

Факултет инжењерских наука у Крагујевцу
Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 10/2012

Јелена Д. Живковић

Металне пене

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Драган Адамовић -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да преглед развоја и употребе металних пена. На почетку анализирати основне захтеве које морају да испуне ови материјали. У даљем делу рада описати начине добијања металних пена. Затим дати преглед својстава металних пена. На крају дати преглед примене ових материјала.

Оквирни садржај рада

1. Увод
2. Поступци производње металних пена
3. Својства металних пена
4. Примена металних пена
5. Закључак
6. Литература

Препоручена литература:

- [1]. Томислав Филетин Металне пјене, ФСБ Загреб 2003
- [2]. Гиговић, Металне пјене, Факултет за металургију и материјале, Зеница 2005
- [3]. Гојко Марић, Томислав Филетин, Иван Крамер, Металне пене-производња, својства, примена, Факултет машинства и бродоградње, Завод за материјале, Загреб 2008
- [4]. Томислав Филетин, Преглед развоја и примјене савремених материјала, Загреб 2000
- [5]. P. Zitha, J. Banhart, G. Verbist (MIT-Verlag Bremen, 2000) Metallicfoams: challenges and opportunities

Крагујевац, март 2015.

ментор:

Проф. др Драган Адамовић

Резиме

Металне пене су нова врста и облик материјала који се развијају на основу опонашања структуре и својстава природних ћелијских материјала као што су дрво, кости, корали и др. Предности металних пена су: мала густина, прилагодљива топлотна својства, могу бити јако добри топлотни изолатори или могу добро проводити топлоту, ватроотпорност, пригушење енергије удара, вибрација и звука, релативно висока крутост.

Кључне речи: метална пена, ћелијски материјал, процес производње.

Abstract

Metal foams are new kind form material, which develop on imitation of structure and natural, cellular materials, such as: wood, bones, coral etc. Advantages are: small density, adaptable thermal characteristic, they can be very good thermal insulators or conductors of heat, fire resistance, damping impact energy, vibration and sound and high level of stiffness.

Key words: metal foam, cellular material, production process.

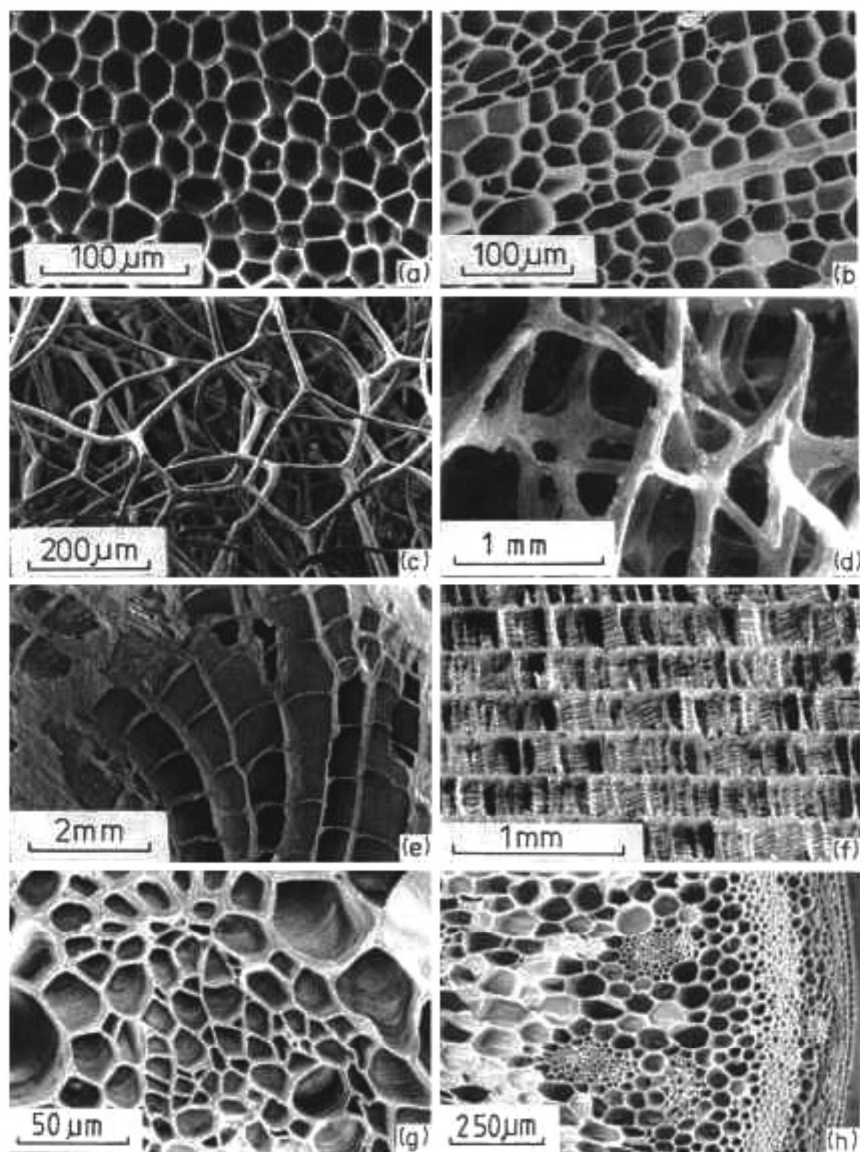
САДРЖАЈ

1. УВОД	6
1.1. Грађа и структура металних пена	8
1.2. Могућност примене металних пена	9
1.3. Исплативост металних пена	10
1.4. Стабилност металних пена	10
2. ПОСТУПЦИ ПРОИЗВОДЊЕ МЕТАЛНИХ ПЕНА	12
2.1. Убризгавање гаса у растоп	13
2.2. Гасом ослобођене честице растворене у растопу	15
2.3. Гасом ослобођене честице растворене у получврстој фази	16
2.4. Прецизно ливење помоћу калупа од воска или полимера	18
2.5. Талочење метала на хелијски прототип	19
2.6. Експанзија гаса у растопу	20
2.7. Пене са кугластим шупљинама	22
2.8. Спајање или ливење два метала од којих је један растворљив	23
2.9. Евтектичко очвршћавање гас-метал	24
3. СВОЈСТВА МЕТАЛНИХ ПЕНА	25
3.1. Механичка својства металних пена	25
3.1.1. Крутост	25
3.1.2. Притисна чврстоћа	26
3.1.3. Затезна чврстоћа	27
3.1.4. Понашање при променљивом оптерећењу – замор	28
3.1.5. Понашање при пузању	28
3.2. Топлотна својства металних пена	30
3.3. Звучна својства металних пена	31

3.4. Пригушење вибрација металних пена.....	34
3.5. Електрична својства пена	34
3.6. Спајање металних пена.....	36
3.6.1. Спајање лепковима	36
3.6.2. Растављиви спојеви	37
3.6.3. Заваривање.....	37
4. ПРИМЕНА МЕТАЛНИХ ПЕНА	39
5. ЗАКЉУЧАК.....	43
Литература	44

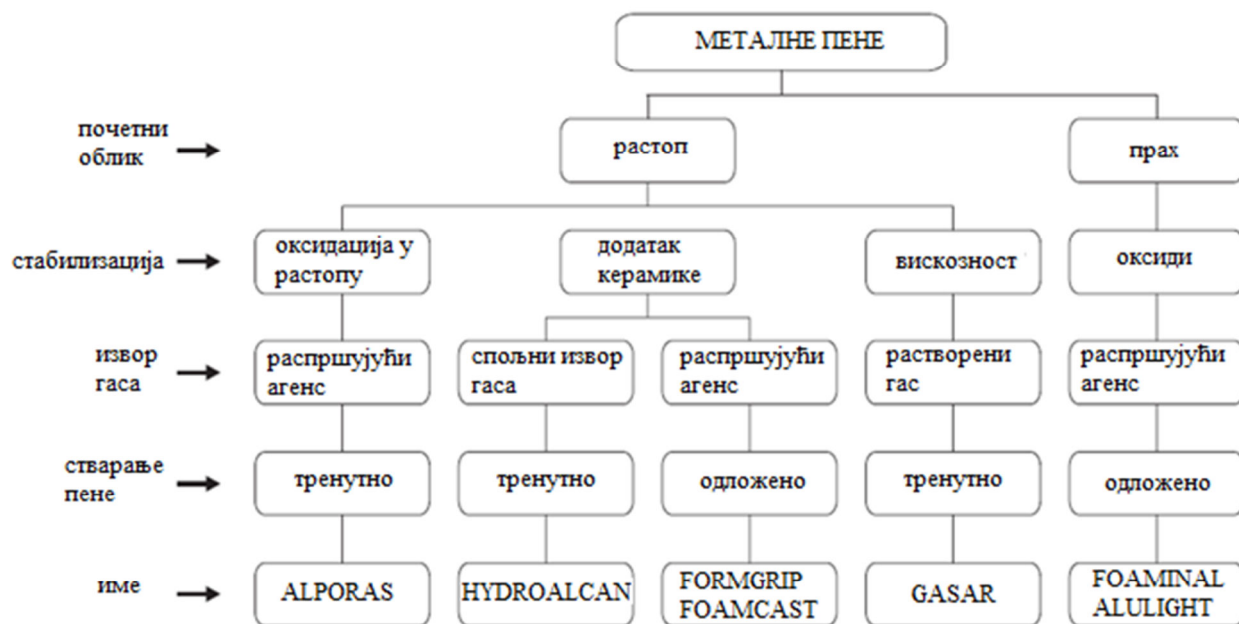
1. УВОД

Металне пене су покушај опонашања грађе и структуре природних материјала за услове техничке примене (слика 1.1). Металне пене имају високу порозност од 40 до 90 %. Својства пена се регулишу применом параметара процеса производње, чиме се првенствено утиче на грађу пене.



*Слика 1.1. Природни ћелијски материјали: а) плута б) балза в) сунђер г) кост д) корал
ђ) рибља кост е) лист ириса ж) стабљика биљке*

Металне пене потпуно су нов облик материјала који још увек није у потпуности познат инжењерима. Истраживања металних пена почела су деведесетих година, а први патенти пре шездесет година. Металне пене израђују се новим процесним техникама које се непрестано унапређују и развијају. Методе којима се испитују својства металних пена још увек нису поуздано проверене и разрађене, а нису ни позната сва својства.



Слика 1.2. „Породично стабло“ металних пена

Сировине за почетак производње металних пена су у облику растопа или праха. Само упењавање материјала увек се догађа из течне фазе тако да се прах доводи у облик растопа повишењем температуре. Извор гаса је неопходан предуслов за стварање шупљина унутар растопљеног метала. Он може бити спољашњи или се у растоп додаје распршујући агенс који поспешује пењење. Стварање пене може бити тренутно или одложено.

У последњем реду на слици 1.2 наведени су комерцијални називи неких облика металних пена. Металне пене могу се произвести из скоро свих врста материјала који су у облику праха, али су најчешће доступне металне пене на бази алуминијума (Al) и никла (Ni). По посебној наруџбини производе се и на бази магнезијума (Mg), олова (Pb), цинк (Zn), бакра (Cu), бронзе, титана (Ti), челика па чак и злата (Au).

