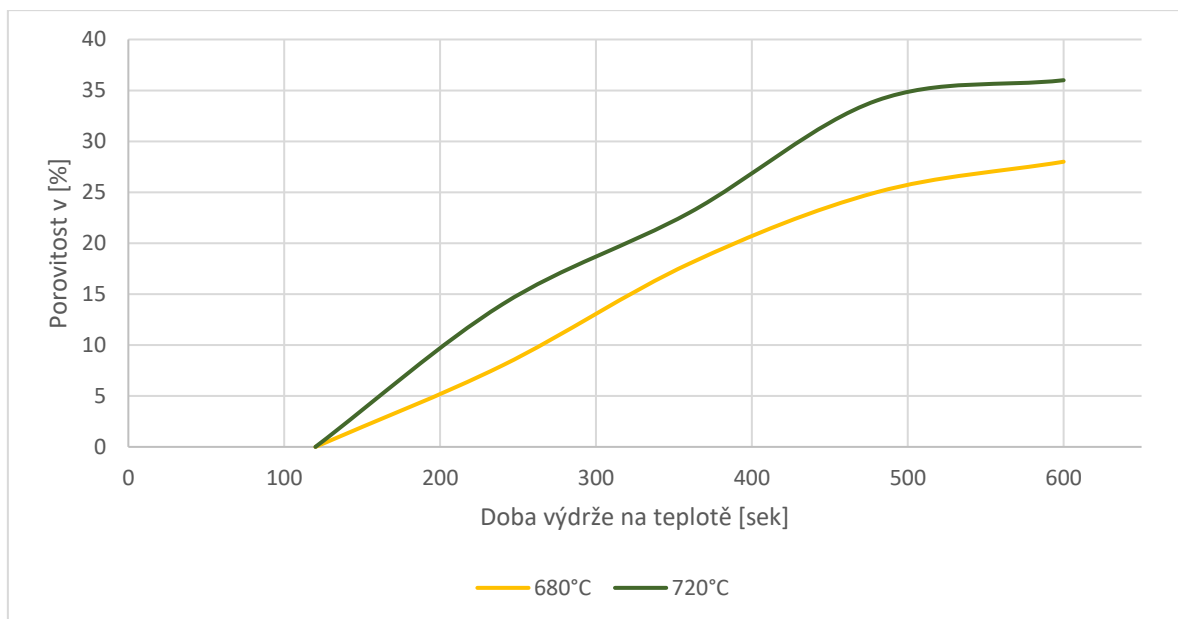
Ze zaznamenaných údajů objemových změn na čase a teplotě zpěňování jsem vytvořil grafy těchto průběhů pro zvolené teploty pění 680 a 720°C a lisovací tlaky 600 a 700 MPa.

Z grafu (Obr. 34), který se věnuje průběh pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků z Al99,7 slisované tlakem $\approx 600\text{MPa}$ lze vyčíst, že vyšší teplota pění měla téměř v celém průběhu o 20% vyšší hodnoty pórovitosti.



Obr. 34 Graf průběhu pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 12\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 600\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]

Při porovnání křivek v grafu průběh pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 12\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 700\text{MPa}$ (Obr. 35) docházím k podobnému závěru jako u vzorků slisované tlakem 600MPa tedy, že vlivem zvýšené teploty pění o 40°C došlo k nárůstu pórovitosti přibližně o 20%. Také si lze všimnout při porovnání mezi Obr. 34 a Obr. 35 nárůstu absolutních hodnot pórovitosti mezi vzorky lisované větším tlakem při stejné teplotě pění.



Obr. 35 Graf průběh pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 12\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 700\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]

Bohužel po říznutí vzorů, které se povedlo vytáhnout z pece bez zničení pěnové struktury, byl nalezen vždy pouze jeden pór. Z toho vytvořil závěr, že je vzorek velice miniaturní a není tak asi prostor pro vznik vícero pórů. Proto jsem se rozhodl ke změně velikosti (objemu) vzorků.

4.3 Čtvrtý návrh experimentu – změna velikosti vzorků

Již při prvním návrhu experimentu, jsem přemýšlel o velikosti vzorků. Vzhledem k náročnosti lisovací formy na pevný materiál, a omezení maximální lisovací síly lisu. Rozhodl jsem se tehdy, že velikost vzorku 10mm (respektive 12mm po úpravách) by mělo být vhodné jak z hlediska menších lisovacích nástrojů, tak síle potřebné k lisování. Ale vzhledem k jen malému úspěchu při tvorbě pěny u předchozích experimentů, že je třeba tento rozměr zvětšit.

Proto jsem vytvořil novou formu na stejném principu jako u druhého návrhu, ale s větším průměrem. Ze vzorce výpočtu tlaku,

$$p = \frac{F}{S} [MPa] \quad (3)$$

kde p = tlak [MPa], F =tlačná síla [N] a S = plocha kolmá na tlačnou sílu [mm^2] - obsah kruhu, a dosažení hodnot, kterých potřebujeme dosáhnout (lisovací tlak 700MPa) a maximální možnou sílu, kterou dokáže vyvolat lis 45t (přibližně 441,3 kN = $441,3 \cdot 10^3$ N) jsem vypočítal maximální průměr vzorku, který dokážeme slisovat na potřebný tlak. Po dosažení výše zmíněných hodnot jsme vypočetli maximální možnou plochu k vylisování. Jelikož náš vzorek je kruhový, tak můžeme jednoduchým přepočtem s obsahu kruhu vypočteme maximálním průměr vzorku, který je roven $\varnothing D_{\text{max}} = 28,35\text{mm}$. Jelikož z důvodu bezpečnosti nemohu jít na samotnou hranici výkonu lisu zvolil jsem lisovací průměr na 24mm.

Vytvořil jsem tedy formu s vystruženou dírou $\varnothing 24$ ze stejného materiálu jako u druhého návrhu, a to z nerezové oceli 17-4PH (viz. Obr. 36). Problém nastal při výběru materiálu pro lisovací trn. Jelikož vyhazovače (E1710) takovéto velikosti se běžně nepoužívají, byla by dlouhá čekací doba na jeho dodání. A podobný problém by byl při výrobě z kaleného kolíku. Proto jsem hledal i jiné polotovary z kalené oceli jako např. válečky do ložisek, ale nic nebylo správné velikosti nebo s dlouhou dodací dobou. Z toho důvodu jsem se rozhodl vyrobit lisovací trn ze stejného materiálu jako formu jelikož, tento materiál předčí mechanickými vlastnostmi jiné běžně dostupné materiály.



