



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET

Jasmin Horak

**ISTRAŽIVANJE TEMPERATURE KOD ROTACIJSKOG
ZAVARIVANJA MOŽDANIKA**

Zagreb, svibanj 2019.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za namještaj i drvene proizvode, Drvnotehnološkog odsjeka Šumarskog fakulteta pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Ivice Župčića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	2
2.1 Zavarivanje drva	2
2.1.1 Rotacijsko zavarivanje	2
2.1.2 Vibracijsko zavarivanje	10
2.2 Svojstva bukovine	12
3. CILJEVI RADA	14
4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA	15
4.1 Izbor materijala	16
4.1.1 Izbor masivnog drva	16
4.2 Priprema uzoraka za zavarivanje okomito na smjer vlaknaca	16
4.2.1 Određivanje početnog sadržaja vode u uzorcima	16
4.2.2 Priprema uzoraka	17
4.2.3 Priprema moždanika	20
4.3 Izrada ispitnih proba	20
4.4 Način ispitivanja	24
5. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA	27
5.1.1 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 865 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $1,11 \text{ m/min}$ (865_50)	27
5.1.2 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 865 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $2,03 \text{ m/min}$ (865_100)	29
5.1.3 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $1,11 \text{ m/min}$ (1520_50)	31
5.1.4 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $2,03 \text{ m/min}$ (1520_100)	33
5.2 Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka	35

5.3	Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja	36
6.	ZAKLJUČAK	38
7.	PRILOZI.....	39
7.1	Usporedba izvlačnih sila (statistička obrada)	39
7.2	Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja (statistička obrada).....	41
8.	LITERATURA.....	43
8.1	Popis slika.....	45
8.2.	Popis tablica.....	46
8.3.	Popis grafikona	47
	Sažetak	48
	Summary	49

1. UVOD

U današnje doba sve je prisutniji termin "ekologija" u načinu života, ali i prozoda. Utjecaj koji ostavljamo na okoliš i naše zdravlje proizvodima u upotrebi koji nas okružuju te proizvodima koje zbrinjavamo nakon njihove upotrebe ostavit će dugotrajan trag na zdravlje prirode, samim time i na naše zdravlje i budućih generacija koje dolaze iza nas. Svakodnevno traženje rješenja ekološki prihvatljivih materijala, njihovu proizvodnju, izradu krajnjeg proizvoda te uporabu istih nije zaobišlo niti jednu struku.

Kod proizvodnje drvnih proizvoda gotovo je nezaobilazna primjena smola kao veziva u proizvodnji drvnih ploča i namještaja stoga pronaći konstrukcijsko rješenje trajnog povezivanja dvaju elementa drva bez upotrebe smola nije nimalo lak zadatak.

„Zavarivanje drva svakako je jedna od novijih disciplina koja se ozbiljnije počela razvijati prije dvadesetak godina, neprestano se razvija i usavršava i dan danas, kako bi u puno većoj mjeri bila zastupljena u finalnoj obradi i konstrukcijama proizvoda od drva. Danas postoje proizvodi koji su konstrukcijski riješeni i spojeni pomoću zavarivanja drva. Prije dvadeset godina znanstvenici su predvidjeli kako je zavarivanje drva nova disciplina s velikim potencijalom i perspektivnom budućnošću. Čovjeka danas okružuje znanost koja svaku pojavu i nepoznanicu nastoji razjasniti do najsitnijih detalja. U tome svakako ne sudjeluje samo pojedinac, već timovi sastavljeni od znanstvenika iz raznih područja i disciplina. Doći do idealnog zavarenog konstrukcijskog spoja nije nimalo jednostavan i lak zadatak. Potrebno je poznavati djelovanje i utjecaj kako glavnih tako i manje bitnih čimbenika na zavareni spoj, što je preduvjet za postizanje određene čvrstoće spoja. Provedena istraživanja rotacijskog zavarivanja ukazuju na zavidnu čvrstoću zavarenog spoja. Može se reći kako je čvrstoća zavarenog spoja mjerljiva s čvrstoćom lijepljenog spoja, a u nekim situacijama i veća. Ovo istraživanje daje određeni doprinos u spoznajama oko rotacijskog zavarivanja masivnog drva i primjeni tako spojenih elemenata“ (Župčić, 2010.)

U radu će se istraživati utjecaj frekvencije vrtnje (1520 i 865 min^{-1}), brzina pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi ($1,11$ i $2,03 \text{ m/min}$), s dubinom zavarivanja u iznosu 20 mm na temperaturu u rotacijski zavarenom spoju. Smjer zavarivanja je okomit na smjer vlakana uz konstantno trajanje zavarivanja uz pritisak na moždanik nakon zavarivanja u roku trajanja $3 - 5 \text{ s}$. Temperatura je mjerena pomoću mjernih sondi na pozicijama definiranim dosadašnjim istraživanjima. Zavarivanje će se izvršiti bukovim moždanikom u bukovu podlogu.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2.1 Zavarivanje drva

Dvije najčešće primjenjivane metode zavarivanja masivnog drva i drvnih ploča jesu: zavarivanje uz pomoć vibracije i zavarivanje uz pomoć rotacije (Župčić i dr., 2011.)¹. Metodom zavarivanja uz pomoć vibracija drveni elementi međusobno vibriraju, zbog čega se pojavljuje trenje među površinama u dodiru, razvija se toplina koja „omekša i rastali“ strukturu stanica drva (hemicelulozu i lignin), a vlakanca drva međusobno se isprepletu. Zbog hlađenja struktura drva otvrdnjavanja i nastaje čvrsti spoj (zavar) (Župčić i dr., 2008.)². Nešto jednostavniji način povezivanja dva ili više elementa masivnog drva ili ploče ostvaruje se umetanjem drvenog čepa (moždanika). Kroz elemente se probuši rupa manjeg promjera od promjera čepa i u nju se uz pomoć okretnog momenta utiskuje drveni čep, a elementi koji se zavaruju međusobno se čvrsto priljube. Pri rotacijskom zavarivanju podloga (elementi) miruje, a moždanik (drveni čep) rotira uz pomak u smjeru svoje uzdužne osi. Obilježje obiju metoda jest trenje na kontaktnim površinama (Župčić i dr., 2011.)¹

2.1.1 Rotacijsko zavarivanje

Rotacijsko zavarivanje prvi su patentirali Suthoff i dr. (1996.)³ u Njemačkoj. Prilikom rotacijskog zavarivanja podloga miruje dok se moždanik rotira oko svoje osi. Trenje je posljedica koja se javlja na dodirnim površinama.

Rotacijom moždanika većeg promjera u provrt manjeg promjera stvara se toplina koja omekšava strukturu drva (ponajviše lignin i hemicelulozu) te dolazi do ispreplitanja drvnih vlakana. Hlađenjem spoja nastaje čvrsto zavaren spoj (Župčić, 2010)⁴.

¹ Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., 2011: Vrijeme trajanja zavarivanja kao važan čimbenik zavarivanja bukovine, *Drvena industrija*, 62 (2) 115 –121

² Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., Hrovat, B., 2008: Zavarivanje masivnog drva, *Drvena industrija*, 59 (3) 113 –119

³ Suthoff, B., Franz, U., Hentschel, H., Schaaf, A. 1996.: Verfahren zum reibschweissartigen Fügen und Verbinden von Holz. *Patentschrift DE, 196(20)*, 273

⁴ Župčić, I. 2010.: Čimbenici koji utječu na spajanje tokarenih bukovih elemenata tehnikom zavarivanja. *Doktorska disertacija*, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb

Pizzi i dr. (2004.)¹ istraživali su problematiku rotacijskog zavarivanja moždanika u podlogu i optimizaciju čimbenika koji utječu na čvrstoću zavarenog spoja. Moždanici su utiskivani u podlogu od bukovine u provrte promjera 8, 9 i 10 mm. Korištene su dvije frekvencije vrtnje: od 800 i 1200 o/min. Nakon zaustavljanja rotacije održan je kratkotrajni pritisak na moždanik. Prije ispitivanja zavareni uzorci su kondicionirani tjedan dana u određenoj klimi (20 °C i 65 % vlage). Vrijeme zavarivanja (W.T.) iznosilo je: 0, 2 i 4 s, do dubine od: 12 i 30 mm. Kao podloga korištena je bukovina (*Fagus Sylvatica* L., tvrdo drvo) i smrekovina (*Picea Abies*, meko drvo), a moždanici su bili od bukovine (glatki i nažljebljeni). Smjer utiskivanja moždanika u podlogu bio je radijalni, tangentni i longitudinalni. Vlažnost uzoraka bila je 12 %. Uzorci su bili ispitivani na izvlačnu silu (izvlačenjem moždanika iz podloge u koju su bili zavareni) s pomakom od 2 mm/min. Najveća izvlačna sila postignuta je u slučaju kada je bukov moždanik promjera 10 mm zavaren u bukovu podlogu u provrt 8 mm s frekvencijom vrtnje 1200 o/min. Maksimalna izvlačna sila iznosila je 1500 N, a prosječna sila je 883 N. Prema ovom istraživanju statistički značajan utjecaj na izvlačnu silu ima vrsta podloge za koju je moždanik zavaren (vrsta drva), promjer rupe (provrt) i vrijeme zavarivanja (pomak moždanika za vrijeme rotacije). Tip presjeka (radijalni, tangentni ili poprečni), tip moždanika (glatki ili nažljebljeni) i frekvencija vrtnje u svim slučajevima ovog istraživanja nemaju statistički značajnu razliku.

Zador pri zavarivanju moždanika jedan je od vrlo bitnih čimbenika zavarivanja te ima znatan utjecaj na čvrstoću spoja (Pizzi i dr., 2003; Ganne-Chedeville i dr., 2005)^{2,3}. Optimalni zador pri rotacijskom zavarivanju moždanika (prema spomenutim autorima) iznosi 2 mm, pa je zbog toga u ovom istraživanju korišten zador od 2 mm. Najveća izvlačna sila postignuta je kada je bukov nažljebljeni moždanik zavaren u bukovu podlogu, u provrt od 8 mm, frekvencijom vrtnje od 1 200 okr./min. Dubina zavarivanja iznosila je 12 mm, a prosječna izvlačna sila 883 N (Pizzi i dr., 2004)⁵.

¹Pizzi, A.; Leban, J. M.; Kanazawa, F.; Properzi, M.; Pichelin, F. 2004: Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 18 (11): 1263-1278.

²Pizzi, A.; Properzi, M.; Leban, J.M.; Zanetti, M.; Piche-lin, F. 2003: Mechanically – induced wood welding. *Ma-deras. Ciencia y tecnologia*, 5 (2): 101 – 106

³Ganne-Chedeville, C.; Pizzi, A.; Thomas, A.; Leban, J.M.; Bocquet, J.-F.; Despres, A.; Mansouri, H., 2005: Parame-ter interactions in two-block welding and the wood nail concept in wood dowel welding. *J. Adhesion Sci. Tech-nol.*, 19 (13-14): 1157 - 1174.

