



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**HLINÍKOVÉ PĚNY A JEJICH VYUŽITÍ V TECHNICKÉ
PRAXI**

ALUMINIUM FOAMS AND THEIR APPLICATIONS IN ENGINEERING PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristián Belák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Němec, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Kristián Belák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Karel Němec, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Hliníkové pěny a jejich využití v technické praxi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce na bázi literární rešerše bude obsahovat souhrnnou charakteristiku hliníkových pěn, popis jejich kladných a záporných vlastností a možnosti konkrétních aplikací v různých oblastech.

Cíle bakalářské práce:

Definice kovových pěn
Charakteristika hliníkových pěn
Oblasti využití těchto materiálů
Zhodnocení budoucnosti hliníkových pěn

Seznam literatury:

Michna, Š.: Encyklopedie hliníku. Děčín, Alcan Děčín Extrusions, 2005. 1. elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 80-89041-88-4

Grgač P., Janovec, J., Dománková, M.: Nové materiály a technologie, 1. vyd. Bratislava. STU. 2007, 217 s. ISBN 978-80-227-2599-6

Duarte, I., Banhart, J.: A study of aluminium foam formation—kinetics and microstructure. Acta Materialia, 2000, 48.9: 2349-2362

Lu, Guoxing; Yu, Tongxi: Energy Absorption of Structures and Materials.. Woodhead Publishing, 2003. Online version available at:

<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEASM000V/energy-absorption-structures/energy-absorption-structures>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Bakalárska práca zahŕňa poznatky o hliníkových penách a ich praktickom využití. V prvej časti je práca zameraná na základnú charakteristiku hliníka a jeho zliatin a následne sú charakterizované kovové peny a uvedené ich základné rozdelenie. Ďalej je venovaná značná pozornosť vybraným spôsobom ich výroby. Taktiež sú uvedené vlastnosti takýchto pien, a to predovšetkým tie najpodstatnejšie – mechanické. Práca pojednáva aj o technologickom spracovaní pien a posledná časť obsahuje popis vybraných aplikácií kovových pien v technickej praxi.

Kľúčové slová

Hliník, hliníková pena, kovová pena, póry

Abstract

Bachelor thesis includes knowledge of aluminum foams and their practical use. The first part of the thesis is focused on the basic characteristics of aluminum and its alloys, consequently, there are characterized metal foams and stated their basic division. Further, there is also devoted considerable attention to selected methods of its manufacturing. Also, properties of these foams are mentioned, mainly the most important ones – mechanical. Thesis deals even about technological processing of foams and the last part contains description of selected applications of metal foams in technical practice.

Keywords

Aluminum, aluminum foam, metal foam, pores

Bibliografická citácia

BELÁK, K. *Hliníkové pěny a jejich využití v technické praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto záverečnú prácu vypracoval samostatne a s použitím literatúry a informačných zdrojov, ktoré sú uvedené v zozname na konci práce.

V Brne dňa 24.5.2016

.....
Kristián Belák

Pod'akovanie

Týmto chcem poďakovať Ing. Karlovi Němcovi, Ph.D. za venovaný čas a poskytnutie cenných rád a pripomienok pri vypracovaní práce. Ďalej by som rád poďakoval svojej rodine a priateľom za materiálnu, no predovšetkým morálnu podporu počas celého doterajšieho štúdia.

Obsah

1 Úvod	10
2 Hliník	11
2.1 Vlastnosti hliníka	11
2.2 Výroba hliníka	12
2.3 Zliatiny hliníka.....	12
3 Kovové peny.....	14
4 Výroba kovových pien	16
4.1 Výroba pien z tekutého kovu	16
4.1.1 Vstrekovanie plynu	16
4.1.2 Rozklad speňovacích častíc.....	17
4.1.3 Eutektické tuhnutie systému plyn – pevná látka	18
4.1.4 Tavenie kovového prášku	18
4.1.5 Odlievanie pomocou polymérovej peny	19
4.2 Výroba pien z tuhého kovu	20
4.2.1 Spekanie kovových práškov a vlákien	20
4.2.2 Metóda zachytávania plynu.....	20
4.2.3 Penenie suspenzií	21
5 Vlastnosti hliníkových pien.....	22
5.1 Mechanické vlastnosti.....	22
5.1.1 Vplyv tepelného spracovania	23
5.1.2 Vplyv povrchovej vrstvy	24
5.1.3 Modul pružnosti	25
5.1.4 Pevnosť v ťahu	25
5.2 Fyzikálne vlastnosti	25
5.2.1 Elektrická vodivosť	26
5.2.2 Tepelná vodivosť.....	26
5.2.3 Absorpcia zvuku a potlačenie vibrácií	26
5.2.4 Chemické vlastnosti	27
6 Spracovanie kovových pien.....	28
6.1 Rezanie.....	28
6.2 Spájanie.....	28
6.2.1 Zváranie.....	28

6.2.2 Adhezíva	30
7 Technické aplikácie	31
7.1 Automobilový a dopravný priemysel	31
7.1.1 Crashbox	31
7.1.2 Teleskopický zdvíhací systém.....	32
7.1.3 Výplň stĺpikov karosérie	32
7.1.4 Vlakové kabíny	33
7.1.5 Cyklistické kľuky	33
7.1.6 Kapota automobilu	33
7.2 Stavebný priemysel.....	34
7.2.1 Zvukovo izolačný materiál.....	34
7.2.2 Dekoračné účely	35
7.3 Energetický priemysel	35
7.3.1 Tepelné výmenníky	35
7.4 Ďalšie aplikácie.....	36
8 Záver.....	37
9 Zoznam použitých zdrojov	38
10 Zoznam použitých skratiek a symbolov	41

1 Úvod

Hliník a jeho zliatiny si našli významné miesto v našom každodennom živote. Za posledné desaťročia dochádza k obrovskému rastu jeho výroby a spotreby (ktorú prekonáva už len titan spolu s jeho zliatinami), čo je zapríčinené výbornou kombináciou mechanických (pomer pevnosti ku hmotnosti), chemických (korózna odolnosť) a technologických vlastností (dobrá schopnosť tvárnenia). Preto si našiel široké možnosti uplatnenia v potravinárskom, chemickom, stavebnom aj strojárskom priemysle.

Počas výroby kovových súčiastok či už z hliníka, ocele, alebo iného kovu v drvivej väčšine prevláda snaha o získanie štruktúry bez väd v podobe vzduchových pórov (bublín), ktoré vznikali najmä pri odlievaní odliatkov, zvaraní konštrukcií alebo pri výrobe práškovou metalurgiou. Opakom sú porézne materiály, ľuďstvu známe už celé desaťročia, ktoré sa vo veľkom využívajú hlavne na výrobu obalového materiálu, rôznych filtrov a taktiež na izolačné účely. Pôvodne však neboli považované za vhodné na konštrukčné použitie. S nástupom moderných a progresívnych technológií sa však otvorili nové možnosti v podobe tzv. kovových pien, u ktorých sú vzduchové bunky rozmiestnené v kovovej matici. Pritom inšpirácia pochádza zo samotnej prírody, kde môžeme nájsť pórovitú štruktúru napr. v stonke rastlín, kostiach, dreve či koraloch. Tieto peny sa vyznačujú vysokou tuhosťou a schopnosťou prenášať veľké zaťaženia pri výrazne nižšej hmotnosti v porovnaní s kovmi s celistvou štruktúrou. K ich masovému rozšíreniu však až do súčasnosti nedošlo, pretože stále nie sme schopní vyriešiť mnohé problémy. Za závažný nedostatok je považovaný napr. značný rozdiel v mechanických vlastnostiach identických súčiastok, čo je spôsobené nehomogénnou štruktúrou. Ďalšou enormnou prekážkou sú výrobné náklady, ktoré nutne musia byť dostatočne znížené, aby kovové peny obstáli v dnešnom konkurenčnom prostredí, hlavne vo veľkosériovej výrobe.

Najpoužívanejším a najvhodnejším kovom pre výrobu pien je hliník. Kombinácia vlastností hliníka a porézneho materiálu v sebe ukrýva obrovský potenciál. V súčasnej dobe sa jeho výroba a predaj venuje čoraz viac svetových firiem. Pri napredovaní aktuálnych vývojových trendov v tejto oblasti nebude trvať dlho, kým dôjde k jeho celosvetovému masovému rozšíreniu.

2 Hliník

Hliník je chemický prvok s označením Al (z lat. *aluminium*) v periodickej sústave prvkov. Je to striebrobiely kov s nízkou mernou hmotnosťou, je paramagnetický a nie je toxický. Má protónové číslo 13 a elektrónovú konfiguráciu $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$. S podielom 8,13 % je tretím najrozšírenejším prvkom v zemskej kôre (no vo voľnej prírode sa v kovovej forme nevyskytuje) hneď po kyslíku s podielom 46,6 %, kremíku s 22,7 % a druhým najpoužívanejším kovom hneď po železe. Dôvodom, prečo sa v prírode nevyskytuje v kovovej forme, je jeho silná afinita ku kyslíku, kvôli ktorej pokrýva svoj povrch ochrannou vrstvou s hrúbkou približne 6,35 nm. Tento jav sa nazýva pasivácia a spôsobuje jeho skvelú odolnosť voči atmosférickej korózii. Prvýkrát bol izolovaný v roku 1825 Hansom Christianom Oerstedom [1,2,3].



Obr.1 Vzhľad hliníka [3]

2.1 Vlastnosti hliníka

Patrí medzi nepolymorfné kovy, má kubickú, plošne centrovanú mriežku (FCC). Vďaka tomu dosahuje dobré plastické vlastnosti za tepla aj za studena, a to v čistom stave aj vo forme zliatin. Sklzoové roviny resp. smery sú $\{111\}_\alpha$ resp. $\langle 110 \rangle_\alpha$. Na rozdiel od iných kovov a zliatin s danou mriežkou má podstatne vyššiu energiu vrstevnej chyby, a to znižuje pravdepodobnosť tvorby vrstevných chýb alebo dvojčiat. Plastická deformácia prednostne nastáva sklzom dislokácií [1,2].

<i>Materiál</i>	<i>Energia vrstevnej chyby [mJ.m⁻²]</i>
Hliník	166
Nikel	125
Meď	55
Austenitické ocele	18-55 (v závislosti na chemickom zložení)
Mosadz s 15 % hmotnostných % Zn	27
Mosadz s 30 % hmotnostných % Zn	15

Tab.1 Energia vrstevnej chyby vybraných kovov a zliatin s FCC mriežkou [2]

Medzi hlavné výhody hliníka patrí jeho dobrá tvárnosť (pri niektorých zliatinách a vhodnom spracovaní dosahuje až superplasticitu), disponuje dobrou elektrickou a tepelnou vodivosťou, vysokou mernou kapacitou a taktiež dobrou zvariteľnosťou v prítomnosti ochrannej atmosféry. Mechanické vlastnosti sú závislé na stupni čistoty a na mechanickom spracovaní. V mäkkom (vyžíhanom) stave dosahuje pevnosť v ťahu hodnotu 60 MPa a ťažnosť až 25 %. Značnou nevýhodou je nízka tvrdosť. Nie je odolný len voči atmosférickej korózii, ale aj voči slabým kyselinám, neodolá však zásaditým látkam [2,4].

<i>Vlastnosť</i>	<i>Hodnota</i>
Parameter mriežky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Merná hmotnosť	$2,6989 \text{ g.cm}^{-3}$ (pri 20°C)
Teplota tavenia	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivosť	247 W.m^{-1} (pri 25°C)
Elektrická vodivosť	62 % IACS (Al 99,8) 65-66 % IACS (Al 99,999+)
Latentné teplo tavenia	397 kJ.kg^{-1}
Latentné teplo varu	$10,78 \text{ MJ.kg}^{-1}$
Atómová hmotnosť	26,98154
Objemová zmena pri kryštalizácii	6,5 %
Špecifické teplo	$0,900 \text{ kJ/kg.K}$ (pri 25°C) $1,18 \text{ kJ/kg.K}$ (pri 660,4 °C)
Spalné teplo	$31,05 \text{ MJ/kg}$
Elektrický odpor	$26,2 \text{ n}\Omega.\text{m}$ (Al 99,999+ pri 20°C) $26,55 \text{ n}\Omega.\text{m}$ (Al 99,8 pri 20°C)
Teplota supravodivosti	1,2 K

Tab.2 Vybrané fyzikálne vlastnosti hliníka [1]

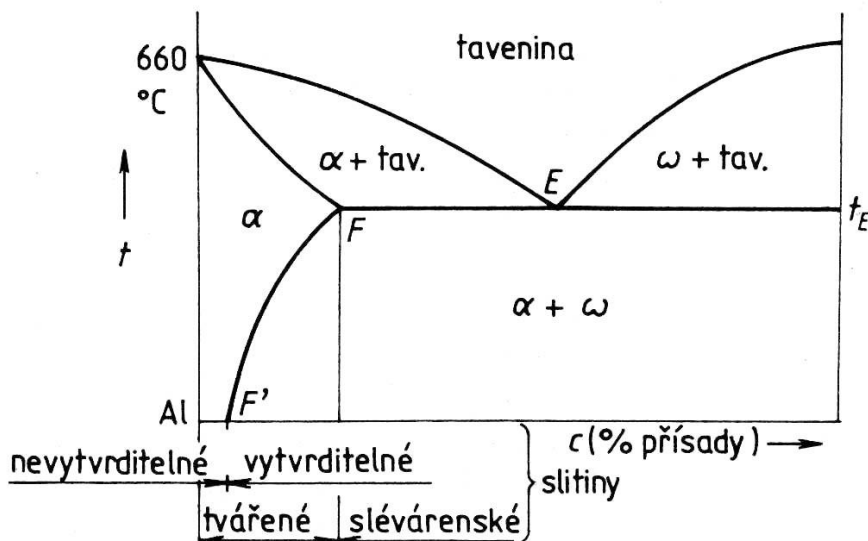
2.2 Výroba hliníka

Priemyslová výroba hliníka sa začala až v roku 1859. V prírode sa nachádza až v 250 rôznych mineráloch. Medzi najznámejšie patrí korund, diaspor, spinel, gibbsit, kyanit, andaluzit a iné. Z ekonomického hľadiska je najdôležitejšou využiteľnou rudou bauxit. Na jednu tonu hliníka je potrebných 4-6 ton bauxitu. Prvá časť výroby pozostáva z prípravy čistého oxidu hlinitého Al_2O_3 . Druhá fáza je elektrolytická výroba čistého hliníka [1,4].

