

Izrada tijela električne gitare od metalne pjene

Lukač, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2012

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:984071>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Lukač

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Gojko Marić, dipl. ing.

Student:

Josip Lukač

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru Doc. dr. sc. Gojku Mariću na pomoći i podršci tijekom izrade diplomskog rada, graditelju instrumenata Bojanu Radoniću, dipl. ing. arh., na izradi gitare te brojnim stručnim savjetima i uloženom trudu, Miranu Radoniću na pomoći pri studijskom snimanju gitare, direktoru tvrtke Kapri d.o.o. Krešimiru Šparavecu, dipl. ing. str., što je omogućio obradu rezanja vodenim mlazom, studijskom glazbeniku Zoranu Vicebanu na testiranju gitare, gospodinu Zdenku Halapiru na prostoru za snimanje i svima koji su mi bili podrška za vrijeme studiranja.

Josip Lukač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. GITARA	3
2.1. Razvoj gitare	3
2.2. Električna gitara	6
2.2. Postupak izrade električne gitare	10
3. POTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA.....	13
3.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini	15
3.2. Plinom oslobođene čestice u polučvrstoj fazi	16
3.3. Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera	18
3.4. Taloženje materijala na ćelijaste praobljke	19
3.5. Ubrizgavanje plina u taljevinu	20
4. SVOJSTVA METALNIH PJENA	21
4.1. Krutost.....	23
4.2. Tlačna čvrstoća	25
4.3. Vlačna čvrstoća	28
4.4. Sendvič konstrukcije	30
4.5. Toplinska svojstva.....	31
4.6. Zvučna svojstva.....	32
4.7. Prigušenje vibracija.....	33
5. PRIMJENA METALNIH PJENA.....	34
6. EKSPERIMENTALNI DIO	37
6.1. Idejni projekt	37
6.2. Izrada električne gitare.....	38
6.2.1. Postupak rezanja vodenim mlazom	41
6.2.2. Obrada tijela gitare.....	44
6.2.3. Usporedba tijela gitare od aluminijske pjene s drvenim tijelom gitare.....	48
6.2.4. Sklapanje gitare.....	49
6.3. Ispitivanje gitare.....	53
6.3.1. Ispitivanje zvučnih svojstava gitare	53
6.3.2. Audio i video snimanje gitare s profesionalnim studijskim glazbenikom	63
7. ZAKLJUČAK.....	67
PRILOZI.....	68
LITERATURA.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz strukture kosti (A) i metalne pjene (B)	1
Slika 2. Električna gitara	2
Slika 3. Dijelovi klasične gitare	4
Slika 4. Dijelovi električne gitare.....	6
Slika 5. Električna gitara s dva vrata Gibson eds-1275 SG	9
Slika 6. Različite električne gitare.....	9
Slika 7. Vrat električne gitare.....	10
Slika 8. Tijelo električne gitare	11
Slika 9. Stablo metalnih pjena.....	13
Slika 10. Vrijednosti veličine ćelija i relativne gustoće	14
Slika 11. Proces nastajanja metalne ALPORAS pjene	15
Slika 12. Proces nastajanja FOAMINAL – ALULIGHT metalne pjene	16
Slika 13. Sendvič konstrukcije s jezgrom od metalne pjene FOAMINAL-ALULIGHT	17
Slika 14. Proces preciznog lijevanja metalne pjene s otvorenim ćelijama.....	18
Slika 15. Proces nastajanja Ni metalne pjene (INCO pjena).....	19
Slika 16. Proces nastajanja metalne pjene ubrizgavanjem plina u taljevinu	20
Slika 17. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena; neosno opterećeno na tlak	23
Slika 18. Dijagrami "naprezanje-deformacija" metalnih pjena	25
Slika 19. Dijagrami "naprezanje – deformacija" pri tlačnom opterećenju Al pjena	26
Slika 20. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći	27
Slika 21. Ovisnost granice stlačivanja pjene i tečenja materijala ćelija o gustoći	27
Slika 22. Dijagram naprezanje – istezanje Al pjena.....	28
Slika 23. Krivulja naprezanje – istezanje s udjelom lomne površine ALPORAS pjene.....	29
Slika 24. Odnos transverzalnog i longitudinalnog istezanja	29
Slika 25. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene	30
Slika 26. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al.....	32
Slika 27. Sendvič poluproizvodi od metalne pjene	35
Slika 28. Naplatak automobila s jezgrom od ALULIGHT pjene.....	35
Slika 29. Primjena metalne pjene u autoindustriji za ojačanje okvira	36
Slika 30. Izmjenjivač topline napravljen od DUOCEL Al-pjene.....	36
Slika 31. Ploča za izradu tijela gitare od ALPORAS aluminijske pjene.....	38
Slika 32. Princip izrade gitare Fender Telecaster.....	40
Slika 33. Kontura po kojoj će tijelo gitare biti izrezano vodenim mlazom.....	41
Slika 34. Rezanje vodenim mlazom (WJM)	42
Slika 35. Upravljačka konzola stroja Water Jet Sweden AB NC-3000	42
Slika 36. Tijelo električne gitare dobiveno rezanjem vodenim mlazom.....	43
Slika 37. Ploča nakon rezanja vodenim mlazom.....	43
Slika 38. Shema tijela Fendera Telecaster	44
Slika 39. Improvizirana glodalica s bušilicom za glodanje Al pjene	45
Slika 40. Glodalo korišteno za izradu Al i drvenog tijela	45
Slika 41. Tijelo gitare s drvenim umetcima	46
Slika 42. Korišteno tekuće PU ljepilo	46
Slika 43. Šablona od pleksiglasa za glodanje utora gitare ručnom obradom	47
Slika 44. Glodanje utora na tijelu gitare pomoću šablone.....	47
Slika 45. Tijelo gitare od Al pjene dobiveno nakon obrade.....	48
Slika 46. Tijelo drvene električne gitare koje će poslužiti za usporedbu.....	48

Slika 47. Tijelo gitare bez vrata	49
Slika 48. Tijelo gitare nakon montiranja drvenog vrata.....	49
Slika 49. Vrat Fenedera Telecaster	51
Slika 50. Princip frekvencija po kojima se štimaju žice gitare	51
Slika 51. Gitara od aluminijske pjene	52
Slika 52. Uspoređene gitare od drveta i aluminijske pjene	52
Slika 53. Karakteristike zvučnika na kojem je provedeno testiranje	53
Slika 54. Karakteristike mikrofona na kojem je provedeno testiranje	54
Slika 55. Dijagram duboke E-žice preko magneta	55
Slika 56. Dijagram duboke E-žice preko mikrofona i zvučnika	56
Slika 57. Dijagram A-žice preko magneta	56
Slika 58. Dijagram A-žice preko mikrofona i zvučnika.....	57
Slika 59. Dijagram D-žice preko magneta	57
Slika 60. Dijagram D-žice preko mikrofona i zvučnika.....	58
Slika 61. Dijagram G-žice preko magneta	58
Slika 62. Dijagram G-žice preko mikrofona i zvučnika.....	59
Slika 63. Dijagram B-žice preko magneta	59
Slika 64. Dijagram B-žice preko mikrofona i zvučnika.....	60
Slika 65. Dijagram visoke E-žice preko magneta	60
Slika 66. Dijagram visoke E-žice preko mikrofona i zvučnika.....	61
Slika 67. Titranje gitare pri frekvenciji od 160,1 Hz	62
Slika 68. Titranje gitare pri frekvenciji od 369,74 Hz	62
Slika 69. Titranje gitare pri frekvenciji od 55,3 Hz	62
Slika 70. Improvizirani tonski studio	63
Slika 71. Digitalni studio za snimanje Korg D16.....	64
Slika 72. Tehnika potrebna za snimanje.....	64
Slika 73. Tone King Galaxy pojačalo	65
Slika 74. Tonsko i video snimanje gitare	65
Slika 75. Dijagram glasnoće i tona.....	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti svojstava metalnih pjena	21
Tablica 2. Izrazi za izračunavanje svojstava metalnih pjena	22
Tablica 3. Mogućnosti primjene metalnih pjena	34
Tablica 4. Usporedba masa tijela gitara	48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	ploština
C_p	J/kgK	specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku
E	GPa	modul elastičnosti
E_f	GPa	modul savitljivosti
f	Hz	frekvencija
F	N	sila
F_m	N	maksimalna sila
G	GPa	modul smičnosti
H	HRC	tvrdoa
K_{IC}	$\text{MPa m}^{1/2}$	lomna žilavost
L	kJ/kg	latentna toplina taljenja
L_s	mm	razmak oslonaca
m	kg	masa
m		konstanta propagacije
R_d	MPa	dinamička izdržljivost
R_e	MPa	granica razvlačenja
R_{et}	MPa	granica stlačivanja
R_m	MPa	vlačna čvrstoća
R_{mt}	MPa	tlačna čvrstoća
R_{ms}	MPa	savojna čvrstoća
T	K	temperatura
T_m	K	talište
T_{\max}	K	maksimalna radna temperatura
T_{\min}	K	minimalna radna temperatura
W	mm^3	moment otpora
α	$1/\text{K}$	koeficijent toplinske rastezljivosti
v	m/s	brzina
V	mm^3	volumen
α_1	$\text{W/m}^2\text{K}$	lokalni koeficijent prijelaza topline
η		konstanta prigušenja
η^c	$\%$	faktor gubitka
λ	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti
ν		Poissonov faktor
σ	MPa	naprezanje
d	mm	veličina ćelija
ρ/ρ_s		relativna gustoća
ρ	kg/m^3	gustoća
ρ_s	kg/m^3	gustoća osnovnog materijala pjene

ε_D	mm/mm	deformacija pri zgušnjavanju
ε_f		vlačna duktilnost
η	%	faktor gubitka
R	Ω	električni otpor
σ	MPa	naprezanje
ε	%	deformacija
E/E_s		relativni modul elastičnosti
σ_v	MPa	vlačno naprezanje
ε_L	%	longitudinalno istezanje
ε_T	%	transverzalno istezanje
A_z	%	upijanje zvuka
U	J	deformacijska energija
G	dB	glasnoća zvuka

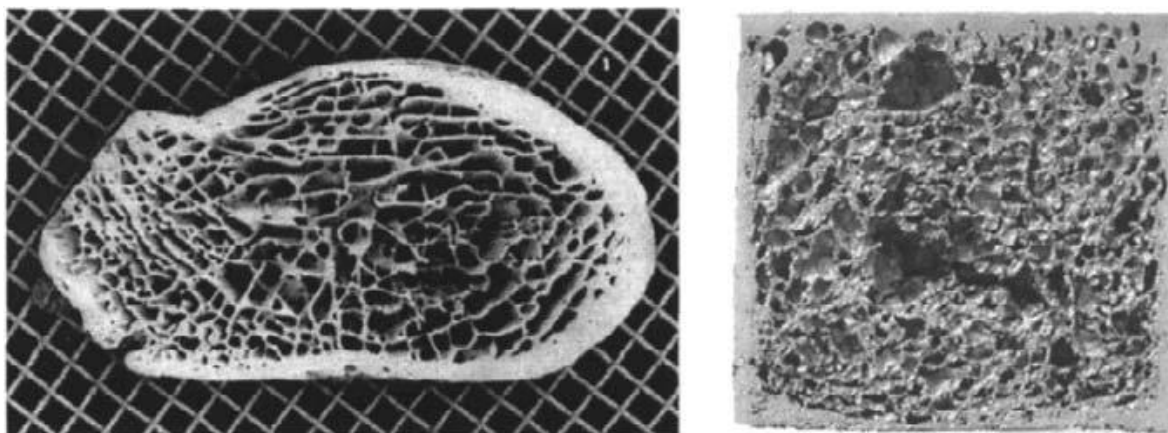
SAŽETAK

U radu je prikazana izrada tijela električne gitare od metalne pjene. Gitara kao glazbalo postoji još od starog vijeka, no električna gitara nastaje tek u 20. stoljeću. Za razliku od akustičnih gitara kod kojih ton nastaje vibriranjem žica čiji se efekt pojačava u rezonantnom šupljem dijelu gitare, kod električnih gitara zvuk se pojačava električnim putem pomoću magneta. Tijelo električne gitare radi se od punog drva jer ima nisku gustoću i svojstvo dobrog prigušenja vibracija. Metalne pjene nastale su oponašanjem svojstava prirodnih ćelijastih materijala kao što je drvo i imaju svojstva slična drvetu. Upravo zbog toga ispitana je mogućnost izrade tijela električne gitare od metalne pjene. U radu su opisani princip rada i dijelovi električne gitare. Zatim su opisana svojstva i primjeri primjene metalnih pjena. Izrađena je električna gitara s tijelom od metalne pjene i identična gitara s tijelom od drveta. Zatim su ispitivana zvučna svojstva napravljenih gitara te je donesen zaključak.

Ključne riječi: metalne pjene; električna gitara; izrada glazbenog instrumenta

1. UVOD

Današnjim razvojem tehnologije i uporabom novih oblika poznatih materijala došlo je do razvoja metalnih pjena. Metalne pjene su novi oblik materijala koji je nastao oponašanjem strukture i svojstava prirodnih ćelijastih materijala kao što su drvo, kamen, kost, koralj itd.. čija su svojstva prilagođena okolnim uvjetima. Zato metalne pjene predstavljaju zanimljivo i još nedovoljno istraženo područje na kojem je moguć daljnji razvoj i napredak. Temeljna svojstva im proizlaze iz vrste osnovnog materijala ćelija, oblika ćelija (otvorene i zatvorene) te načina proizvodnje. Osnovna svojstva su im visoka poroznost od 40 do 90 %, izrazito niska gustoća, prilagodljiva toplinska svojstva, vatrootpornost, dobra električna vodljivost, odlično prigušuje energiju udara, vibracija i zvuka, visoka krutost kod sendvič konstrukcija. Koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova vozila, letjelica, brodova, u graditeljstvu, itd..



Slika 1. Prikaz strukture kosti (A) i metalne pjene (B) [1]

U posljednjih 40 godina izvode se brojni pokušaji pjenjenja metala ili proizvodnje porozne metalne strukture, ali nisu došli u širu primjenu zbog relativno visoke cijene i proizvodnje pjenastog materijala loše kvalitete. Metalne pjene nude zanimljivu perspektivu zbog kombinacije svojstava koje su povezane sa svojstvima metala s jedne strane i poroznom strukturom s druge strane.

Metalne pjene se mogu proizvesti iz gotovo svih vrsta materijala koji postoje u obliku praha, ali danas su komercijalno dostupne uglavnom metalne pjene na bazi aluminija (Al) i nikla (Ni). Po posebnoj narudžbi proizvode se i pjene na bazi olova (Pb), magnezija (Mg), cinka (Zn), bakra (Cu), titana (Ti), čelika, bronce, čak i zlata (Au).

U ovom radu izraditi će se i ispitati ideja izrade tijela električne gitare od metalne pjene. Obzirom da su metalne pjene još uvijek nisu u potpunosti našle svoje mjesto u široj primjeni, a posjeduju zanimljiva svojstva, mogućnost izrade pjenjenjem prekursora u kalupu i izbor gustoće pjene. Pri izradi tijela električne gitare do izražaja bi došla vrlo niska gustoća metalnih pjena i odlična apsorpcija vibracija. Upravo zbog toga aluminijska pjena mogla bi biti zamjena za drvo koje se najčešće koristi za izradu tijela gitare.



Slika 2. Električna gitara [2]

2. GITARA

2.1. Razvoj gitare

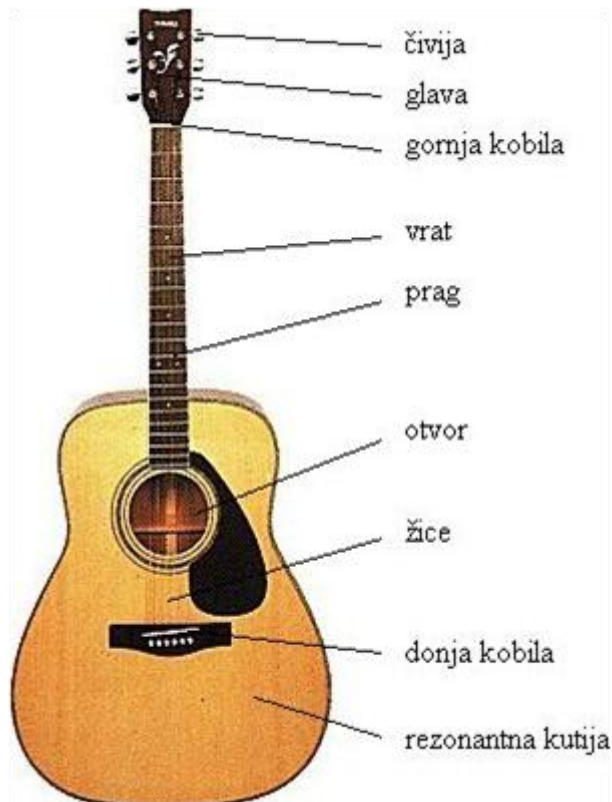
Gitara kao glazbalo postoji još od starog vijeka, no prvi pravi pisani spomen o gitari potječe iz 14. stoljeća. U Europu su je donijeli Arapi za vrijeme njihovih osvajanja od 8. do 13. stoljeća. U današnjem obliku vjerojatno je nastala u Španjolskoj gdje se je od 16. stoljeća svirala među srednjom i nižom klasom aristokracije. Instrument u obliku broja 8 u Europi se prvi put pojavio u Španjolskoj. U 17. stoljeću gitara se je već svirala po čitavoj Europi, a današnje akustične i električne gitare proširile su se čitavim svijetom

Hrvatska riječ gitara, engleski oblik "guitar", njemački "gitarre", francuski "guitare" kao i brojne druge europske izvedenice temelje se na španjolskoj riječi "guitarra" koja potječe od andaluzijskog arapskog pojma "qitara", dok podrijetlo te riječi mnogo dublje u stari vijek. Latinski oblik "cithara" na kojoj se temelji arapska riječ proizišao je iz starogrčkog oblika "kithara", dok se ta riječ konačno temelji na perzijskoj riječi tar što znači "žica". Akustična gitara se najčešće povezuje sa Španjolskom pa se zbog toga i naziva španjolskom gitarom.

Gitara je žičani instrument s tipično 6 žica, zvuk se proizvodi okidanjem žica desnom rukom dok se pritiskanjem žica uz vrat gitare lijevom rukom mijenja visina tona. Glazbalo vuče antičke korijene i koristi se u gotovo svim glazbenim stilovima. Najčešći oblici gitare su sa šest žica, međutim također postoje i sa četiri, sedam, osam, deset i dvanaest žica. Gitara je prepoznata kao jedna od primarnih instrumenata u bluesu, countryu, flamencu, rocku i mnogim oblicima pop glazbe. Također se koristi i kao klasični solo instrument. Sviranjem akustične gitare, ton se dobiva vibracijom žice ili se može koristiti pick-up (magnet) koji prevodi titranje žice u električni signal koji zatim putuje do pojačala i pretvara se u zvučni. Akustična se gitara nije pretjerano mijenjala do 20. stoljeća, kada se za potrebe plesnih skupina počinju upotrebljavati metalne žice po uzoru na banjo. To je početak uzdizanja gitare na vodeće mjesto u popularnoj glazbi, što s vremenom dovodi do izuma polu-akustične gitare, kao i verzije potpune električne gitare. Kasnije u 20. stoljeću, električne gitare imaju potpuni utjecaj u popularnoj glazbenoj kulturi.

Gitare su se tradicionalno izrađivale od drveta, sa žicama od životinjskog crijeva, a u novije vrijeme od najlona ili čelika. Glazbalo su izrađivali i popravljali luthieri (netko tko izrađuje ili popravlja instrumente sa žicama, riječ "luthier" dolazi od francuske riječi za lutnja, "luth").

Tijelo klasične gitare - jedno je od najvažnijih dijelova gitare, kod klasične gitare tijelo se naziva se glasnjača ili rezonantna kutija. Napravljena je iz dva dijela od materijala smreke, omorike, cedrovine ili mamutovca, koji se režu te na kraju lijepe i oblikuju. Kako bi se tijelo rezonantne kutije ojačalo u unutrašnjost se lijepe letvice u posebne položaje koji su vrlo bitni za zvuk gitare. Obod gitare radi se od drveta trešnje, oraha, mahagonija, javora ili platine, koji se reže na trake te se savijaju prema kalupu. Čitavom dužinom oboda s gornje i donje strane lijepe se drvene trokutaste letvice kako bi se što bolje povezala rezonantna kutija s ostalim dijelovima. Dno tijela gitare izrađuje se najčešće od istog drveta kao i obod. Na prednjoj strani rezonantne kutije nalazi se okrugla rupa, te most i hvataljka za žice (kobila) . Ukrasni detalji od drveta ili plastike koriste se kako bi se zaštitili zaobljeni dijelovi tijela.



Slika 3. Dijelovi klasične gitare [2]

Vrat - se najčešće izrađuje od mahagonija ili cedrovine. Kako bi se pojačao, dužinom vrata umeće se traka od tvrdog drveta. Na prednjoj strani nalazi se dvadeset pragova i njihove oznake. Na kraju vrata nalazi se glava gitare i kobilica. Gitara se ugađa pomoću pužnih vijaka, pomoću kojih se mijenja napetost žica. Vrat se spaja s tijelom gitare pomoću lepezastog spoja te se potom lijepi.

Žice - u samome početku žice za gitaru tradicionalno su se izrađivale od životinjskog crijeva, a u novije vrijeme od najlona i čelika. Žice od najlona upotrebljavaju se u klasičnoj glazbi, dok se žice od čelika najčešće koriste u popularnoj glazbi. Kako bi svirali, glazbenici se služe prstima ili noktima za trzanje žica, dok neki također koriste i trzalicu.

