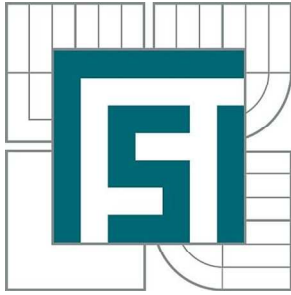


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

## VLASTNOSTI A POUŽITÍ KOVOVÝCH PĚN

PROPERTIES AND THE USE OF METAL FOAMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ROBIN KŘIVÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství  
Akademický rok: 2011/12

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Robin Křivánek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vlastnosti a použití kovových pěn**

v anglickém jazyce:

### **Properties and the Use of Metal Foams**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Charakteristika kovových pěn, popis jejich výhod a nevýhod, možnosti aplikací v průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Popis kovových pěn
- 2) Charakteristika jejich vlastnosti
- 3) Aplikace kovových pěn

Seznam odborné literatury:

- 1) Grgač P., Janovec, J., Dománková, M. Nové materiály a technologie, 1. vyd. Bratislava: STU. 2007, 217 s. ISBN 978-80-227-2599-6
- 2) MICHNA, Š., et al. Encyklopedie hliníku. Prešov : Adin, 2005. 701 s. ISBN 80-89041-88-4
- 3) Lu, Guoxing; Yu, Tongxi. Energy Absorption of Structures and Materials.. Woodhead Publishing, 2003.

Online version available at:

[http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=2524&VerticalID=0](http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2524&VerticalID=0)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 31.10.2011



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

# Abstrakt

V této bakalářské práci jsou shrnuty poznatky o kovových pěnách s převážným omezením na hliníkové pěny, protože se v nich skrývá největší potenciál. V první části je popsána výroba porézních materiálů a to především způsob vzniku pěny teplotním rozkladem zpěňovadla a metodou vháněním vzduchu do taveniny kovu. Dále jsou zde uvedeny zátěžové zkoušky k bližšímu poznání jejich vlastností, ale i nejnovější způsoby zkoumání pěn, jako jsou pomocí radioskopie a CT skeneru, ze kterého se následně vytvoří voxelový model pěny. Jsou tady shrnuty i základní způsoby jejich zpracování. Na závěr musíme zmínit možnosti využití těchto materiálů se zaměřením na komerčně vyráběné pěny Alporas® a Duocel®. Hromadnému používání pěn brání hlavně vysoké výrobní náklady a v některých případech i obtížná reprodukovatelnost vlastností.

# Abstract

In this thesis are summarized the findings of metal foams, with prevailing constraints on aluminum foam, because in them hides the greatest potential. The first part is described the production of porous materials, especially the way of foam production by thermal decomposition of foaming agent and melt gas injection. There are also written stress tests to gain a deeper knowledge of their properties, but also the latest exploring methods of foams, such as using a radiography and CT scanner from which then creates a voxel model of foam. They are summarized here the basic ways of processing. Finally we must mention the possibility of using these materials with a focus on commercially produced foams Alporas® and Duocel®. Mass using foams mainly prevents high production costs and in some cases difficult reproducibility of properties.

## Klíčová slova

Hliníkové pěna, póry, voxelový model, tavenina, radioskopie, tuhnutí, chlazení, zpěňovadlo, rentgenové záření, porézní struktura

## Keywords

Aluminium foam, pores, voxel model, liquid alloy, radiography, solidification, cooling, foaming agent, x-rays, porous structure

## Bibliografická citace

KŘIVÁNEK, R. *Vlastnosti a použití kovových pěn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vlastnosti kovových pěn vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 25. května 2012

.....  
Robin Křivánek

# Poděkování

Tímto chci poděkovat všem, kteří mi poskytli potřebné podklady k vypracování této práce. Zejména panu Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky nutné k úspěšné tvorbě bakalářské práce. V neposlední řadě musím poděkovat své rodině i blízkým za materiální a především morální podporu.



# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 KOVOVÉ PĚNY</b> .....	<b>11</b>
<b>2 VÝROBA KOVOVÝCH PĚN</b> .....	<b>13</b>
2.1 METODA VSTŘIKOVÁNÍ PLYNU .....	13
2.1.1 Cymat <sup>®</sup> .....	13
2.1.2 Metcomb <sup>®</sup> .....	14
2.2 PŘIMÍCHÁVÁNÍ PĚNIDLA DO TAVENINY.....	15
2.3 VÝROBA PĚN Z VYLISOVANÝCH PRÁŠKOVÝCH SMĚSÍ .....	15
2.3.1 Lisování práškových směsí .....	15
2.3.3 Nízkotlaké odlévání .....	16
2.3.3 Válcování plechů do polotovaru .....	17
2.4 PŘESYCENÍ TAVENINY PLYNEM .....	17
2.5 VÝROBA POMOCÍ POLYMEROVÉ ŠABLONY .....	18
<b>3 ZÁTĚŽOVÉ ZKOUŠKY KOVOVÝCH PĚN</b> .....	<b>19</b>
3.1 CHARAKTERIZACE STRUKTURY .....	19
3.2 PŘÍPRAVA VZORKU .....	19
3.3 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ ZKOUŠKA .....	19
3.4 SMYKOVÉ ZKOUŠKY .....	20
3.5 ÚNAVA .....	20
<b>4 MODERNÍ METODY ZKOUMÁNÍ KOVOVÝCH PĚN</b> .....	<b>22</b>
4.1 TVORBA MODELŮ POMOCÍ CT SKENERU .....	22
4.2 TVORBA VOXELOVÉHO MODELU .....	23
4.3 RENTGENOVÁ RADIOSKOPIE .....	24
<b>5 ZPRACOVÁNÍ PĚN</b> .....	<b>26</b>
<b>6 VLASTNOSTI KOVOVÉ PĚNY</b> .....	<b>28</b>
6.1 ABSORPCE ZVUKU A POTLAČENÍ VIBRACÍ .....	28
6.2 VEDENÍ TEPLA .....	28
6.3 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI .....	28
<b>7 APLIKACE KOVOVÝCH PĚN</b> .....	<b>30</b>
7.1 ALPORAS <sup>®</sup> .....	31
7.2 ERG DUOCEL <sup>®</sup> .....	32
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>33</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>34</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>36</b>

# Úvod

U mnoha nových technických objevů lidstvo našlo inspiraci v přírodě. A není tomu jinak ani při vzniku kovových pěn. Tato pórovitá struktura se objevuje v pevných, ale přitom velmi lehkých organických konstrukcích (kosti, koráli, stonky rostlin, kmeny stromů, atd.), která se během dlouhého času vyvinula k dokonalosti. V těchto stavebních materiálech se využívá ideálního rozložení hmoty v jednotlivých částech konstrukce. Představme si třeba lidskou kost, ta má nejméně hustou strukturu uprostřed a dále směrem k povrchu houstne, tedy tam, kde je potřeba největší pevnost a tvrdost. Tyto materiály snadno vydrží i velká napětí, důležitým faktorem je, že dochází k zatěžování vlivem vlastní tíhy (jsou samonosné).

Většina odborníků zabývajících se odléváním kovových konstrukčních prvků, se snaží po celém jejich objemu minimalizovat výskyt vzduchových dutin. Avšak u kovových pěn je tomu naopak, zde je cílem dosáhnout nerovnoměrného (stochastického) rozložení vzduchových buněk v kovové matici. Součást z tohoto materiálu snese stejně velké zatížení jako neporézní, ale při výrazně nižší hmotnosti. Kovové pěny mají mnohem lepší mechanické vlastnosti, než doposud běžně používané stavební látky, to dává předpoklady možné aplikace v této průmyslové oblasti. Ačkoliv jsou porézní kovy lidstvu známy již desítky let, k jejich hromadnému využívání zatím nedošlo, protože nejsme schopni zcela vyřešit technické problémy, které souvisí s jejich výrobou. Jedním z nich je obtížná reprodukovatelnost vlastností zcela identický součástek. Na vině je právě nehomogenní struktura, která způsobuje poměrně velký rozptyl hodnot pevnostních charakteristik. Dalším faktorem jsou vysoké výrobní náklady kovových pěn, ty jsou na dnešní dobu jen těžko akceptovatelné. Nejpoužívanějším kovem k výrobě pěny je hliník, ten je také komerčně prodáván hned několika firmami pod obchodními názvy (Alporas<sup>®</sup>, Duocel<sup>®</sup>, Metcomb<sup>®</sup>, atd.) celém světě.

Ke snazšímu pochopení dějů, které probíhají při procesu pění kovu, nám slouží rentgenová radioskopie, která umožňuje pozorovat např. i růst dendritů. Metoda zkoumání vnitřní struktury pomocí jednotlivých řezů, taktéž využívající rentgenové záření, je CT analýza. Z dat získaných na CT skeneru jsme schopni vytvořit trojrozměrný model kovové pěny, a ten můžeme následně prostřednictvím počítačových programů testovat. Tím jednoduše zúžíme rozptyl hodnot mechanických vlastností. Možnost aplikace porézních kovů se rok od roku zvyšuje, tak už je jen otázkou čas, kdy nám bude sloužit v každodenním životě.

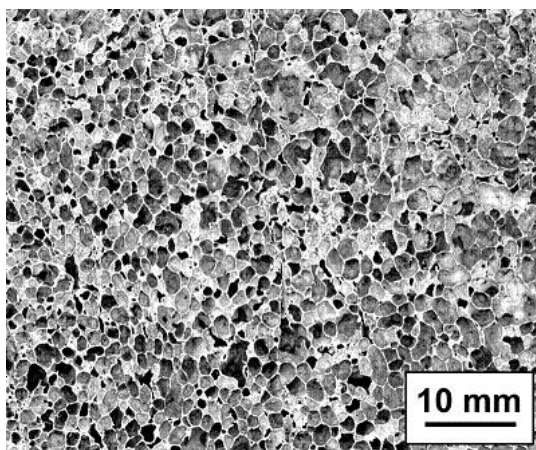
# Kovové pěny

## 1. Kovové pěny

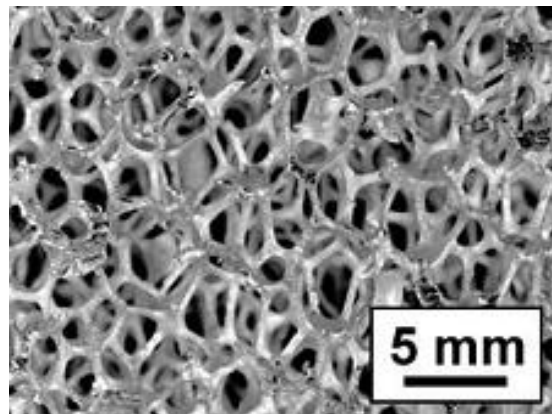
Kovové pěny jsou buněčné materiály s vynikajícími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Mezi nejvýznamnější přednosti patří nízká měrná hmotnost, která je zajištěna celulární strukturou. Póry jsou vyplněny plyny a tvoří 40 až 98 % celkového objemu materiálu. Navzdory nízké hustotě neztrácí svou pevnost, a proto nejsou zatěžovány svou vlastní tíhou, jako jiné konstrukční materiály. Tyto pěny mají výjimečné schopnosti v pohlcování nárazové energie, nízkou tepelnou vodivost, relativně vysokou plynovou prodyšnost a neobvyklé akustické vlastnosti. To vše dává velký potenciál využití do budoucna.