Obr. 36 Třetí verze formy s lisovacím trnem a zátkou [Zdroj: vlastní]

S větší formou souvisí i zvýšená míchací dávka. Navrhl jsem, že budu do formy vkládat 20g směsi a míchací dávka bude pro tři vzorky. Proto jsem odměřil 60g čistého hliníku a 0,6g TiH_2 vložil do společné nádoby a jednu minutu míchal. Následně jsem odměřil navržených 20g směsi a vložil do formy. Jelikož se jedná již o velký vzorek, který potřebuje veliké síly pro slisování, proto jsem vymazal formu tenkou vrstvou plastickým mazivem, které obsahuje směs MoS_2 a grafitu, pro snadnější slisování a následné vylisování.

Z rovnice (3) jsem vypočítal, že pro lisovací tlak 600MPa potřebuji vyvinout lisem sílu přibližně 27,5t a pro tlak 700MPa je potřebná síla cca 32t. Zvolil jsem pro první várku lisovací tlak 600MPa, abych vyzkoušel, jak obstojí vyhazovací trn z materiálu 17-4PH.

Bohužel se ukázalo, že tento materiál trnu nebyl vhodný. Při prvním pokusu nové formy proběhlo vše v pořádku a vylisoval jsem vzoreček o $\varnothing 24$ a výšce 16,9mm. Problém nastal, ale již u druhého pokusu. Tím, že byly všechna uložení děr forem a lisovacích trnů s vůlí necelé 0,1mm, vždy se vytvářel při lisování tenký hliníkový film na povrchu forem.

Ten jsem vždy před dalším pokusem odstranil. Ale u třetí verze formy u druhého pokusu tento problém způsobil zadření formy a její poškození (viz. poškození lisovacího trnu na Obr. 37). Proto jsem se musel opět vrátit k návrhu lisovacího trnu.



Obr. 37 Poškozený trn $\varnothing 24\text{mm}$ [Zdroj: vlastní]

Naštěstí firma kooperující se slévárnou, ve které pracuji měla na skladě vyhazovač E1710 od firmy Meusburger v $\varnothing 25\text{mm}$, a tak jsem místo čekání tří týdnů na dodání



Obr. 38 Upravená třetí verze lisovací formy s trnem a zátkou. [Zdroj: vlastní]

od výrobce vyhazovače čekal necelý týden. V mezičase jsem nechal opravit třetí verzi formy a upravit její lisovací otvor na $\varnothing 25H8$, a vysoustružil novou zátku (viz. Obr. 38).

Pro upravenou třetí formu ($\varnothing 25\text{mm}$) s lisovacím trnem z vyhazovače jsem zachoval stejný míchací postup. Tedy na jeden vzorek 20g směsi z Al99,7 + 1% hmotnostní podílu TiH₂.

Z rovnice (3) jsem opět vypočítal, že pro lisovací tlak 600MPa při průměru 25mm potřebuji vyvinout lisem sílu přibližně 30t a pro tlak 700MPa je potřebná síla cca 35t. Zvolil jsem pro první várku lisovací tlak 600MPa, abych vyzkoušel, jak obstojí vyhazovací trn.

Před lisováním jsem na formu (pouze do lisovacího otvoru) nanesl tenkou vrstvu plastického maziva a vložil zátku. Odměřil jsem 20g směsi a tu slisoval ve formě lisem již avizovanou silou 30 tun. Lisování v upravené třetí formě proběhlo v pořádku a vylisoval jsem vzoreček o $\varnothing 25$ a výšce 15,5mm. Stejným postupem se povedlo vylisovat další dva vzorky z dávky, tyto vzorky byly označeny jako č.19-21.

Jelikož jsem chtěl mít opět vzorky o dvou různých lisovacích tlacích (silách) jako v předchozích experimentech namíchal jsem ještě jednu dávku prášku a vylisoval další tři vzorky (č.22-24), ale pouze tlakem cca 660MPa (silou 33t) z důvodu bezpečnosti, kvůli nepěkným zvukům, které lis začal vydávat po přesažení lisovací síly 32t. Tyto vzorky byly velikosti $\varnothing 25$ a výšce 15 mm.



Obr. 39 Vylisované vzorky č.19 a č. 22 [Zdroj: vlastní]

Předehřál jsem pec na teplotu v místě položení vzorků 680°C (respektive 720°C) a po jednom je začal napěňovat v žíhací peci. Opět jsem každé dvě minuty kontroloval průběh napěňovacího procesu. Zvětšení objemu vzorků mělo pozitivum v tom, že šlo nyní pořizovat vcelku pěkné fotografie průběhu napěňování. Proto jak je vidět na Obr. 40 po dvou minutách v peci při 700°C nenastaly žádné změny.



Obr. 40 Vzorek po 2 minutách v peci při 720°C [Zdroj: vlastní]

Po čtyřech minutách se spodní část vzorku začala tavit a nabývat na objemu (viz Obr. 41).



Obr. 41 Vzorek v peci při 720°C po 4 minutách [Zdroj: vlastní]

Při kontrole procesu po šesti minutách, jak je vidět na Obr. 42 je skoro celý vzorek roztátý a objem vzorku je větší než byl po 4 minutách v peci.



Obr. 42 Vzorek v peci při 720°C po 6 minutách [Zdroj: vlastní]

Po osmi minutách v peci je vzorek celý roztavený a jeho objem je opět větší než při kontrole v šesti minutách pěnícího procesu (viz. Obr. 43).



Obr. 43 Vzorek v peci při 720°C po 8 minutách [Zdroj: vlastní]

A při poslední kontrole před vytažením z pece, jak je vidět na Obr. 44 vzorek napěněný do houbovitého tvaru.



