

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**OTPORNOST NA TROŠENJE KERAMIČKIH PREVLAKA NA
ALUMINIJSKIM PJENAMA**

MAGISTARSKI RAD

Denis Prusac

Zagreb, 2007.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**OTPORNOST NA TROŠENJE KERAMIČKIH PREVLAKA NA
ALUMINIJSKIM PJENAMA**

MAGISTARSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Vinko Ivušić

Denis Prusac

Zagreb, 2007.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK:

Ključne riječi: metalne pjene, oksidno – keramičke prevlake, plameno naštrcavanje, abrazija, erozija, poroznost pjene

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mentor rada: Prof. dr. sc. Vinko Ivušić

Broj stranica: 123

Broj slika: 95

Broj tablica: 20

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 29

Datum obrane:

Povjerenstvo: Dr. sc. Tomislav Filetin, redovni profesor

Dr. sc. Vinko Ivušić, redovni profesor

Dr. sc. Hrvoje Ivanković, redovni profesor Fakulteta kemijskog inženjerstva i Tehnologije, Zagreb

Institucija u kojoj je rad pohranjen: SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Koristim prigodu da zahvalim prijatelju doc.dr.sc. Krešimiru Grilecu na dugogodišnjoj pomoći u raznim životnim situacijama, pa tako i u ovoj. Također zahvaljujem i svom mentoru prof.dr. sc. Vinku Ivušiću na razumijevanju i strpljenju, te pomoći tijekom izrade ovog magistarskog rada i uopće. Posebne riječi pohvale upućujem doc.dr.sc. Gojku Mariću na organizaciji i konstantnoj pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela ovog rada. Na kraju se zahvaljujem velikom čovjeku Ivanu Krameru, dipl.ing., na nesebičnoj pomoći pri prikupljanju potrebne stručne literature.

SADRŽAJ

PREDGOVOR
SAŽETAK RADA
SUMMARY
POPIS OZNAKA
POPIS SLIKA
POPIS TABLICA

1. UVOD	1
2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA	3
2.1. Ubrizgavanje plina u taljevinu	3
2.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini	4
2.3. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi	6
2.4. Eutektičko skrućivanje plin - metal	10
2.5. Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama	12
2.6. Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv	14
2.7. Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera	15
2.8. Taloženje metala na ćelijaste praoblake	16
2.9. Ekspanzija plina u taljevini	17
3. SVOJSTVA METALNIH PJENA	19
3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena	19
3.1.1. Krutost	21
3.1.2. Tlačna čvrstoća	22
3.1.3. Vlačna čvrstoća	26
3.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju - umor	28
3.1.5. Ponašanje pri puzanju	32
3.1.6. Apsorpcija energije udara	35
3.1.7. Propagacija udarnog vala	39
3.1.8. Ojačane aluminijske pjene	41
3.1.9. Sendvič konstrukcije	47
3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena	50

3.2.1. Toplinska vodljivost	50
3.2.2. Vatrootpornost	50
3.3. Zvučna svojstva metalnih pjena	51
3.4. Prigušenje vibracija metalnih pjena	52
3.5. Spajanje metalnih pjena	53
3.5.1. Spajanje ljepilima	53
3.5.2. Rastavljivi spojevi	56
3.5.3. Zavarivanje i lemljenje metalnih pjena	56
4. PRIMJENA METALNIH PJENA	57
5. TOPLINSKI NAŠTRCANI SLOJEVI	66
5.1. Definicija	67
5.2. Namjena toplinski naštrcanih slojeva	68
5.3. Osnovni materijali	70
5.3.1. Prikladni osnovni materijali	70
5.3.2. Poželjno toplinski obrađeno stanje prije obrade	70
5.4. Materijali prevlaka	71
5.5. Principi postupka	72
5.5.1. Elektrolučno naštrcavanje	73
5.5.2. Plameno naštrcavanje	74
5.5.3. Plazmatsko naštrcavanje	75
5.5.4. Visokobrzinsko plameno naštrcavanje	76
5.6. Svojstva obradka	77
5.7. Kontrola sloja	78
5.8. Metalni oksidi	79
5.9. Čisti metali	81
6. EKSPERIMENTALNI DIO	82
6.1. Postupak proizvodnje uzoraka Al pjena	82
6.2. Izrada uzoraka	84
6.3. Rezanje uzoraka	85
6.4. Toplinsko naštrcavanje uzoraka	87
6.4.1. XUPER ULTRA BOND 5100	87
6.4.2. METACERAM 28030	89
6.4.3. METACERAM 28085	89
6.4.4. METACERAM 28095	89
6.5. Metalografsko ispitivanje	90
6.5.1. Priprema uzoraka	91

6.5.2. Karakterizacija osnovnog materijala i prevlaka	95
6.6. Otpornost na trošenje prevlaka na ispitnim uzorcima	96
6.6.1. Abrazijsko trošenje	96
6.6.2. Erozijska česticama	98
7. REZULTATI ISPITIVANJA	102
8. ANALIZA REZULTATA	112
8.1. Uvod	112
8.2. Definiranje utjecajnih faktora i njihovih nivoa	112
8.2.1. Poroznost Al metalne pjene	112
8.2.2. Primjenjena sila	112
8.2.3. Vrsta prevlake	112
8.3. Izbor modela pokusa i obrazloženje	113
8.4. Izvedba pokusa	114
8.4.1. Raspon variranja	114
8.5. Obrada podataka softverskim paketom «DESIGN EXPERT»	118
8.5.1. Mogućnosti DOE	118
8.5.2. Faktorska analiza	118
8.5.3. Unos podataka i softversko rješenje	119
9. ZAKLJUČAK	121
10. LITERATURA	122
PRILOG	
ŽIVOTOPIS	
BIOGRAPHY	

PREDGOVOR

Metalne pjene predstavljaju relativno novu vrstu i oblik materijala koji se razvijaju na osnovi oponašanja strukture i svojstava prirodnih ćelijastih materijala kao što su: drvo, kosti, koralji, pčelinje saće, i sl.. Njihova najvažnija svojstva temelje se na vrsti materijala stijenke ćelija, obliku ćelija (otvorene ili zatvorene) i procesu proizvodnje kojim se dobijaju.

U odnosu na druge konstrukcijske materijale metalne pjene imaju sljedeće prednosti: mala gustoća (relativna gustoća ρ/ρ_s – omjer gustoće pjene i gustoće metala), prilagodljiva toplinska svojstva (ovisno o strukturi), vatrootpornost, dobra električna svojstva, izuzetno prigušenje energije udara, vibracija i zvuka, relativno visoka krutost sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene, itd.

Trenutno veliki problem u proizvodnji i primjeni predstavlja nepotpuno ovladavanje parametrima procesa izrade. Često se dobivaju neujednačene i nepredvidljive strukture uz istovremeno varijacije u vrijednostima svojstava.

Današnji stupanj razvoja metalnih pjena nalazi svoje mjesto u širokom polju primjena: dijelovi cestovnih i tračničkih vozila, letjelica, brodova, u graditeljstvu, za namještaj, za ukrasne predmete, za medicinska pomagala, prigušivače zvuka i vibracija i sl. Za širu primjenu ograničenje je još uvijek njihova visoka cijena.

Trenutno se najviše razvijaju metalne pjene na bazi aluminijske i nikla, a mogu se naručiti i pjene na bazi magnezija, olova, cinka, bakra, bronce, titana, čelika pa čak i zlata.

U ovom radu proučavat će se aluminijske metalne pjene na koje će se plamenim naštrcavanjem nanositi slojevi oksidnih keramika. Njihova uloga će biti povišenje površinske tvrdoće uz istovremeno povećanje otpornosti na trošenje. Time će se pokušati dati novi pravac razvoja primjene metalnih pjena jer do danas u dostupnoj literaturi to još nije učinjeno.

Ipak, T. Filetin i G. Marić prvi su kod nas pisali o toplinski naštrcanim slojevima na aluminijskim pjenama, [1].

SAŽETAK

U prvom dijelu rada opisani su postupci proizvodnje metalnih pjena, te njihova svojstva i primjena.

Cilj ovog magistarskog rada bio je istražiti mogućnost primjene različitih površinskih slojeva za povećanje otpornosti na trošenje metalnih pjena.

U radu su ispitivane dvije različite kvalitete, tj. različite poroznosti aluminijskih pjena, AlSi10 koje su proizvedene u Laboratoriju za nemetale, FSB. Na epruvetama tih pjena postupkom plamenog naštrcavanja nanosene su tri različite vrste prevlaka, i to:

- METACERAM 28030 (oksidnokeramički prašak na bazi Al₂O₃),
- METACERAM 28085 (oksidnokeramički prašak na bazi ZrO₂),
- METACERAM 28095 (metalni prašak na bazi molibdena).

Tako obrađene epruvete su ispitivane na otpornost abrazijskom i erozijskom trošenju u Laboratoriju za tribologiju, Zavoda za materijale, FSB, a rezultati su analizirani softverskim paketom "DESIGN EXPERT".

Primjenom F – testa analizirana je varijanca, te efekti interakcija faktora. Pokazalo se da su utjecajni faktori primjenjena sila i vrsta sloja.

Ključne riječi: metalne pjene, oksidno – keramičke prevlake, plameno naštrcavanje, abrazija, erozija, poroznost pjene

SUMMARY

In the first part of this work the author described the procedure of producing metal foams as well as their characteristics and usage.

The aim of this masters degree has been to explore the possibilities of uasage of a various surface layers to increasing the resistance on wearing of metal foams.

Two different qualities are explored in this work i.e. different porosity of aluminium foams, AlSi10, which were produced in Laboratory for non – ferrous metals, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Arhitecture. At the test specimens of those foams with the flame spraying three different types of coating were applied such as:

METACERAM 28030 (oxideceramic powder on the basis of Al₂O₃),

METACERAM 28085 (oxideceramic powder on the basis of ZrO₂),

METACERAM 28095 (metal powder on the basis of molibden).

Thus prepared specimens were tested on wear resistance of abrasion and erosion in the Laboratory of Tribology, Chair for Materials, and the results were analysed by the DESIGN EXPERT software package.

Using the F – test, variance was analysed as the effects of interaction factors in abrasive wearing. It showed that influential factors were applied, force usage and the types of layers, and in coating METACERAM 28030 and METACERAM 28095 and foam porosity.

Key words: metal foams, oxideceramic coatings, flame spraying, abrasion, erosion, foam porosity.

POPIS OZNAKA

a ,	Duljina brida četvrtastog komada korištenog za mjerenje progiba, mm
A ,	Konstanta potrebna za izračunavanje početnog istezanja (ϵ_0) pri puzanju
$(AG)_{eq}$,	Ekvivalentna smična krutost, N
a^* ,	Negativno ubrzanje (usporenje), m/s ²
b ,	Širina uzorka, mm
B ,	Savojna krutost
C ,	Konstanta
c ,	Visina jezgrenog sloja, mm
c ,	Razmak između uporišta, mm
$C1$	Koeficijent za izračunavanje maksimalne brzine udara (vt), m/s
D ,	Promjer provrta, mm
d ,	Visina uzorka, mm
E ,	Modul elastičnosti, GPa
E_c ,	Modul elastičnosti jezgre sendvič - konstrukcije, GPa
E_f ,	Modul elastičnosti limova sendvič - konstrukcije, GPa
E_f ,	Modul savitljivosti, GPa
$(EI)_{eq}$,	Ekvivalentna savojna krutost, Nmm ²
f ,	Frekvencija, Hz
F ,	Sila, N
F_c ,	Sila koja uzrokuje pomak, N
F_{fy} ,	Sila stradanja sendvič konstrukcije zbog tečenja, N
G ,	Modul smičnosti, GPa
G_c ,	Modul smičnosti jezgre sendvič- konstrukcije, GPa
h ,	Debljina stijenke paketa od metalne pjene, mm
h ,	Visina ispitnog uzorka, mm
H ,	tvrdoća
HV ,	Tvrdoća po Vickersu
H ,	Udaljenost mjesta djelovanja sile od kraja uzorka, mm
I ,	Moment inercije, mm ⁴
KIC ,	Lomna žilavost, MPa \cdot m ^{1/2}
L ,	Udaljenost između sila na donjoj strani uzorka, mm
m ,	Konstanta propagacije
m ,	Masa, kg
M ,	Moment, Nmm
n ,	EkspONENT puzanja
N ,	Broj ciklusa promjenjivog opterećenja
P ,	Snaga, W
p ,	Tlak, MPa
Q ,	Aktivacijska energija, kJ/mol
R ,	Promjenjivo tlačno opterećenje, MPa

<i>R</i> ,	Polumjer kuglica korištenih za test četiri kuglice, mm
<i>Ra</i> ,	Srednje aritmetičko odstupanje profila, μm
<i>Rz</i> ,	Prosječna visina neravnina, μm
<i>Rd</i> ,	Dinamička izdržljivost, MPa
<i>Re</i> ,	Granica tečenja materijala pjene, MPa
<i>Re,c</i> ,	Granica tečenja jezgre sendvič- konstrukcije, MPa
<i>Re,f</i> ,	Granica tečenja limova sendvič - konstrukcije, MPa
<i>Ret</i> ,	Granica stlačivanja, MPa
<i>Rm</i> ,	Vlačna čvrstoća, MPa
<i>Rmo</i> ,	Smična čvrstoća, MPa
<i>Rmt</i> ,	Tlačna čvrstoća, MPa
<i>s</i> ,	Udaljenost između sila (na gornjoj strani uzorka) u slučaju opterećenja u četiri točke, mm
<i>t</i> ,	Debljina vanjskih ploča, mm
<i>t</i> ,	Vrijeme, s
<i>T</i> ,	Temperatura, K
<i>U1</i> ,	Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko i erozijsko trošenje
<i>U2</i> ,	Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko i erozijsko trošenje
<i>v</i> ,	Brzina, m/s
<i>vD</i> ,	Brzina u točki D, m/s
<i>vt</i> ,	Maksimalna brzina kod koje može doći do udara, m/s
<i>W</i> ,	Apsorpcija energije po jedinici volumena, MJ/m ³
<i>W</i> ,	Debljina uzorka, mm
<i>x</i> ,	Pomak, mm
<i>y</i> ,	Udaljenost od neutralne osi, mm

GRČKA SLOVA

α ,	Kut sudara kod erozijskog trošenja, °
α_1 ,	Lokalni koeficijent prijelaza topline, W/m ² K; koeficijent
α, β ,	Koeficijenti za izračunavanje maksimalne brzine udara, (vt)
δ ,	Progib, mm
ε ,	Deformacija, mm/mm;%
ε_D ,	Deformacija pri zgušnjavanju, mm/mm;%
ε_f ,	Vlačna duktilnost
ε^* ,	Brzina puzanja u drugom stadiju (brzina sekundarnog puzanja), s ⁻¹
ε_0^* ,	Početna brzina puzanja materijala, s ⁻¹
η ,	Bezdimenzionalni koeficijent gubitka
η_c ,	Faktor gubitka, %
λ ,	Koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK
ν ,	Poissonov faktor
ρ ,	Gustoća metalne pjene, kg/m ³
ρ_c ,	Gustoća jezgre sendvič – konstrukcije, kg/m ³
ρ_s ,	Gustoća neporoznog materijala, kg/m ³
ρ/ρ_s ,	Relativna gustoća, kg/m ³
σ ,	Naprezanje, MPa
σ_c ,	Naprezanje u jezgri sendvič – konstrukcije pri savijanju, MPa
σ_f ,	Naprezanje limova sendvič – konstrukcije pri savijanju, MPa
σ_g ,	Maksimalno (gornje) promjenjivo naprezanje, MPa
σ_d ,	Minimalno (donje) promjenjivo naprezanje, MPa
σ_0 ,	Referentno naprezanje, MPa
σ_{et} ,	Naprezanje stlačivanja, MPa
$\sigma_{max, bp}$,	Maksimalno naprezanje uzorka bez provrta, MPa
$\sigma_{max, p}$,	Maksimalno naprezanje uzorka s provrtom, MPa
χ ,	Prosječna vrijednost trošenja, g/mm
ϕ ,	Volumni udio krutog materijala u stijenci ćelija

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Prirodni ćelijasti materijali, [2]	1
Slika 2.1. Proizvodnja aluminijske pjene ubrizgavanjem zraka u taljevinu postupkom "Alcan / NorskHydro / CYMAT", [3]	4
Slika 2.2. Nastajanje ALPORAS metalne pjene „Shinko Wire“ postupkom, [4]	5
Slika 2.3. Ploče izrezane iz većeg bloka metalne pjene nastalog postupkom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u taljevini, [3]	6
Slika 2.4. Pojednostavljeni prikaz postupka FOAMINAL - ALULIGHT	7
Slika 2.5. Proces nastajanja ALULIGHT metalne pjene, [3]	8
Slika 2.6. Kruti uložak na okviru osobnog automobila izrađen od metalne ALULIGHT pjene, povećava krutost i čvrstoću pokazanog dijela, [2]	10
Slika 2.7. Ispuna naplatka kotača izrađenog od metalne ALULIGHT pjene (ušteta od oko 2 kg po kotaču), [3]	10
Slika 2.8. Binarni dijagram stanja metal – vodik, [5]	11
Slika 2.9. Proces nastajanja metalne pjene eutektičkim plin – metal skrućivanjem, [5]	12
Slika 2.10. Proces nastajanja kuglaste pjene IFAM postupkom, [4]	13
Slika 2.11. Metalna kuglasta pjena od nehrđajućeg čelika AISI 316 L, [4]	13
Slika 2.12. Nastajanje metalne pjene povezivanjem dvaju materijala od kojih je jedan topljiv, [6] a) rastaljeni metal (npr. aluminij i njegove legure) infiltrira se u sloj topljivih čestica; b) čestice se otapaju u prikladnom otapalu (npr. voda) čime nastaju otvorene ćelije	14
Slika 2.13. Proces nastajanja ERG DUOCEL metalne pjene, [6]	15
Slika 2.14. Proces nastajanja Ni metalne pjene (tzv. INCO pjena), [6]	16
Slika 2.15. Proces nastajanja metalne pjene procesom širenja inertnog plina, [6]	17
Slika 3.1. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena, [8]	21
Slika 3.2. Dijagrami „naprezanje – deformacija“ metalnih pjena pri tlačnom opterećenju, [5]	22
Slika 3.3. Krivulje „naprezanje – deformacija“ pod tlačnim opterećenjem aluminijskih pjena; a) do deformacije od 5% b) pri većim deformacijama, [9]	23
Slika 3.4. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći, [9]	24
Slika 3.5. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene (<i>Ret</i>) i granice tečenja materijala ćelije (<i>Re</i>) o relativnoj gustoći, [9]	24
Slika 3.6. Dijagram „naprezanje – skraćenje“ u ovisnosti o svojstvima duktilnosti i krhkosti metalne pjene, [3]	25
Slika 3.7. Utjecaj gustoće metalne pjene na dijagram „naprezanje – skraćenje“, [3]	25

Slika 3.8. Utjecaj debljine površine metalne pjene na dijagram „naprezanje – skraćenje“, [3]	26
Slika 3.9. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku pseće kosti, [10]	26
Slika 3.10. Uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće napravljeni od CYMAT metalne pjene, [10]	27
Slika 3.11. Dijagram „naprezanje – istežanje“ Al pjena, [9]	28
Slika 3.12. Vrste dinamičkih opterećenja, [5]	28
Slika 3.13. Skraćenje Duocel Al – 6101 T6 pjene u uvjetima umora izazvanog tlačnim opterećenjima, [5]	29
Slika 3.14. Tip 2 ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja, [5]	29
Slika 3.15. Tip 3 ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja, [5]	30
Slika 3.16. Čvrstoća kod postojanja provrta u uvjetima tlačnog i vlačnog opterećenja. Ispitivani materijali nisu osjetljivi na ureze, [5]	31
Slika 3.17. Urezna čvrstoća u uvjetima tlačnog promjenjivog opterećenja ($R=0,1$) uz praktički beskonačan broj ciklusa na pjenama s provrtom, [5]	32
Slika 3.18. Krivulje puzanja ALPORAS pjene u uvjetima vlačnog i tlačnog opterećenja, [11]	35
Slika 3.19. Omjer između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće, [12]	36
Slika 3.20. Krivulje koje prikazuju apsorpciju energije pri savijanju a) i tlaku b), [5]	37
Slika 3.21. Paket obložen metalnom pjenom, [6]	37
Slika 3.22. Udarni test nosača motora BMW-a, [13]	39
Slika 3.23. Krivulja naprezanje-deformacija metalne pjene, [5]	40
Slika 3.24. Parametar S - omjer krutost/masa za različite materijale i opterećenja (E - modul elastičnosti, ρ - gustoća, 100 %-vrijednost za čelik), [14]	42
Slika 3.25. Oblici mreža od nehrđajućeg čelika za ojačanje Al pjena, [15]	42
Slika 3.26. Ojačanje na tlačnoj strani metalne pjene, [16]	43
Slika 3.27. Orijehtacija ojačanja mreže od istegnutog austenitnog čelika, [17]	44
Slika 3.28. Utjecaj ojačanja na ponašanje pri savijanju grede od AlSi12 pjene poroznosti od 81%, [17]	45
Slika 3.29. Deformacija uzoraka AlMg1Si0,6 pjene, poroznosti 85 %, nakon udarnog ispitivanja (maksimalna energija 15 J) za različite položaje ojačanja, [17]	46
Slika 3.30. Svojstva ojačane AlSi12 pjene debljine 15 mm, poroznosti 85 % u usporedbi s Al limom debljine 3 mm; AlSi12 debljine 15 mm, poroznosti 80 %; sendvič AlSi12 debljina pjene 11 mm, poroznosti 80 %, vanjskih Al limova debljine 1 mm , [14]	47
Slika 3.31. Sendvič-konstrukcije pod opterećenjem u a) četiri točke; b) tri točke, [5] i [18]	48
Slika 3.32. Testiranje metalnih pjena na savijanje u četiri točke, [16]	50
Slika 3.33. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al, [19]	52
Slika 3.34. Proces povezivanja umetka i metalne pjene, [6]	54
Slika 3.35. Povezivanje metalne pjene pomoću vijka i umetka, [20]	54
Slika 3.36. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena, [16]	55
Slika 3.37. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena, [16]	55
Slika 3.38. Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena, [16]	56

Slika 4.1. Sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene, [14]	58
Slika 4.2. Primjena metalnih pjena u autoindustriji, [16]	59
Slika 4.3. Sposobnost apsorpcije energije udara metalnih pjena prilikom ispitivanja na tlak, [16]	60
Slika 4.4. Grijača ploča napravljena od ALPORAS ojačane pjene (600mmx 600mm), [16]	61
Slika 4.5. Raspored topline u običnoj grijačkoj ploči (lijevo), i ALPORAS grijačkoj ploči (desno), [16]	61
Slika 4.6. Plovak od metalne pjene, [16]	61
Slika 4.7. Prigušivači zvuka od aluminijskih spužvi, [21]	62
Slika 4.8. Lijevani proizvod od aluminijske pjene, [22]	63
Slika 4.9. Korištenje metalnih pjena u estetske svrhe, [16]	63
Slika 4.10. Rezultati testiranja sendvič konstrukcija s jezgrom od aluminijske pjene, [23]	64
(a), (b) – površinski slojevi napravljeni od staklenih vlakana	
(c), (d) – površinski slojevi napravljeni od kevlar	
(e), (f) - površinski slojevi napravljeni od ugljičnih vlakana	
Slika 4.11. Alatni stroj s udarnom šipkom, [23]	65
Slika 4.12. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od niklove pjene, [24]	65
Slika 5.1. Podjela najvažnijih postupaka naštrcavanja prema vrsti nositelja energije, [25]	72
Slika 5.2. Shema postupka elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice, [25]	73
Slika 5.3. Shema postupka plamenog naštrcavanja pomoću žice ili praha, [25]	74
Slika 5.4. Shema plazmatskog naštrcavanja, [25]	75
Slika 5.5. Shema postupka visokobrzinskog plamenog naštrcavanja praha, [25]	76
Slika 6.1. Peć za proizvodnju pjena	83
Slika 6.2. Punjenje kalupa prekursorom	83
Slika 6.3. Kalup (147x147x21 mm)	84
Slika 6.4. Uzorci U1 i U2	85
Slika 6.5. Shematski prikaz rezanja uzoraka U1, U2	86
Slika 6.6. Način rezanja epruveta za abrazijsko trošenje	86
Slika 6.7. Način rezanja epruveta za abrazijsko i erozijsko trošenje	87
Slika 6.8. Dimenzije epruveta za ispitivanje otpornosti na: a) abrazijsko (48x18x21mm) i b) erozijsko trošenje (18x18x21mm)	87
Slika 6.9. Makrografska slika zalivenih uzoraka	93
Slika 6.10. Uređaj "suhi pijesak/gumeni kotač"	97
Slika 6.11. Skica uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač", [27]	97
Slika 6.12. Trag od ispitivanja na uzorcima na uređaju "suhi pijesak/gumeni kotač"	98
Slika 6.13. Skica i fotografija dijela uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama, [27]	99
Slika 6.14. Uređaj za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama	100
Slika 6.15. Fotografija epruveta korištenih pri ispitivanju s prevlakama:	100
a) METACERAM 28030, b) METACERAM 28085,	
c) METACERAM 28095	
Slika 7.1. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U1 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 15 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja	102

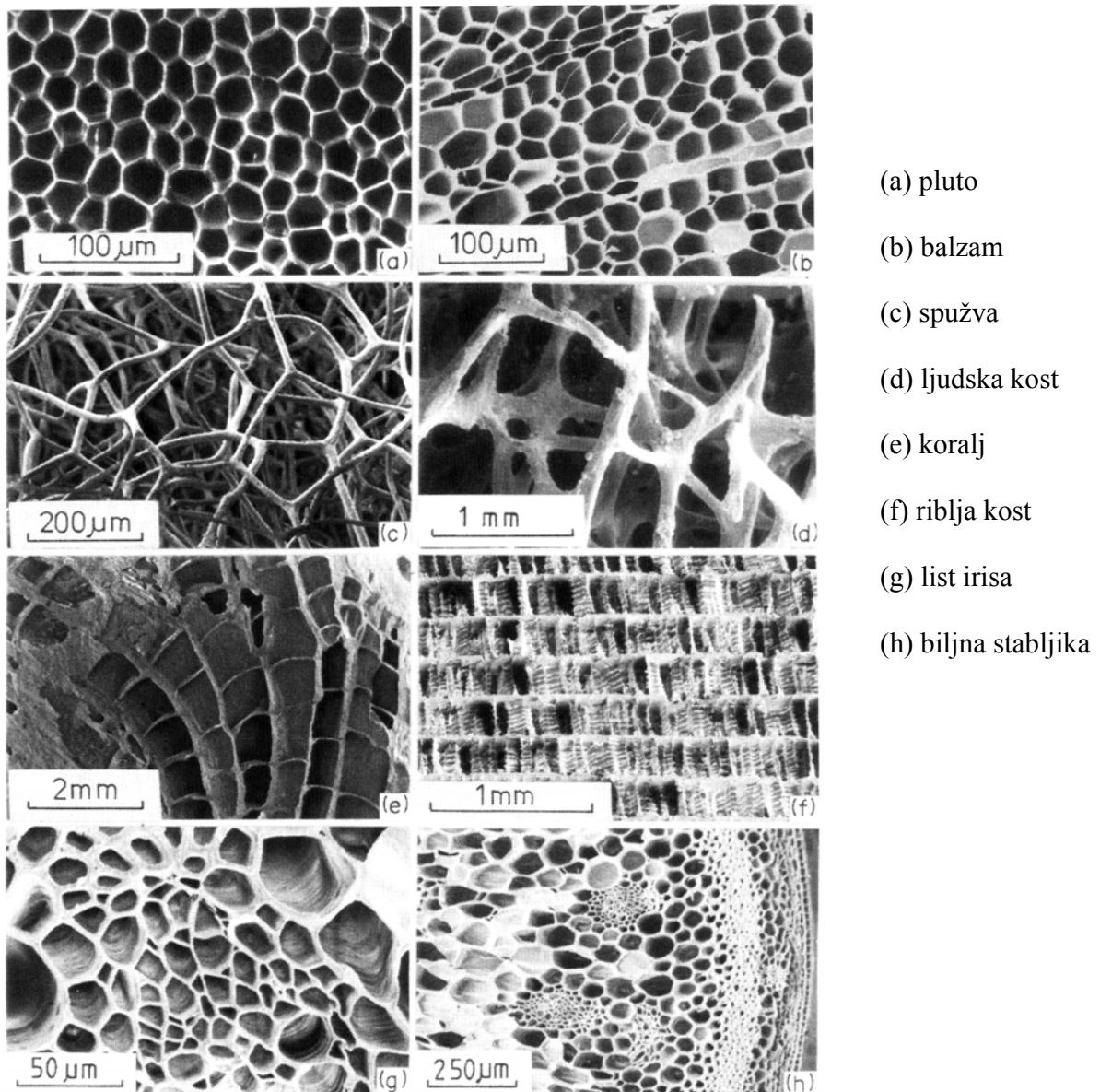
Slika 7.2. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U2 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 15 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja	102
Slika 7.3. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U1 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 45 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja	104
Slika 7.4. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U2 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 45 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja	104
Slika 7.5. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U1 za pojedine prevlake uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5 \text{ min}$	106
Slika 7.6. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U2 za pojedine prevlake uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5 \text{ min}$	106
Slika 7.7. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U1 za pojedine prevlake uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15 \text{ min}$	109
Slika 7.8. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U2 za pojedine prevlake uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15 \text{ min}$	109
Slika 8.1. Model planiranja potpunog faktorskog plana pokusa 23, [28]	113

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva metalnih pjena, [5]	20
Tablica 2. Parametri puzanja pojedinih metala, [11]	33
Tablica 3. Moguća primjena metalnih pjena, [5]	57
Tablica 4. Odabrani primjeri upotrebe za toplinsko naštrcavanje, [25]	68
Tablica 5. Glavna područja primjene oksidno-keramičkih slojeva, [25]	80
Tablica 6. Smjernice za parametre naštrcavanja, [26]	88
Tablica 7. Postupak brušenja uzorka	93
Tablica 8. Postupak poliranja uzorka	93
Tablica 9. Mikrostruktura prevlaka na uzorcima od Al pjene	94
Tablica 10. Rezultati mjerenja debljine prevlaka i vezivnih slojeva na uzorcima od Al pjena prije trošenja	95
Tablica 11. Rezultati abrazijskog ispitivanja za primijenjenu silu $F = 15\text{ N}$, i broj okretaja $n = 100$	103
Tablica 12. Rezultati abrazijskog ispitivanja za primijenjenu silu $F = 45\text{ N}$, i broj okretaja $n = 100$	105
Tablica 13. Rezultati erozijskog ispitivanja uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5\text{ min}$	107
Tablica 14. Prosječan gubitak mase epruvete za pojedine prevlake uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5\text{ min}$	108
Tablica 15. Rezultati erozijskog ispitivanja uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15\text{ min}$	110
Tablica 16. Prosječan gubitak mase epruvete za pojedine prevlake uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15\text{ min}$	111
Tablica 17. Plan pokusa 23	114
Tablica 18. Rezultati mjerenja gubitka mase prevlaka METACERAM 28030 i METACERAM 28085	115
Tablica 19. Rezultati mjerenja gubitka mase prevlaka METACERAM 28085 i METACERAM 28095	116
Tablica 20. Rezultati mjerenja gubitka mase prevlaka METACERAM 28030 i METACERAM 28095	117

1. UVOD

U prirodi postoji mnogo ćelijastih materijala, kao što su drvo, kamen, kost, koralj i sl. (slika 1.1.). Metalne pjene su pokušaj oponašanja takvih građa i struktura za tehničke uvjete primjene. Njihova glavna karakteristika je visoka poroznost koja se kreće od 40 do 90%. Uz to, oblik, veličina i vrsta osnovnog materijala bitno određuju njihova svojstva.



Slika 1.1. Prirodni ćelijasti materijali, [2]

Metalne pjene predstavljaju relativno novi oblik metalnih materijala koji su još uvijek nedovoljno poznati nženjerima i znanstvenicima. Intezivna istraživanja počela su unatrag 10 – tak godina, iako su prvi patenti prijavljeni još 50 – tih godina prošlog stoljeća. Metalne pjene izrađuju se novim procesnim tehnikama koje se iz dana u dan razvijaju i unapređuju. Neki od tih postupaka još nisu u potpunosti dorađeni i kvantitativno opisani, te nije usavršeno upravljanje procesima izrade. U slijedećih nekoliko stranica prikazat će se neki od trenutno najzastupljenijih postupaka nastajanja metalnih pjena.

2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA

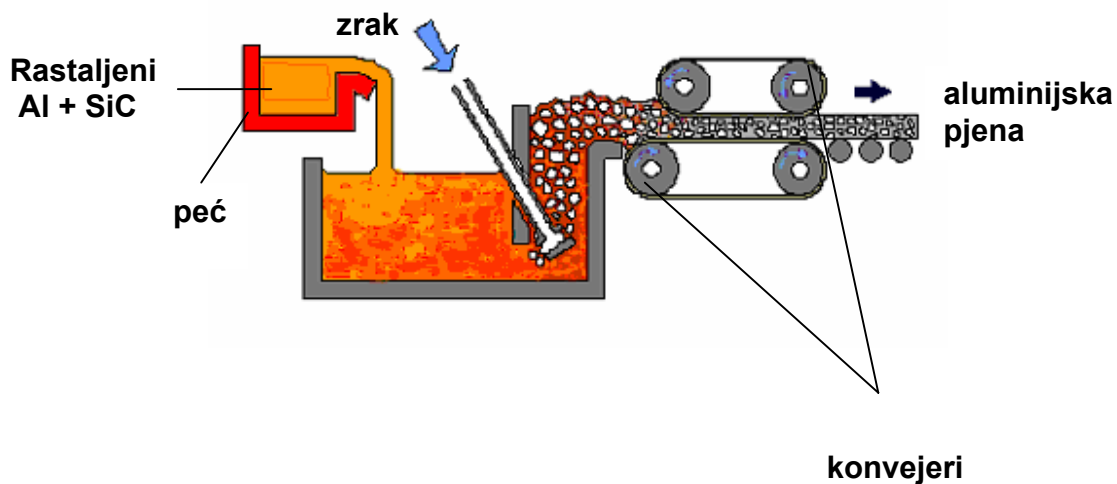
Danas je u svijetu poznato devet načina proizvodnje metalnih pjena od kojih je pet u komercijalnoj upotrebi. Svi ti načini dijele se u četiri šira područja. To su:

- oblikovanje pjene taloženjem iz parne faze,
- oblikovanje pjene elektrotaloženjem iz tekuće faze,
- oblikovanje pjene u rastaljenoj fazi,
- oblikovanje pjene u čvrstoj fazi.

Svakim od ovih devet postupaka može se donekle utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija, te na relativnu gustoću. Postupci će ukratko biti opisani u narednom dijelu teksta.

2.1. Ubrizgavanje plina u taljevinu

Metalna pjena ne može se dobiti samo ubrizgavanjem plina u čisti metal (zbog nestabilnosti procesa tj. dolazi do prebrzog sušenja opne mjehurića). Zbog toga se u taljevinu dodaju vrlo sitne, nerastvorljive čestice koje povećavaju viskoznost aluminijske, sprječavaju sušenje opne mjehurića i na taj način stabiliziraju pjenu. Kao čestice najčešće se koriste SiC, Al₂O₃, ZrO₂, MgO i TiB₂ promjera 0,5 μm do 25 μm. Volumni udio im najčešće iznosi 10 – 20%. Prilikom unošenja tih čestica u aluminijsku taljevinu koriste se tehnike mješanja kako bi njihova raspodjela bila jednolika. Ovim postupkom se najčešće upjenjuje aluminijska, moguće ga je primjeniti i na magnezij. Za ubrizgavanje može se koristiti više vrsta plinova. To su zrak, CO₂, O₂, inertni plinovi (Ar), N₂, pa čak i vodena para. Mješavina metala i mjehurića ispliva na površinu gdje se metal suši. Na ovaj način se proizvode aluminijske pjene gustoće od 69 kg/m³ do 540 kg/m³ s porama promjera od 3 – 25 mm i debljinom stijenke 50 – 85 μm. Na veličinu ćelija može se utjecati protokom plina, brzinom ubrizgavalice, frekvencijom vibriranja raspršivača te ostalim parametrima. Shema procesa proizvodnje prikazana je na slici 2.1.



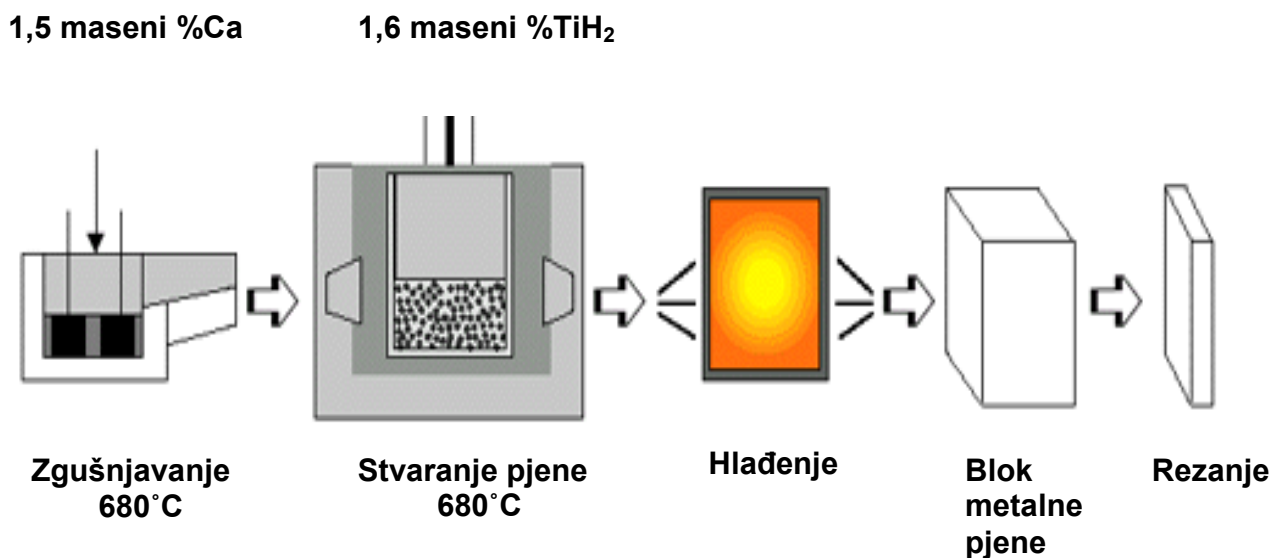
Slika 2.1. Proizvodnja alumijske pjene ubrizgavanjem zraka u taljevinu postupkom «Alcan / NorskHydro / CYMAT», [3]

Prednost ovog postupka je u tome što je jeftiniji od ostalih postupaka, te se mogu proizvoditi predmeti većih dimenzija. Može se postići poroznost i preko 95% uz različitu veličinu zatvorenih ćelija. Loša strana je što se rezanjem otvaraju ćelije i što je postupak još uvijek ograničen na aluminij. Na tržištu su na ovaj način izrađene pjene poznate pod nazivom HYDRO-ALCAN.

2.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini

U ovom procesu taljevini se dodaje agens koji se rastvara pri povišenoj temperaturi i tako tvori plin. U početnoj fazi procesa, pri temperaturi tališta aluminija (u rasponu od 670 - 690°C) taljevini se dodaje oko 1,5% Ca. Nakon samo nekoliko minuta viskoznost se znatno povećava zbog novonastalih spojeva CaO, CaAl₂O₄ ili intermetalnog spoja Al₄Ca. Kao raspršujući agens dodaje se otprilike 1 – 2% TiH₂, koji se iznad 465°C rastvara na Ti i plinoviti H₂. H₂ stvara mjehuriće koji služe za stvaranje metalne pjene sa zatvorenim ćelijama uz uvjet dovoljno sporog hlađenja. Promjer dodanih čestica kreće se u rasponu od 5 - 20 μm. Cijeli postupak traje oko 15

minuta i odvija se pod konstantnim tlakom. Na tržištu ovako izrađene pjene poznate su pod nazivom ALPORAS. Shema postupka prikazana je na slici 2.2.



Slika 2.2. Nastajanje ALPORAS metalne pjene «Shinko Wire» postupkom, [4]

Pažljivom kontrolom parametara procesa, kao što su tlak, vrijeme ili temperatura može se postići homogena građa metalne pjene. Na neka svojstva kao što su relativna gustoća ili veličina ćelija može se utjecati variranjem količine Ca ili TiH₂. Gustoća ovako proizvedenih pjena kreće se od 180 do 240 kg/m³. Blok metalne pjene dimenzija 2400 x 700 x 450 mm ima masu oko 180 kg. Relativna gustoća iznosi od 0,07 do 0,2, a veličina ćelija od 0,05 mm do 5 mm.

Ćelije ove vrste pjene su zatvorene, ali se valjanjem njihove stijenke mogu razbiti čime se povećavaju zvučno izolacijska svojstva. Zbog upotrebe relativno skupog Ca i TiH₂ ovaj je postupak ipak nešto skuplji od prethodnog. Na slici 2.3. prikazani su proizvodi izrađeni ovim postupkom. Razvijanje novih agensa (karbonati, nitrati) koji se raspadaju na višim temperaturama mogu se uskoro očekivati čelične ili Ni metalne pjene izrađene ovim postupkom.