Kanazawa i dr. (2005.)¹ ispitivali su parametre koji utječu na moždanik prilikom rotacijskog zavarivanja. Za potrebe istraživanja korišteni su moždanici, glatki i užljebljeni (tip A i tip B) promjera 10 mm i duljine 80 mm. Na bukovim uzorcima bušeni su provrti dubine 30 mm gdje je provrt početnih 20 mm promjera 8 mm, a sljedećih 10 mm promjera 7,5 mm. Frekvencija zavarivanja bila je 1200 min⁻¹. Nakon zavarivanja uzorci su stavljeni na kondicioniranje (20 °C i 65 % vlažnosti zraka) tjedan dana. Brzina zavarivanja je varirala, 100 mm/min i 400 mm/min. Prilikom zavarivanja postigla se temperatura nešto veća od 183 °C s brzim opadanjem gdje se za 1 min temperatura spustila na 60-70 °C. Temperatura je mjerena termalnom kamerom. Kako bi se moglo izvršiti snimanje, izrađen je utor kroz provrt. Autori su zaključili da vjerojatno temperatura prelazi 200 °C. Međutim, zbog ograničenosti u brzini kamere, nisu bili u mogućnosti izmjeriti točnu temperaturu što potvrđuje kasnije i Rodriguez i dr. (2010)². Rodriguez i dr. proveli su istraživanje na brezovini (*Betula Alleghaniensis*) i javorovini (*Acer Saccharum*). U istraživanju su korišteni glatki bukovi moždanici promjera 9,68 mm i duljine 82 mm, a na uzorcima brezovine i javorovine izbušeni su provrti različitih promjera (7,14, 7,37 i 7,67 mm) u tri različita smjera (radijalnom, tangentnom i longitudinalnom smjeru) na dubinu od 25 mm. Također, korištene su tri frekvencije vrtnje (1000, 1500 i 2500 min⁻¹). Prije zavarivanja uzorci su stavljeni na kondicioniranje (20 °C i 65 % vlažnosti zraka). U ovom istraživanju su korišteni brzo reagirajući senzori stavljeni u bočne provrte na udaljenosti od 1 i 2 mm od linije zavara kako bi se mogla izmjeriti temperatura. Temperatura zavarivanja direktno je vezana za frekvenciju vrtnje. Odnosno, što je veća frekvencija vrtnje stvara se veća temperatura. Tako za javorovinu kod 1000 min⁻¹ prosječna temperatura je između 269 i 273 °C, za 1500 min⁻¹ prosječna temperatura je između 279 i 281 °C, a kod 2500 min⁻¹ prosječna temperatura je između 311 i 323 °C. Prosječna temperatura brezovine frekvencije vrtnje 1000 min⁻¹ iznosi između 243 i 252 °C, za 1500 min⁻¹ prosječna temperatura je između 263 i 277 °C, a kod 2500 min⁻¹ prosječna temperatura iznosi između 306 i 308 °C. Maksimalne temperature zavarivanja postignute su za 0,7 – 2 s. Dobivenom temperaturom zavarivanja autori utvrđuju kako se termalnom kamerom ne dobivaju pouzdani rezultati. Nadalje, do gotovo jednakih rezultata temperatura, s jednakim parametrima, postupcima i vrstama drva došli su i Belleville i dr. (2012.)³.

¹ Kanazawa, F.; Pazzi, A.; Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation, *J Adhesion Sci. Technol.*, 19 (12): 1025 –1038

² Rodriguez, G., Diouf, P., Blanchet, P., Stevanovic, T. 2010.: Wood –Dowel Bonding by High-Speed Rotation Welding –Application to Two Canadian Hardwood Species. *J Adhesion Sci. Technol.*, 24 (2010): 1423 –1436

³ Belleville, B., Stevanovic, T., Pizzi, A., Cloutier, A., Blanchet, P. 2012.: Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. *J Adhesion Sci. Technol.*, DOI: 10.1080/01694243.2012.687596

Veza između temperature, vremena trajanja trenja i toplinskih strujanja pri rotacijskom zavarivanju moždanika (drvenog čepa) visokom frekvencijom vrtnje može se pratiti uz pomoć matematičkog modela prijenosa topline (Zoulalian i Pizzi, 2007)¹. Temperatura kontaktnih površina (sljubnica) može se odrediti kao funkcija vremena i trajanja trenja (zavarivanja) prema formuli:

$$T_0 = T_i + \frac{2 \cdot \beta \cdot \mu \cdot \tau \cdot \sqrt{\alpha}}{h \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{t}$$

gdje je:

T₀ - temperatura zavarivanja

T_i - početna temperatura drva

t - vrijeme zavarivanja

τ - trenje kod pritiska

μ - frekvencija vrtnje ili vibracija

β - mehanička energija trenja pretvorena u toplinsku energiju (za rotacijsko i linearno zavarivanje iznosi 0,080 ± 0,01)

h - toplinska vodljivost

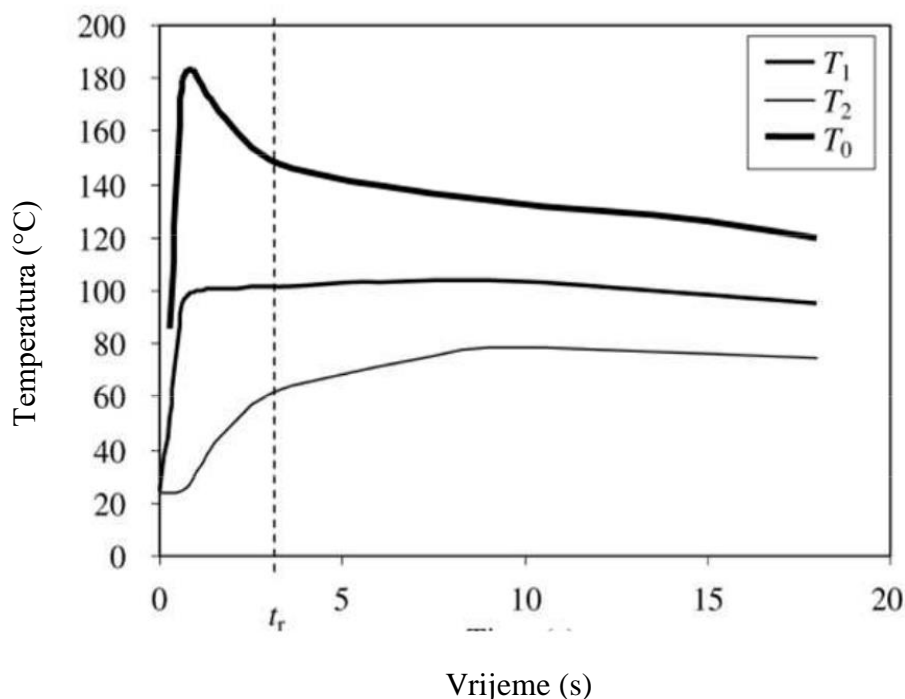
α - difuznost drva

Za rotacijsko i linearno zavarivanje vrijednost β jednaka je 0,080 ± 0,01. Prema rezultatima istraživanja (za rotacijsko zavarivanje), optimalna temperatura zavarivanja iznosi oko 180 °C (183 °C). S prestankom djelovanja trenja ta se temperatura naglo smanjuje.

Eksperimentalna i procijenjena krivulja porasta temperature kao funkcija vremena prikazana je na slici 1 za slučaj kada je promjer moždanika 10 mm a promjer rupe 8 mm. T₁ je eksperimentalna krivulja temperature na udaljenosti 1 mm od površine sljubnice, a T₂ je eksperimentalna krivulja temperature na udaljenosti 2 mm od površine sljubnice. T₀ je procijenjena krivulja temperature na kontaktnim površinama (sljubnicama). Inicijalno se povećava kao funkcija vremena u usporedbi s eksperimentalnom krivuljom temperature T₁ i T₂. Vrijeme u kome je rotacija zaustavljena označeno je t_r. (Kanazawa i dr. 2005.)².

¹ Zoulalian, A.; Pizzi, A., 2007: Wood-dowel rotation wel-ding – a heat – transfer model. J. Adhesion Sci. Technol., 21 (2): 97-108. doi:10.1163/156856107780437435

² Kanazawa, F.; Pizzi, A., Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. J. Adhesion Sci. Technol., 19 (12): 1025-1038.



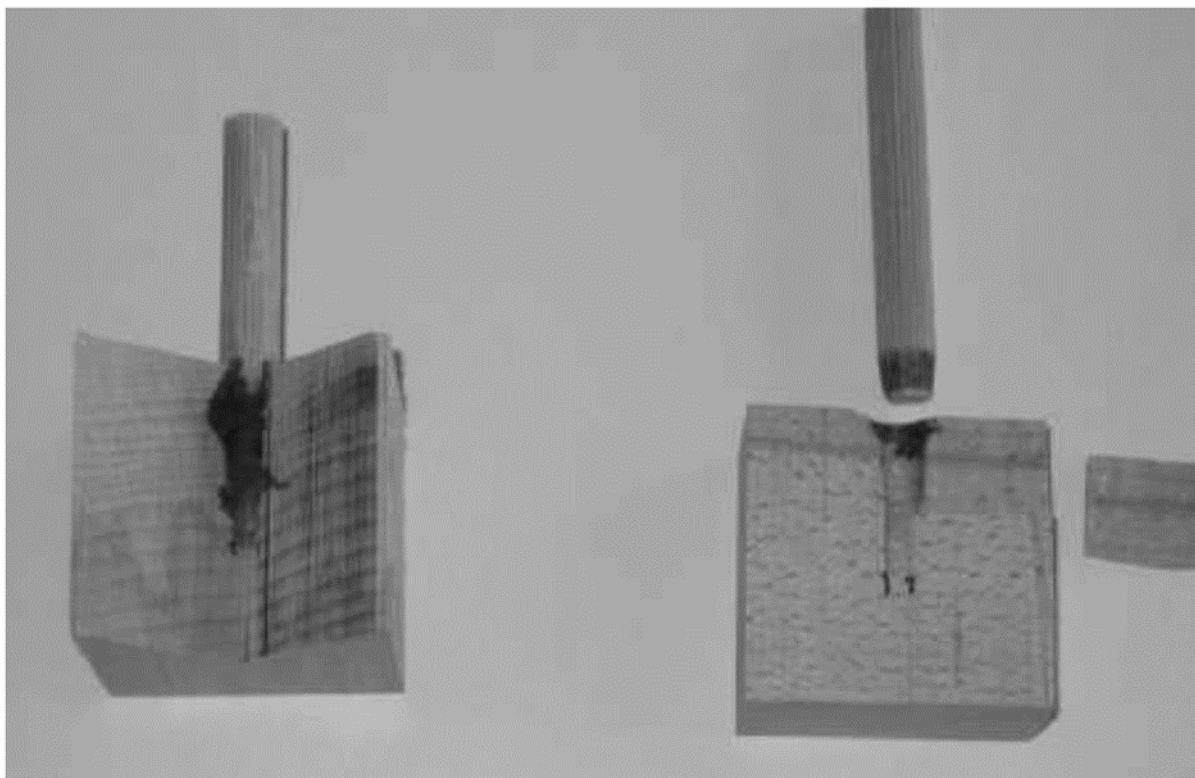
Slika 1. Krivulje eksperimentalne i procijenjene vrijednosti temperature rotacijskog zavarivanja (Zoulalian i Pizzi, 2007.)¹

Mjerenje temperature tijekom zavarivanja vrlo je složen zadatak. Za mjerenje temperature u procesu zavarivanja korištena je toplinska kamera (Kanazawa i dr., 2005.)². Na uzorku je napravljen rez koji je omogućavao pogled na moždanik tijekom rotacije (slika 2.). Za vrijeme zavarivanja izmjerena je maksimalna temperatura od 183 °C, koja za jednu min po završetku rotacije padne na samo 60 do 70 °C. Višak slobodnih vlakanca za vrijeme zavarivanja se omota oko moždanika i sprječava daljnje zagrijavanje površine moždanika. Ovaj način mjerenja temperature je indikativan jer u slučaju da uzorak nije bio zapiljen temperatura bi bila sigurno veća. Temperatura samozapaljenja drva ovisi o vrsti drva te anatomskim i fizikalnim svojstvima i kreće se u granicama od 380 do 500 °C (Babrauskas, 2001.)³. Srednje temperature zapaljenja drva pomoću otvorenog plamena (ovisno o vrsti drva), a iznose od 300 do 365 °C.