Недостаци металних пена су:

- Недостаци разумевања основне механике металних пена. Неки делови тог подручја су још увек неразјашњени.
- Непостизање тачно одређених својстава металних пена у односу на постављене параметре.
- Примена ових материјала је још увек мала, разлози томе су висока цена неких облика металних пена (слика 1.3.), физичка својства нису довољно позната, недовољно је знање о својствима пена.[1]



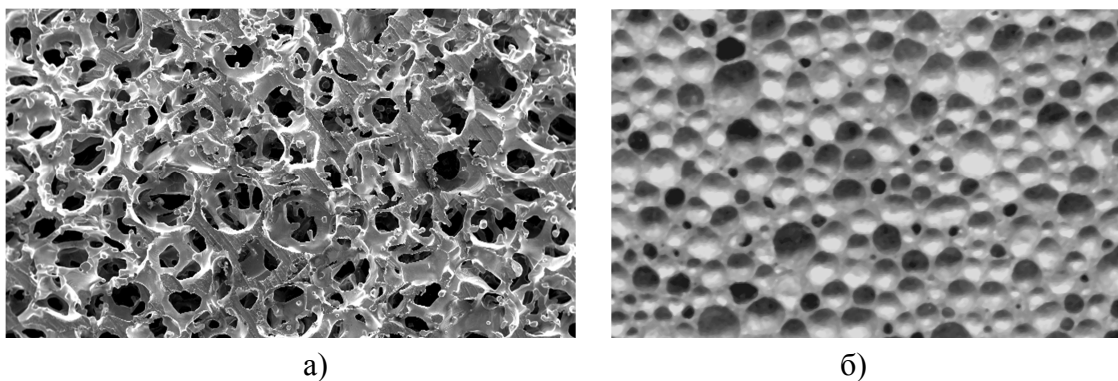
Слика 1.3. Комади израђени од металних пена

1.1. Грађа и структура металних пена

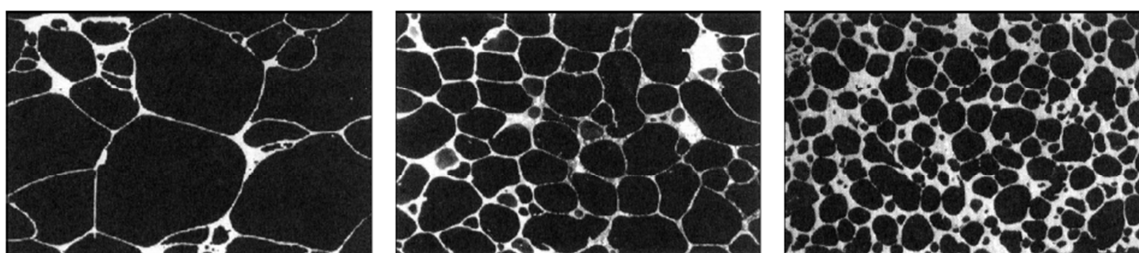
Металне пене појављују се у неколико облика:

- Ћелијски метали,
- Порозни метали,
- Чврсте металне пене,
- Метални сунђери.

Ћелије металних пена могу бити отворене или затворене (слика 1.4.), од тога зависе својства. Пене са затвореним ћелијама јако добро апсорбују енергију удара, док пене са отвореним ћелијама имају добра топлотна својства.



Слика 1.4. Отворене (а) и затворене (б) ћелије металних пена



а) SYMAT металне пене б) ALPORAS металне пене в) ALULIGHT металне пене

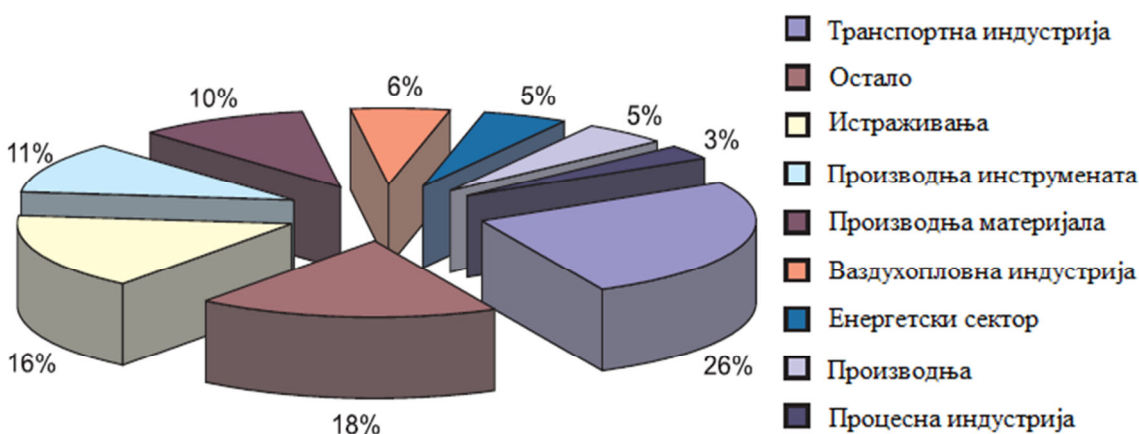
Слика 1.5. Грађа и структура

Металне пене окарактерисане су величином, врстом материјала, обликом, релативном густином ρ/ρ_s . Приказани су облици грађе (слика 1.5.) три металне пене различитих произвођача. SYMAT пена има најмању релативну густину 108 [kg/m^3], ALPORAS пена има густину 240 [kg/m^3], а ALULIGHT пена има густину 435 [kg/m^3]. Када се проучава грађа металних пена често се уочавају неке неправилности нпр. неправилне и наборане границе ћелија и прекинути зидове ћелија. [1]

1.2. Могућност примене металних пена

Употреба металних пена није још увек велика, главни проблем се јавља због неистражених области где се металне пене могу применити. Својства металних пена су: изузетно мала маса, велика специфична крутост, добра могућност апсорпције енергије удара и електромагнетних таласа, топлотно-изолацијска својства, добро упијање звука, ватроотпорност, итд. Да би примена металних пена бола исплатива пожељно је да буду

испуњена бар четири од наведених својстава. Многе индустријске гране су заинтересоване за ову врсту материјала (слика 1.6.).



Слика 1.6. Приказ заинтересованости појединих грана индустрије за металне пене

Индустрија транспортних средстава је највише заинтересована за металне пене. Интерес су показале велике светске компаније као што су: Jaguar Cars, LTD, Ford Motor Company, RoverGroup, ...[2]

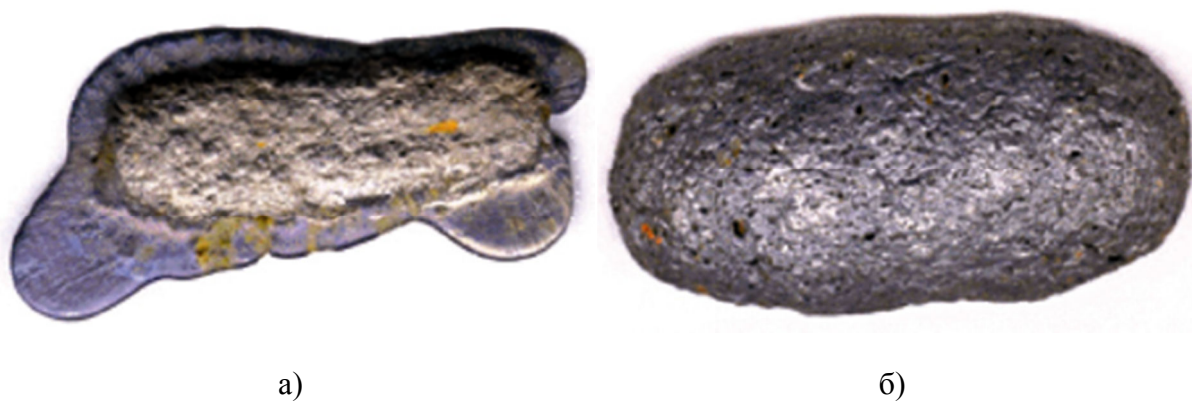
1.3. Исплативост металних пена

При избору материјала за неки производ веома је важан однос цена-квалитет. Прво се сагледају техничка својства која ће осигурати функционалност и трајност производа, затим се израчунају трошкови израде материјала. Трошкови израде металних пена су високи, зато се производе мале количине и процеси производње нису још увек усавршени. Цена може бити од 7 па до 12000 долара по килограму материјала. Укупни трошак чине трошкови материјала, израде алата, коришћење опреме, енергије и информација. Предност металних пена је што су рецикличне. На крају је оптимизација избора материјала, која подразумева избор материјала са одговарајућим својствима уз минималне трошкове.[1]

1.4. Стабилност металних пена

Пене се убрајају у нестабилне системе. Метални растопи не могу бити упењени без адитива који имају улогу стабилизатора приликом стварања пене. Врста стабилизатора зависи од метала који се упењује и од процеса израде. Нпр. у *Hydro-Alcan* процесу се

додају SiC честице величине око 10 μm . Алуминијуму треба додати око 8-20% SiC. Запремински удео зависи од начина убризгавања гаса у растоп. Те додатне честице уочавају се анализом помоћу енергетски диспергованих рендгенских зрака (EDX). У процесу производње *Alporas* пене адитиви су од алуминијума, калцијума или мешани оксиди који настају у растопу унутрашњом оксидацијом након додавања калцијума. У производњи *Alulight-Foaminal* пена као стабилизатори процеса користе се метално-оксидна влакна која се налазе у металном праху. Оксиди прекривају површину сваког зрна праха пре очвршћавања и остају збијени након притискивања. Влакна су врло танка, поготово за алуминијум где њихова дебљина износи испод 100 nm. Садржај оксида у металним прашковима врло је битан зато што од њега зависи стабилност металних пена. Ако је садржај премали, пене ће бити нестабилне. Код пена с вишим уделом оксида већи део течне фазе касније задржава пенасту грађу. Такви механизми нарочито су ефикасни када се металне пене израђују од олова (слика 1.7.) или алуминијума.[3]



Слика 1.7. Оловне пене израђене од а) праха са 0,06 % кисеоника б) праха са 0,46 % кисеоника

2. ПОСТУПЦИ ПРОИЗВОДЊЕ МЕТАЛНИХ ПЕНА

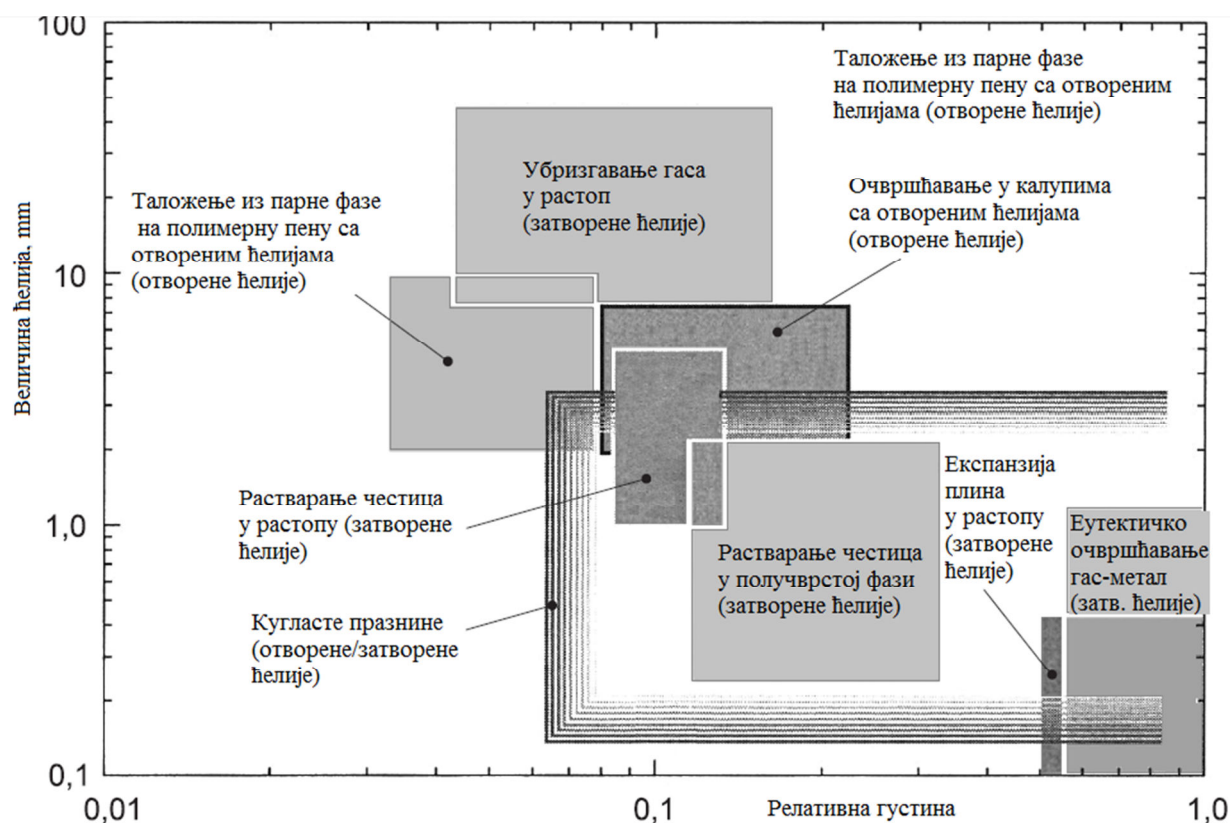
Како би металне пене имале још боља својства битно је проналажење нових и бољих процеса за производњу металних пена. Познато је више начина за производњу металних пена од којих је само део у комерцијалној употреби. Начини за производњу пена деле се на четири подручја:

- Пена се обликује из парне фазе,
- Пена се обликује електроталожењем из течне фазе,
- Пена се обликује у растопљеној фази,
- Пена се обликује у чврстој фази.