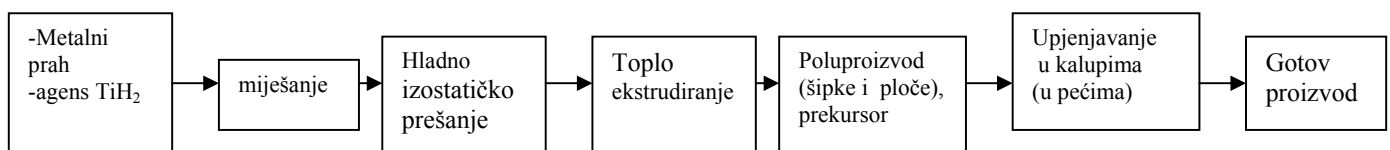
Slika 2.3. Ploče izrezane iz većeg bloka metalne pjene nastalog postupkom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u taljevini, [3]

2.3. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi

Pjenasti materijali mogu se izrađivati i od metalnog praha. Proces se odvija tako da se na samom početku mješaju prah čistog metala ili legure s dodatkom koji pospješuje upjenjavanje, a to je najčešće već spomenuti TiH_2 . Nastala smjesa se zatim sabija u poluproizvod oblika šipke ili pločice. Načini sabijanja mogu biti razni a najčešće se koriste: izostatičko tlačenje, ekstrudiranje i valjanje praha. Ovako dobiven poluproizvod mora biti vrlo pažljivo napravljen zato što poroznosti i nepravilosti nastale u ovom stupnju imaju dalekosežne posljedice u kasnijim fazama procesa. Poluproizvod se zatim reže na manje komade i stavlja u kalup gdje se zagrijava na temperaturu nešto iznad solidus temperature legure. Dodatak TiH_2 se raspada na Ti i H_2 koji uzrokuju širenje i stvaranje visoko poroznog materijala. Proces traje (ovisno o veličini i temperaturi) od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Proizvod poprima oblik kalupa i ima relativnu gustoću 0,08 i više, te zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm. Postupak nije ograničen samo na aluminij već se njime mogu proizvoditi pjene na bazi cinka, mjedi, olova, zlata i još

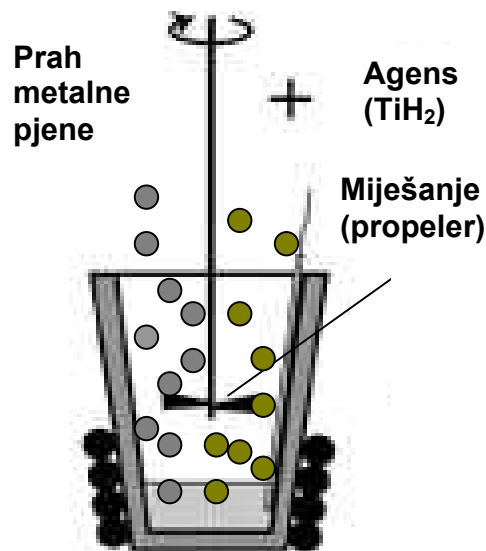
nekih drugih metala. Upjenjavanje se odvija u polukrutoj fazi jer se TiH_2 raspada na 465°C što je mnogo niže od tališta aluminija (oko 660°C). Upjenjeni kruti aluminij se zatim ugrijava do taljenja, a hlađenjem se pjena stabilizira. Fraunhoferov institut u Bremenu (Institut für Advanced Materials – IFAM) razvio je izradu sendvič – konstrukcija ovim postupkom. Takva konstrukcija sastavljena je od jezgre od upjenjenog materijala zatvorene s dva metalna lima koji su ljepilom povezani s pjenom.

Komercijalni naziv za ovako proizvedene metalne pjene je FOAMINAL – ALULIGHT, [3]. Na slikama 2.4. i 2.5. prikazan je postupak nastajanja takve pjene.



Slika 2.4. Pojednostavljeni prikaz postupka FOAMINAL - ALULIGHT

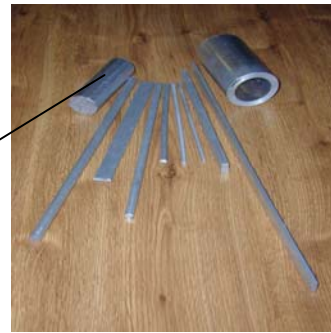
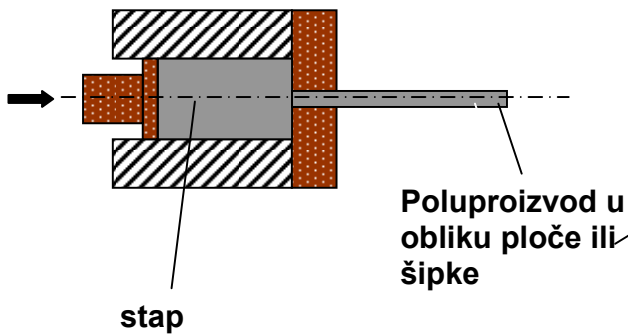
a) Miješanje sastojaka



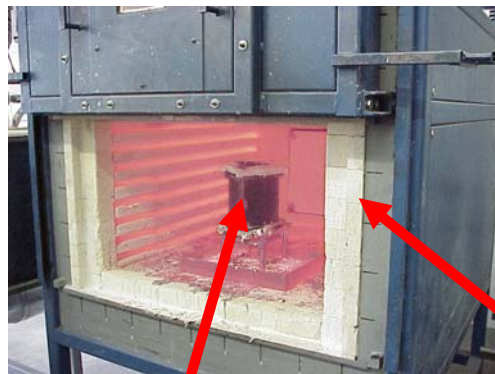
b) Hladno izostatičko prešanje u cilindrima



c) Toplo ekstrudiranje



d) Priprema za pjenjenje i pjenjenje te dobivanje konačnog proizvoda

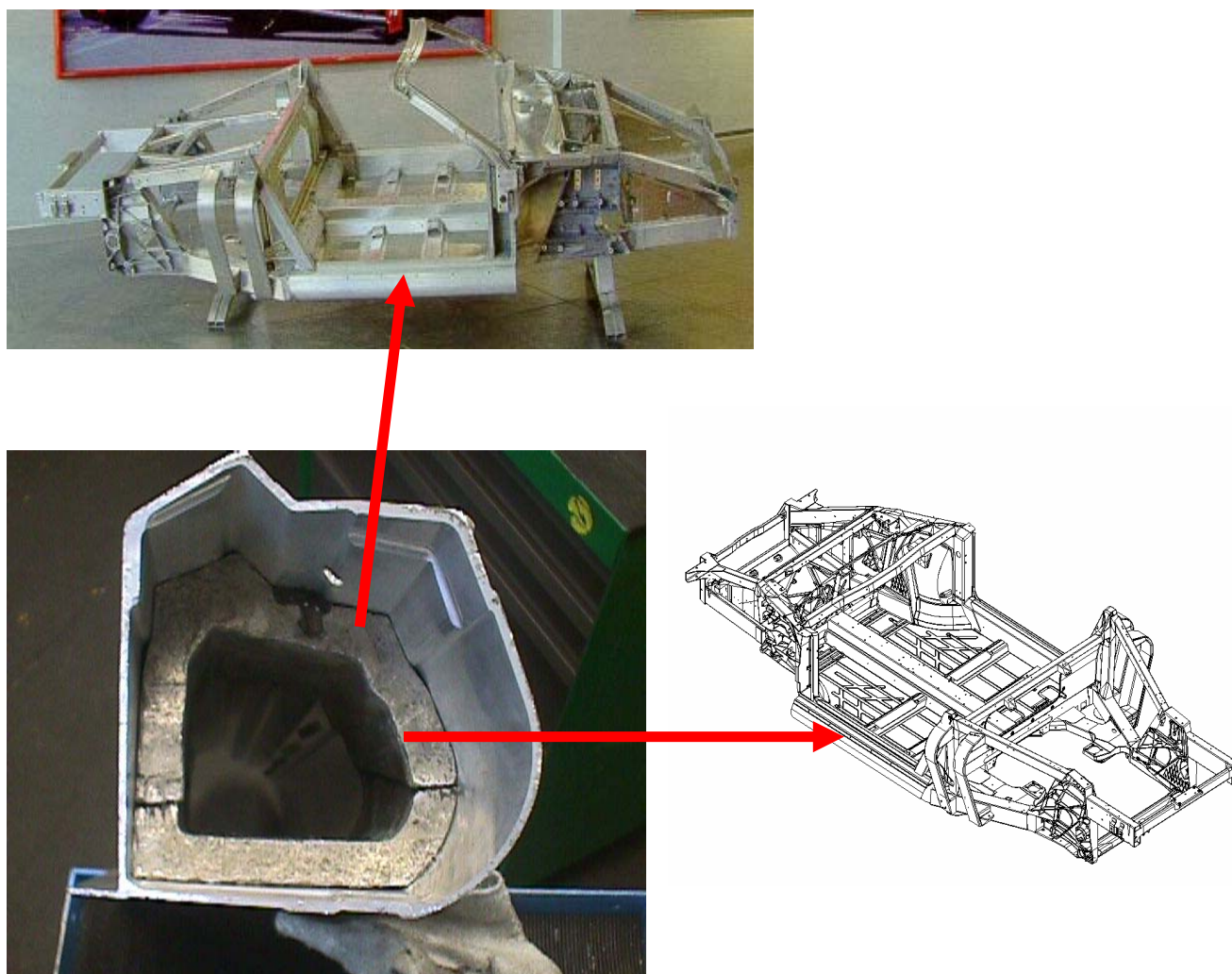


Kalup u kojem se nalazi ekstrudirani poluproizvod s agensom koji pospješuje stvaranje pjene

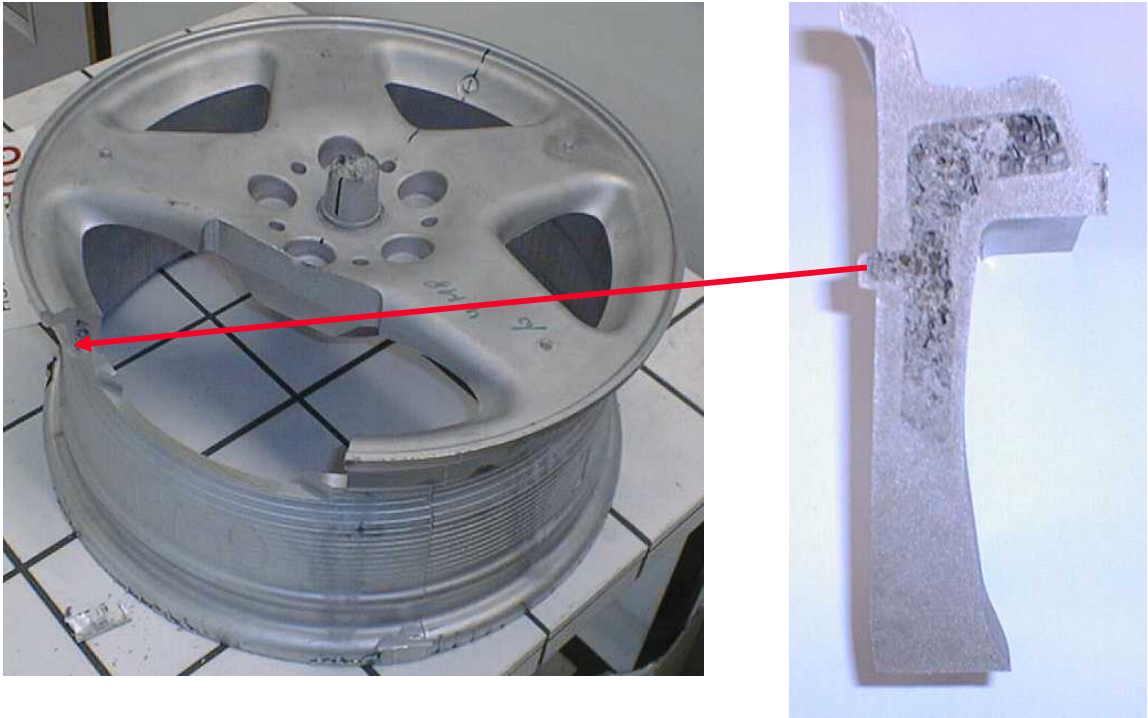
peć

Slika 2.5. Proces nastajanja ALULIGHT metalne pjene, [3]

Nekoliko primjera primjene ALULIGHT metalnih pjena prikazano je na sljedećih nekoliko slika:



Slika 2.6. Kruti uložak na okviru osobnog automobila izrađen od metalne ALULIGHT pjene, povećava krutost i čvrstoću pokazanog dijela, [3]



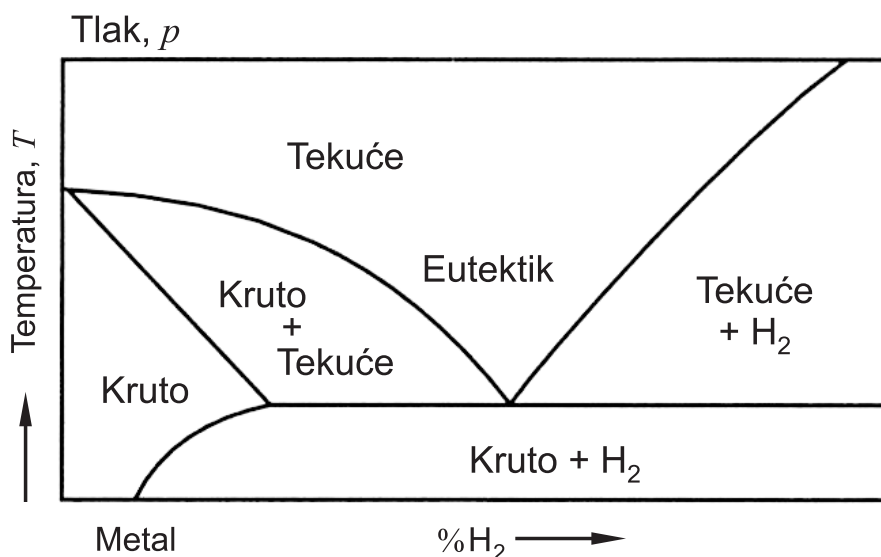
Slika 2.7. Ispuna naplatka kotača izrađenog od metalne ALULIGHT pjene (ušteda oko 2 kg po kotaču), [3]

2.4. Eutektičko skrućivanje plin – metal

Ovaj postupak zasniva se na činjenici da neki metali i njihove legure tvore s vodikom eutektički sustav (slika 2.8.). U te metale ubrajaju se: Al, Be, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn i Ni te njihove legure. Legure se otapaju u vodikovoj atmosferi pod visokim tlakom, a skrućuju se vrlo brzo brzim snižavanjem tlaka. Rezultat je homogena taljevina ispunjena vodikom. Porozni materijal nastaje eutektičkom reakcijom plina i metala. Ako se temperatura snizi, taljevina će na kraju

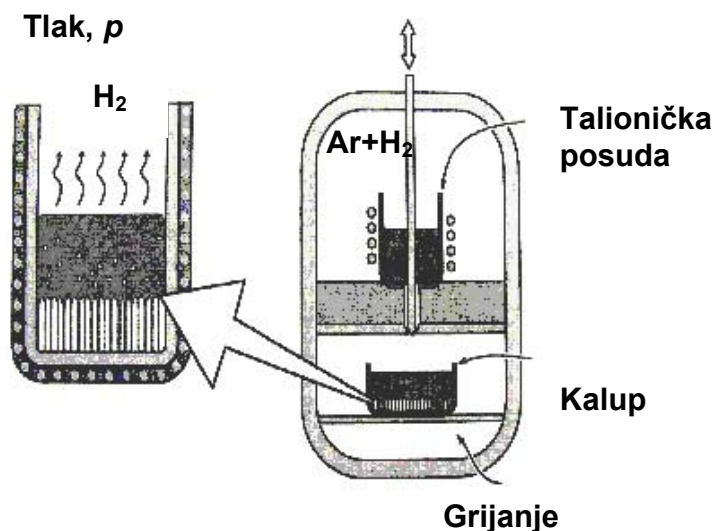
doživjeti eutektičku pretvorbu u heterogeni dvofazni sustav plin + metal. Na određenoj temperaturi događaju se reakcije segregacije i plinske šupljine ostaju zatvorene u metalu.

Legura se zagrijava u posudi pod određenim tlakom vodika te se na taj način tali (slika 2.9.). Tlak vodika iznosi od 0,5 do 1 MPa, a može iznositi i 5 MPa. Taljevina se zatim ulijeva u kalup gdje se događa eutektičko skrućivanje. Materijali nastali ovim postupkom u literaturi se nazivaju «GASAR».



Slika 2.8. Binarni dijagram stanja metal – vodik, [5]

Volumni udio ćelija u tako proizvedenoj pjeni je i do 30%. Kontrola i optimiranje postupka je vrlo komplicirana. Ćelije su izdužene i orjentirane u smjeru skrućivanja. Promjeri ćelija iznose od 10 μm do 10mm. Mogu se dobiti i zatvorene i otvorene ćelije, a osim H_2 mogu se koristiti O_2 i N_2 . Postupak je prikazan na slici 2.9.



Slika 2.9. Proces nastajanja metalne pjene eutektičkim plin – metal skrućivanjem, [5]

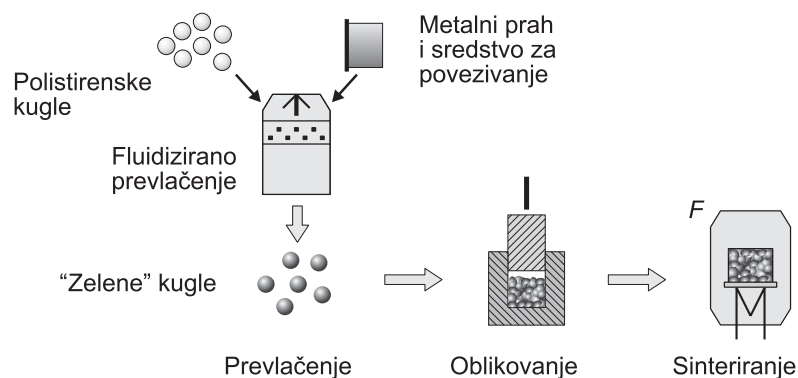
2.5. Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama

U najnovije vrijeme javlja se čitav niz procesa za proizvodnju metalnih ćelijastih materijala s kuglastim šupljinama. Šupljine pri tom imaju relativno velik promjer, od 0,3 do 1mm, te relativnu gustoću 0,1.

Prvi postupak se zasniva na raspoređivanju šupljina po materijalu raznim postupcima, te se zatim zgušnjava postupkom sinteriranja u vakuumu ili postupkom sinteriranja s tekućom fazom. Ovim postupkom danas se proizvode metalne pjene od Ni superlegura i legure Ti6Al4V s relativnom gustoćom 0,06.

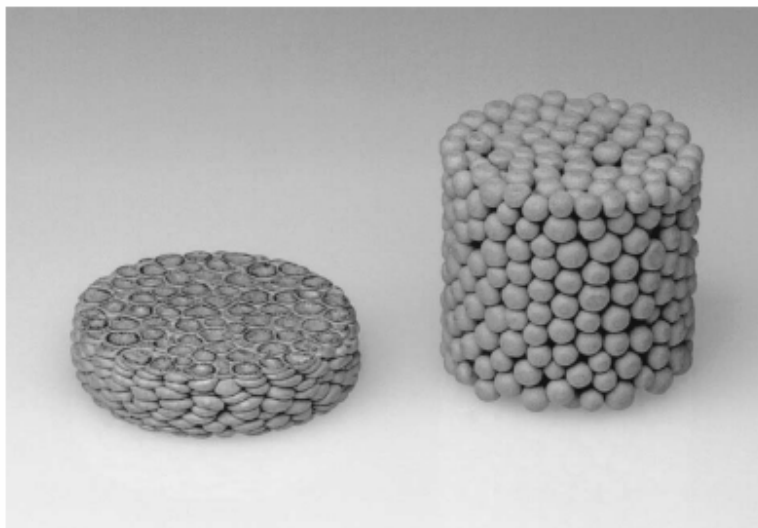
Drugi postupak razvijen je na sveučilištu Georgia Technology U SAD-u. Kuglasta građa tvori se pomoću dodataka kao što su TiH_2 pomiješana s organskim dodacima koji pospješuju i povezivanje s otapalom. Povišena temperatura uklanja otapalo i sredstvo za bolje povezivanje. Ovim postupkom može se proizvesti niz metalnih pjena, tako da se npr. od Fe_2O_3 i Cr_2O_3 može napraviti metalna pjena od nehrđajućeg čelika.

Treći postupak razvio je Fraunhoferov institut u Bremenu (IFAM). Kugle od polistirena prevučene su metalom i sinterirane kako bi se dobila metalna građa s kuglastim šupljinama visokog stupnja jednoličnosti. Sinteriranje i spajanje stijenki kugli se obavlja u jednom koraku što znatno smanjuje troškove proizvodnje. Kugle mogu biti i zatvorene i otvorene. Iznosi relativnih gustoća kreću se od 0,05 i više, a veličina šupljina od 100 μm do nekoliko milimetara. Proces nastajanja ove vrste pjene prikazan je na slici 2.10.



Slika 2.10. Proces nastajanja kuglaste pjene IFAM postupkom, [4]

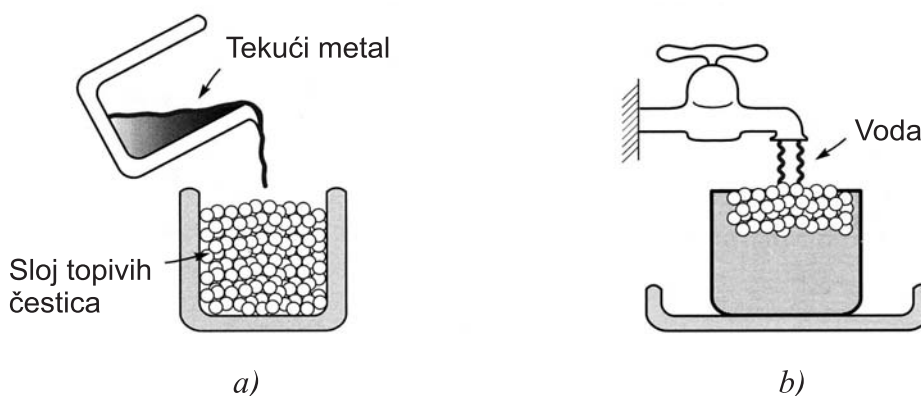
IFAM nastoji proizvesti pjenu i od nehrđajućeg čelika X2CrNiMo 18 10 (AISI 316L) velike gustoće. Napravljena je pjena te vrste čelika poroznosti 80 – 97% te su i ispitana neka njena mehanička svojstva. Slika 2.11. prikazuje jednu takvu pjenu.



Slika 2.11. Metalna kuglasta pjena od nehrđajućeg čelika AISI 316 L, [4]

2.6. Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv

Dva praha, od kojih niti jedan nije u manjem udjelu od 25%, miješaju se i stvaraju čvrstu tvorevinu koja je dvostruko povezana s obje faze. Nakon povezivanja jedan se prah (npr. sol) topi (rastvara) u odgovarajućem otapalu (slika 2.12.). Pjene bazirane na mješavini prahova aluminijskih legura s natrijevim kloridom uspješno se primjenjuju za velike presjeke s jednoličnom građom, a kao otapalo se najčešće koristi voda.



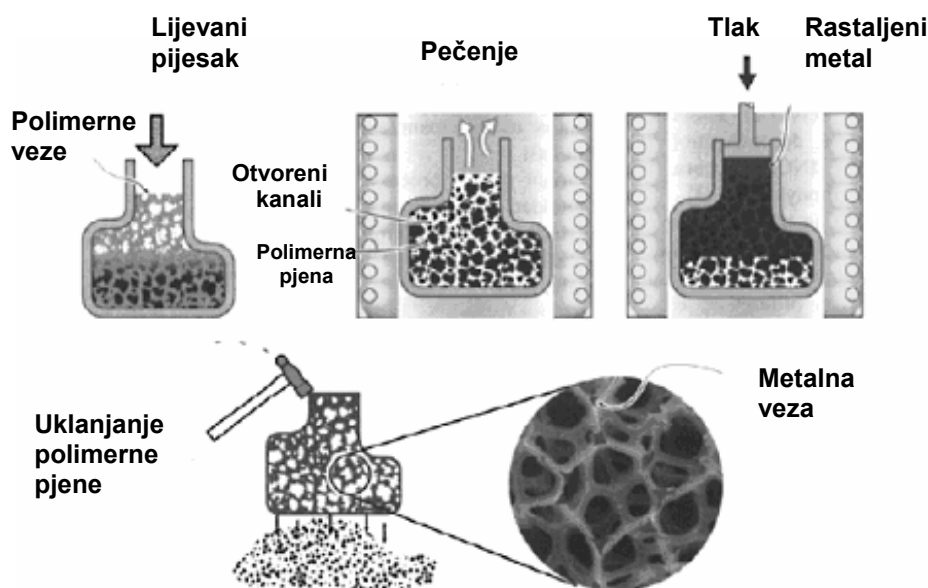
Slika 2.12. Nastajanje metalne pjene povezivanjem dvaju materijala od kojih je jedan topljiv, [6]
a) rastaljeni metal (npr. aluminij i njegove legure) infiltrira se u sloj topljivih čestica;
b) čestice se otapaju u prikladnom otapalu (npr. voda) čime nastaju otvorene ćelije

Oblik ćelija razlikuje se od onog proizvedenog drugim procesima, a najčešće su otvorene. Veličina ćelija ovisi o promjeru čestica praha i kreće se u širokom rasponu od $10\mu\text{m}$ do 10mm . Relativna gustoća iznosi od 0,3 do 0,5.

Postoji i alternativa ovom procesu gdje se u nakupinu od topljivog materijala infiltrira metalna taljevina pod tlakom, te se nakon toga hladi. Čestice se otapaju i ostaje metalna pjena vrlo uravnotežene građe ćelija.

2.7. Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera

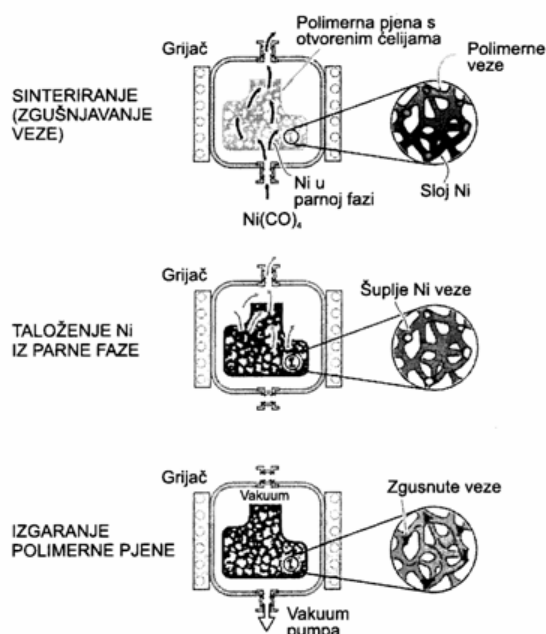
Ovaj proces je razvila tvrtka Ergaerospace i njime su proizvedene sve tzv. “ERG DUOCEL” metalne pjene (slika 2.13.). Ti materijali imaju građu s otvorenim ćelijama u obliku duodekaedra. Gustoća im je 3 do 50% gustoće čvrstih metala dok im je gustoća ćelija 0,1968; 0,3937; 0,7874 ili 1,5748 šupljina po milimetru. Za izradu kalupa, u kojima se postupkom preciznog lijevanja proizvode metalne pjene, mogu se koristiti polimerne pjene s otvorenim ćelijama raznih veličina i oblika. Prvo se odabire polimerna pjena odgovarajuće veličine ćelija i relativne gustoće. Ona se zatim premazuje keramičkim prahom koji se zatim suši i ugrađuje u ljevački pijesak. Kalup se zatim peče da bi kalupni materijal očvrstnuo, a polimerna pjena isparila, te da bi se stvorio negativ oblika pjene. Sljedeći je korak punjenje kalupa rastaljenom legurom koja se zatim hladi. Otpor tečenju nekih legura prevladava se primjenom tlaka za vrijeme ulijevanja u kalup. Nakon hlađenja i vađenja iz kalupa metalna pjena ima jednak oblik kao i korištena polimerna pjena. Veličine šupljina metalnih pjena s otvorenim ćelijama iznose od 1 do 5 mm, dok im relativna gustoća iznosi više 0,05.



Slika 2.13. Proces nastajanja ERG DUOCEL metalne pjene, [6]

2.8. Taloženje metala na ćelijaste praoblake

Polimerne pjene s otvorenim ćelijama također mogu poslužiti kao baza na koju se postupkom kemijskog taloženja iz parne feze (Chemical Vapour Deposition - CVD) nanose metalni materijali evaporacijom ili elektrotaloženjem. U samom početku postupka polimerna pjena se stavlja u CVD retortu u koju se zatim uvodi $\text{Ni}(\text{CO})_4$ (slika 2.14.). Zagrijavanjem na temperaturu od oko 100°C $\text{Ni}(\text{CO})_4$ se raspada na čisti Ni i CO. Nikal se u parnoj fazi taloži na polimerni materijal unutar retorte. Nakon što je nanoseno nekoliko desetaka mikrometara metalne prevlake, polimerne pjene se uklanjaju i spaljuju infracrvenim zagrijavanjem.

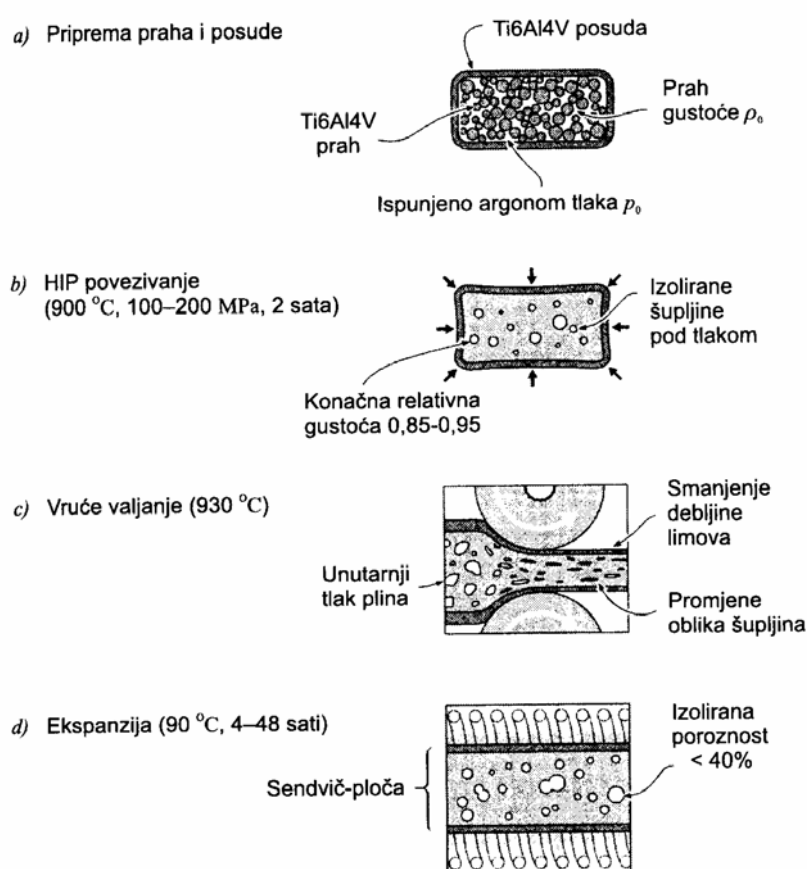


Slika 2.14. Proces nastajanja Ni metalne pjene (tvz. INCO pjena), [6]

Struktura ovako dobivenih metalnih pjena je ćelijasta sa šupljikavim vezama. Gustoća takvih veza se može povećati sinteriranjem. Pjena ima otvorene ćelije sa šupljinama veličine od 100 do 300 μm . Ovim procesom proizvode se metalne pjene s najmanjom relativnom gustoćom od 0,02 do 0,05. Ovaj proizvodni postupak je vrlo skup zato što je $\text{Ni}(\text{CO})_4$ vrlo otrovan i za vrijeme njegove uporabe nužne su temeljite analize štetnih emisija u okoliš. Još jedna loša strana ovog postupka je to što se moraju koristiti čisti metali, titan ili nikal, zbog nemogućnosti nanošenja legura CVD postupkom.

2.9. Ekspanzija plina u taljevini

Za proizvodnju materijala koji u svojoj građi imaju malene šupljine ispunjene inertnim plinom visokog tlaka koriste se postupci metalurgije praha. Najčešće korišteni inertni plin je argon koji ima vrlo nisku topljivost u metalima. Do tečenja materijala i širenja šupljina dolazi zbog visokog tlaka uzrokovanog povišenom temperaturom. To pokazuje kako se promjenom tlaka i temperature može utjecati na građu, a time i na svojstva metalnih pjena. U prvom koraku procesa prah legure Ti6Al4V stavlja se u posudu napravljenu od istog materijala (slika 2.15.).



Slika 2.15. Proces nastajanja metalne pjene procesom širenja inertnog plina, [6]

Iz posude je izvučen sav kisik jer bi on inače na sebe vezao titan, te je potom napunjena argonom pod tlakom od 0,3 do 0,5 MPa. Sadržaj posude potom se zgušnjava na relativnu gustoću 0,9 do 0,98 postupkom vrućeg izostatičkog prešanja. Sljedeći korak je valjanje titanove legure pri

temperaturi od približno 900-940°C. Zbog tlaka valjanja šupljine u leguri postaju spljoštene i izdužene u smjeru valjanja. Sve to rezultira strukturom koja sadrži mnogo jednoličniju raspodjelu šupljina i stvaranjem veza između plinom ispunjenih šupljina. Do širenja plina dolazi u posljednjoj fazi procesa pri temperaturi 900°C uz trajanje i do 48 sati. Zbog visoke temperature tlak u ćelijama raste pa se one šire, što dovodi do smanjenja gustoće. Ovim postupkom uglavnom se izrađuju sendvič-konstrukcije na bazi Ti-legura koje imaju poroznost jezgre i do 50% i veličinu ćelija od 10 do 300 μm . Ovo je prva iskoristila tvrtka BOEING za izradu sendvič ploča s jezgrom niske gustoće. Ovaj postupak također je nešto skuplji zbog procesa vrućeg valjanja Ti legura.

3. SVOJSTVA METALNIH PJENA

Podaci o raznim svojstvima nužni su pri odabiru materijala za neki proizvod. Na svojstva materijala utječu: građa (struktura), kemijski sastav, te način izrade i obrade. Vrlo su bitne dimenzije i način pripreme uzorka za ispitivanje. Postupci ispitivanja metalnih pjena još se razvijaju i predstavljaju, zbog svoje kompleksnosti, pravi izazov za inženjere. Zbog svoje vrlo nepredvidive mikrostrukture, rezultati, kod jednakog načina ispitivanja, često variraju i za nekoliko desetaka postotaka što u primjeni smanjuje povjerenje u metalne pjene.

Da bi rezultati bili što vjerodostojniji, ispitivanja se provode po strožim režimima nego je to inače uobičajeno.

3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena

Svojstva pjena određena su svojstvima osnovnog materijala i relativnom gustoćom ρ/ρ_s , gdje je ρ gustoća pjene a ρ_s gustoća materijala od kojeg je pjena napravljena. Vrijednosti relativne gustoće kreću se od 0,005 (rijetke pjene) do 0,5 (guste pjene).

Kod ispitivanja bilo kojeg svojstva nužno je naglasiti razliku između svojstava metalnih pjena i metala od kojih su one dobivene. Jedna od najvećih prednosti metalnih pjena u primjeni je njihova vrlo mala masa. To omogućuje izradu izrazito lakih konstrukcija kojima se danas teži zato što se njima ostvaruju uštede u masi i druge prednosti (npr. u autoindustriji manja potrošnja goriva). Takve konstrukcije u eksploataciji su često izložene statičkim ili dinamičkim mehaničkim opterećenjima koja mogu uzrokovati havarije. Zbog toga je nužno što točnije odrediti mehanička svojstva metalnih pjena, kao što su: tlačna i vlačna čvrstoća, modul elastičnosti i modul smičnosti, dinamička izdržljivost, tvrdoća, otpornost na umor ili puzanje itd., kako bi se mogao odrediti podoban materijal za neku konstrukciju. Veliku ulogu igra i stupanj nepravilnosti i nehomogenosti građe pjene. Čelije su često nepravilnog oblika, različite veličine, zidovi ćelija često su uništeni što znatno umanjuje mehanička svojstva, poroznost varira po nekoliko desetaka postotaka itd.. Izbor i dobra priprema uzoraka bitni su za utvrđivanje reprezentativnih podataka.

U tablici 1. navedene su vrijednosti mehaničkih svojstava metalnih pjena nekoliko najpoznatijih svjetskih proizvođača.

Metalne pjene imaju širok raspon svojstava tako da im je i veliko područje potencijalne primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja. Kada se usporede pjene s otvorenim i zatvorenim ćelijama, vidljivo je da su im mehanička svojstva uglavnom na jednakoj razini, no otvorene ćelije imaju ipak nešto niže vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće.

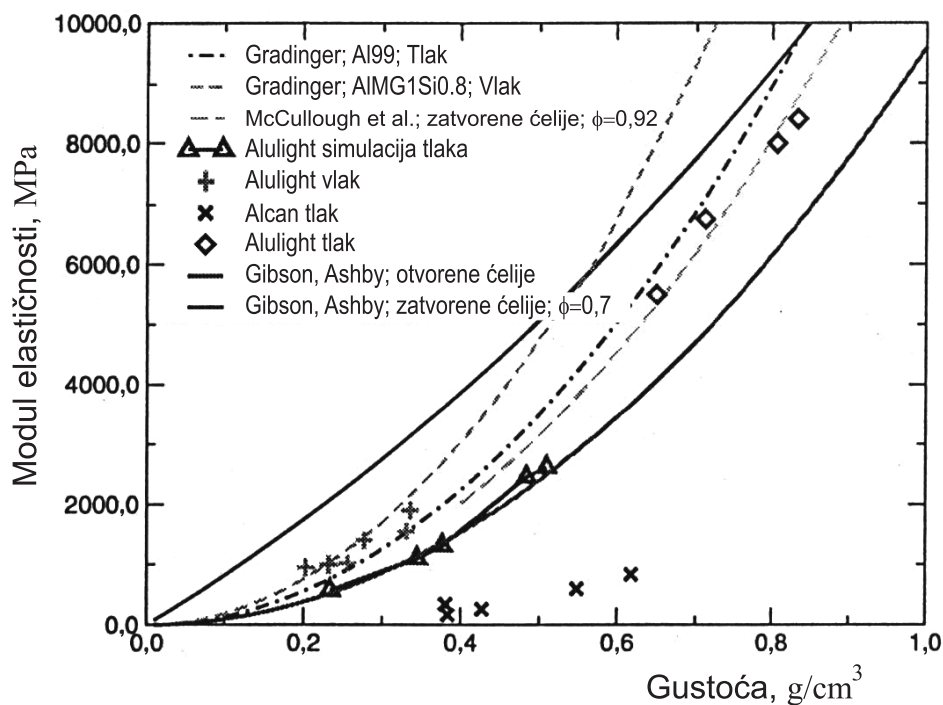
Tablica 1. Mehanička svojstva metalnih pjena, [5]

SVOJSTVO, SIMBOL, JEDINICA	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relativna gustoća, ρ/ρ_s	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Građa	Zatvorene ćelije			Otvorene ćelije	
Gustoća, ρ , kg/m ³	0,07-0,56	0,3-1,0	0,2-0,25	0,16-0,25	0,26-0,37
Modul elastičnosti, E , GPa	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modul smičnosti, G , GPa	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Modul savitljivosti, E_f , GPa	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor, ν	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Tlačna čvrstoća, R_{mt} , MPa	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Granica razvlačenja, R_e , MPa	0,04-7,0	2,0-20	1,6-1,8	0,9-2,7	0,6-1,1
Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Dinamička izdržljivost, R_d , MPa	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
Deformacija pri zgušnjavanju, ϵ_D	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačna duktilnost, ϵ_f	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
Faktor gubitka, η^C , %	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
Tvrdoća, H	0,05-10	2,4-35	2,0-22	2,0-3,5	0,6-1,0
Lomna žilavost, K_{IC} , MPa·m ^{1/2}	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0

3.1.1. Krutost

Uobičajeno je da čvrstoća i krutost ćelijastih (poroznih) materijala u značajnoj mjeri ovise o njihovoj gustoći. Teorijske pretpostavke, koje su postavili Gibson i Ashby, [6] o mehaničkim svojstvima ćelijastih materijala, zasnivaju se na vezi između morfologije ćelija i svojstava stijenki ćelija. Kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama takve pretpostavke odgovaraju podacima utvrđenim ispitivanjem, dok u pjena sa zatvorenim ćelijama to nije slučaj. Aluminijske pjene pokazuju različit modul elastičnosti pri vlačnom i tlačnom opterećenju.

Slika 3.1. pokazuje rezultate ispitivanja modula elastičnosti Al pjena sa zatvorenim ćelijama. Iz ove slike vidljivo je kako krutost materijala ovisi o njegovoj gustoći. Većina izmjerenih vrijednosti pjena sa zatvorenim ćelijama manja je od očekivanih teorijskih proračuna Gibsona i Ashbyja, [7]. Pjene sa zatvorenim ćelijama niske gustoće pokazuju vrijednosti krutosti koje su približno jednake vrijednostima predviđenim za pjene s otvorenim ćelijama. Objašnjenje za niže vrijednosti krutosti u odnosu na predviđene nalazi se u mikrostrukтури materijala.

