

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2020**

**JAN**

**VONEŠ**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Voneš** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **473502**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Slévárenské pěny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Foundry foams**

Pokyny pro vypracování:

Popis a rešerše pěnových litých materiálů  
Popis a návrh technologie výroby pěny  
Experiment

Seznam doporučené literatury:

Metal Foams: Fundamentals and Applications, Nihad Dukhan, DEStech Publications, Inc, 2013  
Porous Metals and Metallic Foams, 10th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (MetFoam 2017)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

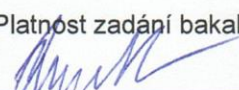
**doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**


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

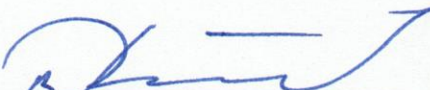
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

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

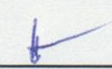
  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

9.6.2020  
\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

  
\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

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

V Praze dne: .....

.....

Jan Voneš

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D., který mě provedl celou prací. Jsem vděčný za jeho rady a připomínky. Dále děkuji panu Ing. Vojtěchu Petrovi za jeho znalosti odlévání, které mi pomohly v praktické části. Také bych chtěl poděkovat matce za korekturu textu, otci za spolupráci a rady s experimenty a přítelkyni za psychickou podporu.

# Anotace

**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** Ústav strojírenské technologie

**Název bakalářské práce:** Slévárenské pěny

**Akademický rok:** 2019/2020

**Autor:** Jan Voneš

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

**Abstrakt:** Tato bakalářská práce se zabývá problematikou slévárenských pěn. Rešeršní část se zaměřuje na popis vlastností kovových pěnových materiálů, popis výroby tohoto materiálu a možnosti jeho využití. V praktické části je provedeno několik experimentů za účelem nalezení nejjednoduššího způsobu výroby hliníkové pěny. Z výsledků pokusů jsou vytvořeny vzorky a z nich metalografické výbrusy. Následuje shrnutí a porovnání vzorků a doporučení pro zlepšení jednotlivých metod výroby.

**Klíčová slova:** slévárenská pěna, hliníková pěna, kovová pěna, celulární pevná látka, pórovitá struktura

**Počet stran:** 51

**Počet obrázků:** 33

**Počet tabulek:** 6

**Počet rovnic:** 3

# Annotation

**University:** CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

**Department:** Department of Manufacturing Technology

**Title of work:**

**Academic year:** 2019/2020

**Author:** Jan Voneš

**Supervisor:** doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

**Abstract:** This bachelor thesis deals with the issue of foundry foams. The research part focuses on the description of the properties of metal foams, the description of production of this material and its possible usage. In the practical part several experiments are performed in order to find the simplest way to produce aluminium foams. Samples and metallographic sections are created from the experimental results. The conclusion consists of summary and comparison of samples and recommendations for improving individual production methods.

**Keywords:** foundry foam, aluminium foam, metal foam, cellular solid, porous structure

**Number of pages:** 51

**Number of pictures:** 33

**Number of tables:** 6

**Number of equations:** 3

# Obsah

1	ÚVOD.....	8
1.1	SLÉVÁRENSKÁ PĚNA – TERMINOLOGIE .....	9
1.2	CÍLE PRÁCE .....	9
2	VLASTNOSTI SLÉVÁRENSKÝCH PĚN .....	10
2.1	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VLASTNOSTI: .....	16
3	VÝROBA SLÉVÁRENSKÝCH PĚN.....	18
3.1	ZPĚNĚNÍ POMOCÍ ZPĚNOVADLA – METODA ALPORAS .....	18
3.2	TUHnutí PLYNEM PŘESYCNÉ TAVENINY – METODA GASAR .....	20
3.3	PŘÍMÉ ZPĚNĚNÍ PLYNEM – METODA CYMAT.....	20
3.4	PRÁŠKOVÁ ZHUTŇOVACÍ METODA.....	21
3.5	ODLÉVÁNÍ POMOCÍ ODPARITELNÉHO MODELU .....	21
3.6	ODLÉVÁNÍ DO VÝPLŇOVÉHO MATERIÁLU .....	23
4	PRAKTICKÁ ČÁST – ODLÉVÁNÍ.....	25
4.1	PRVNÍ POKUS.....	25
4.1.1	<i>Odlití do soli.....</i>	25
4.1.2	<i>Přímé zpění plynem .....</i>	27
4.1.3	<i>Vyhodnocení.....</i>	28
4.2	DRUHÝ POKUS .....	29
4.2.1	<i>Metoda Alporas.....</i>	29
4.2.2	<i>Odlití do výplňového materiálu – soli.....</i>	32
4.2.3	<i>Vyhodnocení.....</i>	34
4.3	TŘETÍ POKUS .....	36
4.3.1	<i>Vrstvené slévání.....</i>	37
4.3.2	<i>Tlakové odlévání .....</i>	37
4.3.3	<i>Vyhodnocení.....</i>	38
5	METALOGRAFICKÉ VÝBRUSY .....	39
5.1	SNÍMKY Z EXPERIMENTU METODOU ALPORAS .....	40
5.2	SNÍMKY Z EXPERIMENTU ODLÉVÁNÍ DO SOLI .....	42
5.3	POROVNÁNÍ POROZIT .....	43
6	ZÁVĚR.....	44
7	SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY.....	47
8	SEZNAM TABULEK, ROVNIC A OBRÁZKŮ.....	50

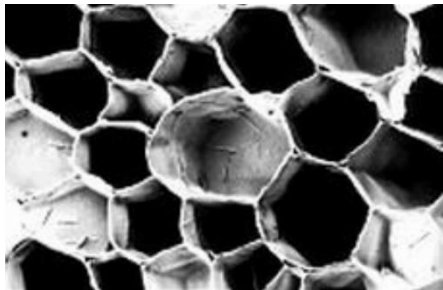
# 1 Úvod

První písemnou zmínku o pozorování pórovitosti přírodních materiálů a zjišťování výhod tohoto uspořádání popsal v roce 1664 ve své knize Robert Hooke slovy:

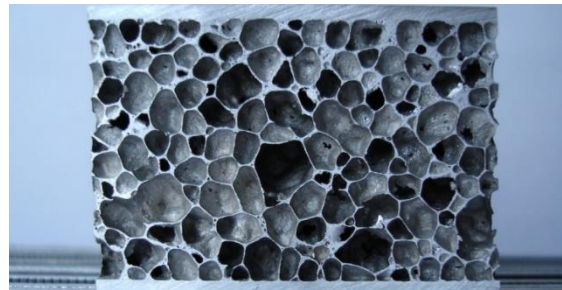
*„I took a good clear piece of Cork, and with a Pen-knife sharpened as keen as a Razor, I cut a piece of it off ... I could exceeding plainly perceive it to be all perforated and porous, much like a Honey-comb in these particulars ... which were indeed the first microscopical pores I ever saw, and perhaps, that were ever seen, for I had not met with any Writer or Person, that had made any mention of them before this ... my Microscope could presently inform me that here was the same reason evident that there is found for the lightness of froth, wool and sponge“[1].*

Jak tomu ale bývá, tak se touto myšlenkou začali lidé opravdu zabývat až tři sta let po objevu, kdy vyšly první články s tematikou pórovitých kovů, keramik a plastů. Jedním z možných vysvětlení tak pozdního objevu je komplexnost kovových pěn jak v experimentální, tak teoretické rovině. Jedná se totiž o směsi plynů, kapalin a pevných látek. Teprve ve dvacátém století si člověk uvědomil, jakou výhodu mají materiály s velkou plochou povrchu, schopností dobře přenášet teplo, a hlavně nepřekonatelným poměrem pevnosti vzhledem k hustotě. Od té doby se syntetické polymerní pěny z nejrůznějších materiálů využívají téměř ve všech odvětvích průmyslu. Mezi příklady těchto lehkých přírodních materiálů s neuvěřitelnou schopností snášet namáhání a nárazy při nízké objemové hmotnosti patří například korek, kost, dřevo.[2][8]

Na obrázcích 1 a 2 se nachází porovnání ukazující nezpochybnitelnou podobnost přírodních pórů korku a syntetických pórů hliníkové pěny.



Obrázek 1: Korková kůra pod mikroskopem [4]



Obrázek 2: Výbrus hliníkovou pěnou [5]



## 1.1 Slévárenská pěna – terminologie

Název slévárenská pěna je podřazený pojmu kovová pěna, protože ne všechny kovové pěny jsou vyrobeny slévárenskými metodami. Dále se budu zmiňovat o kovových pěnách popsaných v teoretické části, ovšem má praktická část se zabývá pouze výrobou sléváním.

Termín slévárenská pěna se může zdát pro mnohé matoucí, jelikož toto slovní spojení není moc rozšířené mezi veřejností. Pojem pěna můžeme snadno definovat jako disperzi plynu v kapalině, kterou musí být jednotlivé plynové kapsy od sebe odděleny. Pokud tato kapalina ztuhne, vznikne takzvaná „pevná pěna“, která je speciálním případem „celulární pevné látky“. Pevná pěna tedy vzniká z taveniny a díky tomu může mít jen omezenou morfologii. Naopak celulární pevná látka nemusí nutně vznikat z taveniny, a proto způsob jejího uspořádání není ničím podmíněn. Mezi příklady patří slinování práškových kovů do nejrůznějších tvarů a struktur. Vhodnější termín pro pojmenování látek s navzájem propojenými póry je „kovová houba“. [7][8]

## 1.2 Cíle práce

V teoretické části této bakalářské práce je cílem seznámit se s poměrně novou problematikou kovových pěn. První část se věnuje vlastnostem, chování a porovnání s ostatními materiály. Řeší se zde i zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých morfologií pěn a s tím související rozsah využití v různých odvětvích průmyslu. Dále následuje popis jejich výroby. Práce se zaměřuje na výrobu metodou Alporas, Gasar či metodou Cymat. Také popisuje práškovou zhuňovací metodu, odlévání do výplňového materiálu a odlévání pomocí vytavitelného modelu. Čtenář by si měl udělat obecný pohled na věc a rozšířit své znalosti v oblasti kovů a slévání.

Praktická část se zaměřuje na výrobu hliníkové pěny hned několika způsoby. Mezi ně patří odlévání metodou Alporas, zalití výplňového materiálu či přímé probublávání plynem. Jednotlivé metody se budou lišit dostupností materiálů, podmínkami pro odlévání, náročností přípravy a požadavky na vlastnosti materiálu. Všechny budou prováděny slévárenskými postupy tzn. z taveniny. Celkem jsem provedl tři pokusy, které čtenáře provedou zdařenými, ale i nezdařenými pokusy. Cílem je zhotovení a popsání metody, která bude jednoduchá, levná, časově nenáročná, snadno opakovatelná a dosáhne snížení hustoty o 50 %.

## 2 Vlastnosti slévárenských pěn

Mezi hlavní výhody tohoto nepříliš známého materiálu patří:

- **použití v automobilovém průmyslu** – kvůli stále se zvyšujícím nárokům na snížení uhlíkové stopy a spotřeby paliva je nezbytné snížení hmotnosti vozidel. Tato opatření není ovšem vhodné prosazovat na úkor bezpečnosti. Další možností je zmenšení motorů, které vede k nutnosti lepších chladičů. V neposlední řadě potřeba snížit zvukové znečištění nás nabádá k výrobě nových pohlcovačů zvuku. Všechny tyto požadavky se dají snadno vyřešit pomocí slévárenských pěn různého druhu (obrázek 3). [7]



*Obrázek 3: Využití kovových pěn v automobilovém průmyslu [17]*

- **poměr tuhosti a váhy, nehořlavost**, díky čemuž se hodí na stavbu lehkých konstrukcí. Pro tyto aplikace je upřednostňována morfologie s uzavřenými póry. Díky této vlastnosti najde uplatnění i ve stavbě lodí, které z něj mohou být vyrobeny celé.
- **recyklovatelnost**, díky níž je atraktivní hlavně vzhledem k životnímu prostředí.

- **vysoká absorpce energie**, která může být využita v dopravním průmyslu pro výrobu nárazníků a dalších konstrukcí určených k deformaci. Tyto zóny podléhají plastické, nevratné deformaci, která by měla být rovnoměrně rozprostřena po celém objemu tohoto bezpečnostního opatření. Z důvodů různých směrů nárazů se musí jednat o látky izotropní. Neméně důležité je i využití v kosmickém průmyslu, kde se tyto pěny používají jako absorbéry při přistání. [3][6][7]

- **odolnost proti výbuchům a nárazům** pro použití hlavně ve vojenství. Především lehká, pohyblivá vozidla čelí nedostatku obrnění proti výbuchům a střelám vyšší ráže. Použití konvenčních materiálů by totiž vedlo k nepřijatelnému zvýšení hmotnosti.

Nejúčinnější metodou se ukázalo připevnění tvrzeného ocelového či keramického plátu na absorbér energie – kovové pěny. Plát zajistí stlačení, roztržení nebo stočení střely a poddajná vrstva pohltí zbytkovou energii. Jako keramická sloučenina se používá například oxid hlinitý či karbid křemíku díky nízké objemové hmotnosti a vysoké tvrdosti. Tyto vlastnosti zkoumané na nerezové kompozitní pění (3.6) ukázaly schopnost pojmout větší množství energie a zároveň snížit celkovou hmotnost pancéřování oproti dosavadním materiálům. [6][20]

- **absorpce zvuku a vibrací** využitelná v průmyslových strojích, kde je nárok na tepelnou a mechanickou odolnost. I v této oblasti vynikají pěny oproti samotnému kovu. Díky pórovitosti se totiž zvukové vlny zčásti odrazí, ale zbytek vnikne do struktury porézního kovu, kde se pohltí. Při frekvencích v řádu tisíců Hertzů jde dokonce o pohlcení až 99 %. Jako příklad lze uvést využití této vlastnosti ve vchodových halách či podél japonských dálnic. V tomto případě se používají pěny Alporas (3.1). [7]

- **možnost náhrady kloubů**, kostí či zubů díky pěnám z titanu a nerezové oceli. Pórovitost v tomto případě zaručuje dobré přichycení tkáně (obrázek 4).