¹ Zoulalian, A.; Pizzi, A., 2007: Wood-dowel rotation wel-ding – a heat – transfer model. J. Adhesion Sci. Technol., 21 (2): 97-108. doi:10.1163/156856107780437435

² Kanazawa, F.; Pizzi, A., Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. J. Adhesion Sci. Technol., 19 (12): 1025-1038.

³ Babrauskas, V. 2001: Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Inteflam 2001, Interscience Communication Ltd, London, 71-88.



Slika 2. Dva načina zarezivanja uzorka prilikom mjerenja temperature pomoću termalne kamere (Kanazawa i dr., 2005.)¹

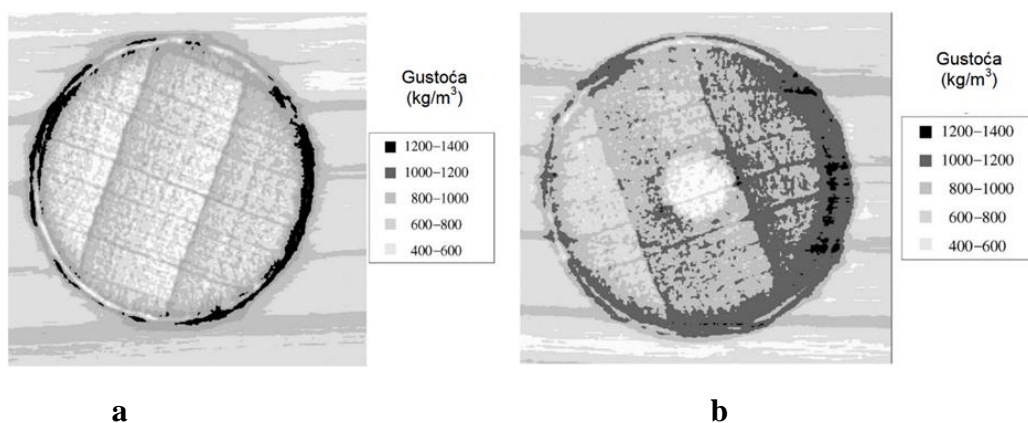
Vrijeme trajanja zavarivanja kod rotacijskog zavarivanja ima veliki utjecaj, ali isto tako se može očekivati da će duže vrijeme zavarivanja dati bolje rezultate, međutim ova tvrdnja nije istinita iz više razloga. Dužim vremenom zavarivanja postižu se veće temperature trenja pa je veća mogućnost samozapaljenja što doprinosi manjoj čvrstoći spoja. Drugo, ako je vrijeme zavarivanja previše produljeno, kod formiranog spoja dolazi do destrukcije i uništavanja staničja drva u zoni kontakta. Na slici 3 prikazana je rendgenska snimka moždanika zavarenog u podlogu (slika 3.a blizu vrha umetanja i slika 3.b blizu dna umetanja). Na slici 3.a je približno 30 % kontaktnih površina zavareno s gustoćom zavara od 1200 - 1400 kg/m³. Postoje također zone kod kojih je zavarivanje ostvareno, ali nisu toliko velike gustoće kao u glavnoj zoni (Pizzi i dr., 2003)². Postoje i zone kod kojih je došlo do promjene gustoće, ali ne i do zavarivanja. Opseg zavarivanja između kontaktnih površina (slika 3.a), procijenjen je na nešto više od 60 %, ali je čvrstoća na desnoj strani definitivno jača, kao što je prikazano širom površinom zgušnjavanja.

¹ Kanazawa, F.; Pizzi, A.; Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19 (12): 1025-1038.

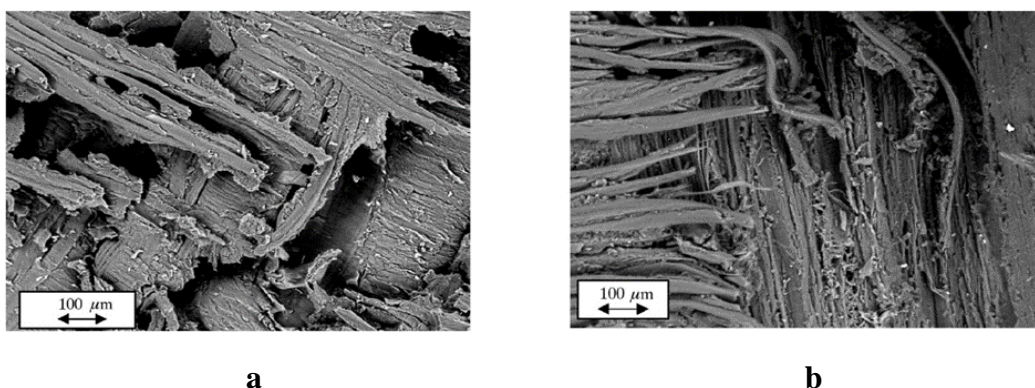
² Pizzi, A.; Properzi, M.; Leban, J.M.; Zanetti, M.; Piche-lin, F. 2003: Mechanically – induced wood welding. *Ma-deras. Ciencia y tecnologia*, 5 (2): 101 – 106

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Čvrstoća spoja uvelike ovisi o površini zavara između moždanika i provrta. Ravnina provrta i moždanika nikada nije savršena, zbog toga više pritiska (jače je trenje) dolazi na jednoj strani što uzrokuje veće trenje i bolje zavarivanje. Ovo je jedan od glavnih uzroka promjenjivosti rezultata izvlačne sile. Važno je napomenuti kako 60 % zavarenog područja daje rezultate koji su usporedivi s PVAC lijepljenim spojevima. Veći postotak zavarenog područja svakako bi imao bolje rezultate. Gustoća površine moždanika i podloge povećava se zbog zavarivanja 600 do 750 kg/m³, a kada se doda prosječna gustoća bukovine, gustoća zavarenog područja prosječno iznosi od 1350 do 1500 kg/m³. Ova gustoća je veća od gustoće spoja dobivene vibracijskim zavarivanjem (Pizzi i dr., 2003)¹.



Slika 3. Rendgenski prikaz rasporeda gustoće zavara i površine zavarivanja na poprečnom presjeku moždanika: a) blizu vrha umetanja, b) blizu dna umetanja (Pizzi i dr., 2004.)²



Slika 3.1. SEM mikroskopski prikaz ispreplitanja vlakanaca na kontaktnim površinama (slika a i b) (Pizzi i dr., 2004.)³

¹ Pizzi, A.; Properzi, M.; Leban, J.M.; Zanetti, M.; Piche-lin, F. 2003: Mechanically – induced wood welding. Ma-deras. Ciencia y tecnologia, 5 (2): 101 – 106

² Pizzi, A.; Leban, J. M.; Kanazawa, F., Properzi, M.; Pichelin, F. 2004: Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. J. Adhesion Sci. Technol., 18 (11): 1263-1278.

Poboljšavanje čvrstoće spoja postignuto je pomoću zagrijavanja moždanika na 100 °C do sadržaja vode od 1,5 %. Tada je vrući moždanik rotacijski zavarivan u podlogu. Međutim, kod zavarivanja čvrstoća spoja postiže se u nekoliko minuta, dok postoje ljepila kojima treba čak do 24 sata kako bi se postigli slični rezultati (Pizzi i dr., 2004.)¹.

Prilikom trajanja procesa zavarivanja postiže se visoka temperatura (otprilike 180 °C) koja u zoni zavarivanja smanjuje sadržaj vode u drvu. Nakon prestanka zavarivanja u drvu se postupno postiže ravnotežni sadržaj vode s okolinom (moždanik i podloga upijaju vodu iz zraka) te dolazi do bubrenja. Zbog bubrenja moždanika i podloge povećava se mehaničko zaplitanje vlaknaca i uklinjavanje samog moždanika što povećava izvlačnu silu. Ovo je vrlo izraženo kod dubine utiskivanja 30 mm, dok za dubinu od 15 mm porast izvlačne sile s vremenom trajanja kondicioniranja nije značajan (Kanazawa i dr., 2005.)²

Utjecaj na vrste drva i presjeka na čvrstoću rotacijski zavarenog spoja proučavali su Župčić i dr. (2014.)³. Korišteni su uzorci drva bukve (*Fagus Sylvatica L.*), hrasta lužnjaka (*Quercus Robur L.*) i smreke (*Picea Abies L.*). Ispitivanje se vršilo u smjeru vlaknaca podloge i okomito na njihov smjer (radijalni, radijalno/tangentni i tangentni). Korišteni su bukovi užljebljeni moždanici prosječnog promjera 10,04 mm, dok su uzorci bušeni svrdlom promjera 8 mm. Uzorci su kondicionirani šest mjeseci na 23 ± 2 °C i $50 \pm 5\%$ vlažnosti zraka. Prije testiranja izmjeren je sadržaj vode i gustoća baze uzoraka koji su iznosili: za bukovinu 9,13 % sadržaja vode s gustoćom od 0,68 g/cm³, hrastovina sadrži 9,33 % sadržaja vode i gustoće 0,69 g/cm³, a smrekovina sadrži 10,37% sadržaja vode s gustoćom od 0,45 g/cm³. Moždanici su zavarivani na dubinu od 20 mm s frekvencijom vrtnje od 1520 min⁻¹. Prema rezultatima istraživanja, vrsta drva i presjek imaju značajan utjecaj na izvlačnu silu. Najveće rezultate izvlačne sile postigli su moždanici zavareni u bukovi poprečni presjek. Također, utvrđeno je da postoji statistički značajna razlika između iznosa izvlačne sile zavarenih moždanika u smjeru vlaknaca i okomito na smjer vlaknaca. Međutim, ne postoji značajna statistička razlika između iznosa izvlačne sile u smjerovima okomito na smjer vlaknaca (radijalni, radijalno/tangentni i tangentni). Prema rezultatima istraživanja, bukovina je najpogodnija vrsta drva za zavarivanje moždanicima bez obzira na orijentaciju vlaknaca (Župčić i dr., 2014.)³.

¹ Pizzi, A.; Leban, J. M.; Kanazawa, F.; Properzi, M.; Pichelin, F. 2004: Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 18 (11): 1263-1278.

² Kanazawa, F.; Pizzi, A.; Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F.; 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19 (12): 1025-1038

³ Župčić, I., Vlaović, Z., Domljan, D., Grbac, I. 2014.: Influence of Various Wood Species and Cross-Sections on Strength of a Dowel Welding Joint. *Drvna industrija* 65 (2) 121 -127

2.1.2 Vibracijsko zavarivanje

Vibracijsko zavarivanje može se podijeliti, ovisno o smjeru vibriranja, na linearno i kružno vibracijsko zavarivanje. Termin "mehaničko inducirano zavarivanje" koristi se za spajanje ravnih površina pomoću vibracija ili moždanika za podlogu pomoću rotacije, bez dodavanja ljepila, smola i drugih veznih sredstava. Tako dobiven spoj ima čvrstoću koja se može uspoređivati s čvrstoćom lijepljenog spoja (Pizzi i dr., 2003)¹.