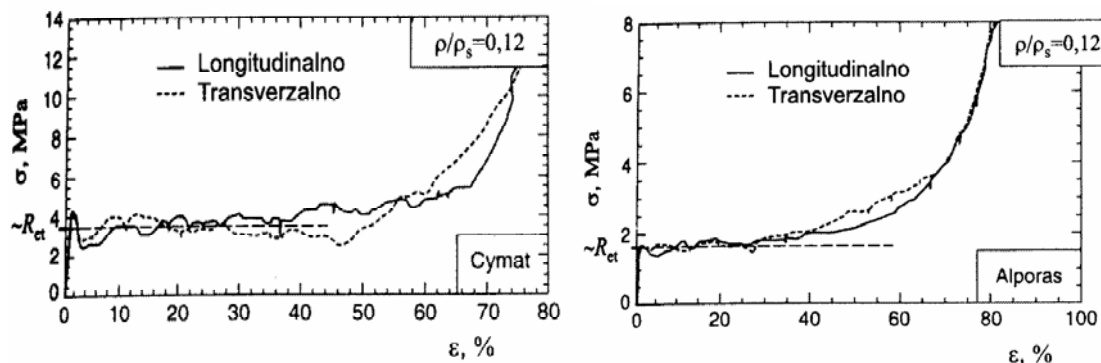


Slika 3.1. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena, [8]

Može se konstatirati da s povećanjem pravilnosti strukture raste krutost Al pjena. Krutost snizuju i nepravilnosti poput zavojitih stijenki ćelija, nehomogenosti kao što su nejednolika veličina čvorova i velike napukline. Teorijska predviđanja koje su dali Gibson i Ashby zasnivaju se na pretpostavci pravilne građe (strukture) metalnih pjena. Tako nisu uzeti u obzir lokalne pojave nestabilnosti, kao što je npr. lokalno izvijanje.

3.1.2. Tlačna čvrstoća

Slika 3.2. prikazuje dijagram “naprezanje-skraćenje” pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje realnih Al pjena (s otvorenim ćelijama).



Slika 3.2. Dijagrami “naprezanje-deformacija” metalnih pjena pri tlačnom opterećenju, [5]

Inicijalno opterećenje izaziva elastičnu deformaciju, ali početna linija nije pravac i manjeg je nagiba od nagiba koji odgovara stvarnom modulu elastičnosti, jer neke ćelije počinju teći već pri vrlo malim opterećenjima. Modul elastičnosti pri vlačnom opterećenju je za oko 10% viši od modula pri tlačnom opterećenju. Anizotropija oblika ćelija dovodi do bitnih razlika (30%) između modula elastičnosti u različitim smjerovima.

Pjene s otvorenim ćelijama imaju vrlo dobro definiranu granicu stlačivanja - R_{et} (engl. *plateau stress*) vidljivo na slici 3.2.. Pri tom naprezanju ćelije počinju teći uslijed savijanja. Zatvorene ćelije pokazuju mnogo složenije ponašanje. Naprezanje veličine granice stlačivanja izaziva zgušnjavanje pjene sve do konačne deformacije zgušnjavanja (ϵ_D).

Empirijske veze između granice stlačivanja, deformacije zgušnjavanja i relativne gustoće izražene su u obliku:

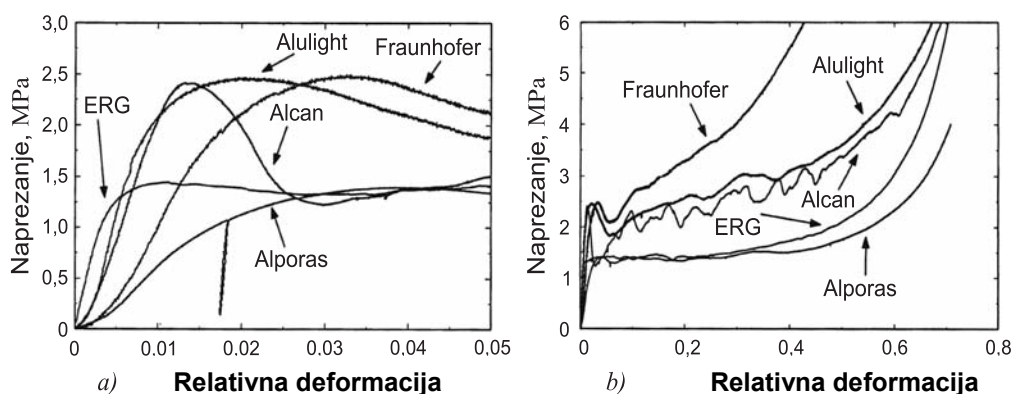
$$R_{et} = (0,25 - 0,35) \cdot R_e \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^m$$

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

gdje je: R_e – granica tečenja materijala pjene, m – eksponent koji za metalne pjene iznosi od 1,5 do 2, a koeficijent α_1 od 1,4 do 2,0.

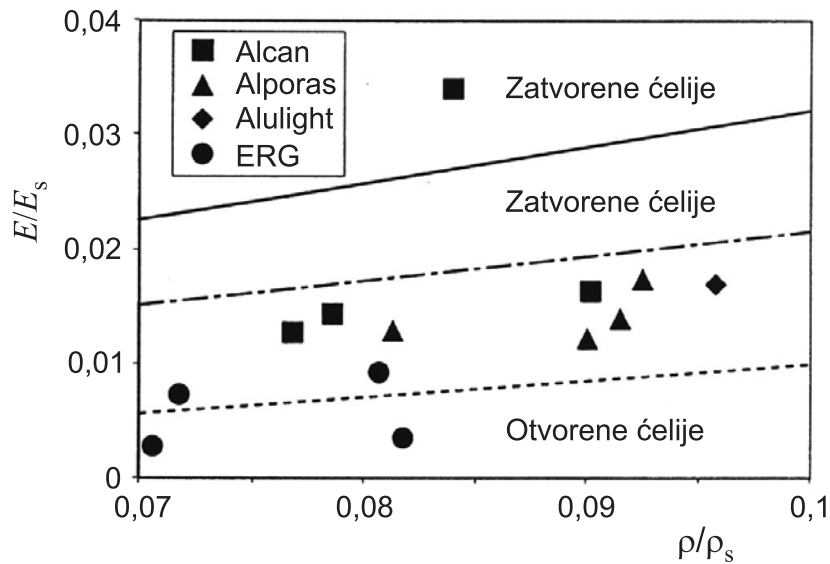
Većina ispitivanja provodi se na aluminijskim ili niklenim pjenama budući da su one uglavnom prisutne u primjeni. Od aluminijskih pjena proučavaju se sljedeće vrste: CYMAT, ALPORAS, ERG Duocel, ALULIGHT i IFAM. Omjer visine i debljine uzorka mora biti veći od 1,5, dok omjer veličine uzorka i veličine čelije mora biti veći od 7 kako bi se izbjegao utjecaj veličine uzorka na rezultate ispitivanja. Budući da proizvođači isporučuju materijal raznih dimenzija, vrlo je važan način na koji se rezanjem dobiva manji uzorak iz većeg komada materijala. Danas se preporučuju tri postupka rezanja. To su: rezanje tračnom pilom nakon kojeg slijedi obrada površine, rezanje dijamantnom oštricom ili odvajanje elektroerozijskom obradom. Postupci obrade površine ne utječu previše na rezultate ispitivanja. Gustoća pojedinog uzorka određuje se vaganjem uzorka i mjerenjem njegovih dimenzija.

Iz dijagrama na slici 3.3. može se zaključiti kolike su deformacije uzoraka pri najvećim opterećenjima za svaki tip aluminijskih metalnih pjena.

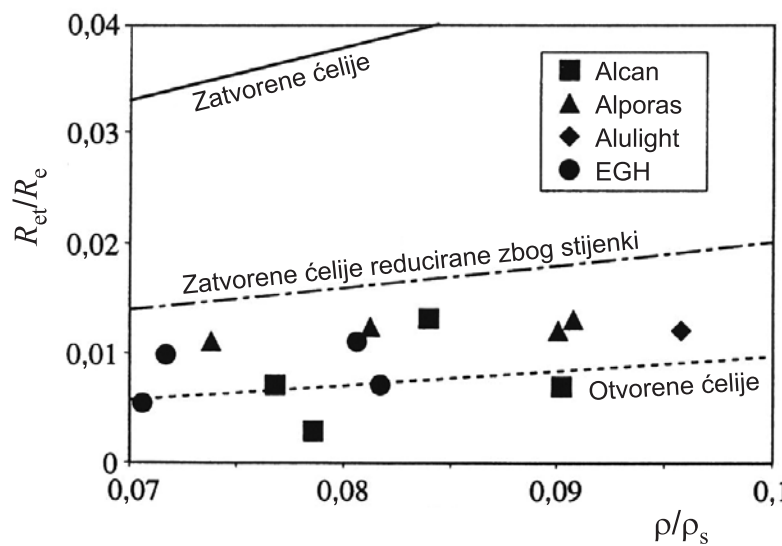


Slika 3.3. Krivulje “naprezanje-deformacija” pod tlačnim opterećenjem aluminijskih pjena;
a) do deformacije od 5%;
b) pri većim deformacijama, [9]

Kod ove vrste ispitivanja često se daju i grafikoni ovisnosti relativne gustoće o modulu elastičnosti ili o omjeru granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja (R_e) materijala, kao što je i prikazano na slikama 3.4. i 3.5.

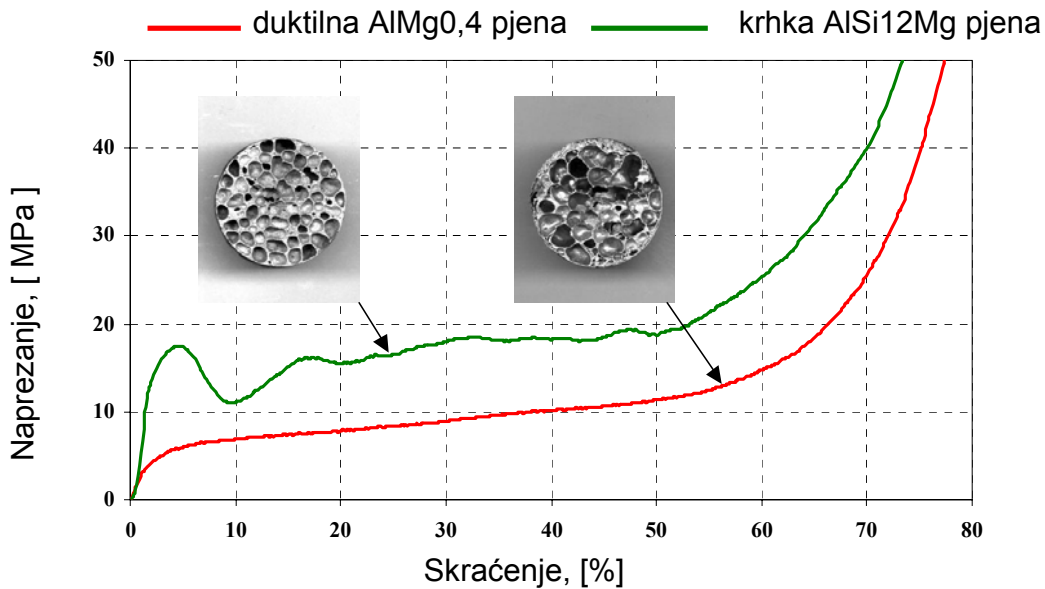


Slika 3.4. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći, [9]

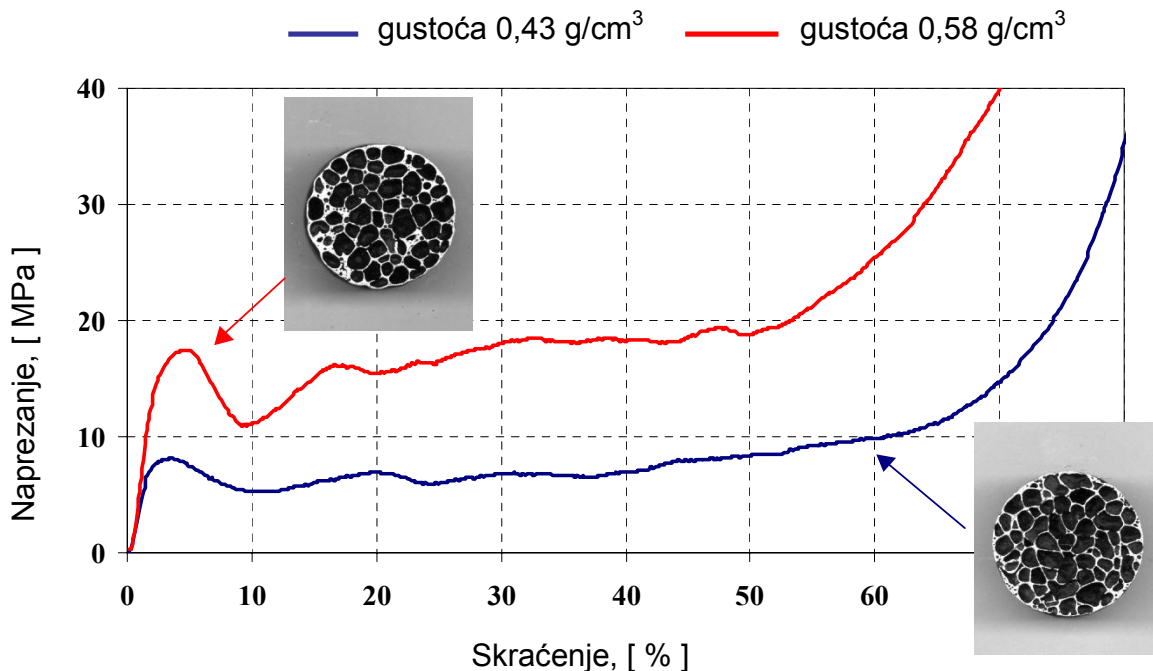


Slika 3.5. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja materijala ćelija (R_e) o relativnoj gustoći, [9]

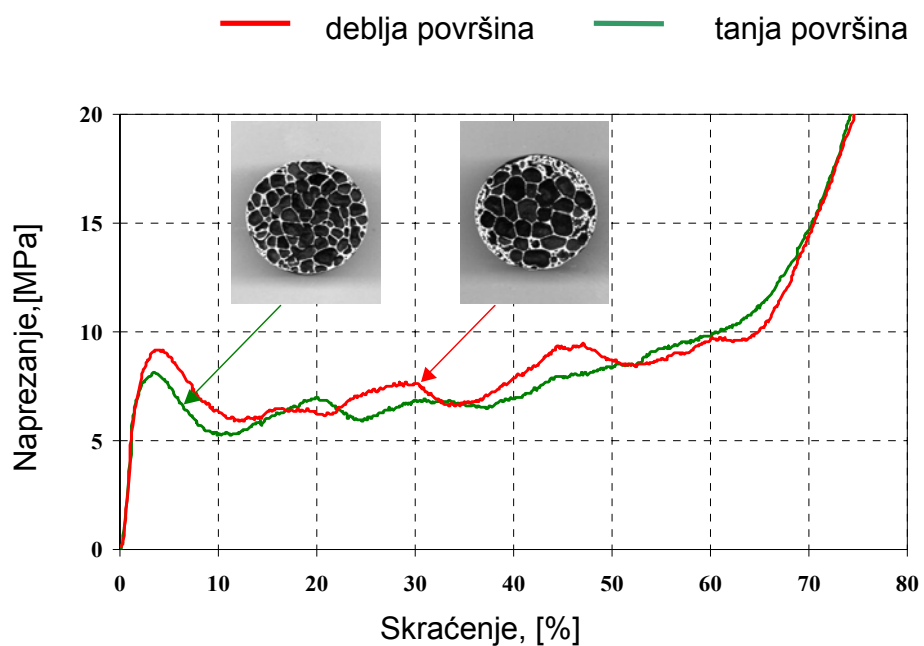
Nadalje, na idućih nekoliko primjera (slike 3.6., 3.7., i 3.8.) vidjet će se, koje sve karakteristike aluminijskih pjena i kako utječu na dijagram «naprezanje – skraćenje».



Slika 3.6. Dijagram «naprezanje – skraćenje» u ovisnosti o svojstvima duktilnosti i krhkosti metalne pjene, [3]



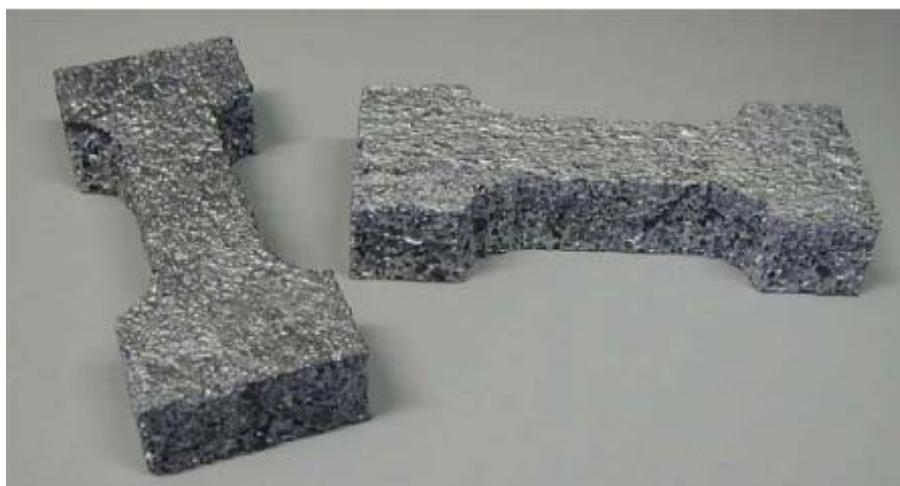
Slika 3.7. Utjecaj gustoće metalne pjene na dijagram «naprezanje – skraćenje», [3]



Slika 3.8. Utjecaj debljine površine metalne pjene na dijagram «naprezanje – skraćenje», [3]

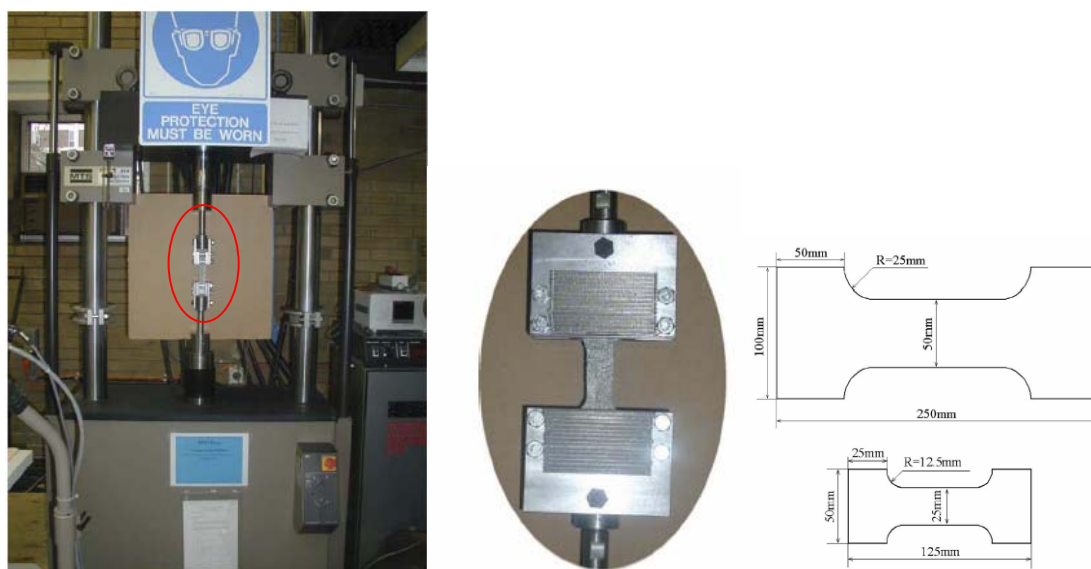
3.1.3. Vlačna čvrstoća

Ispitivanja se pod vlačnim opterećenjima provode na cilindričnim uzorcima ili na uzorcima u obliku kosti (slika 3.9.).



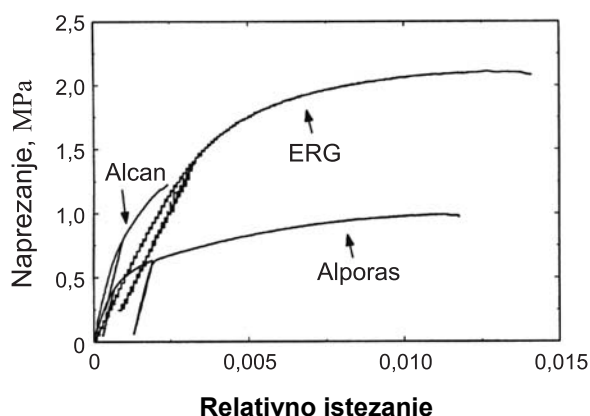
Slika 3.9. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku pseće kosti, [10]

Odvajanje i obrada uzoraka propisani su normom ASTM E8 - 96a kako bi se izbjegli lomovi u području vrata uzorka ili na krajevima koji se uglavljaju u uređaj za ispitivanje. Kao glavne dimenzije uzoraka uzimaju se promjer kod cilindričnog i debljina kod uzorka u obliku pseće kosti. Omjer tih dimenzija i veličine ćelije mora biti veći od 7. Istezanje se uglavnom mjeri ekstenzimetrom koji se pričvršćuje na dio uzorka gdje dolazi do lomova. Prilikom ispitivanja ERG pjene korišteni su uzorci u obliku kosti duljine 90 mm i presjeka 20x20 mm. Opterećenje je zadano u dva smjera: okomito i paralelno na dulju os ćelija. Krajevi uzorka prevučeni su epoksidnom smolom kako bi se izbjeglo drobljenje materijala. Osim toga na krajeve se mogu namotati i komadi papira i njihov učinak je isti. Za mjerenje osnovog istežanja uzorka koristi se ekstenzimetar duljine 50,8 mm, dok se za mjerenje poprečnog istežanja koristi ekstenzimetar duljine 12,7 mm. Modul elastičnosti može se izračunati iz nagiba krivulje “naprezanje-istežanje”, dok se Poissonov faktor računa pomoću izmjerenih vrijednosti istežanja. Slična ispitivanja provedena su na ALCAN i ALPORAS pjename, samo što je u tom slučaju uzorak, koji je također u obliku kosti, dimenzija 25x25 mm i duljine 125 mm. Ispitivanje vlačne čvrstoće i veličina ispitnih uzoraka na CYMAT pjename prikazano je na slici 3.10.



Slika 3.10. Uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće napravljene od CYMAT metalne pjene, [10]

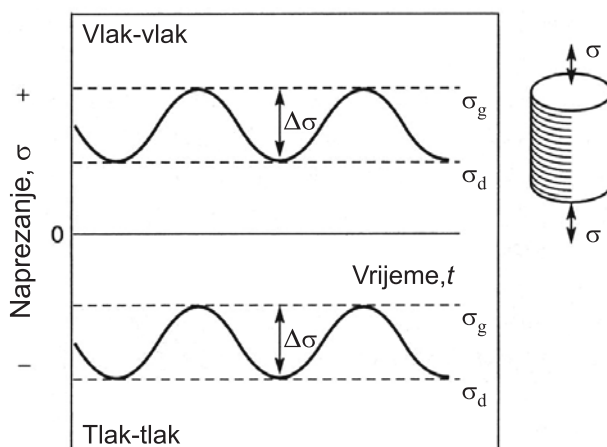
Opterećenje je zadano paralelno na smjer izduženja ćelije. Rezultati vlačnog ispitivanja za Al pjene dani su u dijagramu na slici 3.11..



Slika 3.11. Dijagram «naprezanje-istezanje» Al pjena, [9]

3.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju - umor

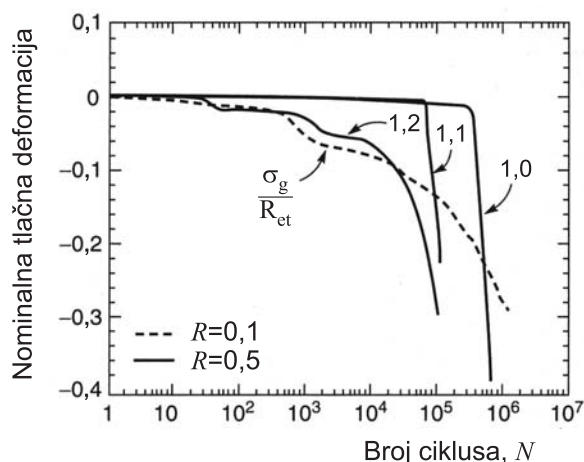
Uzrok umoru materijala veliki je broj ciklusa opterećenja koje se neprestano ponavlja. Nakon nekog vremena izloženosti dolazi do stvaranja inicijalne napukline, širenja napuklina u materijalu i konačno do loma. Značajka koja pokazuje otpornost materijala na umor naziva se dinamička izdržljivost. Umoru su izložene i metalne pjene. Ciklička opterećenja mogu biti tlačnog i vlačnog karaktera i oba načina variraju od minimalne σ_d do maksimalne σ_g vrijednosti kao što je pokazano na slici 3.12. U tom je slučaju uzorak cilindričnog oblika.



Slika 3.12. Vrste dinamičkih opterećenja, [5]

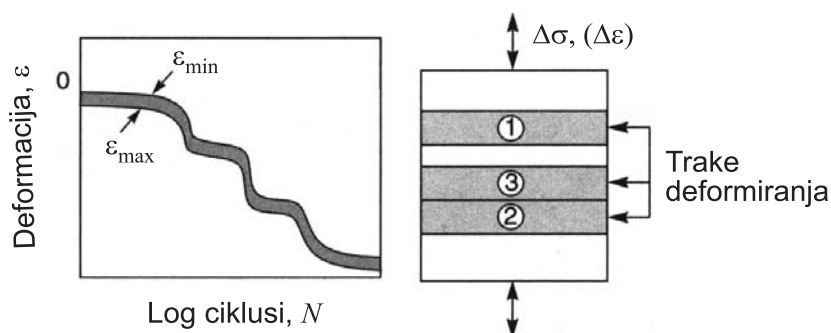
Za uobičajene se metalne materijale smatra da na vijek trajanja u uvjetima cikličkog opterećenja ne utječe učestalost ponavljanja opterećenja u normalnim uvjetima. Ako se sve to događa u korozivnom mediju, vijek je trajanja materijala znatno kraći. Pretpostavlja se kako ta pravila vrijede i za metalne pjene. Poznata su tri tipa ponašanja metalnih pjena:

Tip 1. Iako se u materijalu akumuliraju deformacije, nisu vidljivi znaci širenja lomnog područja. Na dijagramu na slici 3.13. prikazana je ovisnost deformacije izazvane tlačnim opterećenjima o broju ciklusa ponavljanja.



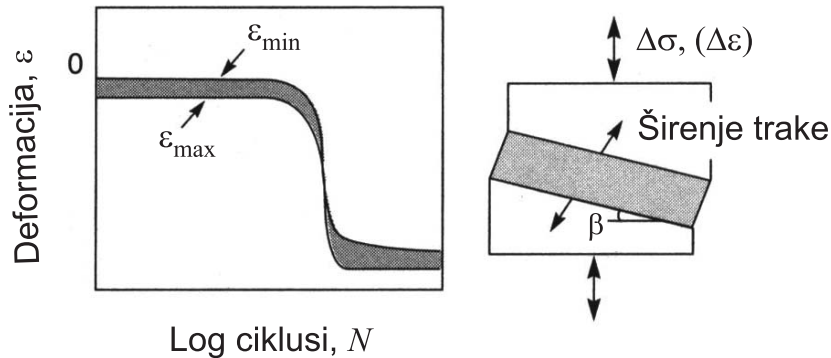
Slika 3.13. Skraćenje Duocel Al – 6101 T6 pjene u uvjetima umora izazvanog tlačnim opterećenjima, [5]

Tip 2. Lomna područja stvaraju se na nepredvidivim unutarnjim stranama materijala. Napukline prvo nastaju na najslabijem dijelu, a trajanjem opterećenja lomna područja se razvijaju po cijelom materijalu. Ovaj tip ponašanja prikazuje slika 3.14.



Slika 3.14. Tip 2 ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja, [5]

Tip 3. Zbog djelovanja opterećenja stvara se jedna napuklina u obliku trake i širi se preko cijelog materijala što je vidljivo na slici 3.15.



Slika 3.15. Tip 3 ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja, [5]

Ispitivanja se obavljaju na cilindričnim uzorcima. Opterećenja, koja su u ovom ispitivanju tlačna, variraju između minimalne i maksimalne vrijednosti. Frekvencija ispitivanja bila je u rasponu od 3 do 10 Hz. Svi uzorci su predopterećeni naprezanjem od 0,1 MPa. Broj ciklusa kod svih uzoraka iznosio je 3×10^6 , dok su maksimalna naprezanja iznosila između 50 % i 80 % utvrđene vrijednosti tlačne čvrstoće.

Osjetljivost na ureze

Prilikom konstruiranja mnogi dijelovi imaju neki oblik ureza ili su u njemu prisutni provrti. To osigurava njihovu funkcionalnost, mogućnost spajanja s drugim dijelovima itd. Vrlo je važno utvrditi kako se metalne pjene ponašaju u slučajevima postojanja ureza ili provrta kako bi se potpuno mogla definirati njihova konstrukcijska primjena. Ako je opterećenje statički tlačno, pjene nisu osjetljive na ureze ili provrte, što je i eksperimentalno potvrđeno (slika 3.16.), a može se izraziti formulom:

$$\sigma = R_{mi} \cdot [1 - (D/W)]$$

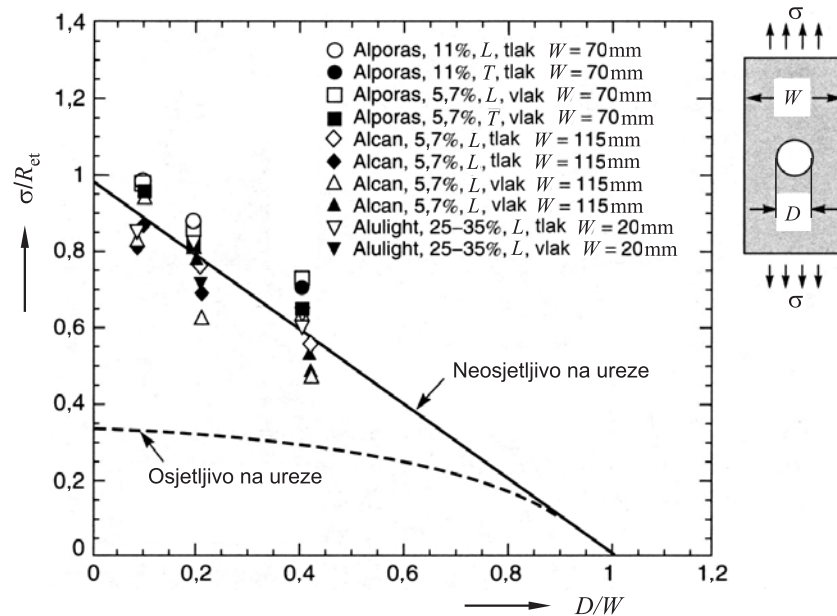
gdje je: σ – nominalno naprezanje,

R_{mt} – tlačna čvrstoća,

W – širina ispitivane ploče i

D – promjer provrta.

Slika 3.19. prikazuje čvrstoću metalnih pjena u slučaju postojanja provrta.



Slika 3.16. Čvrstoća kod postojanja provrta u uvjetima tlačnog i vlačnog opterećenja. Ispitivani materijali nisu osjetljivi na ureze, [5]

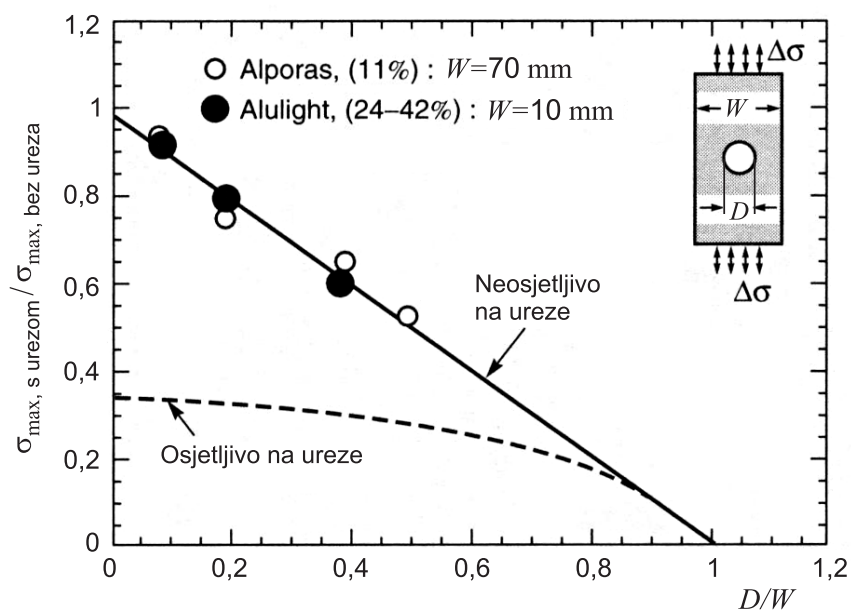
Kod određivanja osjetljivosti na ureze u uvjetima tlak-tlak promjenjivog opterećenja potrebno je odrediti maksimalno naprezanje na uzorku s urezom ili provrtom, a na osnovi geometrije uzorka i maksimalnog naprezanja na uzorku bez ureza:

$$\sigma_{\max,p} = [1 - (D/W)] \cdot \sigma_{\max,bp}$$

gdje je: $\sigma_{\max,p}$ – maksimalno naprezanje uzorka s provrtom, a

$\sigma_{\max,bp}$ – maksimalno naprezanje uzorka bez provrta.

Mogu se pojaviti dva moguća mehanizma loma: žilavo ponašanje; plastičnost u blizini provrta dovoljna je da razgradi koncentraciju elastičnih naprezanja koja može dovesti do loma, ili krhko ponašanje kada do loma dolazi na rubu provrta zato što su se lokalna naprezanja izjednačila s vlačnom čvrstoćom. Slika 3.17. pokazuje čvrstoću u uvjetima promjenjivog tlačnog opterećenja pjena s provrtom.



Slika 3.17. Ureзна čvrstoća u uvjetima tlačnog promjenjivog opterećenja ($R = 0,1$) uz praktički beskonačan broj ciklusa na pjenama s provrtom, [5]

3.1.5. Ponašanje pri puzanju

U ovom poglavlju bit će opisano ponašanje metalnih pjena pri povišenim temperaturama. Kao što je već poznato na visokim se temperaturama bitno mijenjaju mehanička svojstva svih metalnih materijala. Dolazi do sniženja granice razvlačenja, modula elastičnosti i dinamičke izdržljivosti te do povišenja istežljivosti i žilavosti, te često i do puzanja materijala. Puzanje se pojavljuje na temperaturama koje su više od $1/3$ tališta promatranog materijala koji je istodobno izložen konstantnom opterećenju.

S povećanjem vremena izloženosti navedenim uvjetima deformacija je sve veća. Puzanje metalnih pjena nužno je proučiti zato što se one vrlo često koriste kao jezgre sendvič-konstrukcija

koje su u eksploataciji izložene visokim temperaturama. Puzanje pjena modelirano je korištenjem saznanja o izobličenju i istežanju stijenci ćelija zbog puzanja. Danas postoje i matematički modeli koji opisuju proces puzanja kod metalnih pjena. Pretpostavlja se da je brzina puzanja pjene u drugom stadiju ovisna o početnoj brzini puzanja i nametnutom naprežanju, a određena je sljedećim empirijskim izrazom, [11]:

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

gdje je: ε^* – brzina puzanja u drugom stadiju, σ – primjenjeno naprežanje, dok su: ε_0^* – početna brzina puzanja, n – eksponent puzanja, σ_0 – referentno naprežanje svojstva materijala (vidi tablicu 2.). Početna brzina puzanja (ε_0^*) povezuje se s energijom (Q) potrebnom za aktivaciju procesa puzanja i to sljedećom relacijom:

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

gdje je: Q – aktivacijska energija, A – konstanta, R – plinska konstanta i T – apsolutna temperatura.

Tablica 2. Parametri puzanja pojedinih metala, [11]

Materijal	n	σ_0	Q , kJ/mol
Aluminij	4,4	0,12	142
Nikal	4,6	0,50	284
Austenitni čelik (AISI - 316L)	7,9	33,5	270

Relativna brzina u II. fazi puzanja za pjene s otvorenim ćelijama prema [11] iznosi:

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0^*} = \frac{0,6}{n+2} \cdot \left[\frac{1,7 \cdot (2n+1)}{n} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^n \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^{(3n+1)/2}$$

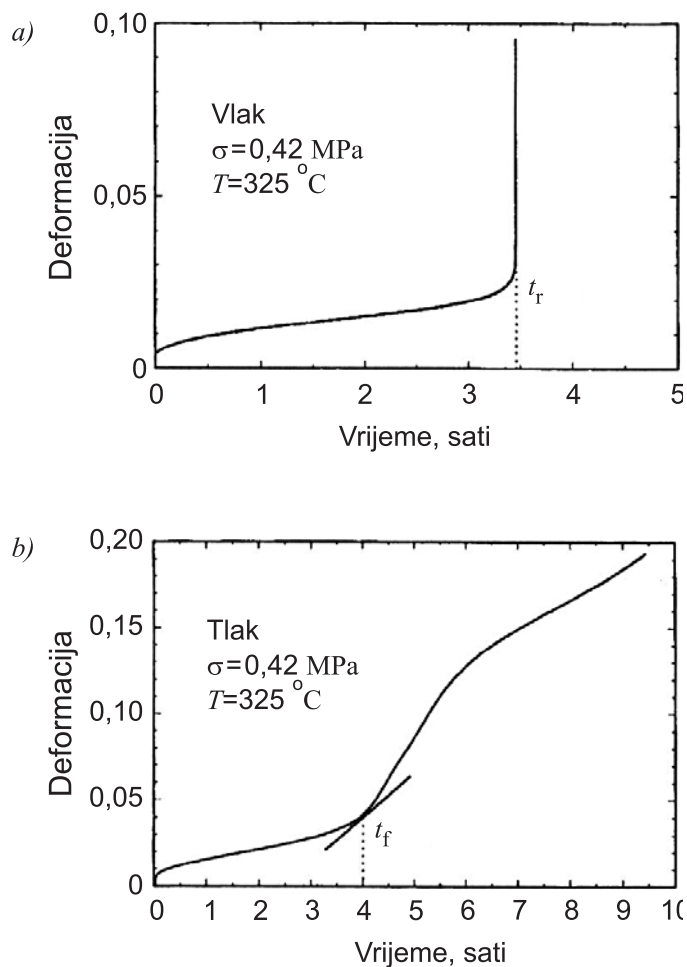
gdje je: ε^* – brzina puzanja u drugom stadiju, ρ/ρ_s – relativna gustoća, σ – naprezanje i n – eksponent puzanja.

Relativna brzina istežanja u drugoj fazi puzanja za pjene sa zatvorenim ćelijama prema [11] iznosi:

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0^*} = \left[\frac{\frac{\sigma}{\sigma_0}}{\frac{1}{1,7} \cdot \left(\frac{n+2}{0,6} \right)^{1/n} \cdot \left(\frac{n}{2n+1} \right) \cdot \left(\phi \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{(3n+1)/2} + \frac{2}{3} \cdot (1-\phi) \cdot \frac{\rho}{\rho_s}} \right]$$

gdje je ϕ volumni udio krutog materijala u stijenci ćelija.

Ispitivanje je obavljano na ALPORAS pjene gustoće 235,2 kg/m³. Ta se pjena također koristi kao jezgra sendvič-konstrukcija koje su izložene povišenoj temperaturi. Veličina ćelija ispitivane pjene dosta varira, no prosječno je iznosila 4,5 mm, dok je debljina stijenki bila 82 μ m. Kao i kod većine pjena primijećene su neke nepravilnosti u njezinoj građi. Temperatura solidusa iznosi 615 °C, a temperatura likvidusa 660 °C. Zbog nedostatka podataka pretpostavlja se kako su eksponent n i iznos aktivacijske energije Q jednaki kao kod čistog aluminijske. Temperature na kojima je obavljano ispitivanje bile su manje od 0,67 iznosa temperature tališta. Ispitivani uzorak je bio dimenzija 25×25×50 mm. Puzanje pjena dosta ovisi o gustoći uzorka tako da prilikom ispitivanja valja smanjiti varijacije u gustoći uzoraka što je više moguće. Naprezanja su iznosila od 0,25 MPa do 0,68 MPa, dok je temperatura varirala između 260 °C i 350 °C. Ovisno o iznosu opterećenja i temperature ispitivanja do pojave loma trajala su od 0,5 sati do 500 sati. Slika 3.18. pokazuje krivulje puzanja ALPORAS pjene u uvjetima vlačnog i tlačnog opterećenja.



Slika 3.18. Krivulje puzanja ALPORAS pjene u uvjetima vlačnog i tlačnog opterećenja, [11]

3.1.6. Apsorpcija energije udara

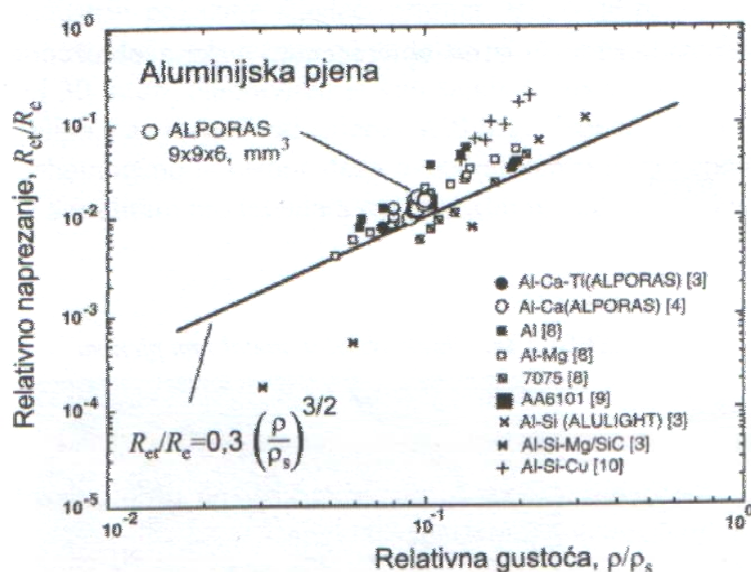
Mogućnost apsorpcije energije udara jedno je od najzanimljivijih uporabnih svojstava pjena. Posebno je izražen interes industrije transportnih sredstava koja izrađuje mnoge dijelove vozila koji u eksploataciji mogu biti izloženi udarnim opterećenjima (npr. branici, nosači motora itd.). Također je to svojstvo zanimljivo prilikom izrade pakirne ambalaže koja tokom transporta može biti izložena udarima.