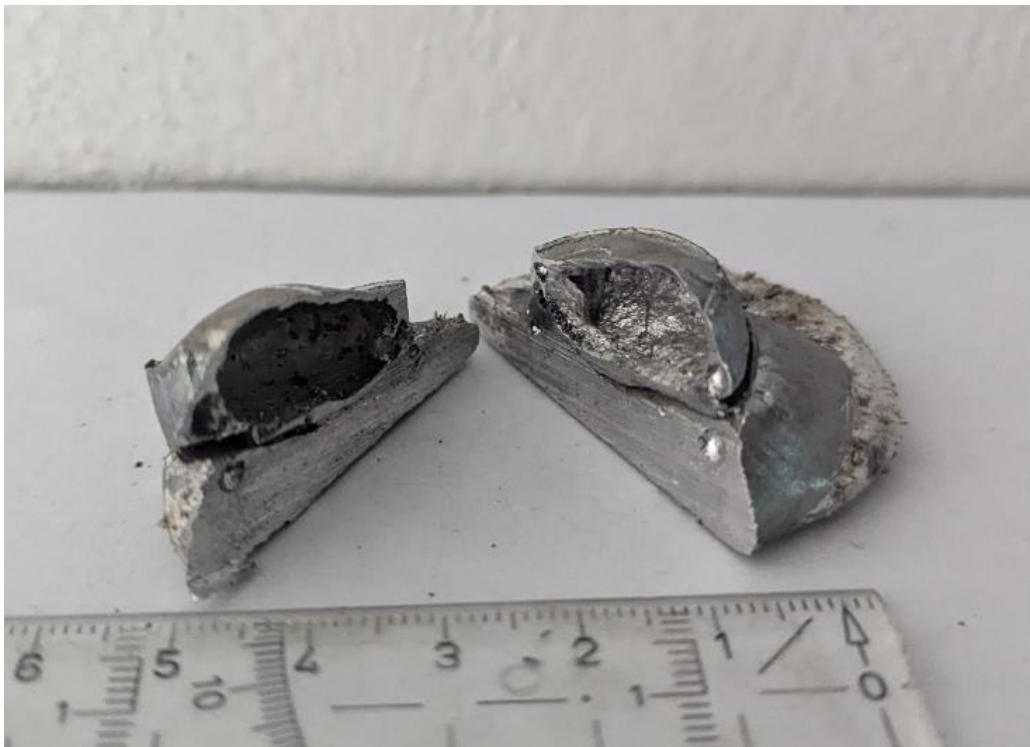
*Obr. 44 Vzorek v peci při 720°C po 10 minutách
[Zdroj: vlastní]*

Ačkoliv se vzorky v peci napění hezky, opět nastal problém při vyndávání vzorků z pece a jejich následné zchlazení. Jelikož jsou vzorky mnohem větší a vyšší než vzorky č. 1-19, stačilo lehké zaklepnání rukou či naklonění podkladové destičky a pěna se zborčila.



Obr. 45 Totální destrukce vzorků [Zdroj: vlastní]

V případě, že se mi vzorek povedlo vcelku vytáhnout z pece s cílem zchladit jí ve vodě, stačil lehký kontakt s vodou a opět došlo k téměř celé destrukci pěnové struktury (viz. Obr. 46)



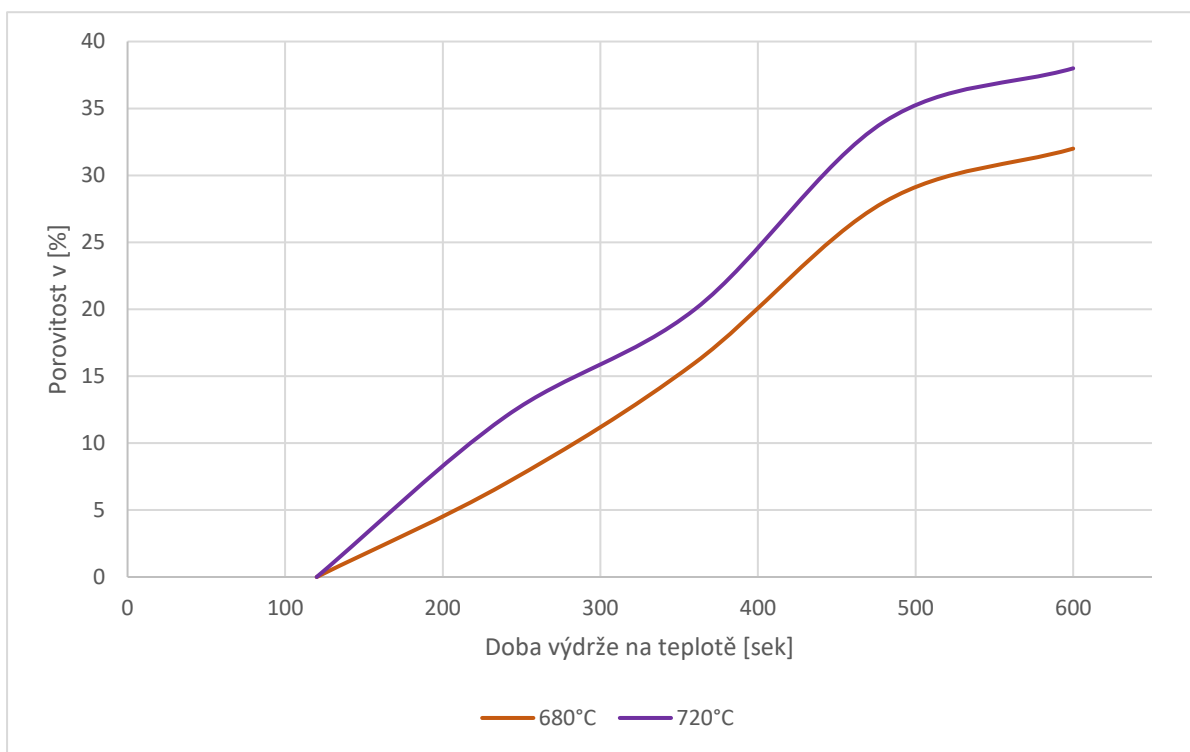
Obr. 46 Zdeformována struktura hliníkové pěny po zchlazení ve vodě [Zdroj: vlastní]

A zchladnutí vzorů na vzduchu nepřineslo o moc větší zlepšení. (viz. Obr. 47)