VRSTE GITARA:

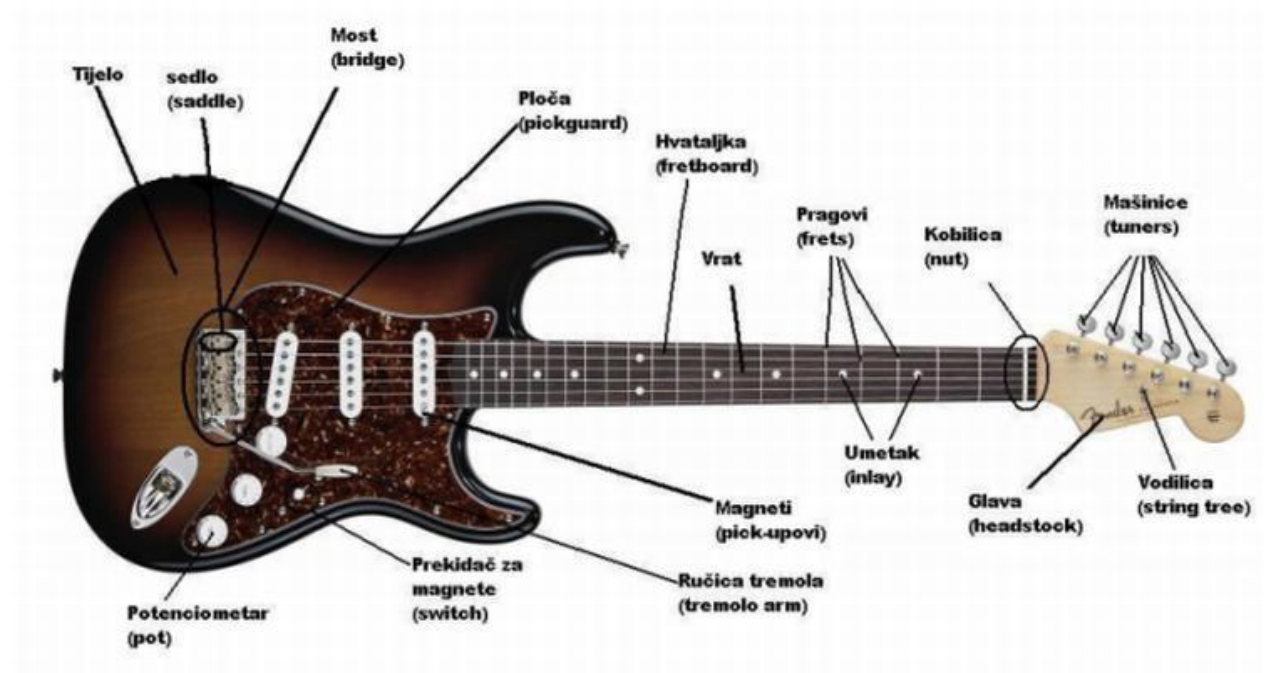
- **Klasična gitara** (6 žica) - poznata i kao španjolska gitara. Prve su tri žice od najlona, dok su tri zadnje od najlona omotanog tankom metalnom žicom (bronca, srebro). Vibriranje žica se pojačava u rezonantnom šupljem tijelu gitare. Popularna za klasičnu, narodnu i flamenco glazbu;
- **Akustična gitara** (6 ili 12 žica) - slična klasičnoj, ali s čeličnim žicama. Popularna za blues, narodnu i rock glazbu;
- **Elektroakustična gitara** - akustična gitare sa šupljim tijelom i pridodanim piezoelektričnim elementom (češće) ili mikrofonom koji služi za stvaranje električnog signala;
- **Poluakustična gitara** (obično 6 žica) - hibrid između akustične i električne gitare. Tijelo je šuplje i posjeduje elektromagnete. Proizvodi karakterističan topli, meki zvuk. Popularna za jazz i rock glazbu;
- **Električna gitara** (6, 7, 8 ili 12 žica) - zvuk se pojačava električnim putem pomoću elektromagneta (pick-upa), tako da električna gitara za razliku od akustične ima tijelo načinjeno od punog drva. Razvila se u 20. stoljeću i popularizirala kroz blues, rock i heavy metal glazbu;
- **Električna bas gitara** (4, 5, 6, 8 ili više žica) - niži raspon frekvencija od električne gitare, u bendu uz bubnjeve stvara ritamsku strukturu glazbe, iako se ponekad koristi kao i solo instrument.

2.2. Električna gitara

Električna gitara je glazbalo moderne glazbe kao što je rock, metal, punk, rock and roll itd., ali primjenjuje se i u ostalim žanrovima (blues, jazz...).

Za razliku od klasične gitare koristi elektromagnetske pick-upove (magnete) koji "prikupljaju" titranje žice i pretvaraju ih u signale koje šalju pojačalu. Električne gitare mogu biti šupljih ili punih tijela. Najpoznatije marke su Fender, Gibson, Ibanez, Jackson... Neke od njih imaju tremolu odnosno ručku kojom se ručno natežu ili otpuštaju lagano sve žice i tako stvaraju vibriranje tona. Taj se efekt uglavnom koristi u bluesu i jazzu.

Dijelovi električne gitare su: glava, mašnice, vodilica, kobilica (nut), pragovi, vrat, hvataljka, ploča (pickguard), magneti (pick-upovi), prekidač za magnete (pick-up switch), tremolo ručica, potencijometri, most (bridge), sedlo i tijelo [slika 4];



Slika 4. Dijelovi električne gitare [3]

- **Tijelo električne gitare** je dio gitare na kojem su smješteni magneti, most itd.. To je najčešće komad drveta (koriste se razne vrste drva, poput mahagonija, jasena (ash), johe (alder), baswooda (lipe), javora (maple) itd.), koji je temelj za spajanje svih ostalih dijelova. Postoje više vrste lakova za tijelo, koji utječu na to kako će sama gitara "disati", ali osnovni cilj je zaštita od vlage;

- **Most** može biti pokretni (floating) ili fiksni, a na njemu se nalaze sedla pomoću kojih podešavamo visinu žica i intonaciju gitare;
- **Ploča** je dio na kojem se nalaze magneti i potenciometri;
- **Magneti** (pick-upovi) prevode titranje žice u električni signal koji zatim putuje do pojačala i pretvara se u zvučni. Postoje dvije vrste magneta: single coilovi (jedna zavojnica) i humbuckeri (dvije spojene zavojnice, te za razliku od single coilova, ne šume). Magneti su statički dijelovi električnih gitara, sastoje se od kućišta u kojem se nalazi stalni magnet i zavoji lak-žice (veći broj zavoja). Vibracije okinute žice u magnetskom polju induciraju stvaranje napona u namotaju magneta. **Pasivni magneti** nemaju potrebu za električnim napajanjem za rad. Povećanjem broja zavoja pojačava se izlazni signal i izobličuje dobiveni ton. Koriste se uz upotrebu čeličnih žica, a za akustične gitare sa plastičnim žicama se rabe tzv. “piezo-magnet” (koriste kristale za detekciju vibracija žica i pokrivaju veće područje frekvencija). **Aktivni magneti** imaju znatno manji broj zavoja, daju manji izlazni signal i impedanciju, te vrlo čist i rezak ton. Da bi se mali izlazni signal pojačao rabi se sklop za pojačavanje u vidu ugrađenog predpojačala kojem treba baterija, npr. kompaktna od 9 V, koja se nalazi negdje unutar tijela gitare;
- **Potenciometri** su kontrole za glasnoću i boju tona gitare (mutan ili bistar). Pomoću prekidača kombiniramo magnete, te dobivamo različite zvukove;
- **Vrat** se sastoji od više dijelova, a važno je spomenuti dva osnovna komada. Prvi je onaj koji leži u šaci svirača (na njega se stavljaju mašnice), a drugi dio, po kojem svirač pritišće žice prstima zove se hvataljka. Za prvi dio drva se uglavnom koriste javor i mahagonij, a za hvataljke se najčešće koriste ebanovina, palisandar (rosewood) i javor. Hvataljka ima i određeni radijus i oblik, koji se uglavnom određuje pomoću visine tona koji tvori onaj dio vrata koji nam leži u šaci. Na hvataljci se nalaze pragovi i umeci. Brojevi pragova na hvataljci su najčešće 21 (Fender), 22 (Gibson) ili 24 (Ibanez, Jackson i ostali moderni proizvođači). Rok trajanja pragova ovisi o vrsti materijala od kojeg su napravljeni, ali i o visini žica

(što su žice više postavljene, pragovi se brže troše) i o načinu sviranja, ako se puno zavija (bend-a) žica, isto se pragovi brže troše;

- **Umetci** su mali ukrasi koji uglavnom olakšavaju orijentaciju pri sviranju, tj. označavaju određene brojeve pragova (1., 3., 5., 7., 9., 12., 15. itd.), a postoje razni oblici i boje. Ispod hvataljke nalazi se šipka (truss rod) koja prolazi kroz vrat gotovo cijelom dužinom hvataljke, a njena uloga je da sprečava krivljenje vrata koje uzrokuju nategnute žice. Ovisno o debljini žica podešava se malim pomacima. Na glavi gitare nalaze se mašnice i vodilice. Kroz mašnice se provlače i štimaju žice. Postoje obične mašnice, ali i one s mogućnošću zaključavanja (locking tuneri), koje imaju drugačiji mehanizam, te bolje drže žice naštimanima;
- **Vodilice** služe da povećavaju tenziju između kobilice i glave, a koriste se uglavnom na gitarama koje imaju šest mašnica u nizu;
- **Kobilica** usmjerava žice po hvataljci, a izrađuje se od više vrsta materijala (grafitni, koštani i na jeftinim gitarama plastični).

Električne gitare razlikuju se ne samo po vanjskom izgledu, već i po performansama (odnosno po pick-up konfiguraciji), pa se tako neke više koriste za žestoku rock svirku. Postoji nekoliko podjela električnih gitara, a najvažnije su: po broju "rogova", postoje single cutaway i double cutaway gitare, te po broju vratova i žica. Najviše gitara ima jedan vrat sa šest žica, no postoje i gitare sa dva vrata (najpoznatija je Gibson eds-1275 SG koju je Page koristio za sviranje balade "Stairway to heaven" uživo), te gitare sa sedam žica (za vrlo tvrdu svirku) koje je malo teže svirati od onih sa šest žica, te gitare sa dvanaest žica. Poseban slučaj jest Gibson eds-1275 SG jer na donjem vratu ima šest žica a na gornjem dvanaest.



Slika 5. Električna gitara s dva vrata Gibson eds-1275 SG [2]



Slika 6. Različite električne gitare [2]

Neki su modeli električnih gitara dosegli legendarne status, poput Fenderovog Stratocastera i Telecastera te Gibsonovih Les Paul i SG. Čak su postale i dio imagea nekih gitarista poput Jimmya Pagea (Les Paul), Jimia Hendrixa (Stratocaster) i Angusa Younga (SG), dok je B.B. King svojoj gitari čak dao i ime - Lucille.

2.3. Postupak izrade električne gitare

Vrat električne gitare najvažniji je dio električne gitare, razlikuje se od vrste gitare pa do njene namjene. Tako je vrat za bas gitaru dulji i u pravilu tanji a za ritam ili solo gitaru kraći. Izradi vrata za električnu gitaru treba posvetiti maksimalnu pažnju, jer o vratu ovisi cijela gitara. Vrat gitare u dijelu kojem se nalazi mehanizam za navijanje žica (headstock), ovisi o obliku gitare. Tako postoje legendarni Fenderovi modeli Stratocaster i Telecaster, te razni modeli od Ibanezovih i Yamahinih modela.

Vrat gitare izrađuje se od javora, a ploča na kojem su pragovi (fingerboard), zbog opterećenja koje stvaraju prsti prilikom sviranja obično se izrađuje od rosewood-a. Rosewood je zajednički naziv za egzotične vrste vrlo čvrstog drveta. Najpoznatiji su mahagonij, ebanovina, palisander. U vrat gitare se ugrađuje čelična šipka koja sprečava savijanje vrata gitare uslijed napinjanja žica. Šipka ima mogućnost podešavanja pomoću vijaka. Vrat se pomoću jačih vijaka i pločica pričvršćuje za tijelo gitare.



Slika 7. Vrat električne gitare [4]

Pragovi su jedan od važnijih dijelova na vratu gitare. Postavljaju se ovisno od duljine vrata i broja polja na gitari.

Dužina skale je razmak između nultog praga i konjića, obično je izražen u inčima ili cm, to je najčešće dužina od 60 do 70 cm. 12. prag gitare mora biti točno na polovici skale, u protivnom se ne može namjestiti intonacija gitare.

Tijelo gitare izrađuje se prema nacrtima ukoliko se želi kopirati poznate svjetske proizvođače. Ako se želi vlastiti izgled prema osobnoj zamisli, to se može napraviti ali treba poštivati određena pravila. To se prije svega odnosi na dimenzije ostalih dijelova gitare koji imaju standarde. Tijelo gitare najlakše je napraviti od suhog drveta (maksimalno 12 % vlage u drvu). Najpogodniji je orah, joha, lipa, jasen. Nisu pogodna teška drva (bukva, hrast, ili egzotična drva) jer je onda gitara teška i nepogodna za držanje kod sviranja.

Najprije se na kartonu skroji željeni oblik, te se iz jednog ili više komada izrezuje tračnom ili ubodnom pilom tijelo u grubom obliku, pazeći da je izrezani komad za oko 1 cm veći, kako bi se brušenjem dobio točan željeni oblik. Rupe za magnete, elektroniku, te utor za spajanje sa vratom najbolje je izrezati električnom glodalicom sa šablonom, a može se ubodnom pilom ili dlijetom. Debljina tijela gitare nije kritična ali ne bi smjela biti tanja od 40 mm, ukoliko nema mehanizam za vibrato efekt (tremolo). Ukoliko se želi postići taj efekt onda je minimalna debljina tijela 45 mm. Tijelo se nakon rezanja fino obrađuje brusnim papirom, ručno ili strojno, a završna obrada je lakiranje ili politiranje.



Slika 8. Tijelo električne gitare [4]

Nakon izrezivanja tijela i vrata, te fine obrade, na red dolazi **ugradnja elektronike**. Pod elektronikom potrebnom za funkcioniranje električne gitare, podrazumijevaju se magnetne zvučnice (pick-upovi), potenciometri za snagu i boju tona, preklopnik, kondenzatori i otpornici, izlazni utikač (OUT Jack), te oklopljeni kablovi za spajanje.

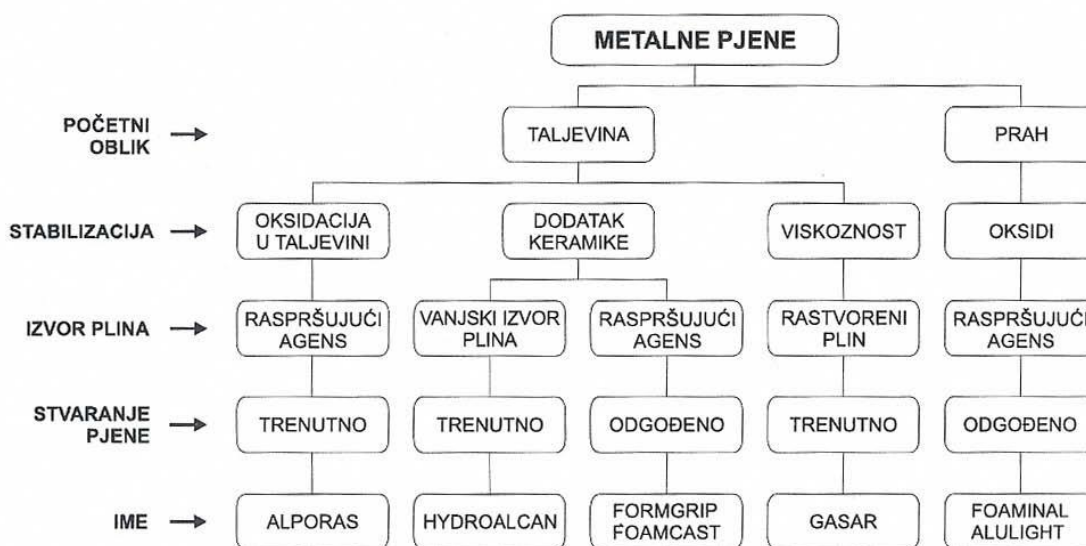
Da bi električna gitara bila električna, potrebna joj je dodatna oprema pomoću koje će ona davati zvuk preko audio uređaja (pojačala). Sistem pojačavanja signala radi na način da žice koje trzanjem proizvode titraje, prenose te titraje u magnetsku zvučnicu koja se nalazi ispod žica, a magnetne zvučnice pomoću titrajnih valova oklopljenim kablovima taj slab signal šalju u pojačalo. Ti vrlo slabi naponi reda nekoliko mV (milivolti), pojačavaju se u predpojačalu, i takvi se šalju pomoću miksera u pojačalo. Tu se pojačavaju i izlaze kao gotov signal iz zvučnika.

Neke gitare imaju već u sebi aktivnu elektroniku, (predpojačalo signala) pa im signal u predpojačalu ne treba pojačavati. Sam signal iz gitare može se raznim efektima (tremolo, vibrato, sustain, i drugim raznim izobličivačima zvuka) slati u pojačalo.

3. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA

Početne sirovine za proizvodnju metalnih pjena mogu biti u obliku taljevine ili praha. Upjenjivanje je moguće jedino iz tekuće faze tako da se i prah mora rastaliti, izvor plina je neophodan za stvaranje šupljina unutar rastaljenog metala. On može imati vanjski izvor, u taljevinu se može dodati raspršujući agens koji pospješuje pjenjenje ili je moguće dodavanje agensa u metalni prah. Očekuje se znatan napredak i razvoj metalnih pjena, uz povećanje njihovih udjela na tržištu. Kombinacijom više metala može se dobiti širok raspon svojstava, pa je moguće i prilagoditi materijal za točno određeni proizvod.

Potrebno je pronalaženje novih, djelotvornijih i bolje upravljivih procesa za proizvodnju metalnih pjena kako bi se postigla još bolja i točno određena svojstva.

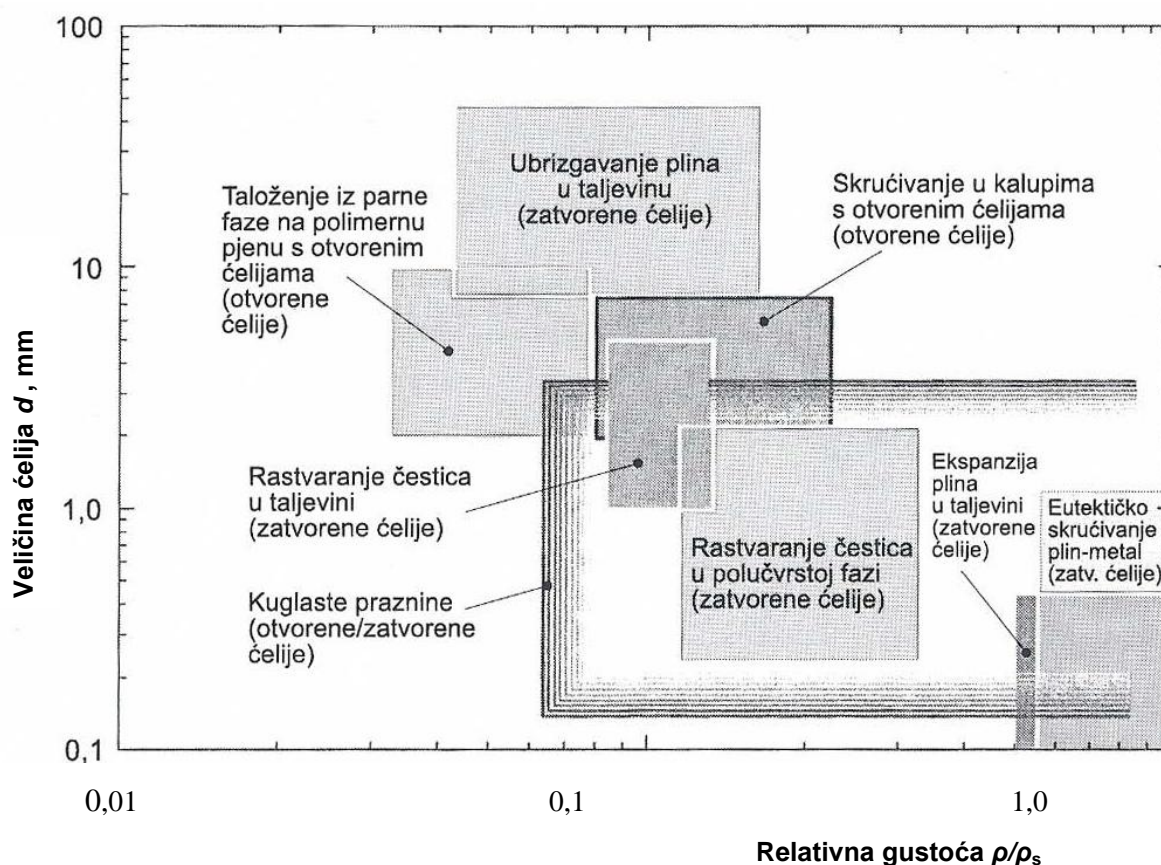


Slika 9. Stablo metalnih pjena [5]

Danas je poznato devet načina proizvodnje metalnih pjena od kojih je pet u komercijalnoj uporabi, dijele se na 4 područja:

- Pjena se oblikuje iz parne faze;
- Pjena se oblikuje elektrotaloženjem iz tekuće faze;
- Pjena se oblikuje u rastaljenoj fazi;
- Pjena se oblikuje u čvrstoj fazi.

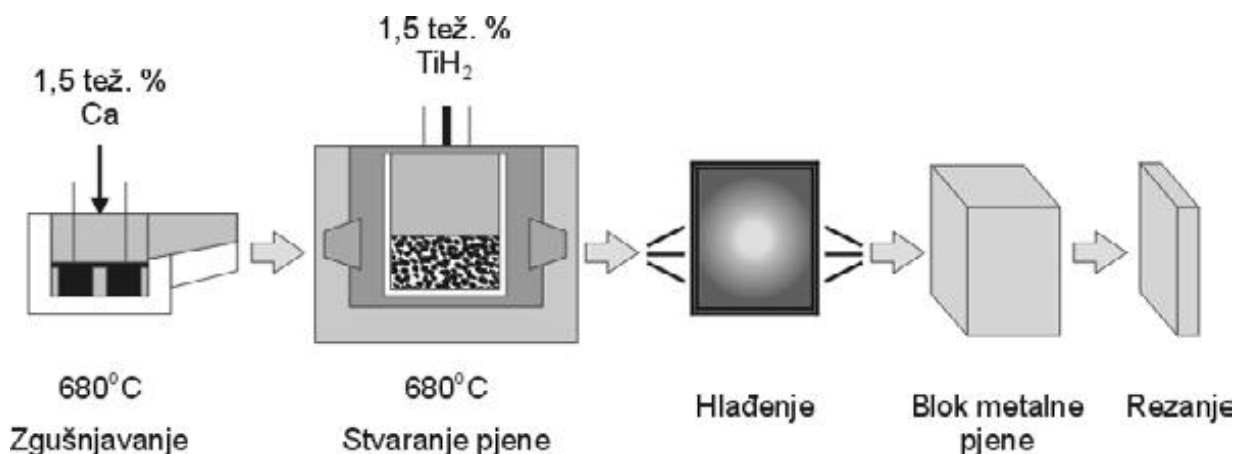
Svakim od ovih postupaka može se utjecati na stupanj otvorenosti ćelija i na relativnu gustoću. U radu se navodi tehnologija izrade plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini (ALPORAS pjena), kojom je dobivena ploča od metalne pjene korištena za izradu tijela električne gitare u eksperimentalnom djelu rada, a opisani su i ostali postupci proizvodnje metalnih pjena.