Zavarivanje uz pomoć vibracija odvija se na način da dva drvena elementa međusobno vibriraju. Usred trenja između dvaju dodirnih površina stvara se toplina koja omekšava hemicelulozu i lignin u strukturi stanica drva. Uslijed hlađenja drvo otvrdnjava čime se stvara čvrst spoj. Također, usred trenja se isprepleću drvena vlakanca. Vibracijsko zavarivanje se najčešće koristi za širinsko i debljinsko sastavljanje (Gfeller i dr., 2004.; Župčić i dr., 2008.)^{2 3}.

Karakteristika vibracijskog zavarivanja drva je topljenje i curenje nekih amorfnih tvari i polimernih materijala u strukturi drva kao što su lignin i hemiceluloza (Gfeller i dr., 2004. i Gfeller i dr., 2003.)^{2 4}. Dio suvišnih stanica koje više nisu povezane izgurane su iz spoja kao višak vlakana tijekom zavarivanja. Kemijske reakcije kovalentnog povezivanja polimera događaju se većinom nakon završenog postupka zavarivanja u fazi hlađenja. Hlađenjem kompozitna mreža vlakancima povezana rastopljenim ligninom čini kompozitnu strukturu. Poznate su i kemijske reakcije lignina s furfurnim spojevima dobivenim kemijskim postupcima iz ugljikohidrata. Ove reakcije imaju mali doprinos čvrstoći jer proces zavarivanja relativno kratko traje.

Pizzi i dr. (2003.)¹ za vibracijsko zavarivanje koristili su uzorke od bukovine dimenzija 150 x 150 x 15 mm, te su ih debljinski spajali pomoću vibracijskog kretanja frekvencijom 100 Hz. Vrijeme prešanja iznosilo je 3 s, pritisak 2 Mpa, amplituda vibracija je bila 3 mm, vrijeme prešanja nakon prestanka vibracija 5 s, a pritisak 2,7 Mpa. Prosječna čvrstoća vibracijski zavarenog spoja iznosila je između 10 i 11 Mpa što zadovoljava zahtjeve EN 205-D1 (Europska norma EN 205-D1, 1992.).

¹ Pizzi, A.; Properzi, M.; Leban, J. M.; Zanetti, M.; Pichelin, F.; 2003: Mechanically –induced wood welding. *Maderas. Ciencia y tecnologia*, 5 (2): 101-106.

² Gfeller B., Pizzi A., Zanetti M., Properzi M., Pichelin F., Lehmann M., Delmotte L., 2004: Solidwood joints by in situ welding of structural wood constituents. *Holzforschung* 58(1):45–52 (2004)20

³ Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., Hrovat, B., 2008: Zavarivanje masivnog drva, *Drvena industrija*, 59 (3) 113 –119

³ Gfeller, B.; Zanetti, M.; Properzi, M.; Pizzi, A.; Pichelin, F.; Lehmann, M.; Delmotte, L. 2003: Woodbonding by vibrational welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 17 (11): 1573-1589.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Prema Gfeller i dr (2003.)¹, čvrstoća vibracijsko zavarenog spoja dva elementa bukovine (*Fagus Sylvatica*) iznosi 10 MPa, dok prosječna čvrstoća dva elementa Norveške smrekovine (*Picea abies*) iznosi 4,2MPa. Kombinacija bukovog i smrekovog uzorka iznosila je 4,4 MPa.

Prema Stamm i dr. (2005.)², vrijeme otvrdnjavanja spoja je manje od 1 minute bez ikakve pripreme površine. Za usporedbu, kod lijepljenja potrebna je priprema površina i sušenje koje traje nekoliko sati (ovisno o adhezivu). Vibracijom dolazi do prosječne temperature od 400 °C (673K) i dolazi do razgradnje strukture drva. Proučavajući svojstva spoja došli su do zaključka da se zavarivanje odvija u dva dijela. Prvi dio obuhvaća zagrijavanje (nastaje trenjem kontaktnih površina uz djelovanje pritiska i topline), dok je drugi dio hlađenje zagrijane sljubnice. Rezultatima istraživanja utvrđeno je kako se 20 s nakon početka hlađenja postiže 70 % ukupne čvrstoće zavarenog spoja promatranog u intervalu od 15 min hlađenja.

Mogućnosti zavarivanja drvnih ploča prvi su ispitali Ganne-Chedeville i dr. (2007.)³. Provedeno je istraživanje linearnog zavarivanja rub - rub i lice - lice. Ispitana su četiri tipa drvnih ploča: OSB 18 mm, MDF 19 mm, neoplemenjena iverica 19 mm, bukova furnirska ploča 18 mm/9, te okume furnirska ploča 19mm/9. Uzorci su dimenzija 20 x deb. uzorka x 150 mm. Vrijeme zavarivanja varira s obzirom na tip drvnih ploča, tako je za furnirske ploče vrijeme zavarivanja iznosilo 3 s, iverica 5 - 7 s, OSB 5,5 s, dok je za MDF duže vrijeme zavarivanja 8 - 10 s. Čvrstoća iverice iznosi 2,8 MPa za rub, dok za lice 1,81 MPa; OSB za rub 3,09 MPa, a lice 2,34 MPa; MDF za rub 4,29 MPa, a lice 3,84 MPa; bukova furnirska ploča 6,21 MPa za rub, a lice 7,22 MPa; okume furnirska ploča za rub 4,36 MPa, a lice 2,09 MPa. Prema rezultatima linearno vibracijsko zavarivanje pruža zadovoljavajuće čvrstoće. Vidljivo je da je čvrstoća rub - rub veća od lice -lice. Razlog tome je čvrstoća samog materijala koja je manja od čvrstoće zavara.

Ganne-Chedeville i dr. (2008.)³ istraživali su i analizirali mikrostrukturu i temperaturu koja se dobiva unutar samog procesa zavarivanja između dva drvena elementa bez uporabe adheziva ili ljepila. Provedene su kemijske i fizikalne analize koristeći infracrvenu termografiju, mehaničko ispitivanje čvrstoće, svjetlosnu mikroskopiju i rendgensku denziometriju. Proces vibracijskog zavarivanja bukovine u vremenu od 0 do 11 s može se podijeliti u tri različite faze.

¹ Gfeller, B.; Pizzi, A.; Zanetti, M.; Properzi, M.; Pichelin, F.; Lehmann, M.; Delmotte, L. 2004: Solid wood joints by in situ welding of structural wood constituents. *Holzforschung*, 58 (1): 45-53.

² Stamm, B., Natterer, J., navi, P. 2005: Joining of wood layers by friction welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19 (13 -14): 1129 -1139

³ Ganne-Chedeville, C., Properzi, M., Pizzi, A., Leban, J.-M., Pichelin, F. 2007: Edge and face linear vibration welding of wood panels. *Holz Roh Werkst.*, 65:83-85

³ Ganne-Chedeville, C.; Properzi, M.; Leban, J. M.; Pizzi, A.; Pichelin, F. 2008: Interface microstructure development during wood welding. *Proceedings of Final Conference in COSTE 34, Bonding of Timber, Enhancing bondline performance, Sopron, Hungary, 6-7 May, 130-140.*

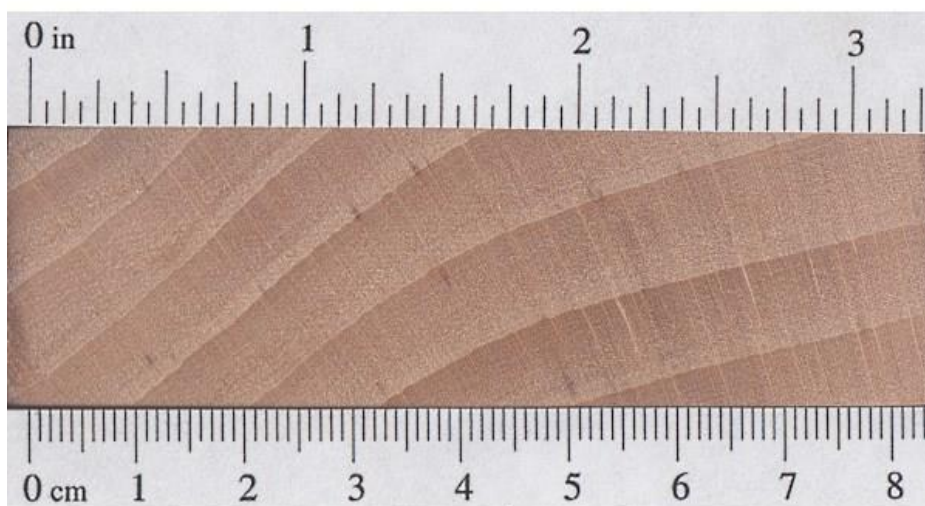
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Prva faza opisuje promjene u fizikalnim i kemijskim svojstvima drva. Zgušnjavanje i anatomske modifikacije događaju se u ovoj fazi. Druga faza predstavlja stabilizaciju zavarenog spoja. Zadnja faza ciklusa zavarivanja je kondicioniranje. U svim fazama zavarivanja prisutna je toplina koja se širi između slojeva drva. Različiti čimbenici kao vrijeme zavarivanja, čvrstoća na smik, temperatura i širina zavarenog spoja utječu na kemijske reakcije koje se događaju u pojedinim međufazama (Ganne-Chedeville i dr., 2008.)¹.

2.2 Svojstva bukovine

Drvo obične bukovine ili europske bukovine pripada botaničkoj vrsti (*Fagus sylvatica* L.), iz porodice Fagaceae. Također, autohtona je vrsta drva u Hrvatskoj.

Pore bukovine su brojne, pojedinačne i u skupinama (Slika 4). Prema kasnom drvu, veličina i broj pora se smanjuje, a volumni udio u drvu iznosi od 22,2 do 37,8 %. Bukovina je bakuljavo drvo, bjelkasto do vrlo blijedo smeđe boje, a stajanjem na zraku potamni do crvenkasto smeđe boje. Kod nekih stabala nastaju tamnija oboljenja srca tj. crveno srce (fakultativno obojena srž). Godovi su uočljivi, a drvo je rastresito porozno sa sitnim i brojnim porama. U tablicama 1 i 2 prikazane su vrijednosti fizičkih i mehaničkih svojstava bukovine (Trajković, Despot, 1996)².



Slika 4. Poprečni presjek bukovine

¹ Ganne-Chedeville, C.; Properzi, M.; Leban, J. M.; Pizzi, A.; Pichelin, F. 2008: Interface microstructure development during wood welding. Proceedings of Final Conference in COSTE 34, Bonding of Timber, Enhancing bondline performance, Sopron, Hungary, 6-7 May, 130-140.

² Trajković, J., Despot, R., 1996.: BUKOVINA, Drvna industrija 47 (4) 171



Slika 5. Tangentni presjek bukovine

Tablica 1. Fizička svojstva bukovine (Trajković, Despot, 1996)¹

Fizička svojstva	Gustoća (ρ_0) kg/m ³	Gustoća (ρ_{12-15}) kg/m ³	Gustoća (ρ_s) kg/m ³	Poroznost %	Radijalno utezanje β_r %	Tangentno utezanje β_t %	Volumno utezanje β_v %
Vrijednost	490 - 680 - 880	540 - 720 - 910	820 - 1070 - 1270	oko 55	oko 5,8	oko 11,8	14 - 17,9 - 21

Tablica 2. Mehanička svojstva bukovine (Trajković, Despot, 1996)¹

Mehanička svojstva	Čvrstoća na tlak MPa	Čvrstoća na vlak \parallel	Čvrstoća na savijanje MPa	Čvrstoća na smik MPa	Tvrdoća (po Janki) MPa		Modul elastičnosti GPa
					\parallel	\perp	
Vrijednosti	41 - 62 - 99	57 - 135 - 180	74 - 123 - 210	8 - 9,5	oko 83	oko 65	100 - 160 - 180

Bukovina se dobro obrađuje strojno i ručno, a naročito dobro se tokari. Dobro se ljušti, a valjkasti oblik trupaca omogućava proizvodnju furnira i furnirskih ploča. Drvo se lijepi bez poteškoća i može se bojiti lazurama tako da odgovara hrastovini ili orahovini. Izrazito dobro se savija omekšana parenjem. Uspješno se savijaju komadi s kvrgama i komadi nepravilne građe. Može se i termo tretirati te ostvaruje dobre rezultate. Fakultativna srž (crveno srce) se može ublažiti parenjem. Nezaštićena bukovina nije otporna na napad ksilofagnih insekata i gljiva truležnica. Zaštićuje se hladnim ili toplim uranjanjem u zaštitna sredstva ili tlačnim postupcima čime se postiže prilično dobra zaštita. Fakultativna srž je vrlo nepermeabilna i teško se impregnira. (Trajković, Despot, 1996)¹.