У сваком тренутку може се утицати на облик, величину, степен отворености ћелија и на релативну густину (слика 2.1.). Поступци производње ће бити укратко описани у следећем делу текста:

- Убризгавање гаса у растоп легура AlSi-C и $\text{Al-Al}_2\text{O}_3[\text{Al, Mg}]$;
- У алуминијумски растоп додаје се агенс (TiH_2) који се распада и ствара мехуриће при одређеном притиску и температури $[\text{Al}]$;
- Мешавина металног праха и агенса (TiH_2) загрева се при чему се ослобађају мехурићи у растопу и ствара се пена $[\text{Al, Zn, Fe, Pb, Au}]$;
- Убризгавање под притиском металног растопа у калуп од полимерне пене или воска који је премазан керамичким прахом $[\text{Al, Mg, Ni-Cr, Cu, нерђајући челик}]$;
- Хемијско таложење метала из парне фазе на калуп од полимерне пене који се касније уклања сагоревањем $[\text{Ni-Ti}]$;
- Врућим изостатичким пресовањем праха (HIP-HotIsostaticPressing) инертни гас под високим притиском бива заробљен у порама. Повишењем температуре долази до експанзије гаса $[\text{Ti}]$;
- Кугласте шупљине које настају процесом атомизације или таложењем из парне фазе на полимерне кугле $[\text{Ni, Co, Ni-Cr легуре}]$;
- Спајање два материјала у облику праха од којих је један растворљив. Растворљива компонента уклања се растварачем и остаје метална порозна грађа $[\text{Al+сол у облику праха}]$;

- Отапање гаса (обично H_2) у растопу под високим притиском. Порозни материјал настаје еутектичком реакцијом гаса и метала [Cu, Ni, Al].

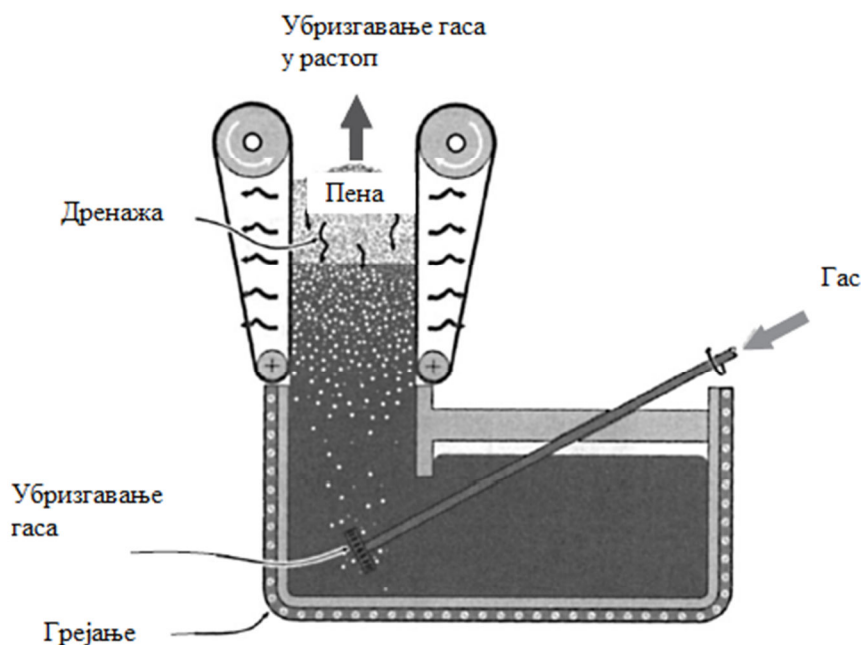


Слика 2.1. Вредности величине ћелија и релативне густине које се могу добити одређеним поступком производње

2.1. Убризгавање гаса у растоп

Метална пена не може се произвести само из убризгавања гаса у растопљени метал (слика 2.2.) зато што је пребрзо сушење метала око ивица мехурића да би пена остала стабилна до очвршћавања. Због тога, у растоп се додају ситне нерастворљиве честице које повећавају вискозност алуминијума, спречавају сушење опне мехурића и на тај начин стабилизују пену. Као честице се користе SiC , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO или TiB_2 величине од $0,5\mu m$ до $25\mu m$. Приликом уношења честица у алуминијум користе се технике мешања како би расподела била једнака. Након тога у растоп се удувава гас помоћу посебно конструисаних ротирајућих убризгавалица и вибрирајућих распршивача. Тако настају једнаки мехурићи распршени у растопу. Може се користити више врста гасова. Мешавина мехурића и метала исплива на површину где се метал суши. Пена на површину излази

помоћу помичних трака. На тај начин производе се алуминијумске пене густине од 69 kg/m^3 до 540 kg/m^3 са порама величине од 3 до 25 mm и дебљином зида 50-85 μm . На величину ћелија може се утицати протоком гаса, брзином убризгавања, фреквенцијом вибрирања распршивача и осталим параметрима.

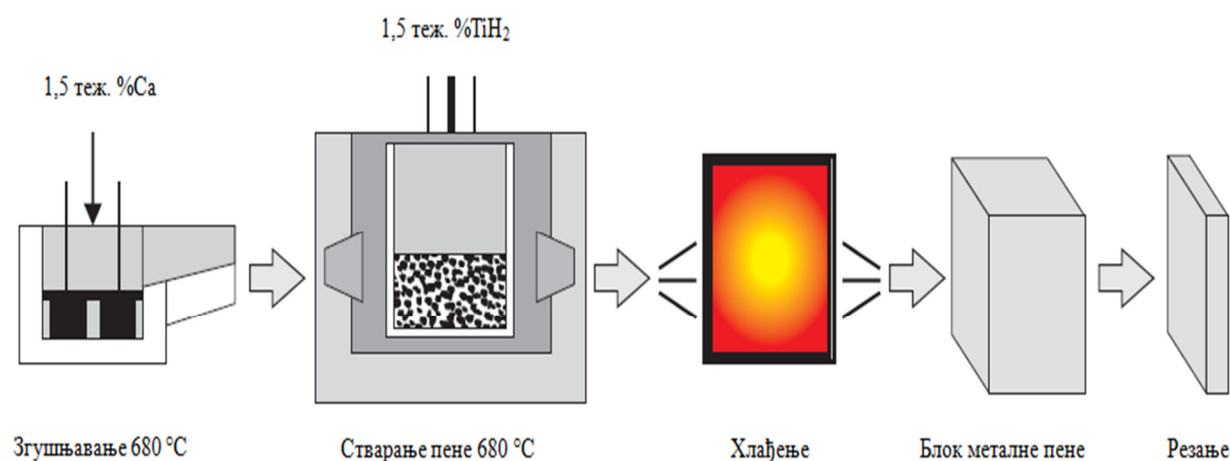


Слика 2.2. Шема производње металне пене убризгавањем гаса у растоп

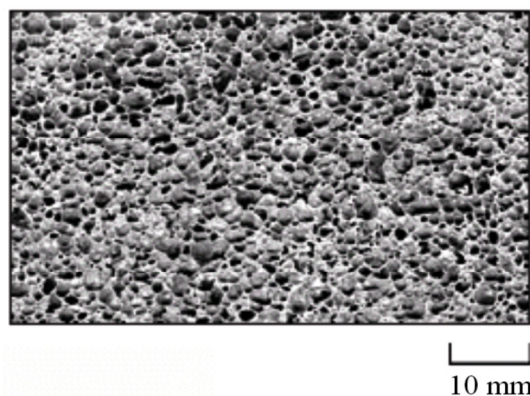
Ако је садржај честица велики или премали настаће одређене потешкоће, које се јављају због сила помоћних трака током вучења на површину. Ћелије се дијагонално деформишу што лоше утиче на механичка својства. Овај процес је јефтинији, могу се производити комади великих димензија, али недостатак овог процеса је што је ограничен на алуминијум. На овај начин су израђене *Hydro-Alcan* пене. [3]

2.2. Гасом ослобођене честице растворене у растопу

Растопу се додаје агенс за поспешење упењавања. Под утицајем повишене температуре он се раствара. Растопу се додаје око 1,5 % Ca на температури од 670 до 690 °C. Вискозност се повећава због спојева CaO , CaAl_2O_4 или инертног споја Al_4Ca . Додаје се 1-2% TiH_2 као распршујући агенс који се раствара на Ti и гасовити H_2 . H_2 ствара мехуриће који служе за стварање металне пенеса затвореним ћелијама ако је сушење довољно споро. После хлађења испод температуре топљења ствара се алуминијумска метална пена која се може даље обрађивати. Овај процес траје око 15 минута (слика 2.3.).



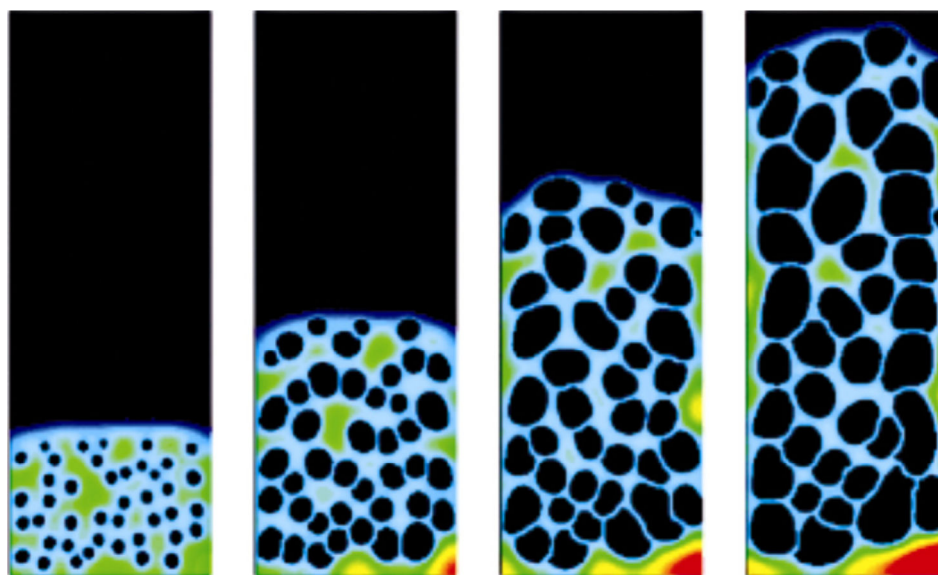
Слика 2.3. Поцес настајања „Alporas“ металне пене



Слика 2.4. Грађа (структура) Alporas металне пене

Код ових пена ћелије су затворене (слика 2.4.), њихов зид се може разбити чиме се повећавају звучно изолацијска својства. Овај поступак је скупљи од претходног због

употребе Са и TiH_2 . Израђују се и нумерички модели металних пена произведених овим процесом (слика 2.5.). Модел описује ширење шупљина у растопу при константној температури. Циљ је дефинисање тачних услова и односа између шупљине и растопа.

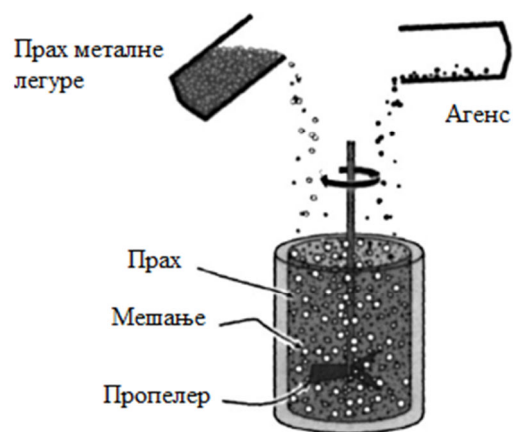


Слика 2.5. Нумеричка 2Д симулација процеса упењавања

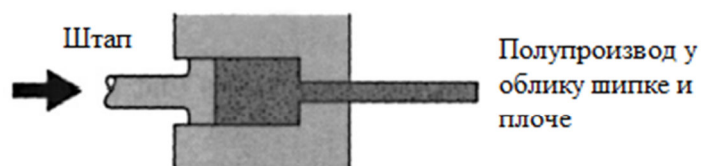
Различите боје означавају концентрацију H_2 у Al -матрици. Овим процесом израђују се алуминијумске металне пене „*Alporas*“.[3]

2.3. Гасом ослобођене честице растворене у получврстој фази

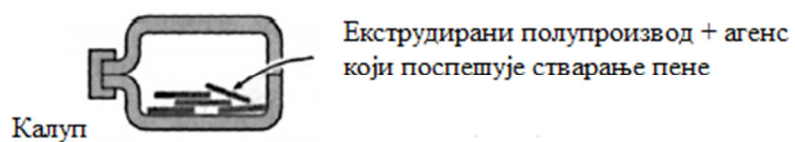
На почетку процеса мешају се прах чистог метала или легуре и додатак за упењавање (слика 2.6.). Као додатак најчешће се користи TiH_2 . Настала мешавина се сабија у полупроизвод у облику плочице или шипке. Полупроизвод мора бити пажљиво направљен зато што почетна порозност или друге неправилности узрокују лоше резултате у каснијим фазама. Полупроизвод се сече на мале комаде и ставља у калуп где је температура виша од солидус температуре легуре. Допатак (агенс) се распада на Ti и H_2 који доводи до ширења и стварања високо порозног материјала. Овај процес траје неколико минута.