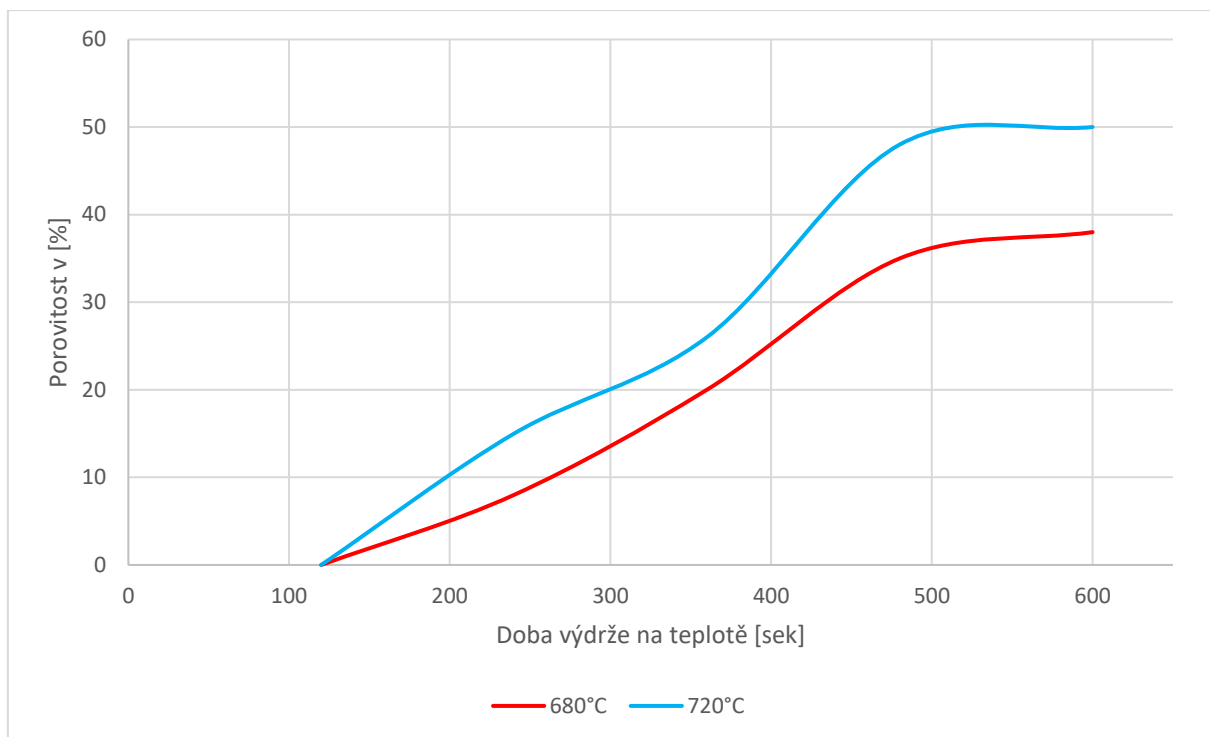
Obr. 47 Hliníková pěna po zchlazení na vzduchu. [Zdroj: vlastní]

Jako u předešlých experimentů, tak u této metody jsem vytvořil graf pro snazší porovnání mezi vzorky, které byly slisovány při různých tlacích a napěněny při různých teplotách. Z grafu (Obr. 48), který se věnuje průběh pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 25\text{mm}$ z materiálu Al99,7 slisované tlakem $\approx 600\text{MPa}$ lze vyčíst, že vyšší teplota pění měla opět v celém průběhu asi o 20% vyšší hodnoty pórovitosti.



Obr. 48 Graf průběhu pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 25\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 600\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]

Při porovnání křivek v grafu průběh pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 25\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 660\text{MPa}$ (Obr. 49) nabývám podobného závěru jako u vzorků slisované tlakem 600MPa tedy, že vlivem zvýšené teploty pění o 40°C došlo k nárůstu pórovitosti přibližně o 25%. Také si lze všimnout při porovnání mezi Obr. 33 a Obr. 34 nárůstu pórovitosti mezi vzorky lisované tlakem 660MPa při teplotě pění 720°C až hodnotu kolem 50%.



Obr. 49 Graf průběhu pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 25\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 660\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]

Z důvodu stálého nedaření při procesu zpěňování s následným ochlazením, zkusil jsem se vrátit k původnímu materiálu tedy AlSi10Mg s nadějí, že zvětšení objemu pomůže k zpěnění. Zachoval jsem stejný míchací postup pouze se změnou materiálu. Tedy na jeden vzorek 20g směsi z AlSi10Mg + 1% hmotnostní podílu TiH_2 . Připravil si materiál pro tři vzorky a začal je lisovat silou 33t (tlak cca 650MPa).

Problém ale začal již při vylisování vzorků z formy. Jelikož při jejím vyndávání z formy měl lis skákavý průběh a při skončení tohoto procesu byl vidět důvod proč se to dělo. Jelikož u vylisování docházelo k vytváření lomů kolmých k lisovací síle napříč celým vzorkem (viz. Obr. 50). Tento průběh a výsledek se stal u všech třech vzorků z této dávky.



*Obr. 50 Vylisování vzorku $\varnothing 25$ z materiálu AlSi10Mg
[Zdroj: vlastní]*

Zkusil jsem vložit takto „rozlámaný“ vzorek do předehřáté žíhací pece na teplotu 700°C, ale nastal průběh podobný jako v jiných pokusech se vzorky z tohoto materiálu (viz. Obr. 51).



Obr. 51 Napěnění "rozlámaného" vzorku $\varnothing 25$ z materiálu AlSi10Mg [Zdroj: vlastní]

Z důvodu nedaření se vytvořit pěnu z Al99,7 kvůli rozpadnutí pěnové struktury při jejím vyndáváním z pece, jsem navrhl a nechal vyrobit formu, ve které by se pěna napěnila. Má představa byla, že díky kontaktu mezi Al pěnou a uzavřenou formou nedojde ke zhroucení její struktury při vytahování z pece a vytvoří se tak krásné vzorky, které by šly použít k mechanickým zkouškám.