Kovové pěny se dají celkem snadno vyrobit i ze zinku, olova, niklu, mědi, hořčíku, železa nebo titanu. Avšak pěny z těchto kovů nejsou tak perspektivní, jako z hliníku (popřípadě z jeho slitin). Hliník si drží nejlepší postavení díky své nízké měrné hmotnosti, vysoké pevnosti, houževnatosti, ale hlavně odolnosti vůči korozi. Pěnový hliník je stále populárnější i kvůli jeho výjimečným chemickým vlastnostem, které jiné materiály nemohou nabídnout. V první řadě je to schopnost dobře odolávat vlivu okolního prostředí, nehořlavost, atd. Další výhodou je poměrně snadná recyklovatelnost a ve vztahu k člověku jeho zdravotní nezávadnost. Hliník je navíc netoxický i při vystavení tepelnému záru. Tyto skutečnosti mají v dnešním moderním a ekologickém světě stále větší význam. Pěnový hliník by dokonce mohl najít uplatnění i v takové oblasti průmyslu, kde se doposud využívaly jen plasty. Důležitým faktorem ovlivňujícím konečné vlastnosti kovové pěny je nejen tvar a velikost pórů, ale i jejich orientace a tloušťka stěn. Dle vnitřní struktury dělíme porézní materiály na tyto základní typy:

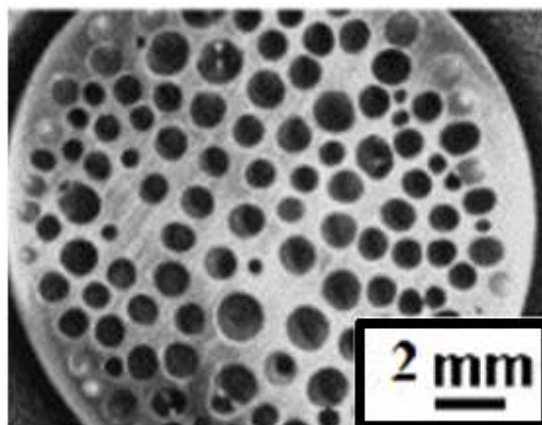
- ♦ s otevřenými nebo uzavřenými póry
- ♦ s houbovitou strukturou
- ♦ s lotosovou strukturou (s orientovanými póry)



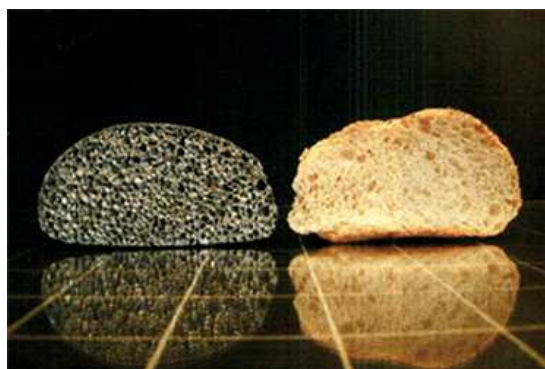
Obrázek 1.1: Uzavřené póry



Obrázek 1.2: Otevřené póry



Obrázek 1.3: Lotosová struktura



Obrázek 1.4: Houbovitá struktura

## 2. Výroba kovových pěn

Kovové pěny jsou člověku známy již tři desetiletí a během této doby se vyvinulo asi 10 různých způsobů výroby. Zhruba polovina z nich slouží pro komerční účely a jsou tedy využívány ve výrobním průmyslu. Základem výroby je tvorba bublin v roztaveném kovu a následná stabilizace pěnové struktury během celého procesu vzniku. Ve všech těchto procesech se odborníci snaží docílit přesného a rovnoměrného rozložení jednotlivých buněk po celém obsahu materiálu, aby tak byl v praxi použitelný.

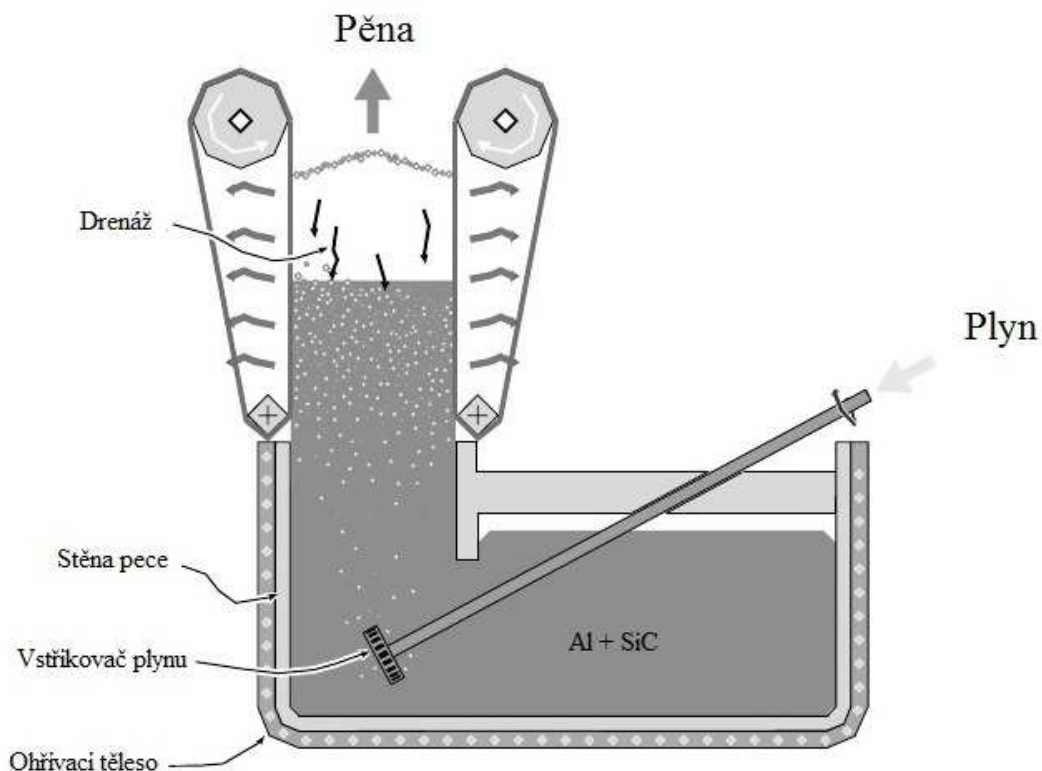
Například v hliníkové tavenině s nízkou viskozitou dochází ke spojování jednotlivých malých buněk do větších bublin, které se tlačí k povrchu taveniny. Nastane tzv. kolabování pěny ještě před procesem tuhnutí a to má za následek vznik velkých dutin, které se zde vyskytovat nesmí. Ve výrobním procesu porézního kovu je kolabování pěny zcela nepřijatelné. Zvýšení viskozity lze dosáhnout přidáním mikroskopických keramických částic nebo legování, kdy jsou do taveniny hliníku přimíchávány jiné prvky, které podporují tvorbu stabilních částic při tuhnutí. Dochází k vyztužení stěn pórů těmito částicemi a tím se zabrání kolabování pěny.

### 2.1 Metoda vstřikování plynu

Jedná se o nejrozšířenější způsob výroby kovové pěny. Metoda vstřikování plynu se dá dobře provádět s různými čistými kovy v roztaveném stavu, ale nejnáze se pomocí ní vyrábí pěnový hliník, protože jeho tavenina je odolná vůči oxidaci se vzduchem a také díky nízké měrné hmotnosti hliníku. Důležité je, aby pěna vydržela stabilní do té doby, než ztuhne. Tento problém se řeší zvýšením viskozity. Jako plyn je běžně používán vzduch, ale i oxid uhličitý, kyslík, inertní plyny a dokonce může být pro vytvoření bublin do tekutého hliníku aplikována i voda.

#### 2.1.1 Cymat<sup>®</sup>

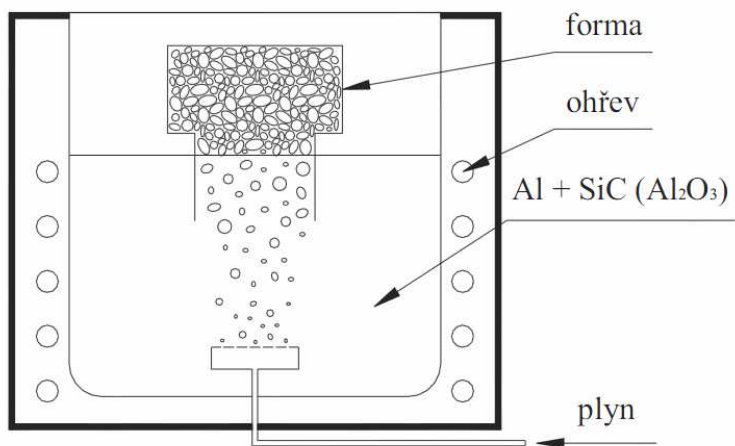
Kanadská firma Cymat Corp, která získala patenty od společností Alcan a Norsk Hydro, vyrábí pěnový hliník metodou vhnání plynu do taveniny z externího zdroje. Kolaborasi pěny se zabráňuje přidáváním keramických částic, jako jsou prášky karbidu křemíku, či oxidu hořečnatého. Její produkty jsou označovány SAF – Stabilized Aluminium Foam. Tato metoda je znázorněna na obrázku č. 2.1. O rovnoměrné rozložení jemných bublinek plynu v tavenině se stará rotační nebo vibrační čerpadlo. Jako plyny se používají vzduch, dusík, argon. Z tavicí pece se pěna vytahuje po dopravním pásu, kde dochází k následnému tuhnutí a konečnému rozřezání. Výhodou této metody je, že se jedná o jednoduchou a relativně levnou kontinuální výrobu. Díky obsahu keramických částí (10 - 20 % hm.) je hůře recyklovatelná a při jejím zpracování se řezné nástroje rychle opotřebují.