Obrázek 4: Využití nerezových pěn v lékařství [18]

- **dobry prostup tepla či elektřiny** a vysoký poměr povrchu ku objemu, díky přítomnosti velkého množství pórů, vede k využití kovových pěn například v elektrolýze či výměnících tepla. Pro tyto účely se hodí obzvláště měď a hliník díky jejich vysoké vodivosti. Je ovšem třeba použít strukturu s navzájem propojenými póry, aby tekutina mohla snadno protékat a teplo mohlo být předáváno v co největší míře. [3][6][7]
- **tepelná izolace** – ač se tato vlastnost může zdát v rozporu s předchozí vlastností, tak to jen ukazuje na univerzálnost kovových pěn. Potřebujeme-li materiál, který je schopný snížit přenos tepla, zachovat pevnost kovu a udržet si minimální tloušťku, tak nemáme moc jiných možností než použít nerezové kompozitní pěny. Důležitou podmínkou je nepropojenost jednotlivých pórů zajišťující narušení teplotního toku skrze materiál.

Tato vlastnost byla nedávno popsána doktorkou Afsaneh Rabiei, zaměřující se na výrobu a testování kompozitního materiálu skládajícího se z nerezové matrice a nerezových dutých kuliček (3.6). Článek pojednává o porovnání schopnosti přenést teplo mezi nerezovou pěnou a nerezovým blokem. Nerezová pěna má oproti bloku třetinovou hustotu, tj. srovnatelnou s hustotou hliníku. Aby byl test úspěšný, musí deska v peci odolat teplotě 825 °C po dobu nejméně 100 minut. Nerezová pěna tento časový interval překonala a nejvyšší

dosažená teplota na její zadní straně byla 379 °C (obrázek 5). Stojí za zmínku, že nerezový plát vydržel pouze 13 minut před dosažením teploty 427 °C, která je udávaná jako mezní a její překročení znamená přílišnou změnu pevnostních charakteristik materiálu.

Jestli se nerezovým pěnám povede stejně dobře i ve zkoušce na otevřeném ohni, tak by mohly najít uplatnění i pro převoz nebezpečných látek po kolejištích. Vezmeme-li v potaz i schopnost pohlcovat záření, tak se nám nabízí možnost použití i pro uskladnění a převoz jaderného, explozivního či jinak nebezpečného materiálu. [19]



*Obrázek 5: Nerezová pěna 30x30 cm zbarvená po teplotním testu [19]*

- **korozní odolnost**, proto se používá jako chemicky a mechanicky odolné filtry, které zároveň dobře odolávají zvýšeným teplotám. I zde je nutné mít pěnu s navzájem propojenými póry.

- **schopnost uchování a přesunu kapalin** v porézních materiálech vzniklých práškovou metalurgií, která se aplikuje v samolubrikujících ložiskách. Olej je uložen v meziprostorech mezi částicemi a díky pomalému vytékání nahrazuje olej starý. Toto využití se ovšem neomezuje jen na olej. Blok této pěny může být vhodný pro pomalé uvolňování parfému do okolí. Také se hodí pro převoz kapaliny v neplných nádobách, kde silně redukuje její pohyb a přelévání.
- **poměr plochy a objemu**, díky kterému se hodí jako katalyzátory. [3][6][7]
- **použití jako trvalá jádra** pomocí hliníkových pěn komplexních tvarů. Tyto pěny jsou připraveny zahříváním předem připravených pelet obsahujících hliníkový prášek a zpěnovadlo. To vede k jejich napěnění uvnitř forem. Jde o úspěšné nahrazení písečných jader, protože ta se musí následně vyjmout. Hliníková jádra ovšem v odlitku zůstanou a zvýší tím mechanické vlastnosti celku. Díky tomu může mít odlitek tenčí stěny a dojde ke snížení hmotnosti.

Výhodné je zvýšení tuhosti, absence rozměrných dutin a zlepšení tlumení rázů a zvuků. Důležité pro dobré spojení jádra se skořápkou je předehřátí jádra a jeho povrchová úprava. K roztavení vnitřní struktury nedochází kvůli vysoké tepelné vodivosti a přirozené tendenci hliníku tvořit na svém povrchu oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ), který má teplotu tání daleko přesahující teplotu tání čistého kovu. [22]

- **nevšední vzhled** zaručující využití jako dekorace domácnosti nebo dokonce pokrytí celých stěn kovovou pěnou a tím pádem zakrytí nevzhledného betonu pod ní. Zde je opět podmínkou lehkost a žáruvzdornost konstrukce.

Hned se toho také chopili umělci, kteří se snaží „vytvořit výrazný vizuální nebo haptický dojem ve srovnání s konvenčními materiály“ [7]. Využití kovových pěn by mohlo následovat i ve zlatnictví pro výrobu nevšedních šperků. Byly z nich zhotoveny i nejrůznější každodenní věci jako například židle, nábytek, hodiny, lampy, reprosoustavy (obrázek 6). To ovšem nemá nic společného s jejich mechanickými vlastnosti, pouze s jejich vzhledem. [6][7]



*Obrázek 6: Nábytek z hliníkové pěny [16]*

## 2.1 Faktory ovlivňující vlastnosti:

- **materiál**, protože jiné prvky a sloučeniny mají odlišné tepelné, chemické a mechanické vlastnosti. Tím pádem bude mít výsledná pěna rozdílnou tepelnou vodivost, mikrostrukturu a uspořádání pórů.
- **morfologie** – v závislosti na počtu, tvaru, propojenosti a velikosti pórů se mění tepelná a elektrická vodivost, schopnost absorpce energie a zvuku pěny. Záleží také na tom, jestli je uspořádání nahodilé či uspořádané = cílené. V ojedinělých případech pěny dokonce překonávají v pevnosti i kovy samotné.

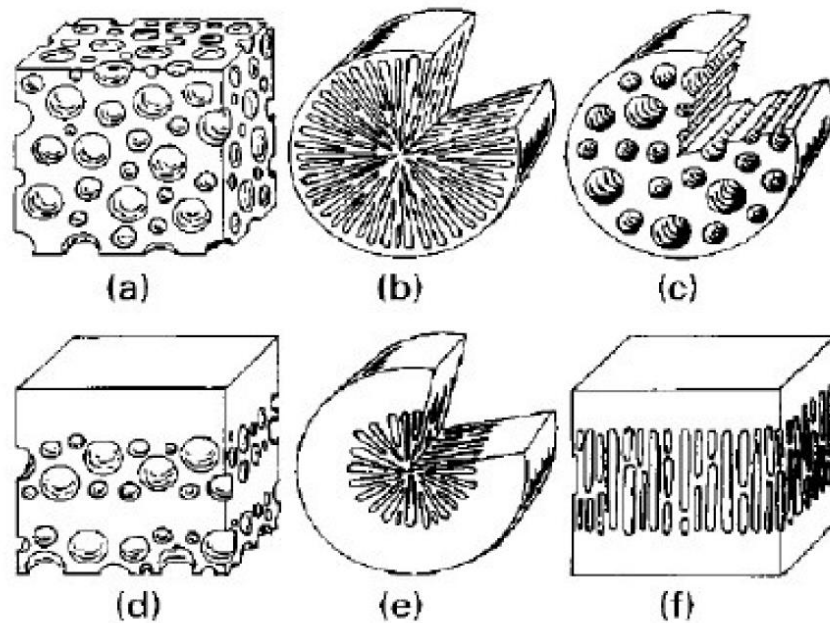
Některá využití mohou mít velice specifické požadavky na stupeň propustnosti od velice propustných po zcela nepropustné. Nepropustné pěny jsou využívány zejména jako pohlcovače nárazů a zvuku či jako konstrukční prvky. Propustné se hodí pro výměníky tepla nebo filtry.

Cílený tvar pórů může mít mnoho výhod. Lze se díky tomu vyvarovat ostrým hranám pórů, které slouží jako koncentrátoři napětí a tím pádem snižují pevnost a tvárnost. Směr pórů má také vliv na pevnost v tlaku. Póry uspořádané rovnoběžně se směrem tlakové síly lépe odolávají tlaku než ty v kolmém směru.

Hliníkové „plástve“ se šesterečnou strukturou svými pevnostními vlastnostmi pěny sice předčí, mají ale jednu hlavní nevýhodu, a tou je nákladná výroba.

Na obrázku 7 můžeme vidět různé rozmístění a tvar pórů. Díky povaze tuhnutí si můžeme všimnout, že jejich směr závisí na teplotním gradientu. Obrázky 7b) a 7e) vznikly radiálním odvodem tepla a obrázky 7c) a 7f) zase axiálním odvodem tepla. [7][15]



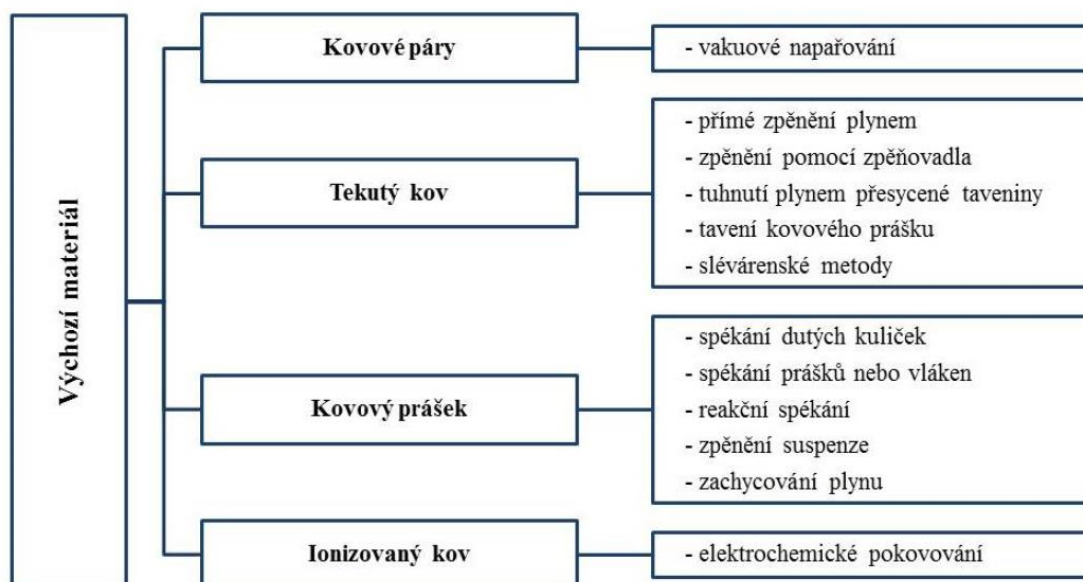


Obrázek 7: Různé tvary pórů: a) sférické, b) radiální, c) cylindrické, d)- f) lamelární [15]

- **ekonomika** – pěny s pravidelnou buněčnou strukturou a požadavkem na podobnost či kulovitost jednotlivých pórů jsou obecně náročnější a tím pádem i dražší na sériovou výrobu. Jedná-li se ovšem o výrobu kusovou, tak právě tyto pěny, vzniklé například odléváním pomocí odpařitelného modelu, mohou být několikrát levnější. Tento postup totiž nevyžaduje speciální stroje, které se vyplatí koupit až při sériové výrobě. [7]

### 3 Výroba slévarenských pěn

Tyto produkty se dále rozdělují například podle jednotlivých postupů výroby. Některé způsoby vytvoří pěny s navzájem propojenými dutinami, jiné zase s dutinami od sebe oddělenými tenkými stěnami. Odlišuje se také tvar, velikost, uspořádanost a pravidelnost jednotlivých pórů. Oblíbená varianta je „sendvič“ z kovové pěny ze dvou stran obklopený kovovým plátem. Výroba se dělí podle počátečního skupenství, ve kterém se kov nachází. Také cena se může velice lišit a to od \$7 do \$12 000 za kilogram. [6] Neméně důležitý je výběr materiálu. Jedná se například o kovy jako: hliník, hořčík, zinek, titan, olovo, měď, železo, nikl. Jako nejvýhodnější se ovšem jeví hliník díky nízké měrné hmotnosti, teplotě tání a odolnosti proti korozi. Základní rozdělení je zobrazeno na obrázku 8. [6][7][8]



Obrázek 8: Rozdělení kovových pěn podle způsobu výroby [11]

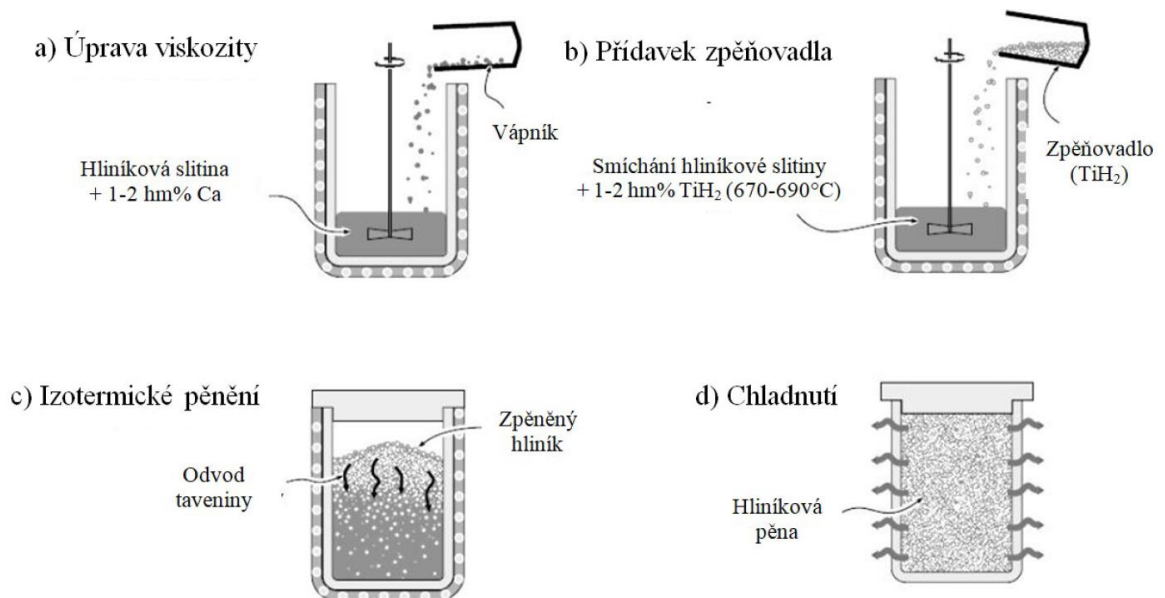
#### 3.1 Zpěnění pomocí zpěnovadla – metoda Alporas

Na rozdíl od přímého zpěnění je, pro tento způsob výroby, plyn součástí nějaké látky, zpěnovadla. Za nejúčinnější z těchto látek se považuje práškový hydrid titanu ( $TiH_2$ ), který při zahřátí uvolňuje plyn, načež začne proces pění. U této metody se musí v tavenině nejdříve zvýšit hustota. Toho se dosáhne přidáním keramických částic jako například vápníku, oxidu hlinitého či karbidu vápníku. Po řádném zamíchání

a přidání zpěnovadla se nádoba s taveninou nechá pár minut pěnit a poté vznikne homogenní pěna s uzavřenými póry. Výhoda této metody spočívá ve snadné automatizaci, při které vzniká nekonečná pěnová deska určená k nařezání.