2.3 Zliatiny hliníka

Pre využitie v technickej praxi sú však dôležité hliníkové zliatiny. Po oceliach patria k najpoužívanejším kovovým konštrukčným materiálom. K ich prednostiam môžeme zaradiť hlavne relatívne dobrú pevnosť k nízkej mernej hmotnosti, takže merné pevnostné charakteristiky, ako napr. pomer R_m/ρ dosahuje u určitých zliatin zrovnateľné alebo dokonca lepšie hodnoty u ocelí. Taktiež skvele odolávajú korózii a dobre sa zvárajú v ochrannej atmosfére. K hlavným nevýhodám patrí ich nízka tvrdosť, preto sa ich povrch veľmi ľahko zmliaždi. Trieskové obrábanie je taktiež problematické, pretože materiál má tendenciu sa mazať [5]. K najznámejším zliatinám patrí dural, teda zliatina s meďou a horčíkom.

Hliníkové zliatiny je možné rozdeľovať podľa rôznych kritérií. Najčastejšie a najrozšírenejšie je rozdelenie podľa spôsobu technologického spracovania na zlievarenské a tvárne. Ako ďalšie kritérium sa používa schopnosť zvyšovať pevnosť a tvrdosť tepelným spracovaním tzv. vytvrdzovaním, a to na vytvrditeľné a nevytvrditeľné. Táto vlastnosť súvisí s ich polohou v rovnovážnom diagrame, teda s ich chemickým zložením. Podmienkou však je dostatočné presýtenie tuhého roztoku na báze hliníka prísadovými prvkami. Dochádza k nemu po veľmi rýchlom ochladení zliatin z oblasti tuhého roztoku α a následnom starnutí [5].



Obr. 2 Obecný rovnovážny diagram binárnych hliníkových zliatin s vyznačením ich základného rozdelenia [6]

U hliníkových zliatin už nie je predpokladaný žiadny ďalší vývoj z pohľadu úplne nového chemického zloženia, sú považované za ukončenú skupinu materiálov. Zlepšovanie vlastností bude dosahované úpravami postupov spracovania, prípadne úplne novými postupmi. Pozornosť bude venovaná hlavne tepelnému spracovaniu. Účelom doterajších postupov bolo väčšinu získať čo najlepších pevnostných charakteristík. V praxi však práve tieto charakteristiky nie sú prvoradé ani zásadné. Nové technologické postupy by sa teda mali zameriavať na zvyšovanie tvárnosti, lomovej húževnatosti, koróznej odolnosti alebo na zníženie vrubovej citlivosti. Pri zvyšovaní pevnosti taktiež dochádza k zníženiu ostatných významných vlastností a nezanedbateľne stúpajú výrobné náklady [5].

Nové možnosti vývoja a obrovský potenciál širokej aplikácie v technickej praxi prinášajú kovové peny, v najväčšom rozsahu práve tie na báze hliníka.

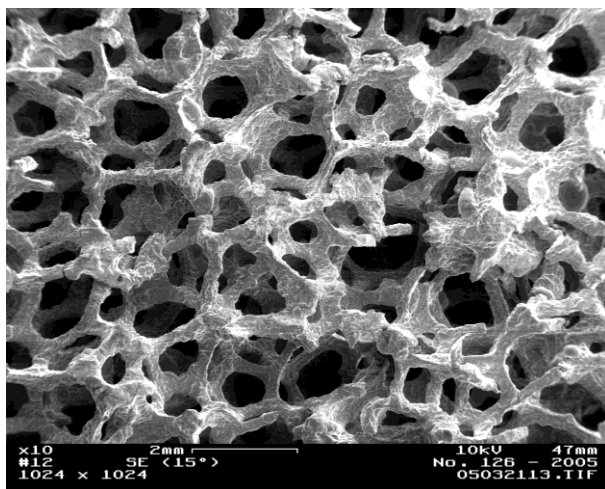
3 Kovové peny

Kovové peny predstavujú porézny materiál s celulárnou (bunkovou) štruktúrou. Skladajú sa z kovového skeletu a z pórov vyplnených plynom, pričom tieto póry tvoria vyše 70 % celkového objemu materiálu. Vďaka bunkovej štruktúre dosahujú vysokú pevnosť vzhľadom na ich nízkumernú hmotnosť, perfektnú absorpciu nárazovej energie vo všetkých smeroch nárazu, značnú schopnosť izolovania zvuku a tiež tepelnú stabilitu. Charakteristika pórov zásadne ovplyvňuje vlastnosti týchto pien, hlavne ich tvar, veľkosť a orientácia pórov, ale aj rozmerová homogenita a hrúbka stien [2].

Spomedzi všetkých kovových pien má v súčasnej dobe najväčšie uplatnenie hlavne penový hliník a jeho zliatiny. Aj keď sa kovové peny dajú pomerne jednoducho vyrobiť aj z iných kovov ako zinok, olovo, železo, nikel, meď, titan, horčík a iné, z viacerých dôvodov je z nich najperspektívnejší práve hliník. Prednostne kvôli jeho nízkej mernej hmotnosti, nízkej teplote tavenia, vysokej tuhosti a húževnatosti a dobrej koróznej odolnosti. Vďaka týmto vlastnostiam je predurčený na výrobu poréznej štruktúry s významnými konštrukčnými aplikáciami [1].

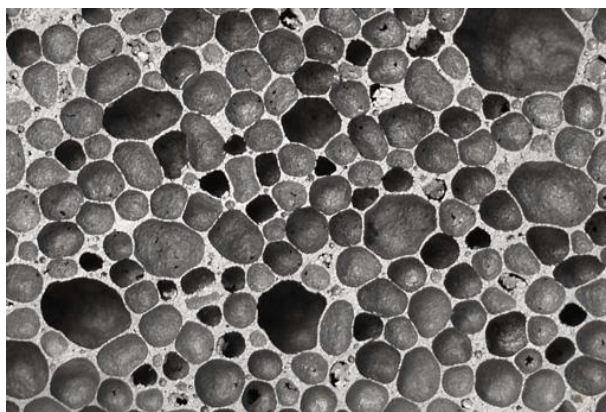
Podľa vnútornej štruktúry môžeme kovové peny rozdeliť na tieto základné kategórie :

- S otvorenými pórmi – tiež nazývané „kovové špongie“, majú mnoho možností uplatnenia vrátane tepelných výmenníkov, pohlcovačov energie a ľahkej optiky. Všeobecne sú používané v pokročilých technologických odvetviach, ako napr. v leteectve.



Obr. 3 Kovová pena s otvorenými pórmi [7]

- S uzavretými pórmi – Používané sú primárne na absorpciu nárazov, podobne ako napríklad polymérové peny v cyklistických helmách, ale zvládajú podstatne väčšie nárazy. Peny s touto štruktúrou sú dokonca schopné plávať na vodnej hladine.



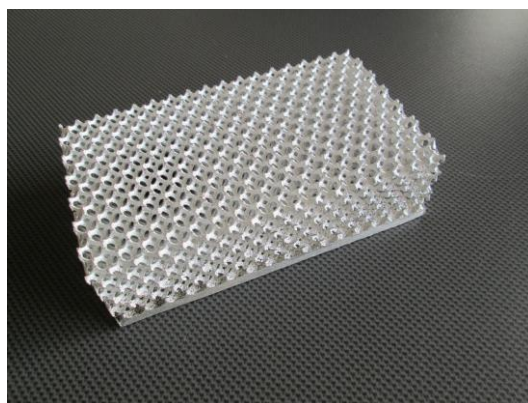
Obr. 4 Kovová pena s uzavretými pórmi [8]

- So stochastickým usporiadaním pórov – rozmiestnenie pórov v štruktúre je náhodné. Dané usporiadanie má väčšina kovových pien, čo je spôsobené technológiami ich výroby.



Obr. 5 Stochastické usporiadanie pórov v kovovej pene [9]

- S pravidelným usporiadaním pórov – štruktúra peny je považovaná za pravidelnú [7]



Obr. 6 Pravidelná štruktúra kovovej peny [7]

4 Výroba kovových pien

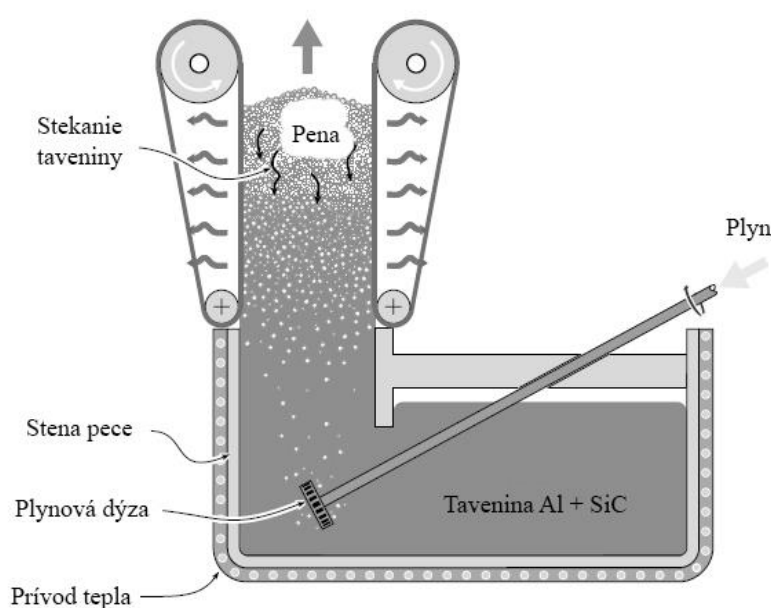
Existuje mnoho spôsobov ako vyrábať porézne kovové materiály. Niektoré metódy sú podobné tým, používaným na penenie vodných a polymérnych kvapalín, iné sú špeciálne navrhnuté tak, aby využívali vlastnosti kovov, ako napr. možnosť spekania. Podľa toho, z akého stavu daného kovu sa pena vyrába, môžeme jednotlivé metódy rozdeliť na [10] :

- Z tekutého kovu
- Z tuhého kovu vo forme prášku
- Z kovových pár alebo plyných kovových zlúčenín
- Z kovového iónového roztoku

4.1 Výroba pien z tekutého kovu

4.1.1 Vstrekovanie plynu

Tvoriť penu vháňaním plynu do čistého tekutého kovu je náročné, pretože kvapalina má tendenciu stekať z bublín príliš rýchlo na to, aby bolo možné vytvoriť penu s dostatočnou stabilitou, ktorá bude schopná stuhnúť. Avšak, 10-30 % malých a nerozpustných, prípadne pomaly rozpustných častíc, ako napr. oxid hlinitý Al_2O_3 , zvyšuje viskozitu hliníkovej taveniny a bráni jej stekaniu, takže stabilizuje penu. Táto metóda je najjednoduchšie aplikovateľná práve na hliníkové zliatiny, kvôli ich nízkej mernej hmotnosti a pretože nedochádza k ich nadmernému okysličovaniu pri vystavení taveniny okolitej atmosfére. Daný spôsob výroby má niekoľko variant. Pri tvorbe hliníkových pien sa taví čistý hliník alebo hliníková zliatina a následne je pridaných 5-15 % stabilizačných častíc. Zvyčajne sa používajú častice hliníku, zirkónia, karbidy kremíka, prípadne diborid titánu [11,14].