Gibson i Ashby pretpostavili su, na osnovi odnosa relativnih naprezanja tečenja i relativne gustoće, da do plastičnog kolapsa ćelija dolazi kada moment izazvan tlačnim opterećenjem prekorači moment plastičnosti čvorova ćelija. Prema [7] odnos između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće iznosi:

$$\frac{R_{et}}{R_e} = C \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{3/2}$$

gdje je: R_{et} – granica stlačivanja pjene, R_e – granica tečenja materijala ćelija, ρ – gustoća pjene, ρ_s – gustoća materijala stijenki ćelija i C – konstanta.

Slika 3.19. prikazuje empirijsku vezu između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće za različite vrste komercijalnih pjena, prema kojoj konstanta C iznosi 0,3 kao i kod poliuretanskih pjena.



Slika 3.19. Omjer između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće, [12]

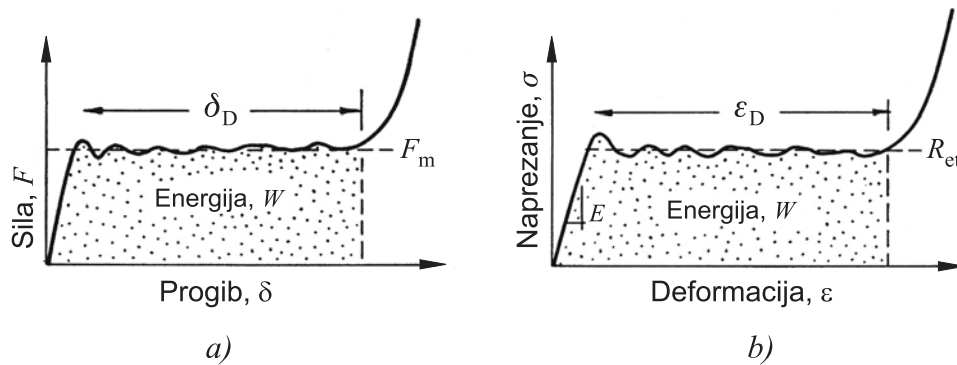
Apsorpcija energije udara po jedinici volumena (W) može se prikazati sljedećom relacijom:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

gdje je: σ – naprezanje, a ε – deformacija.

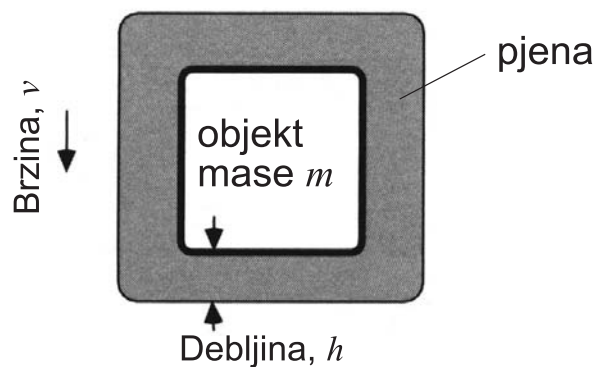
Prosječne vrijednosti apsorpcije energije udara po jedinici volumena za ALPORAS pjenu pri deformaciji od 55 % za statičko i dinamičko opterećenje iznose 1,0 MJ/m³ i 1,51 MJ/m³. Iz toga je vidljivo kako je apsorpcija za 50 % veća pri dinamičkom opterećenju.

Kao što je već spomenuto, apsorpcija energije udara vrlo je važna kod izbora materijala za izradu pakirne ambalaže koja može biti izložena udarnim opterećenjima (slika 3.21.). Tu je bitno da granica stlačivanja (R_{et}) bude tek nešto manja od napreznja pri kojem dolazi do loma materijala, odnosno do dosizanja kritične deformacije zgušnjavanja (ε_D). Površina ispod krivulje $R_{et} - \varepsilon_D$ pokazuje kolika se količina energije udara može apsorbirati (slika 3.20.).



Slika 3.20. Krivulje koje prikazuju apsorpciju energije pri savijanju a) i tlaku b), [5]

Slika 3.21. pokazuje primjer padajućeg (udarno opterećenog) paketa obloženog pjenom.



Slika 3.21. Paket obložen metalnom pjenom, [6]

Objekt mase m , obložen pjenu debljine h može podnijeti kritično usporenje a^* (negativnu akceleraciju), pri čemu maksimalna dopuštena sila iznosi:

$$F = m \cdot a^*$$

Ako kontaktna površina između pjene i pakiranog objekta iznosi A , tada će do uništenja pjene doći pri sili:

$$F = \sigma_{et} \cdot A$$

gdje je σ_{et} – naprezanje stlačivanja.

Iz toga se može izračunati potrebna granica stlačivanja pjene:

$$R_{et} \leq \frac{m \cdot a^*}{A}$$

Apsorpcija po jedinici volumena W izračunava se na sljedeći način:

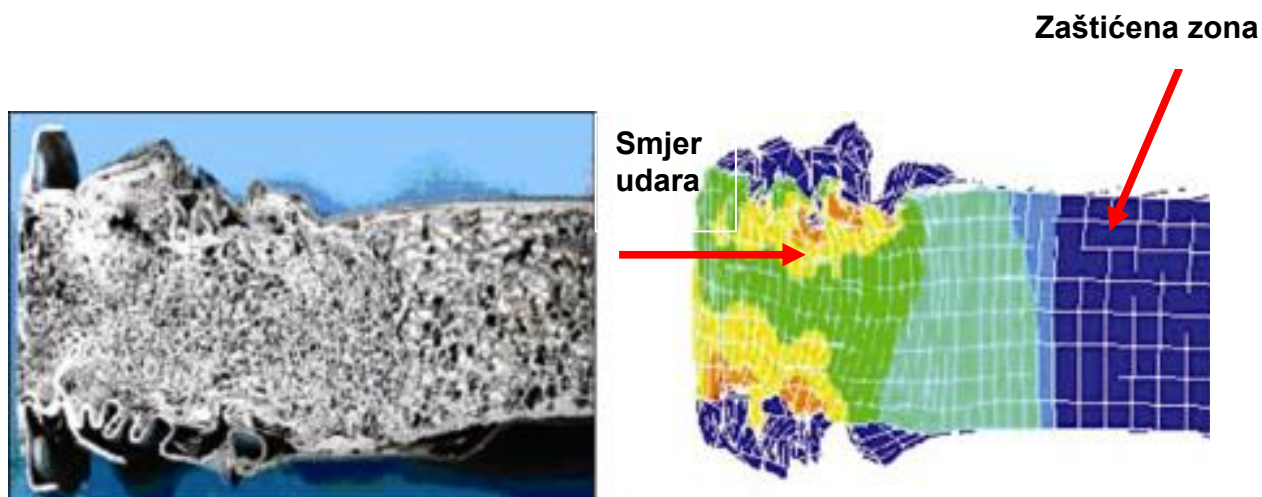
$$W = R_{et} \cdot \varepsilon_D$$

Na kraju je nužno odrediti i debljinu paketa pjene koja je potrebna za apsorpciju ukupne kinetičke energije (mv^2/a^*).

$$h = \frac{1}{2} \cdot \frac{mv^2}{E_{et} \cdot \varepsilon_D \cdot A}$$

Kod tlačno opterećenih cijevi, ispunjenih metalnom pjenu i zatvorenih na jednom kraju, dolazi do savijanja ćelija koje stvaraju nakupine u obliku prstena. Kada se cijela cijev deformira, te nakupine dolaze u međusobni kontakt. I za ovaj oblik materijala vrijede dijagrami apsorpcije energije udara prikazani na slici 3.20.

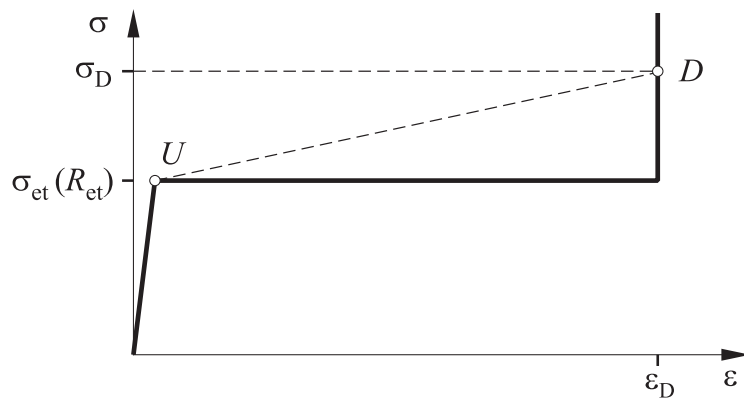
Da se metalne pjene kao materijal koji apsorbira energiju udara već ispituju u industriji pokazuje sljedeći primjer. BMW je napravio niz udarnih testova na nosaču motora koji ima jezgru od metalne pjene. Nosač je udaren masom od 885 kg pri brzini od 30 km/h. Napravljen je kao sendvič-ploča u kojoj su vanjski limovi napravljeni od čelika, a jezgra od pjene AlSiMg. Nakon testa gustoća u aluminijskoj pjeni nehomogeno je raspoređena u aksijalnom smjeru zbog dinamičkih procesa. Napravljen je simulirani model udara numeričkim metodama (slika 3.22.).



Slika 3.22. Udarni test nosača motora BMW-a, [13]

3.1.7. Propagacija udarnog vala

Udarni val širi se kroz metalnu pjenu nakon što je ona izložena udaru relativno velikim brzinama. Širenjem vala raste naprežanje do granice stlačivanja R_{et} pjene.



Slika 3.23. Krivulja naprezanje-deformacija metalne pjene, [5]

Krivulja na slici 3.23. prikazuje kako metalna pjena prije udara ima granicu stlačivanja pri deformaciji zgušnjavanja ε_D . Nakon udara naprezanje raste iznad granice stlačivanja i pjenom se širi plastični udarni val. Elastični val širi se brzinom v_{el} , a naprezanje raste do σ_{et} :

$$v_{pl} = \sqrt{\frac{E_t}{\rho}}$$

Plastični val širi se brzinom v_{pl} pri čemu naprezanje raste od σ_{et} do vrijednosti σ_D u točki D.

Skok naprezanja sa σ_{et} na σ_D iznosi:

$$(\sigma_D - \sigma_{et}) = \rho v_{pl} v_D$$

$$v_{pl} = \sqrt{\frac{(\sigma_D - \sigma_{et})}{\rho \cdot \varepsilon_D}} = \sqrt{\frac{E_t}{\rho}}$$

$$E_t = \frac{(\sigma_D - \sigma_{et})}{\varepsilon_D}$$

gdje je: v_D – brzina u točki D, a E_t – tangencijalni modul (vidi spojnicu U-D na slici 3.23.)

Brzina prijelaza (v_t), kod koje može doći do udara, ponajprije ovisi o relativnoj gustoći i iznosi:

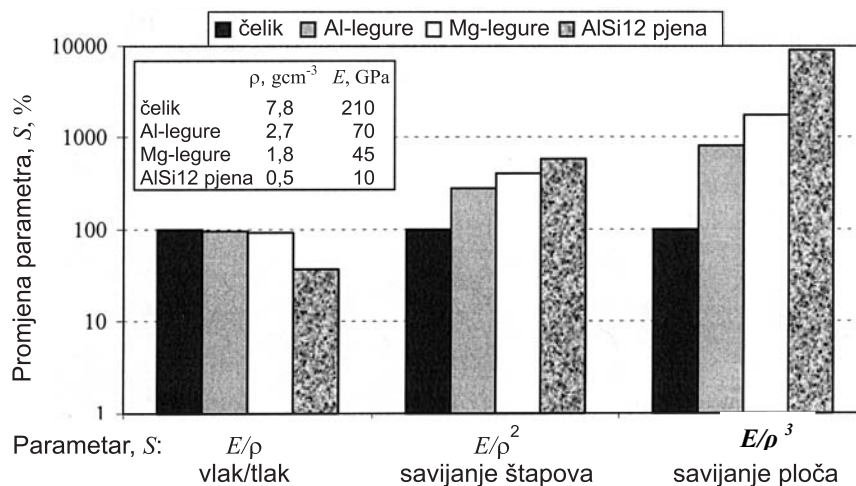
$$v_t = \left(0,1 \cdot C_1 \cdot \frac{R_e}{\rho_s} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1/4} \cdot \left(\alpha - \beta \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1/2}$$

gdje su: α i β – koeficijenti koji iznose 0,8 i 1,75, C_1 – koeficijent koji se bira proizvoljno (npr. 0,3), R_e – granica tečenja materijala ćelija i ρ/ρ_s – relativna gustoća.

Ako se kao primjer uvrste sljedeće vrijednosti: $\rho/\rho_s = 0,15$; $C_1 = 0,3$; $R_e = 200$ MPa i $\rho_s = 2700$ kg/m³, dolazi se do brzine od 21,5 m/s. Za mnoge primjene zemaljskog transporta brzine udara mnogo su manje od te vrijednosti, pa se može konstatirati da kvazistatička čvrstoća zadovoljava u konceptualnoj fazi konstruiranja.

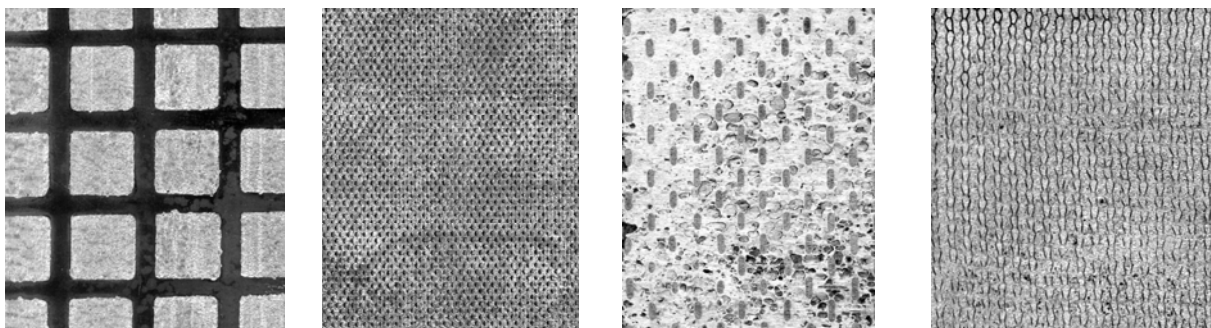
3.1.8. Ojačane aluminijske pjene

Tijekom proizvodnje formiraju se slučajne raspodjele šupljina različitih oblika, a neizbježno je i nastajanje guste površinske kore, koja značajno poboljšava savojnu krutost i izgled pjene. S druge strane, ta kora sadrži često nevidljive napukline i praznine koje mogu inicirati prijevremen lom pjene, naročito pri vlačnom opterećenju i kada su povoljni uvjeti za stvaranje napuklina u visokoporoznom materijalu. Zbog toga je vlačna čvrstoća aluminijskih pjena nedovoljna za efikasniju uporabu za jače opterećene konstrukcijske dijelove, iako je omjer krutosti i mase odličan (slika 3.24.).



Slika 3.24. Parametar S - omjer krutost/masa za različite materijale i opterećenja (E - modul elastičnosti, ρ - gustoća, 100 %-vrijednost za čelik), [14]

Rast napuklina u stijenkama ćelija može se spriječiti ojačanjem pjena, slično kao kod ojačanja betona. Za ojačanje Al pjena rabe se različiti oblici mreža od nehrđajućih čelika (slika 3.25.). Ako materijal ojačavanja ima viši modul elastičnosti i dovoljnu granicu tečenja, naprezanja se prenose s pjene na ojačavajući element i postojeća napuklina u ćeliji postaje neaktivna.



štancani lim

istegnuta mreža

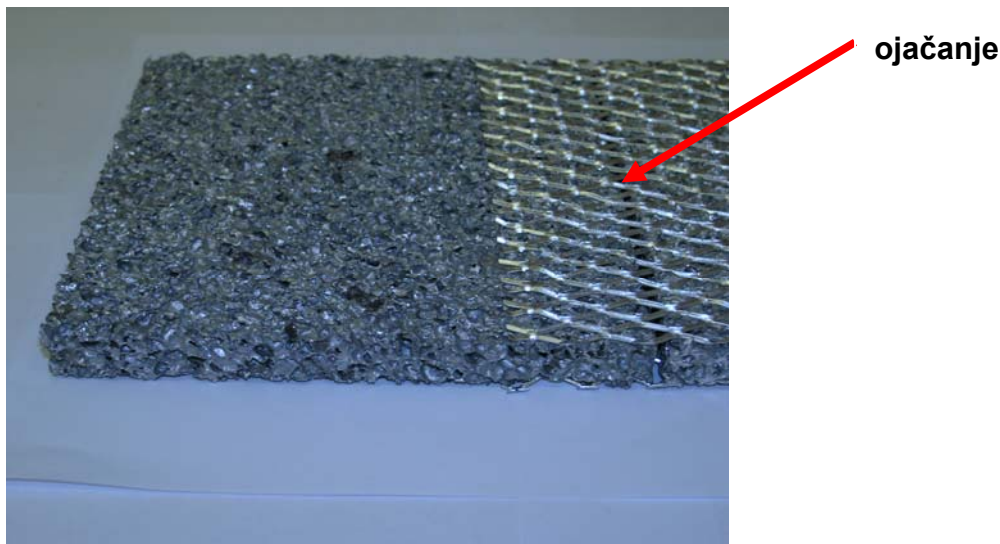
pletena mreža

mreža

Slika 3.25. Oblici mreža od nehrđajućeg čelika za ojačanje Al pjena, [15]

Naprezanje koje uzrokuje tečenje ili čak površinski lom aluminijskih pjena, može se smanjiti ulaganjem ojačanja, naročito ako su postavljena na vlačno opterećenu površinu (slika

3.26.). Na taj način dolazi do značajnog povećanja čvrstoće, kapaciteta apsorpcije energije uz neznatno povećanje mase (oko 20-30 %).



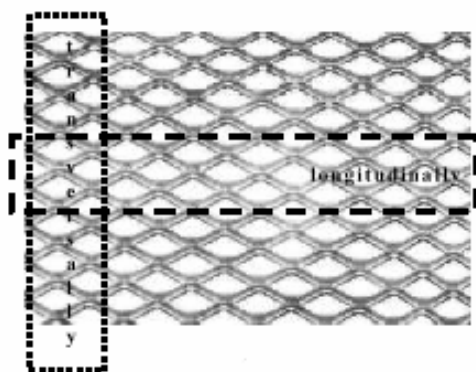
Slika 3.26. Ojačanje na tlačnoj strani metalne pjene, [16]

Dio od pjene moguće je ojačati u onom smjeru gdje se očekuje najveće opterećenje i tako maksimalno optimirati svojstva u odnosu na masu. Također se ojačanja koriste za poboljšanje savojne krutosti sendviča kada je ograničena debljina limova.

U postupku gdje se ojačanje stavlja na donju stranu kalupa, prilikom ekspanzije pjene ojačanje se pomiče prema površini gdje se stapa s pjenom. Tekuća pjena reagira s ojačanjem tvoreći metalnu vezu. Kvaliteta te veze ovisi o kemijskom sastavu oba materijala i može se kontrolirati vremenom kontakta između taljevine i ojačanja te pripremom površine ojačanja. Ovim tipom metalne veze dobivaju se značajna poboljšanja mehaničkih svojstava i toplinske stabilnosti u odnosu na lijepljene ili zavarene sendvič-konstrukcije. U odnosu na tipične kompozite s metalnom matricom ovdje gornji sloj ne predstavlja najslabiju kariku zbog toga što obično ima bolja svojstva od visokoporozne i krhke AlSi12 pjene. Ojačanja sprečavaju izlazak plina iz pjene prilikom hlađenja pa imaju stabilizirajući efekt. Također ojačanja povećavaju debljinu površine, pojednostavljuju spajanje jer je moguće zavarivanje, i omogućavaju određeno oblikovanje.

Dijelovi od metalnih pjena mogu biti ojačani ovisno o smjeru u kojem se očekuje najveće opterećenje, štedeći tako na troškovima ojačanja i masi materijala. Velika prednost ovog procesa proizvodnje ojačanih metalnih pjena je u tome što se izvodi u jednoj tehnološkoj operaciji što smanjuje troškove i pojednostavljuje proizvodnju.

Ploče različite poroznosti napravljene od legura AlSi12 i AlMg1Si0,6, ojačane su s jedne ili obje strane mrežom od istegnutog nehrđajućeg čelika. Veličina pojedinih otvora mreže je 6x3 mm, a specifična težina 3,4 kgm⁻². Uzorci za ispitivanje izrezani su iz ploča u dva smjera: s uzdužnom i poprečnom orijentacijom ojačanja (slika 3.27.).



Slika 3.27. Orijehtacija ojačanja mreže od istegnutog austenitnog čelika, [17]

Na uzorcima je provedeno ispitivanje na savijanje u četiri točke. Veličina uzoraka je 10x12x100 mm (visina x širina x dužina). Korišteno je ispitivanje u četiri točke zbog toga što je pogodnije za materijale s heterogenom strukturom zbog bolje raspodjele momenta savijanja. Ojačanja su postavljena na tlačno ili vlačno opterećenu površinu pjene. Za usporedbu ispitivane su i pjene bez ojačanja. Savojna krutost B izračunata je iz nagiba krivulje “opterećenje-pomak” prema:

$$B = E \cdot I = \frac{1}{48} \cdot \frac{F_c}{y_\varepsilon} \cdot (3l^2 - 4c^2)$$

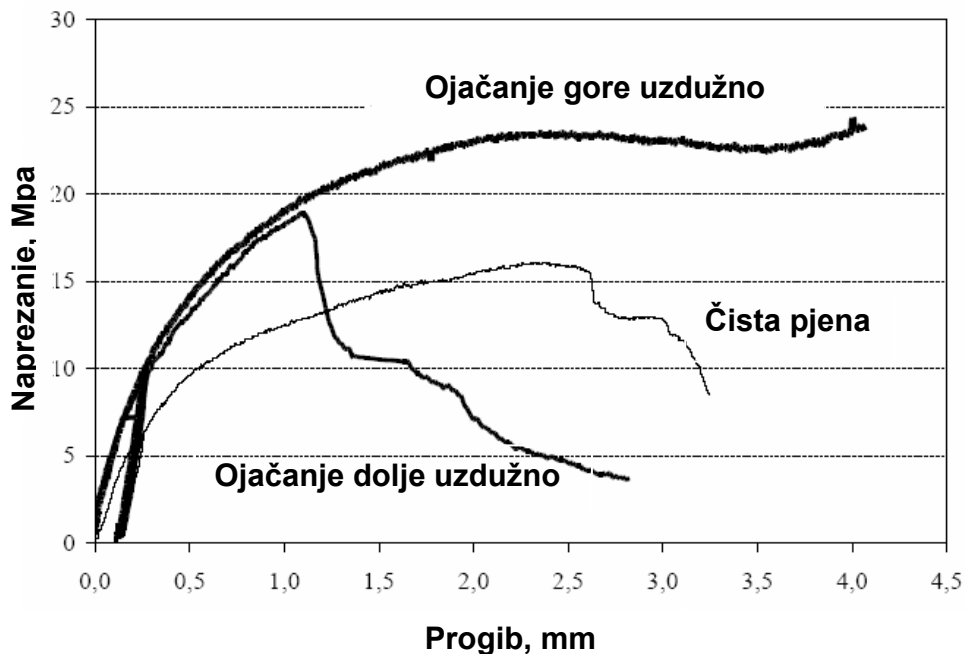
gdje je: E (MPa) – modul elastičnosti, I (mm^4) – poprečni moment inercije, F_c (N) – opterećenje koje uzrokuje pomak y_c (mm), l i c – razmak između uporišta ($l = 70$ mm i $c = 20$ mm u ovom primjeru).

Da bi se dobio linearni dio krivulje opterećenje-pomak, primijenilo se kratko rasterećenje kada je postignuta deformacija od $\varepsilon = 0,1$. Otklon je mjereno u sredini uzorka elektroničkim ekstenziometrom. Brzina je iznosila 2 mm/min. Naprežanje je izračunato prema izrazu:

$$\sigma = \frac{6F_c}{bh^2}$$

gdje je b širina, a h visina ispitnog uzorka.

Slika 3.28. prikazuje ponašanje AlSi12 sa i bez ojačanja prilikom ispitivanja na savijanje. Poroznost pjene približno je ista. Ojačanje je postavljeno na donju ili na gornju stranu ispitnog uzorka, pa se vidi da je savojna krutost gotovo dvostruko veća, dok je masa uzorka porasla za oko 30 %. Najučinkovitije je ojačanje koje je postavljeno na donju, vlačno opterećenu stranu uzorka. U tom slučaju ne dolazi do loma tijekom ispitivanja. Ako je ojačanje postavljeno na gornju, tlačno opterećenu stranu uzorka, dolazi do loma pri znatno nižem opterećenju, koje je usporedivo sa uzorkom bez ojačanja.



Slika 3.28. Utjecaj ojačanja na ponašanje pri savijanju grede od AlSi12 pjene poroznosti od 81%,

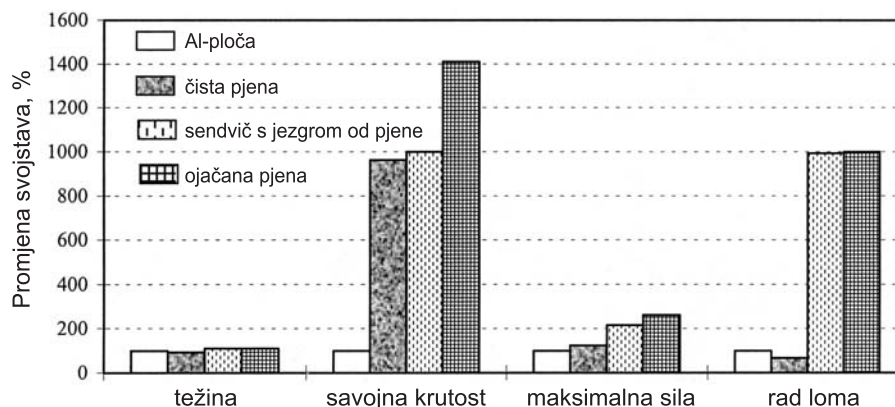
[17]

Utjecaj položaja ojačanja na žilavost jasno je vidljiv na slici 3.29., koja pokazuje konačnu deformaciju nakon udarnog ispitivanja. Uzorak bez ojačanja nije uspio apsorbirati gotovo ništa udarne energije, dok su uzorci s ojačanjem svu udarnu energiju pretvorili u deformaciju. Mogućnost apsorpcije dodatne količine energije može se vidjeti iz kuta pod kojim uzorak ostao savinut. Ponovo se može uočiti da je najefikasnija upotreba ojačanja na vlačno opterećenoj površini.



Slika 3.29. Deformacija uzoraka AlMg1Si0,6 pjene, poroznosti 85 %, nakon udarnog ispitivanja (maksimalna energija 15 J) za različite položaje ojačanja, [17]

Slika 3.30. prikazuje promjene svojstava različitih aluminijskih uzoraka jednakih masa. Uzorak od jednostavne aluminijske pjene ima znatno bolju krutost od Al lima. Nikakvog poboljšanja nema ako se usporedi savojna čvrstoća, a otpornost na lom pjene je nešto manja. Radi toga je aluminijske pjene za praktičnu uporabu nužno ojačati barem na vlačno opterećenoj strani.



Slika 3.30. Svojstva ojačane AlSi12 pjene debljine 15 mm, poroznosti 85 % u usporedbi s Al limom debljine 3 mm; AlSi12 debljine 15 mm, poroznosti 80 %; sendvič AlSi12 debljina pjene 11 mm, poroznosti 80 %, vanjskih Al limova debljine 1 mm, [14]

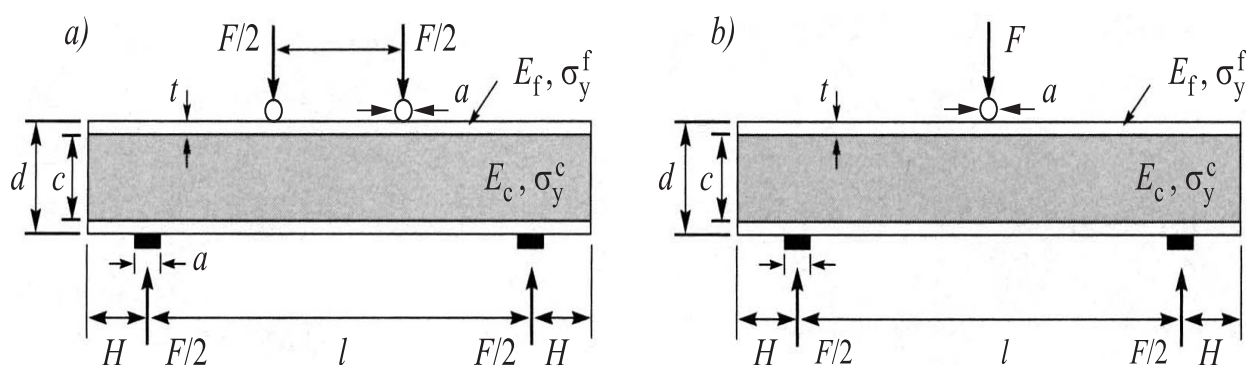
Prednosti ojačanja potvrđena su ispitivanjem savijanja ploča. U ovom slučaju ploče su opterećene po cijeloj površini razlikom tlakova dviju komora između kojih je ispitivani uzorak. Ojačana AlSi12 ploča podnijela je razliku tlaka od 70 kPa, dok je kod ploče bez ojačanja došlo do loma pri 40 kPa. Uslijed povišenog opterećenja dolazi do konstantne deformacije zbog tečenja materijala ili loma zida kod najslabijih ćelija. Ojačanja omogućuju cikličko opterećenje ploče amplitudom od 50 kPa. Nakon prvog ispitivanja ojačane ploče krutost i trajna deformacija ostale su nepromijenjene tijekom cijelog ispitivanja (oko 1500 ciklusa).

3.1.9. Sendvič konstrukcije

Sendvič-konstrukcije imaju vrlo široku primjenu u industriji. Do danas su se izrađivale uglavnom s jezgrom od polimernih pjena. Pojavom metalnih pjena dobio se novi materijal koji je idealan upravo za sendvič-konstrukcije. Jezgre metalnih pjena posebno su važne kada se od konstrukcije zahtijeva multifunkcionalnost tako da se one, osim kao konstrukcijski dio, mogu koristiti kao ležište sustava cijevi za grijanje ili hlađenje, kao zvučna izolacija itd. Osim toga one omogućuju primjenu pri višim temperaturama. Budući da je jezgra, zapravo konstrukcijski dio sendvič-ploča, ona na sebe prima sva opterećenja kao i vanjske površine. Zbog toga je nužno ispitati čitav niz mehaničkih svojstava kako bi se moglo predvidjeti ponašanje sendvič-konstrukcija u eksploataciji.

Za ispitivanje krutosti i čvrstoće koriste se uzorci točno propisanih dimenzija koji se opterećuju na tri ili četiri točke. Prigodom ovakvih ispitivanja pretpostavlja se kako je veza između vanjskih limova i jezgre čvrsta. Veza limova i pjene ostvaruje se lijepljenjem ili difuzijskim spajanjem do kojeg dolazi tijekom izrade pjene. U takvom spoju jezgra i vanjski limovi smatraju se izotropnim materijalom.

Na sličan način može se ispitati i progib sendvič konstrukcija, te mehanizmi oštećivanja smično opterećene sendvič konstrukcije.



Slika 3.31. Sendvič-konstrukcije pod opterećenjem u a) četiri točke; b) tri točke, [5] i [18]

Na slici 3.31. vidljive su sve dimenzije uzorka. To su: b – širina uzorka, t – debljina vanjskih limova, d – visina uzorka, c – visina jezgrog sloja, l – udaljenost između sila na donjoj strani uzorka, s – udaljenost između sila na gornjoj strani uzorka u primjeru opterećenja u četiri točke, H – udaljenost mjesta djelovanja sile od kraja uzorka.

Sile se mogu prenositi preko kuglica promjera $2R$ ili četvrtastog komada duljine brida a (slika 3.32.). $F/2$ predstavlja silu, E_c i E_f su moduli elastičnosti jezgre i vanjskih limova, dok su $R_{e,c}$ i $R_{e,f}$ granice razvlačenja jezgre i vanjskih limova. U slučaju opterećenja u četiri točke ekvivalentna savojna krutost $(EI)_{eq}$ iznosi:

$$(EI)_{eq} = \frac{E_f \cdot b \cdot d \cdot t^2}{2} + \frac{E_f \cdot b \cdot t^3}{6} + \frac{E_c \cdot b \cdot c^3}{12} \approx \frac{E_f \cdot b \cdot d \cdot t^2}{2}$$

Ekvivalentna smična krutost $(AG)_{eq}$ iznosi:

$$(AG)_{eq} = \frac{b \cdot d^2}{c} \cdot G_c \approx b \cdot c \cdot G_c$$

gdje je: G_c – modul smičnosti i A – površina presjeka jezgre.

Maksimalni momenti savijanja i pomoću njih izražena naprezanja iznose:

$$M = \frac{F \cdot l}{4}$$

$$M = \frac{F \cdot (l - s)}{4} \cdot y$$

$$\sigma^f = \frac{M \cdot E_f}{(EI)_{eq}}$$

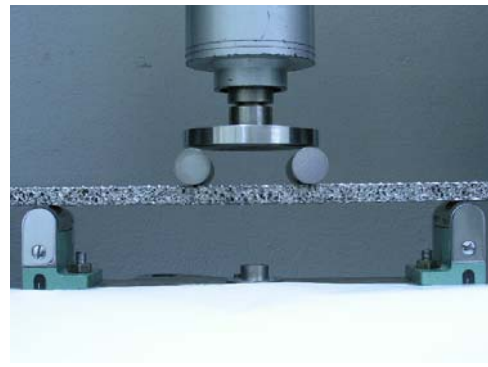
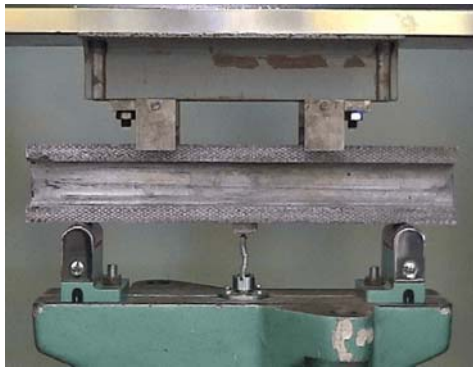
$$\sigma^c = \frac{M \cdot E_c}{(EI)_{eq}}$$

gdje je y udaljenost od neutralne osi.

Sila pri kojoj dolazi do stradavanja sendvič-konstrukcije uslijed tečenja najbolje se izražava preko granice razvlačenja za jezgru i vanjske limove. Opterećenje se i u ovom slučaju postavlja u tri ili četiri točke. Formule za sile iznose:

$$F_{fy} = \frac{4 \cdot b \cdot t(c+t)}{l} \cdot R_{e,f} + \frac{b \cdot c^2}{l} \cdot R_{e,c}$$

$$F_{fy} = \frac{4 \cdot b \cdot t(c+t)}{l-s} \cdot R_{e,f} + \frac{b \cdot c^2}{l-s} \cdot R_{e,c}$$



a) testiranje preko četvrtastog brida duljine "a" b) testiranje preko kuglica polumjera "2R"

Slika 3.32. Testiranje metalnih pjena na savijanje u četiri točke, [16]

3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena

3.2.1. Toplinska vodljivost

Koeficijent toplinske vodljivosti (λ) najbolje pokazuje izolacijske sposobnosti materijala. Vrijednost λ kod metalnih pjena sa zatvorenim ćelijama varira od 0,2 sve do 11 W/mK. Nasuprot tome metalne pjene s otvorenim ćelijama odlično provode toplinu i koriste se u izradi izmjenjivača topline. Budući da koeficijent toplinske vodljivosti za aluminij iznosi 150 - 220 W/mK, a za nemetalne materijale približno 3 W/mK, jasno je da metalne pjene sa zatvorenim ćelijama mogu biti vrlo dobar izolator. Toplinska vodljivost aluminijskih pjena je od 8 pa čak i do 100 puta manja od λ čistog aluminija. Danas su razvijeni matematički modeli pomoću kojih se sa dovoljnom preciznošću može izračunati minimalna i maksimalna vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti.

Na prijenos topline utječe niz faktora kao što su: morfologija ćelija, relativna gustoća, koeficijent toplinske vodljivosti itd.

Aluminijske pjene su otporne na temperature i do 780 °C na kojima se deformiraju tek ako su izložene većim opterećenjima. To je još zanimljivije kada se zna da je talište aluminija oko 650°C. Otpornost na visoku temperaturu se pripisuje sloju Al_2O_3 .

3.2.2. Vatrootpornost

Aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama su pokazale iznimnu vatrootpornost što se pripisuje Al_2O_3 . Do stradavanja može doći iz više razloga tako da se u obzir uzima i toplinska i

strukturna vatrootpornost. Do toplinskog stradavanja dolazi kada pjena gubi izolacijski kapacitet, a do strukturnog kada gubi nosivost.

Alporas pjene su ispitane prema njemačkim standardima i proglašene negorivim. Mogu biti izložene temperaturama višim od 600°C za razliku od poliuretanskih pjena, koje se koriste u tračničkim vozilima, koje se izobliče i razvijaju otrovne plinove.

3.3. Zvučna svojstva metalnih pjena

Dobra zvučna svojstva očituju se u činjenici da metalne pjene apsorbiraju veliku količinu energije.

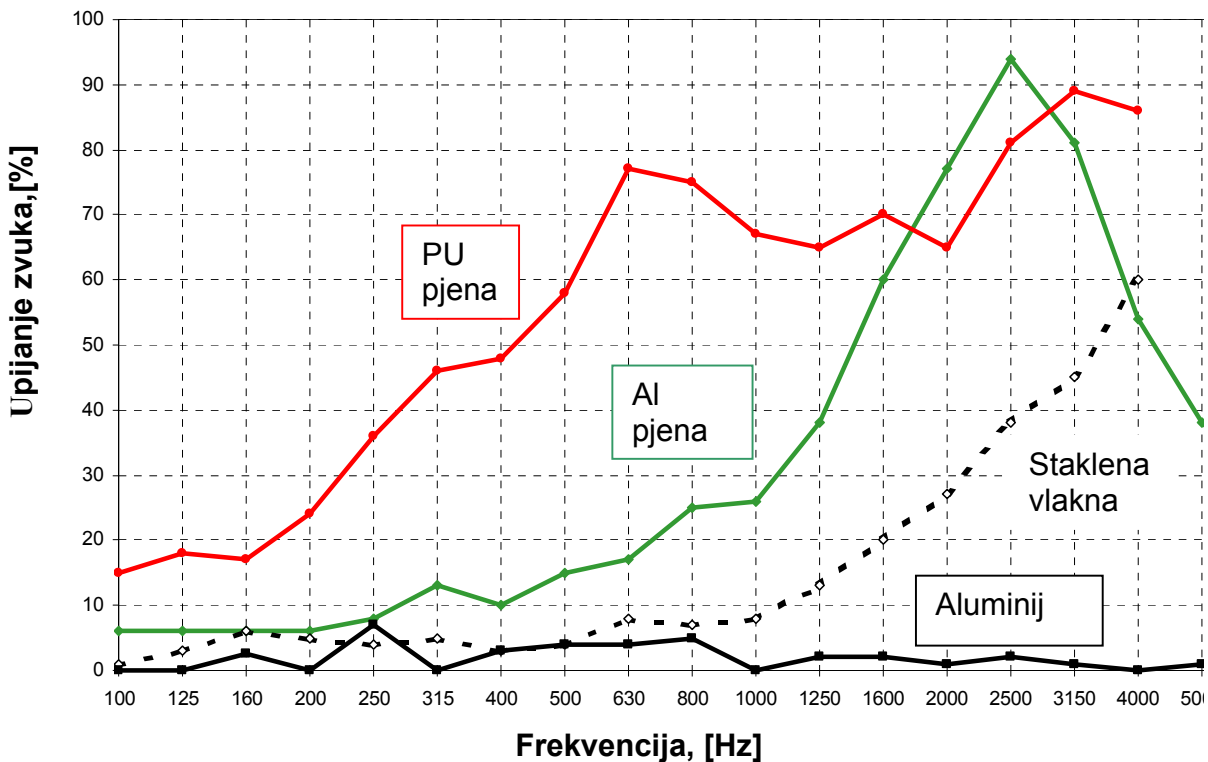
Metalna pjena mora imati otvorene ili poluotvorene ćelije kako bi dobro apsorbirala zvuk. Ispitivanja su provedena na Alporas pjenu sa zatvorenim ćelijama čije su stjenke različitim postupcima razbijane kako bi se omogućila cirkulacija zraka kroz njih.

Apsorpcija zvuka može se poboljšati bušenjem rupa promjera 1 - 2 mm u metalnoj pjenu.

Prema podacima proizvođača, prednosti Alporas pjena u odnosu prema konkurentnoj staklenoj vuni kada se radi o apsorpciji buke jesu:

- staklena vuna nije dovoljno kruta tako da se mora ustabiliti metalnom armaturom što nije slučaj kod Alporas pjene;
- vlakna staklene vune mogu biti uništena pod utjecajem vibracija i vjetra;
- staklena vuna pod utjecajem visoke temperature oslobađa otrovne plinove;
- staklena vuna puno brže upija vlagu;
- Alporas pjena se puno lakše montira zbog svoje vrlo male mase.