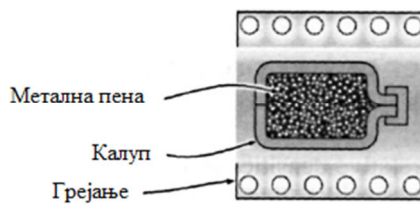
Мешање састојака



Екструдирање



Припрема за пењење



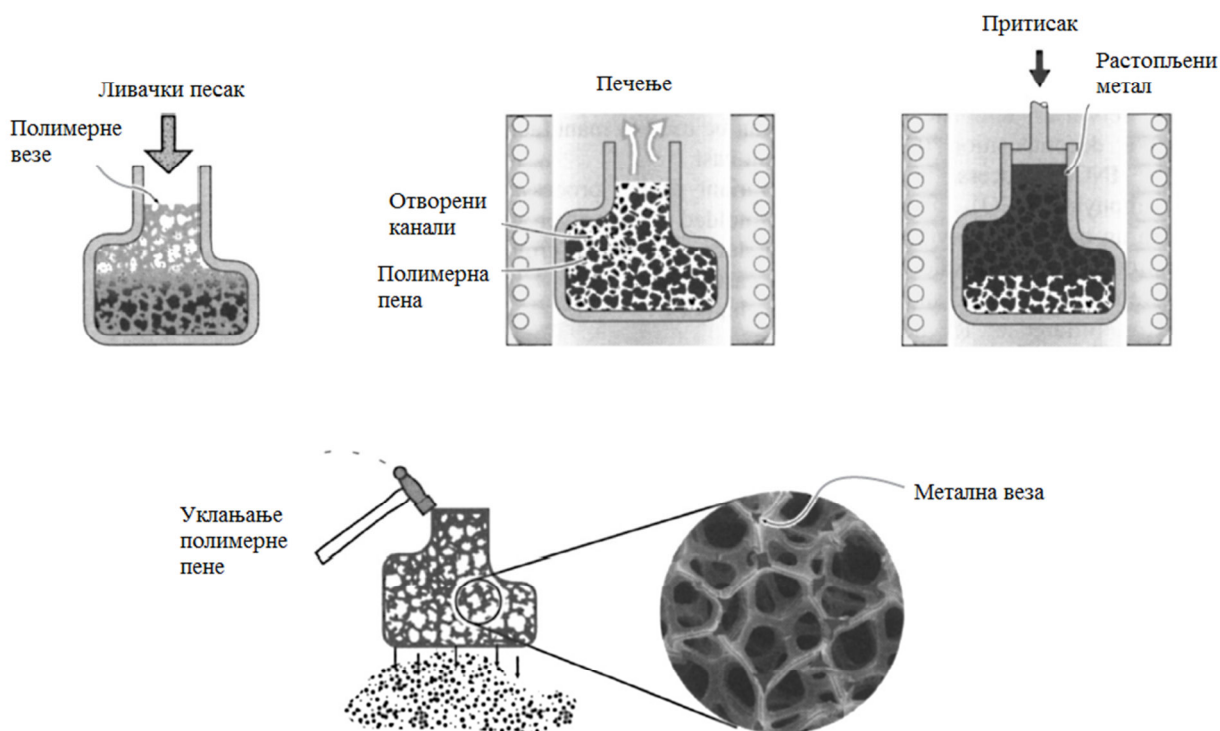
Пењење

Слика 2.6. Процес настајања „Foaminal-Alulight“ металне пене

Овим поступком се могу правити пене на бази цинка, месинга, олова, злата, алуминијума[3].

2.4. Прецизно ливење помоћу калупа од воска или полимера

Овим поступком се производе такозване „*ERG DUOCEL*“ металне пене (слика 2.7.). Ти материјали имају грађу са отвореним ћелијама, за израду пене најчешће се користе алуминијумске легуре, а за израду калупа у којима се прецизним ливењем производе металне пене могу се користити полимерне пене са отвореним ћелијама различитих облика и величина. Одабере се полимерна пена одговарајуће величине ћелија и релативне густине, премаже се керамичким прахом који се суши и уграђује у ливачки песак и калуп се пече. Калуп се пуни растопљеном легуром која се хлади, затим вади из калупа и метална пена има исту грађу као и полимерна пена која се користила.

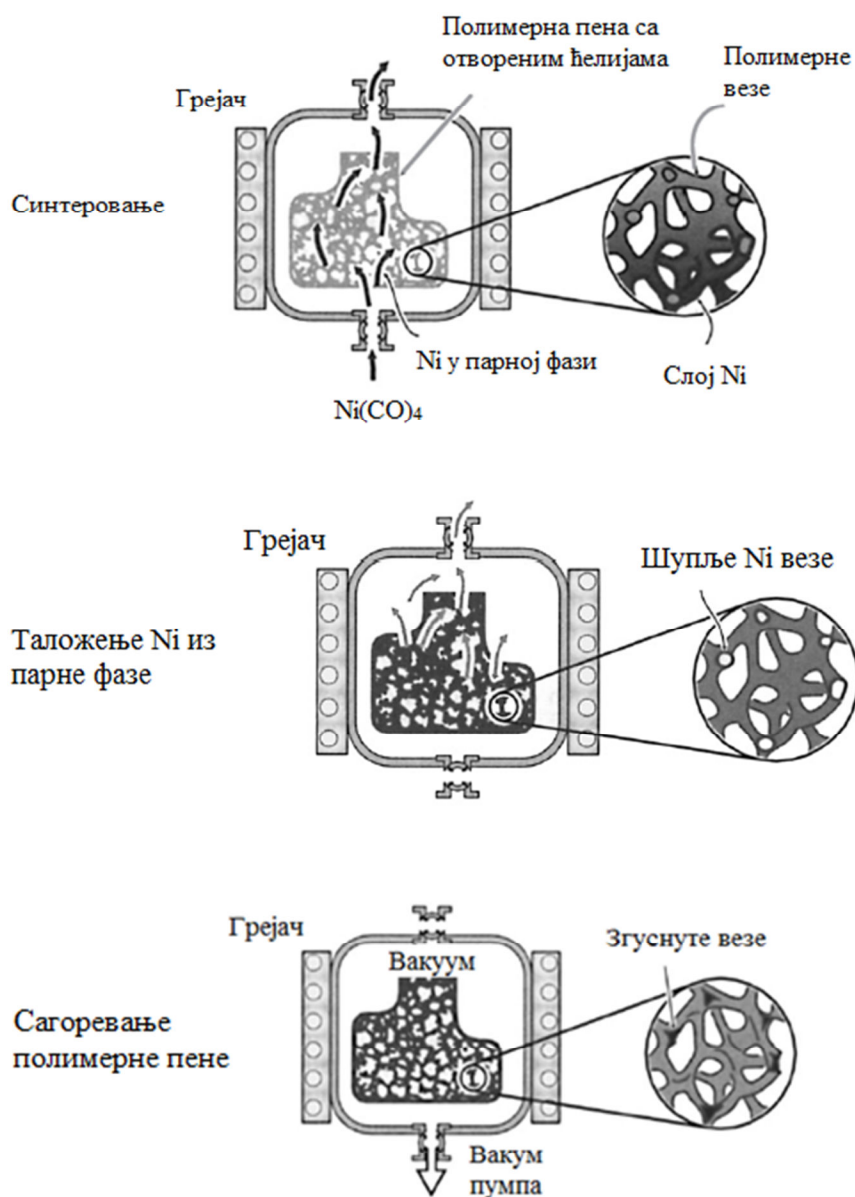


Слика 2.7. Процес настајања „*ERG DUOCEL*“ металне пене

Овим процесом се израђују металне пене на бази свих метала који се прецизно лију.

2.5. Таложење метала на ћелијски прототип

На почетку поступка полимерна пена ставља се у CVD (Chemical Vapour Deposition) реторту у коју се уводи $\text{Ni}(\text{CO})_4$ (слика 2.8.). На температури од око 100°C , $\text{Ni}(\text{CO})_4$ се распада на чисти никл и угљен моноксид CO. Никл се у парној фази таложи на полимерни материјал унутар реторте. Након наношења металне превлаке, полимерне пене се уклањају и спаљују инфрацрвеним зрачењем. Грађа оваквих металних пена је ћелијаста са шупљикавим везама, густина веза се повећава синтеровањем.

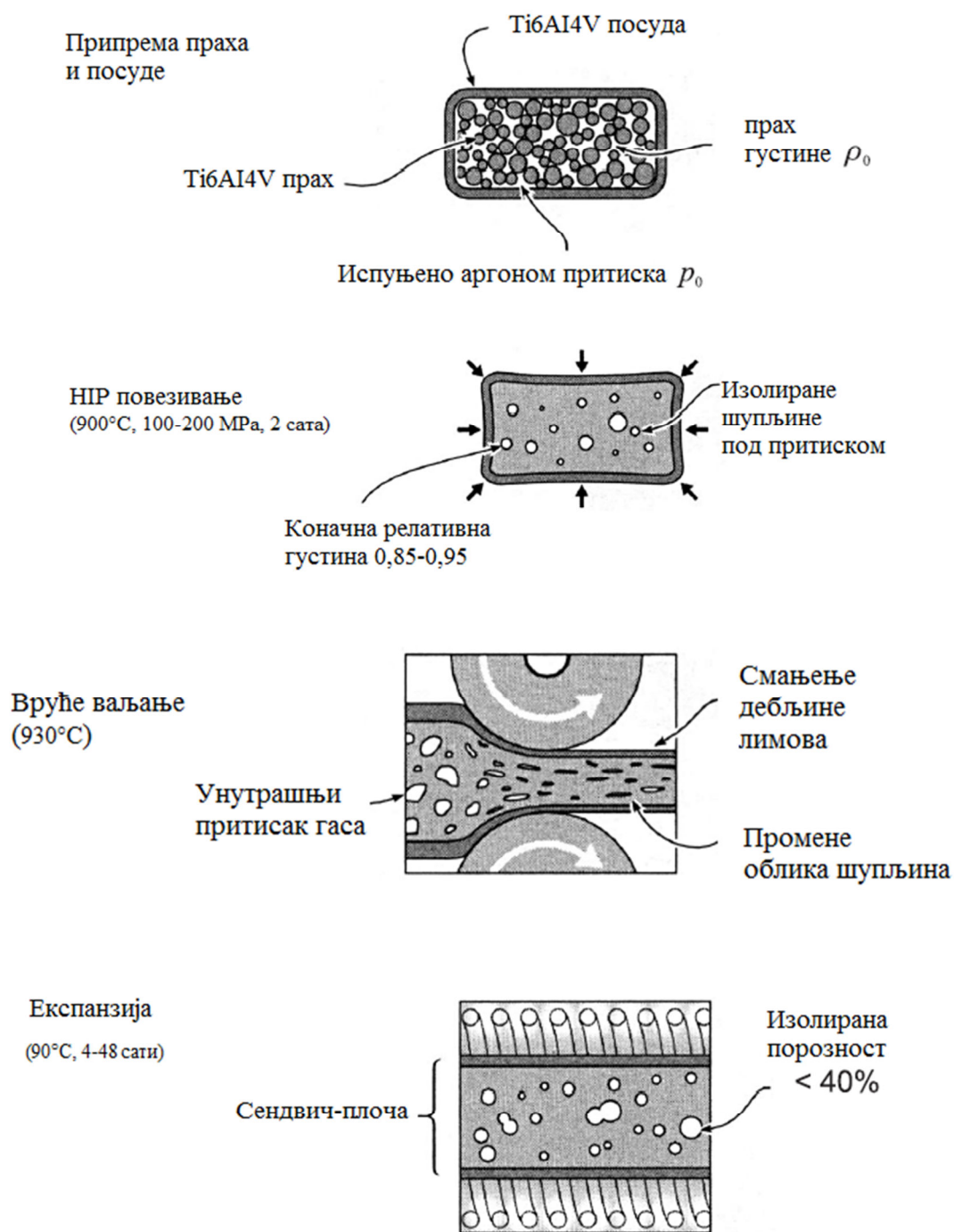


Слика 2.8. Процес настајања Ni металне пене (тзв. INCO пена)

Овим поступком се производе металне пене са најмањом релативном густином од 0,02 до 0,05. $\text{Ni}(\text{CO})_4$ је веома отрован и када се користи потребне су одређене анализе штетних емисија у околину и зато је овај поступак скуп[3].