Slika 10. Vrijednosti veličine ćelija i relativne gustoće koje se mogu dobiti određenim proizvodnim postupkom [6]

3.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini (ALPORAS pjena)

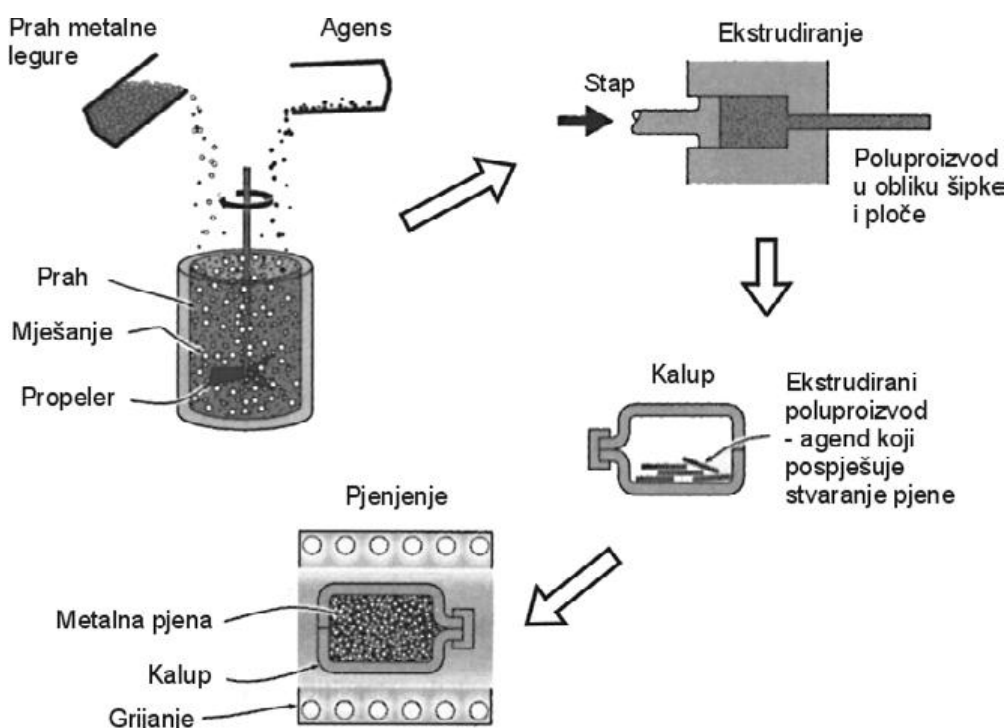
U ovom procesu taljevini se dodaje agens koji pospješuje upjenjivanje. Pod utjecajem povišene temperature on se raspada i tvori plin. U početnoj fazi procesa, pri temperaturi tališta aluminija u rasponu od 670 °C do 690 °C, u taljevinu se dodaje oko 1,5% Ca. Nakon nekoliko minuta procesa, viskoznost se znatno povećava zbog spojeva CaO, CaAl₂O₄ ili intermetalnog Al₄Ca. Kao raspršujući agens se dodaje otprilike 1% do 2% TiH₂ koji se iznad temperature od 465 °C rastvara na Ti i plinoviti H₂. Mjehurići H₂ stvaraju metalnu pjenu s zatvorenim ćelijama, ako je sušenje dovoljno sporo. Promjer dodanih čestica je 5-20 μm, nastala pjena može se dalje obrađivati, proces je brz i odvija se pod konstantnim tlakom. Gustoća ovih pjena može biti od 180 kg/m³ do 240 kg/m³, veličina ćelija od 0,5 mm do 5 mm. Proces je zasad ograničen samo na Al pjene komercijalnog naziva **ALPORAS**. Ćelije su zatvorene i valjanjem mogu postići dobra zvučno izolacijska svojstva. Postupak je nešto skuplji zbog relativno skupog Ca i TiH₂.



Slika 11. Proces nastajanja metalne ALPORAS pjene [7]

3.2. Plinom oslobođene čestice u polučvrstoj fazi (FOAMINAL – ALULIGHT pjena)

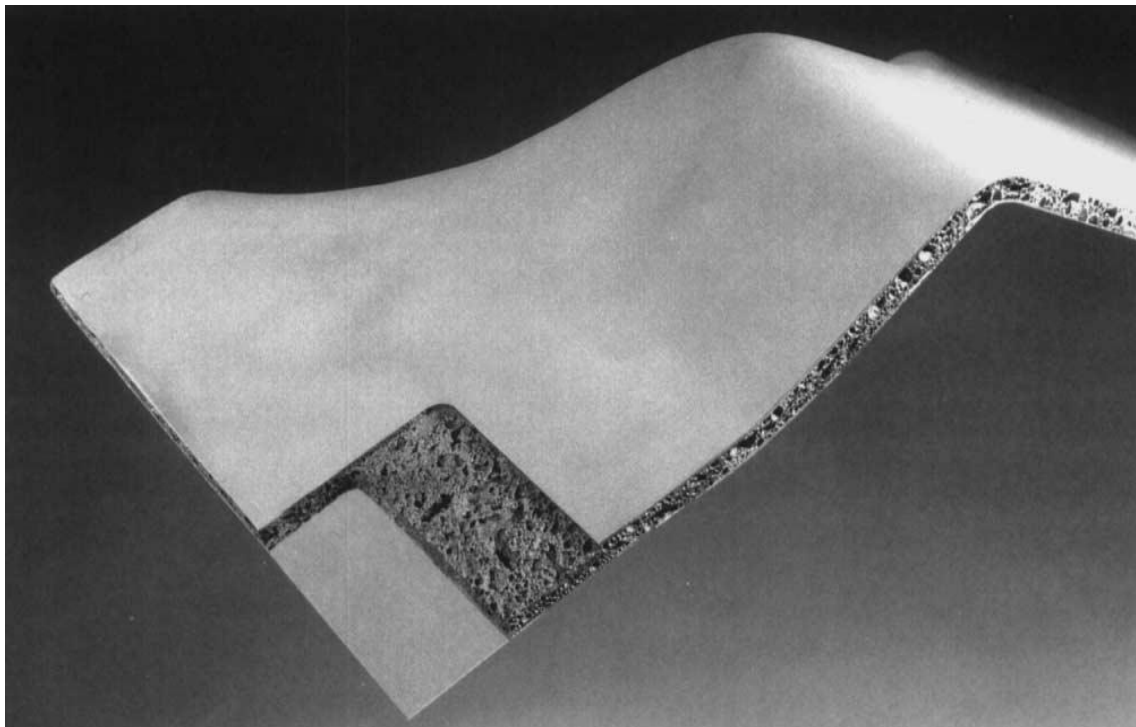
Pjenasti materijali mogu se izrađivati i od metalnog praha. Na samom početku procesa se miješa prah čistog metala ili legure te agens koji pospješuje pjenjenje. Kao agens se najčešće rabi TiH_2 . Nastala mješavina se zatim sabija u poluproizvod u obliku šipke ili pločice. Tehnike sabijanja u metalnu matricu mogu biti različite: neaksijalno ili izostatičko tlačenje, ekstrudiranje, valjanje praha itd.. Takav poluproizvod mora biti vrlo pažljivo napravljen, jer početna poroznost ili druge nepravilnosti uzrokuju lošije rezultate u kasnijim fazama procesa. Poluproizvod se reže na male komade i stavlja u kalup gdje se zagrijava na temperaturu nešto višu od solidus temperature legure. Agens se raspada na Ti i plinoviti H_2 koji uzrokuje širenje i stvaranje visoko poroznog materijala. Trajanje procesa može biti od nekoliko sekundi do nekoliko minuta, ovisno o temperaturi i veličini poluproizvoda. Proizvod zadržava oblik kalupa, ima relativnu gustoću od 0,08 naviše i zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm.



Slika 12. Proces nastajanja FOAMINAL – ALULIGHT metalne pjene [6]

Ovaj postupak nije ograničen samo na aluminij, već se njime mogu proizvoditi pjene na bazi cinka, mjedi, olova, zlata i drugih metala. Upjenjivanje se događa u polučvrstom stanju zato što se TiH_2 raspada na $465\text{ }^\circ\text{C}$ što je mnogo niže od tališta aluminija ($660\text{ }^\circ\text{C}$). To pospješuje upjenjivanje čvrstog aluminija koji se zatim zagrijava do taljenja. Hlađenjem se pjena stabilizira.

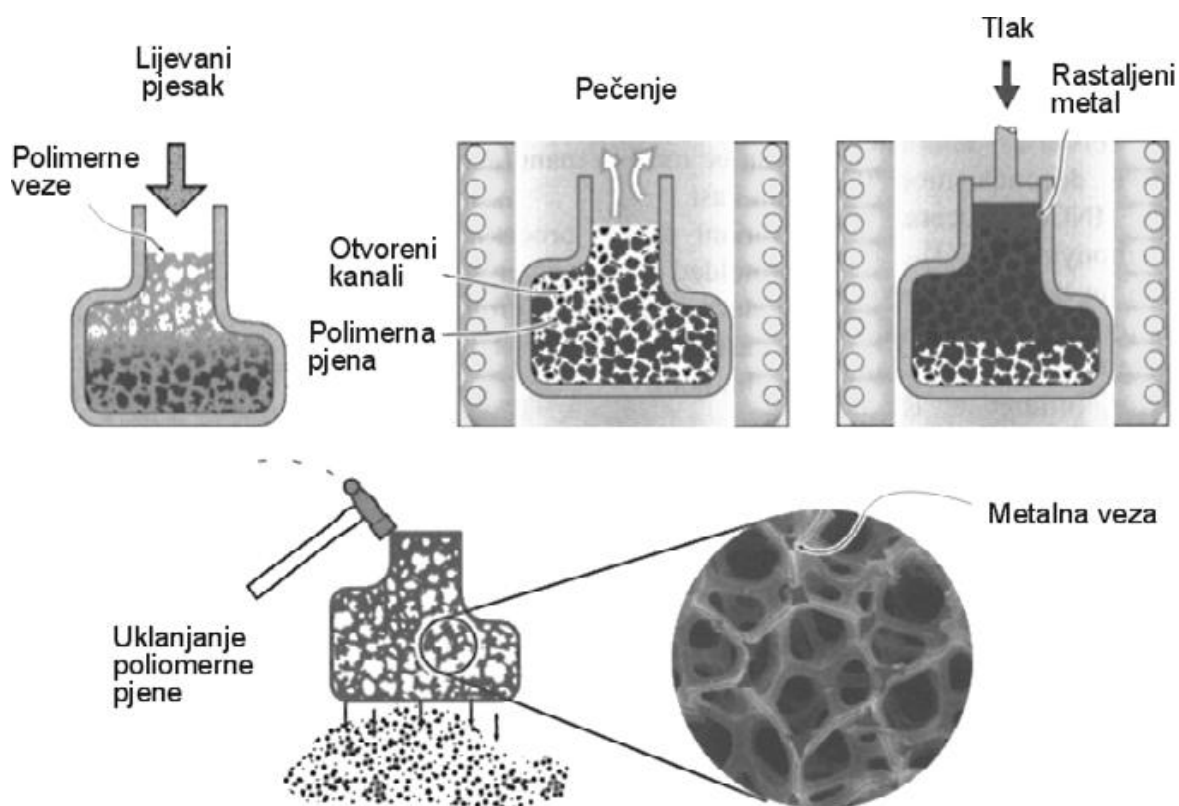
Fraunhoferov institut u Bremenu (Institut für Advanced Materials – IFAM) razvio je izradu sendvič konstrukcija ovim postupkom. Komercijalni naziv za te proizvode je **FOAMINAL-ALULIGHT**. Upjenjeni metal je zatvoren s dvije metalne ploče (lima) koji su ljepilom povezani s pjenom. Ako je potrebna metalna veza između slojeva, limovi od čelika, aluminija ili titana valjanjem zatvaraju jezgru od pjenovitog poluproizvoda. Ta konstrukcija se zatim zagrijava pri čemu poluproizvod stvara jezgru od metalne pjene. Sendvič ploče mogu biti dimenzija do $2 \times 1\text{ m}$.



Slika 13. Sendvič konstrukcije s jezgrom od metalne pjene FOAMINAL-ALULIGHT [8]

3.3. Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera

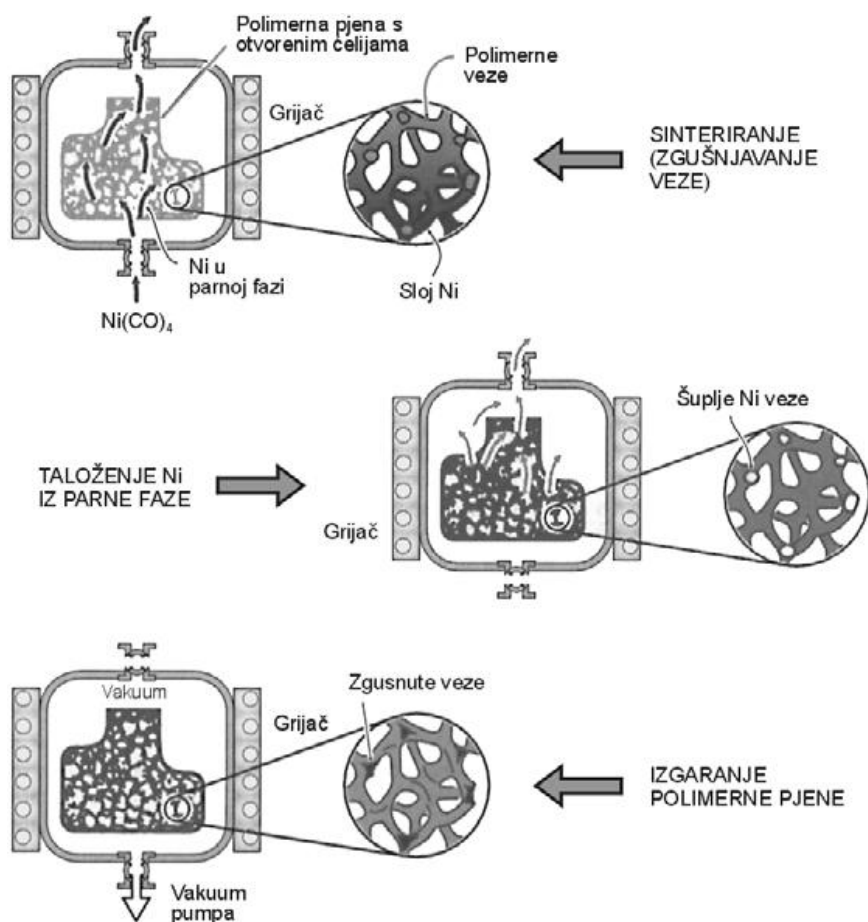
Ovaj proces je razvila tvrtka Ergaerospace i njime su proizvedene sve ERG DUOCEL metalne pjene. Ti materijali imaju strukturu s otvorenim ćelijama u obliku duodekaedara. Gustoća im iznosi od 3 % do 50 % gustoće čvrstih metala, dok im je gustoća ćelija 5, 10, 20 ili 40 pora/inču. Za izradu pjene se najčešće koriste aluminijske legure 6101 i A356. Za izradu kalupa, u kojima se postupkom preciznog lijevanja dobivaju metalne pjene, mogu se rabiti polimerne pjene s otvorenim ćelijama raznih veličina i oblika. Prvo se odabire polimerna pjena odgovarajuće veličine ćelija i relativne gustoće. Ona se zatim premazuje s keramičkim prahom koji se suši i ugrađuje u lijevani pijesak. Kalup se zatim peče da bi kalupni materijal očvrsnuo, a polimerna pjena isparila uz stvaranje negativ oblika pjene. Slijedeći korak je punjenje kalupa rastaljenom metalnom legurom koja se zatim hladi. Ovim procesom izrađuju se metalne pjene na bazi svih vrsta metala koji se mogu precizno ljevati.



Slika 14. Proces preciznog lijevanja metalne pjene s otvorenim ćelijama - ERG DUOCEL metoda [6]

3.4. Taloženje materijala na ćelijaste praoblake (INCO pjena)

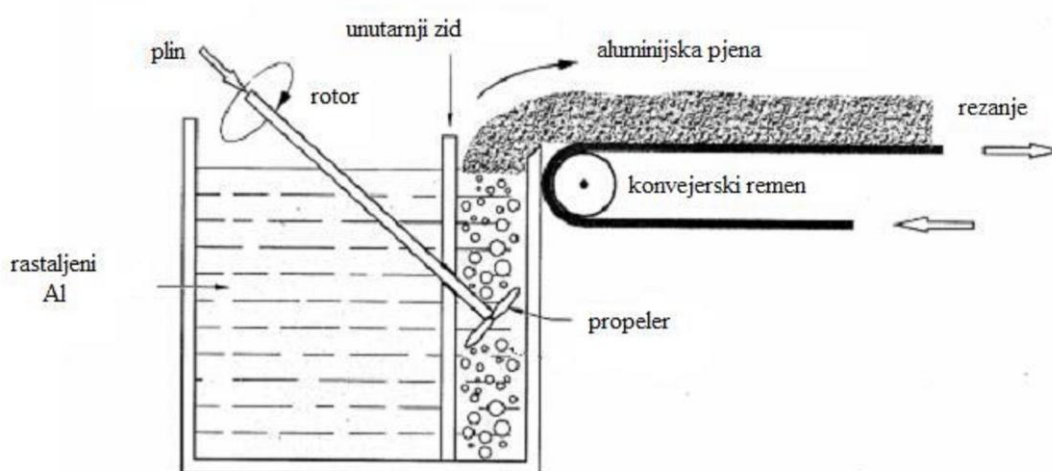
Polimerne pjene s otvorenim ćelijama također mogu poslužiti kao baza na koju se postupkom kemijskog taloženja iz parne faze (CVD) nanose metalni materijali evaporacijom ili elektrotaloženjem. Na početku INCO postupka polimerna pjena se stavlja u CVD retortu u koju se zatim uvodi $\text{Ni}(\text{CO})_4$. Zagrijavanjem na temperaturu od oko 100°C $\text{Ni}(\text{CO})_4$ se raspada na čisti Ni i ugljični monoksid 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. Struktura ovako dobivenih metalnih pjena je ćelijasta sa šupljikavim vezama. Gustoća takvih veza se može povećati sinteriranjem. Ovaj postupak je razvila tvrtka INCO iz Kanade. To je vrlo skup i za okoliš otrovan postupak pa se rijetko koristi.



Slika 15. Proces nastajanja Ni metalne pjene (INCO pjena)[6]

3.5. Ubrizgavanje plina u taljevinu

U taljevinu se dodaju sitne nerastvorljive čestice (SiC , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , TiB_2) promjera 0,5 do 25 μm , one povećavaju viskoznost aluminija, sprečavaju sušenje opne mjehurića i omogućuju da pjena ostane stabilna do skrućivanja mjehurića. Volumni udio čestica iznosi 10-20%, prilikom unošenja se miješaju kako bi se ravnomjerno raspodijelile. Zatim se u taljevinu upuhuje plin rotirajućim ubrizgavalicama i vibrirajućim raspršivačima. Plinovi koji se koriste su zrak, CO_2 , O_2 , inertni plinovi (npr. argon), N_2 , pa čak i vodena para. Mješavina metala i mjehurića ispliva na površinu gdje se metal suši. Pjena izlazi na površinu pomoću pomičnih traka (konvejskih remena). Ovim postupkom dobivaju se pjene gustoće od 69 kg/m^3 do 540 kg/m^3 , pore su promjera 3-25 mm, debljina stjenke iznosi 50-85 μm . Na veličinu ćelija utječe se protokom plina, brzinom ubrizgavalice, frekvencijom vibriranja raspršivača i ostalim parametrima.



Slika 16. Proces nastajanja metalne pjene ubrizgavanjem plina u taljevinu [6]

Nedostatak ovog postupka je mogućnost dijagonalnog deformiranja ćelija što negativno utječe na mehanička svojstva koja postaju izotropna. Prednost ovog procesa je niska cijena i mogućnost proizvodnje komada većih dimenzija. Upjenjeni materijal sa zatvorenom površinom može se rezati na odgovarajuće oblike, pri čemu se otvaraju ćelije što je u nekim slučajevima nedostatak.

4. SVOJSTVA METALNIH PJENA

Svojstva metalnih pjena određena su svojstvima osnovnog materijala i relativnom gustoćom ρ/ρ_s , ρ predstavlja gustoću pjene a ρ_s gustoću osnovnog materijala od kojeg je pjena napravljena. Relativna gustoća kreće se od 0,005 (rijetke pjene) do 0,5 (guste pjene).

Glavna prednost metalnih pjena u odnosu na osnovni materijal od kojeg je pjena napravljena je vrlo mala masa. Time se dobivaju iznimno lake konstrukcije što donosi uštedu na materijalu i masi (to donosi uštedu goriva u autoindustriji). Međutim s obzirom da kod pjena veliku ulogu igra stupanj nepravilnosti i nehomogenosti pjene, važno je točno odrediti mehanička svojstva pjene, kako bi se mogao odrediti podoban materijal za određenu konstrukciju. Zbog toga je važno odrediti tlačnu i vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti, modul smičnosti, dinamičku izdržljivost, tvrdoću, otpornost na umor i puzanje.

Tablica 1. Vrijednosti svojstava metalnih pjena [8]

Svojstvo, (jedinica), simbol	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	INCO
Materijal	Al-SiC	Al	Al	Al	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
Struktura, (tip ćelije)	Zatvorene			Otvorene	
Modul elastičnosti, (GPa), E	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modul smičnosti, (GPa), G	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Modul savitljivosti, (GPa), E_f	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor	0,32-0,34				
Tlačna čvrstoća, (MPa), R_{mt}	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Vlačna čvrstoća, (MPa), R_m	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Din. izdržljivost, (MPa), R_d	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
Deformacija pri zgušćivanju, 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	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, (MPa·m ^{1/2}), K_{IC}	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0
Talište, (K), T_m	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
Max. radna temperatura, (K), T_{max}	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Min. radna temperatura, (K), T_{min}	1-2				
Specif. topl. kapacitet, (J/kgK), C_p	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Toplinska vodljivost, (W/mK), λ	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Topl. rastezljivost, (10 ⁻⁶ /K), α	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
Latentna toplina taljenja, (kJ/kg), L	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310
Električni otpor, (10 ⁻⁸ Ωm), R	90-3000	20-200	210-250	180-450	300-500

Izbor i dobra priprema uzoraka su vrlo bitni za utvrđivanje reprezentativnih podataka, ispitivanja metalnih pjena su još u razvoju 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 % , što u primjeni smanjuje povjerenje u metalne pjene. Da bi rezultati bili što vjerodostojniji ispitivanja se provode po strožim režimima nego je to uobičajeno.

Danas se komercijalno primjenjuju samo metalne pjene na bazi aluminijske i nikla pa će se one detaljnije opisati. S obzirom na vrlo širok raspon svojstava metalne pjene imaju široko područje potencijalne primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja, pri čemu pjene s otvorenim i one s zatvorenim ćelijama uglavnom imaju ujednačena svojstva. S tim da pjene s otvorenim ćelijama imaju nešto niže vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće.