Pořízení hydridu titanu je ovšem finančně náročné, a proto je snaha jej nahradit za nějakou levnější variantu (podílí se až 25 % z celkové ceny přísad [8]). Další jeho nevýhodou je příliš nízká teplota rozpadu, která se ne úplně hodí pro použití s hliníkem. Díky tomu může dojít k předčasnému uvolnění vodíku a nedostatečnému napěnění. Mezi metody na vyřešení těchto problémů patří například: oxidace prášku nebo pokrytí prášku tenkou vrstvou niklu.[8][10]

Pro vytvoření materiálu zvaného Alporas (obrázek 9) se připraví hliníková slitina a 1,5 % vápníku pro zahuštění. Vápník je přidáván z důvodu rychlejšího zhoustnutí než v případě karbidu křemíku. Ten se poté nasype do roztaveného hliníku při teplotě 680 °C a je míchán po dobu šesti minut. Zvýšení hustoty se projeví jako změna kroutícího momentu potřebného k promíchávání směsi. Vzniklá hliníková slitina se poté odlíje do odlévací formy, kam se přidá 1,6 %  $TiH_2$ . Po promíchání se tavenina nechá 15 minut vypěnit a po vyplnění celé formy je následně odlitek zchlazen. Tímto způsobem výroby vzniká produkt, který dosáhne až 92% pórovitosti, velikost pórů se pohybuje od 1 do 13 mm a používá se především pro pohlcení zvuku a nárazů. [10]



Obrázek 9: Zpěňování pomocí zpěnovadla [11]

## 3.2 Tuhnutí plynem přesycené taveniny – metoda Gasar

Její původní název: *Газар*, tedy složení slov plyn a zesílit, vznikl v Rusku. Tato metoda spočívá v tuhnutí vodíkem nasycené taveniny. Tavíme-li totiž kov ve vodíkové atmosféře doplněné vysokým tlakem, dostáváme homogenní taveninu vysoce nasycenou vodíkem. Protože tavba probíhá v eutektických koncentracích, dochází při nižších teplotách k segregaci. Tím, že vodík začíná z taveniny unikat, tvoří se bubliny, které se zachytávají v tuhnoucí směsi.

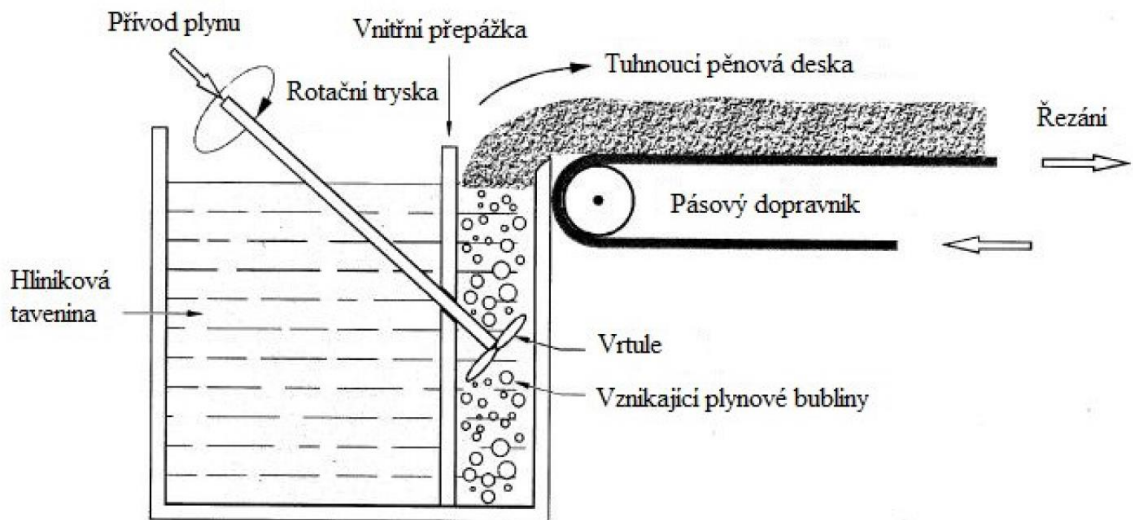
Velikost, tvar a orientace pórů je závislá na okolních podmínkách mezi které patří: obsah vodíku v tavenině, tlak, ve kterém se nachází při tuhnutí, teplota tavení a teplota formy, směr a rychlost odvodu tepla a druh slitiny. Nejčastěji dochází k tvorbě prodloužených pórů orientovaných ve směru chladnutí. Výsledné průměry můžou být od 10  $\mu\text{m}$  do 10 mm a délky od 100  $\mu\text{m}$  do 300 mm. Také dosažitelná pórovitost se dosti liší a to od 5 do 75 %. Tento proces nemusí být využit jen pro výrobu pěn, ale také některých druhů keramik. [7][15]

## 3.3 Přímé zpěnění plynem – metoda Cymat

Čisté kovy lze jen velice obtížně změnit na pěny pomocí probublávání. Pro úspěšné zpěnění je potřeba do taveniny přidat malé nerozpustitelné keramické částice, například: karbid křemíku (SiC) či oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Zvýšené viskozity dosáhneme díky tomu, že keramické částice přilnou na pomezí plyn/kov a zabrání koalescenci pórů. Jako plyn ke zpěnění se používá například: vzduch, oxid uhličitý, dusík, argon. Ten je vmícháván do taveniny pomocí rotujících lopatek či vibrujících trysek, které zaručí rovnoměrné rozložení plynových bublin. Tato vazká směs bublin a taveniny vystoupá na povrch, kde se z ní stane požadovaná pěna. Přebytečný tekutý kov pak při stoupání snadno vyteče. Dále je tato pěnová deska posouvána pomocí pásového dopravníku, na kterém chladne a tuhne. Ještě před úplným ztuhnutím může být deska zmáčknuta pomocí přítlačné desky či válcování. Díky této úpravě vznikne dříve zmíněný „sendvič“ s tenkým nepórovitým plátem kovu na obou stranách. [6][7][8][9]

Výhodou této metody je velké množství pěny, až 1000 kg/h a vysoká pórovitost blížící se 98 %. Velikost pórů dosahuje 3 až 25 mm s tloušťkou stěny 50 až 85  $\mu\text{m}$ . [7]

Nevýhodou je nutnost řezání, která nenávratně otevře póry a křehkost pěny vzniklá přítomností cizích částic zvyšujících viskozitu (obrázek 10). Abychom vyřešili negativní účinky těchto stabilizujících částic, je možné nechat pění pouze čistý kov bez jakýchkoliv přísad. Podmínkou je odlévání taveniny při teplotách blízcích se teplotě tání, kdy je viskozita největší. [7]



Obrázek 10: Schéma zobrazující výrobu kovové pěny pomocí vhnění vzduchu [11]

### 3.4 Prášková zhutňovací metoda

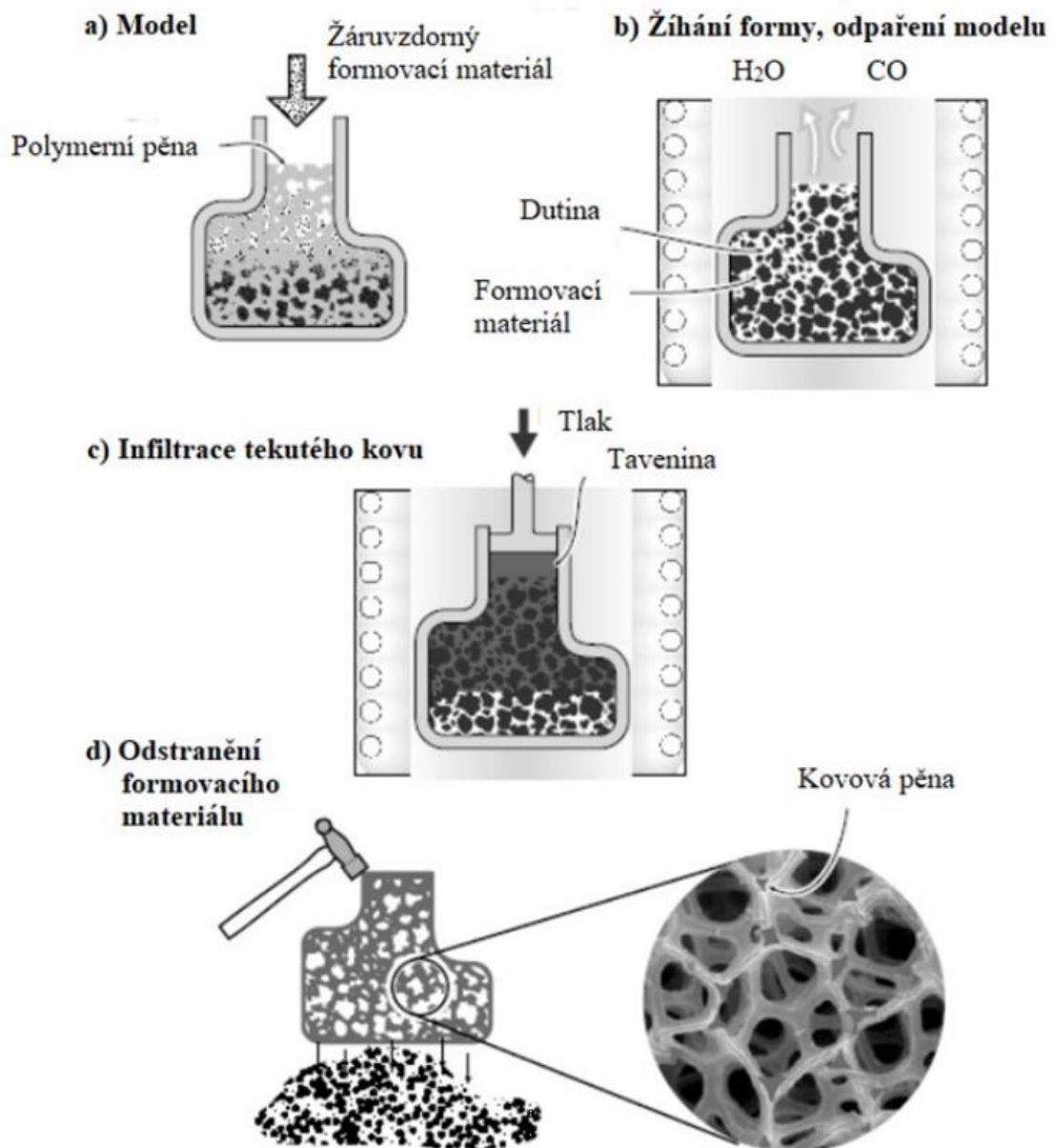
Tato metoda spočívá ve smíchání základních kovových prášků s nezbytnými příměsí, a hlavně se zpěnovadlem. Směs je poté zhutněna do takové míry, aby neobsahovala žádnou pórovitost. Následně je slinuta při teplotě nižší, než je bod tání kovu. Jelikož i touto nižší teplotou je překročen bod tání zpěnovadla, začínají se z něj uvolňovat plyny, které danou směs napění. [7]

### 3.5 Odlévání pomocí odpařitelného modelu

Pomocí této metody jsme schopni vytvořit pouze pórovitý kov s otevřenými póry – kovovou houbu. Nejdříve je zhotoven model pomocí polymerní pěny. Tento model se poté zalije žáruvzdorným formovacím materiálem. Při vysoušení za zvýšených teplot dojde k vypaření modelu a vznikne dutina. Do této dutiny se poté odleje žádaný kov, který vyplní veškeré kanálky. Pro lepší zabíhavost je často nezbytností ohřívání formy

a použití metody tlakového či vakuového lití. Poté stačí formu rozbít nebo rozpustit a zbyde nám kov přesně kopírující původní model (obrázek 11).

Tvary a velikosti pórů závisí na modelu. Všechny póry ovšem musí být navzájem propojené, aby došlo k vypálení modelu a následnému vyplnění formy kovem. Dosažitelná pórovitost dosahuje 95 % a velikost pórů 1-5 mm. [6][7]

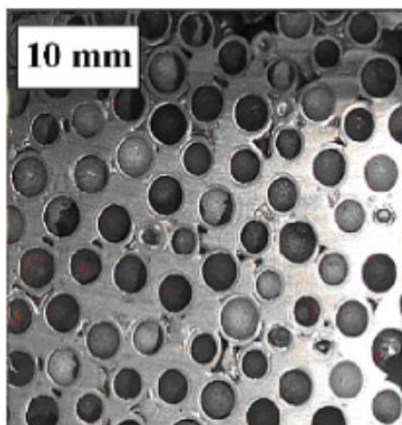


Obrázek 11: Odlévání pomocí odpařitelného modelu [11]

### 3.6 Odlévání do výplňového materiálu

Kovové pěny mohou být také vytvořeny odlitím do formy vyplněné anorganickými či organickými granulami. Mezi ně patří například hliněné pelety, rozpustné soli, písečné pelety, skleněné kuličky nebo duté kuličky. Tyto granule mohou v odlitku zůstat, nebo se odebrat. Toho můžeme dosáhnout pomocí teplotního rozkladu nebo rozpuštění ve vodě či kyselině. Pro úspěšné odstranění výplňového materiálu je nutné mít kovovou pěnu s otevřenými póry. K zaručení správné zabíhavosti je potřeba částice zahřát nebo kov odlít pod tlakem. Mezi hlavní výhody tohoto druhu odlévání patří dobře kontrolovatelná velikost a hustota dutin. Nevýhodami jsou poměrně vysoké náklady na automatizaci a menší dosažitelná pórovitost než u jiných metod (pod 80 %). [7]