¹ Trajković, J., Despot, R., 1996.: BUKOVINA, Drvna industrija 47 (4) 171

3. CILJEVI RADA

U ovom radu istraživana je utjecaj temperature prilikom zavarivanja na određenim frekvencijama vrtnje i brzinom pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi na iznos izvlačne sile. Frekvencije i brzine pomaka u istraživanju su:

- frekvencija vrtnje 865 min^{-1} s pomakom $2,03 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm ;
- frekvencija vrtnje 865 min^{-1} s pomakom $1,11 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm ;
- frekvencija vrtnje 1520 min^{-1} s pomakom $2,03 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm ;
- frekvencija vrtnje 1520 min^{-1} s pomakom $1,11 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm .

Cilj je istražiti utjecaj kombinacija frekvencije vrtnje i brzine pomaka na temperaturu i izvlačnu silu. Nadalje, kao jedan od osnovnih ciljeva je da rezultati ovog istraživanja pridonese boljem razumijevanju određivanja temperature rotacijskog zavarivanja te utvrditi utjecaj temperature zavarivanja na izvlačnu čvrstoću.

4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

Svi podatci istraživanja obrađeni su u programima Microsoft Excel i Statistica. Statistička obrada rezultata ovisit će o tome jesu li dobiveni rezultati parametrijski ili neparametrijski. Tako će, ukoliko su rezultati parametrijski, obuhvaćati izračunavanje: analitičke sredine, broj uzoraka, minimuma, maksimuma, standardne devijacije, homogenost i analizu varijance, post hoc test i izradu grafikona za ispitivane uzorke. Za neparametrijske rezultate obuhvaćat će: izračunavanje analitičke sredine, broj uzoraka, minimuma, maksimuma, standardne devijacije, varijance, vrijednosti Q25, vrijednosti Q75, medijan, homogenost varijance, višestruku usporedbu (Kruskal –Wallis test), post hoc test i izradu grafikona za ispitivane uzorke.

Tablica 3. Oznake uzoraka

Oznaka uzorka	Frekvencija vrtnje (min^{-1})	Brzina pomaka (m/min)	Pomak po okretaju (mm)
865_50_x	865	1,11	1,28
865_100_x	865	2,03	2,64
1520_50_x	1520	1,11	0,73
1520_100_x	1520	2,03	1,33
x – redni broj uzorka 865 - frekvencija vrtnje moždanika 865 min^{-1} 1520 - frekvencija vrtnje moždanika 1520 min^{-1} 50 - predstavlja brzinu pomaka po vertikalnoj osi moždanika 1,11 m/min 100 - predstavlja brzinu pomaka po vertikalnoj osi moždanika 2,03 m/min			

4.1 Izbor materijala

Korištenje materijala bukovine za ovo istraživanje odabrana je slučajnim odabirom iz složaja suhe piljene građe. Kriteriji kod odabira elemenata su bili: pravilnost piljene građe, bez kvrga, pukotina i oštećenja.

4.1.1 Izbor masivnog drva

Pri istraživanju korištena je bukovina (*Fagus Sylvatica* L.). Materijali potrebni za ispitivanje uzeti su iz komercijalnog složaja, kako bi se moguće promjene prilikom ispitivanja mogle povezati sa standardno proizvedenim drvnim elementima. Pomoću tako dobivenih rezultata bit će poznata svojstva spoja, koji se kasnije mogu primijeniti u stvarnim uvjetima. Prilikom odabira materijala za istraživanje korišteni su bukovi nažljebljeni drveni moždanici duljine od 1000 mm (odabrani su metodom slučajnog odabira), te su za potrebe istraživanja piljeni na određenu duljinu od 120 mm kako bi se dobili odgovarajući moždanici. Moždanici su pregledani te nisu primijećene nikakve greške, poput raspuklina ili neprave srži.

4.2 Priprema uzoraka za zavarivanje okomito na smjer vlaknaca

4.2.1 Određivanje početnog sadržaja vode u uzorcima

Početni sadržaj vode određen je gravitacijskom metodom prema HRN ISO 13061-1:2015 pomoću formule:

$$W = \frac{m_W - m_2}{m_2} \cdot 100 [\%]$$

gdje je:

W - sadržaj vode u drvu nakon 7 dana prema HRN ISO 13061-1:2015 [%]

m_w - početna masa probe [g]

m_2 - masa probe nakon 7 dana

Gustoća drva je određivana na istim uzorcima prema HRN ISO 13061-2:2015 pomoću formule:

$$\rho_w = \frac{m_2}{V_{max}} [\text{g/cm}^3]$$

gdje je:

ρ_w - gustoća drva prema HRN ISO 13061-2:2015 [g/cm³]

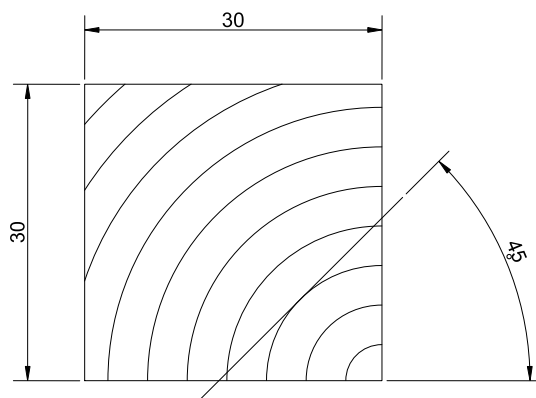
m_2 - početna masa probe [g]

V_{max} - maksimalan volumen probe [cm³]

Izmjerene su dimenzije i masa uzoraka kako bi smo gravimetrijskom metodom prema HRN ISO 13061-1:2015 odredili sadržaj vode i gustoću u uzorcima. Prosječni početni sadržaj vode u bukovim uzorcima iznosio je 8,84 % (minimalni sadržaj vode iznosio je 8,70 %, a maksimalni sadržaj vode iznosio je 8,94 %), a prosječna gustoća iznosila je 0,69 g/cm³ (minimalna gustoća iznosila je 0,66 g/cm³, a maksimalna 0,71 g/cm³).

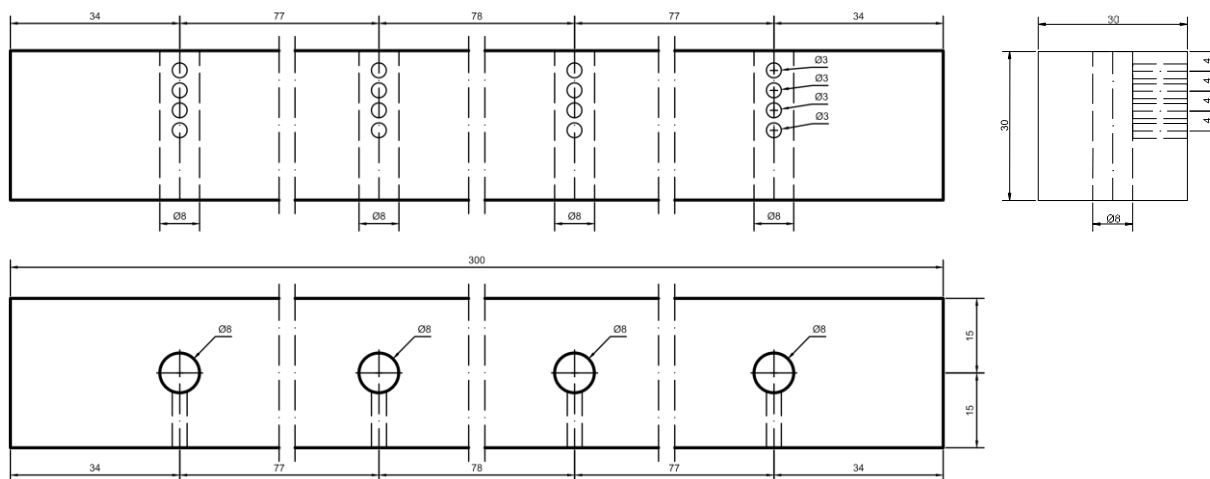
4.2.2 Priprema uzoraka

Prije same pripreme uzoraka uzet je probni uzorak radi određivanja trenutnog sadržaja vode i gustoće drva (bukovine). Prije određivanja uzorci su klimatizirani u klima komori temperature 23 ± 2 °C i relativne vlage zraka 55 ± 5 % minimalno 2 tjedna. Prilikom izrade i pripreme uzoraka korištene su tehnologije piljenja, blanjanja, prikraćivanja uzoraka na konačnu mjeru, bušenje provrta na uzorcima za moždanike i bušenje provrta za sonde. Za provedbu istraživanja korišteni su uzorci dimenzija 30 x 300 x 30 mm. Svi uzorci imali su približno sličnu radijalno-tangentnu teksturu (Slika 6.).



Slika 6. Radijalno-tangentna tekstura

U svakom uzorku bukovine bušena su po četiri provrta za moždanike. Na uzorcima bukovine provrta su bušeni prema slici 6 i 7, promjer provrta iznosio je 8 mm, a smjer zavarivanja je radijalno-tangentni.



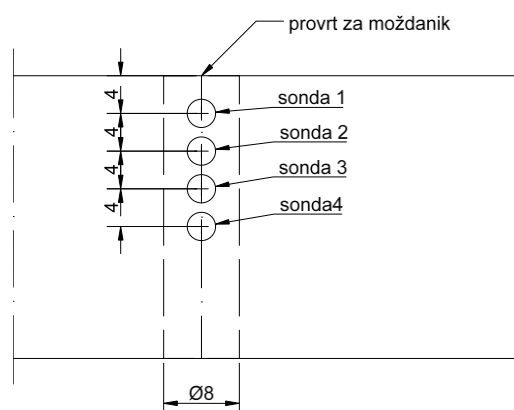
Slika 7. Shematski prikaz ispitnog uzorka bukovine



Slika 8. Ispitni uzorak bukovine

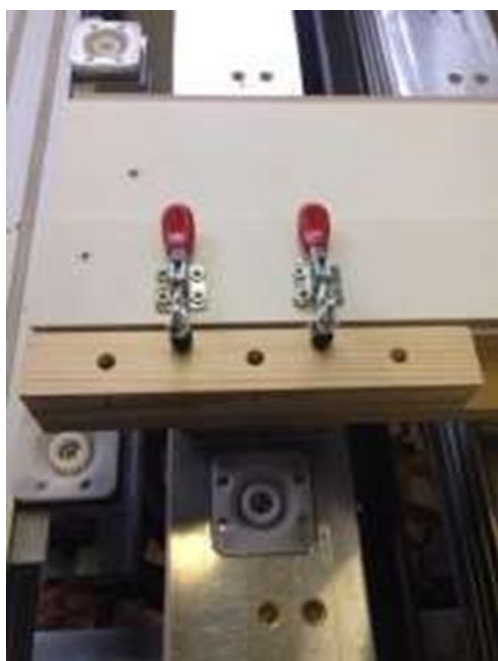
4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

Za potrebe postavljanja ispitnih sonda izrađena su dodatna četiri provrta okomito na provrte moždanika s međusobnom udaljenošću od 4 mm (Slika 9.).