Slika 3.33. pokazuje postotak upijanja zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i aluminija.



Slika 3.33. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al, [19]

Dijagram pokazuje da Al pjena na frekvenciji od oko 2500 Hz ima postotak upijanja zvuka 95%, što je čak desetak posto više od već odavno poznate PU pjene, a puno više od staklene vune koja se često koristi u građevinarstvu.

3.4. Prigušenje vibracija metalnih pjena

Prigušenje je vrlo važno svojstvo dijelova konstrukcija koji su tijekom eksploatacije izloženi vibracijama (npr. dijelovi strojeva za preciznu obradu itd.). Princip ispitivanja je takav da se materijal izloži vibracijama te se proučava ponašanje u rezonanci nakon prestanka rada izvora vibracije. Kao i kod drugih ispitivanja i ovdje je problem nehomogena struktura uzoraka. Na rezultate utječe stupanj poroznosti, veličina i oblik ćelija, način obrade uzorka itd..

Procesi prigušenja u materijalu najbolje su karakterizirani bezdimenzionalnim koeficijentom gubitka η .

3.5. Spajanje metalnih pjena

Svojstva spoja moraju biti jednaka ili bolja od svojstava osnovnih materijala koji se spajaju. Porozna struktura znatno otežava spajanje metalnih pjena, pa se primjenjuju posebne tehnike spajanja. Ovdje su opisana tri načina spajanja:

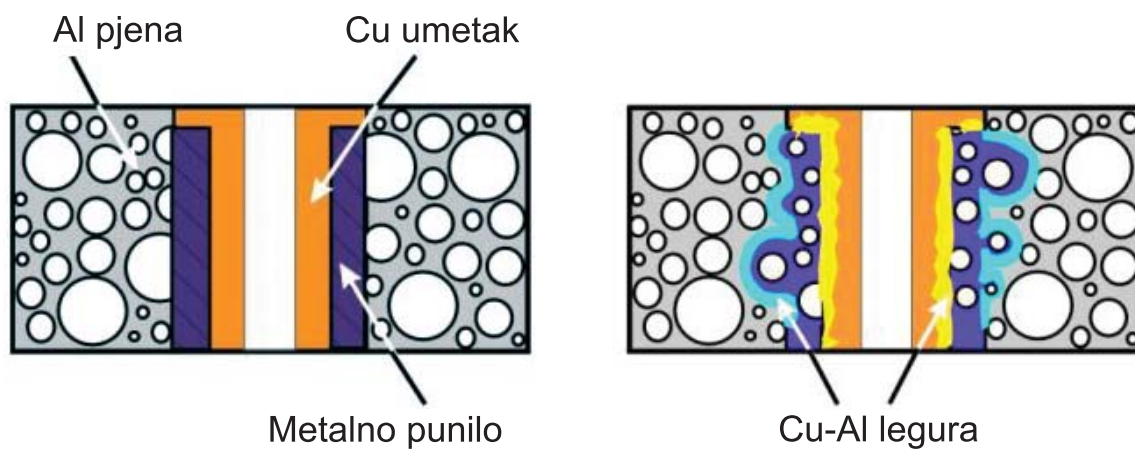
- spajanje ljepilima
- stvaranje rastavljivih spojeva
- spajanje zavarivanjem

3.5.1. Spajanje ljepilima

Kao ljepila najčešće se koriste epoksidne smole. Ljepila imaju jednaka ili bolja svojstva od osnovnog materijala. Najčešći problemi su: smanjenje toplinske stabilnosti i koeficijenta širenja topline i povećanje toplinske ili električne izolacije. Ova metoda spajanja se najčešće upotrebljava kod stvaranja sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene.

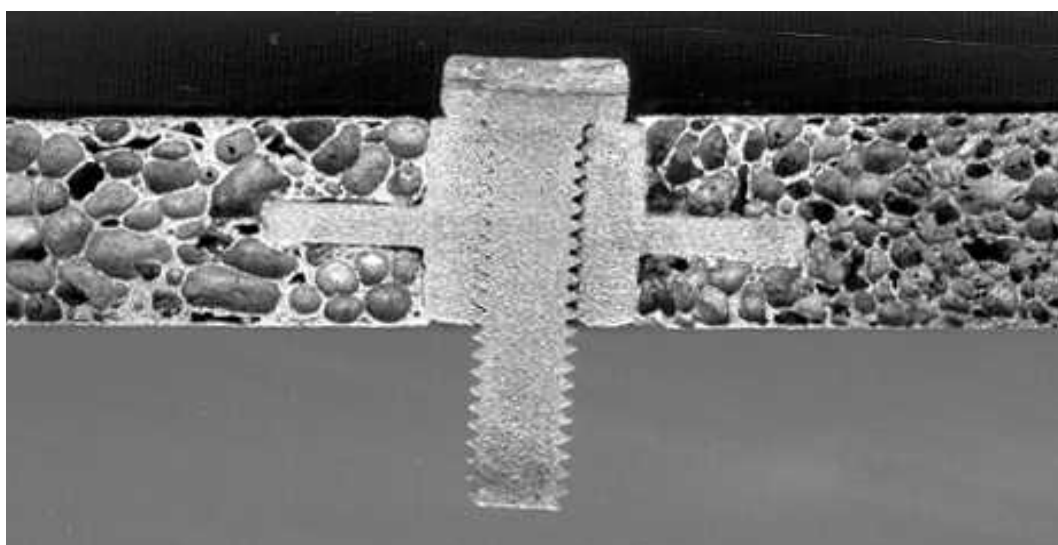
3.5.2. Rastavljivi spojevi

Rastavljivi spojevi metalnih pjena ostvaruju se pomoću drvenih vijaka ili pomoću metalnih umetaka u koje je urezan navoj. Ako se koristi umetak, koji je najčešće od bakra, nužno je postići dobro spajanje s metalnom pjenom. To se može postići korištenjem ljepila, umetanjem spojnice tijekom proizvodnog procesa ili korištenjem punila. Kao punilo se koristi materijal koji se može pjeniti i ima niže talište od metalne pjene u koju se stavlja umetak. Kada se uloži umetak u punilo, cijeli sklop se zagrijava. Prilikom zagrijavanja dolazi do upjenjavanja punila koje povezuje umetak i osnovnu metalnu pjenu. Dijelovi od metalne pjene s bakrenim umetkom prikazani su na slici 3.34..



Slika 3.34. Proces povezivanja umetka i metalne pjene, [6]

Na slici 3.35. prikazana je fotografija rastavljivog povezivanja metalne pjene pomoću vijka i umetka.



Slika 3.35. Povezivanje metalne pjene pomoću vijka i umetka, [20]

Na slikama 3.36. i 3.37. prikazani su još neki primjeri rastavljivog povezivanja metalnih pjena.



Slika 3.36. i Slika 3.37. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena, [16]



3.5.3. Zavarivanje i lemljenje metalnih pjena

Zavarivanje neporoznog aluminijskog je otežano zbog tankog sloja oksida Al_2O_3 na površini koja ima više talište od aluminijskog. Zato se zavarivanje obavlja u atmosferi zaštitnog plina kako se sloj oksida ne bi obnovio. Samo zavarivanje se najčešće obavlja laserom. Gustoća energije iznosi 10^6 W/cm^2 . Laserska zraka je fokusirana zbog čega je zona utjecaja topline puno uža nego kod drugih postupaka. To je kod metalnih pjena vrlo bitno jer se smanjuje mogućnost kolapsa ćelijaste strukture. Do kolapsa dolazi zbog prelaska krute faze u tekuću, što se također može spriječiti korištenjem dodatnog materijala koji se na mjesto zavarivanja dodaje u obliku šipke ili ploče. Primjenjuje se takav dodatni materijal koji se pod utjecajem topline također pretvara u metalnu pjenu. Primjeri zavarivanja prikazani su na slici 3.38.



Bild: A02

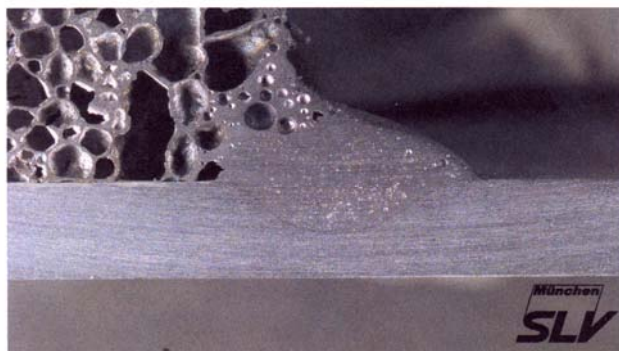


Bild: A02s

Slika 3.38. Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena, [16]

4. PRIMJENA METALNIH PJENA

Primjena metalnih pjena slijedi iz njihovih povoljnih svojstava u odnosu na ostale materijale. Budući da su metalne pjene relativno novi oblik materijala, njihova primjena još uvijek nije u potpunosti raširena, iako već i danas postoji nekoliko respektabilnih proizvođača ove vrste materijala. Metalne pjene mogu uspješno zamijeniti druge čelijaste materijale, npr. drvo i polimerne pjene. Loša strana metalnih pjena je njihova visoka cijena, no ona se neprestano smanjuje. Najveći broj metalnih pjena ima gustoću u granicama od 300 kg/m^3 do 900 kg/m^3 .

Tablica 3. pokazuje neke od mogućih područja primjene metalnih pjena i obrazloženje svojstava.

Tablica 3. Moguća primjena metalnih pjena, [5]

PODRUČJE PRIMJENE	OBRAZLOŽENJE
Lagane konstrukcije	Odličan omjer krutosti i mase pri savijanju
Jezgra sendvič konstrukcija	Niska gustoća i dobra smična i lomna čvrstoća
Prigušenje vibracija	Prigušenje vibracija je i do 10 puta bolje nego kod neporoznih metala
Apsorpcija zvuka	Metalne pjene s mrežastom strukturom
Apsorpcija energije	Vrlo dobra apsorpcija udarne energije pri sobnim i povišenim temperaturama
Zamjena za drvo	Lagane su, krute i mogu se spajati drvenim vijcima
Izmjenjivači topline, hladnjaci	Pjene s otvorenim ćelijama dobro provode toplinu zbog velike površine i vodljivosti stijenki
Vatrootpornost	Pjene sa zatvorenim ćelijama - stjenke prekrivene slojem oksida
Toplinska izolacija	Određene vrste pjena imaju niski koeficijent toplinske vodljivosti
Biokompatibilni umeci	Ćelijasta struktura biokompatibilnih titanovih pjena stimulira rast ćelije tkiva

nastavlja se

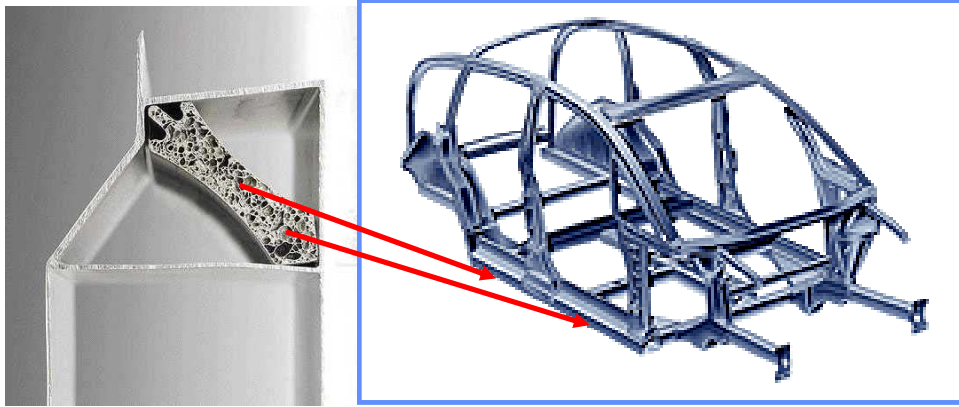
Filteri	Mogućnost filtriranja plinova i tekućina
Elektromagnetska zaštita	Dobra električna vodljivost
Elektrode, držači katalizatora	Veliki omjer površine i volumena

Najčešći oblik metalnih pjena su sendvič-konstrukcije (slika 4.1.).



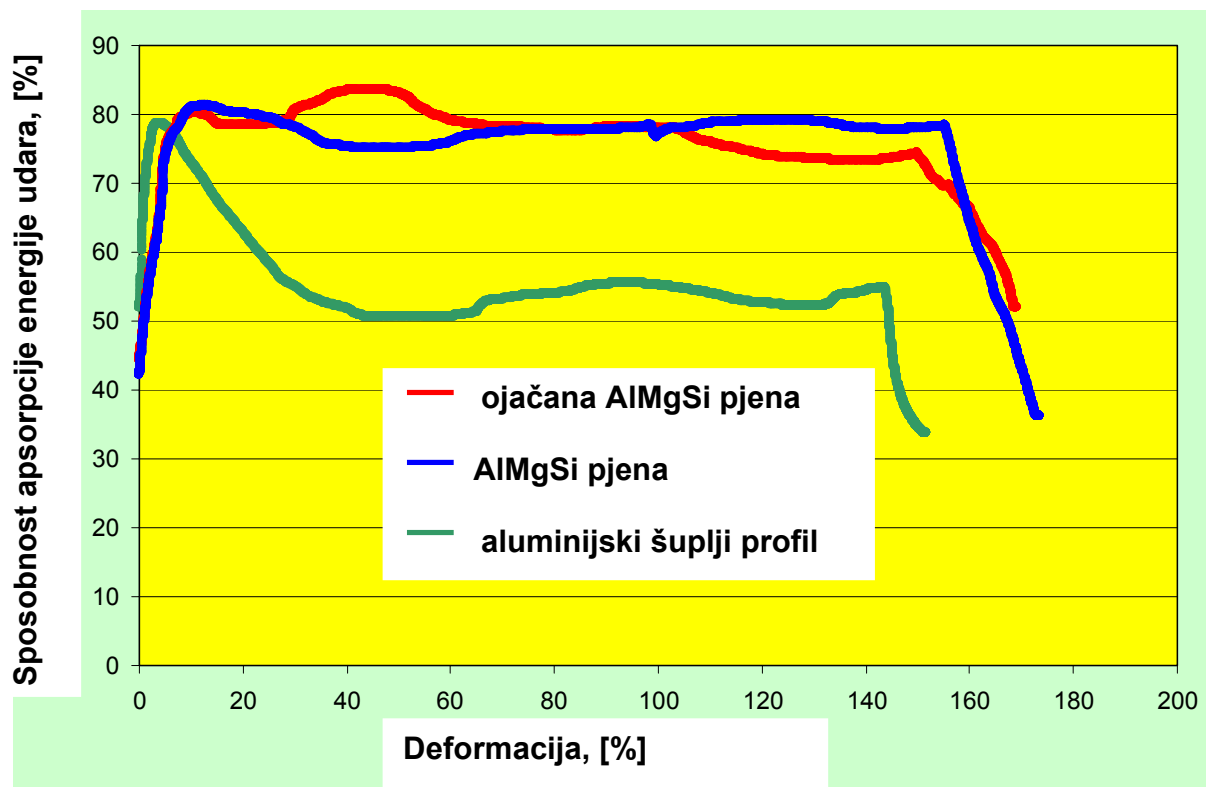
Slika 4.1. Sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene, [14]

Istraživanja pokazuju da najveće zanimanje za metalne pjene pokazuje industrija transportnih sredstava (slika 4.2.).



Slika 4.2. Primjena metalnih pjena u autoindustriji, [16]

Metalne pjene se u autoindustriji uglavnom koriste kao jezgra sendvič-konstrukcija. One se koriste za izradu dijelova oplata i okvira. Time se masa automobila može smanjiti za 20% što predstavlja i značajne uštede u potrošnji goriva. Ako se zna da metalne pjene imaju dobra toplinsko i zvučno-izolacijska svojstva te mogućnost prigušenja vibracija, jasno je da se one mogu primijeniti za razdvajanje kabine vozila od područja gdje je motor. Budući da aluminijske pjene imaju vrlo dobru sposobnost apsorpcije energije udara, od njih se mogu izrađivati i branici koji povećavaju sigurnost putnika pri udarcima. Izrazita sposobnost apsorpcije energije udara metalnih pjena prikazana je na slici 4.3..



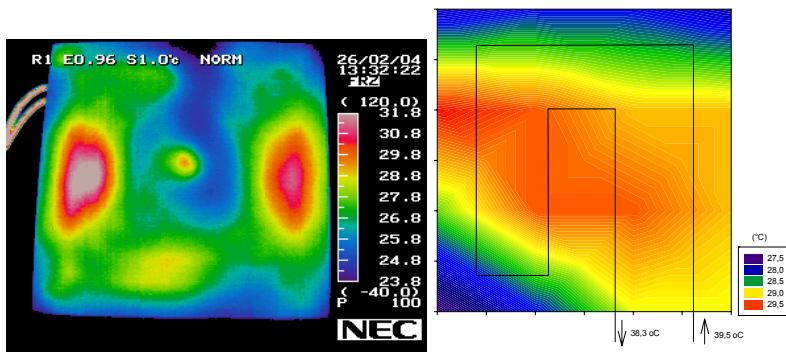
Slika 4.3. Sposobnost apsorpcije energije udara metalnih pjena prilikom ispitivanja na tlak, [16]

Osim u autoindustriji ovi materijali koriste se i u industriji tračničkih vozila, brodova, zrakoplova i svemirskih letjelica. Posebno treba razmotriti mogućnost izrade titanovih pjena i njihovu primjenu u zrakoplovnoj industriji zato što titan ima vrlo dobra mehanička svojstva.

Toplinska svojstva metalnih pjena dosta ovise o njihovoj građi. Ako pjena ima otvorene ćelije, ona će dobro provoditi toplinu, a ako su ćelije zatvorene, ona je vrlo dobar toplinski izolator. Pjene s otvorenim ćelijama, zbog svoje velike površine i dobre toplinske vodljivosti stijenki, dobro provode toplinu i mogu se primijeniti za izradu izmjenjivača topline, hladnjaka, grijačkih ploča, itd. (slike 4.4. i 4.5.)



Slika 4.4. Grijača ploča napravljena od ALPORAS ojačane pjene (600mmx 600mm), [16]



Slika 4.5. Raspored topline u običnoj grijačkoj ploči (lijevo), i ALPORAS grijačkoj ploči (desno), [16]

Velik omjer površina/volumen metalnih pjena također omogućava izradu uređaja za kontrolu protoka fluida kao što su npr. difuzori plina, mjerači razine tekućine (slika 4.6.) i sl..



Slika 4.6. Plovak od metalne pjene, [16]

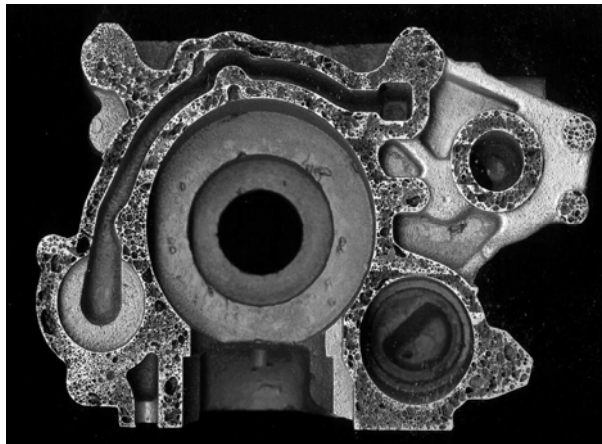
Metalne pjene mogu se koristiti i u graditeljstvu gdje do izražaja dolazi njihova vrlo dobra mogućnost upijanja zvuka. Istraživanja su pokazala kako se bušenjem provrta upijanje zvuka metalnih pjena dovodi na razinu staklene vune, materijala koji se uglavnom upotrebljava u te svrhe. One također imaju bolja mehanička i toplinska svojstva, a njihova krutost osigurava lakšu montažu. Pod utjecajem vatre staklena vuna oslobađa otrovne plinove, dok su metalne pjene vatrootporne.

Od tzv. aluminijskih spužvi izrađuju se također razni oblici prigušivača zvuka kao što je i prikazano na slici 4.7.



Slika 4.7. Prigušivači zvuka od aluminijskih spužvi, [21]

Danas razvijeni postupci lijevanja omogućuju izradu izrazito složenih oblika proizvoda od metalnih pjena (slika 4.8.). Mehanička svojstva mogu se optimizirati različitim postupcima toplinske obrade legure od koje nastaje pjena, a također su moguća i modificiranja površine.



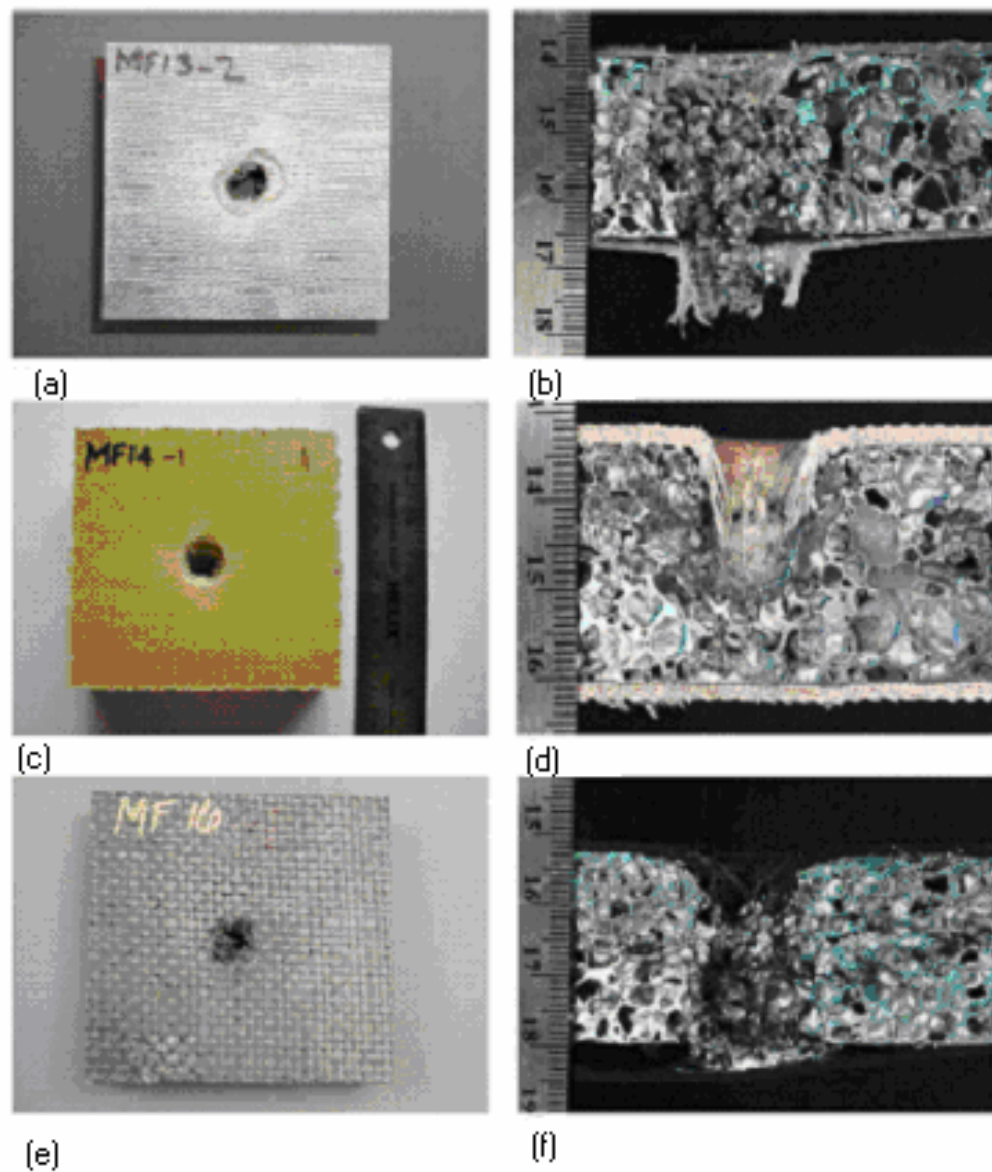
Slika 4.8. Lijevani proizvod od aluminijske pjene, [22]

Mala masa metalnih pjena vrlo je poželjna u industriji namještaja. Porozna građa različite teksture ima izrazito zanimljiva estetska svojstva. (slika 4.9.).



Slika 4.9. Korištenje metalnih pjena u estetske svrhe, [16]

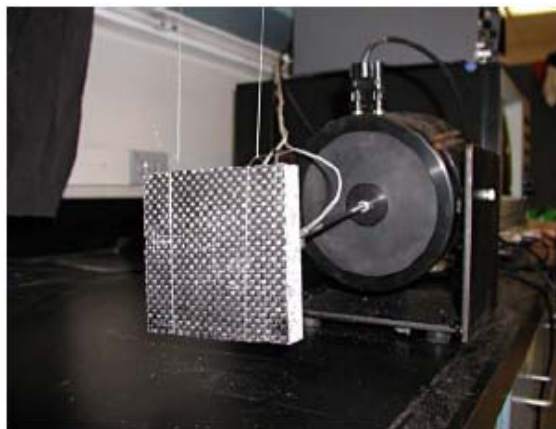
Sendvič konstrukcije imaju veliku sposobnost apsorpiranja energije udara (vidi slika 4.3.), te su zbog toga pogodne za ugradnju u razne automobilske konstrukcije, ali se mogu upotrebljavati i u vojne svrhe pri izradi zaštitnih dijelova odjeće i vojnih vozila. Na slici 4.10. prikazani su rezultati testiranja na udar tri različite sendvič konstrukcije, kojima je zajednička jezgra izrađena od aluminijske ALPORAS pjene gustoće 270 kg/m^3 , a površinski slojevi su izrađeni od različitih materijala.



Slika 4.10. Rezultati udarnog testiranja sendvič konstrukcija s jezgrom od aluminijske pjene, [23]

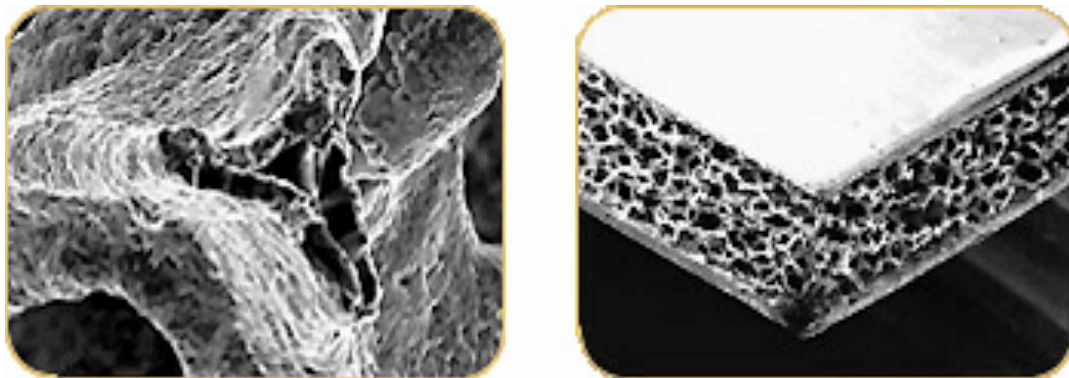
- (a), (b) – površinski slojevi napravljeni od staklenih vlakana
- (c), (d) – površinski slojevi napravljeni od aramida (kevlara)
- (e), (f) - površinski slojevi napravljeni od ugljičnih vlakana

Udar je postignut pomoću pomičnog alatnog stroja sa šipkom brzine oko 10 m/s (slika 4.11.).



Slika 4.11. Alatni stroj s udarnom šipkom, [23]

Osim aluminijskih pjena danas se u komercijalne svrhe proizvode i niklene pjene (slika 4.12.). One se uglavnom primjenjuju za izradu dijelova NiCd i NiMH baterija koje se koristi u električnim alatima, video kamerama, mobitelima itd.. Sendvič - konstrukcije s jezgrom od niklene pjene mogu se koristiti za izradu izmjenjivača topline.



Slika 4.12. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od niklove pjene, [24]

U narednim godinama očekuje se znatan porast proizvodnje metalnih pjena, kao i sniženje cijena što će dovesti do znatno šire primjene.

5. TOPLINSKI NAŠTRCANI SLOJEVI

Sušтина pojma Inženjerstvo površina ("surface engineering") je u tome, da se osnovni materijal (supstrat), prethodno odgovarajuće pripremljen, (i možda već očvrstnut na površini odgovarajućim postupkom), naknadno tretira jednim od postupaka oplemenjivanja površine, tako da nastaje kombinacija svojstava površinskog sloja i osnovnog materijala kakva se ne može postići upotrebom bilo kojeg jednorodnog materijala. Tako nastaju površinski modificirani kompozitni materijali.

Da bi neki proizvod zadovoljio zahtjeve i potrebe industrije, te da bi što duže kao takav trajao, potrebno je razviti način izbora za pronalaženje konkretnog sustava obrade površine. Taj sustav sastoji se od tri različita parametra:

- osnovni materijal,
- prevlaka,
- postupak prevlačenja.

Ova tri parametra zajedno daju svojstva konačnog izratka.

Osnovni materijal su metalne pjene s ćelijastom strukturom i visokom poroznošću (40 do 90 % volumena). Imaju nisku specifičnu masu, visoku krutost, dobro prigušenje vibracija i zvuka, negorivost, toplinska izolacijska svojstva i dr..

Naročito su prikladne za izradu sendvič konstrukcija vozila, letjelica i građevinskih elemenata. Razvoj je započeo s aluminijem i njegovim legurama (silumin), a širi se na cink, olovo, broncu, čelik, nikal, titan, zlato i srebro.

Prevlake će biti oksidne keramike Al_2O_3 i ZrO_2 , te Mo kao čisti metal (više u točki «5.9. Čisti metali») nanešene naštrcavanjem plamenom ("flame spraying"). Na temelju sastava razlikujemo dvije osnovne tehničke keramike: oksidna i neoksidna. Oksidne keramike imaju veliku primjenu u strojarstvu, a tipični primjeri su:

- rezne pločice (Al_2O_3),
- vodilice i kotačići u tekstilnoj industriji (Al_2O_3),
- tanki slojevi na metalnim podlogama (ZrO_2),
- dijelovi pumpi za agresivne medije u kemijskoj industriji (Al_2O_3),
- alati za izvlačenje i vođenje žice i cijevi (ZrO_2) itd.

Postupak prevlačenja pripada grupi toplinsko - mehaničkih. Prevlake se nanose naštrcavanjem i to:

- naštrcavanje plamenom,
- naštrcavanje plazmom,
- detonacijsko naštrcavanje,
- elektrolučno naštrcavanje.

U ovom magistarskom radu sve prevlake bit će nanešene naštrcavanjem plamenom (vidi poglavlje «5.5.2. Plameno naštrcavanje»). Prevlake određuju otpornost na trošenje prevučenog materijala sve dok prekrivaju čitavu površinu osnovnog materijala. U trenutku kada je prevlaka djelomično probijena ili kada dođe do pucanja prevlake, odnosno odvajanja prevlake od osnovnog materijala, važna postaje otpornost na trošenje osnovnog materijala.

5.1. Definicija

Toplinsko naštrcavanje obuhvaća postupke kod kojih se dodaci za naštrcavanje (uglavnom žice ili prahovi) rastaljuju u ili izvan uređaja za naštrcavanje i nanose na površine obradka. Pri tome ne dolazi do rastaljivanja površine obradka.

Postupci toplinskog naštrcavanja mogu se podijeliti prema vrsti dodatka za naštrcavanja, prema vrsti provođenja postupka ili obično prema vrsti prenošenja energije (DIN 32530). Najveći značaj danas imaju plameno naštrcavanje (plameno naštrcavanje žicom ili prahom), visokobrzinsko plameno naštrcavanje, elektrolučno i plazmatsko naštrcavanje (atmosfersko plazmatsko naštrcavanje, plazmatsko naštrcavanje visoke snage, vakuumsko plazmatsko naštrcavanje).

Toplinski naštrcani slojevi razlikuju se od slojeva koji se nanose drugim postupcima, i to po strukturi, mehanizmu vezanja, kao i po mogućnostima naknadne obrade. Stupanj poroznosti slojeva ovisi o prerađenim materijalima i provedenim postupcima naštrcavanja. Proizvedene se debljine slojeva nalaze u području od 10 μm do nekoliko milimetara. Prianjanje toplinski naštrcanih spojeva većinom je mehaničko, pri čemu čvrstoća prianjanja ovisi o procesu i može iznositi više od 100 MPa. Toplinsko opterećenje obradka tijekom nanošenja slojeva ovisi o

različitim postupcima i njihovim parametrima. Ugrijavanje osnovnog materijala se može ograničiti na 100 °C primjenom naprava za hlađenje. Ponekad se obratci predgrijevaju radi povišenja čvrstoće prijanjanja. Naknadna obrada toplinski naštrcanih slojeva uz stezanje često je potrebna radi održanja mjera ili definirane kvalitete površine.

5.2. Namjena toplinski naštrcanih slojeva

Toplinski naštrcani slojevi primjenjuju se u gotovo svim industrijskim područjima, npr. u zrakoplovnoj industriji, termoelektranama i hidroelektranama, postrojenjima za spaljivanje otpada, automobilske industriji te biotehnologiji.

Toplinski naštrcani slojevi ispunjavaju, ovisno o vrsti sloja, strukturi sloja i postupku nanošenja sloja, sljedeće funkcije:

- povišenje otpornosti na trošenje (posebno prikladan protiv mehanizama abrazije i adhezije, odnosno protiv sljedećih vrsta trošenja: klizanjem, brazdanjem, mlazom i erozijom zbog djelovanja plina i tekućina);
- zaštita od korozije (katodna zaštita protiv korozije Zn, Al i pasivna zaštita od korozije u određenim tekućinama i plinovima, npr. upotrebom Inkonel, Hastelloy i čelika otpornih na koroziju i djelovanje kiselina);
- visokotemperaturna oksidacija i zaštita od korozije;
- biokompatibilnost (npr. za zglobove i proteze);
- električna vodljivost ili izolacija;
- toplinska izolacija;
- povoljno ponašanje pri uhodavanju (npr. kao abrazivni slojevi kod kompresora i turbina);
- odnošenje materijala (repariranje potrošenih strojnih dijelova).

Neke odabrane primjene prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Odabrani primjeri upotrebe za toplinsko naštrcavanje, [25]

Industrijsko područje	Dio
Automobilska industrija	Prsten klipa Sinkroni prsten Vilice viličara

nastavlja se

	Kućište alternatora Lambda-sonda Ventili
Zrakoplovna industrija	Lopatica Disk ventilatora Komora izgaranja Toplinski štit Kućište
Opskrba energijom (termoelektrane, hidroelektrane, spaljivanje otpada)	Cijevi za izmjenu topline Kotao Kola ventilatora Lopaticice u plinskim turbinama Igla mlaznica Kaplan-turbina
Industrija papira i tiskovna industrija	Anilox-valjci Transportni valjci i valjci preše
Industrija stakla	Kalupi za staklo Stakleni pokazivači
Industrija kućanskih aparata	Tava za pečenje Glačala-radna površina
Strojogradnja	Pneumatski dijelovi Kućište pumpe Hidraulički dio (npr. osovina klipa)
Tekstilna industrija	Vodilo konca
Kemijska i farmaceutska industrija	Kuglasti ventil Klizač Cijev Spremnik
Medicinska tehnika	Implantati/proteze

Prednost naštrcanih slojeva jest njihova velika mogućnost varijacija u pogledu osnovnog materijala i materijala slojeva.

Karakteristike određenih vrsta slojeva mogu se poboljšati nekim naknadnim obradama, kao što su rastaljivanje, žarenje ili popunjavanje pora.

Naštrcani slojevi su heterogeni i anizotropni i samo se uvjetno mogu primijeniti kod koncentriranog opterećenja u točki ili liniji.

Od malih dijelova (isključeni rasuti dijelovi) do valjaka čija masa iznosi više tona, prevlake se mogu nanositi na dijelove svih veličina, ukoliko se dijelovi mogu pričvrstiti u odgovarajući prihvat (napravu, okretni stol, itd).

Kod nanošenja prevlaka na unutarnje površine treba utvrditi najmanji unutarnji promjer (ovisi o postupku; npr. kod plazmatskog naštrcavanja unutarnji promjeri na koje se mogu nanositi slojevi moraju biti veći od 40 mm) kao i odnose između duljina i promjera.

Geometrija obratka mora biti pristupačna za nanošenje slojeva. Treba se pridržavati pravila za konstruiranje dijelova za koje se nanose prevlake.

5.3. Osnovni materijali

5.3.1. Prikladni osnovni materijali

Svi su tehnički važni osnovni materijali prikladni, ukoliko su provedene odgovarajuće prethodne obrade. Pretežno se prevlače čelici, željezni ljevovi, titan i titanove legure, aluminijski materijali, nikal i niklove legure, materijali na osnovi bakra i kobalta, ali i keramika, a uvjetno i plastika, staklo i drvo.

Ograničenja se odnose na toplinsko opterećenje osnovnog materijala i na vezu između sloja i osnovnog materijala.

5.3.2. Poželjno toplinski obrađeno stanje prije obrade

Ne zahtijeva se određeno toplinski obrađeno stanje. Ipak, treba voditi računa o tome da je loše prethodno poboljšavati čelik ako se nakon toga još rastaljuje naštrcani sloj od samotekuće. Izbor osnovnog materijala, njegovu toplinsku obradu i sloj koji se naštrcavanjem nanosi treba međusobno uskladiti. Nanošenje prevlaka na toplinsko-kemijski obrađeni osnovni materijal (nitriran, cementiran, boriran, itd.) samo je uvjetno moguće i treba ga izbjegavati.

Temeljita i ispravna priprema površine i najkraće moguće naštrcavanje preduvjet su za dobro prijanjanje. Površina mora biti tehnički čista. Ukloniti nečistoće od ulja, masti i sličnih tvari. Odmašćivanje se ne može obaviti sredstvima koja nečistoće uklanjaju ugrijavanjem, ultrazvukom ili mlazom pare.

5.4. Materijali prevlaka

Kao dodaci za naštrcavanje prikladni su, neovisno o postupku, ponajprije prah i žica. Kao dodatak za toplinsko naštrcavanje mogu se koristiti svi materijali koji imaju tekuću rastaljenu fazu u normalnim uvjetima tlaka.

Materijali bez tekuće rastaljene faze, kao npr. SiC, mogu se obrađivati u prikladnoj kombinaciji s drugim materijalima s rastaljenom tekućom fazom koji stvaraju matricu.

Ovisno o kemijskom sastavu, prahovi za naštrcavanje mogu se podijeliti u sljedeće skupine (DIN 352999):

- čisti metali (npr. Cr, W, Ni, Cu, Al, Mo);
- legure (npr. NiCr, NiAl, čelici, CuAl, CoCrW, MCrAlY);
- metalni karbidi (npr. WC, TiC, Cr₂C₃-NiCr, WC-Co, WC-CoCr);
- samotekuće legure (npr. NiCrBSi);
- oksidi (npr. Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃-TiO₂, ZrO₂-Y₂O₃);
- organski materijali.

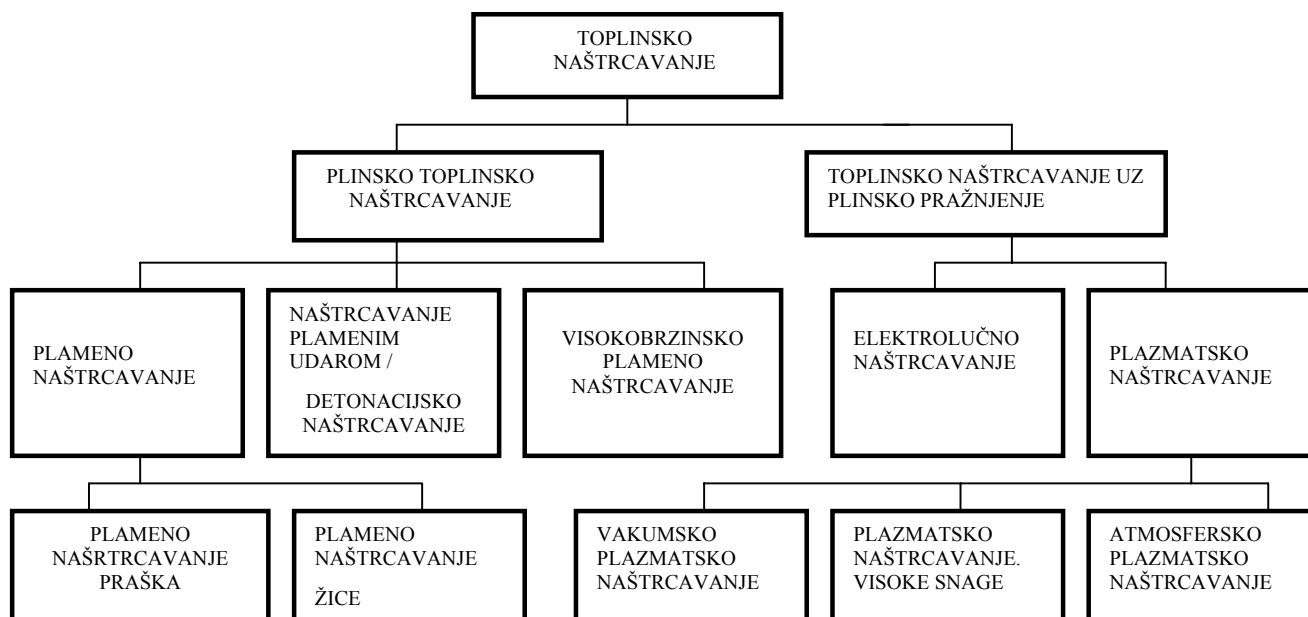
Moguće je korištenje i mješavina, te spojeva prahova od različitih, gore navedanih komponenti.