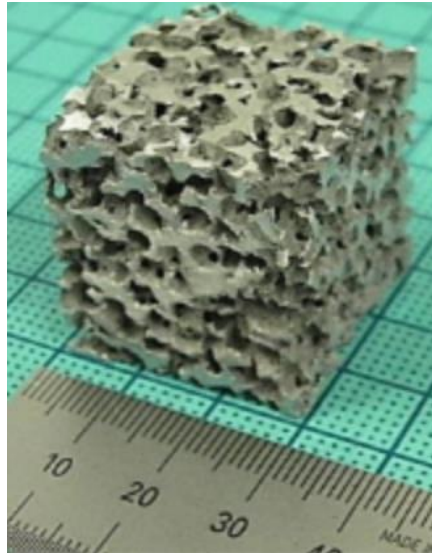
První pokusy odlévání hliníkových slitin do dutých kovových či nerezových kuliček proběhly ve státní univerzitě v Severní Karolíně (obrázek 12). Výroba prekurzorů spočívá v pokrytí polystyrenových kuliček vrstvou práškového kovu. Ty se následně termicky rozloží a práškový kov se sline do jednotvárných skořepin. Tyto kuličky dosahují průměrů 2 mm s tloušťkou stěny 100  $\mu\text{m}$ . Tím máme vytvořen výplňový materiál s teplotou tavení daleko přesahující teplotu tavení hliníku. Forma se společně s kuličkami předejde na 700  $^{\circ}\text{C}$ , aby nedocházelo k předčasnému tuhnutí hliníku. Ten poté zaplní veškeré dutiny. Výhoda této metody je jednotvárnost a kontrolovatelnost velikosti pórů, zajišťující předvídatelnost a opakovatelnost chování pro potřeby nejrůznějších aplikací. [13][19]



Obrázek 12: Použití dutých kovových kuliček pro výrobu hliníkové pěny [13]

Asi nejjednodušší metoda je odlévání hliníkové slitiny do chloridu sodného (kuchyňské soli). Jednotlivá zrníčka jsou ve formě slisována nebo spékána, aby se částice

v místě dotyku natavily a vznikl tak jednotný solný celek. Hliníková slitina s dobrou zabíhavostí se poté nízkotlaceně odlíje do formy. Sůl je následně rozpuštěna ve vodě a vznikne tak jedinečná struktura s maximální pórovitostí 75 %. Použití této metody dovoluje výrobu i složitějších tvarů s velikostí pórů od 10  $\mu\text{m}$  do 10 mm (obrázek 13). [6][14]



*Obrázek 13: Použití NaCl pro výrobu hliníkové pěny [14]*

Další z metod je použití polystyrenových kuliček, které jsou pokryty pryskyřicí. Poté jsou spečeny při teplotě 80 °C, aby se všechny navzájem dotýkaly a vznikl tak pórovitý kov s otevřenými póry. Následuje rychlé vstříknutí roztaveného hliníku do formy. Tím se zamezí předčasnému roztavení a odpaření polystyrenu pokrytého pryskyřicí. O to se postará residuální teplo vylučované z chladnouceho odlitku. [12]



## 4 Praktická část – odlévání

### 4.1 První pokus

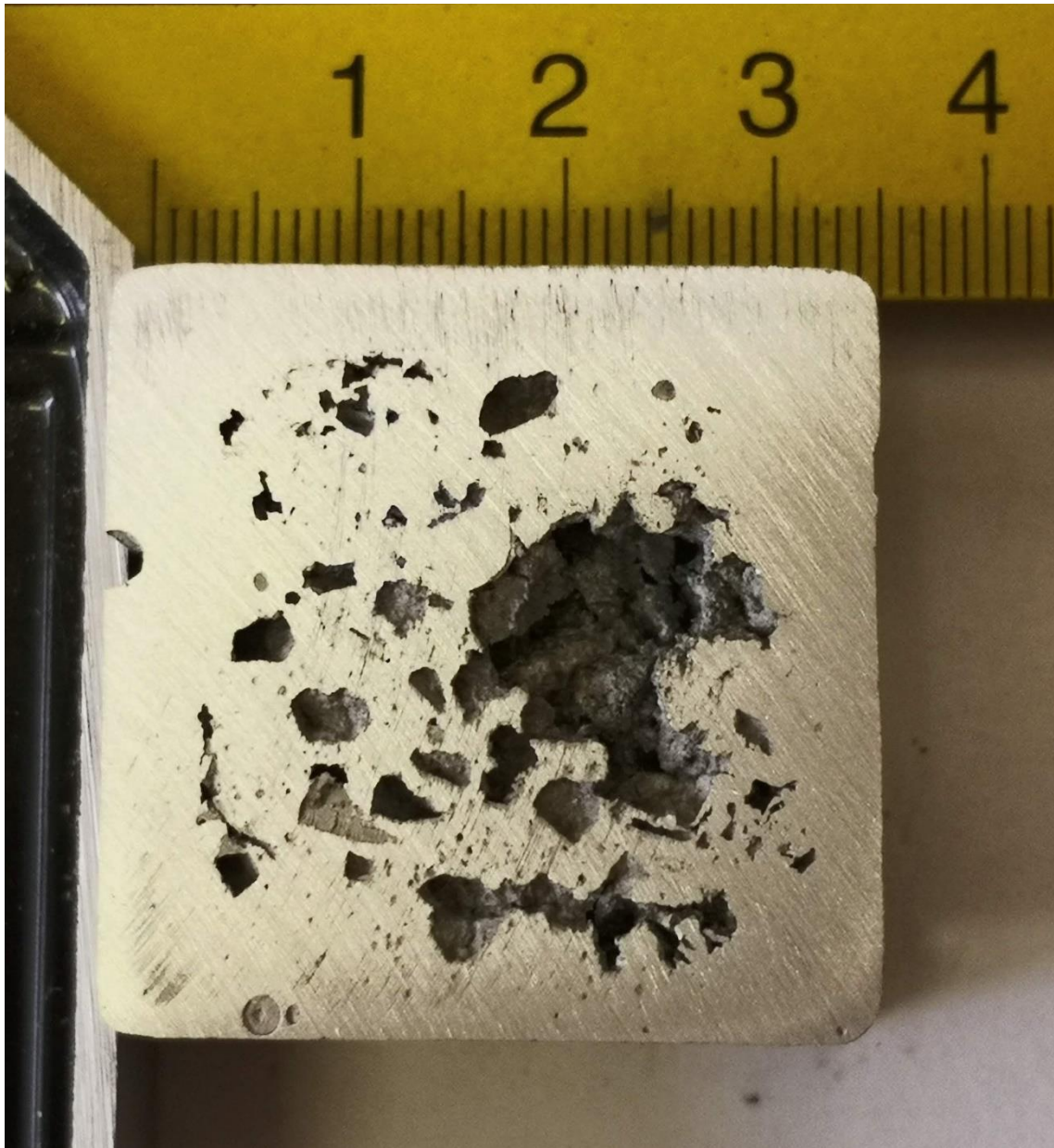
Pro seznámení se s hliníkovými pěny i ve fyzické podobě bylo naplánováno několik pokusů v šamotové peci určené k odlévání hliníku. Díky této peci, která funguje na základě spalování tuhého paliva, byla vytvořena už řada odlitků. Její jednoduchá konstrukce a provoz s sebou nesou i určité nedostatky jako například neregulovatelnost teploty. Ta se podle zbarvení ocelového odlévacího kelímku pohybovala okolo 800°C. Důvodem těchto pokusů bylo přiblížení náročnosti výroby hliníkové pěny a vytvoření přehledu, které metody výroby jsou nejjednodušší a které jsou naopak cestou k neúspěchu. Výsledný přehled a nabitě vědomosti následně posloužily u dalších pokusů.

Jako formy pro hliníkovou pěny posloužily profily čtvercového průřezu. U každého z nich byl jeden konec zavařen a tím vznikla ocelová kokila. Plánem bylo vyzkoušení metody přímého zpěnění plynem a metody odlití do výplňového materiálu, přesněji mořské soli, jejíž hlavní požadovaná vlastnost byla dostatečná velikost jednotlivých zrníček soli, aby mohl hliník snadno zaplnit veškeré mezery. Z takového celku po rozpuštění soli vznikne hliníková houba.

#### 4.1.1 Odlití do soli

První pokus spočíval v prostém nalití hliníku na sůl připravenou v kokile. Zde nastalo hned několik problémů. Příkladem může být praskání soli a předčasné tuhnutí.

Nejúspěšnější test vznikl odlitím hliníku a následným přimícháním soli (obrázek 14). Té bylo ovšem přidáno málo, hliník rychle tuhnul a neměl potřebnou zabíhavost. Sůl nebyla dostatečně předeřtá a stále obsahovala znatelné množství vody a kvůli jejímu odpařování praskala a vystřelovala ven z kokily. I přes tuto nepříjemnost bylo taveninou mícháno téměř až do ztuhnutí. Ve výsledku byla odhalena vrstva soli na dně kokily, naprosto oddělená od hliníku. Směs soli a hliníku vykazovala nerovnoměrně rozložená zrníčka a velká uskupení solných zrn, mezi která se tavenina vůbec nedostala. Tomuto by se dalo předejít větším předeřtání formy, soli nebo litím pod tlakem. Výsledná pórovitost dosahovala 29 %.



*Obrázek 14: Odlití do soli – první pokus*

Další test ukazuje tavbu hliníku zároveň se solí. Záměr byl takový, že by roztavená sůl vytvořila malé kapičky dispergované v hliníku a vzniklá emulze by následně vytvrdla. I přes stálé míchání ovšem v odlitku vznikl pouze jeden velký vměstek soli (obrázek 15). Tato metoda by stála za důkladnějším prozkoumáním. Možná díky agresivnějšímu míchání by bylo možné obě složky oddělit. Kvůli absenci vybavení zajišťující dostatečné promíchávání nebyla v této bakalářské práci opakována.

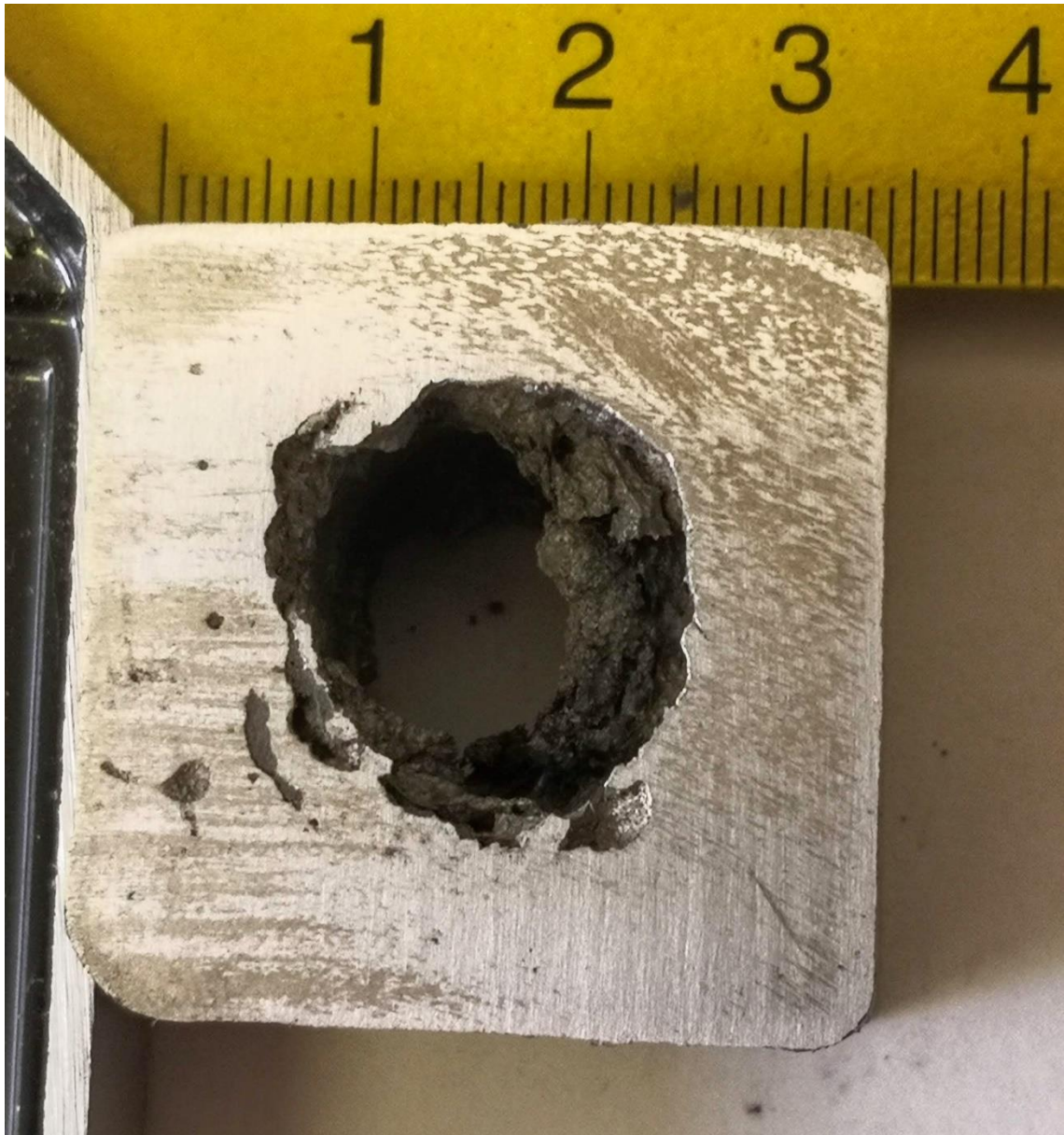


*Obrázek 15: Odlitek směsi roztavené soli a hliníku*

#### 4.1.2 Přímé zpěnění plynem

Poslední byl pokus o zjednodušení výroby metodou Cymat. Odstraněním nutnosti využít pohyblivé či vibrační součástky by se jednalo o zlevnění této metody. Došlo k nahrazení trysky vhánějící vzduch do taveniny pomocí vzduchovacího kamínku, určeného pro akvária. Díky měděné trubce, v níž byl vložen, tak do odlitku mohl proudit vzduch přiváděný regulovatelným kompresorem. Idea byla, že tento kamínek vytvoří velké množství malých bublin, které v hliníku postupně ztvrdnou.

To se ovšem nepovedlo a vznikl jeden velký otvor skrze celý odlitek (obrázek 16). Důvodem neúspěchu byl značný odpor hliníku znemožňující průchod drobných bublinek. Místo toho se nad kamínkem hromadil vzduch, který následně najednou prorazil celou hliníkovou vrstvu. Díky tomu, že se jedná pouze o pór jeden, tak tenhle způsob vidím jako slepou uličku.