Tablica 2. Izrazi za izračunavanje svojstava metalnih pjena [4]

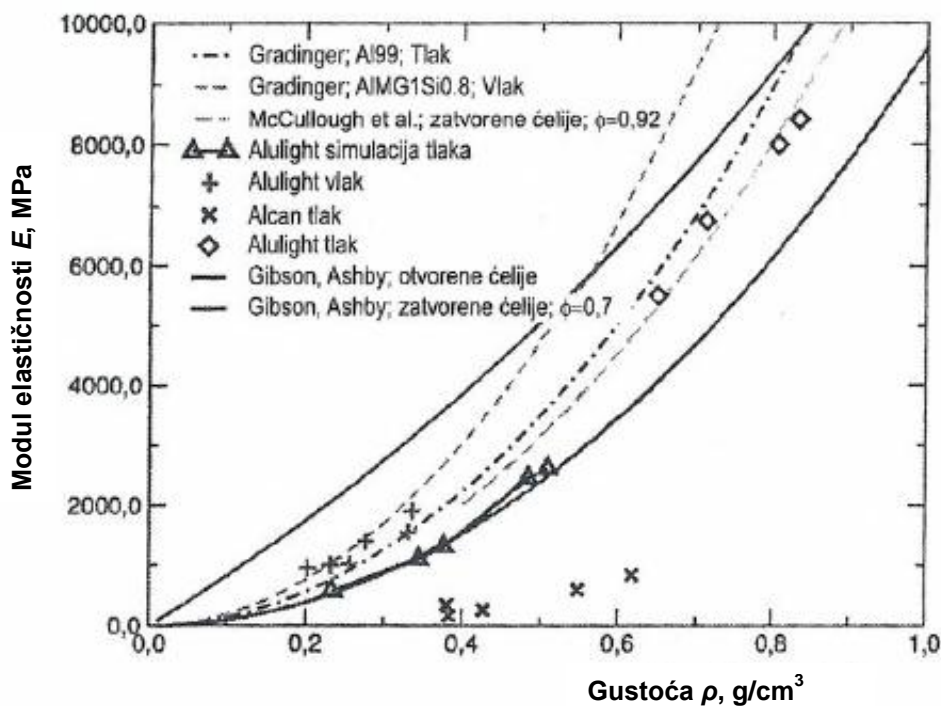
Mehaničko svojstvo	Otvorene ćelije	Zatvorene ćelije
Modul elastičnosti, (GPa), E	$E = (0,1-4) \cdot E_s \cdot (\rho/\rho_s)^2$	$E = (0,1-1) \cdot E_s \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^2 + 0,3(\rho/\rho_s))$
Modul smičnosti, (GPa), G	$G \approx (3/8) \cdot E$	
Modul savitljivosti, (GPa), E_f	$E_f \approx E$	
Tlačna čvrstoća, (MPa), R_{mt}	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{mts} \cdot (\rho/\rho_s)^{3/2}$	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{mts} \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^{2/3} + 0,3(\rho/\rho_s))$
Vlačna čvrstoća, (MPa), R_m	$R_m \approx (1,1-1,4) \cdot R_{mt}$	
Dinamička izdržljivost, (MPa), R_d	$R_d \approx (0,5-0,75) \cdot R_{mt}$	
Deformacija pri zgušćivanju, ϵ_D	$\epsilon_D = (0,9-1) \cdot (1-1,4\rho/\rho_s + 0,4(\rho/\rho_s)^3)$	
Koeficijent gubitka, η	$\eta \approx (0,95-1,05) \cdot \eta_s / (\rho/\rho_s)$	
Tvrdoća, H	$H = R_{mt} \cdot (1+2\rho/\rho_s)$	
Toplinska vodljivost, (W/mK), λ	$(\rho/\rho_s)^{1,8} < \lambda/\lambda_s < (\rho/\rho_s)^{1,85}$	
Električni otpor, ($10^{-8} \Omega m$), R	$(\rho/\rho_s)^{-1,8} < R/R_s < (\rho/\rho_s)^{-1,85}$	

Napomena: Indeks "s" u oznaci odnosi se na svojstva osnovnog materijala

4.1. Krutost

Čvrstoća i krutost ćelijastih (poroznih) materijala u velikoj mjeri ovisi o njihovoj gustoći. Teorijske pretpostavke koje su postavili Gibson i Ashby [6] o mehaničkim svojstvima ćelijastih materijala, zasnivaju se na vezi morfologije i svojstava stijenki ćelija. Kod pjena s otvorenim ćelijama pretpostavke odgovaraju podacima dobivenim ispitivanjem dok kod pjena s zatvorenim ćelijama to nije slučaj.

Aluminijske pjene imaju različit modul elastičnosti pri vlačnom i tlačnom opterećenju. Dodatno otežavajuća činjenica je da početna krutost uzorka pri neosnom tlačnom opterećenju ne karakterizira ponašanje samog materijala, već vrijedi samo za ispitivani uzorak. Ta početna krutost iznosi samo 20% iznosa modula elastičnosti koji se dobiva iz krivulja opterećivanje/rasterećivanje uzorka nakon dostizanja granice stlačivanja (R_{ct})



Slika 17. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena; neosno opterećeno na tlak [9]

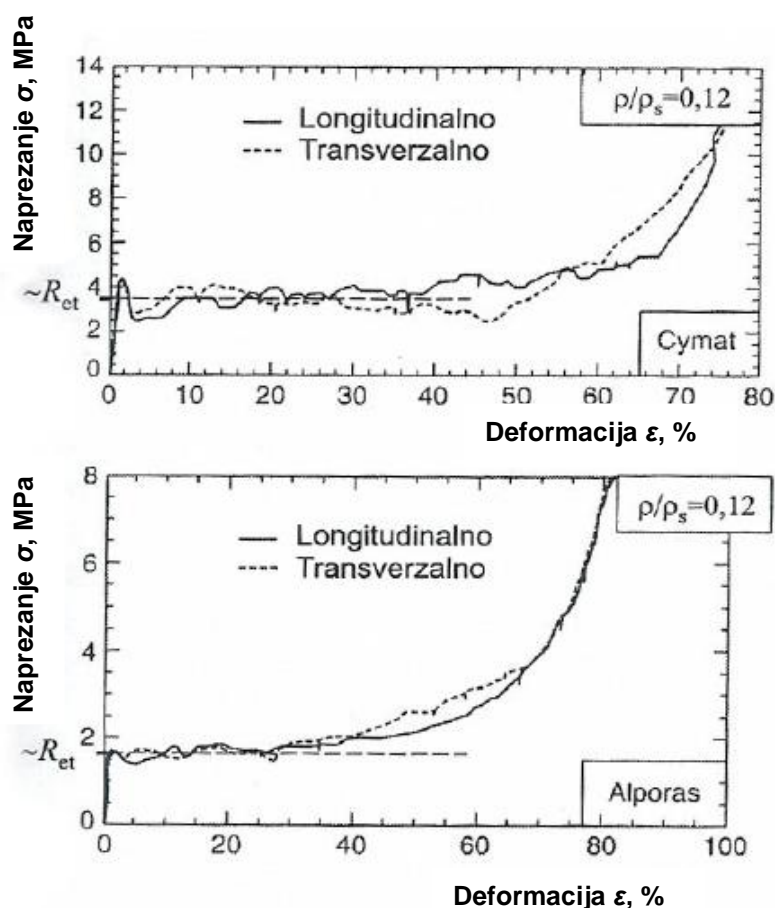
Iz prethodne slike 17. vidljivo je da krutost materijala ovisi o njegovoj gustoći. Ovo su rezultati za Al pjene sa zatvorenim ćelijama. Izmjerene vrijednosti u pravilu su manje od očekivanih teorijskih proračuna. Pjene s zatvorenim ćelijama niske gustoće pokazuju niže vrijednosti krutosti od očekivanih zbog mikrostrukture materijala.

S povećanjem pravilnosti mezostrukture u pravilu raste krutost Al pjena. Krutost se snižava i zbog nepravilnosti kao što su zavojite stjenke ćelija, nehomogenosti u obliku veličine čvorova i velikih napuklina. Al pjene proizvedene metalurgijom praha pokazuju vrlo malen stupanj anizotropije.

4.2. Tlačna čvrstoća

Inicijalno opterećenje izaziva elastičnu deformaciju, ali početna linija nije pravac i manjeg je nagiba od onog 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%) izmjenu modula elastičnosti u različitim smjerovima.

Pjene s otvorenim ćelijama imaju vrlo dobro definiranu granicu stlačivanja – R_{et} što je vidljivo na slici 18.. 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).



Slika 18. Dijagrami "naprezanje-deformacija" metalnih pjena pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje komercijalnih Al pjena [6]

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

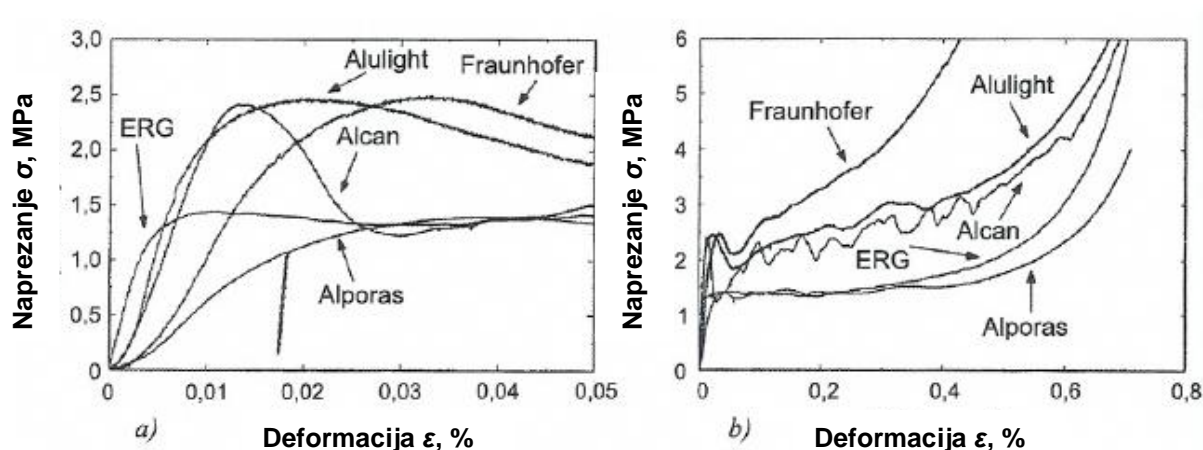
$$R_{et} = (0,25 - 0,35) \cdot R_e \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m \quad (1)$$

$$\varepsilon_D \approx \left(1 - \alpha_1 \cdot \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (2)$$

gdje je: R_{et} - granica stlačivanja, R_e - granica tečenja materijala pjene, m - eksponent koji za metalne pjene iznosi od 1,5 do 2, α_1 – koeficijent iznosi od 1,4 do 2,0.

Ispitivanja se uglavnom provode na Al i Ni pjenama, s obzirom da se one uglavnom komercijalno primjenjuju. Od Al pjena proučavaju se CYMAT, ALPORAS, ERG Duocel, ALULIGHT i IFAM. Omjer visine i debljine uzorka mora biti veći od 1,5, dok omjer veličine uzorka i veličine ćelije mora biti veći od 7 da bi se izbjegao utjecaj veličine uzorka na rezultate ispitivanja.

Ispitivanja se provode na kockastim uzorcima duljine brida 25, 40, 45 ili 50 mm. Ovisno o vrsti uzorci se opterećuju okomito ili paralelno na os izduženja ćelija. Uzorak se opterećuje silom od 50 kN između dvije ploče. Deformacija uzoraka mjeri se ekstenzimetrima i na temelju njih se izračunava Poissonov faktor. Brzina iznosi od 0,01 mm/s do 0,05 mm/s. Iz dijagrama na slici 19. može se zaključiti kolike su deformacije uzoraka pri najvećim opterećenjima za pojedini tip aluminijskih metalnih pjena.

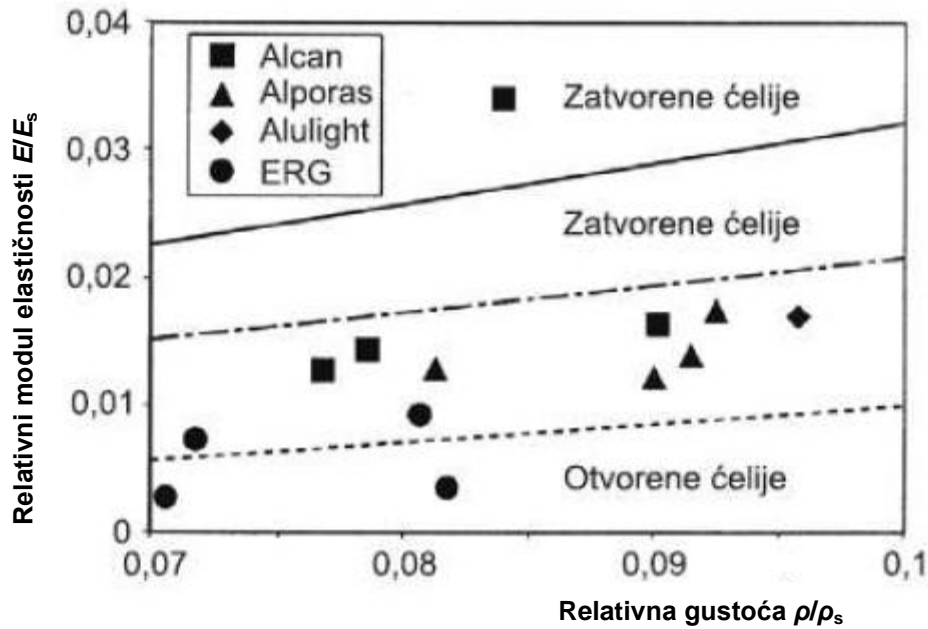


Slika 19. Dijagrami "naprezanje – deformacija" pri tlačnom opterećenju Al pjena

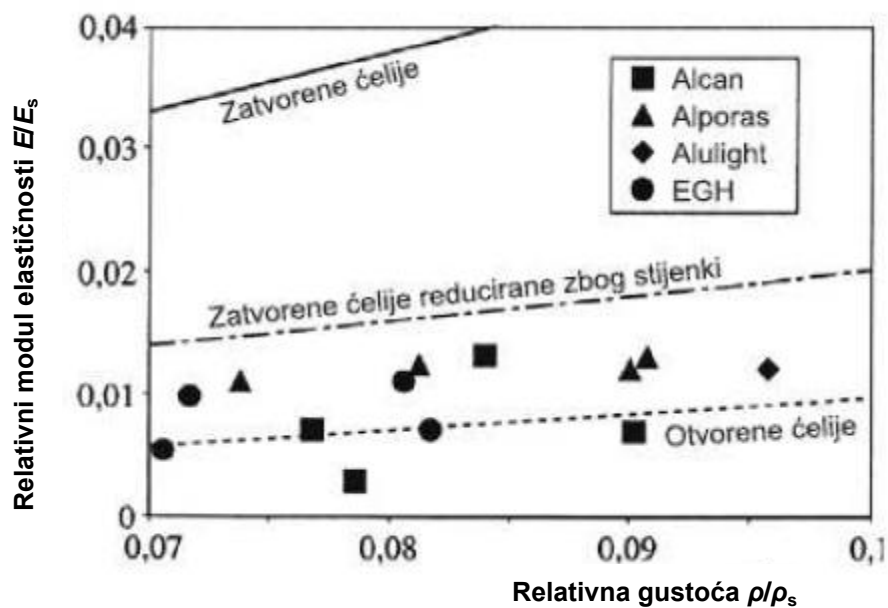
a) deformacija do 5%

b) pri većim deformacijama [10]

Zanimljiva je i ovisnost relativne gustoće o modulu elastičnosti ili o omjeru granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja (R_e) materijala, kao što se prikazuje na sljedećim slikama 20. i 21.



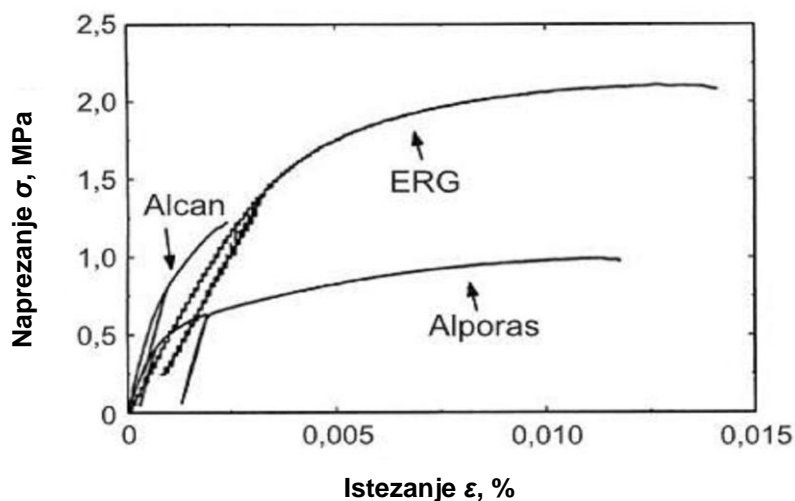
Slika 20. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći [10]



Slika 21. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja materijala ćelija (R_e) o relativnoj gustoći [10]

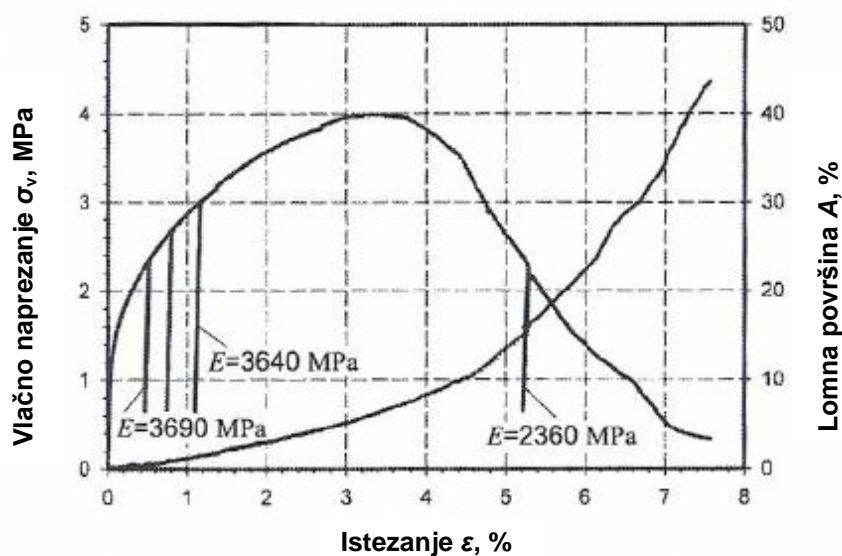
4.3. Vlačna čvrstoća

Ispitivanja vlačnim opterećenjem provode se na cilindričnim uzorcima ili uzorcima u obliku kosti. Odvajanje i obrada uzoraka propisani su normom ASTM E8-96-a. Kao glavne dimenzije uzoraka uzimaju se promjer kod cilindričnog i debljina kod uzorka u obliku kosti. Omjer tih dimenzija i veličine ćelije mora biti veći od 7. Istezanje se mjeri ekstenzimetrom koji se pričvršćuje na dio uzorka gdje dolazi do lomova. Opterećenje je zadano u 2 smjera: okomito i paralelno na dulju os ćelija, brzina opterećenja je 0,01 mm/s. Modul elastičnosti može se izračunati iz nagiba krivulje "naprezanje-istezanje", dok se Poissonov faktor računa pomoću izmjerenih vrijednosti istezanja. Rezultati vlačnog ispitivanja za Al pjene prikazani su u sljedećem dijagramu na slici 22.



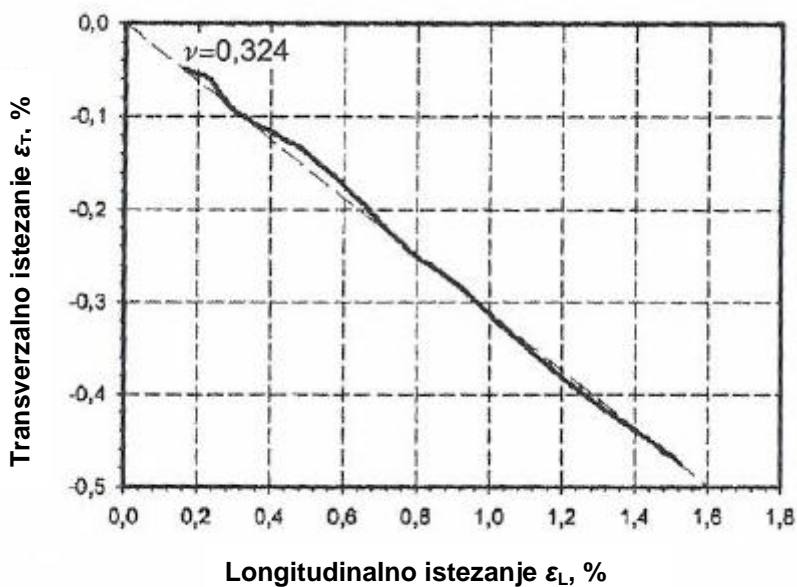
Slika 22. Dijagram naprezanje – istezanje Al pjena [10]

Aluminijske pjene se ponašaju slično kao žilavi materijali. To vidimo iz krivulja koje pokazuju ponašanje uzoraka bez ureza na slici 22. Linearno elastični dio krivulje vrlo je malen nakon kojeg slijedi veći dio u području plastičnosti. Rezultat je nehomogena raspodjela deformacija koja uzrokuje veliku deformaciju na nekim dijelovima površine uzorka. Inicijacija napuklina počinje blizu maksimalnog naprezanja. Daljnje istezanje dovodi do zone loma. Modul elastičnosti smanjuje se s povećanjem istezanja, općenito se može reći da je modul elastičnosti u uvjetima tlačnog opterećenja ipak nešto veći nego u uvjetima vlačnog.



Slika 23. Krivulja naprezanje – istežanje s udjelom lomne površine ALPORAS pjene (uzorci bez ureza) [11]

Poissonov faktor se može izračunati iz izmjerenih istežanja prikazanih na slici 23. Prosječni Poissonov faktor u uvjetima vlačnog opterećenja iznosi 0,35.



Slika 24. Odnos transverzalnog i longitudinalnog istežanja [11]

4.4. Sendvič konstrukcije

Metalne pjene su novi materijal koji je idealan upravo za sendvič konstrukcije. Jezgre metalnih pjena posebno su važne kada se od konstrukcije zahtijeva višestruku funkcionalnost 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. Zato je nužno ispitati cijeli niz mehaničkih svojstava kako bi se moglo predvidjeti ponašanje sendvič-konstrukcija u eksploataciji.

Za sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene zaključeno je sljedeće:

- na relativnu gustoću pjene znatno utječe debljina površinske kore i zato se prilikom određivanja modula elastičnosti mora uzeti u obzir debljina pjene;
- na savojnu krutost ploče ne utječe vrsta materijala pjene;
- masa po jediničnoj površini može se iskoristiti za opisivanje ploča od pjene jer kombinira njihovu masu, gustoću i debljinu;
- stvarni moment inercije ploča i sendviča s jezgrom od pjene može se izračunati iz njihove mase po jediničnoj površini ako relativna gustoća pjene nije viša od 0,4.



Slika 25. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [11]

4.5. Toplinska svojstva

Toplinska vodljivost (λ) najbolje pokazuje izolacijske sposobnosti materijala. Iz prethodne tablice jasno je vidljivo kako vrijednost λ varira od 0,2 W/mK sve do 11 W/mK. 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 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 s 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, emisivnost 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 .

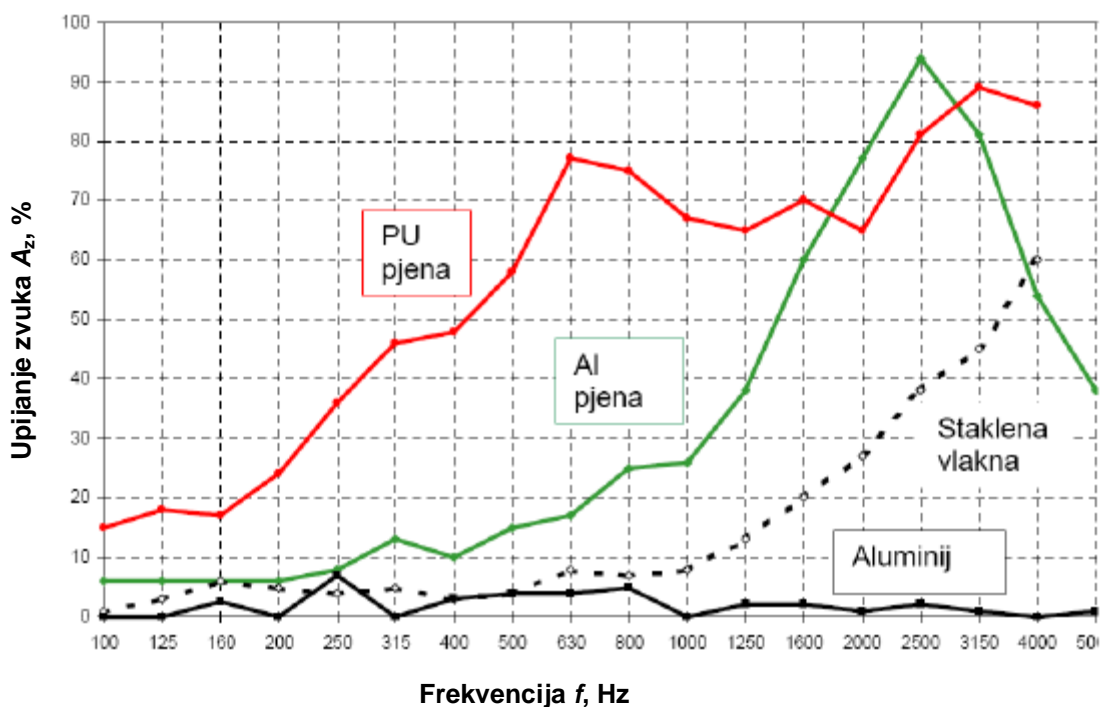
Aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama su pokazale iznimnu vatrootpornost što se pripisuje već spomenutom Al_2O_3 . Do stradavanja može doći iz više razloga, tako da se u obzir uzima i toplinska i strukturna vatrootpornost. Do toplinskog stradavanja dolazi kada pjena gubi izolacijski kapacitet, a do strukturnog kada gubi nosivost.