Obr. 7 Schematický nákres výroby hliníkovej peny metódou vstrekovania plynu [11]

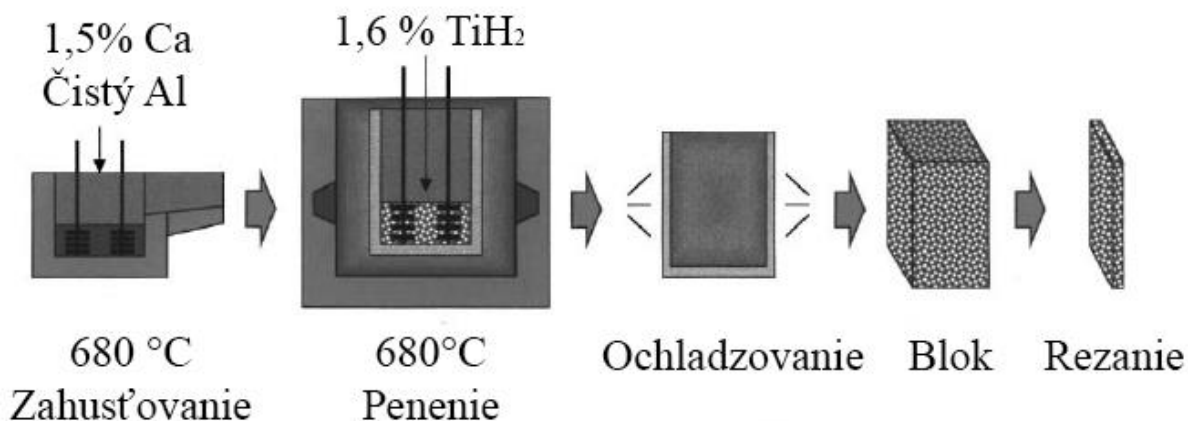
Najčastejšie používaný plyn je vzduch, no je možné použiť taktiež oxid uhličitý, kyslík, inertné plyny a dokonca aj vodu [11]. Dýza musí byť navrhnutá na tvorbu veľmi jemných bublín a ich rovnomernú distribúciu, aby boli dosiahnuté čo najlepšie vlastnosti výslednej peny. Výsledkom je zmes plynových bublín a kovovej taveniny, ktorá vypláva na povrch taveniny, kde sa z nej stáva pomerne suchá, tekutá pena dôsledkom stekania taveniny. Pena je potom relatívne stabilná vplyvom pridaných častíc a môže byť vytiahnutá pásovým dopravníkom, následne je umožnené potrebné schladenie a stuhnutie. Je však dôležité dbať na nepoškodenie poréznej štruktúry počas prechodu do tuhého stavu [10].

Týmto spôsobom je možné vyrobiť penu s pórovitosťou 80 až 98 % , teda s mernou hmotnosťou v rozsahu 0,069 až 0,54 g/cm³. Priemerná veľkosť pórov je v rozsahu od 25 do 3 mm, pričom hrúbka stien sa pohybuje v rozmedzí 50 až 85 μm. Pórovitosť je možné upravovať zmenou prietoku plynu, spôsobom vŕhania a ďalšími parametrami [10]. V súčasnosti sa tejto variante výroby venuje firma Norsk-Hydro a tiež Cymat, pod označením SAF [11,14].

4.1.2 Rozklad speňovacích častíc

Ďalšou možnosťou výroby je prídanie častíc penidiel do taveniny. Tie uvoľňujú pri zvýšení teploty plyn. Najrozšírenejší je hydrid titánu TiH₂, ktorý sa pri zahriatí nad približne 465 °C rozkladá na titan Ti a plyný vodík H₂. Prídaním týchto častíc do hliníkovej taveniny dochádza k produkcii značného množstva vodíka, ktorý v tavenine tvorí póry [11].

Celý proces začína roztavením hliníku a stabilizáciou teploty medzi 670 a 690 °C. Následne dochádza k zvýšeniu viskozity prídáním 1 až 2 % vápnika. Tavenina je potom výrazne premiešavaná, pričom je pridaných 1 až 2 % TiH₂ vo forme častíc s priemerom 5 – 20 μm. Hneď po rozptýlení častíc v tavenine je miešanie ukončené, tým sa umožní formovanie peny nad taveninou. Celý postup je možné riadiť zmenou pretlaku, teploty, prípadne času. Kompletný rozklad hydridu titánu trvá približne 10 minút. V okamihu, keď je tvorba peny na konci, je tavenina ochladzovaná, aby sa nutne zabránilo úniku vodíku pred stuhnutím [11,12].



Obr. 8 Schematické znázornenie procesu [10]

Pre daný postup je možné použiť tiež častice hydridu zirkónia ZrH₂ v koncentrácii približne od 0,5 do 0,6 %. Speňovacia teplota je v tomto prípade medzi 670 a 705 °C. Taktiež na úpravu viskozity taveniny je možné miesto vápnika použiť iné látky, ako napr. práškový oxid hlinitý, karbidy kremíka. Avšak ich použitie značne komplikuje celý proces [10,12].

V súčasnosti sa týmto spôsobom vyrábajú peny len z hliníkových zliatin, pretože vodík zapríčiňuje skrehnutie mnohých kovov a pri vyšších teplotách tavenia dochádza k príliš veľkej

rýchlosti rozkladu TiH_2 . Komerčnou výrobou sa zaoberá japonská firma Shinko Wire. Svoj produkt predáva pod obchodným názvom Alporas [11].

4.1.3 Eutektické tuhnutie systému plyn – pevná látka

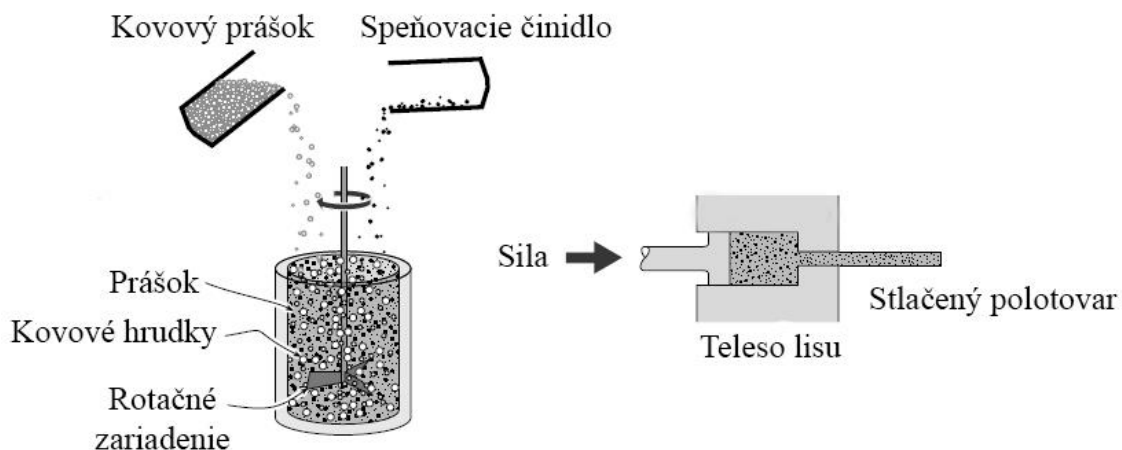
Metóda je založená na fakte, že taveniny niektorých kovov tvoria eutektický systém s plynným vodíkom. Okrem hliníku je možné vyrábať aj peny na báze niklu, medi, horčíku a ďalších. Proces zahŕňa roztavenie týchto materiálov a ich sýtenie vodíkom pod vysokým tlakom až do 50 atm. Následne je tavenina smerovo ochladzovaná rýchlosťou od 0,05 do 5 mm/s. Vplyvom tuhnutia dochádza k eutektickej reakcii, počas ktorej vzniká tuhý kov a vodík, čo vedie k vytvoreniu porézneho materiálu s pórmí vyplnenými vodíkom. Vlastnosti pórov, ako ich objemový podiel a orientácia, sú výrazne závislé na chemickom zložení, tlaku, teplote a mnohých iných faktoroch. Z toho dôvodu je výroba značne nákladná a zatiaľ nie je ani komerčne využívaná. Daný materiál sa označuje ako GASAR, prípadne GASERITE [10,11].

4.1.4 Tavenie kovového prášku

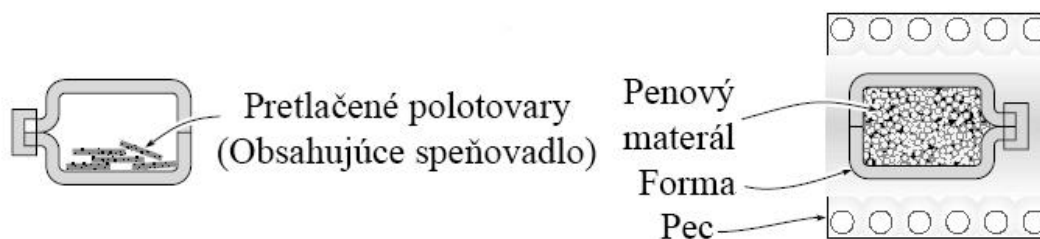
Metóda bola vyvinutá v Brémach (Nemecko). Často je zaradená k práškovej metalurgii, ale keďže penenie prebieha v tekutom stave, mala by byť zaradená do sekcie výroby z tekutého kovu [10].

Výrobný proces začína miešaním kovového prášku so speňovacím činidlom. Potom je zmes stláčaná, čím sa získa relatívne hustý polotovar. Stláčanie môže prebiehať všetkými spôsobmi ktoré zaručia, že speňovacie činidlo zostane spojené s kovovou maticou bez markantnej otvorenej pórovitosti. Preferovaný a v súčasnosti najekonomickejší spôsob je pretlačovanie. Ďalším krokom je zahriatie materiálu na teplotu blízku bodu tavenia použitého kovu. Tým dôjde k rozkladu speňovadla, ktoré je homogénne rozložené v celej matici. Uvoľnený plyn expanduje materiálom a vzniká tak vysoko porézna štruktúra, pričom priemer pórov sa pohybuje v rozmedzí od 1 do 5 mm. Čas potrebný na úplnú expanziu sa líši v závislosti na teplote a veľkosti polotovaru od niekoľkých sekúnd až po minúty [10,13]

U zliatin zinku a hliníku sa ako speňovacie činidlo používa hydrid zirkónia alebo titánu ($\text{ZrH}_2, \text{TiH}_2$). Je však možné využiť metódu aj pre iné kovy, ako napr. zliatiny cínu, zinku, olova, mosadz a iné. Komerčne sa malosériovej výrobe venujú nemecké firmy Schunk a Honsel, tiež rakúske spoločnosti Mepura a Neuman. Hliníkové peny vyrábané týmto spôsobom sú predávané pod obchodnými názvami Foaminal a Alulight [10,13].



Obr. 9 Miešanie prášku a činidla s následným pretlačovaním [11]

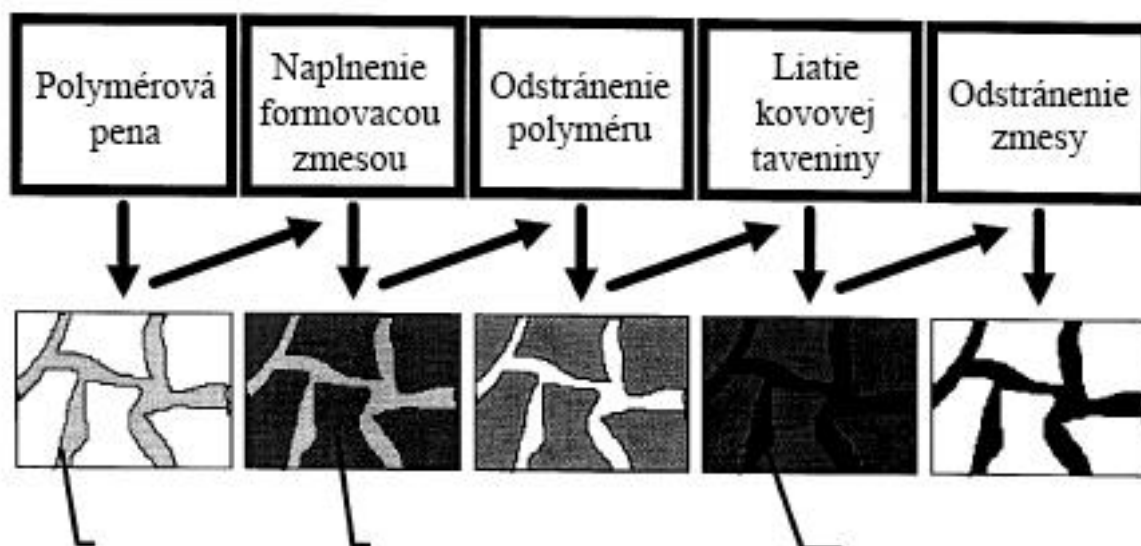


Obr. 10 Zahrievanie polotovarov v peci [11]

4.1.5 Odlievanie pomocou polymérovej peny

Kovové peny môžu byť vyrábané aj bez toho, aby dochádzalo k priamemu speneniu kovu. Využíva sa pri tom polymérová, napr. polyuretánová pena. Ak má však pena uzavreté póry, musí byť bezpodmienečne pretransformovaná na otvorené bunky. Táto pena je v ďalšom kroku naplnená dostatočne tepelne odolnou suspenziou, napr. zmesou mulitu, fenolovej živice a uhličitanu vápenatého. Po vytvrdnutí je polymérová pena tepelne odstránená a roztavený kov je naliaty do takto vzniknutého priestoru. Vďaka tomu skopíruje štruktúru pôvodnej polymérovej peny. Pokiaľ tavenina nevyplní úzke dutiny, tak je gravitačné odlievanie nedostatočné a je nutná dodatočná aplikácia zvýšeného tlaku, prípadne teploty. Po odstránení formovacej zmesi, napr. tlakom vody, získavame kovovú štruktúru, ktorá je presnou kópiou polymérovej peny.[10,11]

V súčasnej dobe sa výrobe venuje firma ERG a produkt je dostupný pod názvom DUOCEL [11].