Obrázek 2.1: Metoda vstřikování plynu

### 2.1.2 Metcomb<sup>®</sup>

Podobný způsob výroby pěnového hliníku se skrývá i pod komerčním názvem Metcomb<sup>®</sup> od rakouských firem LKR a Hütte-Klein-Reichenbach. Základem procesu je vytváření plynových bublin v tavenině, které stoupají vzhůru k povrchu taveniny a hromadí se v dutině formy. Potom následuje ochlazení a následné obrobení odlitku. Podle účelu použití se vytváří s otevřenými i uzavřenými buňkami. Tato metoda je chráněna 5 patenty a zaměřuje se na výrobu složitých trojrozměrných dílců a součástek a v tom se nejvíce liší od postupu Cymatu, která provádí kontinuální výrobu jednoduchých pěnových desek. K legování se používají částice karbidu křemíku nebo oxidu hlinitého v obsahu okolo 20 % hmotnosti. Hustota produktů vyrobených metodou LKR se pohybuje od 0,4 – 0,9 g/cm<sup>3</sup>.



Obrázek 2.2: Metoda Metcomb<sup>®</sup>

## 2.2 Přimíchávání pěnidla do taveniny

Zcela odlišný postup výroby pěnového hliníku vynalezla japonská společnost Shinko Wires Company. Nechala si ho patentovat již v 1986 pod názvem Alporas<sup>®</sup>. Celý proces probíhá v pecích a skládá se z několika částí. V první fázi výroby se přidávají do roztaveného hliníku pevné částice vápníku, aby došlo k jejímu zhuštění a tím i zvýšení viskozity. Do takto připravené směsi se přimíchá tzv. zpěňovadlo, které vytvoří malé bubliny. Následným ochlazením získáme porézní hliník.

První část procesu výroby začíná mezi teplotami 670 a 690 °C, kdy se do taveniny přidává 1 - 2 % vápníku (popř. mangan), který začne rychle oxidovat a tak vytvářet jemné rozptýlené částice jako CaO, Ca Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> a Al<sub>4</sub>Ca, nyní je tavenina připravena pro přisypání práškového zpěňovadla (o velikosti zrn 5 - 20 μm) TiH<sub>2</sub> v množství 1 – 2 %. Správný průběh procesu je zajištěn dodržáním dané teploty, tlaku a času. Rozpuštění hydridu titanu obvykle trvá okolo 10 minut. Když je proces pěnění dokončen, musí tavenina správně a rovnoměrně tuhnout, jinak začne unikat vodík z pór a nastane kolaborace pěny.

V závislosti na účelu použití se Alporas vyrábí většinou s uzavřenými buňkami. Velikost buněk lze měnit od 0,5 do 5 mm, v závislosti na změně obsahu TiH<sub>2</sub> nebo doby pěnění a chlazení. Produkty jsou dílce pěnového hliníku o rozměrech 2400 × 700 × 450 mm<sup>3</sup>, které se dále obrábějí. Ořezané mají hmotnost kolem 180 kg, jejich hustota se pohybuje v rozmezí jen 0,20 – 0,25 g/cm<sup>3</sup>. Rozptyl mechanických vlastností udávaných výrobcem je poměrně malý a i to je důkazem rovnoměrně rozložené struktury materiálu.

Rozřezáváním velkých dílců ztrácí svou povrchovou celistvost a tím svou pevnost v tahu. Při řezání dochází k rychlému opotřebení řezných nástrojů. Alporas je i těžko recyklovatelný, díky relativně velkému obsahu vápníku.

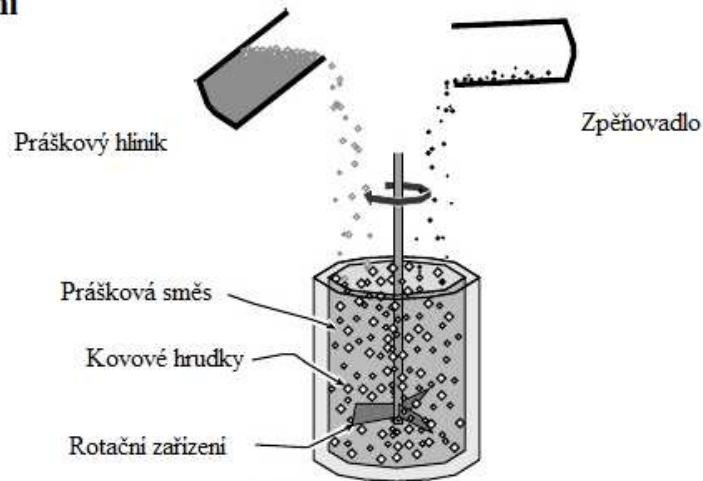
## 2.3 Výroba pěn z vylisovaných práškových směsí

### 2.3.1 Lisování práškových směsí

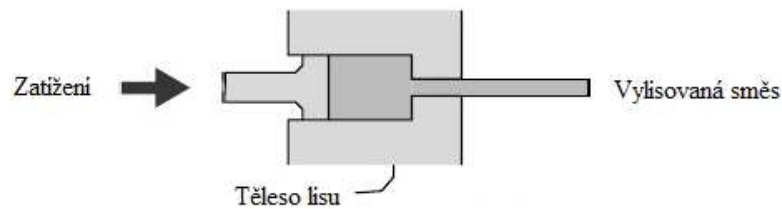
Postup tvorby pěnového hliníku metodou „uvolňování plynu rozkladem částic v polotuhém stavu“ vznikl ve spolupráci několika firem zejména IFAM (Brémy, Německo) dále LKR (Randshofen, Rakousko) a Neuman-Alu (Marktl, Rakousko). Tímto způsobem se vyrábí pěnový hliník pod komerčními názvy Alulight<sup>®</sup>, AFS a ALM. Asi nejpřespektivnější je metoda Alulight<sup>®</sup>, která byla patentována již v roce 1963, ale nedostatek informací o konstrukčních postupech a drahé výrobní náklady oddálily komerční využití. Rozvoji významně pomohl SAV (Ústav materiálů a mechaniky strojů) sídlící v Bratislavě objevením nových technologických postupů, které se staly základem k rozvoji komerční výroby od firmy Alulight International GmbH z rakouského Randshofenu.

V prvním stádiu výroby se důkladně promíchá práškový hliník se zpěňovacím činidlem (TiH<sub>2</sub>, popř. ZrH<sub>2</sub>). Následuje zkomprimování této směsi za studena, tím že se izostaticky vylisuje nebo válcuje. Takto vzniklý polotovár se dále za tepla protlačovacím lisováním vytvaruje do podoby plátů a tyčí, které se vloží do uzavřené formy. Tím jsme docílily rovnoměrného rozložení pěnícího činidla po celém objemu matrice. Ohříváním směsi nad teplotou solidu způsobuje rozkládání TiH<sub>2</sub>, tím dochází k expandování (pěnění) vodíku v polotuhém stavu. Celý obsah nádoby se vyplní uzavřenými buňkami o průměru v rozsahu od 1 do 5 mm. Po ztuhnutí vzniká součást z porézního hliníku se souvislou povrchovou vrstvou, která zlepšuje jeho mechanické vlastnosti.

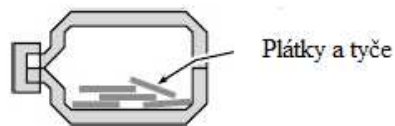
## Smíchávání přísad



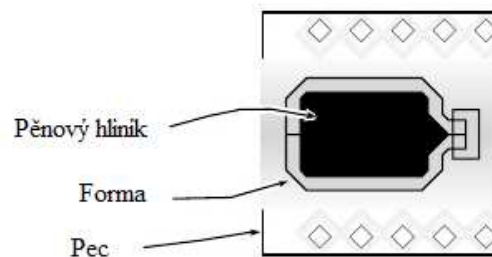
## Lisování



## Nařezané výlisky



## Pěnění

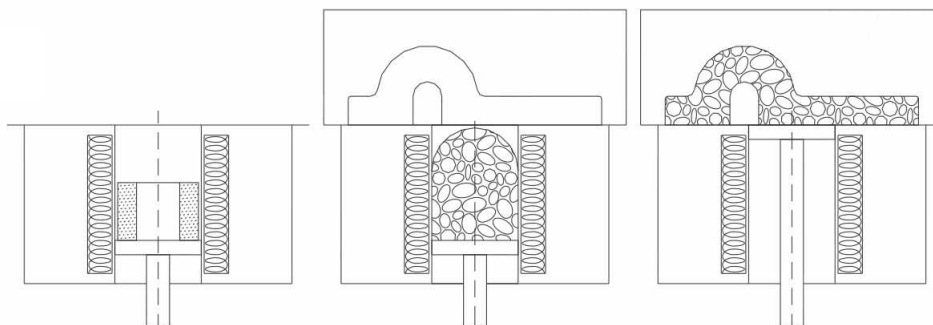


Obrázek 2.3: Metoda výroby lisováním práškových směsí

### 2.3.2 Nízkotlaké odlévání

Jiným postup výroby z práškového hliníku je i nízkotlaké odlévání, které bylo patentováno v roce 1999. K samotnému roztavení a následnému vypěnění dochází ve speciálním kontejneru. Nejprve napěněný hliník zaplní dutinu kontejneru a poté se vtlačí do připravené formy pomocí pístu. Tímto způsobem lze snadno a rychle vyrobít součást z porézního hliníku nejrůznějších tvarů.





Obrázek 2.4: Nízkotlaké odlévání

### 2.3.3 Válcování plechů do polotovaru

Firma IFAM vyvinula dokonalejší variantu této metody, která je určena k výrobě porézních hliníkových panelů (dále jen sendvičů). Jako základ opět poslouží polotovaz obsahující směs práškového hliníku a  $TiH_2$ . Rozdíl je v následném lisování za tepla, kdy se do povrchu polotovaru zaválcuje nerezový nebo hliníkový plech. Znovu vložíme do připravené formy a zahříváme nad teplotu solidu taveniny. Plechy pevně přilnou na vnitřní plochu formy a po ztuhnutí se vytvoří sendvič s pevným povrchem a pěnovým jádrem. Výrazně se zlepší pevnostní vlastnosti sendvičových panelů, ale bez významného zvýšení hmotnosti. Díky rovným povrchům se i snáze přivaří do konstrukčních sestav.