Alporas pjene su ispitane prema njemačkim standardima i proglašene negorivima. Mogu biti izložene temperaturama višim od 600°C za razliku od PU pjena, koje se koriste u tračnim vozilima, koje se izobličie i razvijaju otrovne plinove.

4.6. Zvučna svojstva

Dobra zvučna svojstva očituju se u činjenici da metalne pjene apsorbiraju veliku količinu energije. Kao što je već rečeno metalna pjena mora imati otvorene ili poluotvorene ćelije kako bi dobro apsorbirala zvuk. Ispitivanja su provođena na Alporas pjenu sa zatvorenim ćelijama čije su stijenke 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 pjene u odnosu prema konkurentnoj staklenoj vuni kada se radi o apsorpciji buke jesu:

- staklena vuna nije dovoljno kruta tako da se mora stabilizirati s metalnom armaturom što nije slučaj kod Alporas pjenom;
- vlakna staklene vune mogu biti uništena pod utjecajem vibracija i vjetera;
- 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 26. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al [12]

4.7. Prigušenje vibracija

Prigušenje je vrlo važno svojstvo dijelova konstrukcija koji su tijekom eksploatacije izloženi vibracijama (npr. dijelovi strojeva za preciznu obradu). Konstrukcijsko prigušenje temelji se na pretvorbi vibracijske energije u toplinu unutrašnjim trenjem. 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 bezdimenzijskim koeficijentom gubitka, η . To je gubitak energije po radijanu podijeljen s maksimalnom elastičnom deformacijskom energijom.

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U} \quad (3)$$

Prigušenje postaje bitno kada je materijal izložen rezonantnim frekvencijama. Materijal se nalazi u području elastičnih naprezanja i deformacija koje se ciklički ponavljaju.

Ćelijasti materijali pokazuju jedan red veličine više vrijednosti faktora gubitka od materijala pune gustoće od kojih su napravljeni. Rasipanje vibracija rezultat je trenja između površina ćelija i nastajanja mikronapuklina. Prigušenje se može povisiti smanjenjem debljine stijenki ćelija, uvođenjem strukturalnih nepravilnosti, npr. dodavanjem netopljivih keramičkih čestica (SiC, Al₂O₃ ili grafita). Unatoč svemu, faktor gubitka tipičnih ćelijastih metala premalen je u usporedbi sa standardnim materijalima za prigušenje vibracija, čije se vrijednosti kreću od 0,01 do 0,1.

Svojstvo prigušenja vibracija metalnih pjena vrlo je korisno u konkretnom slučaju tijela električne gitare, jer će tijelo preuzeti dio vibracija koje uzrokuje titranje žica. S obzirom da su metalne pjene ćelijasti materijali slični drvetu očekuje se da će u ovom slučaju biti vrlo dobra zamjena za drvo kao najčešći materijal za tijelo električne gitare. Titranje žica prenosi se na magnete (pick-upove) ali i na tijelo gitare.

5. PRIMJENA METALNIH PJENA

Primjena metalnih pjena slijedi iz njihovih svojstava. Budući da su metalne pjene relativno novi oblik materijala njihova primjena još uvijek nije raširena, iako već i danas postoji nekoliko respektabilnih proizvođača ove vrste materijala. Negativna strana metalnih pjena je njihova visoka cijena, no i to se iz dana u dan smanjuje.

Moguća primjena metalnih pjena je vrlo raznovrsna i to u brojnim područjima, kao što su: prijevozna sredstva (automobili, vlakovi, tramvaji itd.), brodogradnja, zrakoplovna industrija, strojogradnja, građevinarstvo, arhitektura (unutrašnje uređenje), proizvodnja namještaja, itd.. Najveći dio primjena se odnosi na poluproizvode u obliku sendvič ploča.

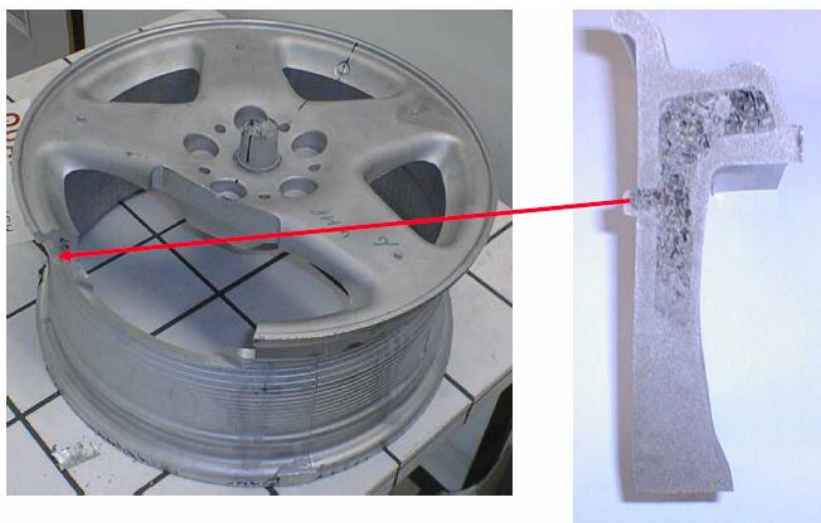
Tablica 3. Mogućnosti primjene metalnih pjena [6]

PODRUČJE PRIMJENE	OBRAZLOŽENJE
Lagane konstrukcije	Odličan omjer krutosti i težine 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
Filteri	Mogućnost filtriranja plinova i tekućina
Elektromagnetska zaštita	Dobra električna vodljivost
Elektrode, držači katalizatora	Veliki omjer površine i volumena



Slika 27. Sendvič poluproizvodi od metalne pjene [12]

Koriste se i u industriji tračnih vozila, brodova, zrakoplova i svemirskih letjelica. Metalne pjene su najčešće jezgre sendvič poluproizvoda.

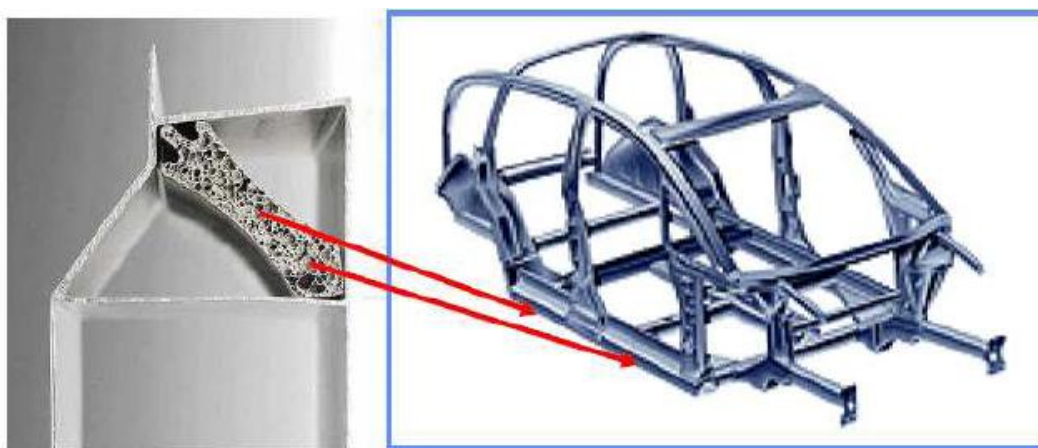


**Slika 28. Naplatak automobila s jezgrom od ALULIGHT pjene
(ušteda u masi do 2 kg po kotaču) [13]**

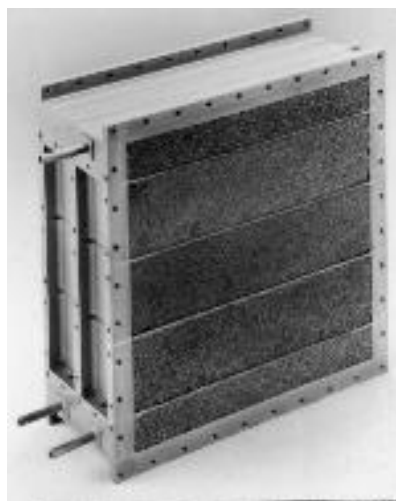
Metalne pjene se u autoindustriji uglavnom koriste kao jezgra sendvič konstrukcija – dijelovi oplata i okvira. Time se masa automobila može smanjiti za 20 % što predstavlja i značajne uštede u potrošnji goriva. Uz poznatu činjenicu da metalne pjene imaju dobra

toplinska i zvučna izolacijska svojstva te mogućnost prigušenja vibracija, jasno je da se mogu primijeniti za razdvajanja kabine vozila od područja motora.

Budući da aluminijske pjene imaju vrlo dobru sposobnost apsorpcije udarne energije od njih se mogu izrađivati i branici koji povećavaju sigurnost putnika pri udarcima.



Slika 29. Primjena metalne pjene u autoindustriji za ojačanje okvira [13]



Slika 30. Izmjenjivač topline napravljen od DUOCEL Al-pjene [13]

Pjene sa otvorenim ćelijama, zbog svoje velike površine i dobre toplinske vodljivosti stijenki, dobro provode toplinu i mogu se koristiti za izradu izmjenjivača topline i hladnjaka.

Niklene pjene se uglavnom koriste za izradu dijelova NiCd i NiMH baterija koji se koriste u električnim alatima, video kamerama, mobitelima itd.. Sendvič konstrukcije sa jezgrom od niklene pjene mogu se također koristiti za izradu izmjenjivača topline.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

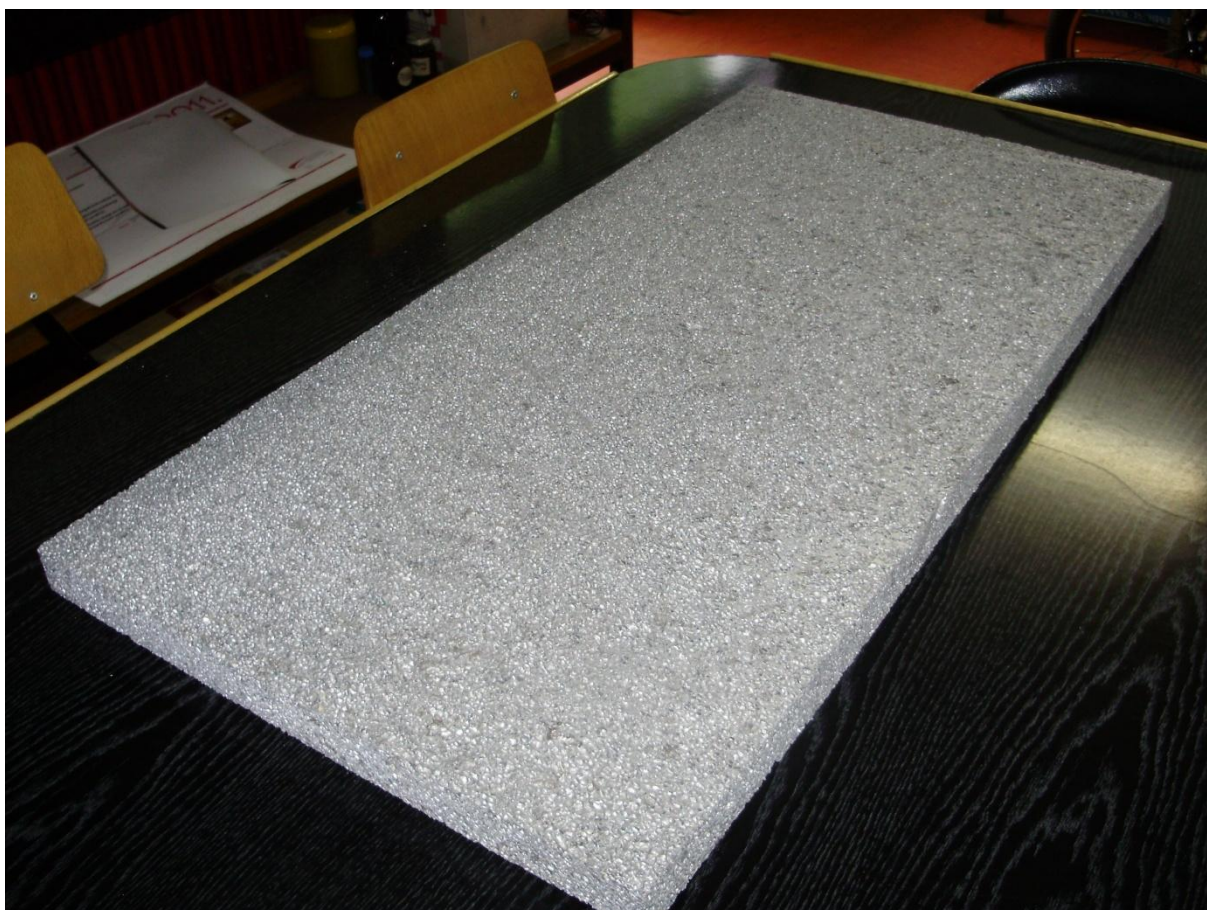
U eksperimentalnom djelu rada razmatrane su mogućnosti i način izrade tijela električne gitare od aluminijske pjene. Napravljeno je tijelo gitare od ALPORAS pjene, te je sklopljena kompletna gitara od standardnih dijelova. Za usporedbu je napravljena identična električna gitara s tijelom od drveta, gitare su zatim usporedno testirane te su komentirani dobiveni rezultati.

6.1. Idejni projekt

Zadatak je bio izraditi tijelo električne gitare od metalne pjene, te zatim sklopiti kompletnu gitaru s ostalim standardnim dijelovima. Prvotna zamisao je bila izrada čeličnog kalupa u kojem bi se poznatim postupkom FOAMINAL ALULIGHT (opisanom u poglavlju 3.2.), te korištenjem dostupnog prekursora ALULIGHT AlSi 10 TiH₂ - 0,8 dobilo tijelo električne gitare. Međutim izrada samog kalupa bila je u potpunosti financijski neisplativa s obzirom da je potrebno samo nekoliko uzoraka, osim toga sam postupak izrade kalupa je izrazito zahtjevan obzirom da zakrivljenu konturu tijela gitare. Još jedan razlog je što je peć potrebna za postupak koja je dostupna na fakultetu vrlo malih dimenzija, te bi bilo moguće izraditi tijelo gitare umanjenih dimenzija. Cilj je bio dobiti vizualno atraktivnu i jako laganu gitaru bez grešaka i uključina na površini tijela što bi bilo vrlo teško obzirom na ograničene resurse kojima raspolažemo na fakultetu. Odlučno je da će se naručiti komercijalno dostupna ploča ALPORAS pjene odgovarajuće debljine, koja će se zatim izrezati tehnologijom rezanja vodenim mlazom prema nacrtu tijela gitare. Ostali utori obraditi će se ručnom glodalicom na isti način kao što se radi i drveno tijelo. Zatim će se sklopiti kompletna gitara s standardnim dijelovima, ispitati će se zvučna svojstva te će se usporediti s identičnom gitarom sa standardnim drvenim tijelom. Potom će biti komentirani rezultati te iznesen zaključak.

6.2. Izrada električne gitare

Naručene su 2 ploče od aluminijske pjene ALPORAS dimenzija 40 x 500 x 1000 mm njemačke tvrtke Gleich Aluminium koja se bavi komercijalnom proizvodnjom metalnih pjena. Postupak dobivanja ALPORAS pjene (opisan je u poglavlju 3.1.) daje vrlo ujednačena i zadovoljavajuća svojstva, te su dobiveni poluproizvodi vrlo dobrih karakteristika. Gleich Aluminium navodi moguću primjenu svog proizvoda, u području dizajna i arhitekture, kao jezgra sendvič konstrukcija te pri izradi elementa za zaštitu pri sudarima.

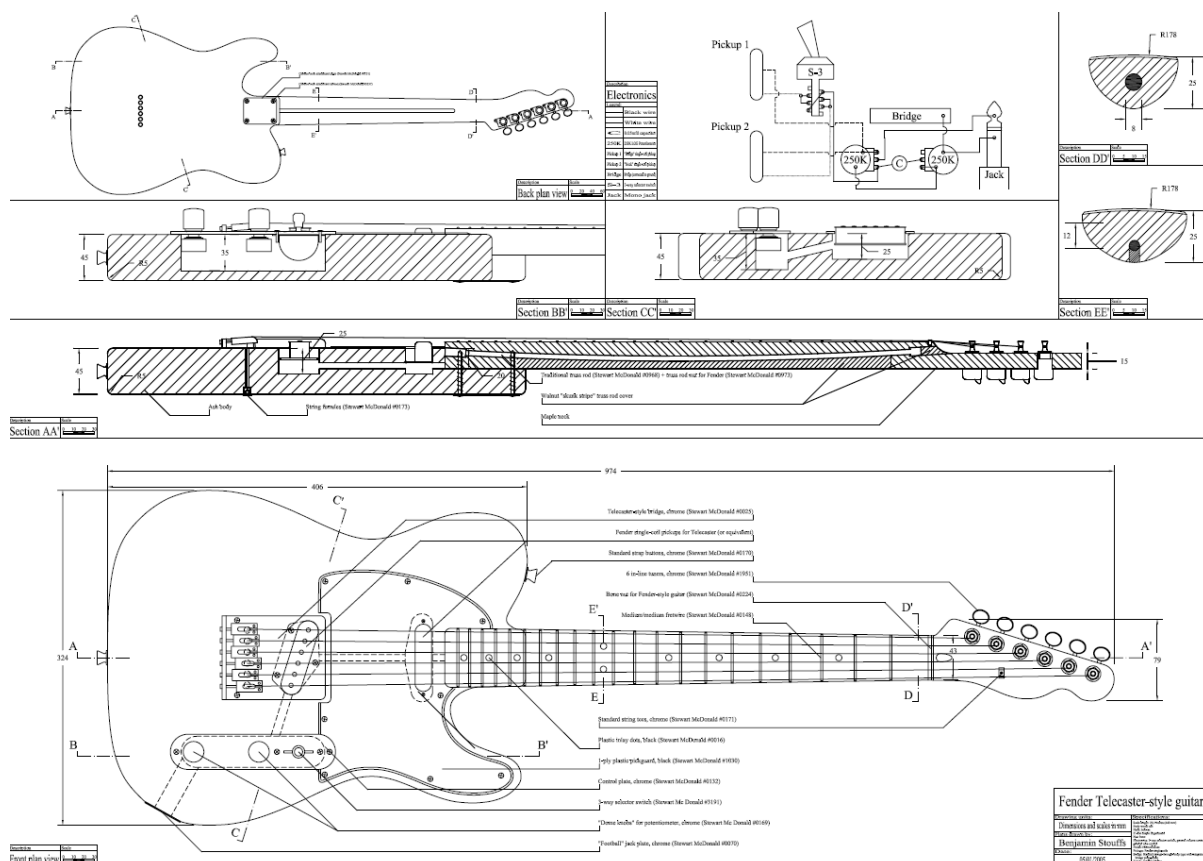


Slika 31. Ploča za izradu tijela gitare od ALPORAS aluminijske pjene

Svojstva ALPORAS pjena koje navodi proizvođač Gleich Aluminium:

- Ekstremno mala masa;
- Visoka postojanost oblika;
- Visoka specifična krutost;
- Vrlo dobra homogenost;
- Nezapaljivost, neotrovnost;
- Dimenzijska stabilnost čak i u blizini temperature taljenja materijala;
- Apsorpcija zvuka;
- Apsorpcija energije udara i vibracija;
- Laka obradivost (rezanje, glodanje, bušenje, savijanje, bojanje, lijepljenje);
- Kemijski sastav legure: Al 99,5 1,5% Ca, 1,5% Ti;
- Veličina pora: Ø 4-6 mm;
- Površina bez kore rezana sa svih strana;
- Specifična apsorpcija energije 5,5 kJ/kg;
- $\rho = 0,25 \text{ g/cm}^3$;
- $E = 0,7 \text{ GPa}$;
- $G = 0,3 \text{ GPa}$;
- $R_e = 1,2 \text{ MPa}$;
- $R_m = 1,6 \text{ MPa}$;
- $R_{et} = 1,5 \text{ MPa}$;
- $R_{p0,2} = 1,5 \text{ MPa}$;
- $R_{ms} = 2,8 \text{ MPa}$;
- $\alpha = 23,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$;
- $\nu = 0,33$.

Kao model za izradu gitare izabran je Fender Telecaster, riječ je o legendarnoj gitari sa poznatim zvukom i razmjerno jednostavnim oblikom potrebnim za izradu. Telecaster je odabran zbog toga što je dugo vremena u masovnoj primjeni, pa predstavlja standard. Puno je lakše procijeniti tonsku kvalitetu materijala kod standardnog oblika, nego kod nekog unikatnog dizajna. Od 4 tipa tijela električnih gitara koje su u širokoj primjeni, Telecaster je najjednostavniji i najprepoznatljivijeg zvuka, često je kopiran od mnogih proizvođača, pa će uspoređivanje biti zanimljivo. Tako da će se izrađena gitara moći usporediti s drvenim Telecasterom koji će imati identične ostale dijelove, ali i sa ostalim Telecaster modelima.

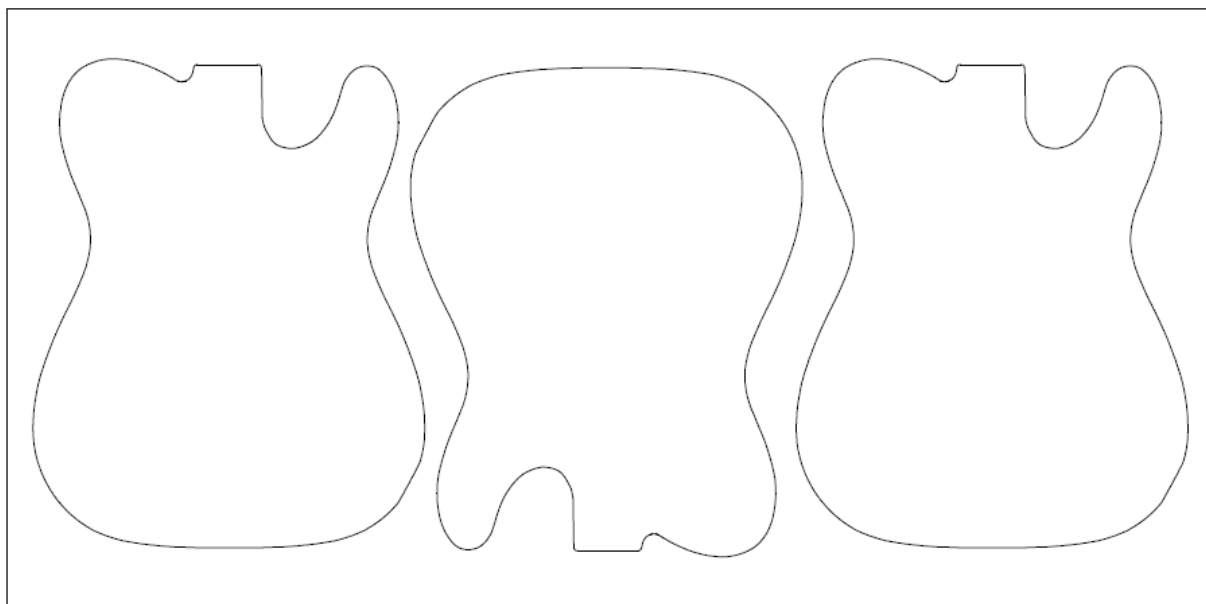


Slika 32. Princip izrade gitare Fender Telecaster [14]

Jedna ploča će poslužiti za izradu 3 komada tijela gitare dok će druga biti ostavljena kao rezerva. Ploča dimenzija 40 x 500 x 1000 mm prikazana na slici 31. izrezana je postupkom rezanja vodenim mlazom prema konturi na slici 33.