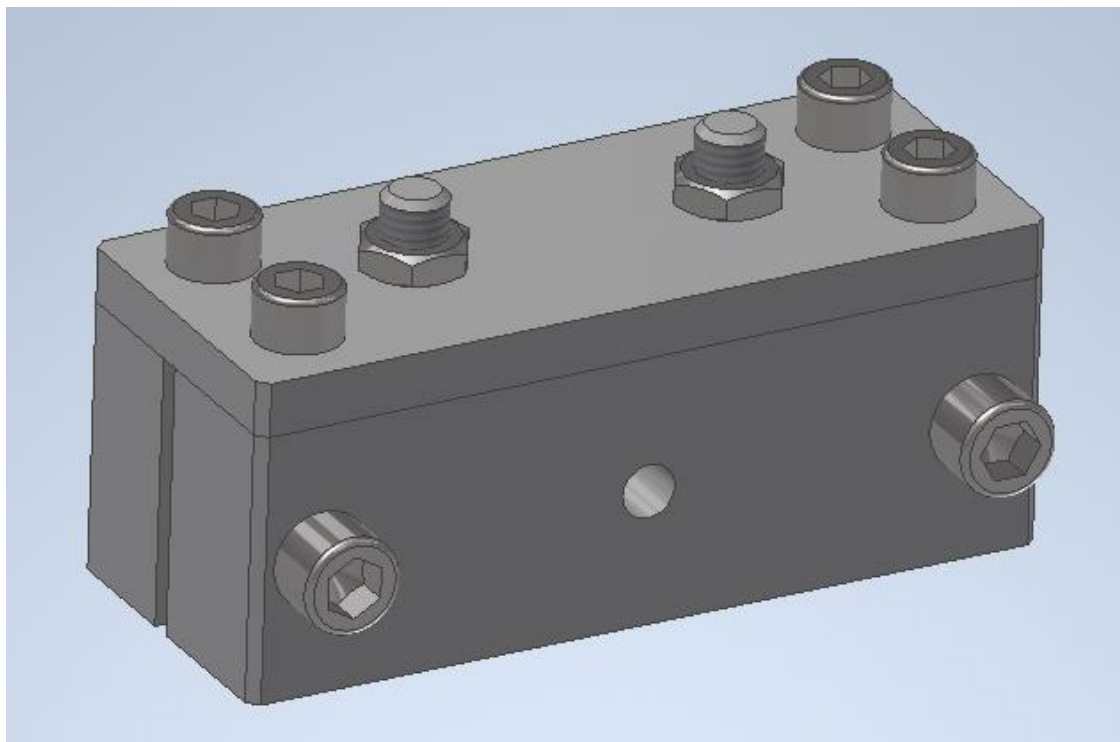
V mezičase výroby formy, když jsem porovnával výsledky vzorků z materiálu Al99,7 a AlSi10Mg, jsem si všiml, že vzorky z materiálu Al99,7 měly problém s vysokou tekutostí při zpěňování, zatímco vzorky z AlSi10Mg byli tak tuhé, že nedošlo k jejich zpěnění. Proto jsem zkusil smíchat tyto materiály v poměru 50:50 a vytvořit jeden zkušební vzorek. Smíchal jsem tedy 10g AlSi10Mg a 10g Al99,7 přidal 0,2g TiH₂. Následně jsem vzorek úspěšně slisoval silou 33t (tlak cca 650MPa). Výsledný vzorek měl stejné rozměry jako všechny předešlé vylisované tímto tlakem v tomto rozměru formy tedy $\varnothing 25$ a výšku 15 mm.

Po vylisování jsem vzorek vložil do předehřáté pece na 700°C a kontroloval každé dvě minuty proces napěnění. Po deseti minutách v peci vzorek pouze ze „soudečkovatěl“. Přesto jsem ho po deseti minutách vytáhl z pece. A opatrně zchladil ve vodě. Po rozříznutí je vidět, že se uvnitř ukrývá několik pěkných pórů viz Obr. 52.



Obr. 52 Řez vzorkem pěny z kombinace materiálů Al99,7 a AlSi10Mg [Zdroj: vlastní]

Formu pro napění, jsem navrhl jako dvojnásobnou (dva vzorky se napění ve stejnou dobu) s možností upravování velikosti prostoru pro napění vzorku. Skládá se ze dvou hlavních částí – levé a pravé poloviny. Ty jsou vyrobeny z obyčejné konstrukční oceli S235JR (11 373), jelikož se nepředpokládá mechanické namáhání, pouze to tepelné. Dále se forma skládá z vrchní desky, která je přišroubována k polovinám formy pomocí čtyř šroubů M10x20. Aby bylo možné nastavovat objem ve formě, jsou ve formě dva „špunty“ se závitem. Další podrobnosti viz. výkresy v příloze.



Obr. 53 Proma pro pění [Zdroj: vlastní]

Připravil jsem čtyři vzorky (č. vzorků 30-33) z materiálu Al99,7, které byly slisovány silou 33t (tlakem 650MPa) v lisu. Tyto vzorky jsem vložil do připravené napěňovací formy a formu zavřel. V zavřené formě jsem formu vložil do pece předehřátou na 700°C. Problém ale nyní nastal v určení, jak dlouho má být tato forma v peci, jelikož není vidět co se odehrává se vzorky uvnitř.

Bohužel už mi nezbýval čas, abych vyřešil tuto problematiku rozsáhlým testováním či koupáním termočlánku, který by mohl být v uzavřené formě. Proto jsem provizorně tento problém vyřešil měřením teploty vnějšího povrchu formy každých pět minut, dokud teplota formy nedosáhla požadovaných 700°C. To trvalo přibližně 30 minut. Následně jsem odměřil 10 minut, po kterých jsem formu vytáhl z pece a zchladil ponořením do vody. Ale z důvodu velkých rozměrů (váhy) pění formy, ochlazování probíhalo velice dlouho.

Než jsem formu mohl otevřít musel jsem počkat až se forma zchladí pod 50°C, aby bylo možné se formy dotýkat bez rizika popálení.

Při otvírání formy došlo k dalšímu problému. Jeden ze šroubů, který držel horní desku se zadřel a nešel vytáhnout. Abych dokázal alespoň vytáhnout vzorky z formy musel jsem zadřený šroub ukrotit.

Po otevření formy jsem našel dva vzorky, které byly stečené na boku formy (forma byla nakloněna při ochlazování ve vodě). Na Obr. 54 níže je vidět vytvořený vzorek z formy. Z obrázku lze vyčíst, že došlo k úplné destrukci pěnové struktury vzorku.



Obr. 54 Vzorek napěňovaný ve formě [Zdroj: vlastní]

5. ZÁVĚR

Hliník je materiálem 21. století. Je to kov, který je již dekádu druhý (hned po železu) nejvíce vyráběný kov na světě s produkcí více než 68 milionů tun ročně a jeho produkce stále stoupá. Jelikož čistý hliník nemá dobré mechanické vlastnosti, z většiny jeho produkce se tvoří různé druhy slitin. Ty se velmi osvědčily a ve velké míře nahrazují či doplňují slitiny železa, především díky jeho poměrné pevnosti vůči váze. Avšak po začátku zkoumání kovových pěn v druhé polovině 20. století a aplikování těchto poznatků k tvorbě pórovitých struktur v hliníkových slitinách, vznikl nový směr vývoje a použití těchto slitin.