2.6. Експанзија гаса у растопу

Променом притиска и температуре се може утицати на грађу, а самим тим и на својства металних пена. У првом кораку прах легуре Ti6Al4V ставља се у посуду направљену од истог материјала. Из посуде кисеоник је извучен јер би за себе везао титан, посуда је затим напуњена аргоном под притиском од 0,3 до 0,5 МПа. Садржај посуде се згушњава на релативну густину од 0,9 до 0,98. У том тренутку у посуди се налази мали број ћелија који је приближан броју зрна праха легуре која је на почетку стављена у посуду. Следи ваљање титанове легуре на температури од 900 до 940°C. Шупљине у легури постају спљоштене и издужене у смеру ваљања. До ширења гаса долази у последњем кораку процеса на температури од 900°C и траје и до 48 сати. Услед високе температуре притисак у ћелијама расте па се оне шире што доводи до смањења густине. Овим поступком најчешће се израђују сендвич-конструкције на бази Ti -легура које имају порозност језгра до 50% и величину ћелија од 10 до 30 μm . Овај поступак (слика 2.9.) је скупљи због процеса врућег ваљања Ti легура[3].

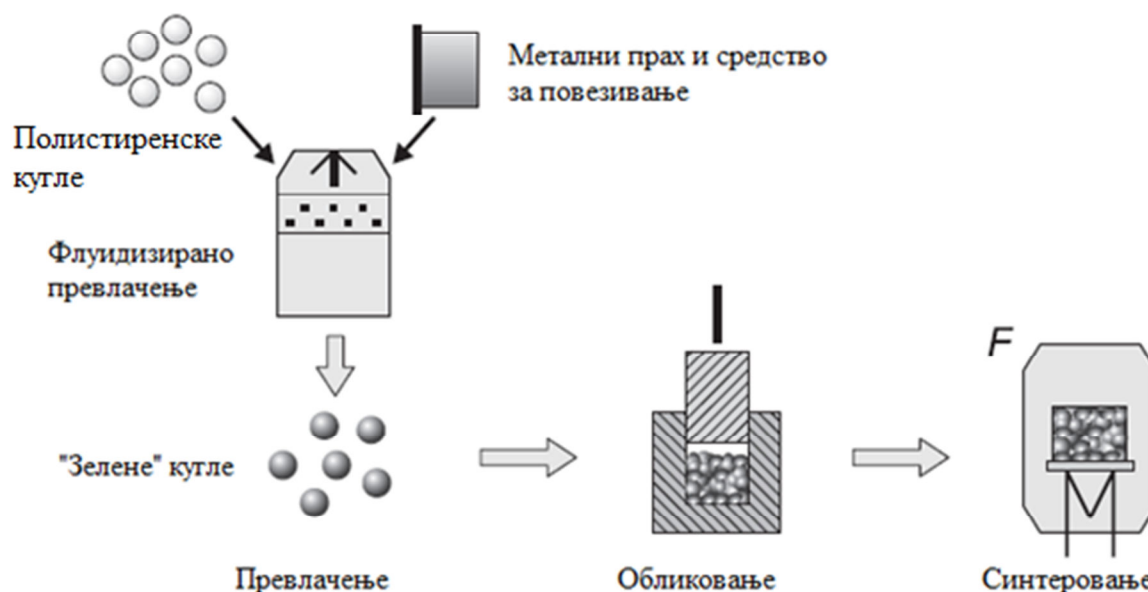


Слика 2.9. Процес настајања металне пене процесом ширења инертног гаса

2.7. Пене са кугластим шупљинама

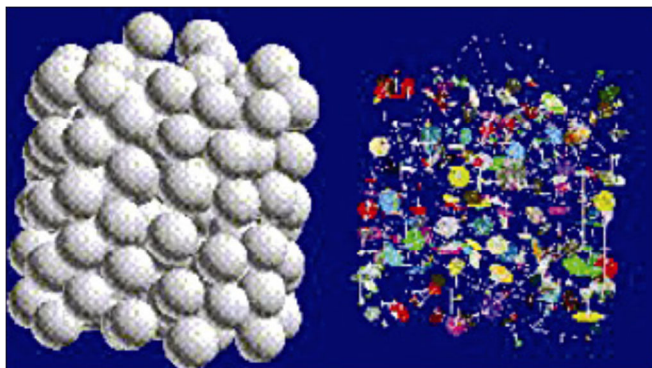
Развијен је низ процеса за производњу металних ћелијских материјала са кугластим обликом шупљина. Шупљине су величине од 0,3 до 1 mm и релативне густине 0,1. Шупљине се распоређују у материјалу специјалним поступцима, затим се згушњавају врућим изостатичким пресовањем, поступком синтеровања у вакууму или поступком синтеровања са течном фазом. Овај поступак је најприкладнији за неке легуре, јер се при њему избегавају притисне деформације кугластих честица праха са танким зидовима које би настале врућим изостатичким пресовањем. Овим поступком се производе металне пене од Ni суперлегуре и легуре Ti6Al4V са релативном густином 0,06.

Металне пене са кугластим шупљинама могу настати и IFAM поступком (слика 2.10.) тако што су кугле од полистирена превучене металом и синтероване како би се добила метална грађа са кугластим шупљинама високог степена једноличности. Синтеровање и спајање зида кугла се одвија у једном кораку, што смањује трошкове производње. Спајањем шупљина долази до грађе са отвореним и затвореним ћелијама, то се може мењати различитим параметрима производње. Величина шупљина је од 100µm до неколико милиметара. [3]



Слика 2.10. Процес настајања металне пене са кугластим шупљинама IFAM поступком

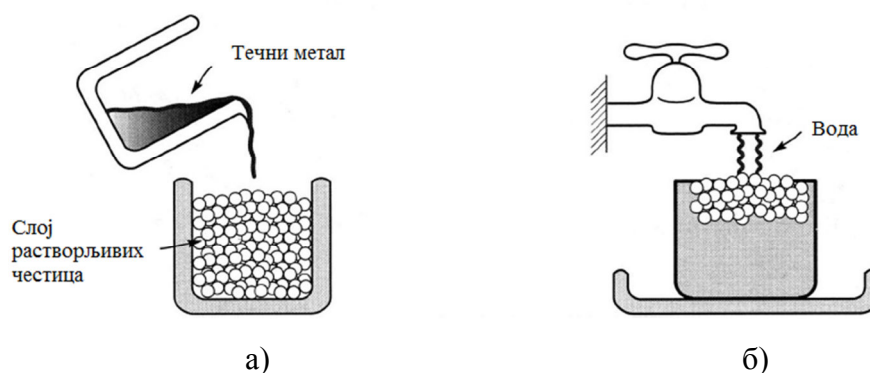
Моделирање механичких својстава могуће је направити уз помоћ методе коначних елемената (МКЕ) (слика 2.11.). То омогућује моделирање реалних својстава и оптимизацију кугластих шупљина у материјалу. Слика показује МКЕ симулацију кугластих шупљина између крутих плоча.



Слика 2.11. Симулација кугластих шупљина методом коначних елемената

2.8. Спајање или ливење два метала од којих је један растворљив

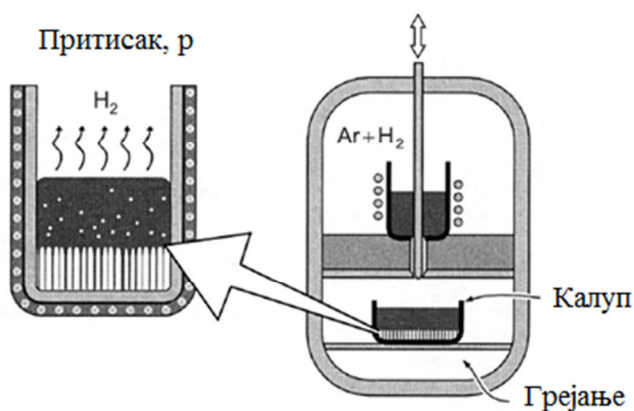
Два праха мешају се и чине двоструко повезану структуру од обе фазе. После повезивања један прах се раствара у одговарајућем растварачу (слика 2.12.). Пене базиране на мешавини прахова алуминијумских легура са натријумовим хлоридом успешно су примењене за велике пресеке са једноличном грађом. Као растварач углавном се користи вода. [3]



Слика 2.12. Настајање металне пене повезивањем два материјала од којих је један топљив:
а) растопљени метал инфилтрира се у слој растворљивих честица, б) честице се растварају у прикладном растварачу (нпр. вода) чиме настају отворене ћелије

2.9. *Еутектичко очвршћавање гас-метал*

Овај поступак се заснива на томе да неки метали и њихове легуре са водоником чине еутектички систем (слика 2.13.). У те метале се убрајају Al, Be, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni и његове легуре. Легуре се растварају у водениковој атмосфери под високим притиском, очвршћују наглим снижењем притиска. Резултат је хомоген растоп испуњен водоником. Порозни материјал настаје еутектичком реакцијом гаса и метала. Ако се температура снизи растоп ће се претворити у хетерогени двофазни систем гас+метал. [3]



Слика 2.13. *Настајање металне пене еутектичким гас-метал очвршћивањем*

3. СВОЈСТВА МЕТАЛНИХ ПЕНА

При избору материјала за неки производ неопходно је познавати његова својства. На својства материјала утиче грађа, хемијски састав и начин израде и обраде. Испитивање својства се спроводи по строгим критеријумима, да би резултати били што тачнији. У својства металних пена се убрајају механичка својства, топлотна, звучна,...[4]

3.1. Механичка својства металних пена

Својства пена одређена су својствима основног материјала и релативном густином ρ/ρ_s (ρ -густина пене, ρ_s -густина материјала од кога је пена направљена). Вредности релативне густине за ретке пене су од 0,005 до 0,5 за густе пене.