6.2.1. Postupak rezanja vodenim mlazom

Postupak rezanja vodenim mlazom omogućila je tvrtka KAPRI d.o.o., Samoborska cesta 114, Zagreb. Kapri posjeduje numerički upravljani stroj Water Jet Sweden AB NC-3000 kojim je ploča izrezana prema dolje prikazanoj konturi. Obrada vodenim mlazom je proces obrade odvajanjem kojeg karakterizira primjena vodenog mlaza uz dodatak abraziva. Vodeni mlaz malog promjera, velikog tlaka i brzine se kroz mlaznicu usmjerava prema materijalu obrade, uz pretpostavku da se može postići dovoljno visoki tlak, dobije se visoka koncentracija energije na maloj površini što omogućuje različite oblike primjene vodenog mlaza kao alata.



PJENASTI ALUMINIJ 40mm
1000x500mm

Slika 33. Kontura po kojoj će tijelo gitare biti izrezano vodenim mlazom



Slika 34. Rezanje vodenim mlazom (WJM)



Slika 35. Upravljačka konzola stroja Water Jet Sweden AB NC-3000



Slika 36. Tijelo električne gitare dobiveno rezanjem vodenim mlazom

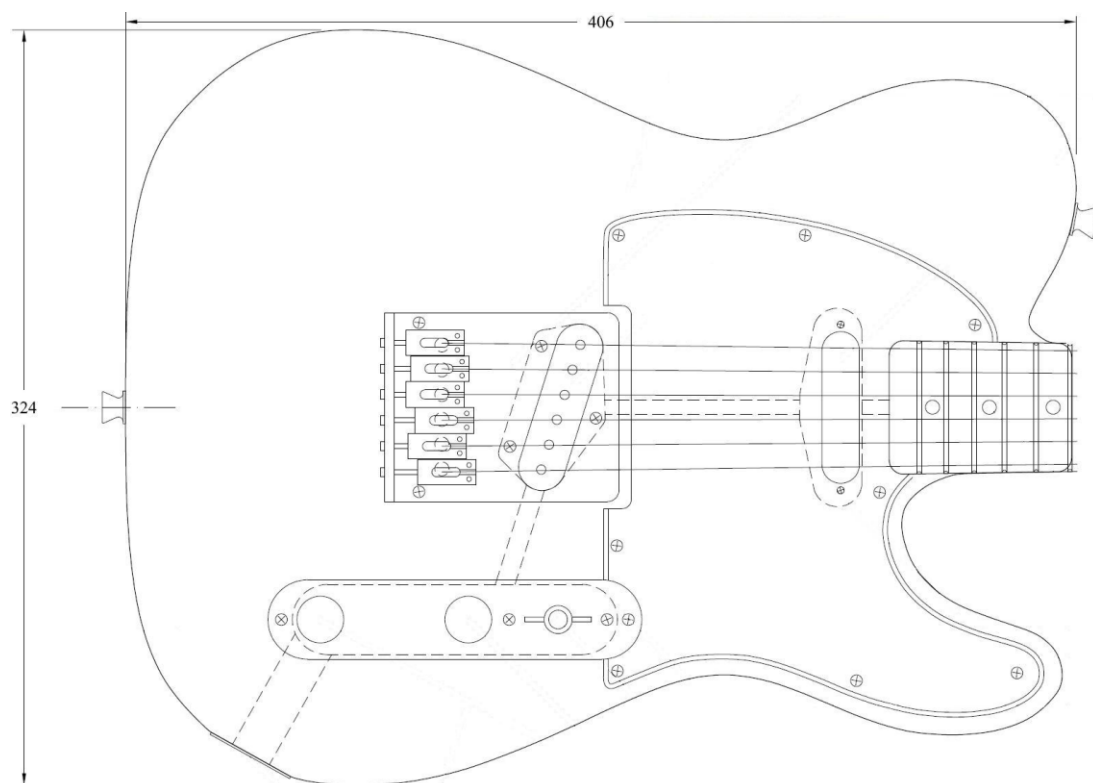
Dobivena je kontura tijela gitare nakon rezanja vodenim mlazom odlične kvalitete reza, daljnja obrada tijela izvedena je ručnom obradom.



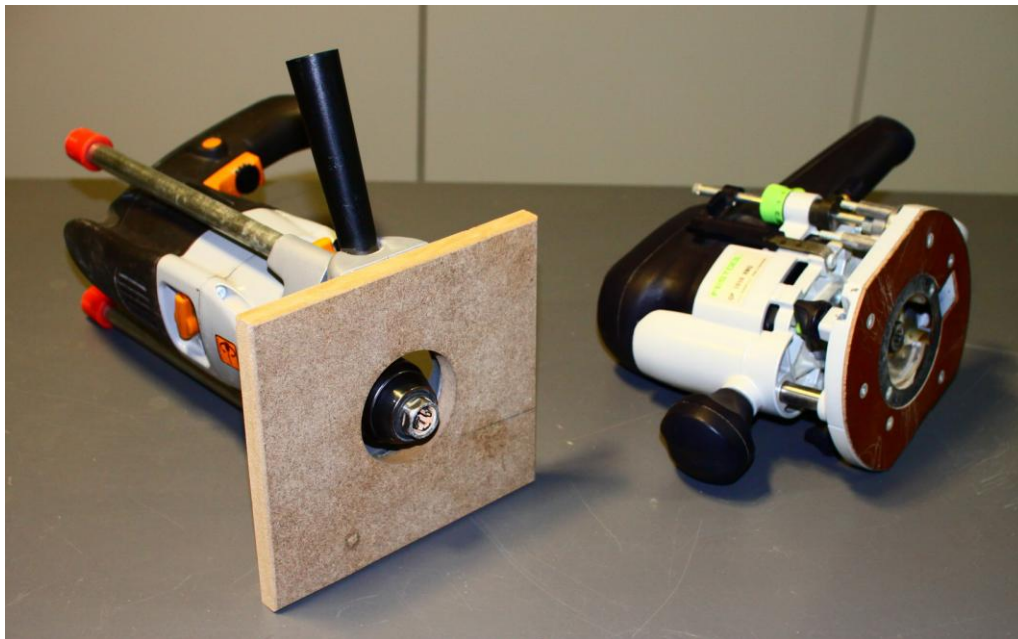
Slika 37. Ploča nakon rezanja vodenim mlazom

6.2.2. Obrada tijela gitare

Tijelo gitare je zatim obrađivano ručnom obradom. Klasična glodalica kojom se obrađuje tijelo drvene gitare radi na izrazito visokom broju okretaja ($10000 - 24000 \text{ min}^{-1}$), ona nije odgovarala za obradu aluminijske pjene koja se obrađuje na znatno manjem broju okretaja (do 2000 min^{-1}), pa je za glodanje utora na tijelu gitare poslužila klasična bušilica. Korišteno je kopirno glodalo za drvo od brzoreznog čelika (HSS), promjera 16mm, visine noža 16mm, prihвата 8mm i ležajem promjera 16mm.



Slika 38. Shema tijela Fendera Telecaster [14]



Slika 39. Improvizirana glodalica s bušilicom za glodanje Al pjene (lijevo) i klasična glodalica za glodanje drveta (desno)



Slika 40. Glodalo korišteno za izradu Al i drvenog tijela

Izbušene su rupe na mjestima na kojima trebaju doći vijci, zatim su korišteni drveni čepovi promjera 5 i 8mm. Čepovi su učvršćeni tekućim poliuretanskim ljepilom. Na njih će kasnije biti postavljena ploča (pickguard) koja sadrži magnete i potenciometre.



Slika 41. Tijelo gitare s drvenim umetcima



Slika 42. Korišteno tekuće PU ljepilo

Postignuti su odlični rezultati te su utori izgledani bez ikakvih problema. Aluminijska pjena se izuzetno lako obrađuje i ne ostavlja vidljiva oštećenja na nožu, nož se tupi sporije nego pri obradi drveta (po količini izgledanog volumena), iako mu je primarna namjena glodanje drveta.



Slika 43. Šablona od pleksiglasa za glodanje utora gitare ručnom obradom



Slika 44. Glodanje utora na tijelu gitare pomoću šablone

6.2.3. Usporedba tijela gitare od aluminijske pjene s drvenim tijelom gitare

Tablica 4. Usporedba masa tijela gitara

masa Al tijela	1075 g
masa drvenog tijela	2112 g

Izrađeno tijelo gitare od aluminijske pjene donosi enormne uštede u masi kompletne gitare od gotovo 50%, što je svakako odličan rezultat. Osim toga Al pjena daje garantirana i uvijek ista svojstva, dok se kod drveta zvučna svojstva mogu značajno razlikovati prema rasporedu godova.



Slika 45. Tijelo gitare od Al pjene dobiveno nakon obrade



Slika 46. Tijelo drvene električne gitare koje će poslužiti za usporedbu

6.2.4. Sklapanje gitare

Izrađene su 2 električne gitare s identičnim dijelovima, osim naravno samog tijela gitare za koje je kod drvene korištena joha (alder) iz Međimurja. Hvataljka (fretboard) - dio gitare na kojem su pragovi, napravljena je od palisandera (rosewood) sa Sri Lanke. Drvo korišteno za vratove obadvije gitare je kanadski javor (hard maple). Vratovi su izrezani iz iste daske sa susjednih pozicija, tako da je s tonskog stanovišta utjecaj različitosti drveta sveden na minimum. Vratovi su identični i pričvršćuju tako da se na poledinu gitare stavi pravokutna metalna pločica s 4 rupe. Rupe na pločici i samom tijelu su takve da vijci lagano prolaze. U vratu su izbušene uske rupe, pa vijci sami naprave navoj pri zatezanju ploče na tijelo gitare. Svi korišteni dijelovi su vrhunske kvalitete najviše klase tako da nije bilo ograničavajućih faktora.



Slika 47. Tijelo gitare bez vrata

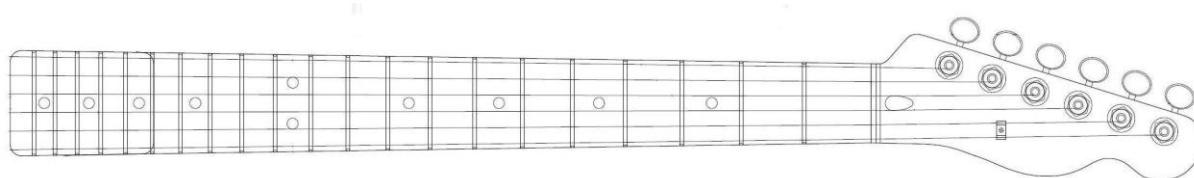


Slika 48. Tijelo gitare nakon montiranja drvenog vrata

Karakteristike izrađenih gitara i korišteni dijelovi:

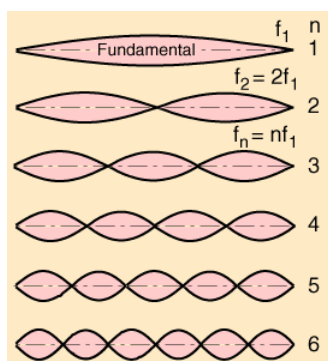
- Menzura: 647.7mm (25.5");
- Tijelo gitare: **joha Međimurje / aluminijska pjena ALPORAS;**
- Vrat: kanadski javor;
- Hvataljka: palisander Sri Lanka;
- Navijači: Schaller locking chrome;
- Držači žica: Fender vintage nickel;
- Pragovi: Rockinger medium pro silver;
- Šipka u vratu: Stewmac double action 25.5";
- Most: Fender Tele vintage 3s chrome;
- Konjić: Graphtech Artbone creme;
- Kapice potencijometara: Gotoh barrel chrome;
- Držeči remena: Gotoh chrome;
- Zaštitna ploča: troslojni vinil;
- Ploča kontrola: Gotoh tele chrome;
- Pločica za vrat: Tronik custom chrome;
- Vijci za vrat: Allparts chrome philips;
- Vijci za ploče: Stewmac pickguard screws chrome;
- Magneti: Lindy Fralin tele blues custom set (B+N);
- Potencijometri: CTS mini 250 Kohm;
- Sklopka: Switchcraft 3-way;
- Kondenzator: Orange drop mini 0.022microF;
- Utičnica: Switchcraft mono jack chrome;
- Kabeli za unutrašnje ožičenje: GFS;
- Boja: Sunburst – drvena gitara
Boja aluminijska – Al gitara;
- D'addario EXL111 Nickel Wound, Balanced Tension Regular Light, 10-46;
- Ukupna masa: **drvena gitara=3618 g**
Al gitara=2556 g.

Oštri rubovi i površina gitare su naknadno brušeni da ne bi smetali gitaristu za vrijeme sviranja. Kompletna gitara s tijelom od aluminijske pjene je gotovo 30% lakša (više od 1 kg) u odnosu na identičnu gitaru od drveta. To je vrlo značajan rezultat koji bi u potencijalnoj široj primjeni znali cijeniti glazbenici koji duže vrijeme provode svirajući, osim toga atraktivan izgled gitare s površinom pjene bez kore naišao je na odlične reakcije ljudi iz glazbenih krugova. Iako bi i vrat gitare zasigurno bilo moguće napraviti od aluminijske pjene, što bi donijelo još značajnije uštede na masi gitare, u ovom radu korišten je standardni vrat gitare od drveta (kanadski javor).



Slika 49. Vrat Fenedera Telecaster [14]

Za kvalitetan zvuk važne su i kvalitetne žice, korištene su D'addario EXL111 Nickel Wound, Balanced Tension Regular Light, 10-46.4



Slika 50. Princip frekvencija po kojima se štimaju žice gitare [14]



Slika 51. Gitara od aluminijske pjene

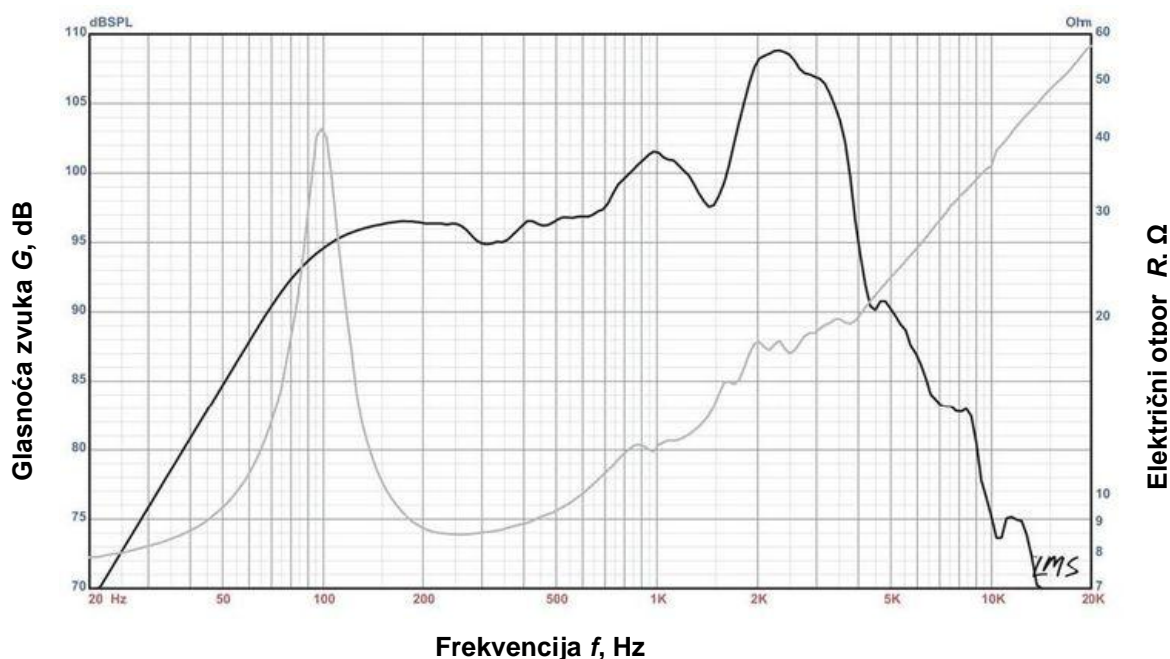


Slika 52. Usporedene gitare od drveta i aluminijske pjene

6.3. Ispitivanje gitare

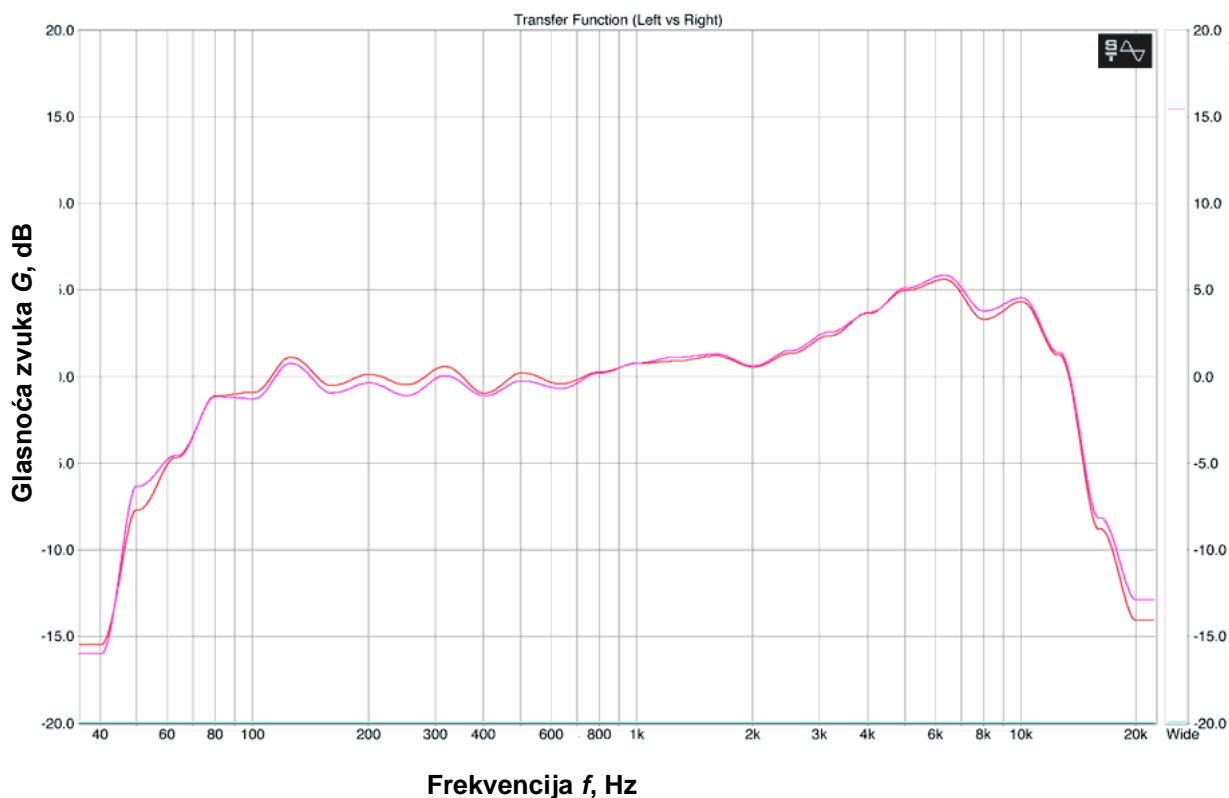
6.3.1. Ispitivanje zvučnih svojstava gitare

Već su prva testiranja zvučnih svojstava aluminijske pjene prije izrade same gitare pokazala da nema neželjenih odzvanjanja (prizvuka) koje se javljaju kod punog aluminija. Gitare su usporedno testirane na uređaju koji mjeri vibracije tvrtke Sound Research. Testiranja su obavljena na zvučniku Eminence Legend 12 inch, i mikrofonom Shure m57 čije su karakteristike prikazane na sljedećim dijagramima na slikama 53. i 54.



Slika 53. Karakteristike zvučnika na kojem je provedeno testiranje [15]

Na dijagramu zvučnika su dvije krivulje. Tamnija krivulja prikazuje glasnoću [dB] na ordinati obzirom na frekvenciju [Hz] na apscisi. Dijagram pokazuje da je zvučnik najglasniji u frekventnom opsegu koji odgovara gitari (200 Hz do 4 kHz) a tiši izvan tog područja, pa smanjuje razne neželjene prizvuke i šumove. Druga svjetlija krivulja prikazuje promjenu otpora zvučnika [Ω] na ordinati obzirom na frekvenciju [Hz] na apscisi. Ova krivulja u manjoj mjeri utječe na zvuk, a više na izbor i podešavanje pojačala. Pokazuje kakva je potrebna struja signala iz pojačala.

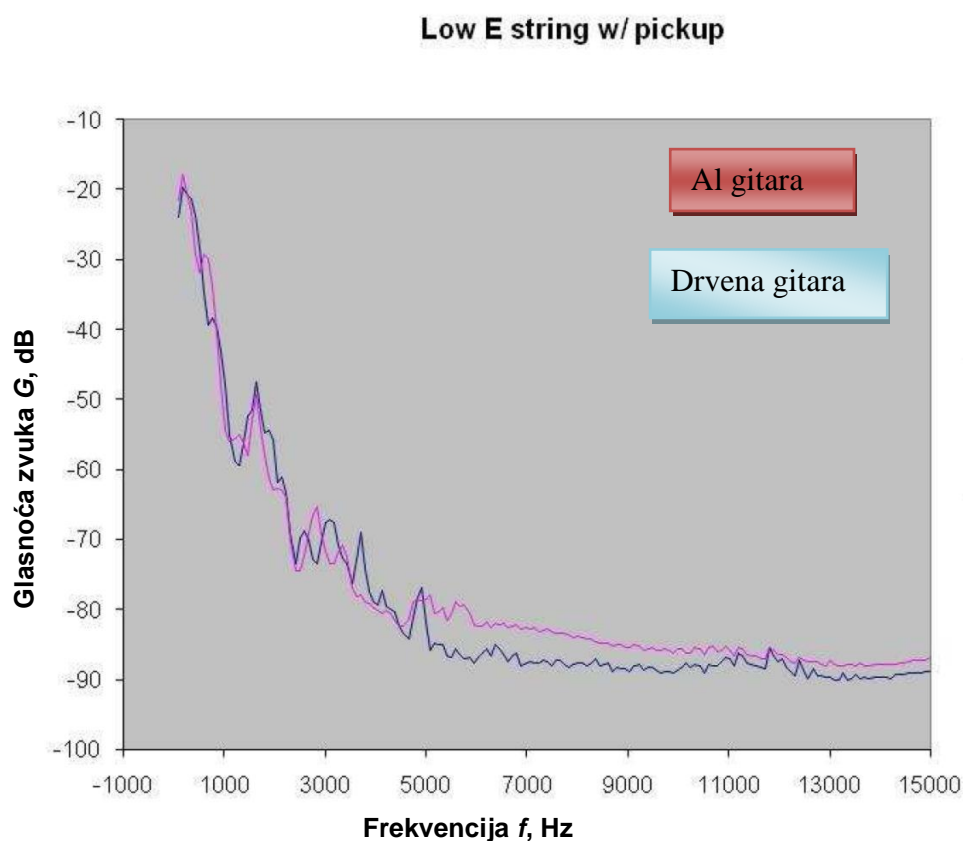


Slika 54. Karakteristike mikrofona na kojem je provedeno testiranje [15]

Na dijagramu mikrofona su dvije krivulje. Krivulje prikazuju male različitosti dviju varijanti istog modela mikrofona. Mikrofon su najosjetljiviji u frekventnom rasponu od 80 Hz do 10 kHz pa mogu vjerno prenijeti zvuk iz zvučnika korištenog za testiranje. Crvena krivulja je prikazuje standardni ravni mikrofoni Shure m57 koji se koristi za hvatanje signala iz jednog zvučnika. Roza krivulja je za kutnu varijantu istog mikrofona koja je korištena za testiranje gitare, koristi se za istovremeno hvatanje signala s dva zvučnika.