Díky vývoji moderních metod výroby kovových pěn, z nichž ty z hliníkových slitin jsou nejvíce perspektivní a jejich unikátní kombinací vlastností se doposavad našlo velké množství aplikací v celém spektru průmyslů. Jako jsou např. tepelné výměníky, kostní implantáty, deformační zóny vozidel či jako např. součást pancéřové ochrany obrněných vozidel.

Z toho důvodu byla tato diplomová práce zaměřena na jejich výrobu, a to metodou práškové metalurgie. V teoretické části jsou popsány charakteristické vlastnosti, příklady širokého spektra použití kovových pěn, vhodné materiály pro zpěňování, popis vybraných metod výroby a podrobnou problematiku výroby kovových pěn práškovou metalurgií.

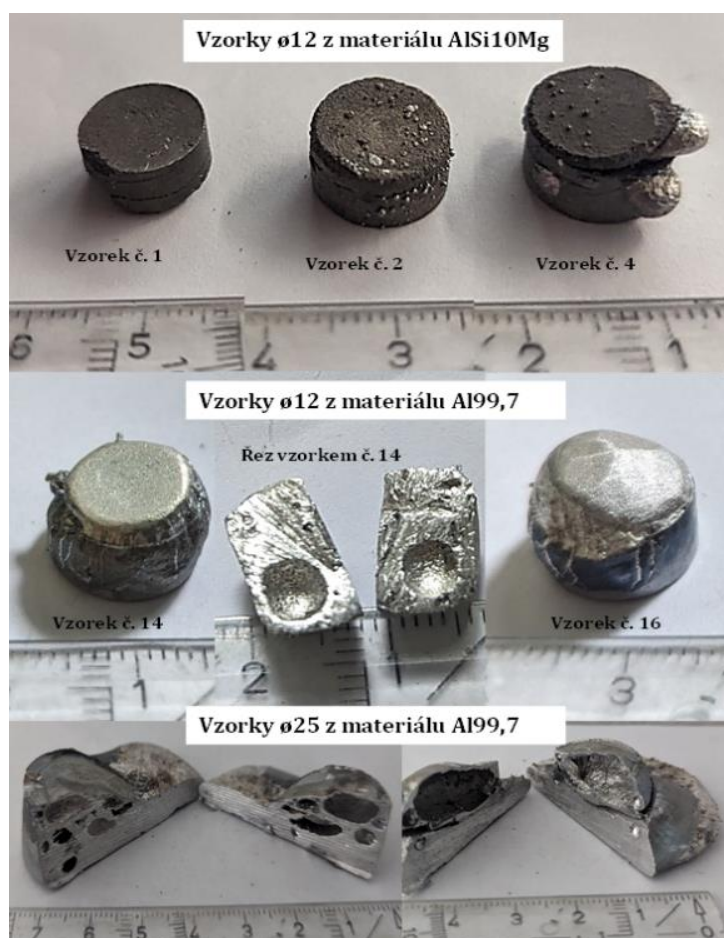
Praktická část se zaměřuje na návrh postupu a experimentální výrobu hliníkové pěny pomocí metody práškové metalurgie s ohledem na dostupné technologie a materiály v provozních laboratořích školy. V návrhu experimentu byl podrobně popsán pracovní postup včetně návrhu spektra lisovacích tlaků, napěňovacího teplot, použitých materiálů a strojů. Rovněž je zapotřebí zdůraznit nutnou bezpečnost práce především při naměňování a mísení prášků.

Při zkoušení navrženého postupu se zjistilo, že je třeba upravit pracovní postup slisovávání práškové směsi, včetně návrhu a výroby nové lisovací formy s ohledem na nutnost použití kvalitních a vysoce pevných materiálů. Během tvorby experimentálních pokusů o výrobu hliníkové pěny z materiálu AlSi10Mg byl zjištěn problém při pokusu tento materiál napěnit. Při procesu pění o různých teplotách se nepodařilo vytvořit

pěnovou strukturu. Pouze začal z povrchu vzorků z tohoto materiálu „rosit“ hliník (viz. vrchní část Obr. 55). Proto došlo k záměně materiálu AlSi10Mg za hliník o čistotě 99,7%.

Pokusy s tímto materiálem ukázaly výrazné zlepšení, kdy došlo k vytvoření pěny. Ale byl zjištěn problém při snaze vypěněnou strukturu vzorku vytáhnout z pece a ochladit. Rovněž u těch vzorků, u kterých se to povedlo, byl zjištěn pouze s jeden pór v celém objemu vzorku (viz. prostřední část Obr. 55). Vzorky s tímto problémem byly malé. Pro jeden vzorek bylo použito 1,5g práškové směsi a po vylisování měl 12mm v průměru a 6mm na výšku (výška se odvíjela od použitého lisovacího tlaku). Proto došlo k přepracování lisovací formy, aby se zvětšil lisovací objem.

Množství práškové směsi na jeden vzorek se zvětšilo na 20g a po vylisování měl vzorek rozměry: $\varnothing 25$ mm a výšku 15,5mm (opět záleží na použitém lisovacím tlaku). Z těchto vzorků se v peci tvořily pěny s pórovitostí až 50%. Oříšek byl, ale takto napěněné vzorky uchovat i po vytažení z pece. Pěnová struktura se vždy téměř celá zborčila jak při zchlazení na vzduchu, tak při zchlazení ve vodě (viz. spodní část Obr. 55).



Obr. 55 Koláž z vyrobených pěn [Zdroj: vlastní]

Proto byla zkonstruována a vyrobena forma, ve které by došlo ke vzpěnění vylisovaných vzorků. Ale při jejím použití nebylo možné pozorovat průběh pění vzorků. Což v kombinaci s dlouhou dobou než došlo k prohřátí formy na zpěňovací teplotu, zabraňovalo úspěšnému vytvoření hliníkové pěny. Bohužel, abych vyřešil tuto problematiku rozsáhlým testováním či koupěním termočláčku, který by mohl být v uzavřené formě už nezbyl čas.

Ačkoliv byl experiment neúspěšný z důvodu nezdaru při výrobě hliníkové pěny, povedlo se mi splnit všechny cíle v zadání.