Obr. 11 Postup odlievania pomocou polymérovej peny [10]

4.2 Výroba pien z tuhého kovu

K výrobe sa miesto taveniny používa pevný kov v práškovej forme. Prášok zostáva tuhý počas celého procesu a prechádza spekaním, prípadne inou formou spracovania. Tento fakt je významný z hľadiska štruktúry, pretože kým pri spracovaní taveniny je tendencia vzniku uzavretých pórov, u kovových práškov je to opačne, typická je prítomnosť otvorených pórov [10].

4.2.1 Spekanie kovových práškov a vlákien

Celý proces pozostáva z niekoľkých krokov : príprava kovového prášku, zhutnenie alebo sformovanie prášku a následné spekanie. Najčastejšie sa používa bronz, u ktorého sa teploty spekania pohybujú na úrovni 820 °C a poréznosť dosahuje 20 až 50 %. Výsledná pevnosť je však relatívne nízka. Jej zvýšenie sa uskutočňuje izostatickým lisovaním alebo valcovaním, čím dochádza k studenému zváraniu častíc k ich kontaktným miestam.

Pri použití hliníkových zliatin však nastávajú komplikácie, pretože hliník sa zvyčajne pokrýva oxidickou vrstvou, ktorá zabraňuje spojeniu jednotlivých častíc. Potlačenie tohto javu je možné deformáciou prášku počas lisovania, aby sa porušila vrstva oxidov a tým bolo umožnené spojenie medzi časticami. Alternatívou je prídanie pomocných látok, ako napr. medené alebo horčíkové prášky. Tie vytvoria eutektickú zliatinu s nízkou teplotou tavenia, ktorej spekanie prebieha pri 595 až 625 °C.

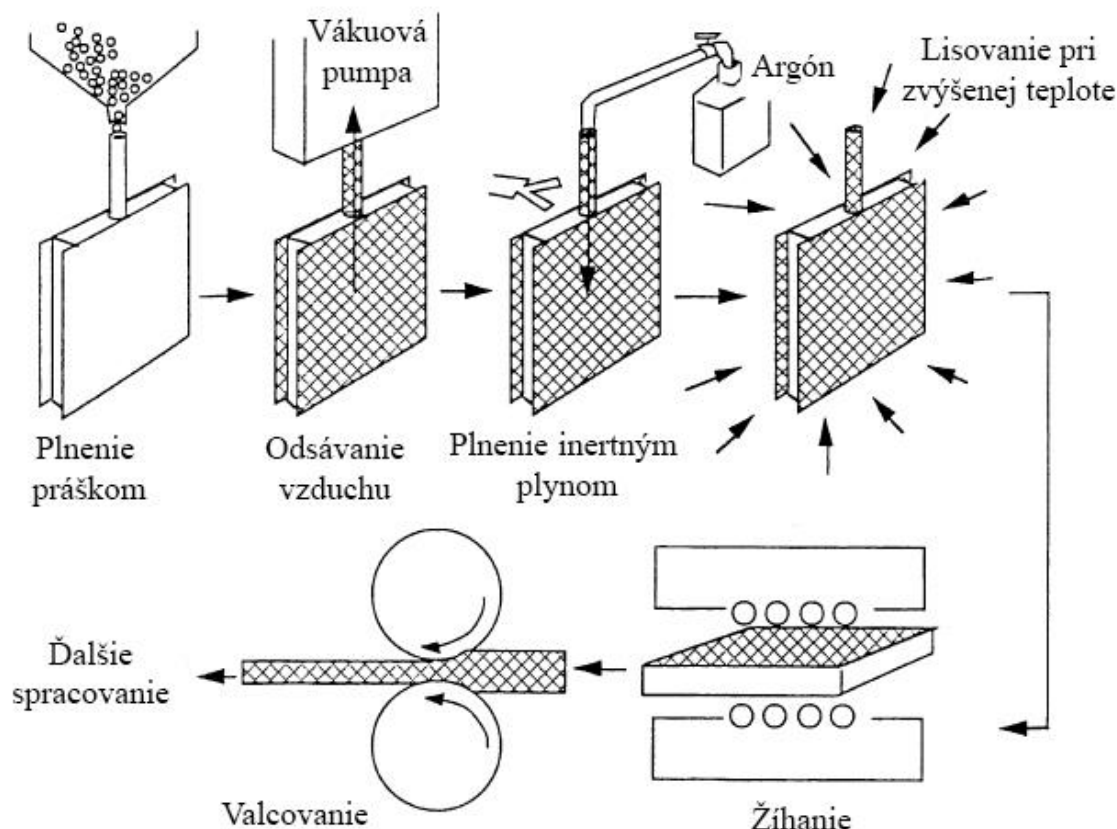
V súčasnosti je možné nahradiť prášky kovovými vláknami, čím sa získavajú nové možnosti výroby poréznych materiálov, ktoré sú komerčne dostupné [10].

4.2.2 Metóda zachytávania plynu

Metóda bola vyvinutá na výrobu materiálu s disperziou malých buniek obsahujúcich inertný plyn s vysokým tlakom. Po zahriatí sa zvyšuje tlak v póroch a tie expandujú pomocou tečenia okolitého kovu. Proces je v súčasnosti používaný firmou Boeing na výrobu sendvičových panelov s nízkou mernou hmotnosťou a poréznosťou až do 50 %.

V prvej časti výroby je nádoba naplnená kovovým práškom rovnakého materiálu. Potom je z nádoby vysatý vzduch a následne je napustená argónom pod tlakom 0,3 až 0,5 MPa. V ďalšom kroku je nádoba uzavretá a za tepla lisovaná na vysokú relatívnu mernú hmotnosť. Nastáva až osemnásobné zvýšenie tlaku plynu, pričom póry zaberajú menej ako 2 % celkového objemu. Nasledujúca časť zahŕňa žihanie pri 0,6 násobku teploty tavenia, ktoré môže trvať až 30 hodín. Počas žihania pomaly expandujú plynové póry, a teda znižujú svoj tlak až do dosiahnutia rovnováhy medzi tlakom plynu a pevnosťou materiálu. Týmto spôsobom je možné získať až 40% pórovitosť s veľkosťou buniek do 300 μm. Steny nádoby majú dvojité funkcie : okrem uzavretia prášku, tvoria aj vonkajšiu vrstvu s vysokou mernou hmotnosťou, čo umožňuje výrobu sendvičového materiálu zloženého z penového jadra a dvoch čelných plátov.

Vzhľadom na vysokú cenu vzácneho plynu a nákladné tepelné spracovanie sa na tento spôsob výroby používajú prevažne drahšie materiály, ako napr. titánové zliatiny [10,11,13].



Obr. 12 Postup výroby metódou zachytávania plynu [10]

4.2.3 Penenie suspenzií

Kovové peny môžu byť taktiež vyrábané prípravou suspenzie kovových práškov, penidiel a ďalších reaktívnych prísad. Suspenzia je zmiešaná a naliata do formy, kde je vystavená zvýšenej teplote. Vplyvom prísad a penidiel sa stáva viskózna a začína expandovať, kvôli pôsobeniu vznikajúceho plynu. Ak bol proces dostatočne stabilizovaný, suspenzia je zachovaná a môže byť kompletne vysušená. Potom nasleduje spekanie, pričom sa sformuje kovová pena požadovaných pevnostných charakteristík. K výrobe sa najčastejšie používajú hliníkové prášky spolu s kyselinou ortofosforečnou a hydroxidom hlinitým, prípadne kyselina chlorovodíková, ktorá zohráva úlohu penidla. Takto získaný materiál dosahuje relatívnu mernú hmotnosť do približne 7 %. Stále však pretrvávajú problémy spojené hlavne s nedostatočnou pevnosťou a častým praskaním peny.

Technologický postup môže byť tiež aplikovaný ako alternatívny spôsob výroby kovovej peny s otvorenou štruktúrou. V tomto prípade, je polymérová pena s otvorenými pórmí ponorená do suspenzie s obsahom zmesi práškov striebra a jeho oxidov. Takto obalená pena je v ďalšom kroku vysušená a následne zahriata na teplotu, pri ktorej dochádza k vypáleniu polyméru. Nasleduje spekanie častíc kovového prášku a tým sa sformuje výsledná tuhá kovová pena [10].

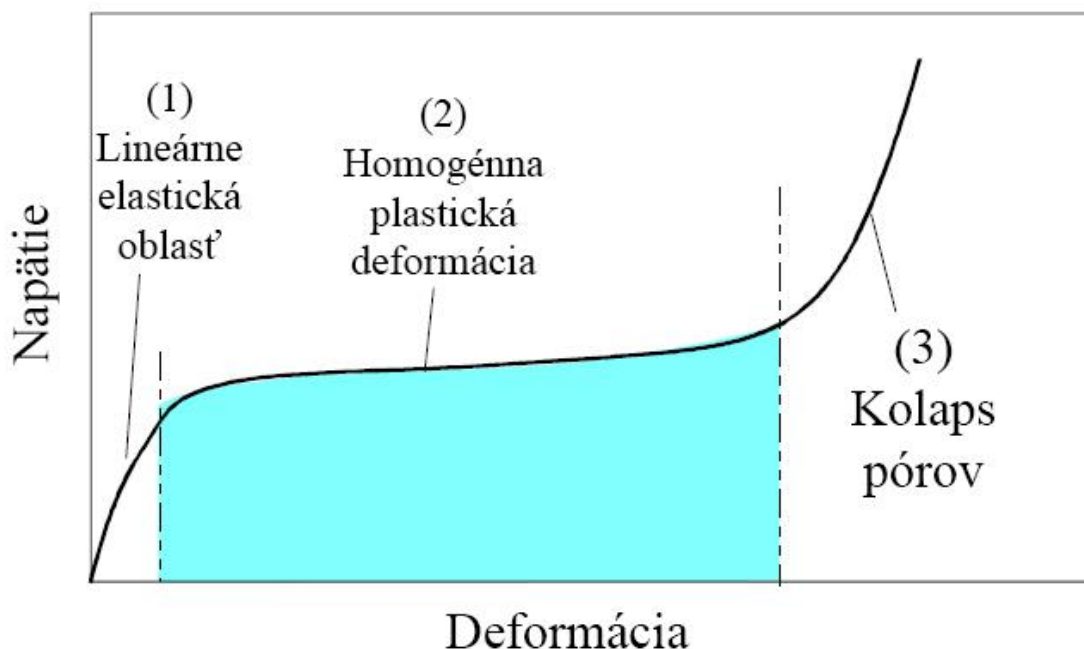
5 Vlastnosti hliníkových pien

Hliníkové peny sú izotropný materiál s niekoľkými nezvyčajnými vlastnosťami, ktoré z nich tvoria vhodný a perspektívny materiál pre určité technické aplikácie. Vďaka nízkej mernej hmotnosti sú v prípade uzavretej štruktúry schopné plávať na vodnej hladine. Ďalej vykazujú zníženú tepelnú a elektrickú vodivosť a taktiež nižšiu pevnosť v porovnaní s materiálom s obvyklou štruktúrou. Sú stabilné až do teploty tavenia. Z ekologického hľadiska sú netoxické a nehorľavé [13].

5.1 Mechanické vlastnosti

Vďaka poréznej štruktúre majú peny pri skúškach iné správanie v porovnaní s konvenčnými kovmi. Preto nemôžu byť použité bežné testovacie metódy. Za najvýznamnejšiu metódu skúšania s relevantnými výsledkami je tlaková skúška, ktorej výstupom je krivka závislosti napätia na deformácii, ktorá je typická ako pre otvorenú, tak aj uzavretú štruktúru peny [13].

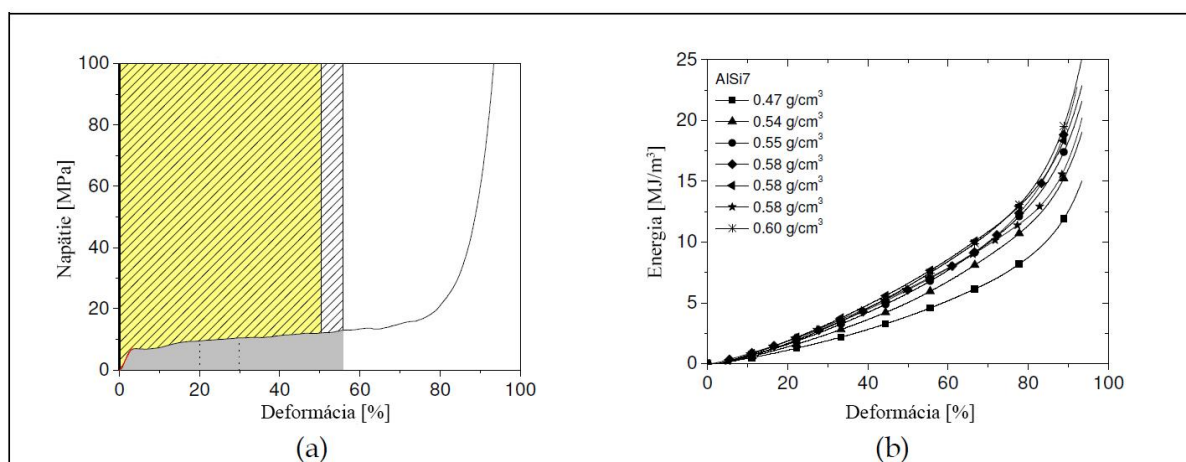
Závislosť je možné rozdeliť na tri hlavné oblasti. Prvou je lineárne elastická oblasť, kde dochádza k približne lineárnemu nárastu napätia s rastúcou deformáciou. Prebieha pružná deformácia stien pórov. Nasleduje druhá oblasť plastickej deformácie, kde dochádza k trvalej deformácii a lámaniu stien pórov. Zvyšovanie deformácie si však v tomto prípade nevyžaduje zvyšovanie záťaže. Poslednou oblasťou je zhustenie peny, kde prebieha rapídne zvýšenie zaťaženia po tom, ako boli póry deformované a stlačené k sebe [15].