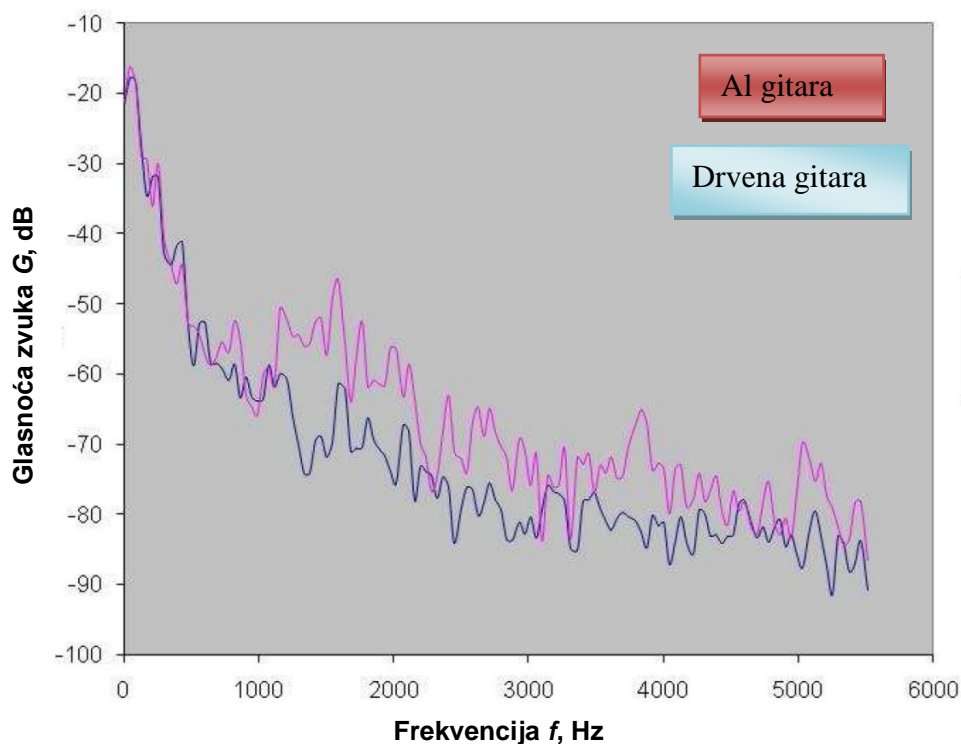
Izbor pojačala, zvučnika i mikrofona je bio takav da su međusobno kompatibilni i na vrhunskoj studijskoj razini.

Rezultati ispitivanja su prikazani na sljedećim dijagramima rezonancije, **crvenom bojom prikazani su rezultati gitare od aluminijske pjene, a plavom bojom rezultati drvene gitare od johe**. Dijagrami prikazuju rezonanciju obiju gitara po žicama i to svaka prazna žica direktno iz magneta (pick-upa) u uređaj, te preko zvučnika i mikrofona čije su karakteristike već prikazane.



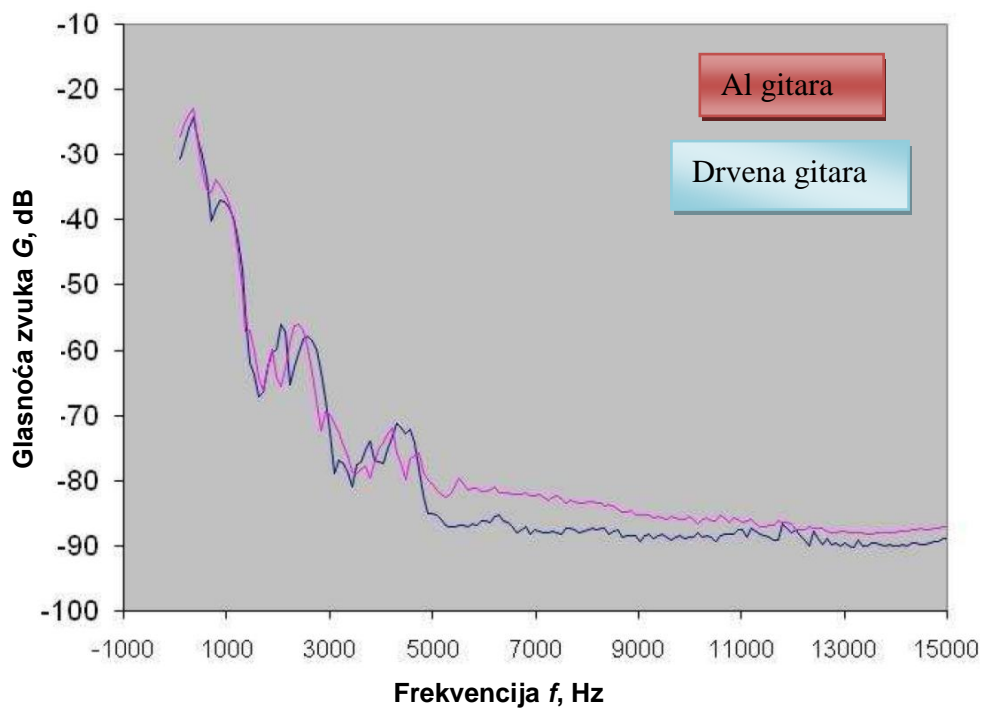
Slika 55. Dijagram duboke E-žice preko magneta

Low E String w/microphone

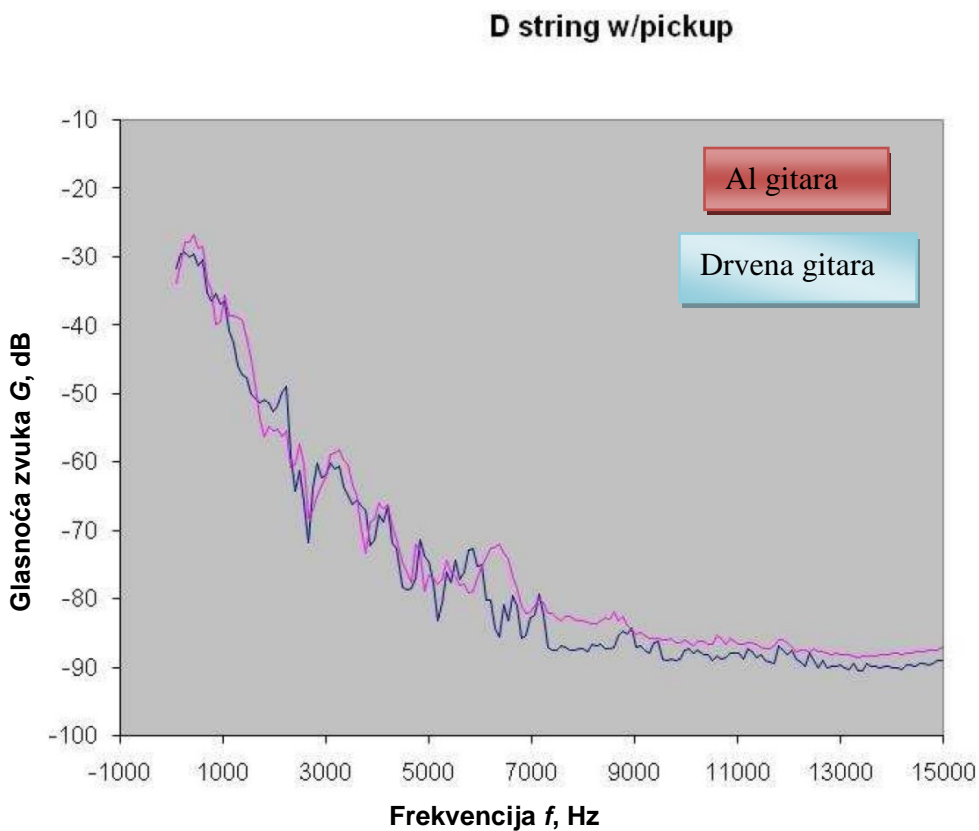
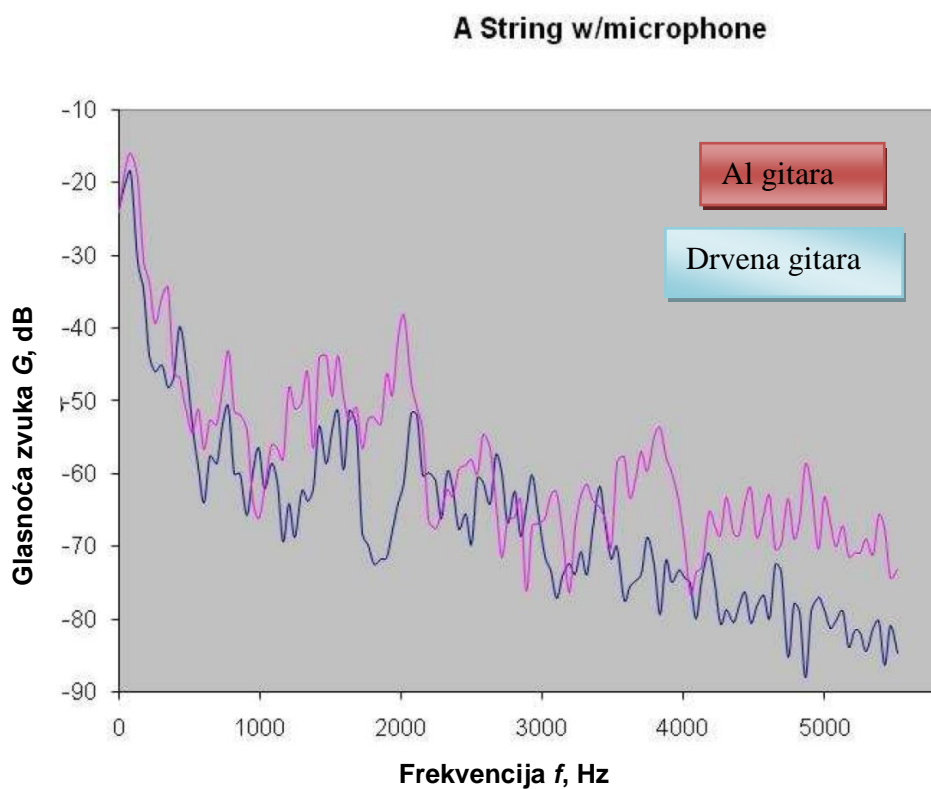


Slika 56. Dijagram duboke E-žice preko mikrofona i zvučnika

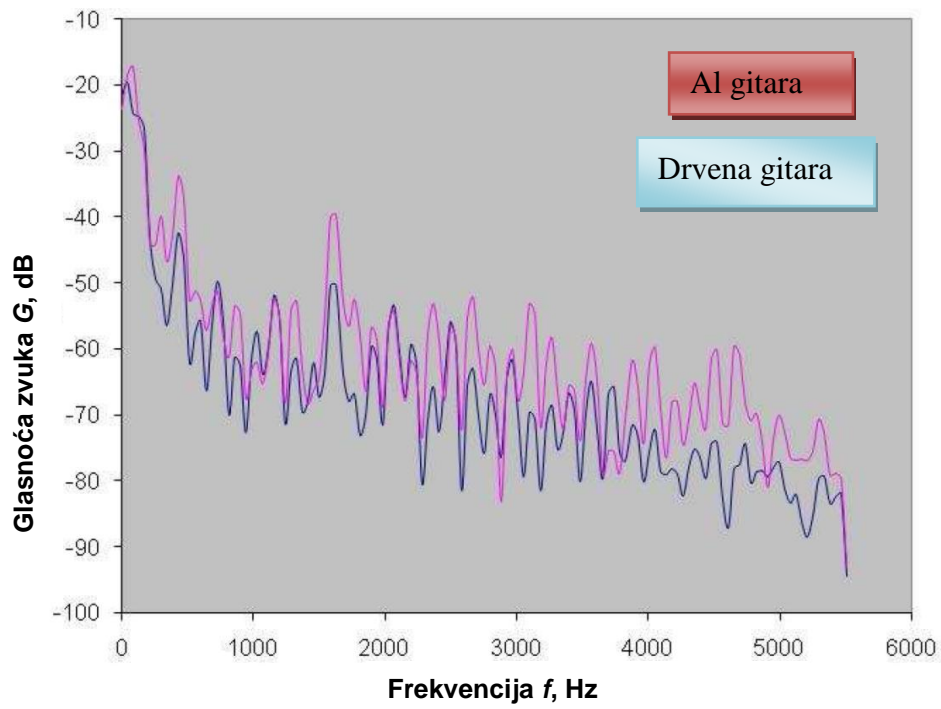
A string w/pickup



Slika 57. Dijagram A-žice preko magneta

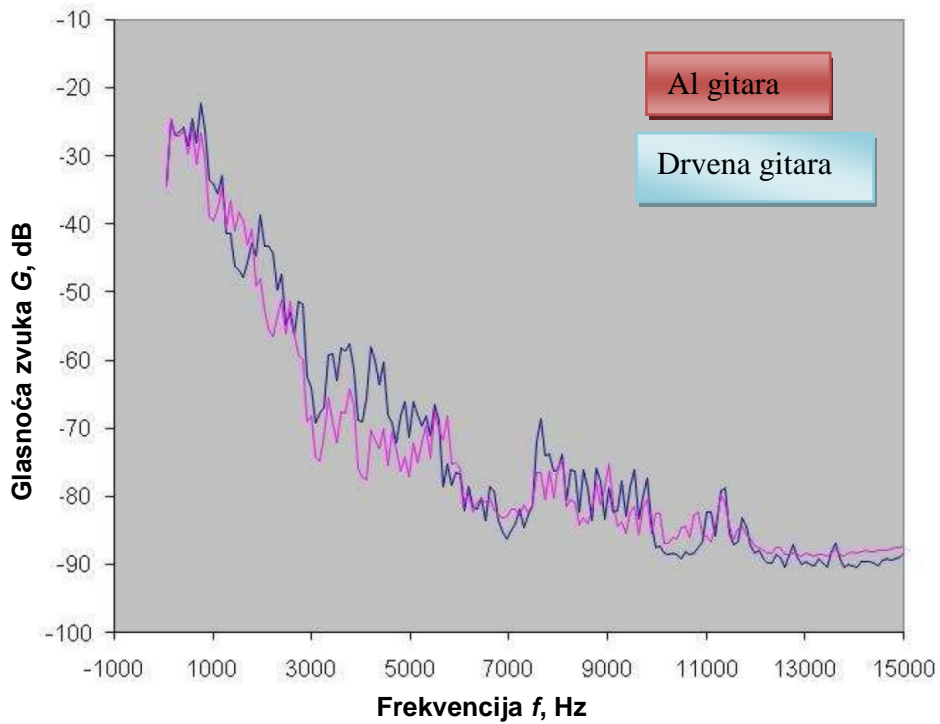


D String w/microphone

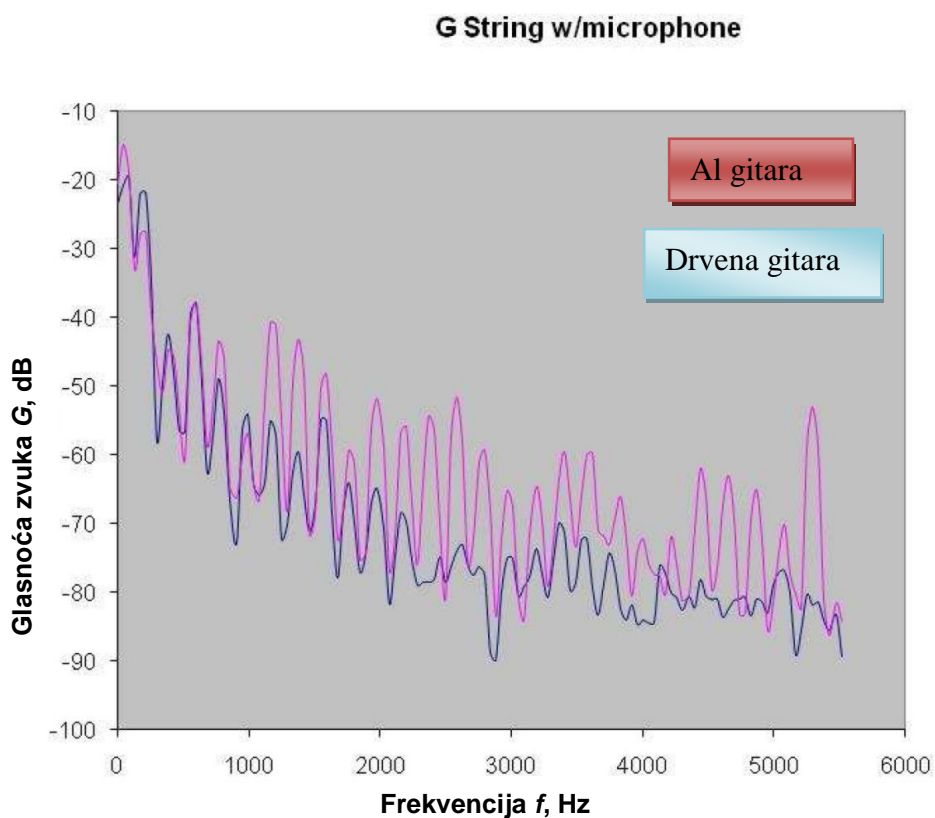


Slika 60. Dijagram D-žice preko mikrofona i zvučnika

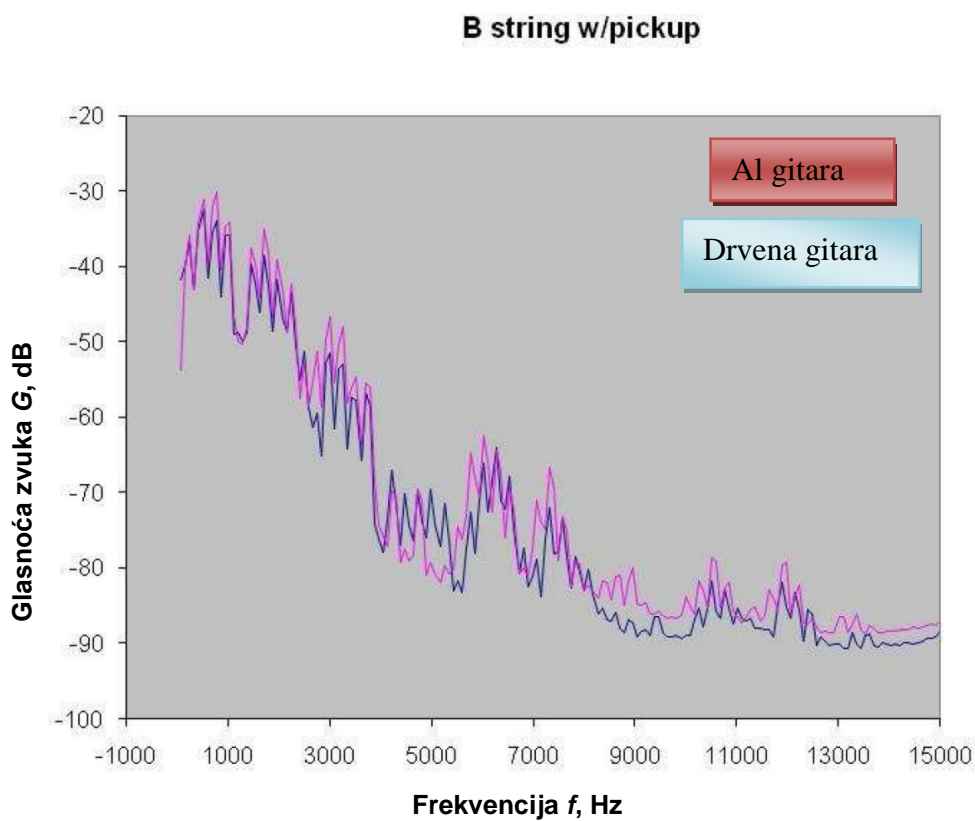
G string w/pickup



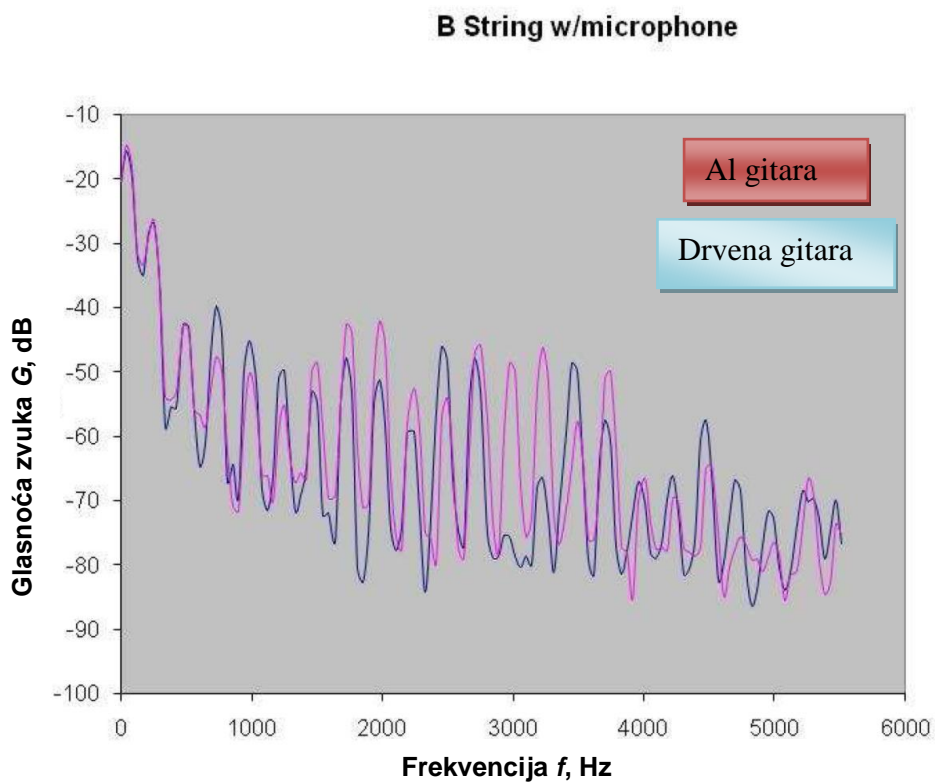
Slika 61. Dijagram G-žice preko magneta



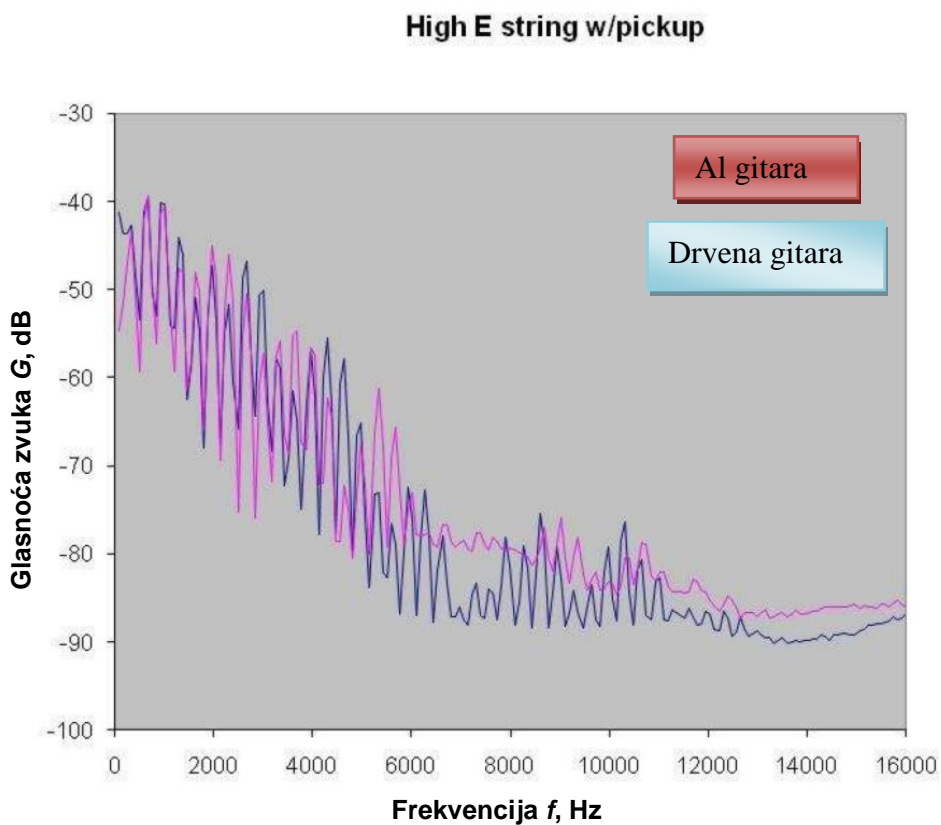
Slika 62. Dijagram G-žice preko mikrofona i zvučnika