Obrázek 2.6: Zaválcovaný plech v hliníkové pěně

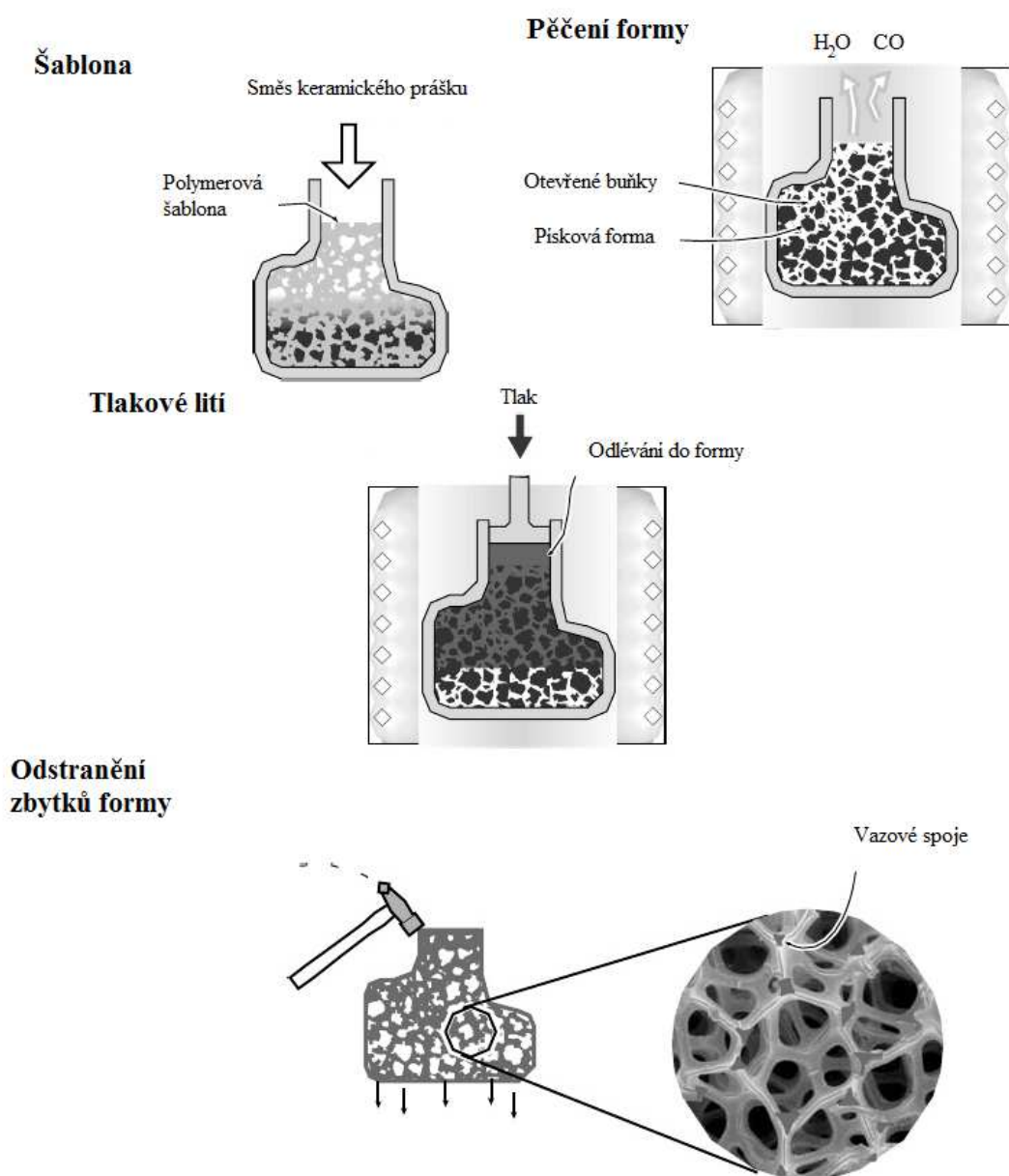
## 2.4 Přesycení taveniny plynem

Jedná se zatím o nekomerční metodu výroby kovové pěny, která je založena na tuhnutí hliníkové taveniny za přetlaku vodíkem. Nejčastěji se takto vyrábí pěnový hliník, ale mohou se použít i jiné kovy (Fe, Mn, Cr, Be, Mg a slitiny na bázi Ni). Pec je umístěna v tlakové nádobě, kde se taví hliník. Celý proces probíhá ve vodíkové atmosféře s regulací tlaku (obvykle se pohybuje v rozmezí od 5 do 10 MPa), snahou je dosáhnout stavu eutektické koncentrace. Poslední fází výroby je řízené chlazení. Výsledný materiál obsahuje poměrně velký podíl protažených buněk (lotosů). Orientace a četnost takto vzniklých buněk závisí na mnoha faktorech např. na chemickém složení slitiny, na obsahu i tlaku vodíku, přehřátí taveniny, ale také na rychlosti a způsobu chlazení. GASAR metoda zatím zůstává komerčně nedostupná z důvodů velkých výrobních nákladů a nároků na bezpečnost.

## 2.5 Výroba pomocí polymerové šablony

Tato metoda je využívána firmou ERG a její produkty jsou známé pod komerčním označením Duocel<sup>®</sup>. Jedná se o předního výrobce porézních materiálů s otevřeným typem buněk. Z kovů se pro odlívání používá pouze měď a hliník.

V první fázi výroby se vytvoří polymerní pěnová šablona s požadovanou velikostí a četností buněk, následně je potažena vlhkou směsí obsahující keramický prášek. Následně se polymerní šablona vysuší a keramický prášek se pevně usadí na stěnách. Poté se forma peče tak dlouho, dokud se veškerý polymer nerozloží (neodpaří), tím se získá negativní obraz pěny. Nyní se tlakovým litím vyplní celá forma roztaveným kovem a nechá vychladit. V poslední fázi procesu odstraníme zbytky pískové formy. Porézní materiál vzniklý takovým způsobem dosahuje extrémně nízké hustoty, pěna zabírá pouze 3 – 12 % z celkového objemu tuhého kovu. Velikost buněk se pohybuje v rozmezí od 1 do 5 mm.



Obrázek 2.6: Výroba pomocí polymerové šablony

## 3 Zátěžové zkoušky kovových pěn

Buněčná struktura porézních kovů je složitá, a proto musí být podrobena detailnější analýze ještě před samotnými zátěžovými zkouškami. K pozorování vzorků používáme optickou mikroskopii, rastrovací elektronovou mikroskopii a rentgenovou tomografii. Poměr velikosti vzorku k velikosti jednotlivých buněk má značný vliv na určení Youngova modulu nebo na výsledky zátěžových zkoušek. Velikost testovacího vzorku by měla tedy alespoň 7 průměrů buněk na každý rozměr. Dalším neméně důležitým faktorem je i úprava povrchu.

### 3.1 Charakterizace struktury

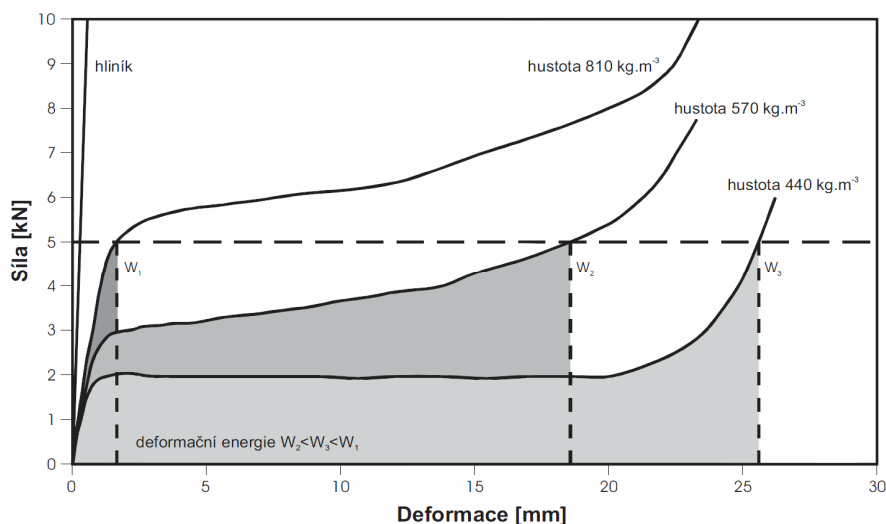
Struktura kovové pěny je nejlépe charakterizována pomocí topologie buněk. Sem můžeme zahrnout velikost a tvar pórů, relativní hustotu, anizotropii, ale i to zda jsou buňky otevřené, či uzavřené. Hustota se určí jednoduše vážením vzorku při známém objemu, zbytek vyžaduje mikroskopii. Optická mikroskopie je užitečná za předpokladu, že je pěna před leštěním plně napuštěná epoxidem. Zkoumaný vzorek se ponoří do nízkoviskózního roztaveného polymeru obsahující barvivo (černá nebo tmavě modrá je nejlepší). Celý proces probíhá ve vakuové komoře, ze které se odsaje vzduch (vznikne podtlak) a následně se buňky kovové pěny vyplní polymerem. Nakonec se vzorek vybrousí a vyleští. Další způsob pozorování je za pomoci rastrovací elektronové mikroskopie, ta umožňuje pozorovat pouze kovové pěny s otevřenou buněčnou stěnou. Nejsložitější metoda je CT vyšetřením, neboli počítačová tomografie (podrobně vysvětlena v kapitole 4.3).

### 3.2 Příprava vzorku

Kovové pěny lze obrábět různými standardními technologiemi. Poškození buněk minimalizujeme řezáním diamantovou pilou, obráběním elektrickým výbojem nebo využitím chemického frézování. Když při výrobě vzorků z kovových pěn použijeme pásovou pilu, dochází ke zkreslení výsledků měření (Youngův modul se sníží až o 15 % a pevnost v tahu o 7%). Dalším faktorem, co výrazně ovlivňuje naměřené mechanické vlastnosti je, již zmíněný poměr velikosti vzorku k velikosti buňky. Čím je tento poměr větší, tím se i zvyšuje naměřená hodnota Youngova modulu a pevnost v tahu.

### 3.3 Jednoosá tlaková zkouška

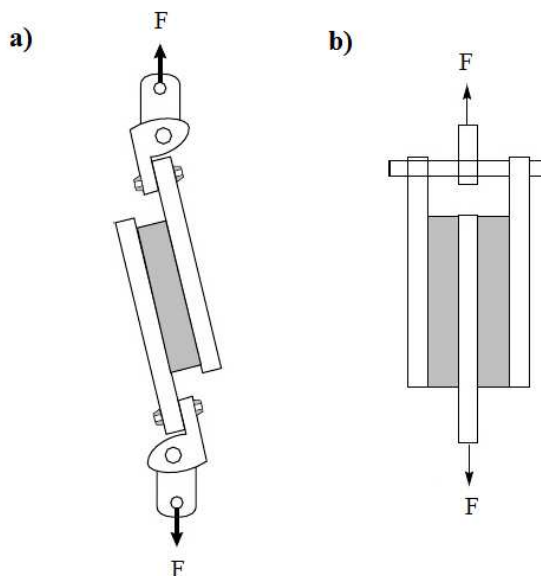
Tyto zkoušky se provádějí na hranolovém nebo válcovém vzorku pěny, jejichž poměr výšky a tloušťky musí být větší než 1,5. Opět je minimální rozměr nejméně 7 průměrů buněk. Na obr. XD je možno vidět graf se třemi křivkami vyjadřujícími deformaci v závislosti na napětí, každá z nich odpovídá vzorku hliníkové pěně o jiné hustotě. Zatěžování probíhá ve třech rozdílných krocích. První fáze probíhá za nízkého napětí a dochází při ní k elastické deformaci stěn buněk (ohýbání stěn). Při dalším zvyšování napětí se dostaneme do bodu, kdy nastane plastická deformace, která probíhá za konstantního napětí. Podle druhu materiálu, ze kterého je vzorek vyroben se buď, stěny pórů lámou (hliníková pěna ze slévárenských slitin), anebo plasticky deformují (z tvárných slitin). V poslední části zatěžování dochází k prudkému zvýšení zatěžovací síly, protože porézní struktura je již zhutněná. Energie potřebná k dosažení trvalé plastické deformace se odečítá z grafu a je rovna ploše pod křivkou. Podle množství energie spotřebované při deformaci poznáme který materiál je vhodný k pohlcování nárazové energie.