*Obrázek 16: Přímé zpěnění plynem – první pokus*

#### 4.1.3 Vyhodnocení

Testy se nejevily moc úspěšné, ale pomohly k prohloubení znalostí a přípravě plánu, co a jak udělat jinak v budoucnu. Tyto znalosti byly využity v dalších pokusech. Z testů vyplynulo, že výroba hliníkové pěny není jednoduchou záležitostí a příprava i samotný proces může být velice nákladný a časově náročný. I když se jedná o převratný materiál, který najde svoje uplatnění v mnoha průmyslových směrech, tak právě cena brzdí jeho rozšíření a využívání.

Nejúspěšněji dopadlo odlévání do soli, a proto proběhlo ještě několik pokusů právě pomocí této metody. Naopak v roztavení soli a přímém zpěnění plynem nebyl pozorován žádný možný pokrok, proto byly tyto metody zavrhnuty.

## 4.2 Druhý pokus

V lednu proběhlo odlévání v prostorách školy společně s docentem Hermanem a inženýrem Petrem. Naplánováno bylo několik odlitků provedených metodou Alporas, tedy pomocí zpěnovadla, a opětovný pokus odlévání do soli, který byl prozatím nejúspěšnější.

### 4.2.1 Metoda Alporas

Tento pokus byl uskutečněn na základě pobuzení mého vedoucího práce, jelikož ho už kdysi bezvýsledně zkoušel a věřil v jeho proveditelnost.

Hlavní součástí odlitku se stala hliníková slitina AlSi8Cu3/226K. Její hlavní příměsí tvoří 9,1 % křemíku a 2,35% mědi. Tavba probíhala v indukční peci (obrázek 17) za teploty 710 °C. Tam se vložil ingot o hmotnosti 866 g. Vyšší teplota byla doporučena inženýrem Petrem, protože panovala obava z nedostatečně nataveného hliníku. Mezitím se připravilo 13 g vápníku Ca a 14 g hydridu titanu TiH<sub>2</sub>. Následně se do roztaveného hliníku v grafitovém kelímku vsypal vápník pro zvýšení viskozity. Směs byla intenzivně míchána, dokud nezačal hliník tuhnout. V ten moment se vrátil do pece, aby se znovu ohřál na požadovanou teplotu. Poté se opět vyndal a byl přidán prášek TiH<sub>2</sub>.



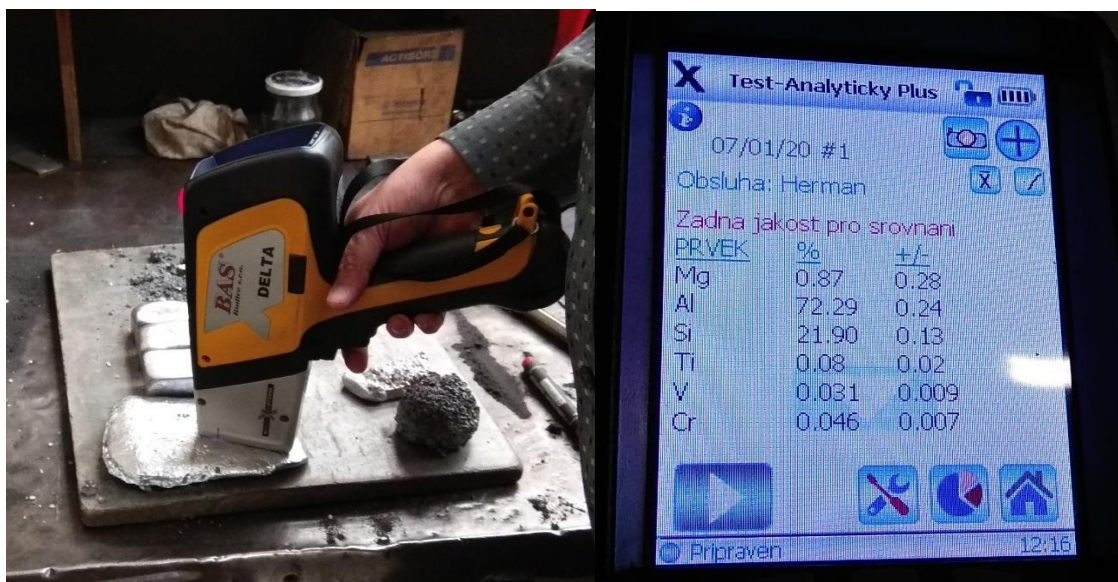
*Obrázek 17: Indukční pec použitá u druhého pokusu*

Hned po přidání hydridu titanu šlo pozorovat četné jiskření signalizující přítomnost vodíku (obrázek 18). A z důvodu nejistoty a neznalosti ohledně procesu pění v takhle malém objemu taveniny, byly vytvořeny hned tři exempláře. První byl odlit okamžitě po vmíchání zpenovadla. Následně se kelímek s taveninou vrátil do pece. První vzorek měl tedy možnost pění ve formě, zatímco druhý vzorek byl odlit po pěti a třetí po patnácti minutách pění v peci (izotermická nádoba). Pro dva z těchto vzorků posloužila forma písková a pro poslední ocelová kokila, aby byl vyloučen vliv materiálu kokily na proces pění.



*Obrázek 18: Vzplanutí unikajících vodíkových bublin*

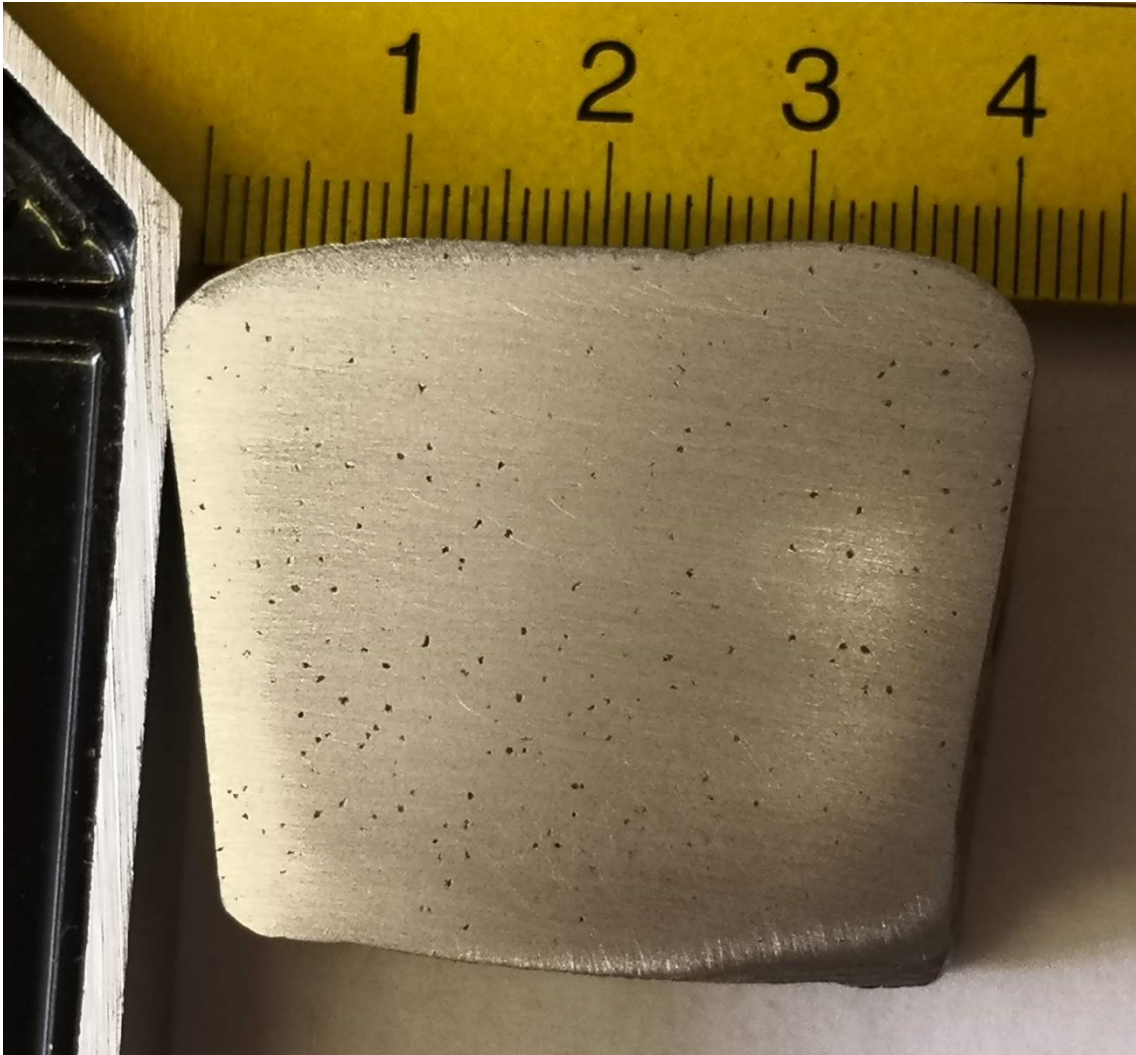
Na povrchu slitiny se objevila jakási struska, která indikovala nedostatečné promíchání nesmáčivých prášků ve směsi. Ruční spektrometr a analyzátor kovů DELTA nám posloužil pro změření jednotlivých prvků v odlitcích. Byl zaznamenán nárůst obsahu titanu (obrázek 19), který signalizoval rozpad hydridu titanu a tím i uvolnění vodíku.



*Obrázek 19: Analýza obsahu jednotlivých prvků ve směsi*

Výbrus ukázal, že se nejedná o hliníkovou pěnu, ale vzorky přesto obsahovaly drobné bublinky (obrázek 20), které svědčí o částečném napěnění. Největší pórovitost vykazoval vzorek, který byl odlit nejdříve. To mohlo být způsobeno tím, že předtím, než

vodík stačil hliník napěnit, byl z taveniny vyloučen. To může být způsobeno brzkým rozpadem  $TiH_2$  či problémy s nesmáčivostí vápníku. Díky tomu se vápník nedostatečně v tavenině rozmíchal, málo se zvýšila viskozita a vodík nebyl v tavenině zachycen. Další možná příčina souvisí s velikostí vzorku, která se oproti komerční metodě Alporas liší několikanásobně. Možné řešení by mohlo spočívat v zabalení prášků do hliníkové fólie, která by se ponořila až na dno tavícího kelímku. Tím by snad došlo ke zpožděnému rozpadu hydridu titanu a většímu promíchání vápníku.



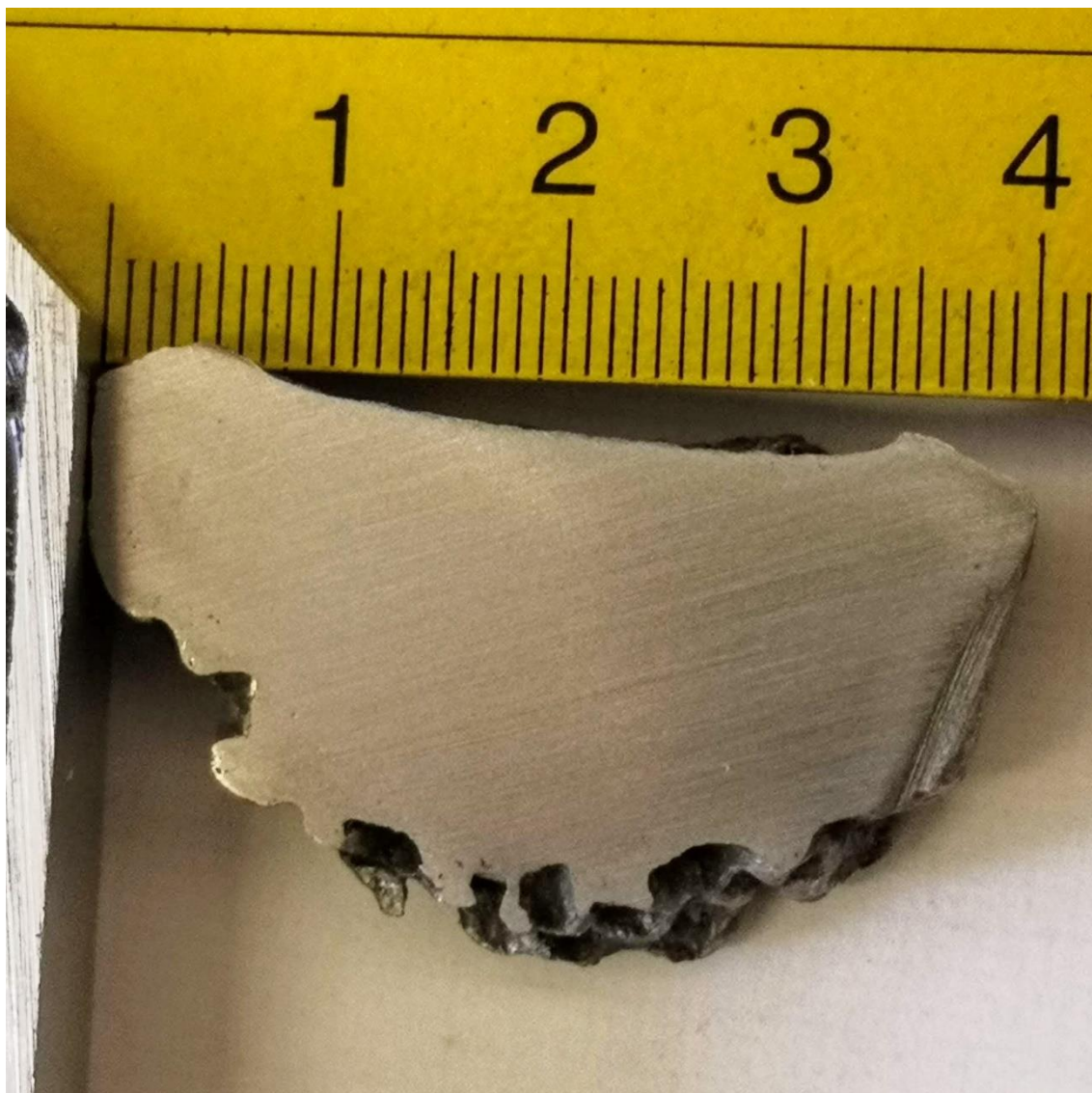
*Obrázek 20: Odlití metodou Alporas – druhý pokus*

#### 4.2.2 Odlití do výplňového materiálu – soli

Jako další přišlo na řadu odlévání do mořské soli. Rozdílem oproti prvním pokusům bylo zahřátí soli na teplotu shodnou s odlévaným hliníkem a regulované ohřátí hliníku na teplotu  $740^{\circ}C$ . Odlévací teplota byla zvýšena kvůli zajištění vyšší zabíhavosti.