Slika 9. Pozicija provrta za ispitne sonde

Bušenje provrta na uzorcima izvršeno je pomoću CNC stroja spiralnim svrdlom od čelika oznake HSS promjera 8,1 mm (bušenje provrta moždanika) i spiralnim glodalom 3 x 12 x 60 mm (bušenje provrta za mjerne sonde) (Slika 10 i 11).



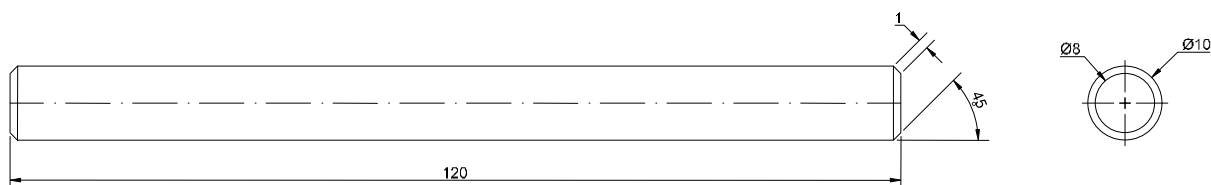
Slika 10. Bušenje provrta za moždanike



Slika 11. Bušenje provrta za sonde

4.2.3 Priprema moždanika

Moždanici su izrađeni iz nažljebljenih drvenih bukovih štapova duljine 1000 mm, promjera 10 mm. Za potrebe istraživanja, štapovi su prikraćivani na duljinu od 120 mm koji će se koristiti kod ispitivanja. Naknadno su rubovi skošeni za 1 mm pod kutem od 45° (Slika 12 i 13) kako bi se omogućio lakši početak zavarivanja.



Slika 12. Shematski prikaz moždanika za ispitivanje



Slika 13. Bukovi moždanik za ispitivanje

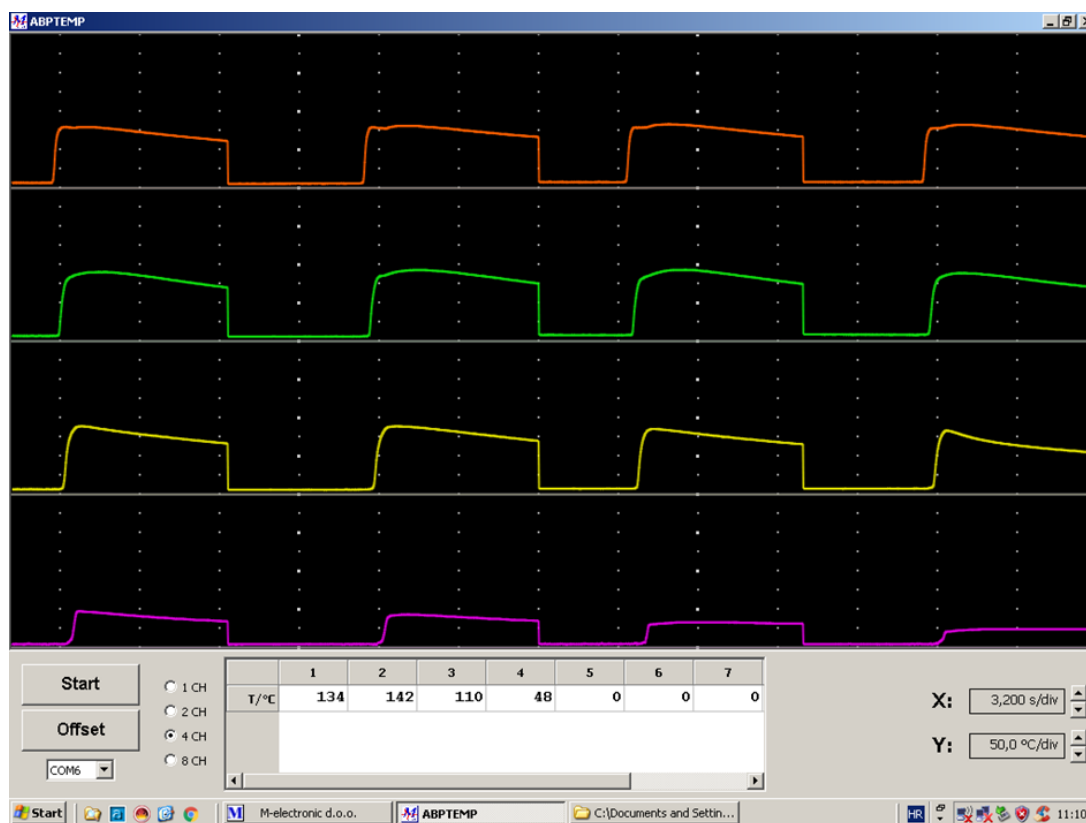
4.3 Izrada ispitnih proba

Zavarivanje uzoraka (Slika 14) je izvršeno pomoću uređaja za zavarivanje koji ima mogućnost konstantne rotacije moždanika. Zavarivanje je vršeno tako što je moždanik rotirao određenom frekvencijom vrtnje. Frekvencija vrtnje tijekom zavarivanja iznosila je 865 i 1520 min^{-1} . Za proces trajanja zavarivanja moždanika u uzorak koristile su se dvije brzine pomaka u iznosima 2,03 m/min i 1,11 m/min, a pritisak na moždanik nakon zavarivanja je trajao 3 - 5 s. Promjer provrta na uzorku iznosio je 8 mm, a promjer moždanika 10 mm, a sukladno tome dimenzije zadora iznose 2 mm. Dubina zavarivanja je iznosila 20 mm. Uzorak u koji se zavarivao moždanik bio je statičan. Na slici 14 i prikazan je ispitni uzorak spreman za zavarivanje.

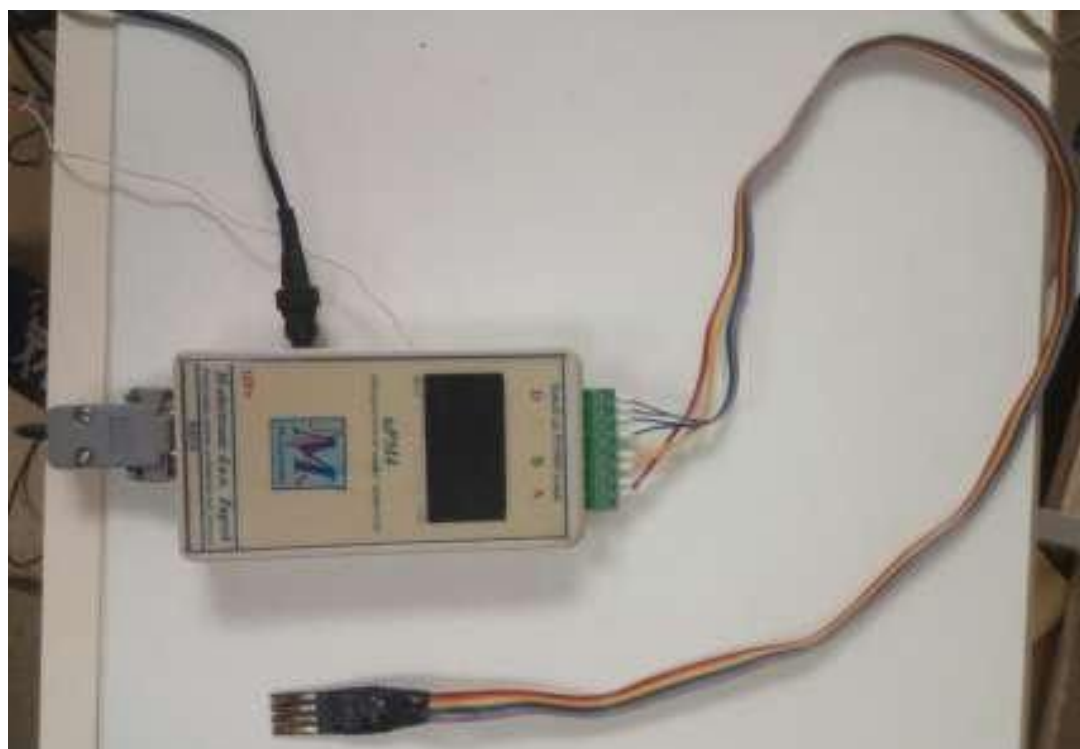


Slika 14. Uzorak za zavarivanje

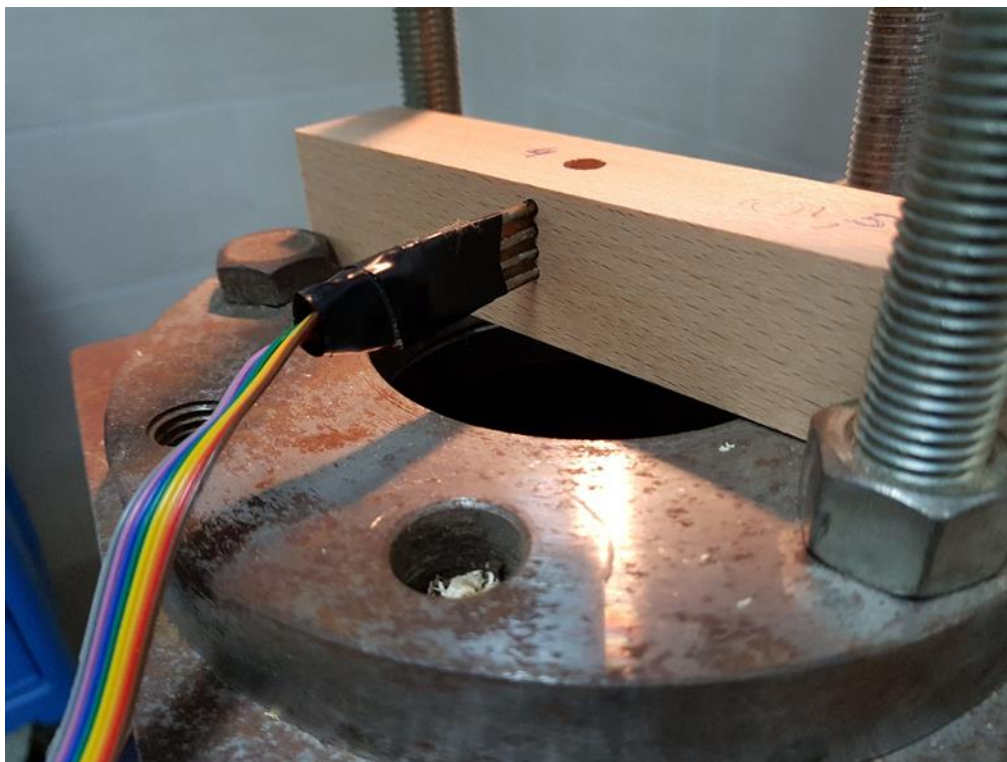
Prilikom zavarivanja korišten je program izrađen isključivo po namjeni za ovaj tip istraživanja. Korišten je softver izrađen od strane tvrtke M-electronic koji bilježi trenutnu temperaturu (Slika 15) te ispisuje u obliku grafa u stvarnom vremenu, a zabilježene podatke o temperaturi automatski zapisuje u računalnom programu Microsoft Excel. Kod ispitivanja korištene su temperaturene sonde PT1000 (Slika 16 i 17) s temperaturnim rasponom od - 70 do + 550 °C. Sonde su klase B s mogućom greškom od 0,3 %.