Obrázek 3.1: Průběh deformace v závislosti na zatěžovací síle (jednoosá tlaková napjatost). Vyznačené plochy pod křivkami představují velikost energii k dosažení plastické deformaci.

### 3.4 Smykové zkoušky

Modul pružnosti ve smyku se měří nejnáze pomocí torzních na válcových vzorcích, ty musí být opracovány podle normy ASTM, aby se zabránilo selhání vzorku v oblasti krčku nebo v držácích. Zkoušecí sestava je na Obrázek JK. Samotné uchycení testovaných vzorků se provádí pomocí lepidel. Točivý moment měří snímač zatížení.



Obrázek 3.1: Smyková zkouška a) podle normy ASTM, b) metodou Double Lap kloubů

### 3.5 Únava

Únava se nejvíce projevuje při cyklickém zatěžování sendvičových panelů a dochází tak k degradaci pevnostních charakteristik. Hlavní příčinou tohoto problému je nukleace a růst trhlin v pěnové struktuře. Zkušební vzorek má tvar válce, který je namáhán axiálně. V materiálu s uzavřenými buňkami dochází nejprve ke vzniku prasklin na čelních stranách

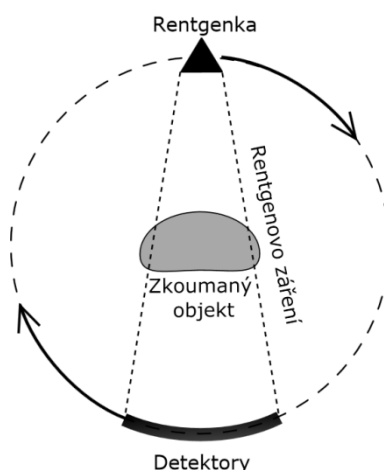
buněk, které se následně šíří k okrajům, kde se trhliny hromadí. Při pokračujícím cyklickém zatěžování nastává tzv. cyklické tečení. Materiál se postupně prodlužuje v důsledku působení středního napětí v tahu a postupně zkracuje pod tlakem středního napětí. V důsledku toto se buněčné stěny ohýbají a znovu narovnávají, až do doby vzniku křehkého lomu. Výsledkem únavové zkoušky je graf závislosti napětí na počtu cyklů (S – N křivka). Z té jsme schopni odečíst mez únavy, čili největší možné napětí, které vydrží zkušební vzorek bez porušení požadovaný počet cyklů.

## 4 Moderní metody zkoumání kovových pěn

### 4.1 Tvorba modelů pomocí CT skeneru

Kovové pěny jsou materiály s velice složitou strukturou, a proto je obtížné numerické určení jejich fyzikálních a mechanických vlastností. Základem k správnému analyzování pórovité matrice je vytvoření přesného trojrozměrného modelu, pomocí CT (Computed Tomography) skeneru. Následným zpracováním pořízených dat jsme schopni vytvořit voxelový model, který je možné dále zpracovat v programu *Ansys*. Princip této metody je stejný jako při CT vyšetření využívaných ve zdravotnictví.

Základ tomografie položil W. C. Röntgen, který objevil tzv. paprsky X již v roce 1895. Dnes je známe pod názvem rentgenové záření, a protože má velmi krátkou vlnovou délku je schopno prozářit i porézní kov. Když takové záření prochází materiálem, tak dochází k jeho tlumení v závislosti na struktuře a složení materiálu. Staré rentgenové přístroje zhotovují pouze samotné snímky, na kterých jsou zobrazeny jednotlivé vrstvy zkoumaného objektu přes sebe.

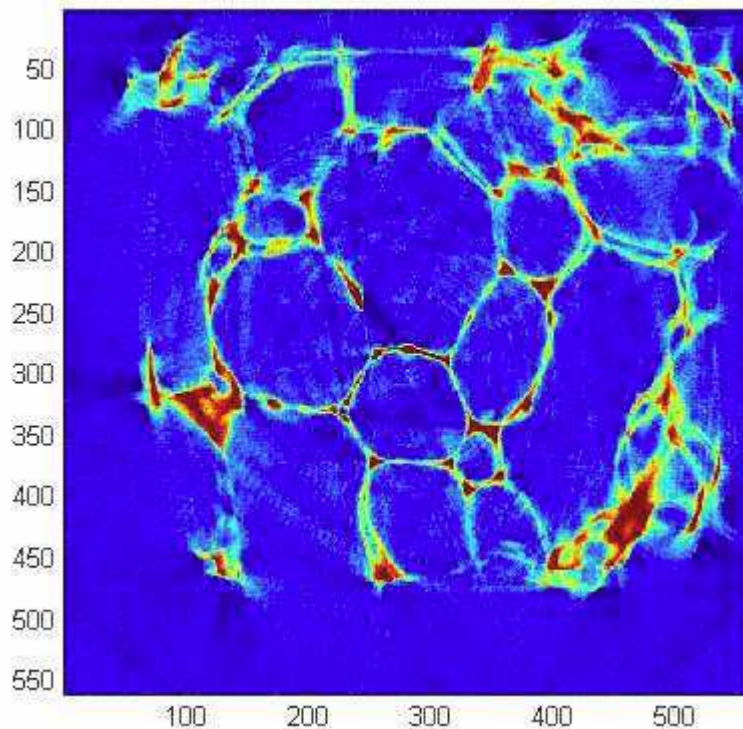


Obrázek 4.1: Schéma CT přístroje

Tento problém byl vyřešen až s vynalezením CT skeneru, který snadno vytvoří velký počet snímků v podobě počítačových dat. Skenovaný objekt je položen na nosné desce, kolem které se pohybuje složité zařízení skládající se z rentgenky a detektoru (viz. Obr.č. 4.1). Rentgenka vysílá rentgenové záření. Naopak detektor umístěný až za vyšetřovaným objektem slouží k zachytávání a měření intenzity dopadajícího záření. Tím získáme snímky (řezy) ze všech možných úhlů pohledu, pomocí nich snáze analyzujeme vnitřní strukturu materiálu. Rovnice vyjadřující poměr vstupní a výstupní hodnoty intenzity rentgenového záření je ve tvaru:

$$\frac{I_0}{I} = e^{\mu d}$$

kde  $I_0$  je hodnota vstupní a  $I$  výstupní intenzity záření, dále  $\mu$  je lineární součinitel zeslabení a nakonec  $d$  vyjadřuje tloušťku zkoumaného materiálu.



Obrázek 4.2: Snímek řezu kovové pěny z CT skeneru

Nedílnou součástí každého CT přístroje je i výkonný počítač sloužící k vypočítání soustavy rovnic a tím i určení přesného koeficientu tlumení každého elementu plochy (pixelu). K analyzování porézního materiálu je potřeba vytvořit 3D model. Snahou je přiřadit koeficient tlumení každému prvku objemu neboli voxelu.

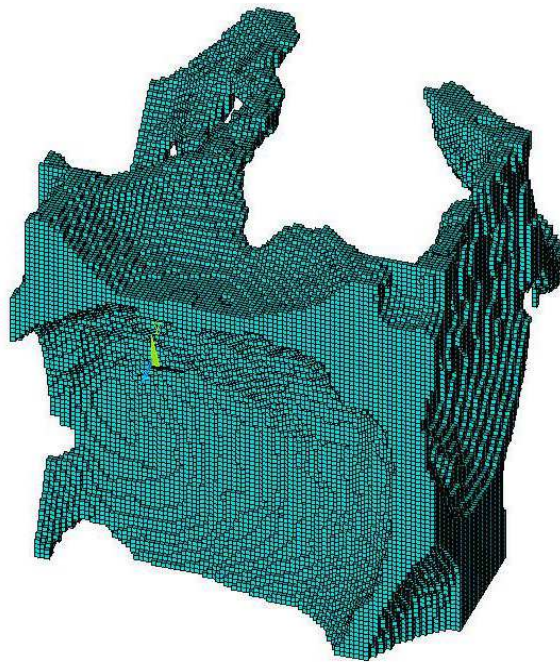
## 4.2 Tvorba voxelového modelu

Snímky získané z tomografu je nutné dále upravit, protože obsahují mnoho rušivých elementů, což by v konečném důsledku mohlo ovlivnit podobu 3D modelu. Na upravení a případné odstranění těchto nežádoucích prvků (například podložka, na které leží objekt) se využívají různé počítačové metody. K základním metodám patří:

- ◆ určení požadované oblasti
- ◆ prahování
- ◆ Gaussovo rozostření
- ◆ odstraňování tzv. ostrůvků

Po všech úpravách se pokračuje samotnou tvorbou voxelového modelu. V programu *Ansys* můžeme takto získaný 3D model kovové pěny podrobit zatěžovací zkoušce a zkontrolovat tak mechanické vlastnosti konkrétního pěnového panelu dříve, než se použije v reálné praxi.



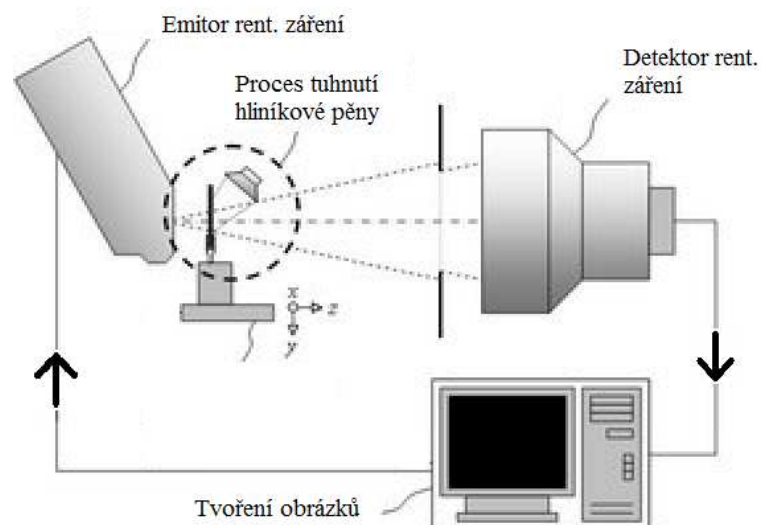


Obrázek 4.3: Voxelový model kovové pěny

### 4.3 Rentgenová radioskopie

Jedná o moderní pozorovací metodu sloužící k bližšímu poznání dějů probíhajících při výrobě kovových pěn. Princip rentgenové radioskopie se využívá jen od roku 2000 a jejím základem jsou rentgenové paprsky. Nejdůležitější částí ve výrobě je před a během tuhnutí kovové taveniny, kdy se tvaruje konečná struktura porézního materiálu. Tato fáze procesu má tak největší vliv na výsledné mechanické vlastnosti.