Obr. 13 Typický diagram závislosti napätia na deformácii hliníkových pien [13]

Bolo preukázané, že pevnosť v ťahu pien je takmer rovnaká ako napätie, pri ktorom dochádza k splošteniu materiálu (druhá oblasť diagramu). Preto je dané napätie považované za jednu z hlavných a charakteristických vlastností pien [13].

Kvôli špeciálnemu tvaru krivky, hlavne v súvislosti s rozsiahlou strednou oblasťou, sú kovové peny schopné absorpcie obrovského množstva energie pri relatívne nízkom napätí. Správajú sa teda presne ako polyuretánové peny, avšak ich pevnosť je približne 30-násobne vyššia. Absorpčné schopnosti je možné dostatočne odhadnúť z veľkosti plochy pod krivkou. Množstvo pohltenej energie je podstatne vyššie ako pri štandardných hliníkových zliatinách, pričom väčšina tejto energie je nevratne premenená na plastickú deformáciu peny. Na rozdiel od bežného materiálu, ktorý značný podiel tejto energie premení na vratnú elastickú deformáciu, takže po odstránení záťaže je energia spätne uvoľnená [15].



Obr. 14 a) Absorbovaná energia na jednotku objemu tvorí plochu pod krivkou
b) krivky absorbovanej energie peny zo zliatiny AlSi₇ pri rôznych merných hmotnostiach [15]

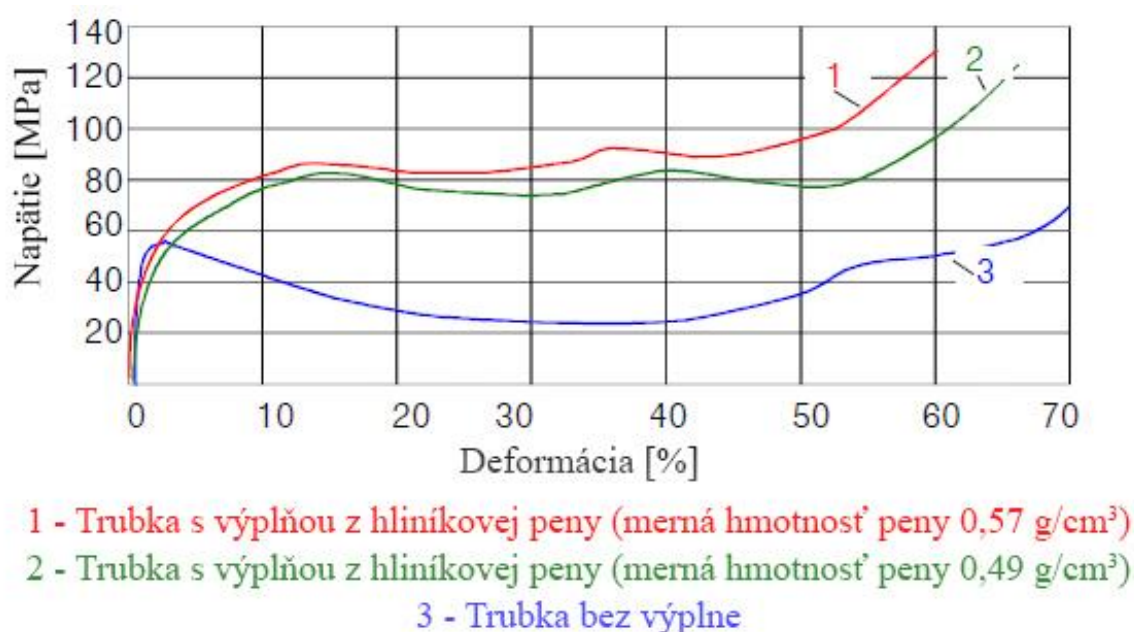
Existuje množstvo faktorov, ktoré ovplyvňujú správanie kovovej peny počas tlakovej skúšky. Najvýraznejšie sú merná hmotnosť peny a tiež zliatina, z ktorej je vytvorená. V prípade mernej hmotnosti bolo zistené, že so stúpajúcou mernou hmotnosťou stúpa pevnosť a tým aj množstvo pohltenej energie. Vzhľadom na chemické zloženie platí, že nižšie hodnoty dosahujú peny vyrobené z čistého hliníka. Zaujímavý je aj fakt, že vlastnosti sa takmer nelíšia v prípade štruktúry s otvorenými alebo uzavretými pórmí, pokiaľ porovnávame peny s rovnakým zložením a mernou hmotnosťou. [13,15]

5.1.1 Vplyv tepelného spracovania

Pokiaľ je pena vyrobená z kovu alebo zliatiny, ktoré môžu byť vytvrdené tepelným spracovaním, principiálne môže byť takto zvýšená aj tvrdosť peny. Avšak, tepelné spracovanie kovových pien nie je ani zďaleka tak jednoduché ako u konvenčných hustých, kovových materiálov. Problémom je práve charakteristická vlastnosť týchto pien, a to ich nízka tepelná vodivosť, ktorá navyše lokálne kolíše z dôvodu nerovnomerného rozdelenia mernej hmotnosti. To spôsobuje komplikácie najmä pri kalení, pri ktorom sú vplyvom nízkej a nerovnomernej vodivosti dosahované nízke rýchlosti ochladzovania, takže nie je možné vždy zabrániť precipitačným procesom. Navyše, je nevhodné používať vodu ako kaliace prostredie, pretože pri vniknutí do peny ju môže čiastočne poškodiť. Alternatívou je aplikovanie stlačeného vzduchu, ktorým ale získame podstatne nižšiu ochladzovaciu rýchlosť. Z daných dôvodov je teda tepelné spracovanie v súčasnosti nevhodné a nepoužiteľné na zlepšenie pevnostných charakteristík pien [16].

5.1.2 Vplyv povrchovej vrstvy

Povrch peny má taktiež výrazný vplyv na charakteristické vlastnosti. Kovová pena, ktorá je pokrytá hustým odlievaným povrchom tvorí sendvičový materiál. V tomto prípade sa povrchová vrstva správa ako výstuha, vďaka ktorej nastáva zvýšenie pevnosti v porovnaní so samotnou penou. Tento jav je aplikovaný napr. u sendvičového materiálu, zloženého z oceľových alebo hliníkových plechov, pričom priestor medzi nimi vyplní hliníková pena. Analogicky je zlepšovaná aj tuhosť trubiek pomocou penovej výplne vnútorného priestoru. Pena zabraňuje predčasnému stlačeniu trubky a tým zvyšuje množstvo energie, ktorú je schopná absorbovať. Navyše, v pokročilých štádiách deformácie, keď je už pena úplne stlačená, zamedzuje ďalšej deformácii. Z toho vyplýva, že trubka s menším priemerom a penovou výplňou disponuje zhodnými absorpčnými schopnosťami ako prázdna trubka väčšieho priemeru [13].



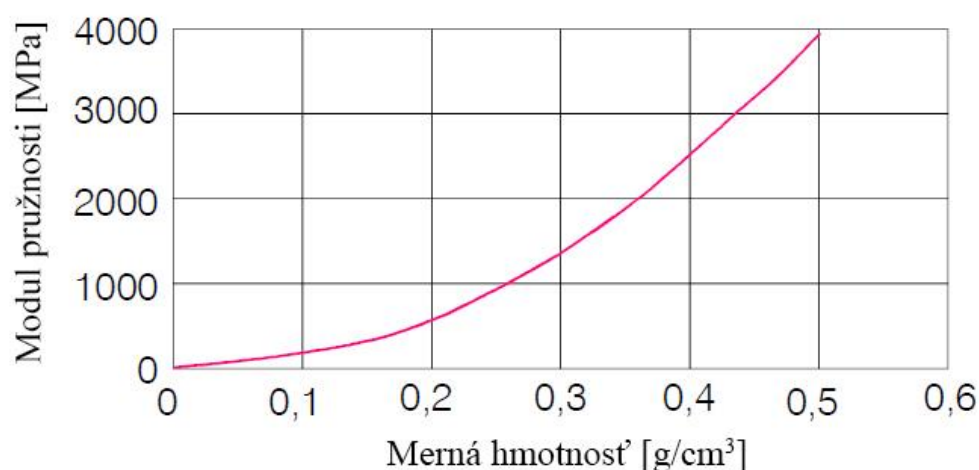
Obr. 15 Diagram závislosti napätia na deformácii pre trubky s a bez výplne kovovou penou [13]

Technológia vystužovania zo sebou prináša aj niekoľko ďalších výhod. V priebehu výroby má výstuha stabilizujúci účinok, takže nedochádza k zmršťovaniu peny počas procesu speňovania. Ďalej nastáva markantné zvýšenie lomovej húževnatosti a taktiež ohybovej tuhosti. Nemenej dôležité je zjednodušenie spájania penových komponentov a tým je uľahčená aj výroba tvarovo zložitejších súčiastok, zhotovených dokonca aj technológiou zvarovania. Podstatný je tiež fakt, že u oceľových plechov, ktoré sú vyplnené hliníkovou penou, je možné do určitej miery využiť technológiu tvárnenia a tým ich pozmeniť na požadovaný tvar.

Pochopiteľne je však spojená aj s niekoľkými negatívami. Predovšetkým ide o nežiadúce zostatkové napätia v súčiastkach a možnosť tvorby korózie na rozhraní hliníkovej peny a výstuhy. Potenciálnym problémom môže byť aj komplikovaná recyklácia [1].

5.1.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti je spolu s geometriou podstatnou charakteristikou pre odhad tuhosti finálneho produktu. Značným množstvom vykonaných skúšok bolo zistené, že v prípade pien má modul tendenciu zvyšovať sa spolu s rastúcou mernou hmotnosťou. Čo je výhodné, nakoľko tak vzniká možnosť modifikácie modulu pre špecifické technické aplikácie pomocou zmien mernej hmotnosti danej kovovej peny. Dokonca v prípade špecifického modulu, teda pomeru E/ρ , je jeho hodnota podstatne nižšia ako u bežného hliníku. Napr. pre penu vyrobenú z hliníku 99,5 % čistoty má hodnotu približne $6 \text{ GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$, zatiaľ čo pre hliník pôvodnej mernej hmotnosti až $25 \text{ GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$ [13].



Obr. 16 Graf závislosti modulu pružnosti kovovej peny na mernej hmotnosti [13]

5.1.4 Pevnosť v ťahu

K rozsiahlym aplikáciám súčiastok z penového hliníku často nedochádza práve z dôvodu nedostatočnej pevnosti v ťahu. Príčinou je nezanedbateľné množstvo mikrotrhlín a nerovnomerná hrúbka povrchovej vrstvy, čo vedie k lomu už pri relatívne slabom mechanickom namáhaní. Riešením je, že ťahom namáhaný povrch je vystužený výstuhami, a to rôznymi kovovými, prípadne keramickými mriežkami, sieťkami alebo dierovanými plechmi. Výstuha sa pri výrobe vloží do dutiny formy a po zaplnení formy ju pena obtečie, čím zostane zaliata v povrchovej vrstve výrobku. Pri dômyselnom vystužení je možné dosiahnuť konfiguráciu, pri ktorej budú ťahové napätia prenášané práve výstuhou a pena bude zaťažovaná len tlakovo.

Pokročilejšou technológiou je čiastočné a gradientné vystužovanie podľa toho, aké u súčasti predpokladáme namáhanie. Tak je možné dosiahnuť potrebné mechanické vlastnosti komponentu pri minimálnej hmotnosti [1].

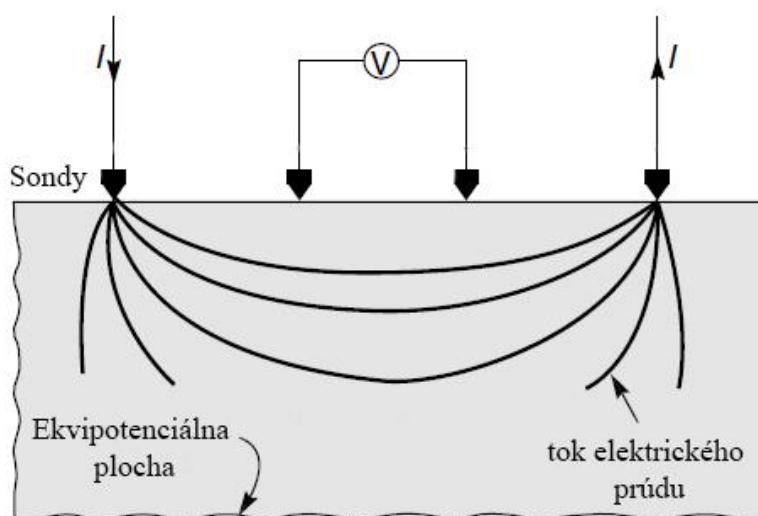
5.2 Fyzikálne vlastnosti

Fyzikálne a chemické vlastnosti sa odlišujú od tých u konvenčných materiálov, čo však vytvára priestor pre ich využitie v rozmanitých technických aplikáciách [13].