Podjela žica je u skladu s DIN 8566. Tipični žičani dodaci za naštrcavanje su masivne žice (od nelegiranih, niskolegiranih ili visokolegiranih čelika, od neželjenih materijala kao što su aluminij, aluminijske legure, bakar i bakrene legure, cinkove legure, nikal i niklove legure, cink i molibden) kao i punjene žice.

Odabir dodatnih materijala za naštrcavanje i svojstva materijala sloja treba promatrati u uskoj vezi s primijenjenim postupkom naštrcavanja, kao i vođenjem procesa naštrcavanja. Vrsta osnovnog materijala i geometrija obratka imaju značajan utjecaj na odabir i uspješnu primjenu materijala u skladu sa zahtjevima.

5.5. Principi postupka

Podjela postupaka slijedi iz DIN 32539, prema vrsti dodataka za naštrcavanje, vrsti izrade ili vrsti nositelja energije. Podjela prema nositelju energije prikazana je na slici 5.1..



Slika 5.1. Podjela najvažnijih postupaka naštrcavanja prema vrsti nositelja energije, [25]

Najveće značenje danas imaju elektrolučno, plameno, plazmatsko naštrcavanje te visokobrzinsko plameno naštrcavanje.

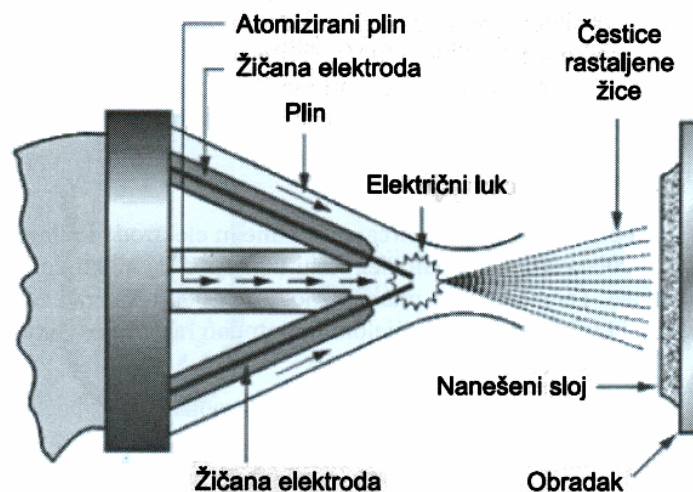
Odabir odgovarajućeg postupka ovisi o zahtijevanim karakteristikama slojeva (gustoća, prijanjanje, debljina sloja, tvrdoća, itd.), dijelovima koji će se prevlačiti (geometrija, troškovi, površina koja se prevlači, osnovni materijal) i rubnim uvjetima, kao i mjestu prevlačenja (u radionici ili na licu mjesta), troškovima itd.

Najveće značenje danas imaju, kod manjih i srednjih zahtjeva na sloj, elektrolučno i plameno naštrcavanje, a za najveće zahtjeve visokobrzinsko plameno naštrcavanje i plazmatsko naštrcavanje. Pojedini se postupci razlikuju prema primijenjenoj vrsti energije, prema toplinskoj i kinetičkoj energiji i postizivim kvalitetama sloja. Svaki postupak ima svoje područje upotrebe te se postupci tako međusobno nadopunjuju.

5.5.1. Elektrolučno naštrcavanje

Kod elektrolučnog naštrcavanja, električni je luk izvor topline. Kod elektrolučnog se naštrcavanja između dviju žica za naštrcavanje koje su spojene s izvorom istosmjerne struje uspostavlja električni luk. Ovaj električni luk rastaljuje krajeve žica i rastaljeni tekući materijal se atomiziranim plinom ubrzava u smjeru površine dijela (slika 5.2.). Kontinuiranim dovođenjem obiju žica uspostavlja se i održava stabilan proces naštrcavanja.

Elektrolučno naštrcani slojevi imaju razmjerno slojevitou strukturu, a u pravilu se odlikuju manje ili više izraženom poroznošću. Za elektrolučno naštrcavanje rabe se samo električki vodljivi dodatni materijali. Za naštrcavanje električki nevodljivih materijala mogu se rabiti punjene žice. Plašt punjene žice pritom je od električki vodljivog materijala, a punjenje je od nevodljivog materijala, primjerice od oksidne keramike.



Slika 5.2. Shema postupka elektrolučnog naštrcavanja pomoću žice, [25]

Značajna prednost elektrolučnog naštrcavanja je visoka ekonomičnost procesa. Za elektrolučno naštrcavanje nisu potrebni gorivi procesni plinovi. Rukovanje procesom je jednostavno.

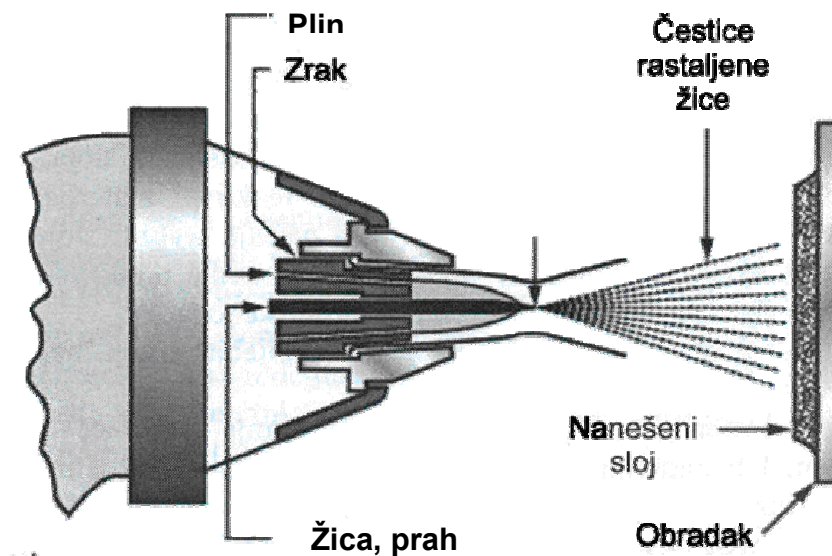
Glavna namjena elektrolučnog naštrcavanja je katodna zaštita od korozije, tj. naštrcavanje cinka i aluminija na čelik, npr. kod mostova, rukohvata, stolica, itd.

5.5.2. Plameno naštrcavanje

Kod plameno naštrcavanja razlikuju plameno naštrcavanje pomoću žice (slika 5.3.) i plameno naštrcavanje praha. Kod plameno naštrcavanja praha, osim toga, razlikuje se naštrcavanje sa i bez toplinske obrade. Kod plameno naštrcavanja dodatni materijal se rastaljuje plamenom s gorivim plinom i kisikom, a na površinu koja se prevlači naštrcava se putem ekspanzije procesnog plina ili uz pomoć dodatnih plinova. Kao gorivi plinovi koriste se acetilen, propan i vodik.

Struktura sloja koja se dobiva naštrcavanjem je u pravilu manje ili više slojevita, a odlikuje se i razmjerno velikom poroznošću. Stoga je primjena ovog postupka ograničena. Njegove su prednosti posebice jednostavno rukovanje i niski troškovi procesa.

Najveći značaj ima naštrcavanje molibdenske žice u proizvodnji automobila, npr. za klipove ili sinkrone prstenove, naštrcavanje aluminija u zaštiti od korozije, naštrcavanje žice s 13%



Slika 5.3. Shema postupka plameno naštrcavanja pomoću žice ili praha, [25]

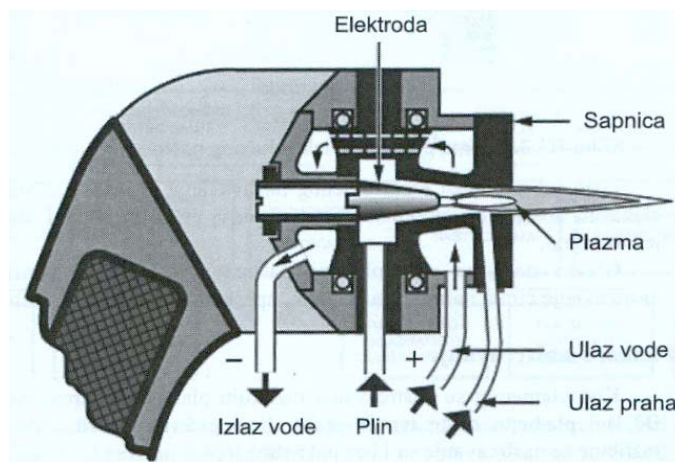
kroma u elektranama i kod reparatura te naštrcavanje takozvanih samotekućih legura. Pod samotekućim legurama podrazumijevaju se materijali NiCrBSi ili CoCrBSi, koji se rastaljuju pri

1020-1040 °C. Ovi materijali daju vrlo tvrde slojeve koji su otporni na trošenje i koroziju, a koji su, primjerice, vrlo rašireni u industriji stakla i u industriji za preradu plastike. Moguće je i plameno maštrecavanje plastičnih materijala.

5.5.3. Plazmatsko naštrcavanje

Kod plazmatskog naštrcavanja između elektrode i mlaznice, koja je istovremeno i anoda, prolaskom struje pali se električni luk. Kroz taj električni luk struji plazmatski plin i ionizira se. Temperature u plazmi iznose do 19726,85 °C. Prah za naštrcavanje se ubrizgava u plazmu i tamo se velikim dijelom ili potpuno rastaljuje (slika 5.4.).

Plazmatsko naštrcavanje se odvija ili u normalnoj, ili u zaštitnoj atmosferi ili u zatvorenoj komori u određenoj atmosferi kod smanjenog okolnog tlaka (vakuumsko plazmatsko naštrcavanje). Specifična obilježja postupka vakuumsko – plazmatskog naštrcavanja su mogućnost čišćenja površina prijenosnim električnim lukom kao i ugrijavanje obratka uz izbjegavanje stvaranja oksidnog sloja. Vakuumskim plazmatskim naštrcavanjem prerađuju se prvenstveno reaktivni materijali, kao titan za prevlačenje implantata i materijali koji moraju stvoriti slojeve u kojima ima izuzetno malo kisika.



Slika 5.4. Shema plazmatskog naštrcavanja, [25]

Kao plazmatski plinovi mogu se upotrijebiti argon, helij, vodik, dušik ili njihove mješavine. Atmosfersko je plazmatsko naštrcavanje posebice prikladno za naštrcavanje keramičkih materijala. Tipični primjeri primjene su naštrcavanje cirkonijevog oksida koji služi

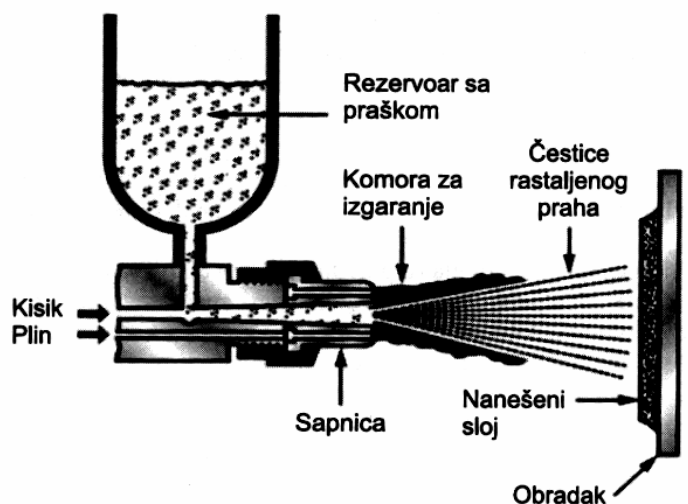
kao toplinski barijerni sloj, krom oksida za Anilox – valjke ili naštrecavanje aluminijevog oksida kao električnog izolatora u elektronskoj industriji.

5.5.4. Visokobrzinsko plameno naštrecavanje

Visokobrzinsko plameno naštrecavanje, također poznato i pod nazivom HVOF (HVOF-High Velocity Oxy-Fuel Flame) po podjeli prema vrsti nosača energije prema DIN 32530 (1989). spada u zasebnu grupu postupaka. Ipak, HVOF se često ubraja u plamena naštrecavanja, jer se i kod njega koristi princip izgaranja smjese gorivo-kisik kao izvora toplinske energije, pri čemu se čestice praha ugrijavaju i ubrzavaju u smjeru površine koja se prevlači (slika 5.5.). Značajna razlika u odnosu na plameno naštrecavanje su višestruko veće brzine plamena i čestica (u usporedbi s plamenim naštrecavanjem, brzina čestica je 4 do 8 puta veća).

Proces izgaranja između goriva i kisika odvija se pod povišenim tlakom. Kao gorivo se mogu koristiti propan (C_3H_8), propilen (C_3H_6), vodik, acetilen, zemni plin i kerozin. Izlazni vrući mlaz plina je nadzvučne brzine. Nadzvučno strujanje se prepoznaje po pokazivanjem Machovih čvorova (engl. Schock Diamonds).

Brzina plamena suvremenih HVOF uređaja doseže do 2100 m/s, pri čemu brzine čestica, ovisno o materijalu i sustavu, mogu iznositi do 800 m/s. Temperatura plamena, ovisno o primijenjenom gorivu, iznosi do 3200 °C.



Slika 5.5. Shema postupka visokobrzinskog plamenog naštrecavanja praha, [25]

HVOF-slojevi se u usporedbi s drugima odlikuju visokom čvrstoćom prijanjanja (>100 MPa), niskom poroznošću (do 0,5% i manje), malim sadržajem oksida (kod posebnog vođenja procesa može se postići 0,1%), niskim izgaranjem legiranih elemenata i razmjerno dobrim očuvanjem faza (izbjegavanje transformacija; isparavanja), posebice karbida.

HVOF-postupak je posebno prikladan za obradu materijala koji naginju raspadu pri visokim temperaturama ili transformaciji, kao WC - Co. Paleta praškastih materijala, koji se priređuju HVOF naštrcavanjem, obuhvaća karbidne materijale s metalnom vezom na osnovi volframa (WC), odnosno krom-karbida, legure na osnovi Ni i Co, kao što su steliti, Tribaloy, Hastelloy i superlegure kao Inconel, ali i MCrAlY, kao i legure na osnovi željeza kao što su austenitni čelici i čisti metali kao Cu i Ni ili Al. Veličina zrna praha obično je u području od 5 do 50 μm .

5.6. Svojstva obradka

Prianjanje na osnovni materijal je ograničeno uglavnom mehaničko-fizikalnim vezama. Kod nekih malobrojnih vrsta slojeva ulogu igraju i mikrozavari. Rastaljivanjem samotekućih legura i žarenjem MCrAlY dobivaju se difuzijski spojevi. Na prianjanje utječu materijal za naštrcavanje, postupak naštrcavanja, debljina naštrcavanja, osnovni materijal i njegova priprema. Najveća čvrstoća prianjanja dobiva se u pravilu visokobrzinskim plamenim naštrcavanjem.

Naštrcavani su slojevi idealni za površinska opterećenja i zahtjeve kao što su trošenje i atmosferska korozija, visokotemperaturna korozija, visokotemperaturna oksidacija, itd., kod kojih se ne pojavljuje jače savijanje ili torzija. Treba izbjegavati koncentrirano pritisno opterećenje u točki ili po liniji.

Toplinsko naštrcavanje ne utječe na dinamičku izdržljivost dijelova ili je snižava. Utjecaj na savojnu čvrstoću je često negativan, a posebice kod nanošenja tvrdih karbidnih ili keramičkih slojeva za zaštitu od trošenja.

Debljina slojeva ovisi o osnovnom materijalu, geometriji, dodatku za naštrcavanje i postupku naštrcavanja. Ovisno o ovim faktorima, moguće debljine slojeva su od 10 μm do nekoliko milimetara. Povećanjem debljine sloja smanjuje se prianjanje sloja na osnovni materijal. Zbog niskih temperatura dijela (u pravilu od 60 °C do 200 °C), kod usklađivanja debljine sloja s veličinom dijela i debljinom dijela u pravilu nema značajnije toplinske deformacije. Kod vrlo

tankih dijelova i vrlo velikih debljina slojeva treba računati s deformacijama, a treba poduzeti i odgovarajuće mjere kod prihvata i učvršćenja dijelova.

Hrapavost naštrcanih slojeva ovisi o tipu sloja i primijenjenom postupku. Hrapavost R_a se, ovisno o procesu, može podesiti u području od 2 do 25 μm , a R_z od 10-60 μm . Finije se hrapavosti dobivaju tokarenjem, brušenjem ili poliranjem.

Djelomično je prevlačenje moguće uz zaštićivanje trakama, maskiranim pastama ili drugim oblicima maski. Međutim, zaštićivanje povećava troškove obrade.

5.7. Kontrola sloja

Kvaliteta naštrcanog sloja ovisi o mnoštvu faktora i radnih faza, kao što su čišćenje, sačmaranje, naštrcavanje i naknadna obrada odvajanjem čestica, a njihova je kontrola regulirana DVS Merkblatt 2304 – Osiguranje kvalitete utvrđivanjem i praćenjem svih faktora koji utječu na proces naštrcavanja.

Prva i brza procjena kvalitete naštrcavanja obavlja se makroskopski, vizualnom kontrolom neprevučениh površina, napuhnuća, napuklina, odstupanja u boji, hrapavosti i sjaju. Daljnje moguće makroskopske metode istraživanja su utvrđivanje profila hrapavosti, odnosno iznosa hrapavosti, i kontrola napuklina penetrantima, ali to je uglavnom ograničeno na toplinski naknadno obrađene slojeve. Često se provodi utvrđivanje debljine sloja, npr. mikrometarskim vijkom, a u serijskoj proizvodnji debljina slojeva se utvrđuje vaganjem dijela prije i nakon obrade.

Kontrola samog naštrcanog sloja provodi se razornim metalografskim metodama: mjerenjem tvrdoće, određivanjem debljine sloja, utvrđivanjem poroznosti, sadržaja oksida, ocjenjivanjem (kvalitativnim) vezanja na osnovni materijal, ocjenjivanjem mikrostrukture sloja, stupnja rastaljivanja naštrcanih čestica, itd. Kod određivanja mikrotvrdoće treba voditi računa o tome da se zbog debljine sloja često moraju primijeniti Super-Rockwell metode kao npr. HRN itd. Za mjerenje tvrdoće kod malog opterećenja ili za mjerenje mikrotvrdoće primjenjuju se HV0,1, HV0,3 ili HV0,5. Za analizu strukture, zrna, faza i elemenata na raspolaganju su metode raster-elektronske mikroskopije ili rendgenografske metode.

Ocjenjivanje naštrcanih slojeva nerazornim kontrolnim postupcima tek je rijetko moguće, a do sada se pretežito primjenjivalo u serijskoj proizvodnji. Metode koje se primjenjuju

pojedinačno su, primjerice, ultrazvučna kontrola i termografija. Ultrazvučna se kontrola u nekim slučajevima uspješno primjenjuje za utvrđivanje odvajanja sloja i može se uvjetno primijeniti za utvrđivanje debljine. Glavni problem kod upotrebe ultrazvuka jest rasipanje zvuka kroz heterogenitete i mikroporoznost naštrcanih slojeva. Termografija se uvjetno može koristiti za ocjenjivanje vezanja naštrcanog sloja na osnovni materijal (loše vezivanje izaziva toplinsku barijeru). Druge nerazorne metode su magnetski indukcijski postupci i postupci s vrtložnim strujama za određivanje debljine sloja na nemagnetičnim/magnetičnim, odnosno vodljivim/nevodljivim supstratima-slojevima-parovima materijala.

Kvantitativno prijanjanje/adhezija sloja uz osnovni materijal u pravilu se određuje kao vlačna čvrstoća prijanjanja, vlačnim pokusom prema DIN 50160/DIN EN 582. Druga metoda, koja se danas gotovo ne primjenjuje, jest određivanje smične čvrstoće prijanjanja. Kod tankih dijelova/limova provode se, ovisno i upotrebi, ispitivanja savijanjem, npr. prema DIN 50121- dio 3, odnosno DIN 50101-dio 1 i 2 ili ispitivanje vučenjem.

U području naštrcanih slojeva mogu se provoditi i druga ispitivanja, kao različita ispitivanja otpornosti na trošenje (npr. ispitivanje na pukotine, ispitivanje abrazije metodom "pin on disk", itd) i ispitivanja otpornosti na koroziju (npr. naštrcavanjem soli, određivanjem krivulje gustoće struje i potencijala).

5.8. Metalni oksidi

Budući da se u ovom radu na metalnu pjenu naštrcavaju slojevi oksidnih keramika (Al_2O_3 i ZrO_2), u ovom poglavlju ćemo reći nešto više o njima.

U odnosu na druge materijale, oksidno- keramički slojevi zbog specifičnih svojstava nude niz potencijalnih prednosti za industrijsku uporabu. Tako keramički materijali u usporedbi s metalima često imaju bolju otpornost na koroziju, oksidaciju i trošenje. Većina tih materijala podnosi više temperature procesa te su većinom dobri toplinski i električni izolatori.

Značajno područje primjene oksidno-keramičkih materijala jest zaštita zahtjevnih pozicija od trošenja. Otpornost na trošenje oksidno-keramičkih materijala posebice se temelji na visokoj energiji vezanja i kemijskoj postojanosti. Profil karakteristika ovih materijala omogućio je posebno veliku primjenu u tisarskoj industriji, industriji papira i industriji strojeva za tekstilnu

industriju, a također za produljenje životnog vijeka transportnih valjaka, valjaka za prešanje i tisak.

Odlična kemijska otpornost kemijskih oksidnih vrsta keramika na djelovanje niza agresivnih tekućina omogućuje primjenu u zaštiti od trošenja u kemijskoj industriji i industriji prehrambenih artikala, npr. u industriji pumpi i armatura.

Proces prevlačenja se, kao i svi postupci toplinskog naštrcavanja, odvija rastaljivanjem praškastih oksidno-keramičkih dodatnih materijala za naštrcavanje (koji se proizvode sinteriranjem ili drobljenjem) izvorom topline i nanošenjem rastaljenih tekućih čestica na površinu obratka.

Proizvodnja slojeva iz metalnih oksida toplinskim naštrcavanjem u pravilu se odvija plamenim naštrcavanjem praha (kao što je to slučaj u ovom radu) ili plazmatskim naštrcavanjem. Metalni se oksidi općenito odlikuju vrlo visokim talištima, zbog čega se postupci naštrcavanja moraju odvijati uz uporabu izvora topline visoke temperature.

Čvrstoća prijanjanja oksidno-keramičkih slojeva je općeniti niža od čvrstoće prijanjanja metalnih slojeva ili slojeva metalnih karbida. Posebice treba voditi računa o velikoj razlici svojstava između materijala oksidno-keramičkih slojeva i većine metalnih osnovnih materijala.

Najčešće primjenjivani oksidno-keramički materijali slojeva i glavna područja njihove primjene prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Glavna područja primjene oksidno-keramičkih slojeva, [25]

Al_2O_3	zaštita od trošenja, električna izolacija
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$	zaštita od trošenja
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$	zaštita od trošenja, električna izolacija
Cr_2O_3	zaštita od trošenja, zaštita od korozije
$\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$	zaštita od trošenja, niski faktor trenja
TiO_2	umjerena zaštita od trošenja, niska električna vodljivost
$\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$	zaštita od trošenja, zaštita od korozije, toplinska postojanost
$\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$	toplinska izolacija, otpornost na visoke temperature, otpornost na eroziju
$\text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$	otpornost na koroziju zbog visoke temperature i na koroziju zbog vrućih plinova, otpornost na promjene temperature, toplinska izolacija
$\text{ZrO}_2 - \text{MgO}$	toplinska izolacija, otpornost na abraziju

5.9. Čisti metali

U područje čistih metala za toplinsko naštrcavanje značajni su sljedeći metali: aluminij, bakar, titan i molibden.

Molibden posjeduje odlična svojstva u slučajevima abrazije, trošenje klizanjem i prisilnog klizanja kod nestanka podmazivanja. To se temelji na činjenici da kod naštrcavanja molibdena dio molibdena oksidira. Molibden je žilav i tvrd, te dobro prianja uz tvrde površine osnovnog materijala.

Molibden se, ovisno o primjeni, može koristiti do oko 350°C - 550°C. Više temperature treba izbjegavati, jer tada može doći do uništenja sloja.

U eksperimentalnom dijelu ovog magistarskog rada prah molibdena je plameno naštrcan. Prednost ovog postupka je u razmjerno niskim investicijama i troškovima postupka. Molibden se najčešće koristi kod popravaka i reparatura, te kod izrade novih proizvoda. Glavno područje za primjenu molibdena su dijelovi pumpi, prsteni cilindra, sinkroni prsteni, ventili, i sl.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U okviru eksperimentalnog dijela magistarskog rada izvršiti će se slijedeće:

- ispitati otpornost na abrazijsko trošenje i eroziju česticama keramičkih prevlaka (oksidne keramike Al_2O_3 , ZrO_2 i prevlaka od Mo), nanešenih naštrecavanjem plamenom na metalne pjene dvije različite poroznosti.
- utvrditi utjecaj pojedinih karakteristika prevlaka na abrazijsko i erozijsko trošenje prevlaka.
- nagovijestiti nove mogućnosti primjene aluminijskih pjena zaštićenih prevlakama.

Prije eksperimentalnog dijela je potrebno provesti metalografska ispitivanja u svrhu karakterizacije osnovnog materijala i prevlake, a nakon eksperimentalnog dijela treba analizirati dobivene rezultate (plan pokusa).

6.1. Postupak proizvodnje uzoraka Al pjena

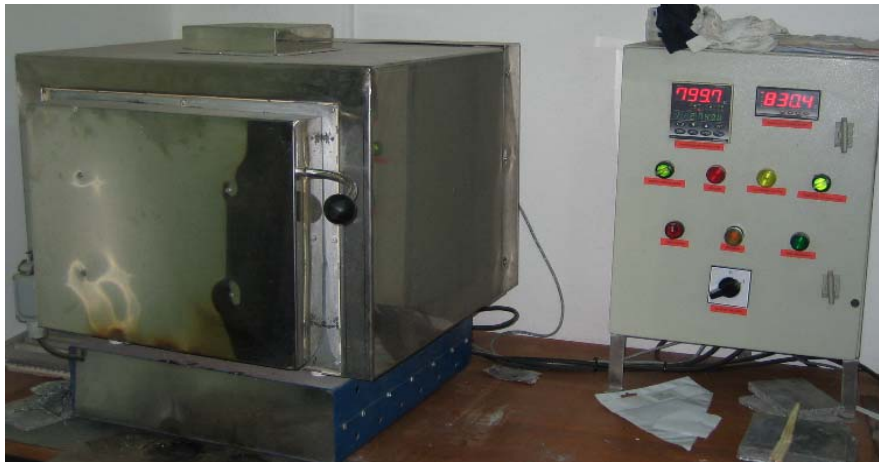
Početne sirovine za proizvodnju metalnih pjena mogu biti u obliku taljevine ili praha. Samo upjenjavanje materijala uvijek se događa iz tekuće faze tako da se i prah povišenjem temperature dovodi u tekuću fazu. Metalne pjene mogu se proizvesti iz gotovo svih vrsta metala koji postoje u obliku praha. Danas su najčešće dostupne metalne pjene na bazi aluminijske i nikla. Kombinacijom više metala može se dobiti širok raspon svojstava. Jedan od češćih načina proizvodnje metalnih pjena je taj da se pjena oblikuje u rastaljenoj fazi. Mješavina rastaljenog praha i agensa (TiH_2) zagrijava se pri čemu se oslobađaju mjehurići u taljevini i stvara se pjena. Time se može utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija te na relativnu gustoću (ρ/ρ_s).

ρ – gustoće metalne pjene

ρ_s – gustoća neporoznog materijala

Njime je proizvedena i legura AlSi10 koju će se koristiti za izradu uzoraka.

Tehnologija korištena za izradu uzoraka je "Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi" koja je detaljno opisan u poglavlju 2.3. Korištena je elektrootporna peć snage 2,5 kW, koja se nalazi u "Laboratoriju za nemetale", FSB (slika 6.1.).



Slika 6.1. Peć za proizvodnju pjena

Prekursor (u ovom slučaju AlSi10) reže se na komade i stavlja u kalup (slika 6.2.).



Slika 6.2. Punjenje kalupa prekursorom

Trajanje procesa ovisi o temperaturi i veličini prekursora kreće se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Proizvod poprima oblik kalupa, ima relativnu gustoću od 0,08 naviše i zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm.

6.2. Izrada uzoraka

Proces se odvija u čeličnom kalupu dimenzija 147x147x21 mm (slika 6.3.), volumena 453789 mm³.



Slika 6.3. Kalup (147x147x21 mm)

Potrebno je dobiti aluminijsku pjenu različitih poroznosti. Poroznost ovisi o količini prekursora (manje prekursora veće poroznost, više prekursora manja poroznost).

U ovom slučaju masa prekursora za uzorak U₁ je 440 g što je 35,9% volumena uzorka, a volumen šupljina je 64,1% volumena uzorka (slika 6.4.). Masa prekursora za uzorak U₂ je 660 g, 53,9% volumena uzorka, volumen šupljina je 46,1% (slika 6.4.).

Kalup se zagrije na temperaturu od približno 400°C. Nakon naštrcavanja kalup se hladi, puni prekursorom, zatvara i steže da ne dođe do istjecanja prilikom upjenjavanja. Tako pripremljen kalup stavlja se u prethodno zagrijanu peć (800°C), gdje se zagrije na temperaturu između solidus i likvidus temperature legure. To treba obaviti što je moguće brže da pad temperature u peći bude minimalan. Izradak je gotov kada se na otvoru za izlaz plinova pojavi prva kuglica taljevine, nakon čega slijedi vađenje kalupa iz peći i intenzivno hlađenje vodom, čime se pjena stabilizira.

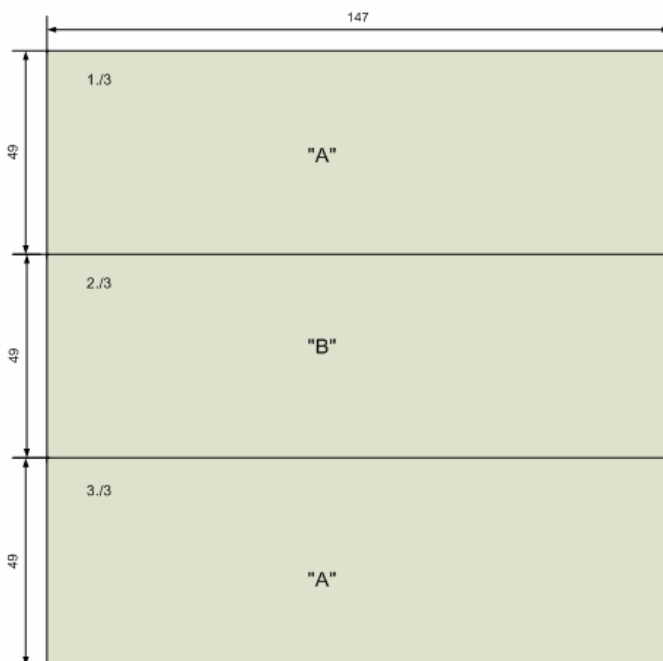


Slika 6.4. Uzorci U_1 i U_2

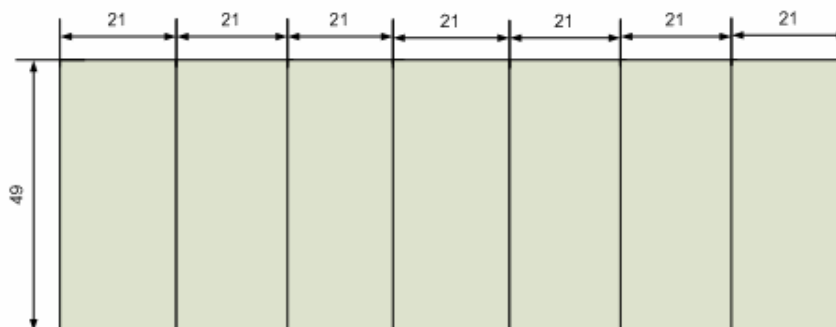
6.3. Rezanje uzoraka

Uzorci U_1 i U_2 su rezani po shemi prikazanim na slikama 6.5., 6.6., i 6.7.. U prvom koraku uzorak je rezan na tri jednaka dijela 147x49 mm (slika 6.5.). Od trećine, "A", rezane su epruvete za ispitivanje abrazijskog trošenja (49x21 mm) prema shemi na slici 6.6.. Iz druge trećine, "B", rezane su epruvete za ispitivanje abrazijskog i erozijskog trošenja (slika 6.7.).

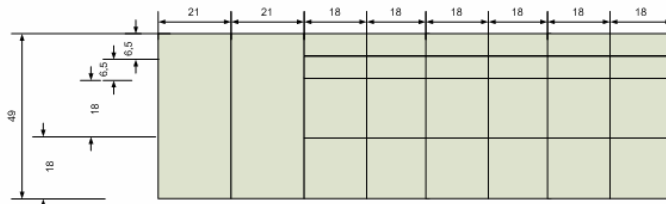
Dimenzije epruvete dane su na slici 6.8..



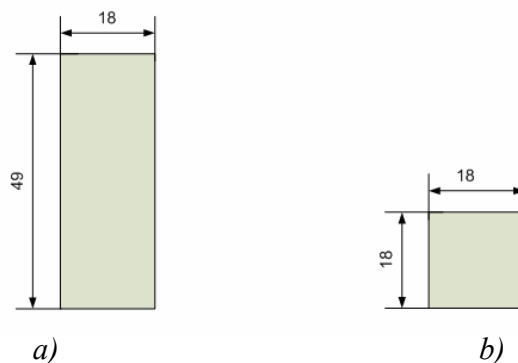
Slika 6.5. Shematski prikaz rezanja uzoraka U_1 , U_2



Slika 6.6. Način rezanja epruveta za abrazivsko trošenje



Slika 6.7. Način rezanja epruveta za abrazijsko i erozijsko trošenje



Slika 6.8. Dimenzije epruveta za ispitivanje otpornosti na: a) abrazijsko (48x18x21mm) i b) erozijsko trošenje (18x18x21mm)

6.4. Toplinsko naštrecavanje uzoraka

Na sve ispitne epruvete postupkom plamenog naštrecavanja nanošena je vezivna prevlaka XUPER ULTRA BOND 5100, podaci preuzeti iz kataloga, [26].

6.4.1. XUPER ULTRA BOND 5100

RotoTec metalni prašak za osnovne prijanjajuće slojeve

Područje zrnatosti 125 – 37,5 μm

Tvrdoća sloja nanosena naštrecavanjem cca 190 HB

Budući da se radi o heterogenim slojevima, oni se u pogledu tvrdoće ne mogu uspoređivati s homogenim materijalima.

Primjenjuje se za zradu osnovnih prijanjajućih slojeva na svim željeznim, materijalima od aluminija i nikla; bakrenim (sadržaj bakra niži od 95%); stakla; keramičkih materijala.

Za gornje slojeve dolaze u obzir ToroTec prašak serije 19000.

Niže navedene tablične smjernice (tablica 6.) za parametre naštrcavanja treba shvatiti kao kratke informacije.

Tablica 6. Smjernice za parametre naštrcavanja, [26]

	Pištolf za naštrcavanje RotoLoy, opremljen sapnicom RL - 100	Pištolf RotoLoy sa sapnicom RL - 100	Pištolf RotoTec 80
C ₂ H ₂ /O ₂ – tekući pritisci (bar)	0,7/4	0,7/4	0,7/4
Razmak za štrcanje	150 mm	150 mm	150 mm
Poz. regulacionog ventila za acetilen A	N	N	N
Poz. regulacionog ventila za acetilen P	N	N	otpada
Poz. ventila plina nosioca T	1	n	otpada

Za naštrcavanje na dulje vrijeme (> 10 min) trebalo bi upotrijebiti sapnicu RL - 110. Primjenjeni postupak je plameno naštrcavanje, opisan u poglavlju 5.5.2. Postupak je proveden plazma pištoljem model "CastoDyn DS 800".

Na vezivnu prevlaku naštrcavaju se METACERAM specijalni prašci za postupak nanošenja na bazi metalnih oksida (keramika) i čistog Mo: METACERAM 28030, METACERAM 28085, METACERAM 28095. Na prvih šest epruveta za abrazijsko, kao i na erozijsko ispitivanje naštrcan je METACERAM 28030, na drugih METACERAM 28085 i na preostalim šest METACERAM 28095. Svi podaci i karakteristike naštrcanih prevlaka također su preuzeti iz već spomenutog kataloga («Castolin Eutectic – dodatni materijali i aparati za specijalna reparaturna zavarivanja», A.M.I. COMMERCE, Zagreb).

6.4.2. METACERAM 28030

Za slojeve otporne na trošenje

Standard K5 – 4 DIN 32529

Mikrotvrdoća djelića praška cca 1600 HV

Srednjesivi oksidnokeramički prašak na bazi Al_2O_3 . Kako bi se izbjegle nestabilne faze, koje bi mogle prouzročiti pukotine u sloju, prašak je stabiliziran dodacima. Maksimalna radna temperatura cca 540°C.

Najčešće se primjenjuju kao zaštitni slojevi protiv trošenja na valjcima u tiskarama, valjcima za transport papira, vodilicama niti, kliznim pločama.

6.4.3. METACERAM 28085

Zaštitni slojevi otporni na trošenje i dobri toplinski izolatori

Standard K10 – 4 DIN 32529

Tvrdoća djelića praška cca 700 HV

Sivobijeli oksidnokeramički prašak na bazi ZrO_2 . Opasnost od pukotina kod slojeva od ovog praška je smanjena stabiliziranjem (bez stabiliziranja bi kod povišenih temperatura došlo do pukotina). Početak taljenja: cca 2340°C. Maksimalna temperatura rada: cca 2000°C. Zbog neznatne toplinske vodljivosti od cca 2 W/mK ovaj prašak je pogodan kao toplinski izolator, a dobro podnosi i temperaturne promjene.

Najčešće se primjenjuju kao zaštitni slojevi za spriječavanje "kvašenja" na loncima za taljenje, termoelementima, strojevima za lijevanje, postrojenjima za lemljenje, toplinski izolatori na dijelovima komora za izgaranje, termoelektranama, aparatima za elektromotorno zavarivanje, pećima. Slojevi otporni na trošenje na konstrukcionim dijelovima peći.

6.4.4. METACERAM 28095

Metalni prašak na bazi molibdena za nanošenje zaštitnih slojeva otpornih na trošenje, nanošenje plamenom

Standard C 5 – 1 DIN 32529

Mikrotvrdoća nanošenog sloja cca 900 HV

Crni prašak, kugličnog oblika, visokotaljiv. Površina sloja u nabačenom stanju je metalno sive boje. Žučkasti i smeđi tonovi u nabačenom sloju ukazuju na pregrijavanje.

Istaknute značajke ovih slojeva su :

- nije potreban temeljni sloj,
- visoka tvrdoća,
- jako nizak faktor trenja s metalnim materijalima,
- dobra klizna svojstva,
- odlična otpornost na trenje klizanja.

Najčešće se primjenjuju kao zaštitni slojevi na dijelovima strojeva koji su izloženi trenju klizanja, npr. klizne brtveće plohe, mjesto ležajeva, vodilice na vretenima, klizne staze, cilindri, klipovi, sinkroni prsteni, itd.

Normalne debljine slojeva su cca 0,3 mm. Kod slojeva debljih od 0,5 mm postoji opasnost drobljenja (ljuštenja), naročito kod mehaničkih opterećenja.

Naneseni slojevi se obično obrađuju brušenjem (silicijumkarbidnim brusnim pločama), povoljnije je "mokro" brušenje.

6.5. Metalografsko ispitivanje

Metalografija – područje znanosti koje se bavi analizom i boljim razumijevanjem mikrostrukture materijala. Također je područje znanosti koje razvija i unapređuje tehnologiju potrebnu za što bolju analizu uzorka. U današnje vrijeme pojam metalografija zamjenjuje se pojmom materijalografija, čemu je uzrok sve učestalija primjena nemetalnih konstrukcijskih materijala. Dakle, pojam metalografija (materijalografija) obuhvaća analiziranje strukture: metala, keramike, polimera i kompozita. Pod osnovni zadatak materijalografije spada određivanje okvirnih svojstava materijala, uz poznavanje kemijskog sastava uzorka iz izgleda mikrostrukture i makrostrukture. Poznavanjem osnovnih svojstava materijala možemo odrediti najpovoljnije tehnologije obrade tog materijala, odnosno odrediti najpovoljniju strukturu materijala za određenu tehnološku obradu.

6.5.1. Priprema uzoraka

Osnovni preduvjet koji se mora obaviti za provođenje materijalografskog ispitivanja jest kvalitetna priprema uzorka točno propisanim postupcima. Postupci izradbe uzorka dijele se u dvije osnovne skupine: uzimanje i priprema uzorka.

Koraci u pripremi uzorka:

- izrezivanje uzorka,
- ulijevanje,
- brušenje,
- poliranje,
- nagrivanje.

Prilikom izrezivanja samog uzorka iz osnovnog materijala, treba dobro obratiti pozornost na odabir mjesta odakle će se izrezati uzorak za analizu. Za izrezivanje se odabiru takve metode koje ne deformiraju i ne uništavaju mikrostrukturu uzorka. Uzorci se standardno uzimaju: lomljenjem, piljenjem i rezanjem uz intenzivno hlađenje i podmazivanje. Prilikom svakog izrezivanja dolazi do deformacije uzorka, tj. dolazi do pojave deformiranog sloja. Njegova debljina ovisi o vrsti izrezivanja, a kreće se od 10 do 900 μm . Poželjno je da ta debljina bude što manja zbog daljnjih obradbenih postupaka.