Základem této radiologické zobrazovací techniky jsou toky fotonů nebo neutronů, které umožňují pozorovat jevy (expanzi plynů, vývoj buněk, atd.) ve vnitřní struktuře vzorků. Radioskopie nabízí nejen nejlepší prostorové (až 20  $\mu\text{m}$ ) a časové (až 9,5  $\mu\text{s}$ ) rozlišení, ale také optimální kontrast mezi kovovou maticí a plynem, který vyplňuje póry.



Obrázek 4.4: Zobrazení metody rentgenové radioskopie

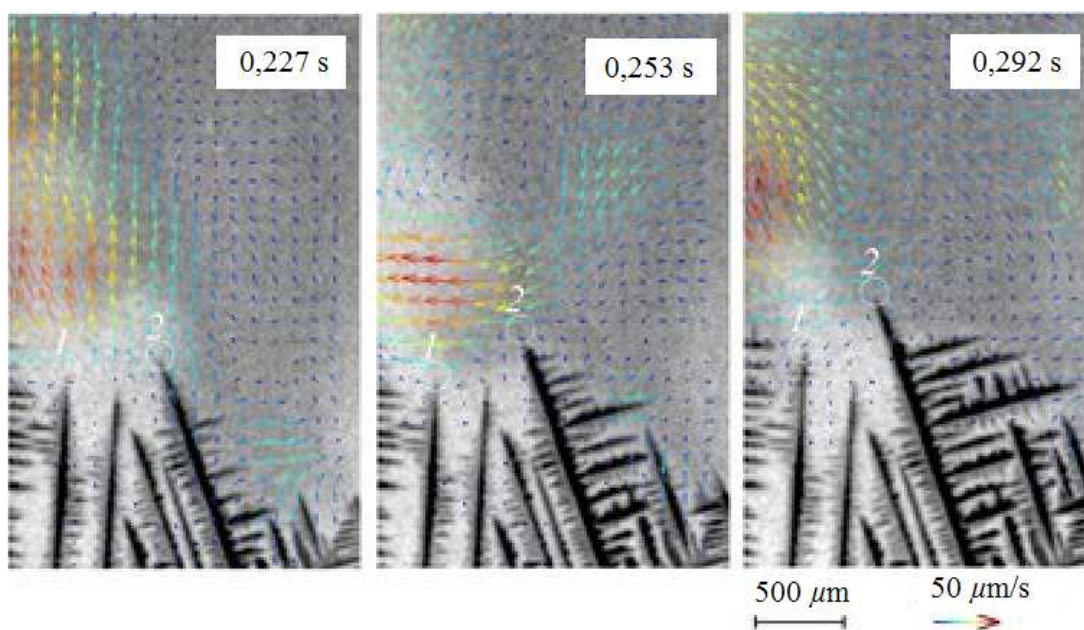


## Synchrotronové rentgenová radioskopie v materiálech

Rentgenové záření poskytuje příležitost “vidět“ přes jinak neprůhledné materiály jako jsou kovy nebo keramika. Další využití této pozorovací metody úzce souvisí s výrobou pěny a jedná se o proces tuhnutí, difúzi v kovech a tok tavenin.

### Tuhnutí kovů

Skupina vědců ve Francii a Norsku studovali tuhnutí různých slitin, tím způsoben, že sledovali přímo fragmentaci dendritů, pórovitost, směrové a rovnoosé dendritické tuhnutí nebo oddělení fází.



Obrázek 4.5: Dendritický růst (v horní části každého snímku je uveden čas jeho pořízení)

### Difúze v kovech

Pomocí běžných pozorovacích metod nebylo možné odhalit kinetiku difuze při výrobě kovových pěn, ale vše se změnilo s příchodem rentgenové radioskopie. První experimenty se provádí za mikrogravitačních (za nízké až nulové gravitace) podmínek v rámci projektu XRMON (X-ray monitoring) s podporou Evropské Kosmické Agentury (ESA) a Německé Kosmické Agentury (DLR).

### Pěnění za mikrogravitačních podmínek

První experiment byl proveden v roce 2007 v 46. parabolickém letu ESA. Pokusy výroby kovové pěny za beztlížného stavu se provádí přímo na palubě dopravního letadla padajícího volným pádem. Stav mikrogravitace trvá jen cca 20 sekund, ale tato doba stačí ke ztuhnutí pěnové taveniny, která má ideální pórovitou strukturu. Ještě náročnější experiment byl proveden během projektu MASER 11, kdy byla použita sondážní raketa, ta navodila mikrogravitaci na několik minut. Při srovnání pěnění za podmínek gravitace nebo mikrogravitace zjistíme, že celková míra srůstání bublin je téměř v obou případech shodná.

## 5 Zpracování pěn

Finálního tvaru výrobků z kovové pěny dosáhneme pomocí řezání, obráběním a spojování. Buněčná stěna vyžaduje speciální techniky, které jsou schopny poskytnout vysoce kvalitní řezy a spoje:

- ♦ Řezání je možné i s konvenčními obráběcími stroji, ale s určitým poškozením povrchu.
- ♦ Vysoce kvantitní povrchy vyžadují použití elektrojiskrových obráběcích strojů, chemického frézování, řezání vodním paprskem nebo vysokorychlostního obrábění.
- ♦ Lepidla dobře fungují jako pojiva kovových pěn.
- ♦ Svařování, pájení a letování jsou také používané metody spojování.
- ♦ Spojování porézního materiálu je možné provádět i šroubovými spoji. Když jsou pečlivě provedené, tak fungují dobře, ale snadno podléhají únavě.

### Řezání

Mezi konvenční obráběcí techniky řadíme frézování, vrtání a řezání na pásových pilách. Při těchto metodách dochází k nemalému poškození povrchu kovových pěn. Citlivější k povrchu jsou nekonvenční metody, jako elektrojiskrové obráběcí stroje (EDM), vysokorychlostní frézy nebo řezání vodním paprskem.

### Povrchová úprava

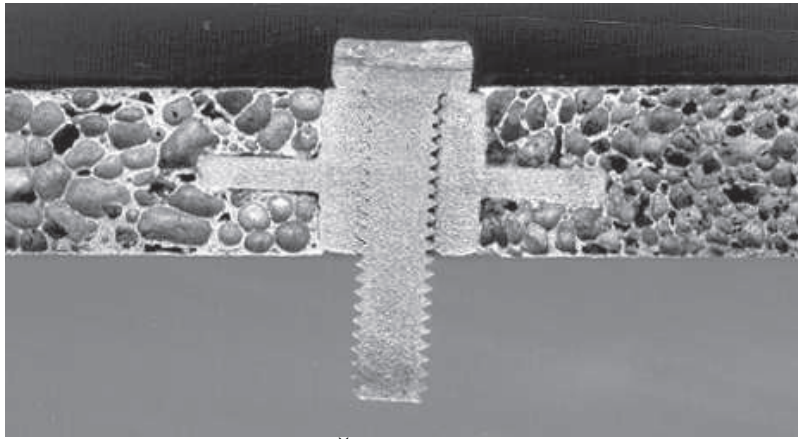
Řez kovové pěny obsahuje otevřené buňky s hrubou texturou a může se zde objevit i lokální poškození povrchu. Pro zjemnění, povrchovou vrstvu vyplníme epoxidem nebo ji můžeme obložit materiálem, který je kompatibilní s kovovou pěnou a vytvořit tím sendvičovou konstrukci. Existují i jiné metody úpravy povrchu např. leštění nebo leptání.

### Spojování

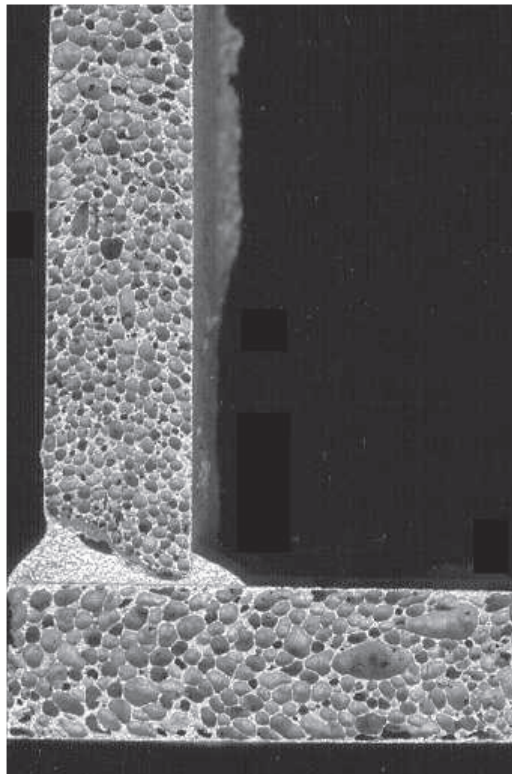
Kovové pěny se souvislou povrchovou vrstvou lze velice snadno svařovat a pájet. Díky buněčné struktuře, která v jistých ohledech připomíná dřevo, a proto umožňuje spojení prostřednictvím vrutů. Mimo lepidel se používají i šroubové spoje s vložkou. Nejmodernější metodou je laserové svařování. Nevýhodou při pájení pěn je, že dochází k odstranění povrchového filmu, který chrání kov před korozí. Pájené spoje oslabují pevnost pěny, tím zvyšují riziko selhání materiálu.

### Lepidla

Pěny lze lepit stejným typem lepidel, které se používají na kovy. Lepené spoje mají obvykle větší pevnost než samotné pěny. Nevýhodou lepidel je nízká tepelná stabilita.



Obrázek 5.1: Šroubový spoj s vložkou



Obrázek 5.2: Spájení dvou desek z kovových pěn

## 6 Fyzikální vlastnosti kovových pěn

Kovové pěny jsou porézní materiály s nepravidelnou vnitřní strukturou, složenou z otevřených nebo uzavřených buněk. Asi nejvýznamnějším faktorem ovlivňující vlastnosti těchto materiálů je relativní hustota ( $\rho/\rho_s$ , kde  $\rho$  je hustota pěny a  $\rho_s$  hustota příslušné neporézní slitiny), na které závisí několik důležitých fyzikálních a mechanických charakteristik. Jedná se například o tepelnou a elektrickou vodivost, z těch mechanický je to modul pružnosti. Velkou měrou se na konečných vlastnostech podílí anizotropie (nestejněměrnost vlastností materiálu v různých směrech) a vady, mezi které můžeme zařadit zkroucené nebo prasklé buněčné stěny, ale i buňky výjimečně velkých rozměrů.