5.2.1 Elektrická vodivost'

Elektrická vodivost' kovových pien je nižšia ako jednotlivých kovov z ktorých sú vyrobené, pochopiteľne z dôvodu nevodivosti pórov obsahujúcich plyn. Aj keď je redukovaná, je stále adekvátne pre poskytnutie dostatočnej schopnosti elektrického uzemnenia a tienenia elektromagnetického žiarenia. Je zrejmé, že vodivost' stúpa spolu so stúpajúcou relatívnou mernou hmotnosťou, avšak z meraní bolo zistené, že závislost' nie je lineárna.

Meranie vodivosti sa uskutočňuje na tenkom plechu z kovovej peny pomocou rozmiestnenia štyroch sond. Dve z nich slúžia na privod elektrického prúdu a ďalšie dve nachádzajúce sa medzi nimi, sú použité na zmeranie rozdielu elektrického potenciálu [11].



Obr. 17 Schematický náčrt princípu merania elektrickej vodivosti [11]

5.2.2 Tepelná vodivost'

Tepelná vodivost' kovových pien je rádovo vyššia ako ich nekovové ekvivalenty, takže všeobecne nie sú vhodné na jednoduchú tepelnú izoláciu, ale sú schopné poskytnúť istú úroveň požiarnej ochrany. Vodivost' pien s uzavretou štruktúrou je však 8 až 30 násobne nižšia v porovnaní s hustým materiálom tvoreným rovnakou zliatinou, no pri uvažovaní zoxيدovania povrchovej vrstvy kovu môže dôjsť ešte k ďalšiemu zníženiu jej hodnoty. Dôležitým faktom je, že na rozdiel od nich, peny s otvorenou štruktúrou je možné použiť na markantné zlepšenie prenosu tepla v tepelných výmenníkoch [11,13].

Rozdiel v hodnote koeficientu teplotnej rozťažnosti je v prípade kovovej peny a hustého materiálu zanedbateľný, čo znamená že nedôjde k strate tvaru danej peny vplyvom zvýšenej teploty [13].

5.2.3 Absorpcia zvuku a potlačenie vibrácií

Kovové peny majú všeobecne lepšie schopnosti mechanického tlmenia ako plný materiál z ktorého sú vyrobené, čo však nie je to isté ako absorpcia zvuku. Do nej totiž zahrňujeme deje pri ktorých nie je zvuková vlna odrazená ani šírená, takže jej energia je pohltaná materiálom. Existuje mnoho spôsobov ako to uskutočniť : priamo - pomocou mechanického tlmenia materiálu, termo-elastickým tlmením, prípadne viskóznymi stratami počas prúdenia vzduchu do a z pórov vplyvom tlakovej vlny. Zvuk je meraný v decibeloch, teda v logaritmickej

jednotke, vzhľadom na schopnosti ľudského ucha. Výsledkom toho je, že koeficient zvukovej absorpcie s hodnotou približne 0,5 (čo odpovedá pohlteniu 50 % energie) je obzvlášť nedostatočný. Aby sme sa priblížili relatívne zreteľnej efektívnosti, mal by koeficient presahovať hodnotu 0,9, čo najkvalitnejšie zvukové izolanty bez komplikácií dosahujú.

U pien sa koeficient pohybuje približne do 0,85, čo je slušná charakteristika, nie však v porovnaní s materiálmi, ako napr. sklenené vlákna. Podstatne významnejšie ale je, že vysoká ohybová tuhosť a nízka hmotnosť peny, prípadne materiálu vyplneného penou, vedie k vysokým vlastným frekvenciám, takže je náročné ich vybudieť. Z toho vyplýva, že zatiaľ čo kovové peny majú potenciál využitia týchto charakteristík v technických aplikáciách, ďaleko zaujímavejšia je kombinácia týchto vlastností s ostatnými parametrami, ako je tuhosť, nízka hmotnosť, protipožiarna ochrana a v neposlednom rade chemická stabilita [11].

5.2.4 Chemické vlastnosti

Hliníkové peny sú nehorľavé a pod vplyvom vysokej teploty neuvoľňujú do okolia jedovaté plyny. Korózne správanie je prakticky zhodné s plným materiálom, z ktorého sú zhotovené. Táto oblasť však stále podlieha ďalším výskumom a pozorovaniam [13].

6 Spracovanie kovových pien

6.1 Rezanie

Bežné metódy trieskového obrábania (rezanie, frézovanie, vŕtanie) môžu spôsobiť značné poškodenie povrchu peny. Vhodnejšou alternatívou je elektroiskrové obrábanie, chemické frézovanie alebo rezanie vodným lúčom. Tieto metódy je nutné využiť aj pri príprave testovacích vzoriek (pokiaľ nie sú rozmerné), pretože poškodený povrch by nezanedbateľne ovplyvnil vlastnosti zisťované pri skúške [11].

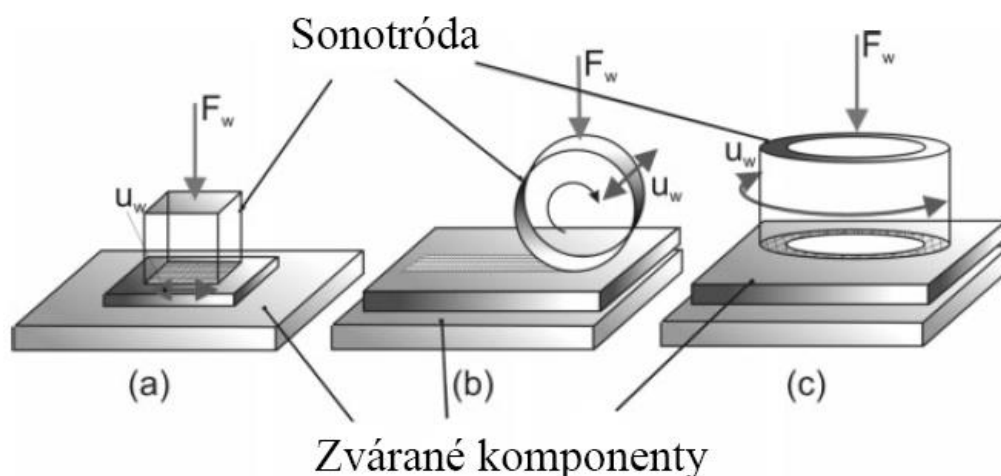
6.2 Spájanie

Kovové peny môžu byť spájané spájkovaním a zváraním. Ich porézna štruktúra má určité podobnosti so štruktúrou dreva, čo znamená, že môžu byť spájané aj spôsobmi spravidla používanými u dreva, ako napr. : spojenie skrutkami do dreva, lepenie a taktiež vložkovanie spojovacieho materiálu [11].

6.2.1 Zváranie

Konvenčné metódy spájania často vedú k degradácii vlastností materiálu. Na druhej strane, ultrazvukové zváranie je možné aplikovať bez znehodnotenia charakteristík, pretože celá operácia prebieha v pásme teplôt pod bodom tavenia spájaných materiálov a pri pomerne nízkom vyvíjanom tlaku.

Ultrazvukové zváranie teda umožňuje spojenie komponentov v tuhom stave, takže nedochádza k žiadnemu taveniu materiálu. Komponenty zvaracieho zariadenia sú podobné, či už sa jedná o bodové, švové, prípadne torzné zváranie [17].

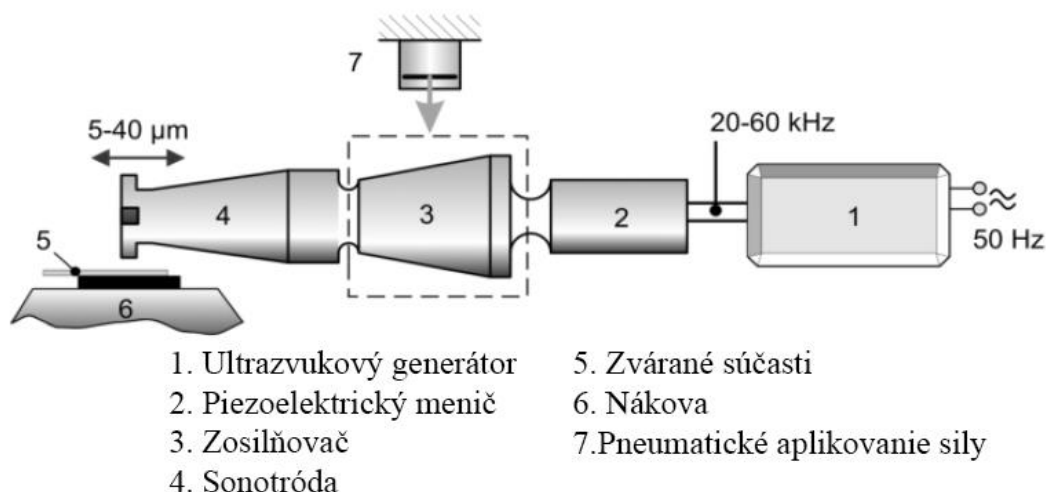


Obr. 18 Typy ultrazvukového zvárania : a) bodové, b) švové, c) torzné [17]

Hlavnými komponentami z ktorých sa celé zvaracie zariadenie skladá sú : ultrazvukový generátor, ktorý slúži na získanie vysokofrekvenčného striedavého napätia, zosilňovač, ktorého úlohou je zabezpečenie požadovanej amplitúdy kmitania zvaracieho nástroja a samotný zvarací

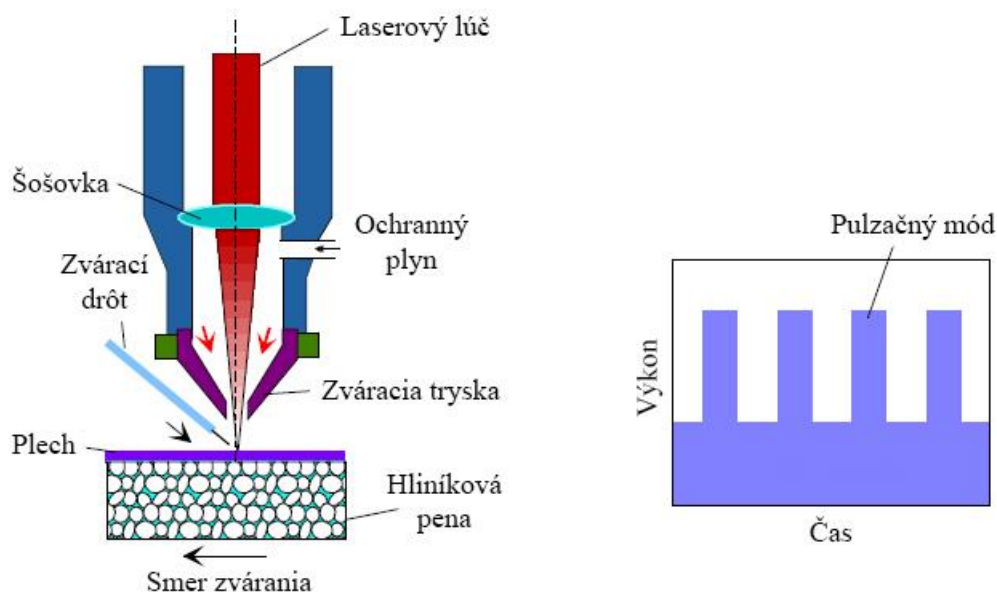
nástroj, ktorý sa nazýva sonotróda. Optimálnym návrhom zosilňovača a spomínanej sonotródy je možné dosiahnuť nevyhnutnú amplitúdu oscilácie v rozsahu 5 až 40 μm . Pri bodovom zváraní sú komponenty umiestnené pod oscilujúcu sonotródu, s ktorou sú následne v kontakte pri pôsobení statického tlaku približne 2 až 15 MPa, čím produkuje vysokofrekvenčné trenie v zvaranej oblasti. Daný proces porušuje oxidickú vrstvu na povrchu komponentu, čiže zabezpečuje priamy medzi-atomárny kontakt naprieč celý rozhraním. Dokonca prebieha aj zvyšovanie teploty a zmäkčenie rozhrania, vďaka čomu pod vplyvom aplikovaného tlaku vzniká bodový zvar.