Izrezani uzorak obično je malih dimenzija i nepravilnog oblika, stoga se zalijeva posebnim sredstvima koja olakšavaju uvid u mikrostrukturu i daljnju obradu, prije svega misli se na brušenje i poliranje. Tako tretiran uzorak bolje je zaštićen, olakšava rukovanje i najvažnije od svega, omogućuje lakšu analizu rubova i uvid u mikrostrukturu. Za zalijevanje uzoraka koriste se duromerni i plastomerni materijali, a postupci kojima se vrši zalijevanje su toplo (do temperature 180°C, tlak 4 bara) i hladno zalijevanje.

Brušenje je postupak odnošenja materijala s površine uzorka, apsorbiranih plinova i oksida, te se skida deformirani sloj. Izvodi se nakon zalijevanja uz pomoć brusnog papira na čijoj je površini učvršćen abraziv. Brušenje spada u agresivne postupke odnošenja materijala. Provođa se u više faza, tj. brusi se više puta sa različitim brusnim papirima. Vršiti se na automatskim strojevima koji služe za brušenje kao i za poliranje. Uzorak se nanosi na rotirajuću ploču, te se uz odgovarajući pritisak pritišće na brusni papir. Nakon svake faze brušenja, prije sljedeće faze uzorak je potrebno zakrenuti pod kutem od 90 ° da bi se uklonili tragovi brušenja u prethodnoj

fazi. Za vrijeme brušenja brusni papiri se mijenjaju, a novi brusni papir ima manju granulaciju od prethodnog.

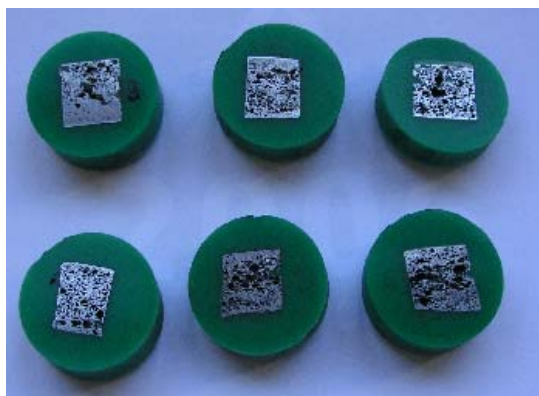
Poliranje spada u završni korak obrade površine ispitivanog uzorka. Pomoću poliranja se uklanjaju ogrebotine i postiže maksimalna zaglađenost površine, te se postiže sjaj ispolirane površine. Abraziv koji polira površinu nije čvrsto vezan za podlogu već se slobodno giba između uzorka i tkanine za poliranje. Prema vrsti materijala određuje se vrsta granulata za poliranje, koji su strogo propisani normama koje izdaje proizvođač.

Vrlo često uzorak koji je tretiran do faze poliranja može se odmah analizirati pod mikroskopom. Tako se mogu zamijetiti pukotine, tragovi brušenja, porozitet, plinski mjehuri, korozija... Kada se želi učiniti vidljivim pojedine faze ili strukturne elemente tada se površina uzorka izlaže raznim kemikalijama-nagrizanje. Postoje razne vrste nagrizaćih kemikalija, te se svaka od njih upotrebljava za odgovarajući materijal specifičnih kristala, sastava, kemijske postojanosti, konstituenata i drugih osobina. Uz koncentraciju kiselina koja ima najvažniju ulogu u nagrivanju, znatnu ulogu također imaju temperatura i vrijeme nagrivanja.

Mikronagrizanje – provodi se u alkoholnim otopinama kiselina, te je kraće od makronagrizanja. Prilikom mikronagrizanja nagriza se samo mikrokonstituenti koji su vidljivi pod mikroskopom. Primjenjuje se prilikom nagrivanja granica zrna metala i nagrivanju plohe, nakon čega se kristali razlikuju po izgledu.

Makronagrizanje – nagrivanje koje omogućuje analiziranje golim okom ili povećalom. Provodi se pomoću vodenih otopina kiselina i traje znatno duže od mikronagrizanja. Koristi se za analize lomova, poroziteta, pukotina i pri analizi zavarenih spojeva.

Zalijevanje uzorka izvršeno je hladnim postupkom. Pri tome je korišteno sredstvo Varidur 20 u omjeru praška i tekućine 1:2. Uzorak se postavlja u kalup pazeći koju stranu treba zaliti a koja treba ostati dostupna za analizu. Nakon vremena potrebnog za skrućivanje kalupa vade se zaliveni uzorci (slika 6.9.). Sljedeći korak je brušenje, koje se vrši u tri faze uz konstantno hlađenje vodom. Faze brušenja provode se prema tablici 7.



Slika 6.9. Makrografska slika zalivenih uzoraka

Tablica 7. Postupak brušenja uzorka

Stupanj	grubo brušenje	srednje brušenje	fino brušenje
Brusna ploča	120	320	600
Abraziv	SiC	SiC	SiC
Podmazivanje	voda	voda	voda
Broj okr./min	300	300	300
Sila pritiska,[N]	ručno	ručno	ručno
Vrijeme, [min]	do poravnanja	do poravnanja	do poravnanja

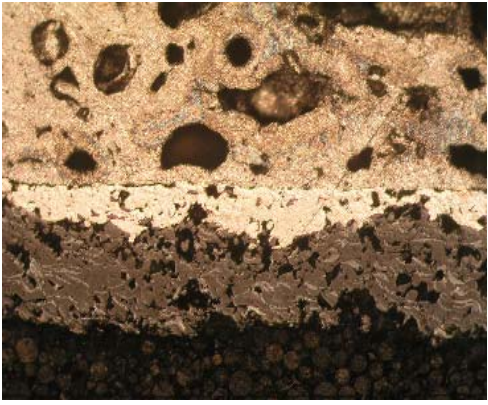

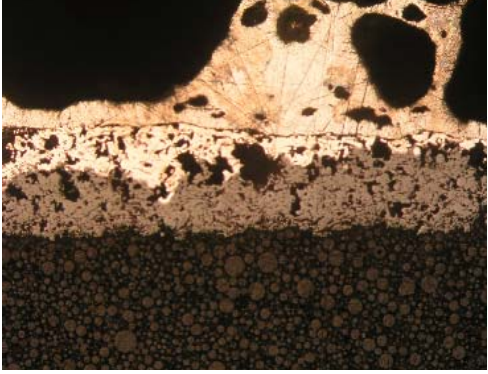
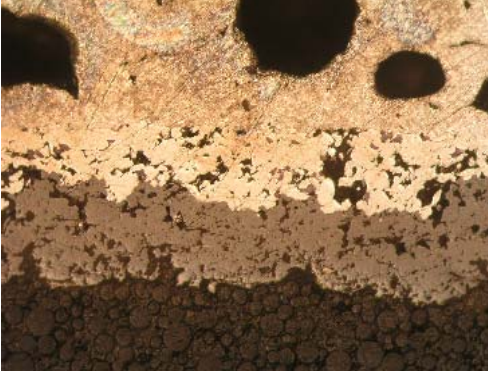
Poliranje uzoraka u osnovi je slično brušenju samo što se poliranje provodi sa još finijim abrazivima i sredstvima tako da se dobije još kvalitetnije obrađena površina. Poliranje je izvedeno u dvije faze, prema tablici 8., na uređaju za poliranje uzoraka.

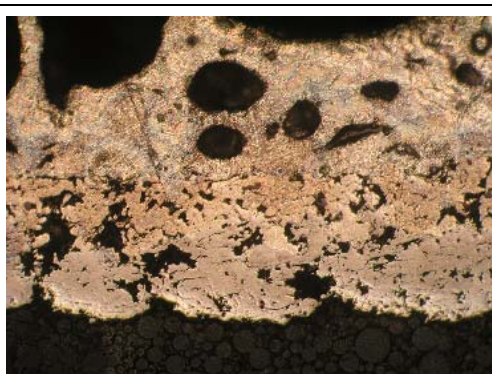
Tablica 8. Postupak poliranja uzorka

Stupanj	grubo poliranje	fino poliranje
Tkanina	mastertext	mastertext
Abraziv	DP - suspension	DP - suspension
Finoća zrna, [μm]	6	1
Broj okr./min	150	150
Sila pritiska,[N]	180	180
Vrijeme, [min]	5	5

Mikrostruktura Al pjene, vezivne prevlake XUPER ULTRA BOND 5100 i slojeva METACERAM 28030, METACERAM 28085 i METACERAM 28095 prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Mikrostruktura prevlaka na uzorcima od Al pjene

poroznost Al pjene 64%	poroznost Al pjene 46%
 <p data-bbox="268 940 790 1097">Mikrostruktura sloja METACERAM 28030 na uzorcima Al pjene, ne nagriženo, povećanje 100:1</p>	 <p data-bbox="810 940 1332 1097">Mikrostruktura sloja METACERAM 28030 na uzorcima Al pjene, ne nagriženo, povećanje 100:1</p>
 <p data-bbox="268 1500 790 1646">Mikrostruktura sloja METACERAM 28085 na uzorcima Al pjene, nenagriženo, povećanje 100:1</p>	 <p data-bbox="810 1500 1332 1646">Mikrostruktura sloja METACERAM 28085 na uzorcima Al pjene, nenagriženo, povećanje 100:1</p>



Mikrostruktura sloja METACERAM 28095 na uzorcima Al pjene, nenagriženo, povećanje 100:1



Mikrostruktura sloja METACERAM 28095 na uzorcima Al pjene, nenagriženo, povećanje 100:1

6.5.2. Karakterizacija osnovnog materijala i prevlaka

Nakon prikazane mikrostrukture uzoraka obavljeno je mjerenje debljine prevlaka i vezivnih slojeva. Rezultati su prikazani u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati mjerenja debljina prevlaka i vezivnih slojeva na uzorcima od Al pjena prije trošenja

	METACE RAM 28 030		METACE RAM 28 085		METACE RAM 28 095	
	debljina prevlake, μm	debljina vezivnog sloja, μm	debljina prevlake, μm	debljina vezivnog sloja, μm	debljina prevlake, μm	debljina vezivnog sloja, μm
poroznost 64,1%	140 do 300	20 do 130	40 do 200	5 do 180	10 do 200	110 do 300
poroznost 46,1%	90 do 280	100 do 270	110 do 260	70 do 200	140 do 220	90 do 180

Na uzorcima zbog vrlo velike poroznosti samih prevlaka nije moguće izmjeriti njihove vrijednosti tvrdoće. Nanešena je jedna prevlaka na sve uzorke. Hrapavosti površine pripremljenih uzoraka određene su prijenosnim uređajem «SUBTRONIC DUO», Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala, FSB. Izvršeno je po pet mjerenja za svaku vrstu prevlake, a srednje vrijednosti R_z za pojedine prevlake iznose:

METACERAM 28030	66,12 μm ,
METACERAM 28085	68,90 μm ,
METACERAM 28095	53,08 μm .

6.6. Otpornost na trošenje prevlaka na ispitnim uzorcima

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko i erozijsko trošenje keramičkih prevlaka naštrcanih na aluminijsku pjenu obavljeno je u Laboratoriju za tribološka ispitivanja, FSB.

Laboratorijsko ispitivanje počinje s pregledom samog stroja i mjerenjem mase epruveta prije samog procesa djelovanja abrazije i erozije na epruvete. Mjerenje mase epruveta provedeno je na vagi tvrtke Mettler. Njena preciznost iznosi 0,0001 g.

Glavni kriterij za rangiranje epruveta je njihova masa prije i poslije provedenog ispitivanja, što ukazuje na veliku važnost preciznog određivanja mase epruveta. Pogreške koje mogu nastati uslijed nepreciznog mjerenja epruveta dovode do nevjerodostojnih rezultata ispitivanja. Zbog toga vage imaju važnu ulogu u tribološkim ispitivanjima.

Ispitivanje na abrazijsko i erozijsko trošenje provedeno je za svaku pojedinu prevlaku na epruvetama različite poroznosti uz tri ponavljanja. Kod abrazijskog trošenja ispitivanje je provedeno sa dvije sile 15 i 45 N. Kod erozijskog trošenja mijenjan je kut sudara između smjera istjecanja abraziva i površine epruvete α i vrijeme ispitivanja t :

- $\alpha = 30^\circ$, $t = 5$ minuta i

- $\alpha = 90^\circ$, $t = 15$ minuta.

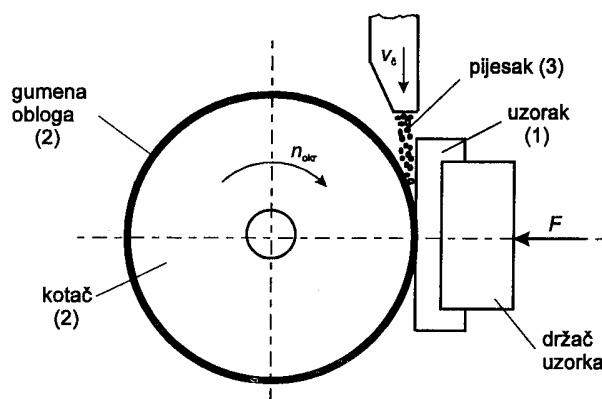
6.6.1. Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje je istiskivanje materijala izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Karakteristika ove vrste trošenja je prisutnost tvrdih abrazivnih čestica uglavnom mineralnog podrijetla, pa se često i naziva mineralno trošenje.

Za eksperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje korištena je test "suhi pijesak/gumeni kotač". Standardni uređaj prema ASTM G65-94 prikazuju slike 6.10 i 6.11..



Slika 6.10. Uređaj "suhi pijesak/gumeni kotač"



Slika 6.11. Skica uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač", [27]

Test se sastoji od abradiranja epruveta standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70. Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore A, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Korištene sile F su 15 i 45 N, broj okretaja kotača n je 100. Nakon završetka ispitivanja na uzorcima ostaje trag kao na slici 6.12.



Slika 6.12. Trag od ispitivanja na uzorcima na uređaju "suhi pijesak/gumeni kotač"

Vaganjem epruvete prije i poslije testa utvrđuje se gubitak mase. Najveća prednost ove metode je to što je standardizirana. Dobiveni rezultati prikazani su dijagramski na slikama 7.1., 7.2., 7.3 i 7.4., te dani u tablicama 11. i 12.

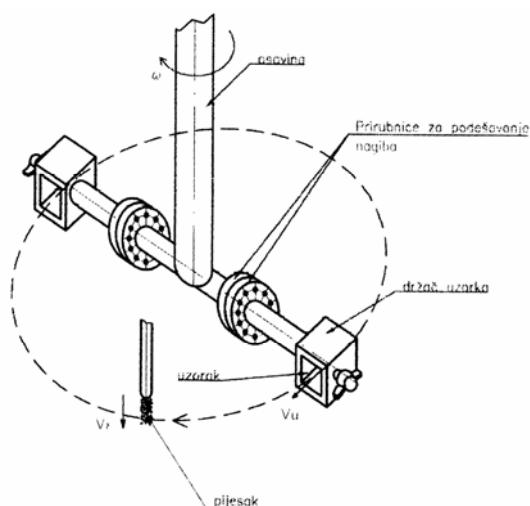
6.6.2. Erozijske čestice

Erozijske čestice je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalaze krute čestice. Erozijska kod koje je strujanje pod malim kutom u odnosu na površinu naziva se abrazivna erozijska, a kad čestice udaraju o površinu gotovo okomito to je udarna erozijska.

Za eksperimentalno utvrđivanje otpornosti materijala na erozijsku korišten je uređaj prikazan na slikama 6.13. i 6.14.

Postavljanjem i fiksiranjem pripremljenih epruveta u ležišta držača epruveta na rotirajućoj konzoli počinje postupak laboratorijskog ispitivanja djelovanja erozivnog mehanizma trošenja krutim česticama na dane epruvete prethodno izmjerene početne mase.

Nakon podešavanja kuta sudara čestica, preko prirubnice za podešavanje nagiba i postavljanja epruveta u njihove držače, uređaj se dovodi u radni položaj. Diže se zaštitni bubanj, sipa odgovarajući pijesak u rezervoar abrazivnog sredstva (pijesak), a nakon toga uključuje uređaj pomoću prekidača.



Slika 6.13. Skica i fotografija dijela uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama, [27]

Uključivanjem uređaja postupak počinje tj. počinje istjecanje pijeska iz njegovog spremišta, prilikom čega dolazi do erozijskog djelovanja krutim česticama na epruvete.

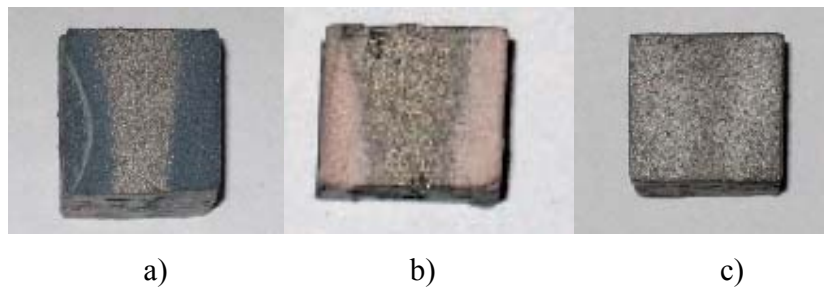
Način erozijskog djelovanja na epruvete prikazan je shematski na slici 6.15..

Ispitivanje se provodi u određenim vremenskim intervalima t od 5 i 15 min. Po isteku određenog vremenskog intervala, uređaj se zaustavlja pomoću prekidača. Nakon njegovog zaustavljanja dolazi do istjecanja preostalog pijeska, zaštitni bubanj se spušta i omogućuje se pristup erodiranim epruvetama, koje se vade iz njihovih držača te se nakon toga određuje gubitak mase. Postupak se ponavlja sve do isteka određenih vremenskih intervala.



Slika 6.14. Uređaj za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama

Istrošenost epruveta može se utvrditi i vizualno što je vidljivo na slici 6.15., ali za precizno utvrđivanje istrošenosti epruveta koristi se specijalna vaga prethodno već spomenuta.



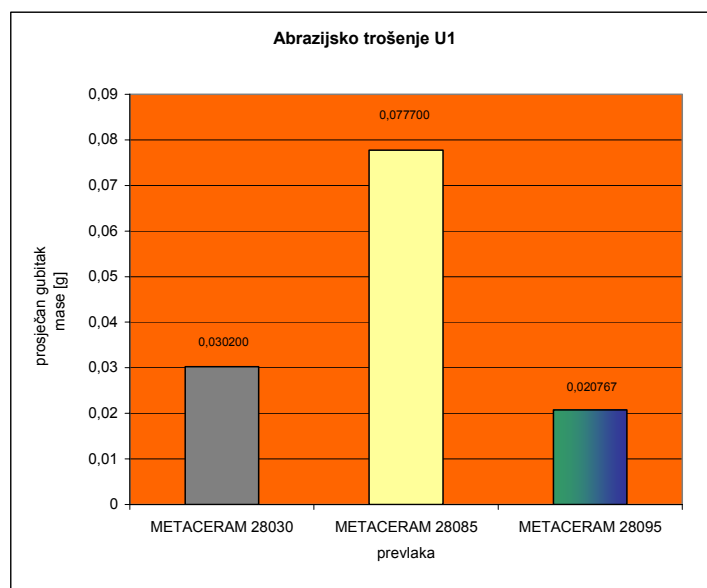
Slika 6.15. Fotografija epruveta korištenih pri ispitivanju s prevlakama:

a) METACERAM 28030, b) METACERAM 28085, c) METACERAM 28095

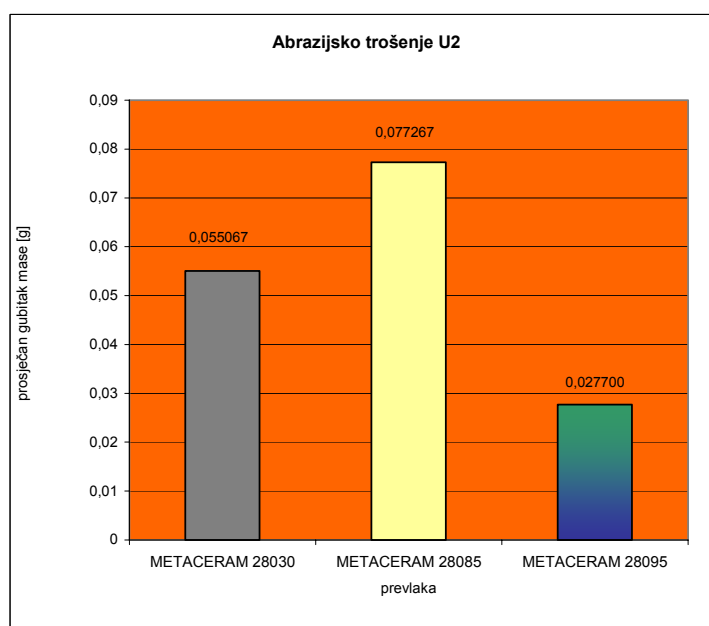
Dobiveni podaci za kut sudara $\alpha = 30^\circ$ i vrijeme ispitivanja $t = 5$ minuta prikazani su tablično (tablice 13. i 14.) i dijagramski na slikama 7.5.,7.6., a za $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15$ minuta (tablice 15. i 16.) i dijagrami na slikama 7.7, 7.8..

Kut sudara $\alpha = 30^\circ$ opisuje abrazivna erozija, pri čemu je najutjecajniji mehanizam trošenja abrazija, za razliku od kuta sudara $\alpha = 90^\circ$ koji je opisan udarnom erozijom, pri čemu je najutjecajniji mehanizam trošenja umor površine.

7. REZULTATI ISPITIVANJA



Slika 7.1. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U_1 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 15 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja

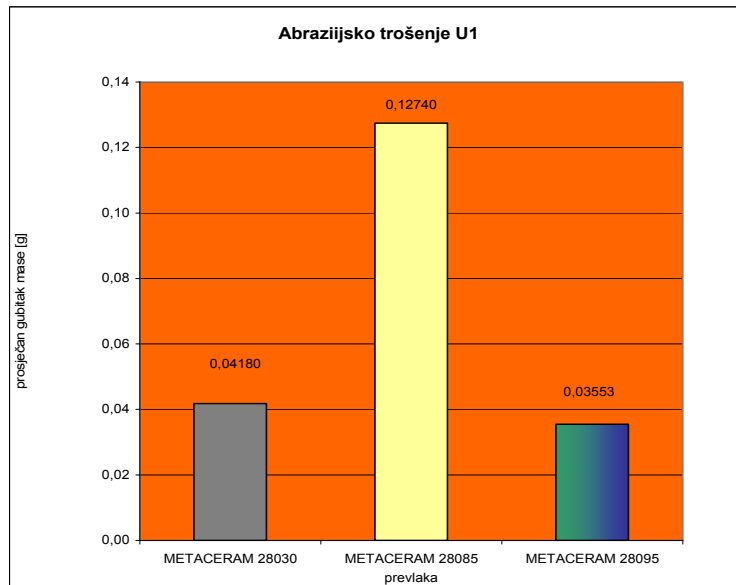


Slika 7.2. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U_2 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 15 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja

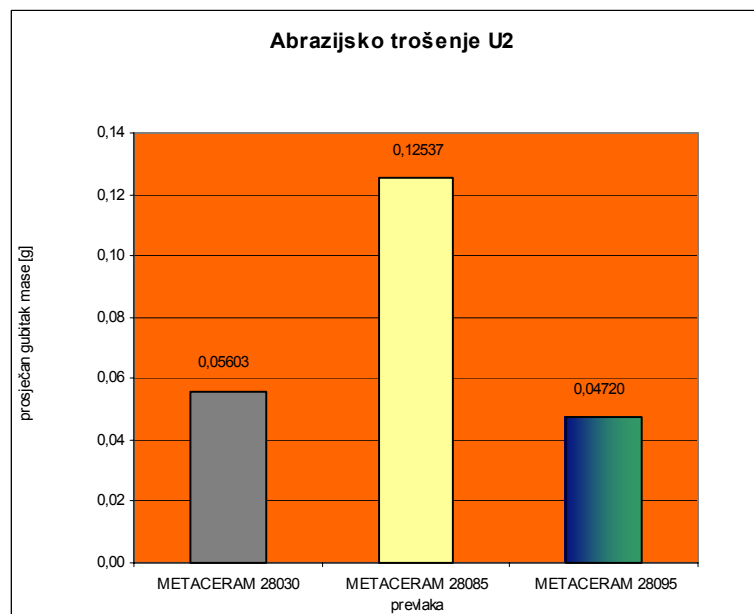
Tablica 11. Rezultati abrazijskog ispitivanja za primijenjenu silu $F = 15\text{ N}$, i broj okretaja

$n = 100$

ABRAZIJSKO TROŠENJE									
prevlaka	uzorak	U_1 , poroznost 64,1%				U_2 , poroznost 46,1%			
		masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]	prosječan gubitak mase [g]	masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]	prosječan gubitak mase [g]
METACERA M 28030	1.	10,8049	10,7887	0,0162	0,030200	22,7663	22,7143	0,052	0,055067
	2.	17,2015	17,1542	0,0473		21,9111	21,8554	0,0557	
	3.	21,6919	21,6648	0,0271		21,4290	21,3715	0,0575	
METACERA M 28085	1.	20,8923	20,8742	0,0181	0,077700	18,4436	18,3403	0,1033	0,077267
	2.	19,8191	19,7160	0,1081		19,8816	19,8540	0,0276	
	3.	24,6820	24,5751	0,1069		18,3068	18,2059	0,1009	
METACERA M 28095	1.	17,5312	17,5079	0,0233	0,020767	22,6853	22,6452	0,0401	0,027700
	2.	20,9854	20,9617	0,0237		18,5276	18,5148	0,0128	
	3.	18,3611	18,3458	0,0153		22,3559	22,3257	0,0302	



Slika 7.3. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U_1 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 45 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja

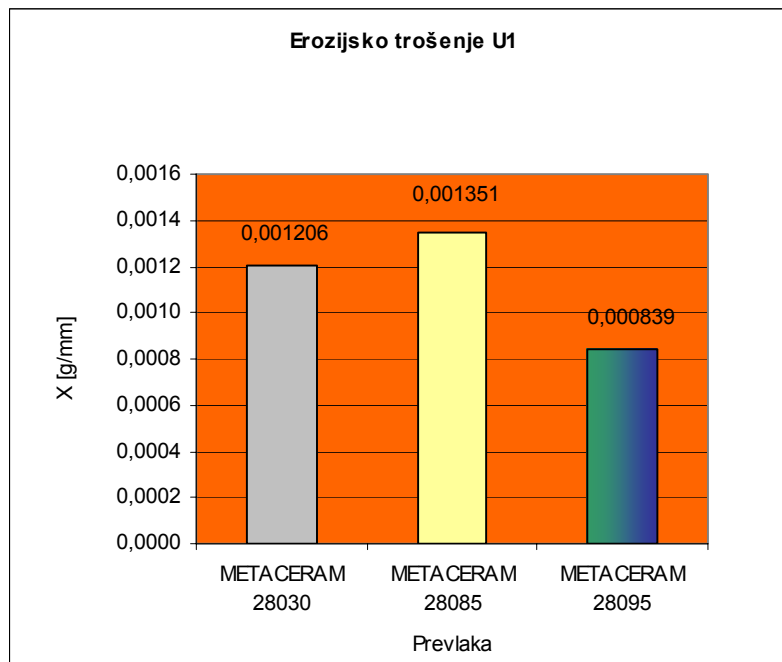


Slika 7.4. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase epruveta od uzorka U_2 za pojedine prevlake, primijenjenu silu $F = 45 \text{ N}$ i $n = 100$ okretaja

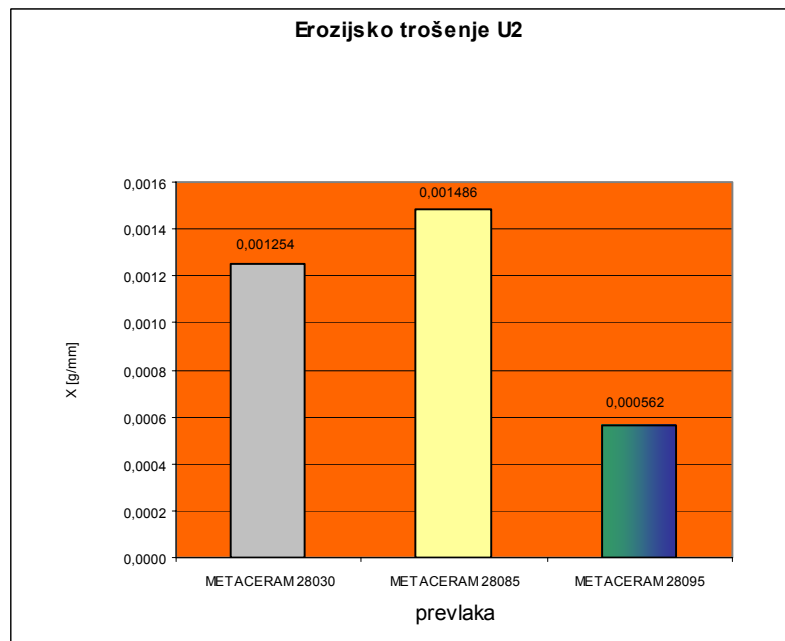
Tablica 12. Rezultati abrazijskog ispitivanja za primijenjenu silu $F = 45 \text{ N}$ i broj okretaja

$n = 100$

ABRAZIJSKO TROŠENJE									
prevlaka	epruveta	U_1 , poroznost 64,1%				U_2 , poroznost 46,1%			
		masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]	prosječan gubitak mase [g]	masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]	prosječan gubitak mase [g]
METACERA M 28030	1.	23,1709	23,1205	0,0504	0,04180	19,8567	19,8049	0,0518	0,05603
	2.	19,7117	19,6659	0,0458		17,2528	17,1819	0,0709	
	3.	9,9601	9,9309	0,0292		18,1052	18,0598	0,0454	
METACERA M 28085	1.	23,2671	23,1638	0,1033	0,12740	16,1579	16,0448	0,1131	0,12537
	2.	16,1800	16,0334	0,1466		20,3177	20,1739	0,1438	
	3.	16,7323	16,6000	0,1323		17,6918	17,5726	0,1192	
METACERA M 28095	1.	14,5733	14,5419	0,0314	0,03553	22,7150	22,6499	0,0651	0,04720
	2.	23,2180	23,1799	0,0381		23,1660	23,1348	0,0312	
	3.	18,9005	18,8634	0,0371		23,0600	23,0147	0,0453	



Slika 7.5. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U_1 za pojedine prevlake uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5$ min



Slika 7.6. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U_2 za pojedine prevlake uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5$ min

Tablica 13. Rezultati erozijskog ispitivanja uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5$ min

EROZIJSKO TROŠENJE							
prevlaka	epruveta	U ₁ , poroznost 64,1%			U ₂ , poroznost 46,1%		
		masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]	masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]
METACERA M 28030	1.	5,0802	5,556	0,0246	4,7530	4,7395	0,0135
	2.	5,0364	5,0244	0,0120	6,3190	6,2872	0,0318
	3.	5,9774	5,9534	0,0240	4,6776	4,6553	0,0223
METACERA M 28085	1.	4,9338	4,9178	0,0160	5,3613	5,3440	0,0173
	2.	3,8105	3,7849	0,0256	4,2880	4,2548	0,0332
	3.	4,0670	4,0497	0,0173	6,1176	6,0881	0,0295
METACERA M 28095	1.	4,6121	4,5956	0,0165	5,5109	5,4931	0,0178
	2.	6,0941	6,0840	0,0101	6,1660	6,1617	0,0043
	3.	4,2270	4,2134	0,0136	6,7390	6,7316	0,0074

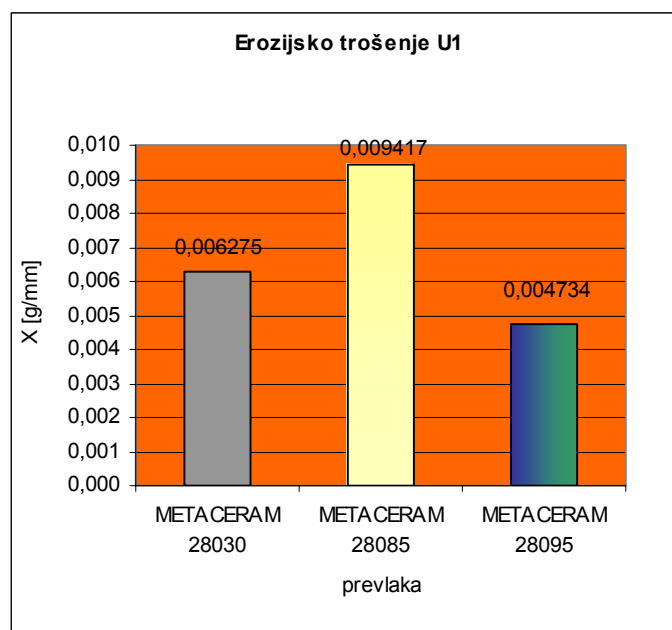
Budući da dimenzije ispitnih epruveta nisu bile u potpunosti jednaka, to je značajno utjecalo na dobivene rezultate. Zbog toga su rezultati prikazani prosječnom vrijednošću trošenja χ koja je dobivena na taj način da je gubitak mase epruvete podijeljen s njegovom visinom.

$$\chi = \frac{\text{gubitak mase}}{\text{visina}}, [g/mm]$$

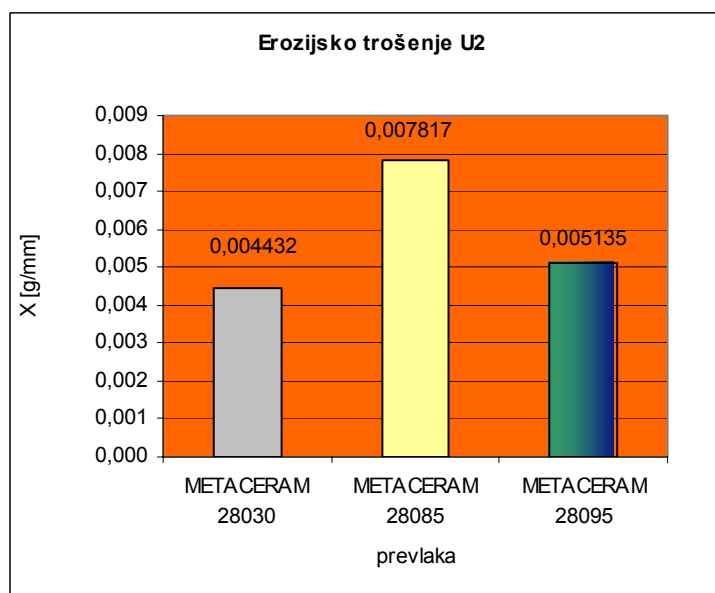
Tablica 14. Prosječan gubitak mase epruvete za pojedine prevlake uz $\alpha = 30^\circ$ i $t = 5$ min

EROZIJSKO TROŠENJE									
prevlaka	epruveta	U ₁ , poroznost 64,1%				U ₂ , poroznost 46,1%			
		visina [mm]	gubitak mase[g]	X [g/mm]	prosječna vrijednost X [g/mm]	visina [mm]	gubitak mase[g]	X [g/mm]	prosječna vrijednost X [g/mm]
METACERA M 28030	1.	17,95	0,0246	0,001370	0,001206	17,35	0,0135	0,000778	0,001254
	2.	14,9	0,0120	0,000805		19,15	0,0318	0,001661	
	3.	16,65	0,0240	0,001441		16,85	0,0223	0,001323	
METACERA M 28085	1.	15,0	0,0160	0,001067	0,001351	17,2	0,0173	0,001006	0,001486
	2.	14,05	0,0256	0,001822		17,6	0,0332	0,001886	
	3.	14,85	0,0173	0,001165		18,85	0,0295	0,001565	
METACERA M 28095	1.	15,3	0,0165	0,001078	0,000839	17,2	0,0178	0,001035	0,000562
	2.	16,3	0,0101	0,000620		17,95	0,0043	0,000240	
	3.	16,6	0,0136	0,000819		17,95	0,0074	0,000412	

α – kut sudara, t – vrijeme ispitivanja



Slika 7.7. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U_1 za pojedine prevlake uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15$ min



Slika 7.8. Dijagramski prikaz prosječnog gubitka mase/visina epruvete x od uzorka U_2 za pojedine prevlake uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15$ min

Tablica 15. Rezultati erozijskog ispitivanja uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15$ min

EROZIJSKO TROŠENJE, $\alpha = 90^\circ$, $t = 15$ min							
prevlaka	epruveta	U ₁ , poroznost 64,1%			U ₂ , poroznost 46,1%		
		masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]	masa prije trošenja [g]	masa poslije trošenja [g]	gubitak mase [g]
METACERA M 28030	1.	3,5765	3,4877	0,0888	5,0855	4,9960	0,0895
	2.	6,2565	6,1347	0,1218	4,6596	4,6229	0,0367
	3.	5,6347	5,5182	0,1165	5,6601	5,5667	0,0934
METACERA M 28085	1.	3,9079	3,7478	0,1601	4,6858	4,5422	0,1436
	2.	4,2396	4,1035	0,1361	5,2817	5,1458	0,1359
	3.	5,3772	5,2524	0,1248	6,0153	5,9200	0,0953
METACERA M 28095	1.	3,8536	3,8170	0,0366	5,3578	5,2577	0,1001
	2.	6,3502	6,2507	0,0995	4,1362	4,0306	0,1056
	3.	5,4108	5,3140	0,0968	5,3647	5,3056	0,0591

Budući da dimenzije ispitnih epruveta nisu bile u potpunosti jednaka, to je značajno utjecalo na dobivene rezultate. Zbog toga su rezultati prikazani prosječnom vrijednošću trošenja χ koja je dobivena na taj način da je gubitak mase epruvete podijeljen s njegovom visinom.

$$\chi = \frac{\text{gubitak mase}}{\text{visina}}, [g/mm]$$

Tablica 16. Prosječan gubitak mase epruveta za pojedine prevlake uz $\alpha = 90^\circ$ i $t = 15$ min

EROZIJSKO TROŠENJE									
prevlaka	epruveta	U ₁ , poroznost 64,1%				U ₂ , poroznost 46,1%			
		visina [mm]	gubitak mase[g]	X [g/mm]	prosječna vrijednost X	visina [mm]	gubitak mase[g]	X[g/mm]	prosječna vrijednost X
METACERA M 28030	1.	17,05	0,0888	0,005208	0,006275	16,3	0,0895	0,005491	0,004432
	2.	17,9	0,1218	0,006804		16,1	0,0367	0,002280	
	3.	17,1	0,1165	0,006813		16,9	0,0934	0,005527	
METACERA M 28085	1.	13,0	0,1601	0,012315	0,009417	14,45	0,1436	0,009938	0,007817
	2.	16,0	0,1361	0,008506		16,2	0,1359	0,008389	
	3.	16,8	0,1248	0,007429		18,6	0,0953	0,005124	
METACER AM 28095	1.	16,8	0,0366	0,002179	0,004734	16,9	0,1001	0,005923	0,005135
	2.	16,5	0,0995	0,00603		17,9	0,1056	0,005899	
	3.	16,15	0,0968	0,005994		16,5	0,0591	0,003582	

α – kut sudara, t – vrijeme ispitivanja

8. ANALIZA REZULTATA

8.1. Uvod

U ovom dijelu magistarskog rada napravljena je analiza utjecaja važnijih faktora na gubitak mase kod ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje dvije različite vrste oksidno keramičkih prevlaka METACERAM 28030 i METACERAM 28085, te prevlaka na koju je nanešen čisti Mo, METACERAM 28095.

Prevlake su nanešene plamenim naštrcavanjem na aluminijsku metalnu pjenu AlSi10. Važniji faktori utjecajnosti koje su uzeti u obzir su: poroznost Al metalne pjene, primjenjena sila i vrsta prevlake. Model pokusa kojim ćemo utvrditi utjecajnost spomenutih faktora bit će faktorski plan pokusa, a u radu će on biti napravljen putem softverskog paketa «Design Expert», [28]. Pri tom će se pomoću F – testa analizirati varijanca, odnosno utvrditi značajnost doprinosa pojedinih faktora, te utvrditi međusobni utjecaj faktora analizom efekata. Opis i definiranje tih faktora napravljeno je u sljedećem poglavlju.

8.2. Definiranje utjecajnih faktora i njihovih nivoa

8.2.1. Poroznost Al metalne pjene

U pokusu su uzorci bili napravljeni od dvije vrste Al pjena: jedna poroznosti 46,1 %, a druga poroznosti 64,1 %.

8.2.2. Primjenjena sila

Pokus je vršen s dvije različite sile i to 15N i 45N.

8.2.3. Vrsta prevlake

U pokusu su ispitivane dvije vrste oksidno-keramičkih prevlaka i to: METACERAM 28030 i METACERAM 28085, te prevlaka na koju je nanešen čisti metal (Mo), METACERAM 28095.

8.3. Izbor modela pokusa i obrazloženje

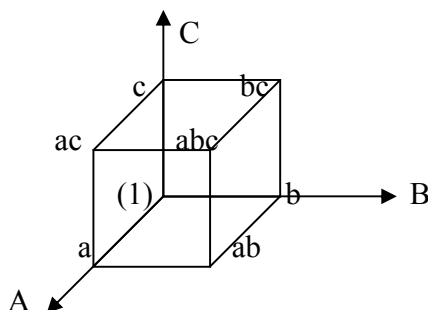
Ovim pokusom ispitat će se utjecaj tri faktora (poroznost, primjenjena sila i vrsta prevlake), od kojih su prva dva kvantitativni faktori, na četvrtu kvantitativnu veličinu (gubitak mase izražen u g).