Slika 15. softver izrađen od strane tvrtke M-electronic



Slika 16. Sonde za mjerenje temperature



Slika 17. Ispitni uzorak sa sondama za mjerenje temperature

Zavareno je ukupno 128 uzoraka. Zavareni su uzorci za svaku kombinaciju frekvencije i pomaka:

- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} s pomakom $2,03 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm ;
- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} s pomakom $1,11 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm ;
- frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} s pomakom $2,03 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm ;
- frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} s pomakom $1,11 \text{ m/min}$ na dubinu od 20 mm .



Slika 18. Zavareni uzorak pripremljen za ispitivanje

4.4 Način ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na računalno upravljanoj kidalici marke Shimadzu AG-X 100 KN (Slika 19). Najznačajnije karakteristike kidalice su: mjerno područje (do 100 KN), mogućnost ispitivanja vlak, tlak i savijanje, mogućnost ispitivanja pločastih uzoraka od 0-21 mm (100/50 KN) i okruglih uzoraka-D24 (100/50 KN). Zbog specifičnosti ispitivanja za kidalicu je izrađen poseban nastavak kojim je omogućen prihvat moždanika te pomoću njega ne dolazi do proklizavanja i ispitivanje se može nesmetano izvršiti (Slika 20). Tako prilagođena kidalica omogućuje da os simetrale uzorka bude paralelna s osi simetrale kidalice na kojoj djeluje sila. Za vrijeme ispitivanja pomak na kidalici je iznosio 5 mm/min. Pomoću izmjera (dobivenih na kidalici) mogu se dobiti rezultati Hookovog dijagrama (Graf 21). Priprema, kondicioniranje, izrada uzoraka, te ispitivanje provedeno je na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za namještaj i drvene proizvode.



Slika 19. Shimadzu AG-X 100 KN



Slika 20. Čeljust i nastavak za prihvat moždanika



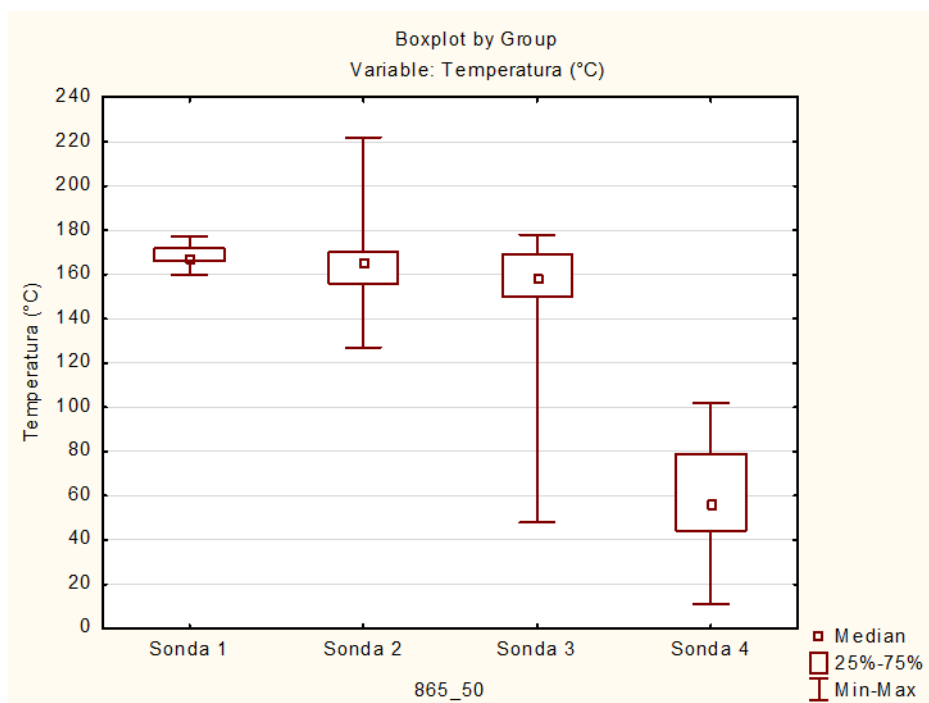
Slika 21. Priprema uzorka za ispitivanje izvlačne sile

5. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA

Svojstva zavarenog spoja utvrđena su mjerenjem izvlačne sile moždanika iz uzorka.

5.1.1 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 865 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $1,11 \text{ m/min}$ (865_50)

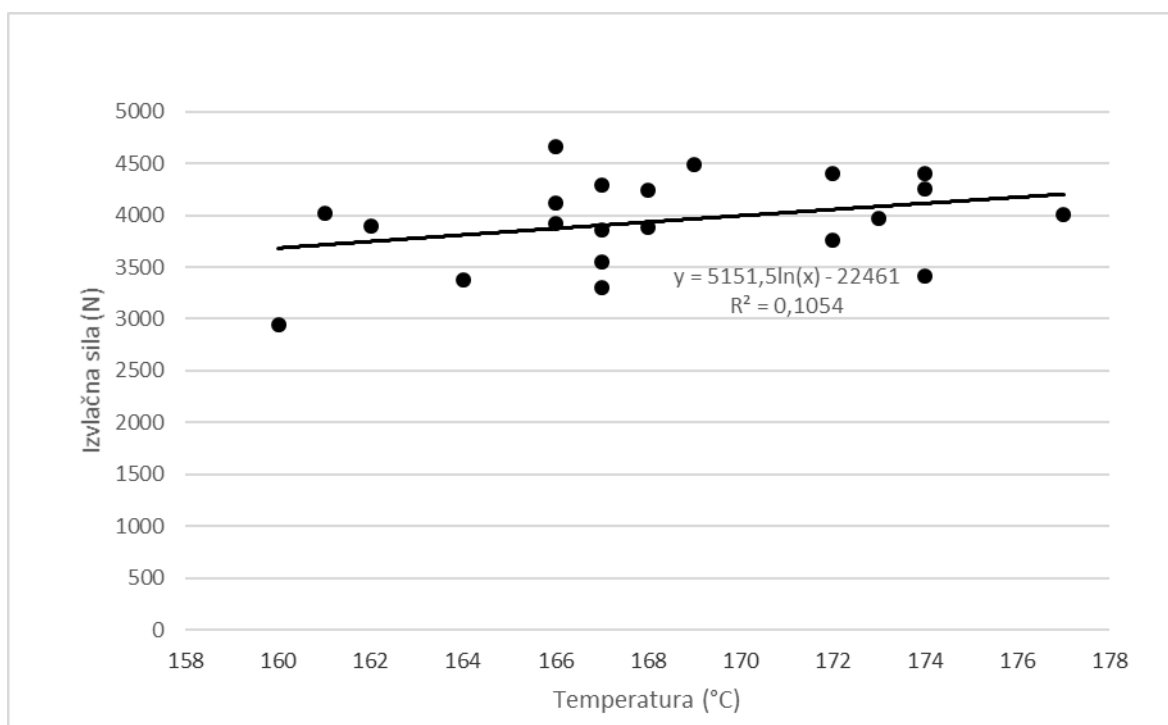
Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od $168 \text{ }^\circ\text{C}$ zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže statistički zanemarivo manju prosječnu temperaturu koja je viša zato što dolazi do prijenosa topline s površine i moždanika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador i postiže najmanje prosječne temperature od $59,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 22).



Slika 22. Prosječne temperature prema sondama (865_50)

5. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA

Na grafu 2 vidljivo je da povećanjem temperature raste i izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 3942 N sa standardnom devijacijom od 435,37, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 168°C sa standardnom devijacijom od 4,61. Maksimalna temperatura iznosila je 177 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 4661 N kod 166 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature značajno povećava izvlačna sila. R - kvadrat linije trenda iznosi 0,1054 što pokazuje veliko rasipanje podataka.



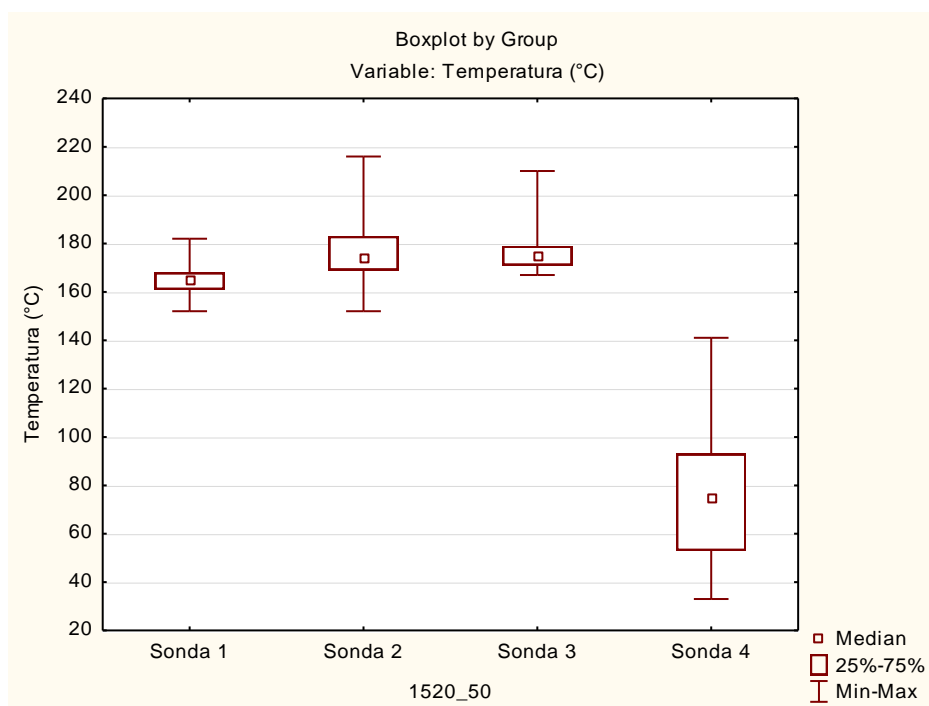
Graf 1. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (865_50)



Slika 23. Pucanje moždanika uslijed velikih sila pri zavarivanju (865_50)

5.1.2 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 865 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $2,03 \text{ m/min}$ (865_100)

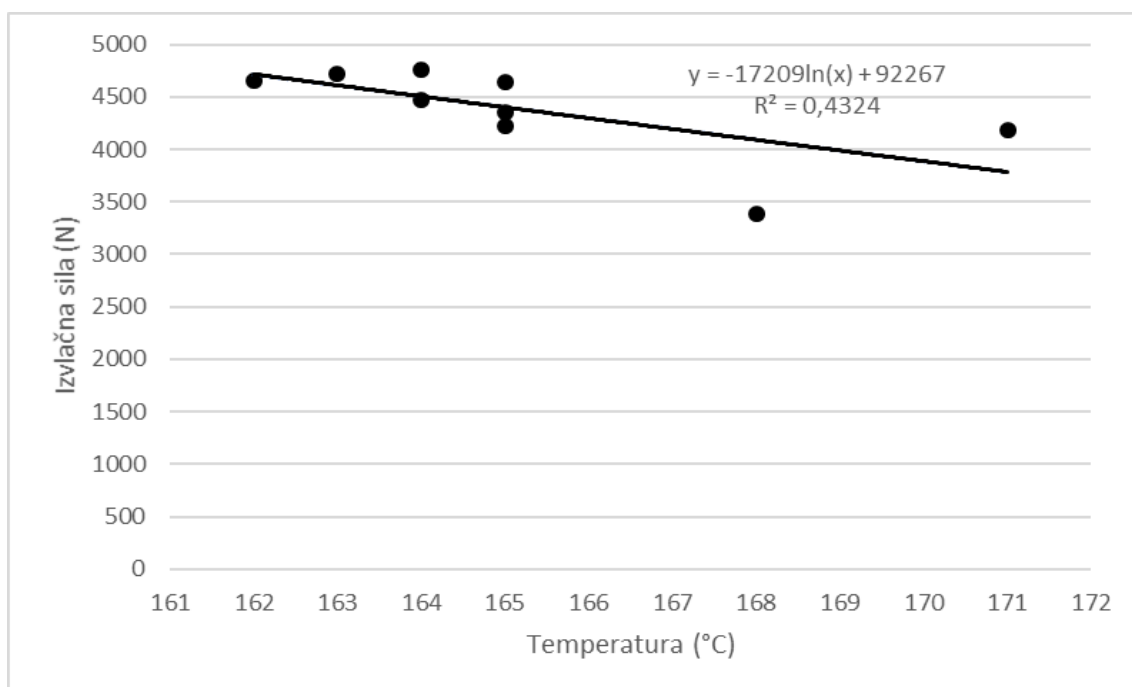
Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od $165 \text{ }^\circ\text{C}$ zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže statistički višu prosječnu temperaturu koja je viša zato što dolazi do prijenosa topline s površine i moždanika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador i postiže najmanje prosječne temperature od $67,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 24).