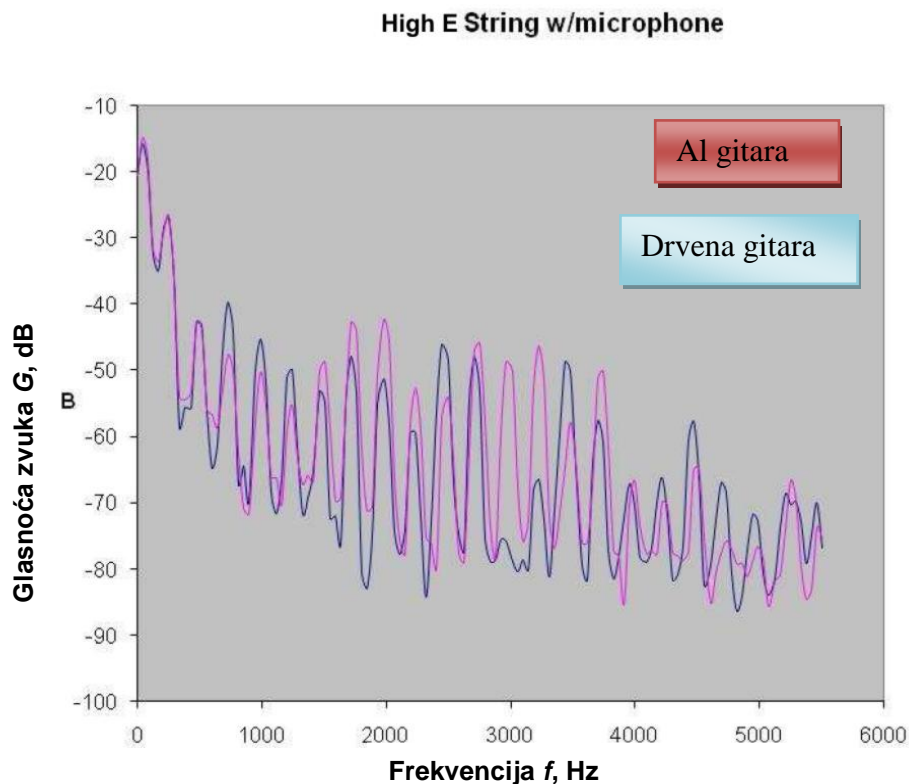
Slika 63. Dijagram B-žice preko magneta



Slika 64. Dijagram B-žice preko mikrofona i zvučnika



Slika 65. Dijagram visoke E-žice preko magneta

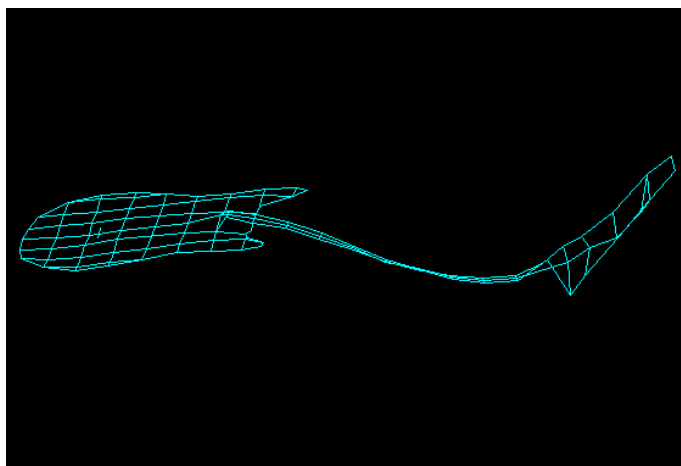


Slika 66. Dijagram visoke E-žice preko mikrofona i zvučnika

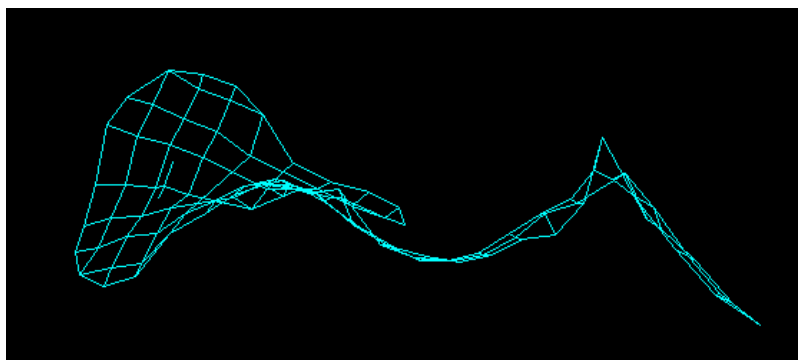
Navedeni dijagrami rezonancije mogu se protumačiti na sljedeći način, gitara od aluminijske pjene ima bogatiji zvuk (više harmonika/alikvota), te dulji ton (sustain) u odnosu na drvenu gitaru. Ima jače izražene basove (vrhovi krivulja su na debljim žicama izraženiji) što ju čini boljom za sviranje ritma (uloga ritam gitare). U srednjim tonovima pokazuje superiornost koja kod tihog sviranja ne dolazi do izražaja, nego se smatra malim nedostatkom. Ljudsko uho funkcioniše tako da bolje čuje frekvencije ljudskog glasa, a to su srednje frekvencije raspona gitare, pa je centar u mozgu prilagođen da bolje čujemo poželjne frekvencije. Zato kod tihog sviranja i zvukova normalnog intenziteta moramo "pojačati" visoke i niske frekvencije jer srednje frekvencije najbolje čujemo. Kod vrlo glasnog sviranja (rock koncert) srednji tonovi trebaju biti podignuti u odnosu na ekstreme, za što je gitara od Al pjene idealna. Prema tome Al gitara ima sve bolja svojstva što se svira glasnije.

Što se tiče visokih tonova, bogatija je od drvene gitare, ali s manjim i zaobljenijim vrhovima krivulja što joj daje topliji ton koji nije staklast i ne "šilji", dakle ton je ugodan. Šiljati visoki tonovi su pri glasnoj svirci vrlo neugodni i jednodimenzionalni. Na tom području je Al gitara postigla odlične rezultate koje je još jedino potrebno pokazati u živoj svirci.

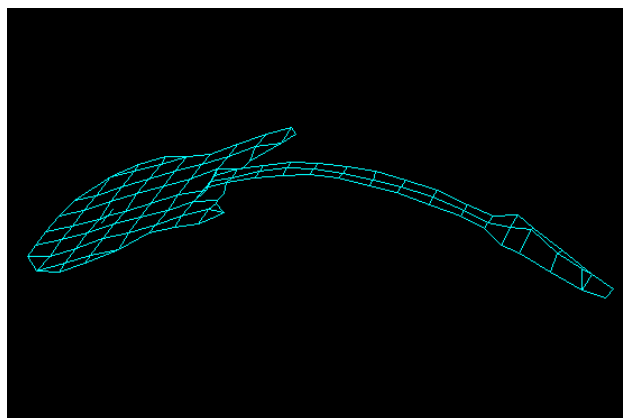
Na sljedećim slikama je prikazano titranje kompletne gitare uzrokovano trzanjem žica različitih frekvencija, naravno prikaz je ilustrativne prirode i karikirano prikazuje način na koji gitara reagira na trzanje žice.



Slika 67. Titranje gitare pri frekvenciji od 160,1 Hz



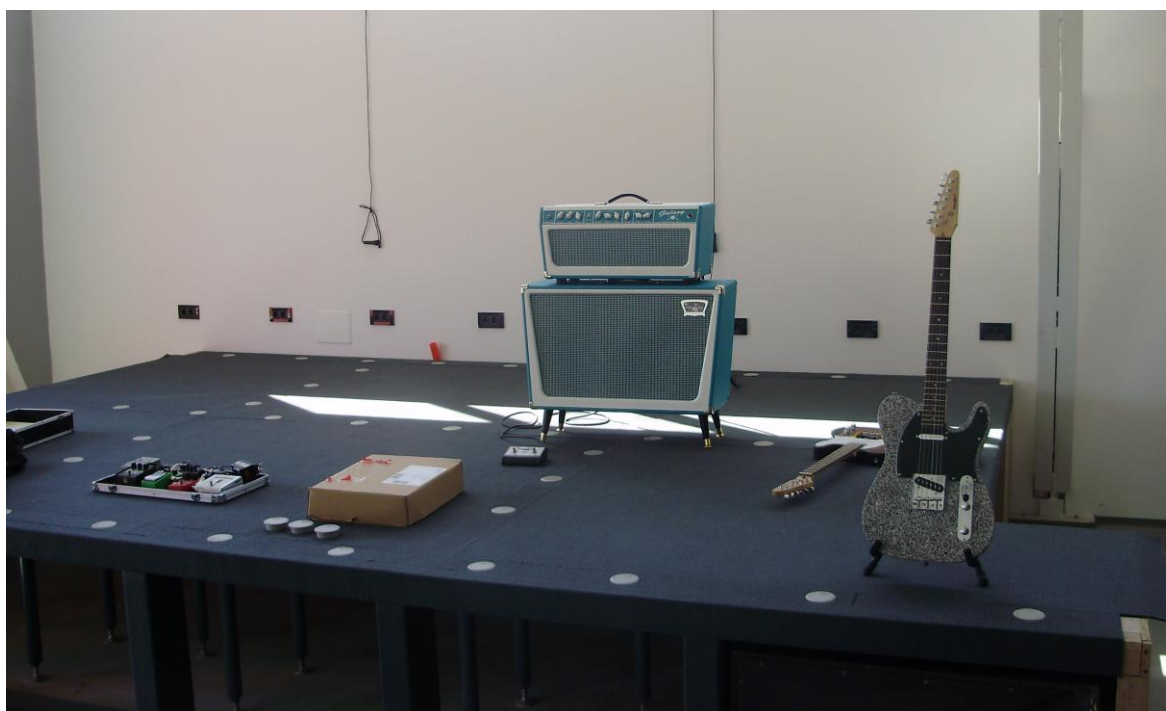
Slika 68. Titranje gitare pri frekvenciji od 369,74 Hz



Slika 69. Titranje gitare pri frekvenciji od 55,3 Hz

6.3.2. Audio i video snimanje gitare s profesionalnim studijskim glazbenikom

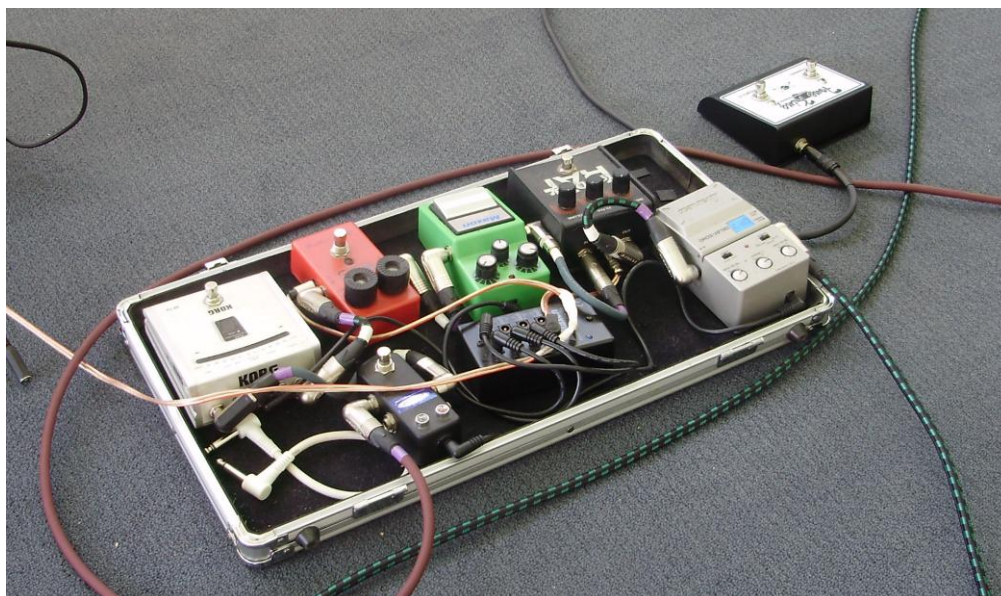
Za snimanje i usporedbu izrađenih gitara sviranjem različitih glazbenih aranžmana angažiran je profesionalni studijski glazbenik Zoran Viceban. Snimanje je napravljeno u improviziranom tonskom studiju u Dugom Selu, korištena je isključivo vrhunska profesionalna studijska oprema tako da nije bilo ograničavajućih faktora koji bi utjecali na zvuk gitare. Korišteno je Tone King Galaxy pojačalo snage 60 W, zvučnici Tone King Eminence legend, mikrofoni Shure m57, digitalni snimač Korg digital 8 canal hard disc recorder d888, kablovi Evidence audio Lyric HG, jackovi Neutrik NP2X te digitalna HD video kamera. Uspoređivane u izrađene gitare u identičnim uvjetima, pri istim postavkama pojačala, tako da su postignuti idealni uvjeti za usporedbu.



Slika 70. Improvizirani tonski studio



Slika 71. Digitalni snimač Korg digital 8



Slika 72. Tehnika potrebna za snimanje

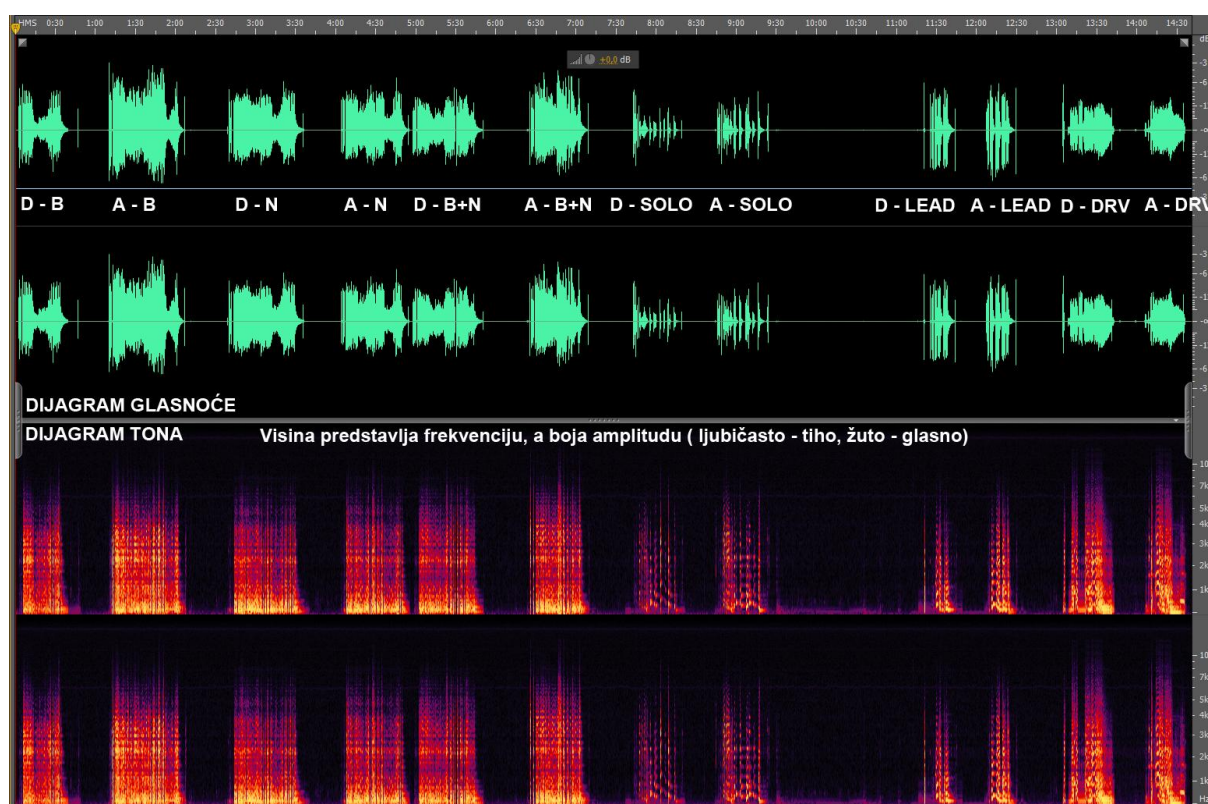


Slika 73. Tone King Galaxy pojačalo



Slika 74. Tonsko i video snimanje gitare

Gitare su snimane naizmjenično, tako da je gitarista identičnu melodiju odsvirao na jednoj i zatim na drugoj gitari. Također su napravljene snimke pri različitim postavkama gitare i pojačala, prvo "clean" a zatim "dirty rat mode". Sve je zabilježeno digitalnom video kamerom te je napravljen kratki film o snimanju i usporedbi gitara koji se nalazi na priloženom na CD-R mediju. Prema subjektivnom mišljenju profesionalnog gitariste izrađena gitara ima odlična svojstva i po ničemu ne zaostaje za drvenom verzijom. U nekim aspektima bogatstva samog zvuka ju čak i nadmašuje. Tako da se je izrada gitare od aluminijske pjene pokazala više nego uspješnom.



Slika 75. Dijagram glasnoće i tona: D - drvena, A - aluminijska, B - bridge pickup, N - neck pickup, LEAD - slaba distorzija, DRV - jača distorzija.

Snimka je naknadno analizirana dijagramima glasnoće i tona. Očito je da je gitara od Al pjene glasnija, što se zorno vidi u dijagramu glasnoće. Gledanjem boja u dijagramu tona vidi se da je gitara od Al pjene ispunjenija bojama, pogotovo u području srednjih frekvencija, osim toga ima i znatno više harmonika (visoki šiljci) prikazani ljubičastom bojom, tako da je to svakako odličan rezultat.

7. ZAKLJUČAK

Metalne pjene su zanimljiv konstrukcijski materijal koji očito još nije dovoljno istražen s obzirom na svoje potencijale. Metalne pjene imaju dokazano odlična svojstva apsorpcije energije udara i vibracija slična drvetu, pa se je sama ideja izrade tijela električne gitare od aluminijske pjene pokazala odličnom.

Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti sljedeće:

- Izrada tijela gitare od Al pjene donosi enormnu uštedu na masi tijela koje je 50 % lakše od drvenog,
- Tijelo gitare od metalne pjene daje garantirana zvučna svojstva;
- Svaka izrađena gitara s tijelom od aluminijske pjene u slučaju serijske proizvodnje će zvučati identično, dok se kod drvenog tijela zvučna svojstva značajno razlikuju prema rasporedu godova drveta, tako da je moguće dobiti značajno različita zvučna svojstva čak i iz istog komada drveta;
- Moguća je izrada vrata gitare od aluminijske pjene, što bi donijelo još veću uštedu na masi tako da bi gitara bila još mnogo lakša, međutim za to nije bilo mogućnosti u okviru ovog rada;
- Izrađena gitara po ničemu ne zaostaje za standardnim drvenim gitarama visoke klase, tako da ih u nekim svojstvima čak i nadmašuje što je zorno prikazano na dijagramima ispitivanja materijala;
- Ističe se unikatnim izgledom i vrlo malom masom;
- U slučaju potencijalne serijske proizvodnje ovakve gitare bilo bi potrebno napraviti kalup, te jednom od poznatih tehnologija upjenjivanja proizvoditi tijela gitare, na taj način eliminirala bi se većina obrade odvajanjem čestica i postigle značajne uštede u odnosu na postupak opisan u ovom radu;
- Ovim radom prikazana je jedna potpuno nova i vrlo uspješna mogućnost korištenja metalnih pjena.

PRILOZI

I. CD-R disc

LITERATURA

- [1] T. Filetin, I. Kramer, G Marić: Metalne Pjene, Hrvatsko Društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [2] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Gitara>
- [3] http://guitarbookhr.comze.com/?page_id=87
- [4] [http://www.instructables.com/id/Build-Your-Own-Electric-Guitar!/
/](http://www.instructables.com/id/Build-Your-Own-Electric-Guitar!/)
- [5] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
- [6] 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.
- [7] J. Banhart; Metallschäume, MIT Verlag, Bremen, 1997.
- [8] Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams John Banhart, Bremen, Germany, 2000.
- [9] W. Krach, T. Daxner, F.G. Rammerstorfer: Metallic Foams versus Human Bones, Proceedings of the EUROMAT Conference, Rimini, 2000., Paper No. 1160
- [10] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson: Compressive and tensile behaviour of aluminium foam, Materials Science and Engineering A270 (1999.), p. 113 – 124
- [11] C. Motz, R. Pippan: Deformation behaviour of closed – cell aluminium foams in tension, Acta mater. 49(2001.), p. 2463-2470
- [12] F. Simančik, H. P. Degischer, H. Worz : «Foamed aluminium – light structural and insulation material», Euromat 1995., Venice / Padua, Italy, 25. – 28. 09. 1995.
- [13] František Simančik: “Aluminium Foam potential for ultra-lightweight structures”, Institute of Materials & Machine Mechanics Slovak Academy of Sciences, Bratislava, January 2004.
- [14] <http://www.gitare.info/list.php?c=izradagitare>
- [15] <http://www.toneking.com/products/index.html>