Pokusi ovog tipa, gdje se istovremeno ispituju dva ili više faktora, svaki na najmanje dva nivoa, nazivaju se **faktorski plan pokusa**. Za izvođenje ovog pokusa odabran je faktorski plan pokusa 3×2^3 , budući da postoje tri faktora od kojih su prva dva na dva nivoa, a treći na tri nivoa. Ova vrsta pokusa omogućuje sagledavanje interakcija, odnosno djelovanje istovremene promjene dva ili tri faktora na mjerenu veličinu, a to je u ovom slučaju gubitak mase. Uz interakciju, faktorskim planom pokusa testirat će se i doprinosi glavnih faktora, čiji broj ovisi o broju promatranih faktora.

Kod svakog stanja pokusa su obavljena tri mjerenja gubitka mase. Ovo ponavljanje osigurava sigurniju procjenu vrijednosti efekata, bilo glavnog faktora ili interakcije. Odabrani faktorski plan pokusa povoljniji je od klasičnog modela eksperimenta jer sadrži manji broj stanja pokusa i moguća je ocjena efekata interakcija dva ili tri faktora.

Nedostatak ovog plana je što se ne zna o kakvoj je promjeni riječ, da li je ona linearna, kvadratna, eksponencijalna i sl..Uvođenjem tri ili više nivoa za svki faktor mogao bi se otkloniti i taj nedostatak, samo što bi u tom slučaju značajno poskupio čitav pokus, te se produljilo vrijeme njegovog izvođenja.

Broj stanja za izabrani model iznosi 2^n ($n=3$ – broj faktora), te iz tog slijedi da pokus sadrži osam mogućih stanja. Uz tri ponavljanja za svako stanje pokusa ukupno postoje 24 ($2^3 \times 3$) izmjerene vrijednosti gubitka mase. Budući da postoje tri vrste prevlaka pokus će se ponoviti tri puta. Plan pokusa može se i grafički prikazati (Slika 8.1.).



Slika 8.1. Model planiranja potpunog faktorskog plana pokusa 2^3 , [29]

8.4. Izvedba pokusa

8.4.1. Raspon variranja faktora

1. Faktor A – poroznost
A₁ – poroznost 64,1 %
A₂ – poroznost 46,1 %
2. Faktor B – primjenjena sila
B₁ – F=15N
B₂ – F=45N
3. Faktor C – vrsta prevlake
C₁ – METACERAM 28030
C₂ – METACERAM 28085
C₃ – METACERAM 28095

Plan pokusa prikazan je u tablici 17.

Tablica 17. Plan pokusa 2³

Y _{ijk}	C ₁		C ₂	
	B ₁	B ₂	B ₁	B ₂
A ₁	A ₁ B ₁ C ₁	A ₁ B ₂ C ₁	A ₁ B ₁ C ₂	A ₁ B ₂ C ₂
A ₂	A ₂ B ₁ C ₁	A ₂ B ₂ C ₁	A ₂ B ₁ C ₂	A ₂ B ₂ C ₂

Dakle, izvršeno je mjerenje gubitka mase na 24 uzorka, za osam različitih stanja pokusa. U tablici 18. dane su vrijednosti gubitka mase za pojedine kombinacije nivoa faktora, te srednja vrijednost za pojedinu kombinaciju prve i druge oksidno- keramičke prevlake METACERAM 28030 i METACERAM 28085.

Tablica 18. Rezultati mjerenja gubitka mase prevlaka METACERAM 28030 i METACERAM 28085.

gubitak mase, g	C ₁ – METACERAM 28030		C ₂ - METACERAM 28085	
	B ₁ – F=15N	B ₂ –F=45N	B ₁ – F=15N	B ₂ –F=45N
A ₁ –poroznost, 64,1% \bar{X}	(1)	b	c	bc
	0,0162	0,0504	0,0181	0,1033
	0,0473	0,0458	0,1081	0,1466
	0,0271	0,0292	0,1069	0,1323
	0,0302	0,0418	0,0777	0,1274
A ₂ –poroznost, 46,1% \bar{X}	a	ab	ac	abc
	0,052	0,0518	0,1033	0,1131
	0,0557	0,0709	0,0276	0,1438
	0,0575	0,0454	0,1009	0,1192
	0,055067	0,05603	0,077267	0,12537

U tablici 19. dane su vrijednosti gubitka mase pojedine kombinacije nivoa faktora, te srednja vrijednost za pojedinu kombinaciju druge i treće prevlake METACERAM 28085 i METACERAM 28095.

Tablica 19. Rezultati mjerenja gubitka mase prevlaka METACERAM 28085 i METACERAM 28095.

gubitak mase, g	C ₂ – METACERAM 28085		C ₃ - METACERAM 28095	
	B ₁ – F=15N	B ₂ –F=45N	B ₁ – F=15N	B ₂ –F=45N
A ₁ –poroznost, 64,1% \bar{X}	(1)	b	c	bc
	0,0181	0,1033	0,0233	0,0314
	0,1081	0,1466	0,0237	0,0381
	0,1069	0,1323	0,0153	0,0371
	0,0777	0,1274	0,020767	0,03553
A ₂ –poroznost, 46,1% \bar{X}	a	ab	ac	abc
	0,1033	0,1131	0,0401	0,0651
	0,0276	0,1438	0,0128	0,0312
	0,1009	0,1192	0,0302	0,0453
	0,077267	0,12537	0,0277	0,0453

U tablici 20. dane su vrijednosti gubitka mase za pojedine kombinacije nivoa faktora, te srednja vrijednost za pojedinu kombinaciju prve i treće prevlake METACERAM 28030 i METACERAM 28095.

Tablica 20. Rezultati mjerenja gubitka mase prevlaka METACERAM 28030 i METACERAM 28095.

gubitak mase, g	C ₁ – METACERAM 28030		C ₃ - METACERAM 28095	
	B ₁ – F=15N	B ₂ –F=45N	B ₁ – F=15N	B ₂ –F=45N
A ₁ –poroznost, 64,1% \bar{X}	(1)	b	c	bc
	0,0162	0,0504	0,0233	0,0314
	0,0473	0,0458	0,0237	0,0381
	0,0271	0,0292	0,0153	0,0371
	0,0302	0,0418	0,020767	0,03553
A ₂ –poroznost, 46,1% \bar{X}	a	ab	ac	abc
	0,052	0,0518	0,0401	0,0651
	0,0557	0,0709	0,0128	0,0312
	0,0575	0,0454	0,0302	0,0453
	0,055067	0,05603	0,0277	0,0453

8.5. Obrada podataka softverskim paketom «DESIGN EXPERT»

Softverski paket «Design Expert», (DOE), je predviđen za rješavanje različitih problema kod optimalizacije mnogobrojnih inženjerskih procesa, putem izvođenja pokusa. Program je kompatibilan s Windows grafičkim sučeljem, i omogućava 3D prikaz, odnosno omogućava vizualizaciju odzivnih površina, pri čemu na raspolaganju stoje brojne opcije, predočavanje dodatnih koordinata, numerička optimalizacija funkcija i još mnoge druge mogućnosti.

U nastavku pokazane su neke od mogućnosti ovog softverskog paketa.

8.5.1. Mogućnosti DOE

Program sadrži mnogobrojne opcije, no u osnovi alati na raspolaganju za rješavanje problema ovim paketom su:

- Faktorska analiza
- Metoda odzivnih površina (RSM)
- Pokusi sa smjesama
- Kombinacija pokusa sa smjesama i faktorima (Crossed pokusi)

8.5.2. Faktorska analiza

U onom magistarskom radu pokus je rješavan pomoću faktorske analize, i to 3×2^3 . Pri rješavanju problema faktorskom analizom ponuđene su sljedeće mogućnosti :

Broj faktora. 2 - 21

Broj razina: 2

Variranje svake razine: 2 – 9 (od 4 do 512 mogućih stanja)

Osim faktorskog plana pokusa postoje i sljedeće načini analize:

- Irregular Fraction
- General factorial

- D – optimal
- Placket Burman
- Taguchi OA

8.5.3. Unos podataka i softversko rješenje

U nekoliko koraka kratko je opisan postupak unosa podataka i realizacija u softverskom paketu DOE.

Korak 1

Kada se uđe u softverski paket klikom na ikonu softvera, otvori se opcija **File – New Design**, čime se definira novi radni zalon na ponuđenom padajućem izborniku u lijevom kutu.

Korak 2

Među ponuđenim opcijama odabire se metoda **2 – Level Factorial**, pri čemu se na ekranu pokažu sve mogućnosti odabira faktora i njihovih nivoa. Klikom na polje **2³** odabire se metoda. Budući da u ovom radu postojeći pokus ima osam mogućih stanja, ali uz tri ponavljanja, klikom miša namjesti se opcija **Replicate –3**. Zatim se klikne mišem na opciju **Continue**.

Korak 3

Na zaslonu ekrana pojavit će se tablica u koju se unose faktori A –poroznost, B – primjenjena sila i C –vrsta prevlake. Pri tom se odabire opcija **Categoric** (dobit će se veličine A1, A2; B1, B2 i C1, C2). Istovremeno se mogu unijeti mjerne jedinice pojedinih faktora. Ostale opcije ostavljaju se onakve kakve jesu. Zatim se odabire opcija **Continue**.

Korak 4

Na ekranu će se pojaviti nova tablica. U nju se unosi odziv R (u ovom slučaju je to broj 1, **Responses 1**). Klikne se opcija **Continue**.

Korak 5

Na ekranu će se pojaviti tablica u koju se pažljivo unose sve izmjerene vrijednosti gubitka mase iz pokusa (treba paziti na njihovo unošenje gledajući da se podaci poklapaju s ručno napravljenom tablicom). Time je završeno unošenje podataka u softverski paket.

Korak 6

Nakon ovog unošenja, kada je sve definirano, prelazi se na pregled realizacije. U gornjem lijevom kutu nalazi se padajući izbornik sa različitim opcijama. Odabire se opcija **Analysis** – gubitak mase. Klikom na ovu opciju pojavljuje se u gornjem dijelu ekrana traka s različitim mogućnostima prikazivanja rezultata. Odabire se opcija **Effects**. Pojavit će se dijagram na kojem se nalaze raznobojni kvadratići. Oni predstavljaju faktore i njihove interakcije. Analiza se nastavlja dalje tako da se klikne mišem na kvadratiće. Pri tom treba paziti da se to radi od desno gore prema lijevo dolje. Nakon toga detaljan prikaz rezultata dobit će se klikom na opciju **ANOVA**. Ako je potrebna još iscrpnija analiza to će se postići aktiviranjem opcija **Diagnostics i Model Graphs**.

Rezultati analize prikazani su u PRILOGU.

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu zadatak je bio ispitati otpornost na abrazijsko i erozijsko trošenje keramičkih prevlaka nanešenih na aluminijske metalne pjene dviju različitih poroznosti, te uočiti mogućnosti primjene istih.

Analizom rezultata softverskim paketom "DESIGN EXPERT", odnosno analizom varijance i efekata interakcije utjecajnih veličina, najveći utjecaj imaju faktori B (primjenjena sila) i C (vrsta prevlake). Dvofaktorske i trofaktorske interakcije nisu pokazale značajan utjecaj na gubitak mase. Kod primjene prevlake METACERAM 28095 (metalni prašak na bazi molibdena) postižu se najbolji rezultati otpornosti na trošenje u slučaju abrazije. Pokazalo se da je prevlaka METACERAM 28085 (oksidokeramički prašak na bazi ZrO_2) najmanje otporna na abrazijsko trošenje.

Povećanjem primjenjene sile dolazilo je do značajnog gubitka mase na svim prevlakama. Zanimljivo je i to da se prevlake METACERAM 28030 i METACERAM 28095 slično ponašaju pri abrazijskom trošenju, pa je u ovom slučaju značajni faktor predstavljala i poroznost pjene. Očigledno je da na tim uzorcima postoji utjecaj poroznosti, ali da bi se došlo do konkretnog zaključka bit će potrebno ispitati uzorke s više različitih poroznosti metalne pjene.

Isto tako pri erozijskom trošenju najbolje su se pokazale prevlake METACERAM 28030 i METACERAM 28095, dok je najlošija, kao i kod abrazije prevlaka METACERAM 28085.

Primjećeno je da su se prevlake koje su bile izložene udarnoj eroziji ($\alpha = 90^\circ$ i $t = 15$ min), pet do šest puta više potrošile od istih prevlaka izloženih abrazijskoj eroziji ($\alpha = 30^\circ$ i $t = 5$ min). To je u skladu s očekivanjima, a razlozi su krhkost keramičkih prevlaka (nisu otporne na udarno djelovanje), probijanje zaštitne prevlake u intervalu od 5 – 15 minuta pri udarnoj eroziji i početak trošenja osnovnog materijala.

Provedena su i metalografska ispitivanja. Zbog nehomogenosti metalnih pjena, velike razlike u tvrdoćama pjene i površinskog sloja, komplicirana je priprema metalografskih uzoraka. Na svim metalografskim uzorcima određena je debljina kako vezivnog sloja tako i prevlake, a određena je i prosječna visina neravnina (R_z).

Primjena ovako zaštićenih aluminijskih pjena bila bi moguća na manje zahtjevnim konstrukcijama (npr. cjevovodi) u čijoj bi se okolini nalazile sitne abrazivne čestice (npr. prašina, ugljena prašina, i sl.).

10. LITERATURA

- [1] T. Filetin, G. Marić: «Characterisation of the thermal sprayed aluminium foams», Abstract – Part 2 – 9 European Conference on NDT, European Federation for Non – Destructive Testing, Berlin, September 25 – 29, 2006, P.64
- [2] <http://web.mit.edu/dmse/csg/recent.html> Natural cellular materials
- [3] František Simančík: “Aluminium Foam potential for ultra-lightweight structures”, Institute of Materials & Machine Mechanics Slovak Academy of Sciences, Bratislava, January 2004.
- [4] John Banhart: «Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams», Progress in Material Science 46 (2001) 559 – 632, Pergamon.
- [5] M. F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley: «Metal foams: A design guide», Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000
- [6] T. Filetin, I. Kramer, G. Marić: «Metalne pjene - proizvodnja, svojstva i primjena», Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [7] L.J. Gibson, M.F. Ashby: «Cellular solids: structure and properties (Second Ed.)», Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [8] W. Krach, T. Daxner, F.G. Rammerstorfer: «Metallic Foams versus Human Bones», Proceedings of the EUROMAT Conference, Rimini, 2000., Paper No. 1160.
- [9] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson: «Compressive and tensile behaviour of aluminium foams», Materials Science and Engineering A270 (1999.), p. 113-124
- [10] D. Ruan, G. Lu, L. S. Ong, B. Wang: «Triaxial compression of aluminium foams», Science and Technology xxx (2006) xxx – xxx, 01. 05. 2006., <http://www.sciencedirect.com>
- [11] E.W. Andrews, J.-S. Huang, L.J. Gibson:» Creep behaviour of a closed-cell aluminium foam», Acta mater. Vol. 47, No. 10, p. 2927-2935, 1999; <http://www.metalfoam.net/papers/andrews99.pdf>
- [12] T. Mukai, H. Kanahashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T.G. Nieh, H. Higashi: «Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminium foam under dynamic loading», Scripta materialia, Vol. 40, No. 8, p. 921-927, 1999; <http://www.metalfoam.net/papers/mukai99.pdf>
- [13] F. Simančík: «Metallic foams – ultra light materials for structural applications», Inżynieria materialowa, Nr. 5 / 2001, 823 – 828.
- [14] F. Simančík, J. Kovačik, N. Minarikova: «Bending properties of foamed aluminium panels and sandwiches», MRS Symposium Proceedings (Ed. by. D.S. Schwartz, D.S. Shih, A.G. Evans

and H.N.G. Wadley), Vol. 521, Materials Research Society, Warrendale, Pennsylvania, 1998., p. 91

[15] F. Simančik, L. Lučan, J. Jerz: «Reinforced aluminium foams», Bremen, 2001.

[16] F. Simančik, R. Florek: «Reinforced aluminium foams – promising solution for lightweight load – bearing parts», Metfoam 2005, 21. – 23. 09. 2005.

[17] F. Simančik, W. Rajner, R. Laag: «Reinforced alulight for structural use», Proceeding of the conference «Processing and properties of lightweight cellular metals and structures (TMS Annual Meeting)», Seattle, 2002. p. 25.

[18] C. Chen, A.-M. Harte, N.A. Fleck: «The plastic collapse of sandwich beams with a metallic foam core», Int. Journal of Mechanical Sciences 43 (2001.)9, p. 1483-1506; <http://www.metalfoam.net/papers/chen01a.pdf>

[19] F. Simančik, H. P. Degischer, H. Worz: «Foamed aluminium – light structural and insulation material», Euromat 1995., Venice / Padua, Italy, 25. – 28. 09. 1995.

[20] N. Sedliakova, F. Simančik, J. Kovačik, P. Minar: «Joining of aluminium foams», Proceeding of Symposium Metallschaume, Bremen, 06. – 07. 03. 1997., p. 177 – 185

[21] http://www.wiley-vch.de/contents/jc_2266/2000/188_a.pdf

[22] F. Simančik, F. Schoerghuber: «Complex foamed aluminium parts as permanent cores in aluminium castings», MRS Symposium Proceedings (Ed. by. D.S. Schwartz, D.S. Shih, A.G. Evans and H.N.G. Wadley), Vol. 521, Materials Research Society, Warrendale, Pennsylvania, 1998., p. 151

[23] U. K. Vaidya, S. Pillay, S. Batus, C. A. Ulven, D. T. Grow, B. Mathew: «Impact and post – impact vibration response of protective metal foam composite sandwich plates», Materials Science and Engineering A 428 (2006), 59 - 66

[24] <http://www.fibernide.com/foam.html>

[25] T. Filetin, K. Grilec: «Postupci modificiranja i prevlačenja površina – priručnik za primjenu», Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.

[26] Katalog «Castolin Eutectic – dodatni materijali i aparati za specijalna reparaturna zavarivanja», A.M.I. COMMERCE, Zagreb

[27] V. Ivušić: «Tribologija», Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.

[28] ..., Softverski paket «Design Expert ® version 7.1.1.», Stat – Ease, Inc. 2021 East Hennepin Avenue, Suite 480, Minneapolis, MN 55413

[29] N. Šakić: Predavanja iz kolegija «Metode znanstveno istraživačkog rada», Zagreb, 1997.

PRILOG

Rezultati analize

U ovom poglavlju prikazani su rezultati obrade podataka softverskim paketom «DESIGN EXPERT», [27] za sve tri kombinacije prevlaka.

Na temelju prethodno opisanog postupka unosa podataka (tablice 18., 19., 20), izvršena je analiza za trofaktorski plan pokusa. Za analizu varijance primjenjen je F – test, a također su analizirani i efekti međusobnog utjecaja faktora. Rezultati su prikazani u nastavku.

Grafička interpretacija rezultata faktora utjecajnosti na prevlake METACERAM 28030 i METACERAM 28085.

Use your mouse to right click on individual cells for definitions.

Response 1 gubitak mase
Transform: Base 10 log Constant: 0

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		
Model		1.06	7	0.15	3.04	0.0311	signif.
<i>B-primjenjena sila</i>		0.22	1	0.22	4.53	0.0492	
<i>C-vrsta prevlake</i>		0.60	1	0.60	12.00	0.0032	
<i>AB0.018</i>		1	0.018	0.37	0.5516		
<i>AC0.057</i>		1	0.057	1.16	0.2981		
<i>BC0.070</i>		1	0.070	1.42	0.2515		
<i>ABC</i>	5.344E-003		1	5.344E-003	0.11	0.7470	
Pure Error		0.79	16	0.050			
Cor Total		1.85	23				

The Model F-value of 3.04 implies the model is significant. There is only a 3.11% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise. Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case B, C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.22	R-Squared	0.5707
Mean	-1.21	Adj R-Squared	0.3829
C.V. %	18.41	Pred R-Squared	0.0341
PRESS	1.79	Adeq Precision	5.144

The "Pred R-Squared" of 0.0341 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0.3829 as one might normally expect. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model

and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 5.144 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient		Standard df	95% CI Error	95% CI		VIF
	Estimate				Low	High	
Intercept	-1.21		1	0.045	-1.31	-1.11	
A-poroznost	0.059		1	0.045	-0.037	0.16	1.00
B-primjenjena sila	0.097		1	0.045	3.619E-004	0.19	1.00
C-vrsta prevlake	0.16		1	0.045	0.061	0.25	1.00
AB-0.028	1	0.045		-0.12	0.069	1.00	
AC-0.049	1	0.045		-0.15	0.047	1.00	
BC0.054	1	0.045		-0.042	0.15	1.00	
ABC	0.015		1	0.045	-0.081	0.11	1.00

Final Equation in Terms of Coded Factors:

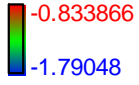
$$\begin{aligned} \text{Log}_{10}(\text{gubitak mase}) &= \\ &-1.21 \\ &+0.059 \quad * A \\ &+0.097 \quad * B \\ &+0.16 \quad * C \\ &-0.028 \quad * A * B \\ &-0.049 \quad * A * C \\ &+0.054 \quad * B * C \\ &+0.015 \quad * A * B * C \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

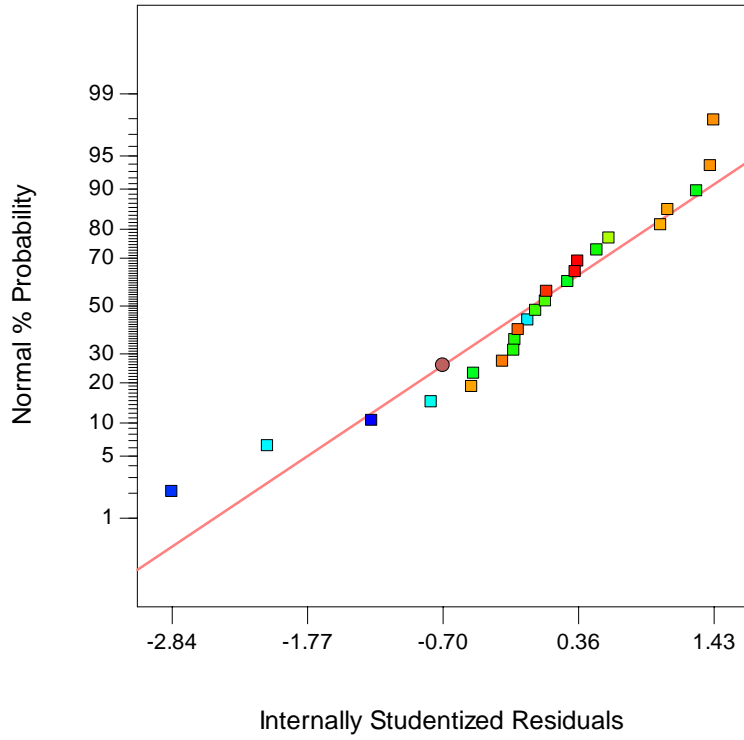
$$\begin{aligned} \text{Log}_{10}(\text{gubitak mase}) &= \\ &-1.21007 \\ &+0.059236 \quad * \text{poroznost} \\ &+0.096740 \quad * \text{primjenjena sila} \\ &+0.15746 \quad * \text{vrsta prevlake} \\ &-0.027648 \quad * \text{poroznost} * \text{primjenjena sila} \\ &-0.048892 \quad * \text{poroznost} * \text{vrsta prevlake} \\ &+0.054086 \quad * \text{primjenjena sila} * \text{vrsta prevlake} \\ &+0.014921 \quad * \text{poroznost} * \text{primjenjena sila} * \text{vrsta prevlake} \end{aligned}$$

Design-Expert® Software
Log10(gubitak mase)

Color points by value of
Log10(gubitak mase):



Normal Plot of Residuals

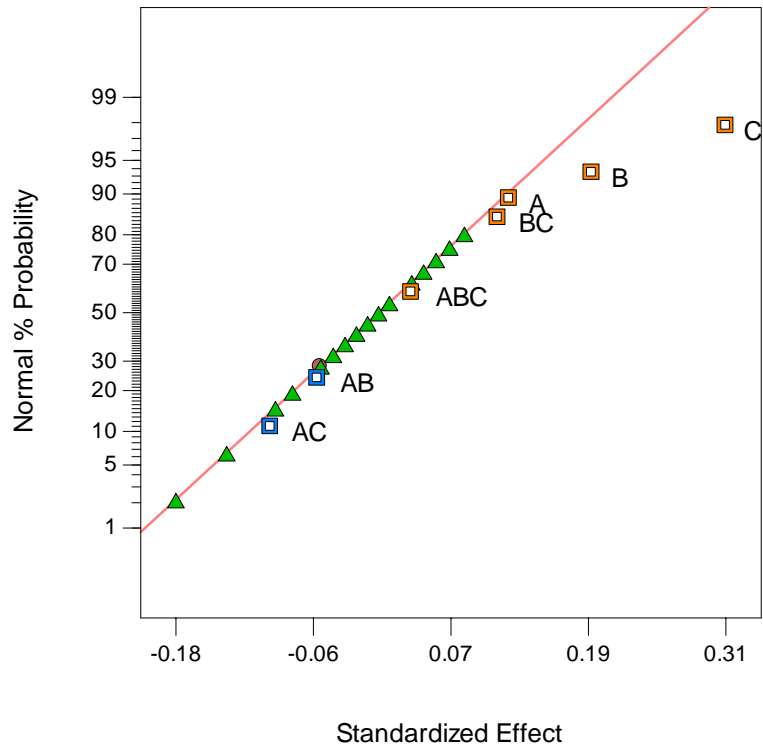


Design-Expert® Software
Log10(gubitak mase)

▲ Error from replicates

- A: poroznost
- B: primjenjena sila
- C: vrsta prevlake
- Positive Effects
- Negative Effects

Normal Plot



Grafička interpretacija rezultata faktora utjecjnosti na prevlake METACERAM 28085 i METACERAM 28095.

Use your mouse to right click on individual cells for definitions.

Response 1 gubitak mase

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	signif.
Model	0.037	7	5.288E-003	7.31	0.0005	signif.
<i>A-poroznost</i>	<i>9.761E-005</i>	<i>1</i>	<i>9.761E-005</i>	<i>0.14</i>	<i>0.7181</i>	
<i>B-primjenjena sila</i>	<i>6.541E-003</i>	<i>1</i>	<i>6.541E-003</i>	<i>9.05</i>	<i>0.0083</i>	
<i>C-vrsta prevlake</i>	<i>0.029</i>	<i>1</i>	<i>0.029</i>	<i>39.67</i>	<i>< 0.0001</i>	
<i>AB</i>	<i>3.682E-006</i>	<i>1</i>	<i>3.682E-006</i>	<i>5.093E-003</i>	<i>0.9440</i>	
<i>AC</i>	<i>1.664E-004</i>	<i>1</i>	<i>1.664E-004</i>	<i>0.23</i>	<i>0.6379</i>	
<i>BC</i>	<i>1.514E-003</i>	<i>1</i>	<i>1.514E-003</i>	<i>2.09</i>	<i>0.1672</i>	
<i>ABC</i>	<i>1.504E-005</i>	<i>1</i>	<i>1.504E-005</i>	<i>0.021</i>	<i>0.8871</i>	
Pure Error	0.012	16	7.229E-004			
Cor Total	0.049	23				

The Model F-value of 7.31 implies the model is significant. There is only a 0.05% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case B, C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.027	R-Squared	0.7619
Mean	0.067	Adj R-Squared	0.6577
C.V. %	39.91	Pred R-Squared	0.4643
PRESS	0.026	Adeq Precision	6.869

The "Pred R-Squared" of 0.4643 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.6577.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 6.869 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient		Standard df	95% CI Error	95% CI		VIF
	Estimate				Low	High	
Intercept	0.067		1	5.488E-003	0.056	0.079	
A-poroznost	2.017E-003		1	5.488E-003	-9.618E-003	0.014	1.00
B-primjenjena sila	0.017		1	5.488E-003	4.874E-003	0.028	1.00
C-vrsta prevlake	-0.035		1	5.488E-003	-0.046	-0.023	1.00
AB3.917E-004	1	5.488E-003		-0.011	0.012	1.00	
AC2.633E-003	1	5.488E-003		-9.001E-003	0.014	1.00	
BC-7.942E-003	1	5.488E-003		-0.020	3.693E-003	1.00	
ABC	7.917E-004		1	5.488E-003	-0.011	0.012	1.00

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned}
 \text{gubitak mase} &= \\
 &+0.067 \\
 &+2.017E-003 \quad * A \\
 &+0.017 \quad * B \\
 &-0.035 \quad * C \\
 &+3.917E-004 \quad * A * B \\
 &+2.633E-003 \quad * A * C \\
 &-7.942E-003 \quad * B * C \\
 &+7.917E-004 \quad * A * B * C
 \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

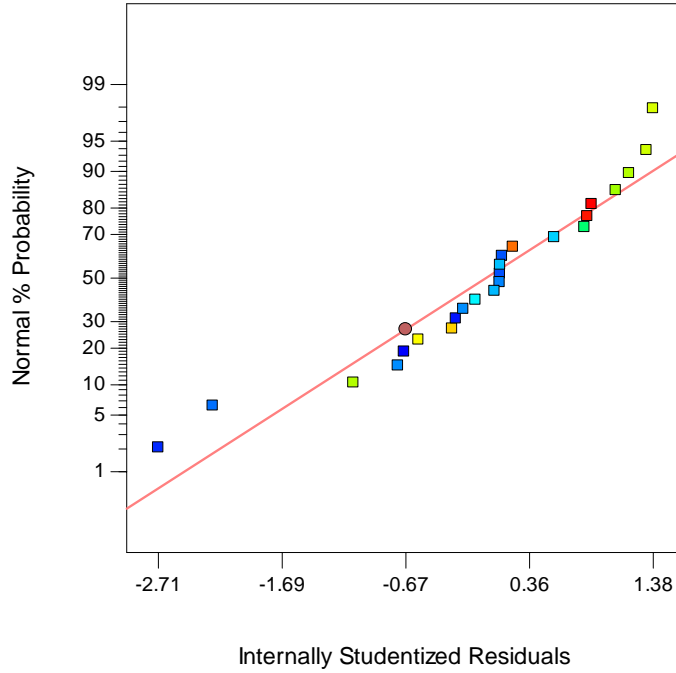
$$\begin{aligned}
 \text{gubitak mase} &= \\
 &+0.067367 \\
 &+2.01667E-003 \quad * \text{poroznost} \\
 &+0.016508 \quad * \text{primjenjena sila} \\
 &-0.034567 \quad * \text{vrsta prevlake} \\
 &+3.91667E-004 \quad * \text{poroznost} * \text{primjenjena sila} \\
 &+2.63333E-003 \quad * \text{poroznost} * \text{vrsta prevlake} \\
 &-7.94167E-003 \quad * \text{primjenjena sila} * \text{vrsta prevlake} \\
 &+7.91667E-004 \quad * \text{poroznost} * \text{primjenjena sila} * \text{vrsta prevlake}
 \end{aligned}$$

Design-Expert® Software
gubitak mase

Color points by value of
gubitak mase:



Normal Plot of Residuals



Design-Expert® Software
gubitak mase

▲ Error from replicates

A: poroznost

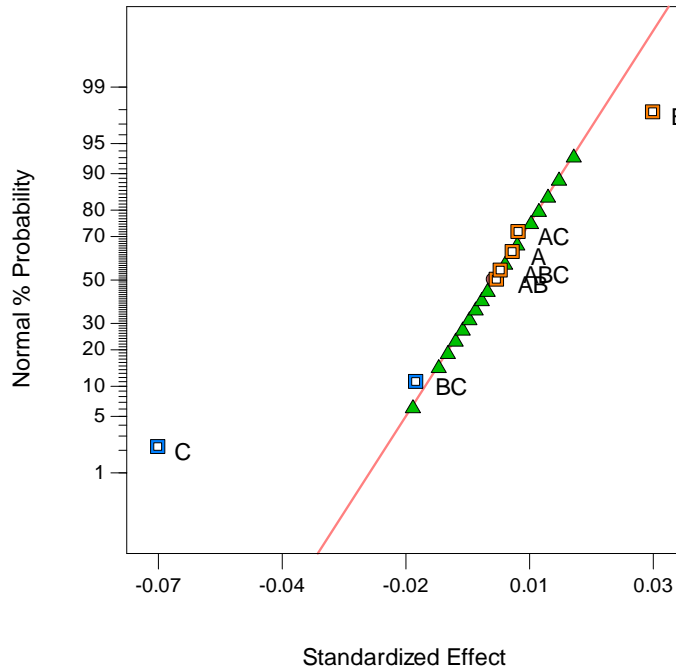
B: primjenjena sila

C: vrsta prevlake

■ Positive Effects

■ Negative Effects

Normal Plot



Grafička interpretacija rezultata faktora utjecajnosti na prevlake METACERAM 28030 i METACERAM 28095.

Use your mouse to right click on individual cells for definitions.

Response 1 gubitak mase

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	signif.
Model	3.517E-003	7	5.024E-004	3.74	0.0137	
<i>A-poroznost</i>	1.248E-003	1	1.248E-003	9.30	0.0076	
<i>B-primjenjena sila</i>	8.225E-004	1	8.225E-004	6.13	0.0249	
<i>C-vrsta prevlake</i>	1.010E-003	1	1.010E-003	7.53	0.0144	
<i>AB1.305E-005</i>		1	1.305E-005	0.097	0.7592	
<i>AC1.576E-004</i>		1	1.576E-004	1.17	0.2946	
<i>BC1.766E-004</i>		1	1.766E-004	1.32	0.2682	
<i>ABC</i>	8.855E-005	1	8.855E-005	0.66	0.4286	
Pure Error	2.148E-003	16	1.342E-004			
Cor Total	5.664E-003	23				

The Model F-value of 3.74 implies the model is significant. There is only a 1.37% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case A, B, C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.012	R-Squared	0.6209
Mean	0.039	Adj R-Squared	0.4550
C.V. %	29.49	Pred R-Squared	0.1470
PRESS	4.832E-003	Adeq Precision	5.272

The "Pred R-Squared" of 0.1470 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0.4550 as one might normally expect. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 5.272 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient	Standard df	95% CI Error	95% CI		VIF
	Estimate			Low	High	
Intercept	0.039	1	2.365E-003	0.034	0.044	
A-poroznost	7.212E-003	1	2.365E-003	2.199E-003	0.012	1.00
B-primjenjena sila	5.854E-003	1	2.365E-003	8.409E-004	0.011	1.00
C-vrsta prevlake	-6.488E-003	1	2.365E-003	-0.012	-1.474E-003	1.00
AB-7.375E-004	1	2.365E-003	-5.751E-003	4.276E-003	1.00	
AC-2.562E-003	1	2.365E-003	-7.576E-003	2.451E-003	1.00	
BC2.713E-003	1	2.365E-003	-2.301E-003	7.726E-003	1.00	
ABC	1.921E-003	1	2.365E-003	-3.092E-003	6.934E-003	1.00

Final Equation in Terms of Coded Factors:

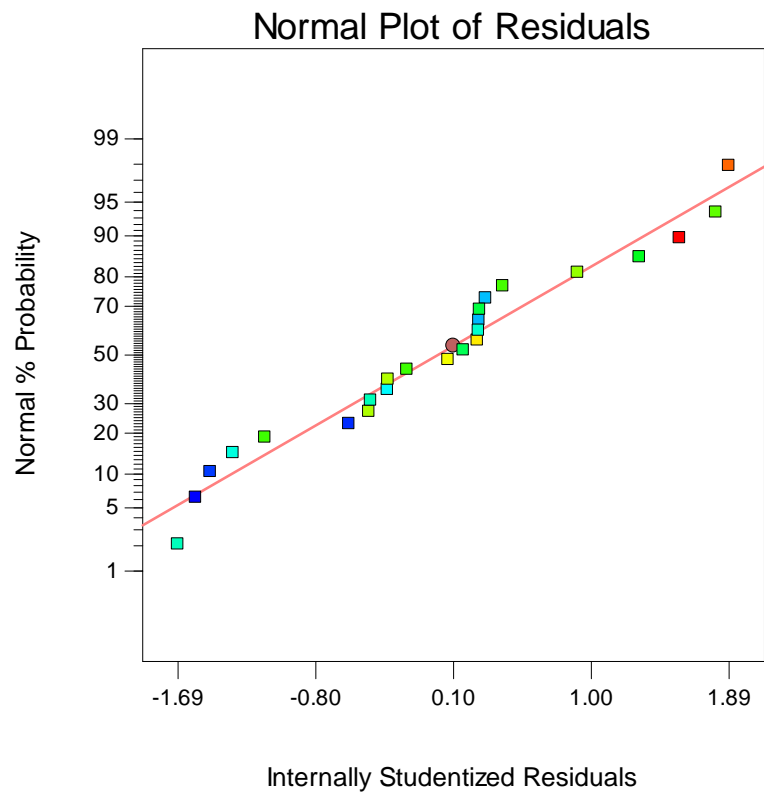
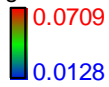
$$\begin{aligned}
&\text{gubitak mase} &&= \\
&+0.039 && \\
&+7.212E-003 &&* A \\
&+5.854E-003 &&* B \\
&-6.488E-003 &&* C \\
&-7.375E-004 &&* A * B \\
&-2.562E-003 &&* A * C \\
&+2.713E-003 &&* B * C \\
&+1.921E-003 &&* A * B * C
\end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned}
&\text{gubitak mase} &&= \\
&+0.039288 && \\
&+7.21250E-003 &&* poroznost \\
&+5.85417E-003 &&* primjenjena sila \\
&-6.48750E-003 &&* vrsta prevlake \\
&-7.37500E-004 &&* poroznost * primjenjena sila \\
&-2.56250E-003 &&* poroznost * vrsta prevlake \\
&+2.71250E-003 &&* primjenjena sila * vrsta prevlake \\
&+1.92083E-003 &&* poroznost * primjenjena sila * vrsta prevlake
\end{aligned}$$

Design-Expert® Software
gubitak mase

Color points by value of
gubitak mase:



Design-Expert® Software
gubitak mase

▲ Error from replicates

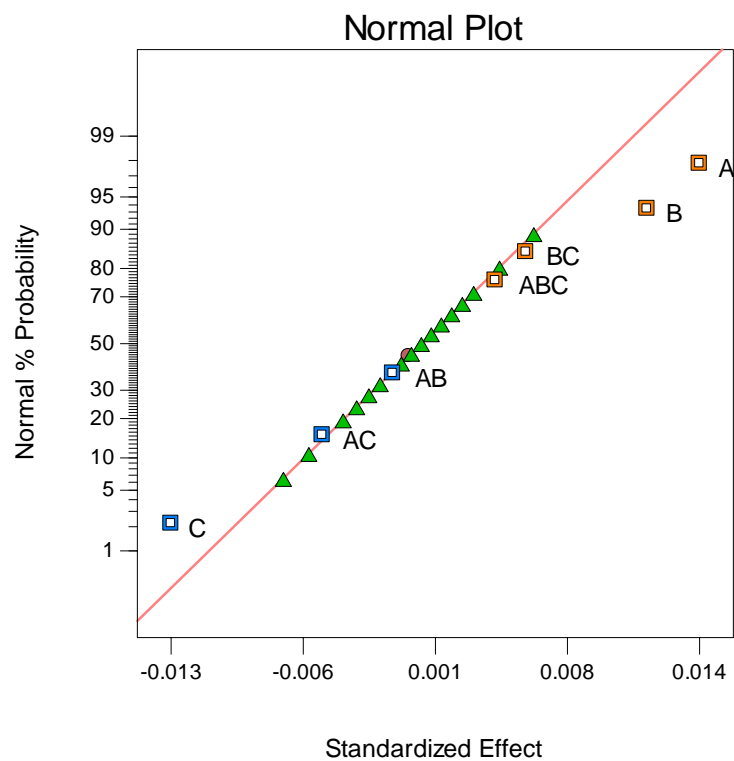
A: poroznost

B: primjenjena sila

C: vrsta prevlake

■ Positive Effects

■ Negative Effects



ŽIVOTOPIS

Denis Prusac, rođen u Zadru 01. 05. 1968. godine, gdje je završio osnovnu školu i gimnaziju matematičko informatičkog smjera. Diplomirao je 1996. godine na FSB-u Sveučilišta u Zagrebu. Iste godine izabran je za mlađeg asistenta na Zavodu za materijale pri Katedri za materijale i tribologiju, gdje ostaje do kraja 1998. godine. Od 1999. do 2001. godine nalazi se na Zavodu za zavarene konstrukcije, Katedra za zaštitu materijala.

Tijekom rada na fakultetu aktivno sudjeluje na projektu 120 – 138 «Tribologija» (voditelj prof.dr.sc. Vinko Ivušić). Držao je vježbe iz kolegija: Materijali I, Materijali II, Materijali III i Tribologija. Kao koautor sudjeluje u nekoliko znanstveno – istraživačkih radova.

U Laboratoriju za analizu metala radio je na uređaju Spectrumat 750 GDS (omogućuje dobivanje kemijskog sastava metala kao i njihovu profilnu analizu).

Od 2001. godine radi u Tehničkoj školi u Zadru kao nastavnik strojarske grupe predmeta.

BIOGRAPHY

Denis Prusac was born on 1 st May 1968. in Zadar where he finished primary and grammar school.

He graduated on Faculty of Mechanical Engineering and Naval Arhitecture, the University of Zagreb. At the same year he was appointed for a junior assistant at the Department of Materials, on the Chair of Materials and Tribology, and he remained there till the end of 1998. From 1999. till 2001. he worked at the Department of Welded Structures, the Chair of Materials Protection. While on faculty he was actively participating in the project «120 – 138» concerning «Tribology» (the head of the project was prof.dr.sc. Vinko Ivušić).

He was teaching in course of practical training in subjects: Materials I, Materials II, Materials III and Tribology.

As a co – author he has been participating in several scientific – research projects.

In the Laboratory of metal analysis he worked on a Spectrumat 750 GDS device (it enables getting chemical composition of metals as well as their profile analysis).

He has been working in Technical school in Zadar since 2001. as a teacher of various mechanical engineering subjects.