### 6.1 Absorpce zvuku a potlačení vibrací

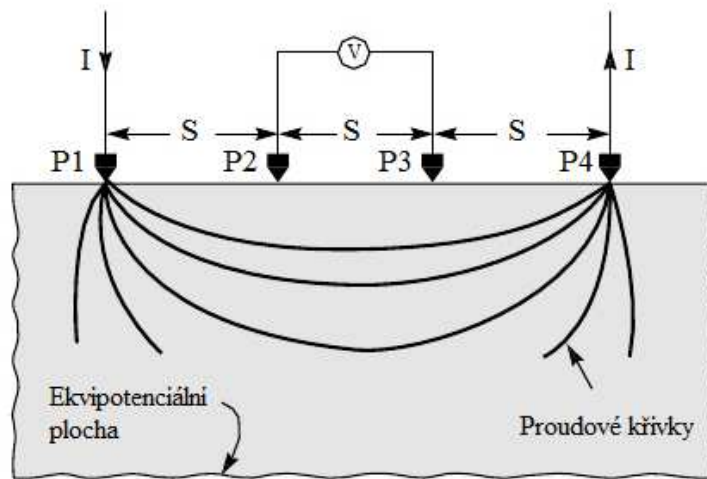
Pěnová struktura je schopna vyššího mechanického tlumení, než stejná kovová slitina bez pór a u pohlcování zvuku to platí také. Zvuková pohltivost je takový jev, při kterém se zvuková vlna neodráží ani neprochází daným materiálem. Dochází k absorbování energie vln materiálem. Účinnost tlumení udává absorpční koeficient. Nejlepší akustické tlumiče snadno dosáhnou hodnoty přes 0,9 (pohlítí tedy přes 90 % dopadající energie). U kovových pěn se udává velikost absorpčního koeficientu až 0,85. Jedná se tedy o poměrně dobrý hlukový izolátor. Jen pro představu rychlost zvuku ve vzduchu je 343 m/s, ale v oceli nebo hliníku se tato hodnota pohybuje okolo 5000 m/s.

### 6.2 Vedení tepla

Tepelná vodivost kovových pěn je při nejmenším řádově větší, než nekovové pěny. Obecně se dá říct, že nejsou vhodné pro jednoduché tepelné izolace, ačkoliv mohou poskytovat některé požární ochrany. Tepelná vodivost porézního materiálu je nižší, než u stejného plného základního kovu. Ještě vhodnější jsou kovové pěny s otevřenými buňky, které se dají využít ke zvýšení přenosu tepla (např. výměníky nebo tepelné štíty). Rychlost výměny tepla závisí na ploše kovového tělesa, přes kterou teplo prochází. Nejlépe přenáší teplo pěny vyrobené z hliníku a mědi.

### 6.3 Elektrické vlastnosti

Elektrická vodivost kovové pěny je opět nižší než u příslušného kovu, protože póry jsou vyplněny nevodivým médiem, jako je vzduch, kyslík, atd. Dalo by se odhadnout, že el. vodivost by měla být závislá na relativní hustotě lineárně, ale ve skutečnosti je závislost ještě silnější. Velká plocha kovových pěn slouží jako elektrody v bateriích. V této aplikaci jsou nejpoužívanější niklové pěny. Elektrická vodivost nebo odpor se měří čtyřbodovou metodou, tato technika je načrtnuta na obr. 6.1. Dvě sondy (P1 a P4) se používají k zavedení proudu do vzorku, zatímco jiná dvojice sond (P2 a P3) se používají k měření potenciálního poklesu napětí mezi nimi.



Obrázek 6.1: Schéma čtyřbodové metody

## 7 Aplikace kovových pěn

Z kovových pěn se v dnešní době nejvíce používají hliníkové, protože vynikají skloubením vysoké pevnosti, nízké hmotnosti, dobré korozní odolnosti, zdravotní nezávadnosti a dobrých tlumících schopností. Ostatní kovy nemají v sobě zdaleka takový potenciál, až některé výjimky, jako jsou pěny vyrobené ze slitin na bázi mědi, niklu nebo manganu. Proto se zaměříme na porézní hliník, ten se komerčně vyrábí již v několika zemích světa. V hliníkových pěnách se skrývá velký potenciál využití a to především ve stavebnictví, v automobilním průmyslu a v mnoha dalších odvětví průmyslu.

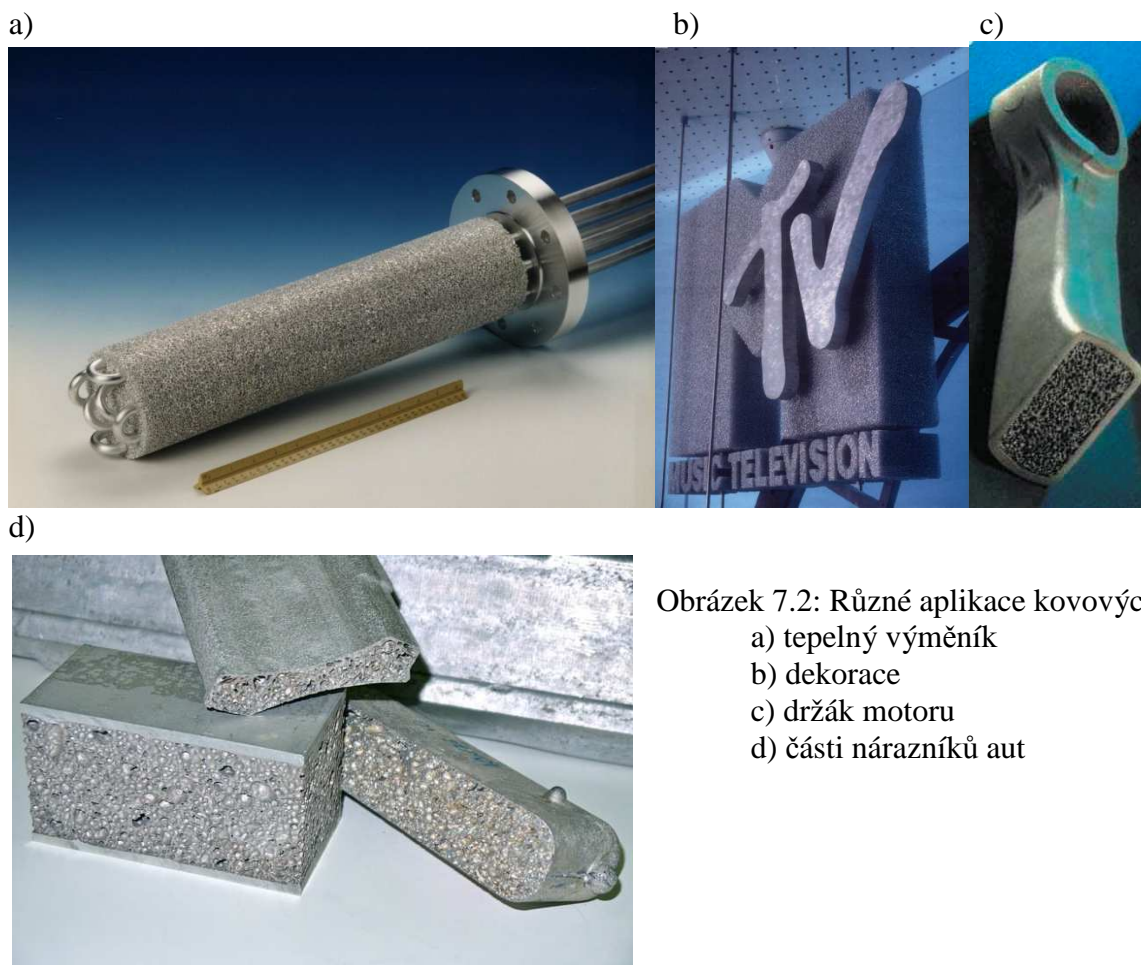
Jako konstrukčnímu materiálu brání jeho hromadnému využívání především poměrně nízká pevnost v tahu, množství strukturních vad, které vedou k oslabení konstrukční součástky, a také poměrně vysoká cena. Moderní způsoby výroby poskytují možnost součástku z pěnového hliníku vyztuzit pomocí různých plechů a sítí. Tyto výtzuhy jsou součástí kovové pěny, protože se spojují během samotného procesu pění. Takto vyrobené součástky snadno přenášejí tlakové napětí pomocí výtzuhy. Naopak jejich nevýhodou je, že při jejich výrobě vždy zůstává vnitřní pnutí, zvýší se pravděpodobnost vzniku koroze (mezi hliníkovou pěnou a výtzuhou), což má v konečném důsledku negativní vliv i na pevnost součástky.

Ideální využití pěnového hliníku je při aplikacích, kdy se využije alespoň dvou, nejlépe však více jeho předností současně. Například držák motoru v automobilech, ten je vyplněný pěnovým hliníkem za účelem zvýšení tuhosti, snížení hmotnosti, schopnosti pohlcení vibrací a nárazové energie při havárii. Pěnový hliník se dá použít i při výrobě přepravních vozíků a jiné manipulační techniky. Další možností aplikace jsou stavby budov, kde se pohybují velké počty lidí, jako jsou supermarkety, kina nebo divadla. Zde se může využít porézní hliník ke konstrukčním účelům a současně jako hlukový izolátor, díky poměrně vysokému absorpčnímu koeficientu (až 0,85). Vzhledem k tomu, že je téměř nehořlavý a dokonce se ani při jeho hoření neuvolňují jedovaté plyny, může být použit v autobusech, letadlech, vlacích nebo v jiných dopravních prostředcích. Jeho nehořlavosti a nízké tepelné vodivosti se využívá při výrobě tepelných štítů a jiných izolátorů. Velké možnosti aplikací má pěnový hliník i při konstrukci armádních vozidel a to především z důvodu schopnosti odolávat průnikům projektilů nebo pohlcovat energii tlakových vln při výbuchu munice.



Obrázek 7.1: Použití hliníkových pěn na venkovní i interní prostory budov hliníkových pěn





Obrázek 7.2: Různé aplikace kovových pěn  
 a) tepelný výměník  
 b) dekorace  
 c) držák motoru  
 d) části nárazníků aut

## 7.1 Alporas<sup>®</sup>

Alporas<sup>®</sup> je obchodní název pěnového hliníku, pod kterým je prodáván od roku 1986 společností Shinko Wire Company. Možnost aplikace v průmyslové výrobě zvyšují jeho výjimečné mechanické vlastnosti, z těch nejdůležitějších můžeme jmenovat vysokou tuhost a pevnost, nízkou měrnou hmotnost, malou tepelnou vodivost, dobrou zvukovou pohltivost, schopnost absorbovat nárazovou energii.