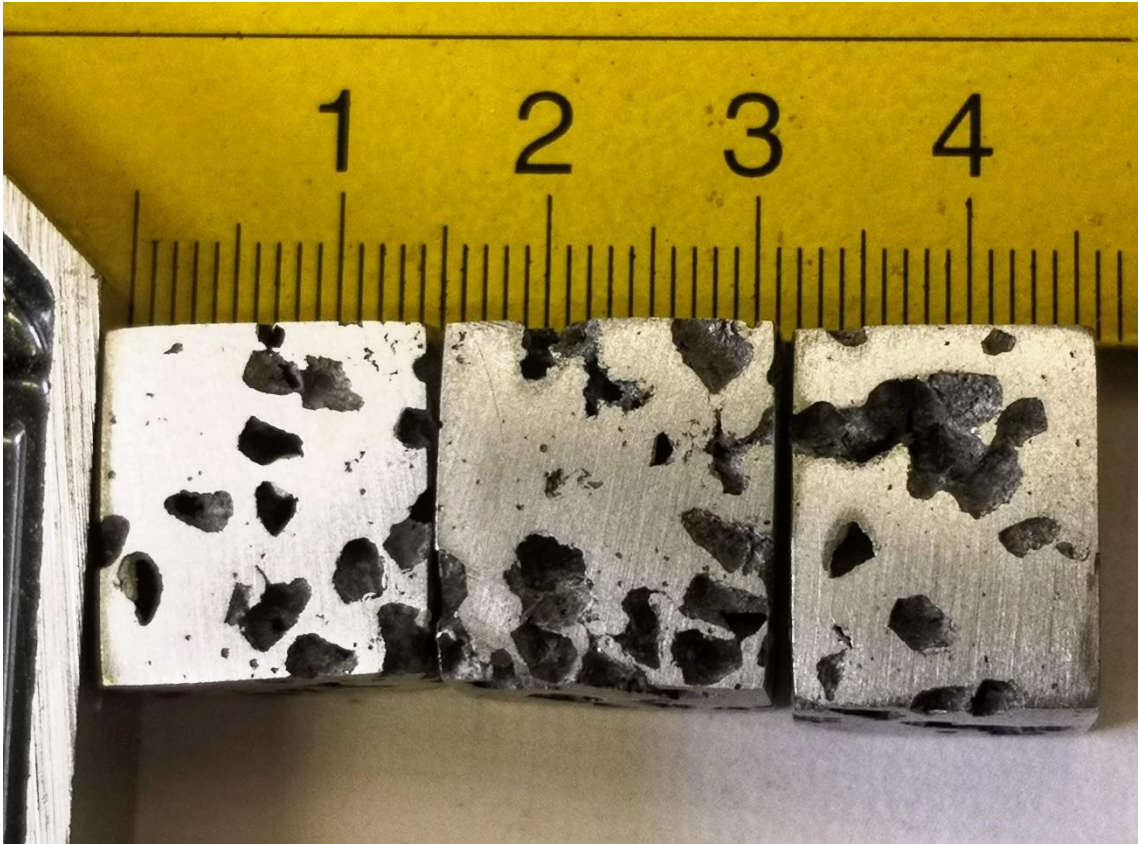
Nejdříve proběhlo roztavení hliníku a sůl byla ponechána v peci, aby se zbavila veškeré vlhkosti a jednotlivá zrníčka se natavila a vytvořila tak jednotný celek. Poté proběhlo prosté nalití taveniny do formy z půlky vyplněné rozehrátou solí. Hliník ovšem neměl tendenci prostory mezi zrníčky vyplnit a zůstal pouze na povrchu soli. (obrázek 21).



*Obrázek 21: Odlití do soli – druhý pokus*

Při druhém pokusu byl solný výplňový materiál společně s taveninou míchán v grafitovém kelímku, dokud sloučenina nezačala tuhnout. Předpokládalo se rovnoměrné rozmístění jednotlivých zrníček soli. Následný výbrus ovšem ukázal problém se solí, jmenovitě její hustotou. Odlitý vzorek totiž vykazoval hned několik vrstev. Spodní vrstvu tvořila sůl, která se kvůli viskozitě hliníku držela na spodu, následovala vrstva čistého

hliníku a až poté vrstva s plovoucí solí. Z této vrstvy byly následně vybroušeny vzorky a vypočtena jejich hustota. (obrázek 22).



Obrázek 22: Odlití a míchání se solí – druhý pokus

#### 4.2.3 Vyhodnocení

Všechny vzorky byly třikrát přeměřeny pomocí posuvného měřítka. Následný výpočet objemu se skládal z aritmetického průměru všech třech měření. Dále byly odlitky zváženy na digitální váze s přesností na desetiny gramu. Kontrolní vzorek z nepórovitého hliníkovitého odlitku posloužil pro porovnání a určení pórovitosti.

Výpočet objemu kvádra  $V$ :

$$V = a \cdot b \cdot c \text{ [mm}^3\text{]} \quad (1)$$

$a, b, c$  – délka strany kvádra [mm]

Výpočet hustoty  $\rho$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [g \cdot cm^{-3}] \quad (2)$$

$m$  – hmotnost vzorku [g]

Výpočet pórovitosti  $n$ :

$$n_i = \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_k}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

$\rho_i$  – hustota jednotlivých vzorků [ $g \cdot cm^{-3}$ ]

$\rho_k$  – hustota kontrolního vzorku [ $g \cdot cm^{-3}$ ]

Tabulka 1: Technické parametry vzorků odlitých do soli – druhý pokus

	Kontrolní	První vzorek	Druhý vzorek	Třetí vzorek
Objem [mm <sup>3</sup> ]:	2743,39	3240,22	3197,36	3556,89
Hmotnost [g]:	7,5	5,9	6,6	7,5
Hustota [ $g \cdot cm^{-3}$ ]:	2,73	1,82	2,06	2,11
Pórovitost [%]:	0	33,40	24,49	22,87

Hustota kontrolního vzorku vyšla:  $\rho_k = 2,73 g \cdot cm^{-3}$ . Tato hodnota se blíží tabulkové hodnotě:  $\rho_{Al} = 2,7 g \cdot cm^{-3}$  [21]. Zanedbatelný rozdíl bude nejspíše způsobený různými příměsi v hliníkovém ingotu (Si, Mg, Ti).

### 4.3 Třetí pokus

Třetí a finální pokus proběhl v karanténě, opět v šamotové spalovací peci. Podle zabarvení ocelového odlévacího kelímku se teplota pohybovala okolo 800 °C. Nešlo tudíž o úplně kontrolovatelný přístup, a přesto bylo dosaženo zajímavých výsledků. Všechny pokusy se zaměřily opět na odlévání do soli, a to různými způsoby, které by měly zajistit větší pórovitost a lepší promíchání zrn v tavenině. Zásadní změnou bylo zvýšení okolního tlaku a použití krystalické kuchyňské soli, která měla větší krystaly, než tomu bylo v předchozích pokusech.

Pomocí několika sít byla sůl rozdělena na tři části. Nejmenší krystaly nebyly do testu zahrnuty. Jedna skupina tedy obsahovala zrna o velikost 1-3 mm a poslední se sestávala z krystalů o velikosti 3-5 mm. Jako forma opět posloužil z jedné strany zavařený ocelový profil čtvercového průřezu. Celkem byly vytvořeny čtyři odlitky – dva druhy slévání do dvou zrnitostí soli. Obrázek 23 zobrazuje ocelové kokily s různými zrnitostmi soli.



Obrázek 23: Ocelové kokily s velikostí zrna 3-5 mm (vlevo) a 1-3 mm (vpravo)

### 4.3.1 Vrstvené slévání

Dva odlitky vznikly pomocí odlévání ve vrstvách. Střídaly se vrstvy tekutého hliníku zasypaného vrstvou soli. V jednom odlitku se tyto složky obměnily celkem čtyřikrát. Nedošlo ovšem k propojení, naopak se vrstvy vůbec nesloučily a v některých případech byla solná zrna tíhou kovové taveniny přitlačena na stěny formy. I přes důkladné přehřátí formy se odlití nepodařilo a po vyklepání se odlitek rozpadl. Tyto nezdařené pokusy jsou zobrazeny na obrázku 24.



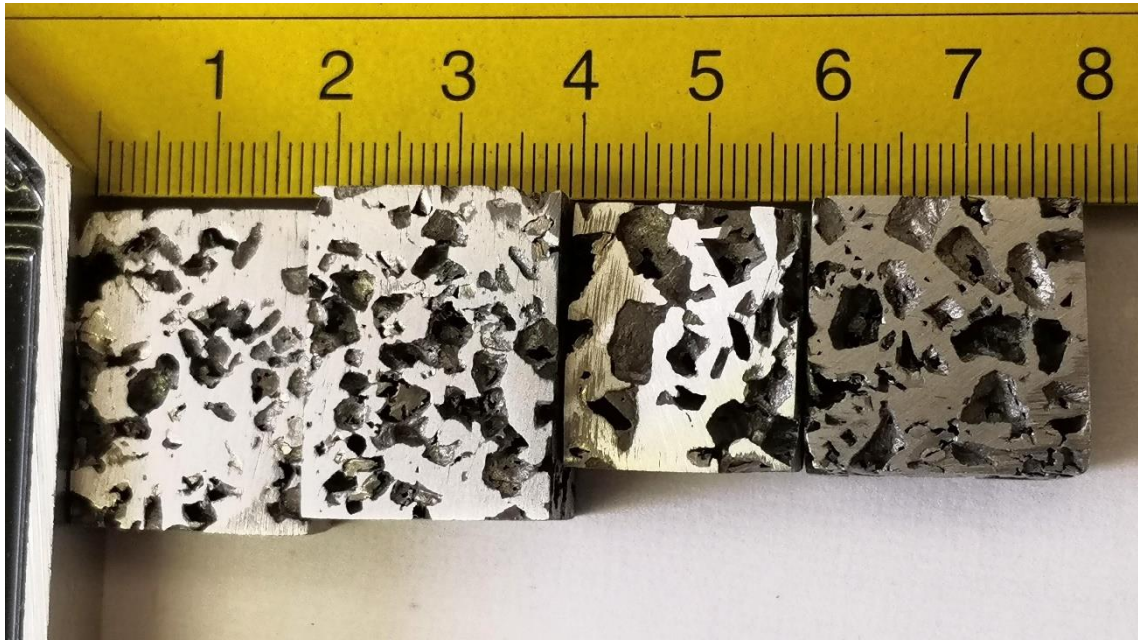
Obrázek 24: Nepovedené odlitky – solná zrna odtlačena na strany (vlevo), rozpadlý odlitek (vpravo)

### 4.3.2 Tlakové odlévání

Další dva odlitky vznikly zalitím soli hliníkovou taveninou a následovalo stlačení ocelovým pístem. Kokila byla společně se solí přehřátá a jednotlivá zrníčka soli navzájem spečena. Kvůli zachování jednoduchosti a nedostupnosti nízkotlakého licího stroje byl píst vytvořen pomocí plechu o rozměrech odpovídajících vnitřnímu čtvercovému profilu. Ukázalo se, že zrnitost výplňového materiálu má vliv na zabíhavost hliníku a vznikly tak dva odlitky pro různě rozměrná zrna. V obou bylo opět zjevné vrstvení. Nyní ovšem největší promíchání jednotlivých složek dosáhla vrstva těsně nad vrstvou soli. To se liší od předchozích pokusů, při kterých nebyl použit žádný vnější tlak (4.2.2). Právě z této vrstvy vznikly čtyři vzorky pro určení pórovitosti.

### 4.3.3 Vyhodnocení

Jak je z tabulky 2 patrné, vzorky 1 a 2 dosáhly o něco menší pórovitosti než je tomu u vzorků 3 a 4. Příčinou je menší velikost zrn, která přímo souvisí s velikostí pórů a se zabíhavostí hliníku. Nejlepší pórovitost vyšla téměř 70 % avšak průměrná okolo 50 %. Hustota vzorků je opět porovnávána s hustotou vypočtenou stejně jako v předchozím pokusu.



Obrázek 25: Odlití do solných prekurzorů pod tlakem v pořadí 1, 2, 3, 4

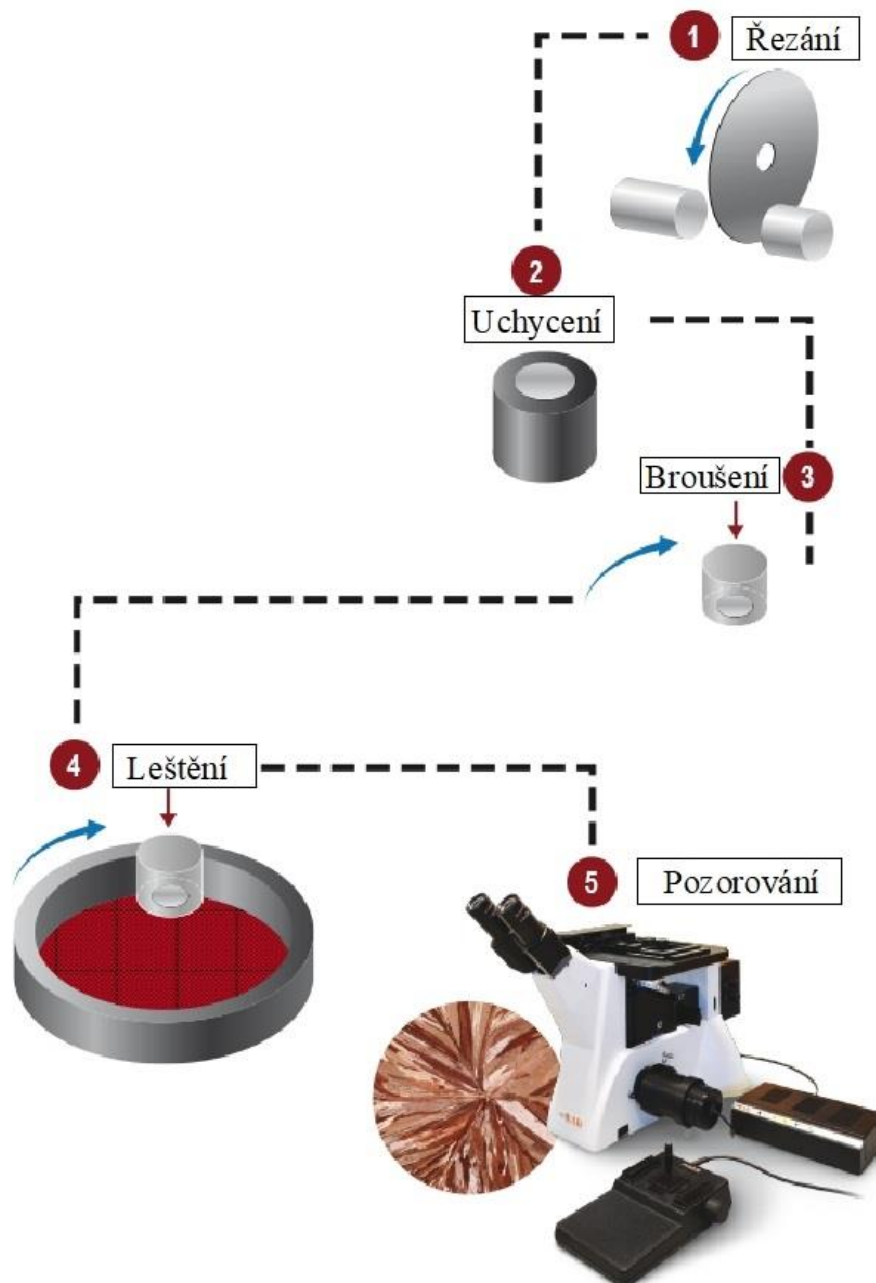
Odlitky nebyly perfektní, protože za hliníkovou pěnu se dalo považovat jen asi 25 % celkového objemu. Díky většímu tlaku a lepším nástrojům lze však touto metodou vytvořit homogenní odlitky s pórovitostí větší než 70 %.