Na základě rešerše a vlastního pokusu o výrobu hliníkové pěny předpokládám, ačkoliv je výroba pěn složitý a vcelku nákladný proces, že dojde k rozšíření již širokého spektra aplikace hliníkových pěn, kvůli snaze inženýrů a projektantů o výrobu co nejlehčích, pevných, a hlavně bezpečných strojů.

6. BIBLIOGRAFIE

- [1] BANHART, John. Light-Metal Foams-History of Innovation and Technological Challenges. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2013, **15**(3), 82-111 [cit. 2023-08-06]. ISSN 14381656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201200217
- [2] BANHART, John. Metal Foams: from Fundamental Research to Applications. In: *Research Gate* [online]. Germany: Department of Materials Science, 2005 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/John-Banhart/publication/40829807_Metal_foams_-_From_fundamental_research_to_applications_C/links/0fcfd50fe871575348000000/Metal-foams-From-fundamental-research-to-applications-C.pdf
- [3] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [4] DRENČEV, L., J. SOBCZAK, S. MALINOV a W. SHA. Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity. *Materials Science and Technology* [online]. 2013, **22**(10), 1135-1147 [cit. 2023-08-06]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1179/174328406X118302
- [5] ASHBY, Michael F. *Metal Foams: A Design Guide*. První. USA: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0-7506-7219-6.
- [6] Simple guide of metal foam: Foam material. In: *Xiamen Zopin New Material Limited* [online]. China: ZOPIN Group, 2011 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: https://www.foam-material.com/simple-guide-of-metal-foam_n83
- [7] VLACH, Tomáš. Kovové pěny - Al. In: *Výukové materiály* [online]. Praha: Ondřej Beneš, 2013 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/progtech/Kovove%20peny.pdf>
- [8] BANHART, J., F. GARCÍA-MORENO, K. HEIM a H.-W. SEELIGER. Light-Weighting in Transportation and Defence Using Aluminium Foam Sandwich Structures. In: *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation* [online]. První. Singapore: Springer Singapore, 2019, s. 61-72 [cit. 2023-08-06]. Indian Institute of Metals Series. ISBN 978-981-15-1262-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-1263-6_5

- [9] CURRAN, David. Metal Foams & how to make them. In: *Dave Curran Blogspot* [online]. London: Blogspot, 2009 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <https://davecurran.blogspot.com/2021/01/metalfoam.html#more>
- [10] BANHART, John. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* [online]. 2001, **46**(6), 559-632 [cit. 2023-08-06]. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [11] BANHART, J. a J. BAUMEISTER. Production Methods for Metallic Foams. *MRS Proceedings* [online]. 1998, **521**(521), 121-130 [cit. 2023-08-06]. ISSN 0272-9172. Dostupné z: doi:10.1557/PROC-521-121
- [12] HAIDAR, S, S ANSARY a A RAHMAN. Production and Compressive Characterization of Aluminium MMC Foam Manufactured Using Dual Foaming Agent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. India, 2016, **115**(012030), 2-12 [cit. 2023-08-06]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-8981/115/1/012030
- [13] SIMANCIK, Frantisek, Walter RAJNER a Rainhard LAAG. Alulight - Aluminum Foam for Lightweight Construction. *SAE Technical Papers* [online]. První. USA: SAE Transactions, 2000, **2000**(2000-01-0337), - [cit. 2023-08-06]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: doi:10.4271/2000-01-0337
- [14] BANHART, John. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* [online]. 2001, **46**(6), 559-632 [cit. 2023-08-06]. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [15] PAPANTONIOU, Ioannis, Helena KYRIAKOPOULOU, Dimitrios PANTELIS a Dimitrios MANOLAKOS. Metal foaming by powder metallurgy process: investigation of different parameters on the foaming efficiency. *Frattura ed Integrità Strutturale* [online]. 2019, **13**(50), 497-504 [cit. 2023-08-06]. ISSN 19718993. Dostupné z: doi:10.3221/IGF-ESIS.50.41
- [16] Hliník Bezpečnostní rizika. In: *Health winesino* [online]. ČR: Health winesino, 2015 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <http://cs.winesino.com/public-health-safety/public-health/1010076952.html>
- [17] PAULIN, Irena a Borivoj ŠUŠTARŠIČ. SYNTHESIS OF ALUMINIUM FOAMS BY THE POWDER-METALLURGY PROCESS: COMPACTING OF PRECURSORS. *Materials and technology* [online]. 2011, **1**(45), 13-19 [cit. 2023-08-09]. ISSN 1580-2949.

Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/281750521_Synthesis_of_aluminium_foams_by_the_powder-metallurgy_process_Compacting_of_precursors

- [18] Bone structure: Informedhealth. In: *InformedHealth.org* [online]. Germany: Institute for Quality and Efficiency in Health Care, 2004 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: https://www.informedhealth.org/grafiken/gesunder-knochen_enjpg_replacement_image.jpg
- [19] New Aluminum 'Foam' Makes Trains Stronger, Lighter, and Safer. In: *Wired* [online]. USA: KATHERINE KORNEI, 2014 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: https://media.wired.com/photos/59322f07a31264584499357f/master/w_1920,c_limit/aluminum-foam-ft.jpg
- [20] Dilenský hydraulický lis Holzmann WP45H. In: *Holzmann-Zipper.cz* [online]. ČR: Holzmann-Zipper.cz, 2011 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <https://www.holzmann-zipper.cz/dilensky-lis-holzmann-wp-45h->
- [21] Kalící a žíhací pec průmyslová CLM 50. In: *Keramicka-pec.cz* [online]. ČR: Keramicka-pec.cz, 2018 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <https://www.keramicka-pec.cz/-/eshop/0/0/5/328-Prumyslova-kalici-a-zihaci-pec-CLM-50>
- [22] Digitální váha KERN EMB 600-2. In: *Hepnar.cz* [online]. ČR: Petr Hepner, 2010 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.hepnar.cz/skolni-vaha-kern-emb-600-2-p346>

7. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Struktura kosti [18]	12
Obr. 2 Sendvič hliníkové pěny využitý k výrobě prototypu německého vysokorychlostního vlaku [19]	12
Obr. 3 Vrstvený panel z 8mm silné leštěné granitové desky a 20mm silný pěnový sendvič z hlikové slitny po zasažení projektilem [8]	14
Obr. 4 Koncept podvozku a bateriového boxu elektrického vozu a) Slisovaný panel AFS použitý k získání utěsněných okrajů, b) modul zahrnující podvozkovou část (zadní strana) a bateriové prostory (přední strana), c) umístění prototypu v elektromobilu (koncepční vůz Jaguar I-Pace) [8].....	15
Obr. 5 Vnitřní struktury kovových pěn. a) Uzavřená, b) Otevřená, c) Houbovitá, d) Lotosovitá (orientované póry) [7]	16
Obr. 6 Teoretický průběh tahové zkoušky Al pěn [12]	17
Obr. 7 Reálný průběh tahové zkoušky Al pěn [5].....	17
Obr. 8 Zásobník munice z lehkého obrněného vozidla svařený z hliníkového pěnového sendviče [8]	18
Obr. 9 Přehled výrobních postupů pórovitých kovových materiálů [10]	20
Obr. 10 Přímé zpěňování taveniny metodou Alporas [9].....	21
Obr. 11 Proces výroby injektáží plynu do taveniny [7].....	22
Obr. 12 Prototyp držáku motoru BMW vyrobený společností LKR Ranshofen. Zprava: prázdný odlitek, kompozitní díl složený z pěnového jádra a odlévané skořepiny a řez kompozitním dílem. [2]	23
Obr. 13 Výrobní proces zalití výplňového materiálu [9]	25
Obr. 14 Řez nosníku motoru vyplněný Alulight pěnou po čelním nárazu [13]	26
Obr. 15 Proces výroby kovové pěny metodou Alulight [7]	27
Obr. 16 Graf závislosti účinnosti pěnění na lisovacím tlaku pro Al99,5 [15].....	28
Obr. 17 Graf závislosti pórovitosti na čase pěnění pro různé teploty pěnění pro Al99,5 [15]	29
Obr. 18 První verze lisovací formy; vlevo řez dělicí rovinou; vpravo izometrický pohled na formu [Zdroj: vlastní]	31
Obr. 19 Část zakótovaného výkresu levé poloviny první verze formy [Zdroj: vlastní]	32
Obr. 20 Digitální váha KERN EMB 600-2 [22]	32

Obr. 21 Dílenský hydraulický lis Holzmann WP45H [20].....	33
Obr. 22 Lisovací forma po první pokusu lisování [Zdroj: vlastní]	34
Obr. 23 Schématický postup lisování [Zdroj: vlastní].....	35
Obr. 24 Upravená první verze lisovací formy (zdeformovaná po lisovacím pokusu) [Zdroj: vlastní].....	36
Obr. 25 Lisovací forma $\varnothing 12\text{mm}$; vlevo rozložená, vpravo složená [Zdroj: vlastní]	37
Obr. 26 Vylisované vzorky z práškové směsi [Zdroj: vlastní]	38
Obr. 27 Ilustrativní obrázek žíhací/kalící pece [21]	39
Obr. 28 Vzorek č. 1, 2 a 4 po fázi "pěnění" [Zdroj: vlastní]	40
Obr. 29 Graf průběhu závislosti pórovitosti na čase pěnění u vzorků č. 1-6 [Zdroj: vlastní]	41
Obr. 30 Žíhací pec se vzorkem č.10 po 6 minutách při 680°C [Zdroj: vlastní].....	43
Obr. 31 Vzorek č.13 po zhroucení pěnové struktury [Zdroj: vlastní]	43
Obr. 32 Řez vzorkem č.14 [Zdroj: vlastní].....	44
Obr. 33 Vzorek č. 16 vlevo a č.14 vpravo [Zdroj: vlastní].....	44
Obr. 34 Graf průběhu pórovitosti v závislosti na teplotě a čase výdrže u vzorků $\varnothing 12\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 600\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]	45
Obr. 35 Graf průběh pórovitosti v závislosti na teplotě a čase výdrže u vzorků $\varnothing 12\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 700\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]	46
Obr. 36 Třetí verze formy s lisovacím trnem a zátkou [Zdroj: vlastní].....	48
Obr. 37 Poškozený trn $\varnothing 24\text{mm}$ [Zdroj: vlastní]	49
Obr. 38 Upravená třetí verze lisovací formy s trnem a zátkou. [Zdroj: vlastní]	49
Obr. 39 Vylisované vzorky č.19 a č. 22 [Zdroj: vlastní].....	50
Obr. 40 Vzorek po 2 minutách v peci při 720°C [Zdroj: vlastní].....	51
Obr. 41 Vzorek v peci při 720°C po 4 minutách [Zdroj: vlastní].....	51
Obr. 42 Vzorek v peci při 720°C po 6 minutách [Zdroj: vlastní].....	52
Obr. 43 Vzorek v peci při 720°C po 8 minutách [Zdroj: vlastní].....	52
Obr. 44 Vzorek v peci při 720°C po 10 minutách [Zdroj: vlastní]	53
Obr. 45 Totální destrukce vzorků [Zdroj: vlastní]	53
Obr. 46 Zdeformována struktura hliníkové pěny po zchlazení ve vodě [Zdroj: vlastní] ..	54
Obr. 47 Hliníková pěna po zchlazení na vzduchu. [Zdroj: vlastní]	54
Obr. 48 Graf průběhu závislosti pórovitosti v závislosti na teplotě a čase výdrže u vzorků $\varnothing 25\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 600\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]	55

Obr. 49 Graf průběhu pórovitosti v závislosti na teplotě a času výdrže u vzorků $\varnothing 25\text{mm}$ z Al99,7 slisované tlakem $\approx 660\text{MPa}$ [Zdroj: vlastní]	56
Obr. 50 Vylisování vzorku $\varnothing 25$ z materiálu AlSi10Mg [Zdroj: vlastní].....	57
Obr. 51 Napěnění "rozlámaného" vzorku $\varnothing 25$ z materiálu AlSi10Mg [Zdroj: vlastní]	57
Obr. 52 Řez vzorkem pěny z kombinace materiálů Al99,7 a AlSi10Mg [Zdroj: vlastní]....	58
Obr. 53 Proma pro pění [Zdroj: vlastní].....	59
Obr. 54 Vzorek napěňovaný ve formě [Zdroj: vlastní].....	60
Obr. 55 Koláž z vyrobených pěn [Zdroj: vlastní]	62

8. PŘÍLOHY

[A] Výkresová dokumentace lisovacích a pěních forem