Hustota takto vyrobeného pěnového hliníku je pouze  $0,25 \text{ g/cm}^3$ , co představuje:

- 1/10 hmotnosti hliníku
- 1/30 hmotnosti železa
- 1/3 hmotnosti dřeva
- 1/5 hmotnosti polymeru

Dobrych absorpčních schopností Alporasu se nejvíce využívá při konstrukci nárazníku a různých deformačních prvků v automobilech, vlacích, autobusech a jiných dopravních prostředcích. Je také ideální stavební nebo obkladový materiál, díky své snadné manipulaci i montáži. Další výhody jsou např. možnost vnitřního i venkovního použití, samonosnost konstrukce, tlumí hluk a plní určité protipožární normy. Zdrojem elektro-magnetických vln jsou především mobilní telefony a počítače, aby nedocházelo k jejich vzájemnému rušení a

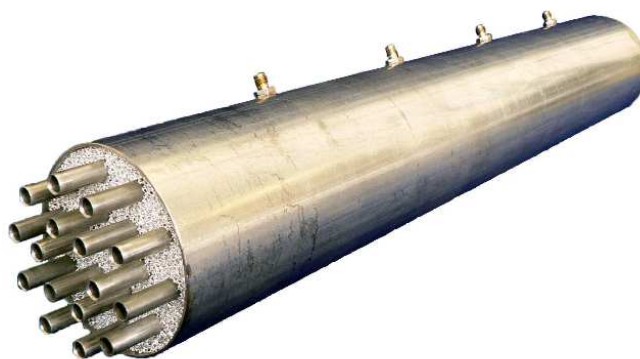
možnosti úniku dat, je potřeba tyto zdroje izolovat. K jejich odstínění je možné použít Alporas ve formě obkladů, kterými jsme schopni odstínit jednotlivé místnosti i budovy důležitých institucí (bank nebo ministerstev). Tepelná vodivost alporasu je asi 60krát nižší, než vodivost samotného hliníku, to dává možnost uplatnit se jako izolace stěn chladicích boxů.



Obrázek 7.3: Rameno opravárenského vozu z Alporasu<sup>®</sup>

## 7.2 ERG Duocel<sup>®</sup>

Jedná se o předního výrobce kovových pěn s otevřenými póry, působící v tomto oboru již od roku 1967. Vyrábí špičkové komponenty pro letectví, armádu a další průmyslová odvětví. Především se specializuje na výměníky tepla, jejichž základem jsou měděné nebo hliníkové pěny. Některé speciální výměníky se používají i na výrobu raketoplánů. Další jejich produkty nacházejí uplatnění při konstrukci armádních vozidel a letadel, jako součástek sloužících k pohlcování nárazové energie. Hliníková pěna Duocel se používá jako konstrukční jádro nádrží na kapalný dusík. Z dalších produktů můžeme jmenovat elektrody, vzduchové i olejové filtry, tepelná čerpadla, atd.



Obrázek 7.4: Výplň chladiče z kovové pěny Duocel<sup>®</sup>



## Závěr

V této práci jsou charakterizovány kovové pěny a jsou zde popsány jejich klady a zápory. Popsána je jejich výroba, zkoušení a použití. Práce je zaměřena hlavně na pěnový hliník, protože je momentálně nejpoužívanějším k výrobě pórovitých kovů.

Úvodní část popisuje základní metody výroby porézních kovů, především různé způsoby zpěňování, což umožňuje vytvoření si představy o vzniku této nerovnoměrně rozložené buněčné struktury. Ačkoliv je proces vzniku kovové pěny poměrně složitý, několik firem je schopno vyrobit pěnový hliník na vysoké úrovni a s dostatečnou reprodukovatelností mechanických vlastností.

V další části je popsán postup přípravy vzorku sloužícího k zátěžovému testování kovových pěn, především se zaměřením na jednoosou tlakovou, smykovou a únavovou zkoušku. Prostřednictvím těchto testovacích metod získáváme relativně přesné hodnoty mechanických charakteristik, jako jsou Youngův modul pružnosti, mez pevnosti a podobně. Nesmíme zapomenout zmínit vysokou schopnost pěny pohlcovat nárazovou energii, která v tomto ohledu předčí většinu běžných materiálů, používaných na výrobu nárazových prvků automobilů. Důležité je i zkoumání vnitřní struktury pomocí nejmodernější technologie (CT vyšetření a rentgenovou radioskopii). Obě metody využívají rentgenových paprsků. S rozvojem výpočetní techniky je možné vytvářet trojrozměrné modely kovových pěn, které je možné následně virtuálně zatěžovat a získávat tak představu o mechanických vlastnostech bez fyzického měření. Díky vysoké rozlišovací schopnosti je možné pomocí radioskopie pozorovat a vysvětlit všechny jevy probíhající během procesu zpěňování.

Další kapitola popisuje finální úpravy produktů. Kovové pěny je nutné obrábět pomocí speciálních technik, jako jsou chemické frézování, elektrojiskrové obrábění a jiné nekonvenční metody, které dokážou opracovat porézní materiál, aniž by poškodily jeho povrch.

Poslední část práce se věnuje vlastnostem a použití kovových pěn, převážně hliníkových, protože, jak již bylo zmíněno, hliník nachází ze všech kovů nejvíce možností uplatnění porézních pěn v průmyslové výrobě. Jeho jedinečnost tkví v kombinaci vlastností, které nelze dosáhnout s využitím jiných materiálů. Nevýhodou je stále vyšší cena, ale s rostoucím objemem výroby jistě náklady klesnou. V budoucnu by kovové pěny mohly najít uplatnění i v těch oblastech průmyslu, kde se zatím hromadně využívají plasty nebo keramika. Při použití pěnového hliníku se totiž docílí snížení hmotnosti výrobků. Jednou pravděpodobně nastane chvíle, kdy se kovové pěny stanou nedílnou součástí mnoha strojírenských výrobků.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KEŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A., a kol., *Encyklopedie hliníku*, Prešov 2005, ISBN 80-890-4188-4.
- [2] GUOXING, L., TONGXI, Y., *Energy absorption of structures and materials* [online]. Cambridge, England: Woodhead Pub. Ltd., c2003, xvi, 403 p. [cit. 2012-04-21]. Dostupné z www: <[http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=2524&VerticalID=0](http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2524&VerticalID=0)>
- [3] KOUDELKA, P. *Vyšetřování mechanických vlastností kovových pěn pomocí mikrostrukturálních modelů*. Praha: Vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, 2010. 69 s. Vedoucí bakalářské práce, Doc. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D..
- [4] ASHBY, M. F. *Metal foams: a design guide* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z www: <<http://www.scribd.com/doc/7009714/Metal-Foams>>
- [5] *Aluminium-Foam Sandwich (AFS) - Produkt Information*, Alulight AFS GmbH, [online]. [cit. 2012-04-27]. Dostupné z www: <[www.alulight.com](http://www.alulight.com)>
- [6] PODOLAN, M. *Hliníková pena Alporas* [online]. [cit. 2012-04-27]. Dostupné z www: <[www.hlinik.sk/pdf/hli\\_pena.pdf](http://www.hlinik.sk/pdf/hli_pena.pdf)>
- [7] SHINKO WIRE CO. Ltd. *Alporas* [online]. [cit. 2012-04-11]. Dostupné z www: <[www.shinko-wire.co.jp](http://www.shinko-wire.co.jp)>
- [8] ALULIGHT. *Alulight Datenblaetter* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <[www.alulight.com](http://www.alulight.com)>
- [9] FRAUNHOFER IFRAM. *Deformation characteristics of metal foams* [online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné z www: <<http://www.ifam.fraunhofer.de/index.php?seite=/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/eigenschaften/&lang=en>>
- [10] CYMAT, *Technology & Innovation* [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z www: <<http://cymat.com/#>>
- [11] METCOMB, *Technical overview* [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z www: <<http://www.metcomb.com/index.html>>
- [12] ERG AREO SPACE CORPORATION, *Docel® foam application guide* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z www: <<http://www.ergaerospace.com/index.html>>
- [13] GARCÍA-MORENO, Francisco X-ray radiography of liquid metalfoams: influence of heating profile, atmosphere and pressure *Sciencedirect* [online]. 2005, volume 263, issues 1-3, pages 290-294 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z www: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775704010192>>

- [14] WIKIPEDIE, *Aluminium foam sandwich* [online]. [cit. 2012-03-22]. Dostupné z www: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_foam\\_sandwich](http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_foam_sandwich)>
- [15] WIKIPEDIE, *Počítačová tomografie* [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A1\\_tomografie](http://cs.wikipedia.org/wiki/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A1_tomografie)>
- [16] WIKIPEDIE, *Metal foam* [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z www: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Metal\\_foam](http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam)>
- [17] ARCHITECTURAL METAL SOLUTIONS, *Alusion* [online]. 2010 [cit. 2012-04-24]. Dostupné z www: <<http://www.archmetalsolutions.com/page2/page4/page4.html>>
- [18] A Development of Technology for Making Porous Metal Foams Castings. JJMIE: *Jordan journal of mechanical and industrial engineering* [seriál online]. [cit. 2012-04-14]. ISSN 1995-6665. Dostupné z www: <[http://jjmie.hu.edu.jo/files/v4n2/JJMIE-02-09\\_Revised%20modified.pdf](http://jjmie.hu.edu.jo/files/v4n2/JJMIE-02-09_Revised%20modified.pdf)>
- [19] WOJDYLA, Ben. Aluminum Foam Coming to Production Cars. *Popular mechanics* [online]. Apr. 2012, [cit. 2012-04-27]. Dostupné z www: <<http://www.popularmechanics.com/cars/news/auto-blog/Aluminum-Foam-8385126>>
- [20] Boden, S. X-ray radiosopic visualisation of solidifying metallic melts. *Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf* [online]. Nov. 2011 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z www: <<http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=25443&pNid=1680>>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

**3D:** trojrozměrný

**AFS:** sendvičové panely z hliníkové pěny

**Ansys:** výpočetní program založený na metodě konečných prvků

**CT:** počítačová tomografie (Computed Tomography)

**radioskopie:** vyšetřovací metoda umožňující získání obrazu vnitřní struktury materiálu

**pixel:** nejmenší plošný element obrazu

**skener:** zařízení, které snímá informace a následně je převádí do digitální podoby

**tomograf:** zařízení provádějící CT vyšetření

**voxel:** objemový element

**Youngův modul:** modul pružnosti v tahu