Tabulka 2: Technické parametry vzorků odlitých do soli – třetí pokus (spočítáno viz 4.2.3)

	První vzorek	Druhý vzorek	Třetí vzorek	Čtvrtý vzorek
Objem [mm <sup>3</sup> ]:	5352,07	7284,32	4375,25	5040,71
Hmotnost [g]:	7,6	10,0	5,4	4,2
Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]:	1,42	1,37	1,23	0,83
Pórovitost [%]:	48,06	49,78	54,85	69,52

## 5 Metalografické výbrusy

Díky možnostem, které poskytuje naše škola, se nechaly zhotovit metalografické výbrusy vybraných vzorků (obrázek 26). Následně z nich vznikly mikroskopické snímky. Ty posloužily pro rozpoznání pórovitosti pomocí softwaru. Tento program určuje poměr světlých a tmavých míst fotografií a díky tomu porozitu jednotlivých vzorků.



Obrázek 26: Princip přípravy metalografického vzorku [23]

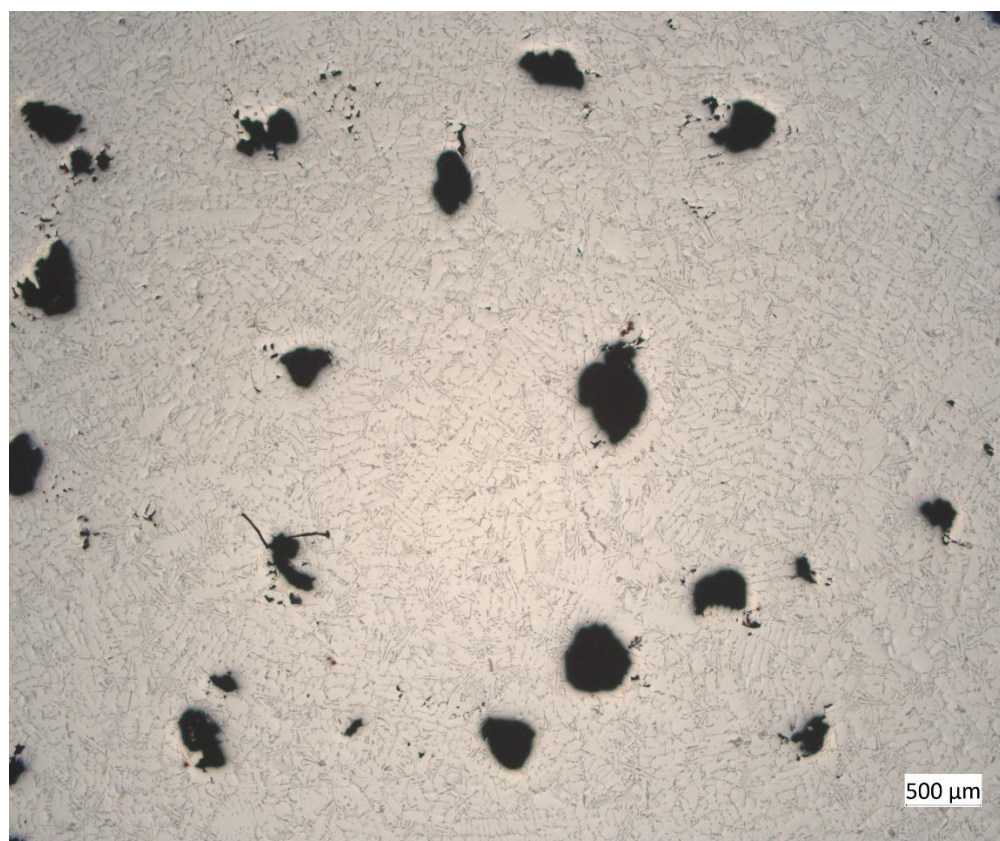
Z metalografických výbrusů každého vzorku vzniklo několik snímků a výsledná hodnota je aritmetický průměr porozit charakteristických pro každý výbrus.

## 5.1 Snímky z experimentu metodou Alporas

První tři výbrusy jsou zhotoveny ze vzorků odlévaných pomocí metody Alporas (4.2.1). Zde lze pozorovat drobné póry vzniklé unikajícím vodíkem ze sloučeniny hydridu titanu. Tyto tři fotografie po sobě následují ve stejném pořadí jako byla tavenina vytahována z pece. Je patrné, že stupeň porozity závisí na době pění. Nejlepší výsledek byl pozorován u druhého odlitku.

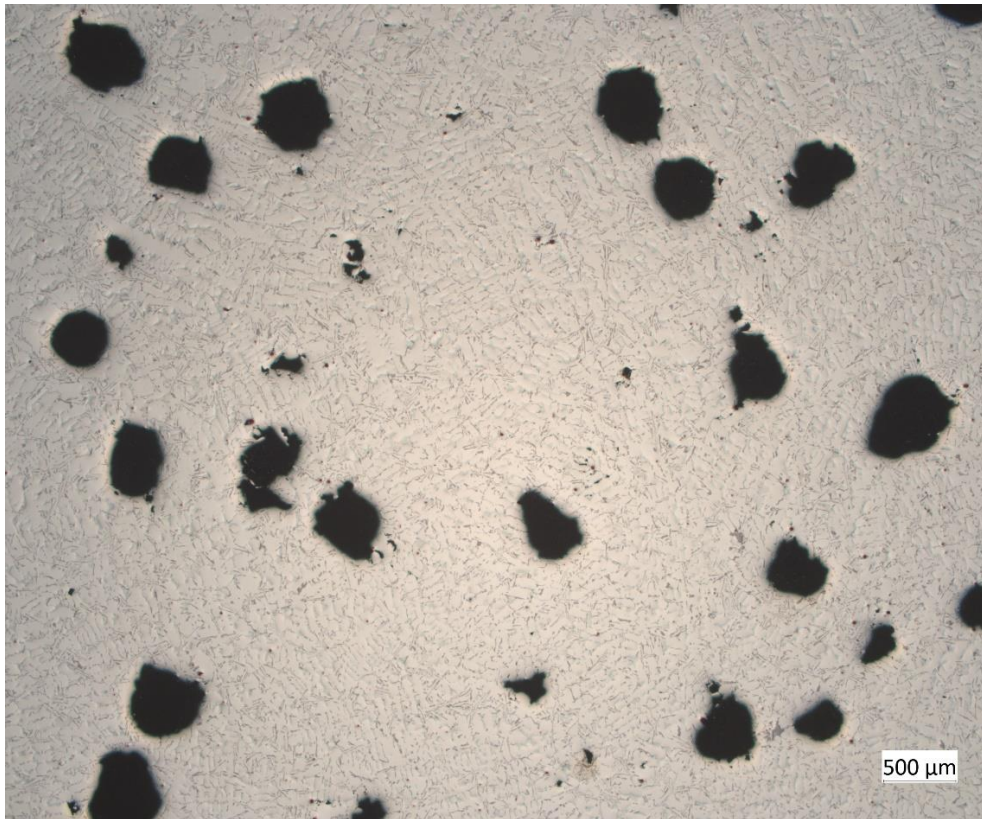
Tabulka 3: Porovnání porozity v závislosti na času pění

Odlitek	První (obrázek 27)	Druhý (obrázek 28)	Třetí (obrázek 29)
Čas odlití	ihned	po 5 minutách	po 15 minutách
Průměrná porozita [%]	3,2	6,1	1,8

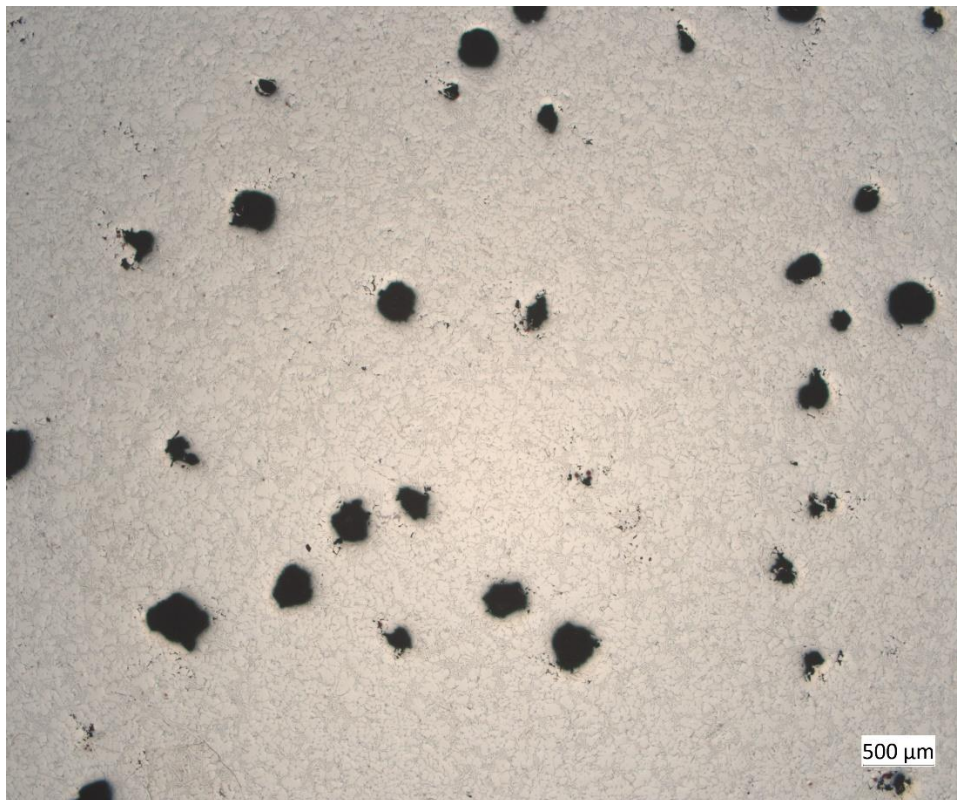


Obrázek 27: Makrofotografie odlitku metodou Alporas odlitého ihned po promíchání prášku





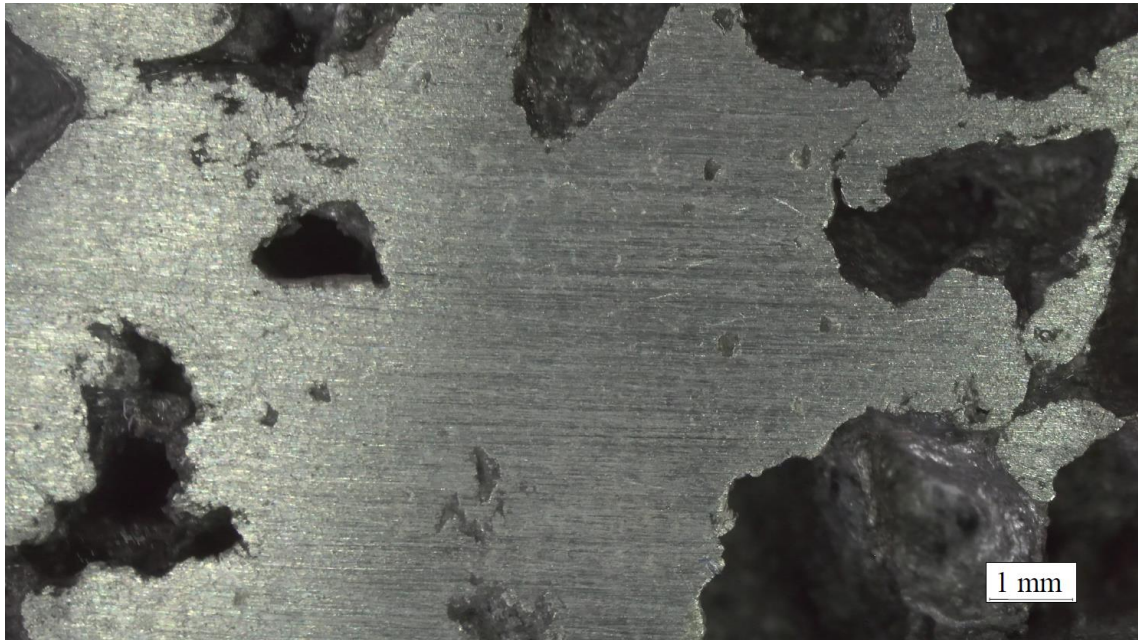
*Obrázek 28: Makrofotografie odlitku metodou Alporas odlitého po pěti minutách po promíchání prášku*



*Obrázek 29: Makrofotografie odlitku metodou Alporas odlitého po patnácti minutách po promíchání prášku*

## 5.2 Snímky z experimentu odlévání do soli

Další tři makrofotografie ukazují odlitky odlévané do soli. První (obrázek 30) je vzorek vzniklý odlitím do soli a promícháváním taveniny až do začátku tuhnutí (4.2.2). Druhý snímek (obrázek 31) zachycuje výsledek odlévání pod tlakem do zrn soli o velikosti 1–3 mm (4.3.2). Poslední (obrázek 32) je také zhotoven z experimentu odlévání pod tlakem nyní ovšem pro velikost zrn 3–5 mm (4.3.2).