Предности металних пена је њихова мала маса, што омогућује израду веома лаких конструкција на којима се данас тежи, јер су могућности уштеде већи (нпр. у аутомобилској индустрији мања потрошња горива). Такве конструкције у експлоатацији су изложене статичким и динамичким механичким оптерећењима која могу проузроковати хаварије. Неопходно је тачно одредити механичка својства металних пена као што су: притисак, затезна чврстоћа, модул еластичности, модул смицања, динамичка издржљивост, тврдоћа, отпорност на замор, пузање,... Велики значај има степен неправилности и нехомогености грађе пене. Ћелије су често неправилног облика, различите величине, зидови ћелија су похабани то умањује механичка својства. Металне пене имају широк распон својства па им је велико подручје потенцијалне примене у условима механичког оптерећења. Својства металних пена са отвореним и затвореним ћелијама су скоро на истом нивоу, пене са отвореним ћелијама имају мало ниже вредности вучне и притисне чврстоће.[5]

3.1.1. Крутост

Крутост и чврстоћа порозних материјала доста зависе од њихове густине. Алуминијумске пене имају различит модул еластичности при оптерећењу на притисак. Почетна крутост узорка при оптерећењу на притисак не карактерише понашање самог материјала већ испитиваног узорка, почетна крутост испитиваног узорка износи 20 % вредности модула еластичности. Крутост смањују неправилности попут завојних зидова ћелија, велике пукотине и нехомогеност као што је неуједначена величина чворова.[7]

3.1.2. Притисна чврстоћа

Пене са отвореним ћелијама имају добро дефинисану границу течења (слика 3.1.), код затворених ћелија напрезање величине границе течења изазива згушњавање пене све до коначне деформације згушњавања (ε_D). Емпиријске везе између границе течења, деформације згушњавања и релативне густине је:

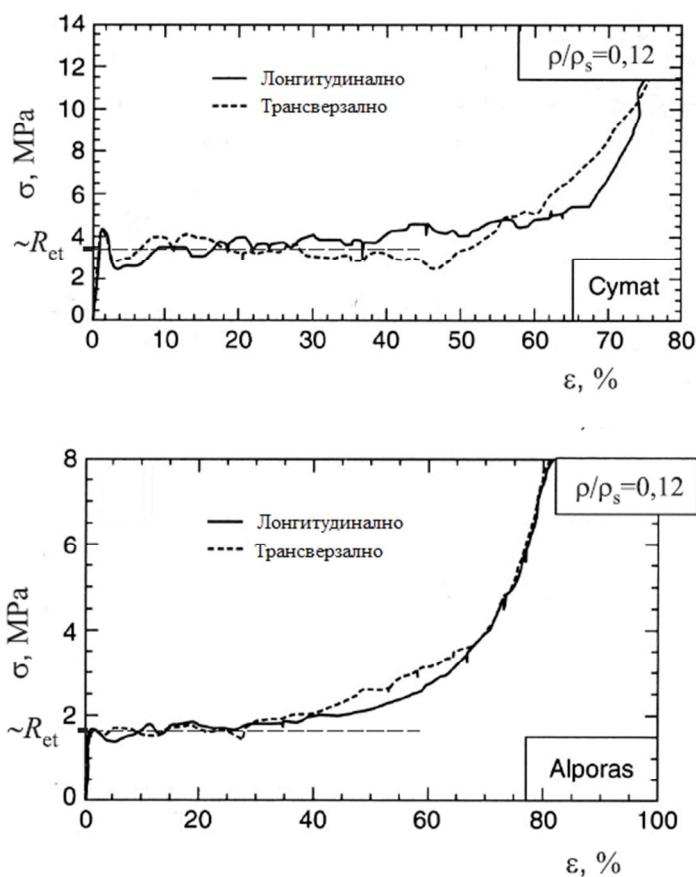
$$R_{et} = (0,25 - 0,35) R_e \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^m \quad (3.1.)$$

$$\varepsilon_D \approx \left(1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (3.2.)$$

R_e - граница течења материјала пене,

m - експонент који за металне пене износи 1,5-2,

α_1 - коефицијент који износи 1,7-2,0.

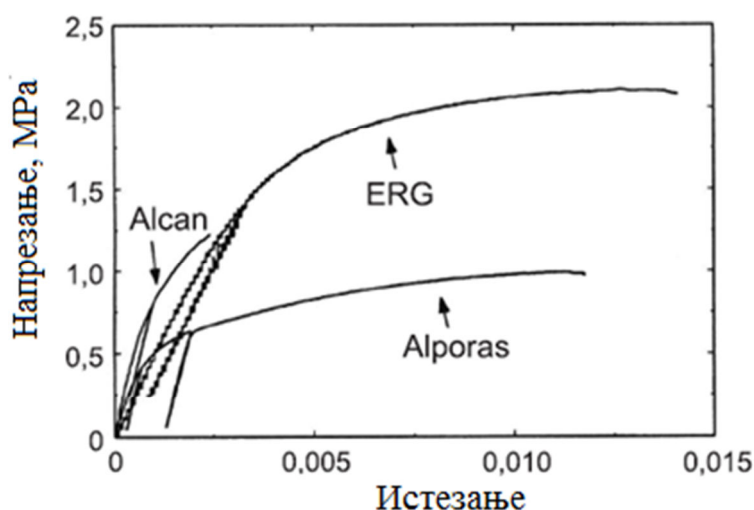


Слика 3.1. Дијаграм „напрезање-деформација“ металних пена при оптерећењу на притисак

Слика 3.1. приказује типичан дијаграм „напрезање-скраћење“ при оптерећењу на притисак за две Al металне пене. Већина испитивања се изводи на пенама од алуминијума и никла јер су оне највише примењиване. Пене на бази никла користе се за производе који морају имати добра електрична својства нпр. делови телефона, рачунара, акумулатора итд. На резултате испитивања притисне чврстоће могу утицати и чиниоци који су последица производње. [7]

3.1.3. Затезна чврстоћа

Циљ испитивања затезањем је одређивање својства отпорности и својства деформација материјала. Испитивања затезне чврстоће се спроводи на цилиндричним узорцима или на узорцима са проширењем. Главне димензије узорка су пречник, код цилиндричног узорка, и дебљина код узорка са проширењем. Приликом испитивања ERG пене кориштени су узорци дужине 90 mm и пресека 20x20 mm. Оптерећење је задато у два смера, вертикално и паралелно на осу ћелија. Крајеви узорка су превучени епоксидном смолом или се могу обмотати папиром како не би дошло до дробљења материјала. Оптерећење је задавано брзином 0,01 m/s. За мерење основног истезања узорка користио се екстензиметар дужине 12,7 mm. Модул еластичности може се израчунати из нагиба криве „напрезање-истезање“, а Поасонов коефицијент се рачуна помоћу измерених вредности истезања. Испитивања су се спровела и на „Alcan“ и „Alporas“ пенама, узорак је био исто у облику кости димензија 25x25 mm и дужине 125 mm. Оптерећење је задато на смер издужења ћелија. Резултати испитивања затезања Al пене су дати дијаграмом (слика 3.2.).[7]



Слика 3.2. Дијаграм напрезање-истезање Al пена



Слика 3.3. Узорци за испитивање затезне чврстоће призматичног облика са проширењем

3.1.4. Понашање при променљивом оптерећењу – замор

Замор материјала је појава поступног оштећења материјала услед дуготрајних периодичних променљивих оптерећења. Око 80 % лома материја се дешава због замора. Приликом динамичког оптерећења, материјал ће пући при мањим напрезањима од затезне чврстоће. Отпорност материјала према динамичком напрезању назива се динамичка издржљивост. Замору су изложене и металне пене. За уобичајене металне материјале сматра се да на век трајања у условима цикличног оптерећења не утиче учесталост понављања оптерећења у нормалним условим. Ако се све дешава под утицајем корозије, век трајања материјала ће бити знатно краћи.[7]

3.1.5. Понашање при пузању

Услед пузања долази до деформације материјала, дуготрајним утицајем константног оптерећења при некој константној повишеној температури. Пузање металних пена зависи од температуре топљења, микроструктуре, врсте атомске везе и кристалне решетке. Постоје математички модели који описују процес пузања код металних пена. Претпоставља се да брзина пузања у другом стадијуму зависи од почетне брзине пузања и напрезања.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0^* \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3.3.)$$

σ^* - брзина пузања у другом стадијуму,

σ - примењено напрезање,

ε_0^* - почетна брзина пузања,

n - експонент пузања,

σ_0 - референтно напрезање својства материјала, узима се из таблице.

$$\varepsilon_0^* = A \cdot \exp \left(- \frac{Q}{R \cdot T} \right) \quad (3.4.)$$

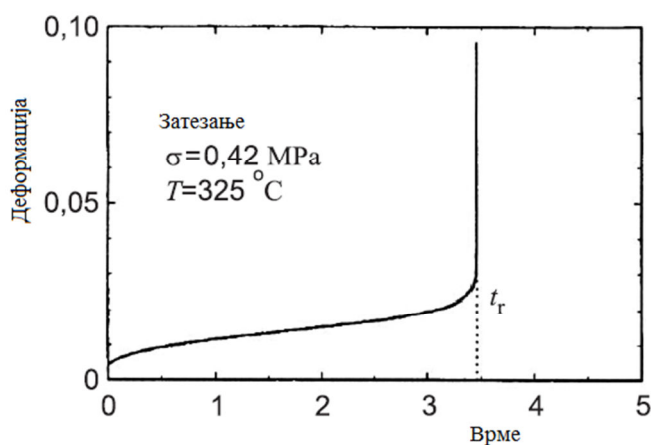
Q - активацијска енергија,

A - константа,

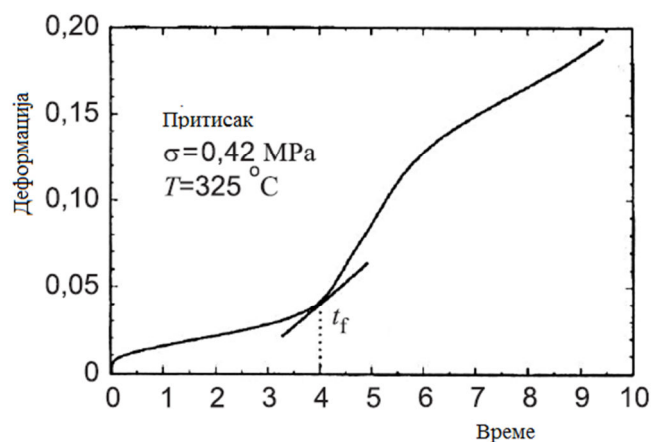
R - гасна константа,

T - апсолутна температура.

Испитивање ја обављено на „Alporas“ пени (слика3.4.) која се користи за језгра сендвич-конструкција које су изложене повишеним температурама. Пузање пена доста зависи од густине узорка.[7]



Слика 3.4. Крива пузања „Alporas“ пене при затезању



Слика 3.5. Крива пузања „Alporas“ пене при оптерећењу на притисак

3.2. Топлотна својства металних пена

Као и код механичких својства предност је мала маса, осим масе неопходна су топлотно-изолацијска својства да би пене биле применљиве у условима где су повишене или снижене температуре. Релативна густина и грађа пене знатно утичу на отпорност пена на отворену ватру и експлозије.

Табела 3.1. Топлотна својства металних пена

Својство, симбол, јединица	МАТЕРИЈАЛ				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Релативна густина	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-1,0	0,05-1,0	0,03-0,04
Грађа	Затворене ћелије			Отворене ћелије	
Тачка топљења, T_m	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
Макс. радна температура, T_{max} , K	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Мин. радна температура, T_{min} , K	1-2				
Спец. топлотни капацитет, C_p , J/kgK	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Топлотна проводност, λ , W/mK	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Топлотна растежљивост, α , $10^{-6}/K$	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
Латентна топлота топљења, kJ/kg, L	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310

Тачка топљења T_m ћелијских материјала практично је једнака тачки топљења материјала ћелија. Код АИ пене тачка топљења је виша од тачке топљења алуминијума јер су ћелије превучене оксидним слојем. Што је већа порозност и мала величина ћелија, то је већа површина превучена оксидом и тачка топљења је виша.

Специфични топлотни капацитет C_v по јединици обима за ћелијске материјале је нижи него код непорозних. Прикладни су за примену када је потребан мали топлотни капацитет (нпр. за делове система за брза загревања и хлађења).

Коефицијент топлотне растељивости α ћелијских материјала скоро је једнак коефицијенту материјала зидова ћелија. Коефицијент топлотне проводности за пене (λ) је знатно нижи, однос коефицијента топлотне растељивости и топлотне проводности (α/λ) је висок, што је мерило за величину топлотних деформација. Код конструкција с уграђеним пенама треба свести на минимум појаву температурских разлика.

Коефицијент топлотне проводности λ – из (таблице 3.1.) види се да вредности коефицијента λ се крећу од 0,2 W/mK све до 11 W/mK. Коефицијент топлотне проводности за алуминијум износи 150-220 W/mK, за неметалне материјале 3 W/mK док су металне пене веома добар изолатор.[6]

Привидна топлотна проводност порозних структура је:

$$\lambda = \lambda_m + \lambda_G + \lambda_C + \lambda_r \quad (3.5.)$$

$$\lambda_m - \lambda_s(\rho/\rho_s)^2 \quad (3.6.)$$

λ_m - топлотна проводност чврстог материјала ћелија,

λ_G - топлотна проводност гаса унутар ћелија,

λ_C - топлотна проводност конвекције унутар ћелија,

λ_r - топлотна проводност зрачења између ћелија.