Aby bol celý proces úspešný, je však nutné zvážiť niekoľko faktorov. Medzi faktory ovplyvňujúce proces patria : množstvo zvaracej energie, amplitúda sonotródy a veľkosť prítlačnej sily. Prispôbením týchto parametrov je možné vytvoriť vysoko pevné spoje. Avšak, netreba zabúdať ani na faktory súvisiace s obrobkom, a to : tvrdosť materiálu, Youngov modul pružnosti a merná hmotnosť. V neposlednom rade tiež geometria obrobku, hlavne toho, ktorý je v bezprostrednom kontakte s nástrojom. Pre ten platí zásadné pravidlo, že jeho hrúbka by nemala prekročiť 3 mm v prípade zvarenia hliníkovej peny s plechom. V opačnom prípade nedôjde k požadovanému relatívnemu pohybu komponentov. Medzi ostatné faktory môžeme zaradiť topografiu jednotlivých súčastí a prítomnosť oxidickej vrstvy a nečistôt [17].



Obr. 19 Schéma ultrazvukového zvaracieho zariadenia [17]

Existuje však aj iný vhodný spôsob zvárania kovových pien, a to laserové. Táto technológia je pokročilá v tom, že počas procesu je do peny dodávané veľmi malé množstvo tepla, čo znamená, že nenastáva poškodenie štruktúry, ktorá tak zostáva stabilná. Počas procesu je zvarací drôt umiestnený pred laserovou hlavou (pozdĺž smeru zvarania). Výskumy a testy ukázali, že tento typ technológie je vhodný pre spojenie hliníkovej peny s hustým plechom. V porovnaní so vzorkami, ktoré boli k sebe lepené, vykazujú zvárané spoje výrazne vyššiu pevnosť [13].



Obr. 20 Schematické znázornenie laserového zvarania hliníkovej peny s plechom a módu, v ktorom proces prebieha [13]

6.2.2 Adhezíva

Peny môžu byť taktiež spojené lepením, pričom takto vzniknuté spoje sú zvyčajne pevnejšie ako samotná pena. Pochopiteľne však existuje niekoľko nedostatkov, a to predovšetkým nízka teplotná stabilita, rozdielny koeficient rozťažnosti či pravdepodobnosť vzniku bariéry voči tepelnej a elektrickej vodivosti. Navzdory nevýhodám, umožňuje lepenie pomerne efektívne a jednoduché vytvorenie spojov. Štandardne je využívané napr. pri konštrukcii sendvičových panelov [11].

7 Technické aplikácie

V súčasnosti existujúce praktické aplikácie kovových pien pokrývajú široké spektrum možností a neustále prebieha vývoj nových oblastí ich využitia. Je preto náročné uviesť všetky aktuálne a potenciálne uplatnenia, avšak je možné venovať pozornosť viacerým, a tak identifikovať okolnosti, pri ktorých je ich použitie výhodné [20].

7.1 Automobilový a dopravný priemysel

Automobilový, resp. dopravný priemysel získava mnohé benefity z vývoja ľahkých materiálov. Pri veľkosériovej výrobe však nejde len o materiálové vlastnosti a cenu, ale aj o ďalšie technické a strategické aspekty, ako napr. nevyhnutnosť zmeny dizajnu komponentov, schopnosť integrácie do systému a taktiež dostupnosť dodávateľov. Popri množstve prototypov už samozrejme prebieha aj početná sériová výroba [18].

7.1.1 Crashbox

Tzv. crashbox je komponent slúžiaci k absorpcii nárazovej energie pri stredných rýchlostiach, čím redukuje finančné a časové náklady na opravu vozidla. Je umiestnený medzi nárazovým nosníkom a prednou časťou rámu vozidla. Pozostáva z hliníkového alebo oceľového profilu, ktorý je vyplnený hliníkovou penou. K hlavným výhodám patrí :

- Eliminácia poškodenia pomocou absorpcie energie v rýchlostiach do 20 km/h
- Dochádza k lepšiemu pohlteniu ako pri nevyplnených profiloch
- Tým, že pohltí energiu v kratšej vzdialenosti umožňuje viac voľnosti pri navrhovaní
- Správa sa rovnako bez ohľadu na zmeny rýchlosti a teploty [19]



Obr.21 Ukážka deformovaného crashboxu štvorcového prierezu a nedeformovaného s kruhovým prierezom, oba vyplnené hliníkovou penou SAF od firmy Cymat [19]

Z obrázku je zrejma aj druhá funkcia penovej výplne okrem absorpcie – spôsobuje, že sa profil pri plastickej deformácii správa odlišne, dochádza k jeho skladaniu a tým sa opäť zvyšuje množstvo pohltenej energie v porovnaní s prázdny komponentom [19].

7.1.2 Teleskopický zdvíhací systém

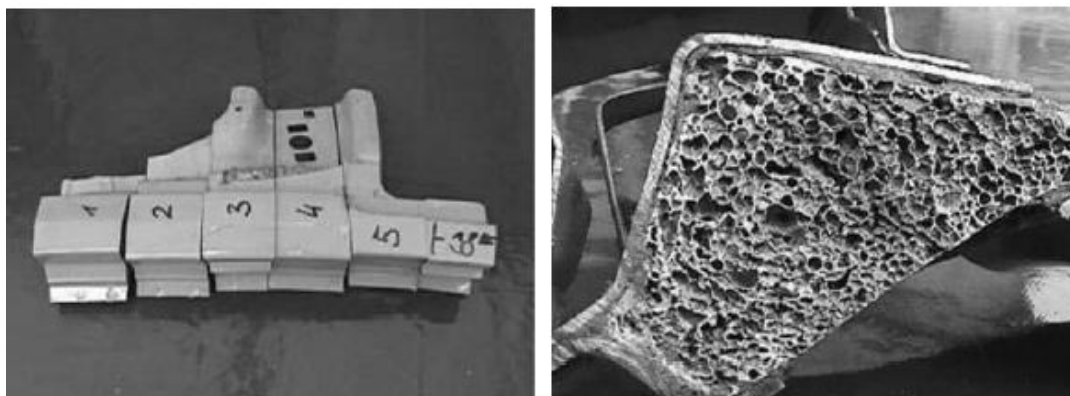
Firma Teupen v Nemecku vyvinula podpory konštrukcie teleskopického ramena pre pracovnú plošinu. Cieľom bolo zvýšenie pracovnej výšky z 20 na 25 m a horizontálny rozsah až na 11 m, pričom bolo nutné udržať celkovú hmotnosť pod hodnotu 3500 kg, aby mohlo byť vozidlo v Európe zaradené do skupiny B vodičského oprávnenia. Podpora pozostáva z 6 plochých panelov typu AFS ukrytých v plechovom ráme. Samotná konštrukcia je vysoká až 2,5 m a úspešne zvládla záťažové testy bez porušenia. Výraznou výhodou je až 50 % úspora hmotnosti v porovnaní s konvenčným riešením z ocele, pričom hmotnosť sa ustálila na 110 kg. Ročne je zhotovených až 100 kusov [21].



Obr. 22 Vozidlo s pracovnou plošinou s podporou z hliníkovej peny [21]

7.1.3 Výplň stĺpikov karosérie

Pena tiež môže byť vložená do tzv. A a B stĺpikov karosérie motorových vozidiel, v ktorých je upevnená buď pomocou adhezív, alebo expandujúcej polymérovej peny, prípadne mechanickým spôsobom. Medzi hlavné prínosy daného riešenia patrí až trojnásobné zvýšenie ohybovej sily v porovnaní s dutými stĺpikmi, schopnosť značného pohltienia energie pri bočných nárazoch a prevrátení vozidla, zlepšenie parametrov pri testoch stláčania strechy, možná redukcia hmotnosti znížením podielu ocele v konštrukcii [19,24].



Obr. 23 Profil A-stĺpiku vyplnený hliníkovou penou, vpravo prierez a štruktúra peny [22]

7.1.4 Vlakové kabíny

Inžinieri v Chemnitzi (Nemecko) vyvinuli prototyp kabíny vysokorýchlostného vlaku zo sendvičového materiálu, ktorý pozostáva z 2 mm hrubých hliníkových plechov, medzi ktorými je 25 mm vrstva kovovej peny z horčíku, hliníku a medi. Výsledkom je až 20 % zníženie hmotnosti v porovnaní s bežne používanými sklenenými vláknami. Významné však bolo zlepšenie odolnosti voči nárazu, hlavne pri zrážkach kabíny s malými objektmi, ako sú kamene alebo vtáky, keďže zrážky takýchto vlakov sú veľmi zriedkavé. Pri nárazových skúškach však bolo zistené podstatné zvýšenie bezpečnosti cestujúcich pri kolízii - rozsah zranenia hlavy bol redukovaný až o 80 % použitím hliníkovej peny v opierkach sedadiel [23].



Obr. 24 prototyp vlakovej kabíny zo sendvičového materiálu [23]

7.1.5 Cyklistické kľuky

Sendvičový materiál bol použitý aj na prototyp kľúk pre závodné bicykle. Zatiaľ čo konvenčné riešenia zhotovené z hliníkovej zliatiny 6082 sa vyznačovali hmotnosťou nad 300 g u najľahších modelov dostupných na trhu, pomocou kovovej peny bola dosiahnutá váha 222 g, čo znamená 30 % pokles. Daný rozdiel je považovaný za obrovský úspech, keďže vo vrcholovej cyklistike sú rozhodujúce už rozdiely v desatinách gramu. Masovej produkcii však stále bráni nákladná výroba a nutný dizajnový vývoj, ukrýva však značný potenciál [21].

7.1.6 Kapota automobilu

Stále zvyšujúce sa nároky na bezpečnosť účastníkov cestnej premávky a v súčasnej dobe hlavne chodcov, je možné splniť integrovaním hliníkovej peny do kapotáže. Ku kľúčovým výhodám takéhoto riešenia môžeme zaradiť :

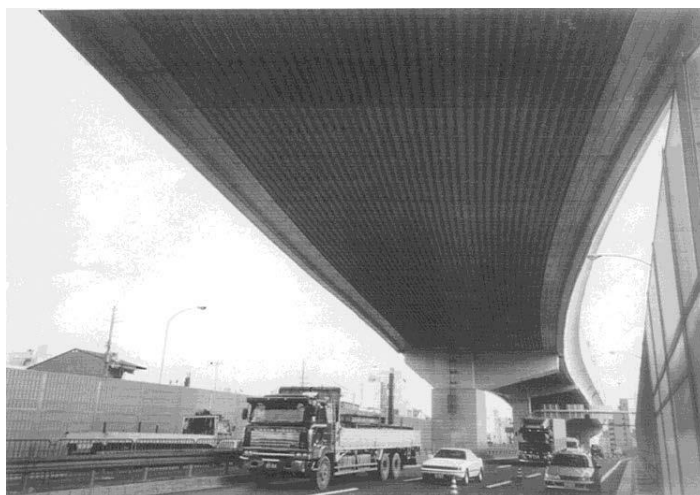
- Perfektná absorpcia energie pri možných zraneniach hlavy chodca
- Riešenie je pasívne a jednoduché v porovnaní s komplexnými aktívnymi riešeniami, ako je napr. airbag
- Nenastáva spätný odskok materiálu po deformácii, čo znamená, že pri náraze je pohyb hlavy chodca postupne spomaľovaný a po zastavení nezíska spätnú akceleráciu v opačnom smere

- Mimo absorpčnej schopnosti disponuje stabilitou pri pôsobení tepla z motorového priestoru, taktiež tepelnou a zvukovou izoláciou [19]

7.2 Stavebný priemysel

7.2.1 Zvukovo izolačný materiál

Vďaka svojim schopnostiam pohlcovať zvuk si hliníkové peny nachádzajú uplatnenie aj v tejto oblasti. Medzi konkrétne prípady použitia môžeme spomenúť : zvukovú izoláciu vo výrobných halách a priestoroch, zvukové bariéry umiestňované popri cestných komunikáciách a železničných tratiach, izolovanie zo spodnej strany vyvýšených rýchlostných ciest a mostov, ale aj v tuneloch, prípadne v akustických miestnostiach a iných vnútorných priestoroch [26,27]. Valcovaná pena s obchodným názvom Alporas má dokonca koeficient absorpcie zvuku ekvivalentný so sklenou vatou s mernou hmotnosťou 25 kg/m^3 [25].



Obr. 25 Izolačná vrstva peny Alporas zo spodnej strany vyvýšeného viaduktu [25]

Takto upevnená valcovito tvarovaná štruktúra je schopná výrazného potlačania hluku z prechádzajúcich vozidiel, čím podstatne zlepšuje životné podmienky v okolitej zastavanej oblasti [25].



Obr. 26 Ochrana tunelovej konštrukcie pred hlukom [26]

7.2.2 Dekoračné účely

Bunková štruktúra kovových pien sa vyznačuje unikátnym a atraktívnym vzhľadom povrchu pre dizajnové účely. Uzavretá štruktúra s bublinkovým reliéfom povrchu alebo uzavretá štruktúra s prerezanou prvou vrstvou pórov, prípadne otvorená štruktúra, ktorej priehľadnosť závisí na veľkosti buniek a hrúbke materiálu, sa stali v posledných rokoch čoraz viac žiadané a zaujímavé pre architektonické využitie, obzvlášť pre použitie na fasády budov, zvyčajne s pomerne veľkou plochou. Okrem fasád však nachádzajú svoje miesto aj na rôznych pamätníkoch, podporných konštrukciách a iných. [18,26].