*Obrázek 30: Makrofotografie odlitku do soli se zamícháním*



*Obrázek 31: Makrofotografie odlitku do soli pod tlakem, menší zrna*



Obrázek 32: Makrofotografie odlitku do soli, větší zrna

Tabulka 4: Porovnání porozity v závislosti na způsobu odlévání do soli

Odlitek	První (obrázek 30)	Druhý (obrázek 31)	Třetí (obrázek 32)
Způsob odlití	S mícháním	Pod tlakem (menší zrna)	Pod tlakem (větší zrna)
Porozita [%]	29,6	44,1	43,5

### 5.3 Porovnání porozit

Tabulka 5: Porovnání porozit třetího pokusu

Odlitek do soli	S mícháním (viz tab. 1)	Pod tlakem (menší zrna) (viz tab. 2)	Pod tlakem (větší zrna) (viz tab.2)
Porozita spočítaná [%]	24,5	49,8	54,9
Porozita ze snímku [%]	29,6	44,1	43,5
Směrodatná odchylka [%]	2,6	2,9	5,7

Výsledná porozita spočítaných (viz 4.2.3) a změřených dat se mírně liší. To je způsobeno několika faktory. Při pořizování snímků záleží, z které části vzorku se snímek pořídí a také nedokáže zachytit strukturu uvnitř kovu. Spočítání porozity je proto přesnější způsob měření i přes to, že zde dochází k jiným nepřesnostem. Mezi ty patří chyba lidského faktoru a nepřesnosti měřících pomůcek.

## 6 Závěr

Cílem mé práce bylo seznámení se s pěnovými litými materiály, popis jejich vlastností, možností využití, způsobu výroby, a nakonec provedení experimentu, který by vedl k vytvoření hliníkové pěny s alespoň 50% pórovitostí.

V úvodu je citovaná první písemná zmínka o pěnových materiálech obecně a popsání počátků využívání syntetických kovových pěn. Poté následuje rozdělení kovových pěn a objasnění terminologie využití v této práci.

Druhá kapitola se zaměřuje na vlastnosti slévárenských pěn, mezi které patří například výhodný poměr tuhosti a hmotnosti, poměr objemu a povrchu, nehořlavost, vysoká schopnost absorpce nárazů, výbuchů, zvuků a vibrací. Dále vynikají díky své tepelné a elektrické vodivosti, která ve spojení s velkým povrchem zajišťuje další možnosti využití. Pěny vyráběné z hliníkových slitin jsou navíc odolné i vůči korozi a dobře recyklovatelné. Nakonec je popsáno rozdělení pěn podle tvaru, počtu a propojenosti pórů.

Další část se zabývá metodami výroby kovových pěn, a to hned několika způsoby ze všech počátečních skupenství. Práce popisuje výrobu pomocí zpěnovadla, přímého zpěnění plynem, práškové metalurgie, odpařitelného modelu či výplňového materiálu.

Praktická část této práce je složena ze tří pokusů na výrobu hliníkové pěny. První pokus sloužil k seznámení se s tímto materiálem a zjištění, které metody by mohly vést k dosažení pórovité struktury. Nejlépe dopadlo odlévání do soli, které dosáhlo 29 % pórovitosti. Naopak zde popsaný způsob přímého zpěnění plynem nevykazoval žádné kladné výsledky, stejně tak i směs roztavené soli a hliníku.

Druhý pokus proběhl ve školní slévárně. Zde v indukční peci proběhlo zpěnění pomocí zpěnovadla, a to z důvodu nároku na přesnou teplotu odlévání. Výsledkem byla hliníková pěna s póry uvnitř odlitku, ovšem z důvodů uvedených v dané stati se jednalo pouze o několikaprocentní pórovitost. Také byl zopakován pokus s odléváním do soli. Vzniklo několik odlitků, které měly zdokonalit tuto metodu. Nejlépe dopadl odlitek, ve kterém se sůl společně s hliníkovou taveninou intenzivně míchala během tuhnutí směsi. To vedlo k nejvyšší porozitě 33 %.

Poslední pokus se zaměřil pouze na odlévání soli a jeho zdokonalení. Zkouška vrstvení, při kterém se vrstva roztaveného hliníku zasypala solí, skončila nezdarem. Zlepšení nastalo při oddělení solných zrn na 3 skupiny a díky stlačení ocelovým pístem po odlití. Jak se ukázalo, obě tyto metody měly pozitivní vliv na pórovitost vzorků. Nejlepší vzorek z této skupiny dosáhl pórovitosti téměř 70 % (obrázek 33). Tím byl dosažen cíl práce, a to vytvořit metodu pro výrobu hliníkové pěny s alespoň 50 % pórovitostí.



Obrázek 33: Nejúspěšnější odlitek (do soli)

Tabulka 6: Porovnání porozit všech pokusů

Pokus	Metoda	Porozita
První	Odlití do soli	29 %
	Tavba soli s hliníkem	(-)
	Přímé zpěnění plynem	(-)
Druhý	Odlití do soli	33 %
	Metoda Alporas	6 %
Třetí	Vrstvené odlévání	(-)
	Tlakové odlévání do soli	69 %

Nakonec byly ze zástupců jednotlivých pokusů vytvořeny metalografické výbrusy a makrofotografie, které dále ukázaly strukturu a stupeň pórovitosti. Porovnání nejvyšších porozit všech pokusů, ať zdařených či nezdařených, je shrnuto v tabulce 6.

Metody popsané v této bakalářské práci byly levné a jednoduché na provedení. Použitím dokonalejších a dražších strojů a nástrojů by bylo možné dosáhnout daleko lepších výsledků.

## 7 Seznam zdrojů a použité literatury

[1] HOOKE, Robert. *Micrographia: or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses. With observations and inquiries thereupon.* J. Allestry, printer to the Royal Society, 1975.

[2] SCHEFFLER, Michael; COLOMBO, Paolo (ed.). *Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications.* John Wiley & Sons, 2006.

[3] LICHY, P., V. BEDNAROVA a T. ELBEL. Casting Routes for Porous Metals Production. *Archives of Foundry Engineering* [online]. 2012, 12(1), 71-74 [cit. 2019-12-13]. DOI: 10.2478/v10266-012-0014-0. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <http://journals.pan.pl/dlibra/publication/100122/edition/86291/content>

[4] VOBORNÍK, Josef. *Korek zázrak přírody. Co o korku možná nevíte.* [Online] 21. duben 2014. [Citace: 14. Prosinec 2019.] Dostupné z: <https://www.videopodlahy.cz/default.asp?AID=704>.

[5] MCFADDEN, Christopher. Interesting Engineering. *Inspired by Nature but as Tough as Iron: What Is Metal Foam Used For?* [Online] 6. Srpen 2019. [Citace: 14. Prosinec 2019.] <https://interestingengineering.com/inspired-by-nature-but-as-tough-as-iron-what-is-metal-foam-used-for>.

[6] ASHBY, Michael F., et al. *Metal foams: a design guide.* Elsevier, 2000.

[7] BANHART, John. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* [online]. 2001, 46(6), 559-632 [cit. 2019-12-14]. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642500000025>

[8] LEFEBVRE, L.-P., J. BANHART a D. C. DUNAND. Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2008, 10(9), 775-787 [cit. 2019-12-14]. DOI: 10.1002/adem.200800241. ISSN 14381656. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200800241>

[9] BANHART, John. Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of Vehicle Design* [online]. 2005, 37(2/3) [cit. 2019-12-14]. DOI:

10.1504/IJVD.2005.006640. ISSN 0143-3369. Dostupné z:  
<http://www.inderscience.com/link.php?id=6640>

[10] MIYOSHI, T., M. ITOH, S. AKIYAMA and A. KITAHARA, 1998. Aluminum Foam, "Alporas": The Production Process, Properties and Applications. MRS Proceedings [online]. B.m.: Cambridge University Press, vol. 521, p. 133. Retrieved z: doi:10.1557/PROC-521-133

[11] KROUPOVÁ, Ivana. Slévárenské metody výroby porézních kovů se stochastickým uspořádáním vnitřních dutin [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/127380> Disertační práce.

[12] MA, Liqun, Zhenlun SONG a Deping HE. Cellular structure controllable aluminium foams produced by high pressure infiltration process. *Scripta Materialia* [online]. 1999, **41**(7), 785-789 [cit. 2019-12-15]. DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00219-5. ISSN 13596462. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359646299002195>

[13] VENDRA, Lakshmi J.; RABIEI, Afsaneh. A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 465.1-2: 59-67.

[14] VESENJAK, Matej, Mohd Ayub SULONG, Lovre KRSTULOVIĆ-OPARA, Matej BOROVIŇEK, Vincent MATHIER a Thomas FIEDLER. Dynamic compression of aluminium foam derived from infiltration casting of salt dough. *Mechanics of Materials* [online]. 2016, 93, 96-108 [cit. 2019-12-15]. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.10.012. ISSN 01676636. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167663615002215>

[15] DRENCHÉV, 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. 2020-03-17]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174328406X118302>

[16] GRIGSBY, Matt. Material Future. [Online] 2019. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <http://www.materialfuture.com/portfolio-item/alusion-recycled-aluminum-foam/>



[17] BOEGGER. Filter Elements. [Online] 2017. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.filter-elements.org/filter-elements/metallic-foams.html>.

[18] SCIENTISTS in Dresden. DW. *Metal Foam - a material for new bones*. [Online] In good shape, 2013. [cit. 2020-03-17] Dostupné z: <https://www.dw.com/en/metal-foam-a-material-for-new-bones/av-16633125>.

[19] RABIEI, A., K. KARIMPOUR, D. BASU a M. JANSSENS. Steel-steel composite metal foam in simulated pool fire testing. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2020, 153 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106336. ISSN 12900729. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1290072919301437>

[20] MARX, Jacob, Marc PORTANOVA a Afsaneh RABIEI. Ballistic performance of composite metal foam against large caliber threats. *Composite Structures* [online]. 2019, 225 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111032. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822319312607>

[21] LEINVEBER, Jan, ŘASA, Jaroslav a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Praha : Scientia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.

[22] SCHWARTZ, Daniel S., et al. *Materials Research Society, Symposium Proceedings, Volume 521. Porous and Cellular Materials for Structural Applications*. MATERIALS RESEARCH SOCIETY WARRENDALE PA, 1998.

[23] Echo-lab. [Online] Devco S.r.l, 2018. [Citace: 27. 06 2020.] <https://www.echo-lab.it/metallographic-sample-preparation/>.

## 8 Seznam tabulek, rovnic a obrázků

Tabulka 1: Technické parametry vzorků odlitých do soli – druhý pokus .....	35
Tabulka 2: Technické parametry vzorků odlitých do soli – třetí pokus (spočítáno viz 4.2.3) .....	38
Tabulka 3: Porovnání porozity v závislosti na času pění.....	40
Tabulka 4: Porovnání porozity v závislosti na způsobu odlívání do soli.....	43
Tabulka 5: Porovnání porozit třetího pokusu .....	43
Tabulka 6: Porovnání porozit všech pokusů.....	45
Rovnice 1: Výpočet objemu .....	35
Rovnice 2: Výpočet hustoty .....	35
Rovnice 3: Výpočet pórovitosti .....	35
Obrázek 1: Korková kůra pod mikroskopem [4] .....	8
Obrázek 2: Výbrus hliníkovou pěnou [5] .....	8
Obrázek 3: Využití kovových pěn v automobilovém průmyslu [17] .....	10
Obrázek 4: Využití nerezových pěn v lékařství [18] .....	12
Obrázek 5: Nerezová pěna 30x30 cm zabarvená po teplotním testu [19] .....	13
Obrázek 6: Nábytek z hliníkové pěny [16].....	15
Obrázek 7: Různé tvary pórů: a) sférické, b) radiální, c) cylindrické, d)- f) lamelární [15] .....	17
Obrázek 8: Rozdělení kovových pěn podle způsobu výroby [11].....	18
Obrázek 9: Zpěňování pomocí zpěňovačla [11].....	19
Obrázek 10: Schéma zobrazující výrobu kovové pěny pomocí vhánění vzduchu [11]..	21
Obrázek 11: Odlívání pomocí odpařitelného modelu [11] .....	22
Obrázek 12: Použití dutých kovových kuliček pro výrobu hliníkové pěny [13].....	23
Obrázek 13: Použití NaCl pro výrobu hliníkové pěny [14].....	24
Obrázek 14: Odlití do soli – první pokus.....	26
Obrázek 15: Odlitek směsi roztavené soli a hliníku .....	27
Obrázek 16: Přímé zpění plynem – první pokus.....	28
Obrázek 17: Indukční pec použitá u druhého pokusu.....	30
Obrázek 18: Vzplanutí unikajících vodíkových bublin .....	31

Obrázek 19: Analýza obsahu jednotlivých prvků ve směsi .....	31
Obrázek 20: Odlití metodou Alporas – druhý pokus .....	32
Obrázek 21: Odlití do soli – druhý pokus .....	33
Obrázek 22: Odlití a míchání se solí – druhý pokus .....	34
Obrázek 23: Ocelové kokily s velikostí zrna 3-5 mm (vlevo) a 1-3 mm (vpravo).....	36
Obrázek 24: Nepovedené odlitky – solná zrna odtlačená na strany (vlevo), rozpadlý odlitek (vpravo).....	37
Obrázek 25: Odlití do solných prekurzorů pod tlakem v pořadí 1, 2, 3, 4 .....	38
Obrázek 26: Princip přípravy metalografického vzorku [23] .....	39
Obrázek 27: Makrofotografie odlitku metodou Alporas odlitého ihned po promíchání prášku.....	40
Obrázek 28: Makrofotografie odlitku metodou Alporas odlitého po pěti minutách po promíchání prášku.....	41
Obrázek 29: Makrofotografie odlitku metodou Alporas odlitého po patnácti minutách po promíchání prášku.....	41
Obrázek 30: Makrofotografie odlitku do soli se zamícháním .....	42
Obrázek 31: Makrofotografie odlitku do soli pod tlakem, menší zrna .....	42
Obrázek 32: Makrofotografie odlitku do soli, větší zrna.....	43
Obrázek 33: Nejúspěšnější odlitek (do soli) .....	45