3.3. Звучна својства металних пена

Најважније подручје звука је оно у распону од 500 Hz до 4000 Hz. Јачина звука се исказује у децибелима (dB) и он се пореди помоћу две скале:

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_o} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_o} \right) \quad (3.7.)$$

$$PWL = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_o} \right) \quad (3.8.)$$

где је:

SPL- ниво притиска звука,

p_{rms} - притисак звука,

p_o - притисак који представља границу чула (20×10^{-6} Pa),

PWL- ниво снаге,

W- снага,

W_o - референтна снага (10^{-12} W).

Звучна својства одређују се помоћу коефицијента упијања звука α који показује колики удео звучне енергије материјал упија. За металне пене коефицијент упијања звука се креће у распону од 0,8 до 0,95 (упија се од 80 % до 95 % енергије). Добра апсорпцијска својства имају пене с отвореним или полуотвореним ћелијама.

Звучна својства одређују се мерењем улазне импедансе на површини узорка који се налази у цеви. На једном крају цеви налази се звучник који производи звук, а на другом крају је причвршћен узорак. Цев је пречника 99 mm и дужине 1 m. Користи се за мерење звука фреквенција од 90 Hz до 1800 Hz. Коефицијент упијања звука израчунава се помоћу следеће формуле:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\frac{p_{\max}}{p_{\min}} - 1}{\frac{p_{\max}}{p_{\min}} + 1} \right)^2 \quad (3.9.)$$

$p_{\max}$, $p_{\min}$ - највећи и најмањи притисак звука.

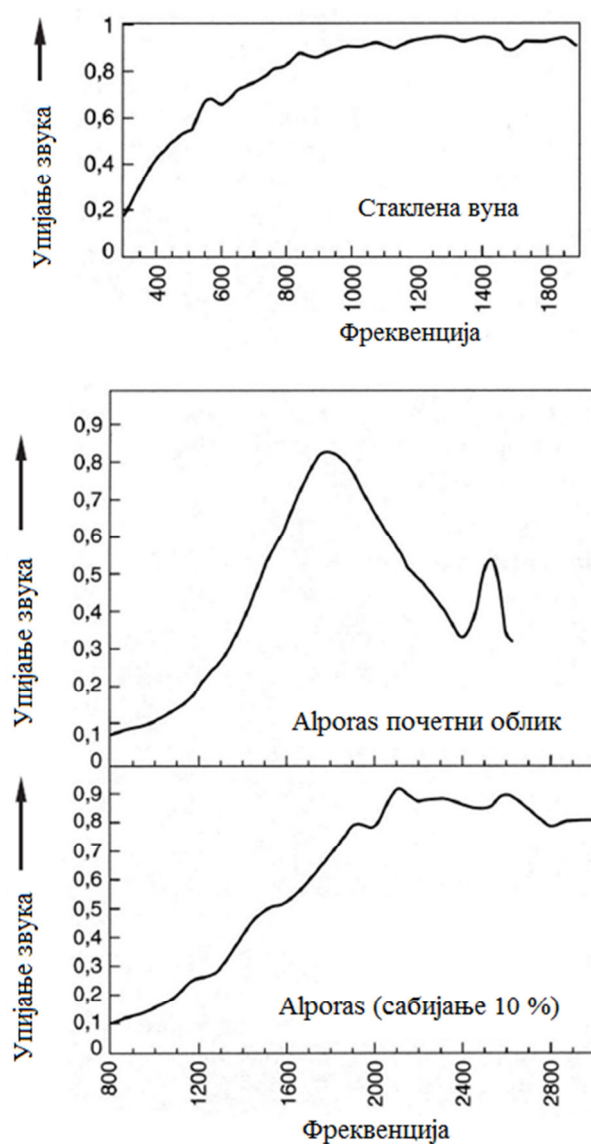
Као што је већ поменуто, метална пена мора имати отворене или полуотворене ћелије како би добро апсорбовала звук. Испитивања су извођена на „Alporas“ пени која има затворене ћелије, тако да је нужно различитим поступцима разбити зидове ћелија како би се омогућила циркулација ваздуха кроз њих.

Дијаграм (слика 3.6) показује упијање звука стаклене вуне и „Alporas“ пене пре и после сабијања. Стаклена вуна је један од најбољих звучних изолатора који се користи већ читав

низ година (највише у грађевинарству). Дијаграм а) показује како при фреквенцији од 1000 Hz стаклена вуна има фактор упијања звука скоро 1, што значи да је скоро сав звук апсорбован. Дијаграм б) показује како „Alporas“ пена у почетном облику има фактор упијања 0,9 при 1800 Hz. Често се металне пене оптерећују на притисак како би се разбили зидови ћелија и на тај начин повећао фактор упијања. Дијаграм ц) показује како се повећава фактор упијања „Alporas“ пене након сабијања од 10 %.[3]

Смањење јачине буке рачуна се према изразу:

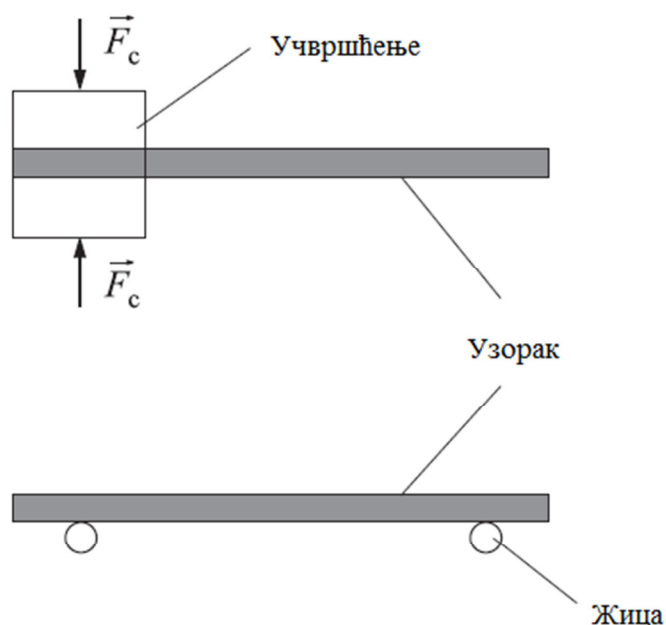
$$\Delta = 10 \log_{10} (1 - \alpha) \quad (3.10.)$$



Слика 3.6. Упијање звука стаклене вуне, ALPORAS пене почетног облика и ALPORAS пене након сабијања од 10%

3.4. Пригушење вибрација металних пена

Пригушење је врло важно својство материјала када се он користи за израду делова конструкције која је током употребе изложена механичким вибрацијама. Материјал се испитује тако што се изложи вибрацијама и проучава се понашање материјала за време и након престанка вибрација. На резултате утиче степен порозности, величина и облик ћелија, начин обраде узорка итд. (слика 3.7.).[3]



Слика 3.7. Учвршћење узорака код испитивања пригушења учвршћен и слободан узорак

3.5. Електрична својства пена

Истраживањима се одређују два електрична својства:

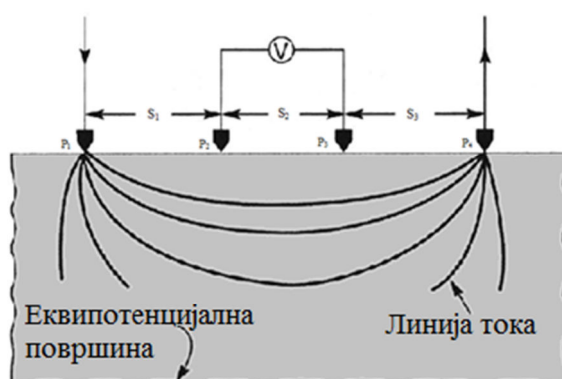
- Електрични отпор и
- Електрична проводност.

Ова својства су битна када се металне пене користе за израду батерија за што су посебно погодне никлене пене, (таблица 3.2.) показује вредности електричне отпорности металних пена.

Табела 3.2. Електрична отпорност металних пена

Својство	Материјал				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Релативна густина	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Грађа (тип ћелија)	Затворене			Отворене	
Електрична отпорност, ($10^{-8} \Omega m$)	90-3000	20-2000	210-250	180-450	300-500

Начин мерења електричног отпора приказан је на слици



Слика 3.8. Мерење електричних својства металних пена контактом у четири тачке

За испитивање се користе танке плоче од металне пене, контакт са узорком се поставља у четири тачке (слика 3.8.). Кроз P_1 и P_4 струја се уводи у узорак, а P_2 и P_3 користе се за мерење пада потенцијала. Електрична отпорност (e_0) се најчешће исказује у $\mu\Omega m$ и рачуна се помоћу формуле:

$$e_0 = 2\pi \left(\frac{U}{IS} \right) \quad (3.11.)$$

$$S = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} + \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \quad (3.12.)$$

I- јачина струје која се уводи у узорак,

U- пад потенцијала,

S₁, S₂, S₃- растојање између контакта.

Електрична проводност се добија из електричне отпорности према изразу:

$$R = e_o \frac{l}{A} = \frac{l}{\gamma A} \quad (3.13.)$$

R- електрични отпор,

l- дужина узорка,

A- вертикална површина на ток струје.

3.6. Спајање металних пена

Порозна грађа металних пена знатно отежава њихово спајање па су неопходне посебне технике спајања.

Могући начини спајања металних пена су:

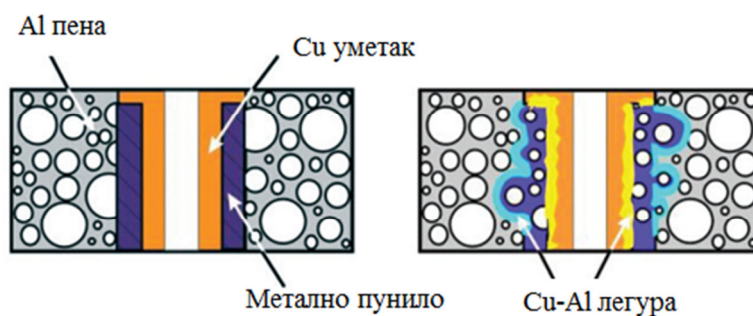
- Спајање лепковима,
- Стварање растављивих спојева,
- Спајање заваривањем.

3.6.1. Спајање лепковима

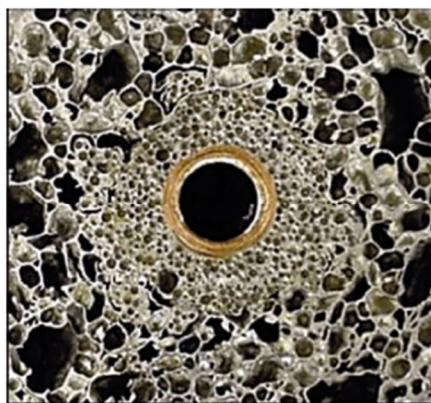
Као лепкови се најчешће користе епоксидне смоле које се примењују и приликом спајања непорозних метала. Лепкови имају боља или једнака својства од основног материјала. Приликом спајања лепковима могу се јавити проблеми као што су смањење топлотне стабилности и коефицијента ширења топлоте и повећање топлотне и електричне изолације. Спајање лепковима се углавном врши код стварања сендвич конструкција са језгром од металне пене.

3.6.2. Растављиви спојеви

Растављиви спојеви металних пена се остварују помоћу дрвених завртњева или помоћу металних уметака (слика 3.9.) у које је урезан навој. Ако се користи уметак, најчешће од бакра (слика 3.10.), неопходно је добро спајање са металном пеном. То се постиже употребом лепка, уметањем спојница током производње или коришћењем пунила. Када се користи пунило цели склоп треба загрејати, тада долази до упењавања пунила које повезује уметак и основну металну пену.