Obr. 27 Vchod do podzemia a zvonica vyrobená z peny Alusion [18]

7.3 Energetický priemysel

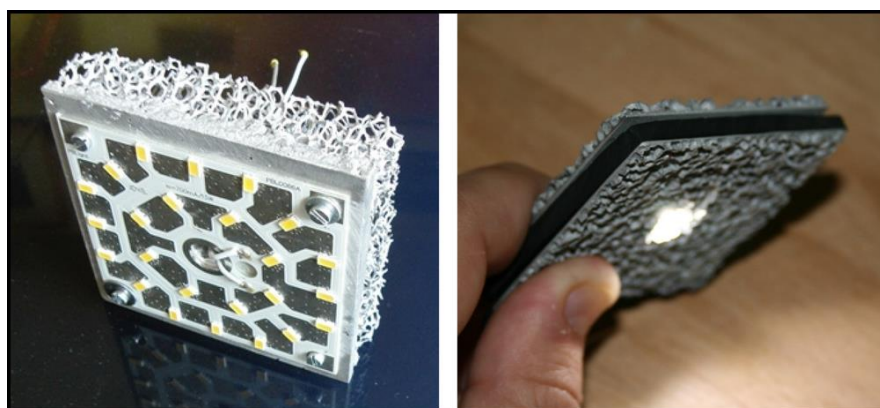
7.3.1 Tepelné výmenníky

Tepelné výmenníky predstavujú pre kovové peny vysoko atraktívny trh so značným potenciálom úspechu. Nadštandardná tepelná vodivosť kovov v kombinácii s rozsiahlou plochou kovovej peny poskytujú vysoko efektívny spôsob chladenia [18]. Táto vlastnosť je tak výrazná, že napr. pri použití niklovej peny na výrobu solárneho kolektoru, bol tento panel schopný pohltiť až 90 % dopadajúcej energie [20].

Jedna z pomerne špeciálnych aplikácií tepelných výmenníkov je pasívne chladenie, čo je oblasť, kde je dopyt po efektívnom chladení zvyšujúci sa každým dňom, z dôvodu rapídneho vývoja počítačov a hlavne mobilných elektronických zariadení. Vo svete sa postupne stáva štandardom LED osvetlenie, ktorá vytláča klasické žiarovky. Tie však potrebujú dostatočné chladenie pre udržanie ich efektivity a ochranu elektroniky. V tomto prípade však použitie aktívneho a často aj pomerne hlučného chladenia nie je vhodné, čím vzniká príležitosť pre kovové peny. Okrem funkčnosti dokážu poskytnúť aj pridanú hodnotu v podobe inovatívneho dizajnu [18].



Obr. 28 Rôzne typy tepelných výmenníkov na báze Al a Cu peny [18]



Obr. 29 Pasívne chladenie LED osvetlenia pomocou peny od firmy M-pore (vľavo) a pomocou peny AFS (vpravo) [18]

7.4 Ďalšie aplikácie

Hliníkové peny však disponujú potenciálom pre nespočetné množstvo ďalších praktických využití. Vzhľadom na ich vysokú tepelnú a chemickú odolnosť v kombinácii so schopnosťou zvukovej izolácie, môžu byť peny s otvorenou štruktúrou aplikované v tlmičoch vo výfukovom systéme vozidiel, filtroch pevných častíc dieselových motorov, katalyzátoroch. Taktiež sú využívané vo filtroch pre filtráciu plynov a kvapalín a kontrolu ich toku, či difúzie [18,20].

Zaujímavú variantu aplikácie je tienenie elektromagnetických vln na stenách a stropoch v miestnostiach s určitými špecifickými elektronickými zariadeniami [26].

Nezanedbateľná je ich možnosť použitia ako zlievarenské jadrá pri odlievaní hliníku. Sendvičový materiál vyrobený zo zinku, horčíku a hliníku tak môže nahradiť konvenčne používané pieskové jadrá [19].

8 Záver

Štandardný konvenčný hliník patrí už celé dekády k technicky najviac využívaným neželezným kovom. Pochopiteľne, v čistom stave je jeho využitie veľmi špecifické a zriedkavé. Prevažnú väčšinu aplikácií tvoria jeho zliatiny, ktoré sa v mnohých prípadoch osvedčili ako perfektný konštrukčný materiál, predovšetkým pre jeho pevnosť v porovnaní s jeho hmotnosťou resp. mernou hmotnosťou, ale pochopiteľne aj pre mnoho ďalších nemenej dôležitých pozitív. Avšak úspešné aplikovanie pórovitej štruktúry na tieto kovy so sebou prináša úplne nový smer ich vývoja a otvára tak priestor rozsiahlym inováciám od ktorých je realistické očakávať sľubné výsledky.

Porézному hliníku (ale aj iným kovom) je v posledných dekádach venovaná čoraz väčšia pozornosť. Unikátna kombinácia vlastností, z ktorých najzásadnejšie sú nízka hmotnosť spolu s vysokou pevnosťou a zároveň markantnou schopnosťou absorpcie nárazovej energie. Tieto ale aj mnohé iné vlastnosti spolu vytvárajú potenciál pre širokospektrálne uplatnenie v praxi. Najväčšie budúce úspechy sa dajú predpokladať pre automobilové a dopravné aplikácie, keďže v tomto segmente je jedným z vývojových trendov znižovanie hmotnosti a tým znižovanie spotreby palív a tvorby emisií, nakoľko ekológia je dnes kľúčovou témou. Druhým významným prínosom v tejto oblasti je zvyšovanie pasívnej bezpečnosti všetkých účastníkov premávky. Vzhľadom na ostatné charakteristické vlastnosti, predovšetkým izolačné, si nachádzajú svoju cestu aj v stavebnom priemysle a taktiež je ich potenciál využiteľný aj v energetike vďaka pozoruhodnej schopnosti prenosu tepla, v istej miere dokonca aj v spotrebnej elektronike. Príležitosť zrejme dostanú aj v rozsiahlom množstve iných odvetví.

Bohužiaľ, napriek prebiehajúcemu intenzívnemu výskumu a postupne vyvíjajúcej sa sériovej výrobe majú peny pred sebou ešte dlhú cestu, ktorá ich delí od ich očakávaného úspechu. Najzásadnejším problémom sú stále príliš vysoké náklady na ich výrobu, s ktorou sú stále spojené mnohé komplikácie. Je nutné spomenúť aj fakt, že reprodukovateľnosť parametrov stále nedosahuje očakávanú úroveň. Tieto dôvody, ale aj mnohé iné príčiny prispievajú k tomu, že mnoho technických využití, ktoré v sebe ukrývajú potenciál, si stále udržiavajú status prototypov. Pozitívne však je, že mnohé negatíva sú už minulosťou a mimo výrobu v malých sériách už nastali početné masové výroby v globálnej, čiže svetovej mierke.

Je teda očividné, že kovové peny nie sú žiadnou tzv. slepou vývojovou cestou. Sú právom považované za pokročilý materiál budúcnosti, ktorý môže pozitívne ovplyvniť náš každodenný život, pokiaľ mi aj naďalej zo strany výrobcov a výskumníkov bude venovaná zaslúžená pozornosť. Otázne nie je či vôbec, ale kedy nastane ich masívne rozšírenie vo všetkých segmentoch pre ktoré majú predpoklady, čiže ich čas s veľkou pravdepodobnosťou ešte len nastane...

9 Zoznam použitých zdrojov

- [1] MICHNA, Š., I. LUKÁČ, V. OČENÁŠEK, R. KOŘENÝ, J. DRÁPALA, H. SCHNEIDER, A. MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 80-890-4188-4.
- [2] GRGAČ, P., J. JANOVEC a M. DOMÁNKOVÁ. *Nové materiály a technológie*. Bratislava: STU, 2007. ISBN 978-80-227-2599-6. Dostupné také z: <https://sweb.mtf.stuba.sk>
- [3] Hliník. *Wikipédia* [online]. [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Hliník>
- [4] SLAVÍČEK, J. *Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu*. Brno, 2011. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [6] KRÍŽ, Rudolf. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v 8 svazcích*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1993. ISBN 80-858-2723-9.
- [7] Metal foam. *Wikipédia* [online]. [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam
- [8] BANHART, J. What are cellular metals and metal foams? *Metalfoam: Cellular metallic material* [online]. [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.metalfoam.net/index.html>
- [9] KÖNIG, A. H. AIVis - An Aluminium-Foam Visualization and Investigation Tool. *TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN* [online]. [cit. 2016-02-25].
- [10] BANHART, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* [online]. 2001, 46(6), 559-632 [cit. 2016-02-24]. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5. ISSN 00796425. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642500000025>
- [11] ASHBY, M. F., A. EVANS, N. A. FLECK, L. J. GIBSON, J. W. HUTCHINSON a H. N. G. WADLEY. Metal foams: a design guide. *Materials* [online]. 2002, 23(1), 119- [cit. 2016-02-24]. DOI: 10.1016/S0261-3069(01)00049-8. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306901000498>
- [12] MATIJASEVIC, B. a J. BANHART. Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent. *Scripta Materialia* [online]. 2006, 54(4), 503-508 [cit. 2016-03-01]. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.10.045. ISSN 13596462. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359646205006743>
- [13] KAMMER, C. Aluminium foam. *Training in Aluminium Application Technologies* [online]. 1999, , 24 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.european-aluminium.eu/talat/lectures/1410.pdf>
- [14] CYMAT. *Process: Technology & Innovation* [online]. 2009 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.cymat.com>

- [15] DUARTE, I. a M. OLIVEIR. Aluminium Alloy Foams: Production and Properties. *Powder Metallurgy* [online]. InTech, 2012 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.5772/34433. ISBN 978-953-51-0071-3. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/powder-metallurgy/aluminium-alloys-foams-production-and-properties>
- [16] BANHART, J a J BAUMEISTER. Deformation characteristics of metal foams. *Journal of Materials Science* [online]. 1998, **33**(6), 1431-1440 [cit. 2016-03-16]. DOI: 10.1023/A:1004383222228. ISSN 00222461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1004383222228>
- [17] BORN, C., G. WAGNER a D. EIFLER. Ultrasonically Welded Aluminium Foams/Sheet Metal – Joints. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2006, **8**(9), 816-820 [cit. 2016-04-05]. DOI: 10.1002/adem.200600083. ISSN 1438-1656. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200600083>
- [18] GARCÍA-MORENO, Francisco. Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Materials* [online]. 2016, **9**(2), 85- [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.3390/ma9020085. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/2/85>
- [19] Aluminum foam technology applied to automotive design. *CYMAT* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.cymat.com/PDFs/Cymat%20SAF%20Automotive%20Applications.pdf>
- [20] DAVIES, G. J. a Shu ZHEN. Metallic foams: their production, properties and applications. *Journal of Materials Science* [online]. 1983,**18**(7), 1899-1911 [cit. 2016-04-19]. DOI: 10.1007/BF00554981. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00554981>
- [21] BANHART, J. a H.-W. SEELIGER. Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2008, **10**(9), 793-802 [cit. 2016-04-19]. DOI: 10.1002/adem.200800091. ISSN 14381656. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200800091>
- [22] HANSSEN, A G, K STÖBENER, G RAUSCH, M LANGSETH a H KELLER. Optimisation of energy absorption of an A-pillar by metal foam insert. *International Journal of Crashworthiness* [online]. 2006, **11**(3), 231-242 [cit. 2016-04-19]. DOI: 10.1533/ijcr.2005.0396. ISSN 1358-8265. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1533/ijcr.2005.0396>
- [23] KORNEI, K. New Aluminum ‘Foam’ Makes Trains Stronger, Lighter, and Safer. *WIRED* [online]. 2014 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.wired.com/2014/12/aluminum-foam-trains/>
- [24] KRETZ, R., K. HAUSBERG a B. GÖTZINGER. Energy-Absorbing Behavior of Aluminum Foams: Head Impact Tests on the A-Pillar of a Car. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2002, **4**(10), 5 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1527-2648\(20021014\)4:10<781::AID-ADEM781>3.0.CO;2-U/epdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1527-2648(20021014)4:10<781::AID-ADEM781>3.0.CO;2-U/epdf)
- [25] MIYOSHI, T., M. ITOH, S. AKIYAMA a A. KITAHARA. ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2000, **2**(4), 179-183 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1527-2648\(200004\)2:4<179::AID-ADEM179>3.0.CO;2-G/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<179::AID-ADEM179>3.0.CO;2-G/abstract)

- [26] ALPORAS. *Shinko Wire Company* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z:
<http://www.shinko-wire.co.jp/product/alporas-eng.pdf>
- [27] Hlinikova pena / Alporas, Alu-foam , Alu-Schaum, Alu-Espuma /. *Metal Service Centre – IMC Slovakia, s.r.o.* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z:
http://www.hlinik.sk/pdf/hli_pena.pdf

10 Zoznam použitých skratiek a symbolov

AFS	Sendvič z hliníkovej peny (aluminum foam sandwich)	
E	Youngov modul pružnosti v ťahu	[GPa]
FCC	Kubická plošne centrovaná mriežka (face centered cubic)	
IACS	The international annealed copper standard	
LED	Elektroluminiscenčná dióda (light-emitting diode)	
Rm	Medza pevnosti v ťahu	[MPa]
SAF	Stabilizovaná hliníková pena (stabilized aluminum foam)	
ρ	Merná hmotnosť	[kg.m ⁻³]