Слика 3.9. Повезивање уметка и металне пене

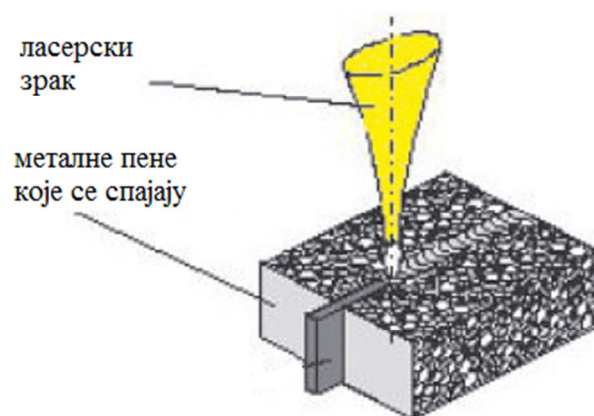


Слика 3.10. Метална пена са бакарним уметком

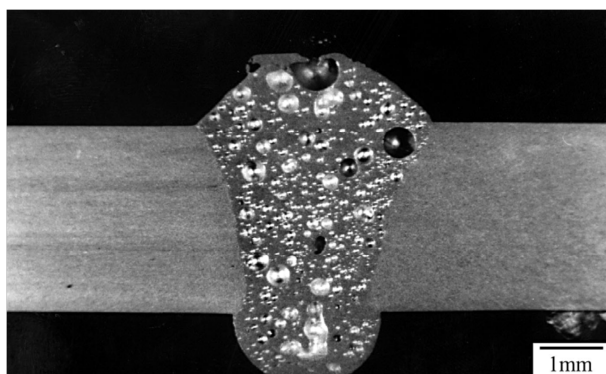
3.6.3. Заваривање

Металне пене се могу спојити поступцима заваривања и лемљења. Заваривање алуминијума је отежано због танког слоја оксида Al_2O_3 на површини који има вишу тачку топљења од алуминијума. Најчешће се заварује ласером (слика 3.11.) и то веома добро због фокусираног зрака којим је смањена могућност уништења ћелијске грађе. Код

металних пена је веома важна ћелијска структура и важно је што заваривањем зона утицаја топлоте је ужа у односу на друге поступке. Због преласка чврсте фазе у течну долази до урушавања што се може спречити употребом додатног материјала (шипке или плоче) на месту заваривања.[1]



Слика 3.11. Заваривање металне пене ласером



Слика 3.12. Попречни пресек завара

4. ПРИМЕНА МЕТАЛНИХ ПЕНА

Металне пене се примењују због њихових погодних својства у односу на друге материјале, недостатак металних пена је висока цена. Примена металних пена је веома разноврсна у различитим подручјима као што су: превозна средства (аутомобили, возови, трамваји...), ваздухопловна индустрија, бродоградња, машинска индустрија, грађевинарство, производња намештаја, архитектура, а највећи део примене се односи на полупроизоде у облику сендвич плоче.[10]

Табела 4.1. Примена металних пена

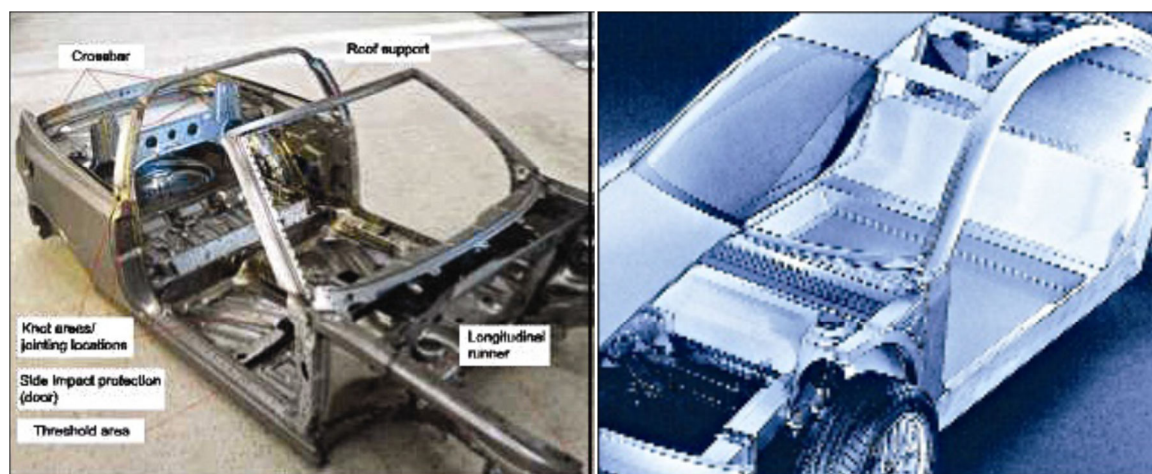
Подручје примене	Образложење
Лаке конструкције	Одличан однос крутости и тежине при савијању
Језгра сендвич конструкција	Мала густина и добра смичућа и ломна чврстоћа
Пригушење вибрација	Пригушење вибрација је и до 10 пута боље него код непорозних метала
Апсорпција звука	Металне пене са мрежастом структуром
Апсорпција енергије	Врло добра апсорпција ударне енергије при собним и повишеним температурама
Замена за дрво	Лагане су, круте и могу се спајати дрвеним завртњима
Измењивачи топлоте, хладњаци	Пене са отвореним ћелијама добро проводе топлоту због велике повишеностиводљивости зидова
Ватроотпорност	Пене са затвореним ћелијама- зидови прекривени слојем оксида
Топлотна изолација	Одређене врсте пена имају мали коефицијент топлотне проводности
Биокомпатибилни умети	Ћелијска структура биокомпатибилних титанових пена стимулише раст ћелије
Филтери	Могућност филтрирања гасова и течности
Електромагнетна заштита	Добра електрична проводљивост
Електроде, држачи катализатора	Велики однос површине и запремине

Металне пене се најчешће примењују за сендвич конструкције (слика 4.1.).



Слика 4.1. Сендвич конструкција са језгром од металне пене

Металне пене имају велику примену и у индустрији транспорта. У аутоиндустрији (слика 4.2.) металне пене се углавном користе као језгра сендвич конструкција. Користе се за израду делова оквира и оплате и тиме се маса аутомобила смањује за око 20% и смањују се трошкови потрошње горива. Као што је у раду већ поменуто да металне пене имају добра топлотна и звучно-изолацијска својства, пригушење вибрација и могу се применити за раздвајање кабине возила од дела где је мотор. Да би се повећала сигурност путника при ударцима израђују се браници од Al (слика 4.3.). Осим у аутоиндустрији ови материјали користе се и у индустрији шинских возила, бродова, авиона и свемирских летелица. Због велике површине и добре топлотне проводљивости зидова пене са отвореним ћелијама добро проводе топлоту и могу се користити за израду измењивача топлоте.

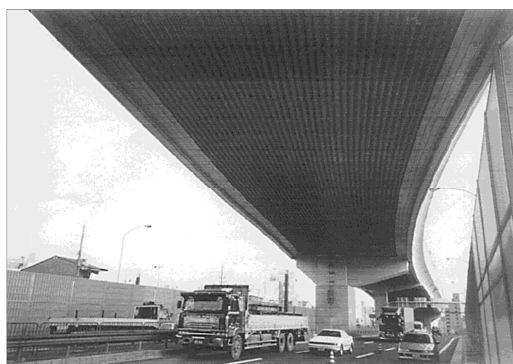


Слика 4.2. Примена металних пена у ауто индустрији



Слика 4.3. Браник аутомобила од металне пене

Металне пене могу да се користе у грађевинарству јер веома добро упијају звук. Истраживања показују да бушењем отвора упијање звука металних пена доводи на ниво стаклене вуне која се углавном употребљава у те сврхе. Стаклена вуна под утицајем ватре ослобађа отровне гасове а металне пене су ватроотпорне. На слици 4.4. је приказан вијадукт чија је доња површина од металне пене која добро упија буку. [11]



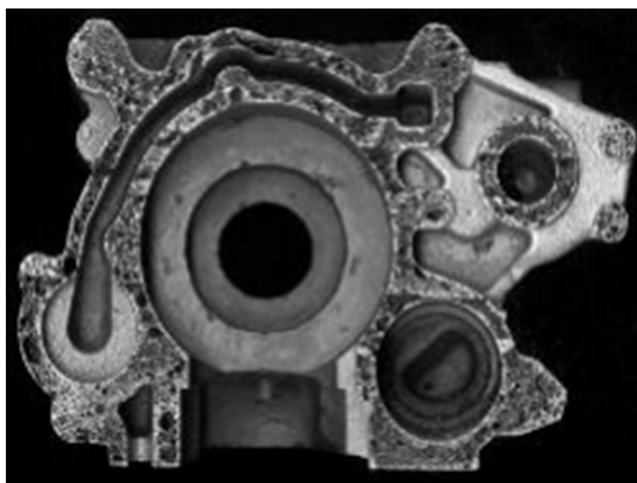
Слика 4.4. Вијадукт чија је доња површина од металне пене

Пригушивачи звука и филтери (слика 4.4.) се могу израђивати од алуминијумских сунђера. Филтери служе за одвајање две течности или за одвајање крутих честица од гасова или течности.

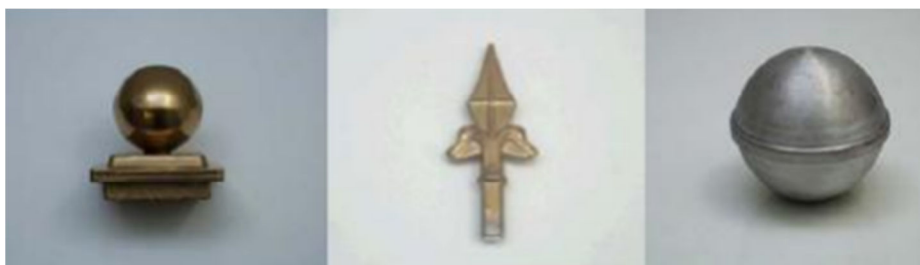


Слика 4.5. Пригушивачи звука од металних сунђера и филтери од металне пене

Поступцима ливења могу се изградити веома сложени производи од алуминијумских металних пена (слика 4.6.). Механичка својства могу се оптимизовати различитим поступцима термичке обраде легуре од које настаје пена, а такође су могућа и модификовања површине. У индустрији намештаја важна је мала маса металних пена, због порозне грађе имају занимљива естетска својства (слика 4.7.) и лако се преносе због мале масе.[12]



Слика 4.6. Ливени производ од алуминијумске пене



Слика 4.7. Предмети од металних пена за естетске сврхе

5. Закључак

Металне пене су веома занимљив и конструкцијски применљив материјал који због свог изгледа подсећа на сунђер или пену и зато је добио назив металне пене. Употреба металних пена је скоро неограничена, могу се користити за изградњу чврстих грађевина, безбеднијих аутомобила, замена су за делове људског тела где је однос јачине и тежине најважнији, као што су вештачки кукови и слично, летелица, бродова, за украсне предмете, измењивачи топлоте, намештај, медицинска помагала, пригушивачи вибрација и звука. Металне пене су применљиве и у војсци па се могу израђивати панцири и оклопна возила. Лакше су од већине материјала који су у употреби и чувају енергију, способне су да издрже велике притиске. У грађевинским материјалима будућности металне пене могу наћи примену.

Проблеми у производњи и примени металних пена настају због непотпуног овладавања параметрима процеса израде, због тога се често добијају неуједначене и непредвидљиве структуре и варијације у вредностима својства. Усавршавањем поступка производње прилагођавају се и методе испитивања својстава специфичностима понашања металних пена. Ограничење је висока цена металних пена.

Литература

- [1]. Томислав Филетин Металне пјене, ФСБ Загреб 2003
- [2]. Гиговић, Металне пјене, Факултет за металургију и материјале, Зеница 2005
- [3]. Гојко Марић, Томислав Филетин, Иван Крамер, Металне пене-производња, својства, примена, Факултет машинства и бродоградње, Завод за материјале, Загреб 2008
- [4]. Томислав Филетин, Преглед развоја и примјене савремених материјала, Загреб 2000
- [5]. P. Zitha, J. Banhart, G. Verbist (MIT-Verlag Bremen, 2000) Metallicfoams: challenges and opportunities
- [6]. http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/metalne_pjene_tehn_razvoj.pdf - приступљено јула 2015
- [7]. <http://www.hdmt.hr/wp-content/uploads/2013/01/pregled-razvoja-i-primjene-suvremenih-materijala.pdf> - приступљено августа 2015
- [8]. http://repozitorij.fsb.hr/1184/1/28_01_2011_Ivo_Misur_Zavrsni_rad_verzija_3_ggg.pdf - приступљено августа 2015
- [9]. <http://www.plagosus.net/blog/tech/nauka/metalna-pena-materijal-buducnosti/> - приступљено августа 2015
- [10]. <http://www.metalfoam.net/> - приступљено јуна 2015
- [11]. <http://www.metalfoam.co.kr/html/english.htm> - приступљено септембра 2015
- [12]. <http://search.aol.com/aol/search?q=piece+of+metal+foams> - приступљено августа 2015