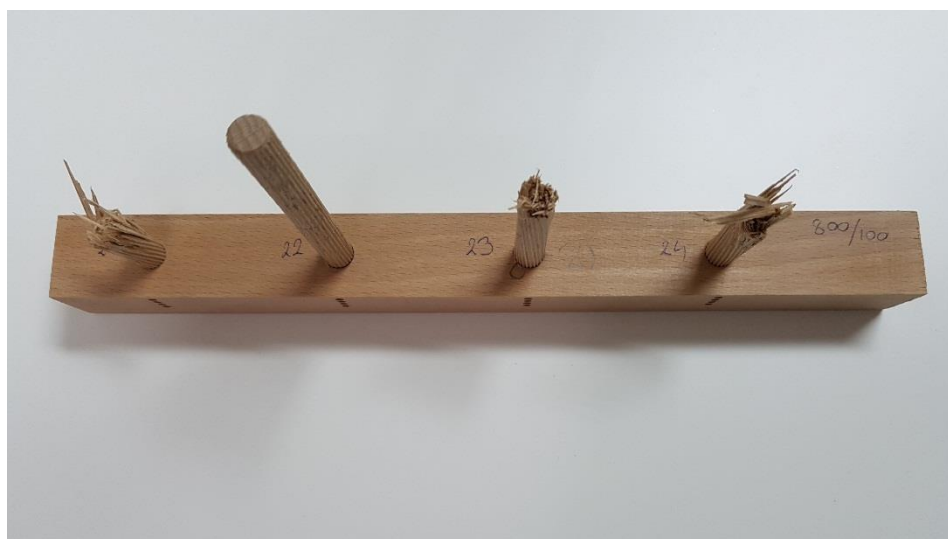
Slika 24. Prosječne temperature prema sondama (865_100)

5. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA

Na grafu 3 vidljivo je da se povećanjem temperature smanjuje izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 4379 N sa standardnom devijacijom od 428,66, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 165°C sa standardnom devijacijom od 2,72. Maksimalna temperatura iznosila je 171 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 4757,56 N kod 164 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature smanjuje izvlačna sila. R - kvadrat linije trenda iznosi 0,4324 što pokazuje veliko rasipanje podataka.



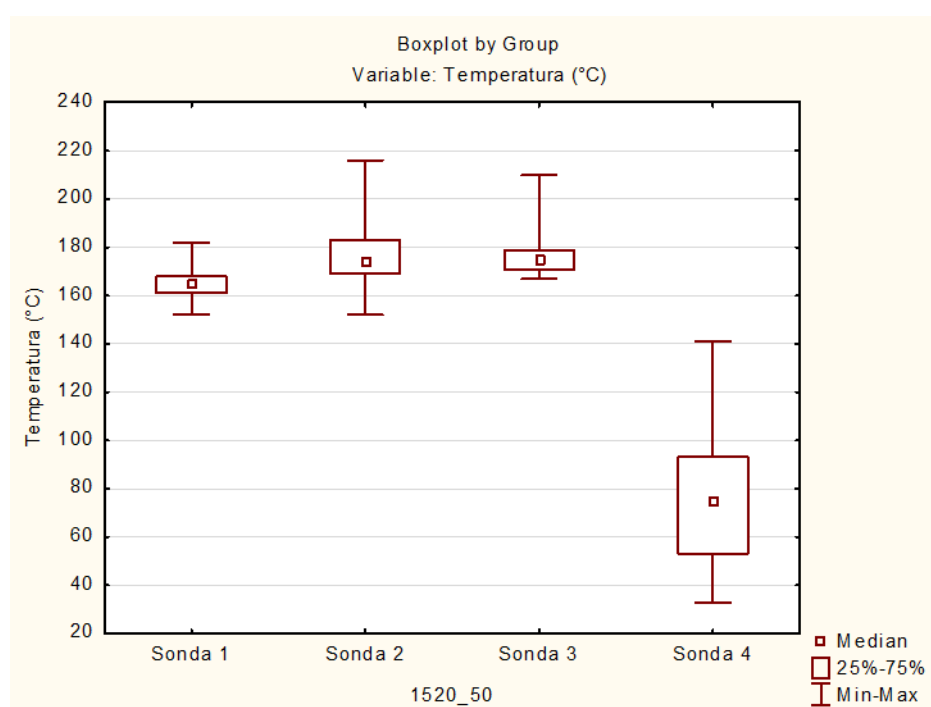
Graf 3. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (865_100)



Slika 25. Pucanje moždanika uslijed velikih sila pri zavarivanju (865_100)

5.1.3 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $1,11 \text{ m/min}$ (1520_50)

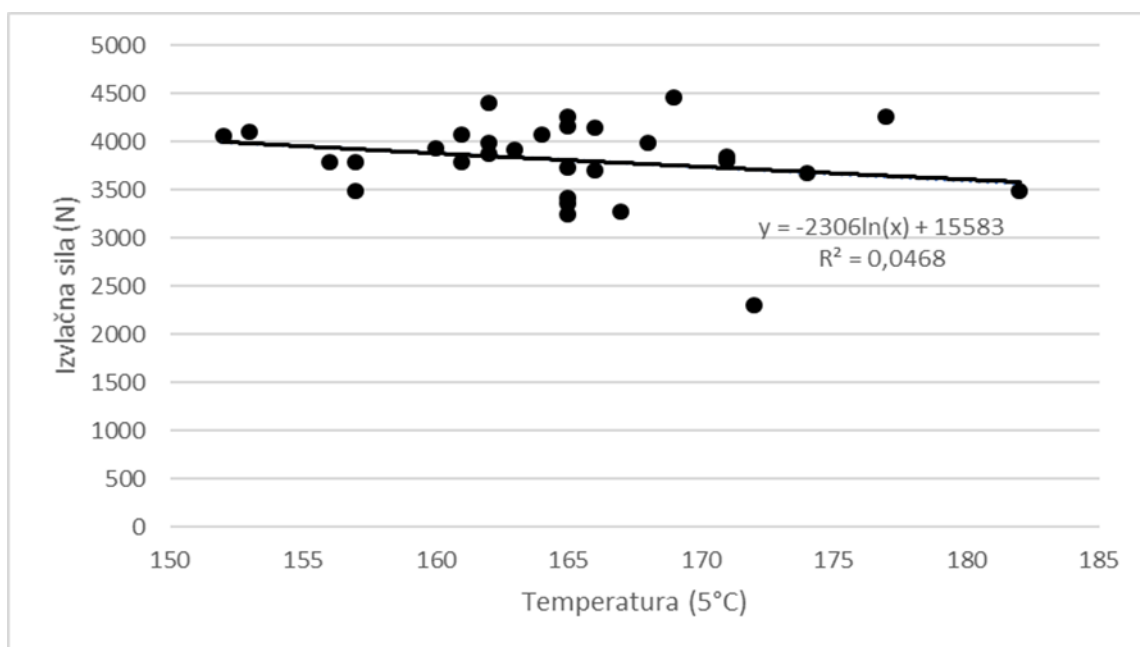
Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od $164 \text{ }^\circ\text{C}$ zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže statistički višu prosječnu temperaturu koja je viša zato što dolazi do prijenosa topline s površine i moždanika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador i postiže najmanje prosječne temperature od $73,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 26).



Slika 26. Prosječne temperature prema sondama (1520_50)

5. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA

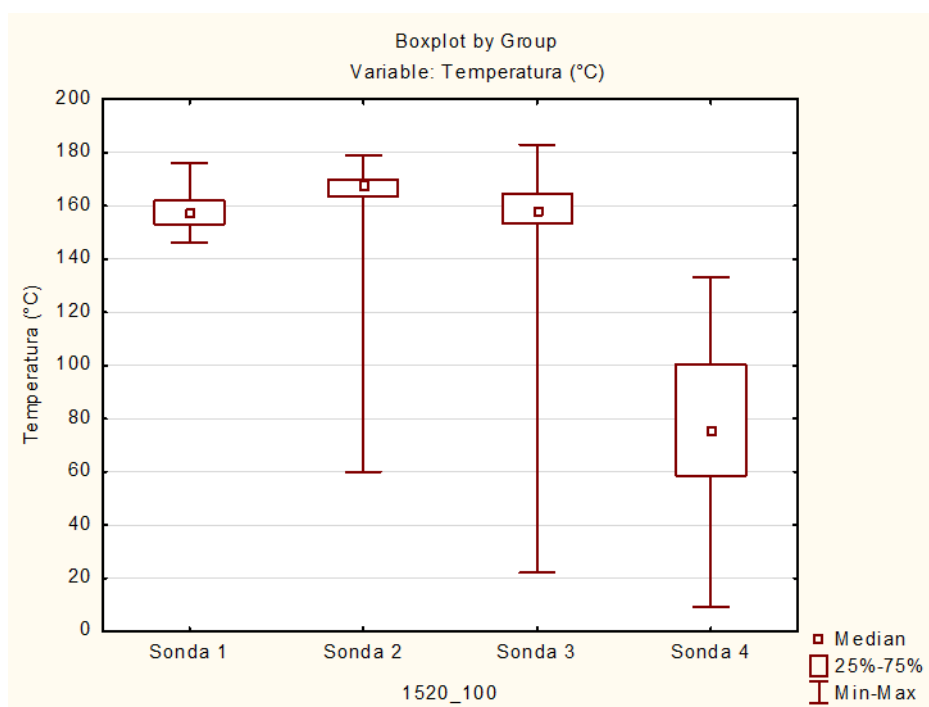
Na grafu 4 vidljivo je da se povećanjem temperature smanjuje izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 3813 N sa standardnom devijacijom od 426,73, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 164,7 °C sa standardnom devijacijom od 6,63. Maksimalna temperatura iznosila je 182 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 4460,19 N kod 169 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature smanjuje izvlačna sila. R - kvadrat linije trenda iznosi 0,0468 što pokazuje veliko rasipanje podataka.



Graf 4. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (1520_50)

5.1.4 Utjecaj temperature kod frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} s brzinom pomaka u iznosu $2,03 \text{ m/min}$ (1520_100)

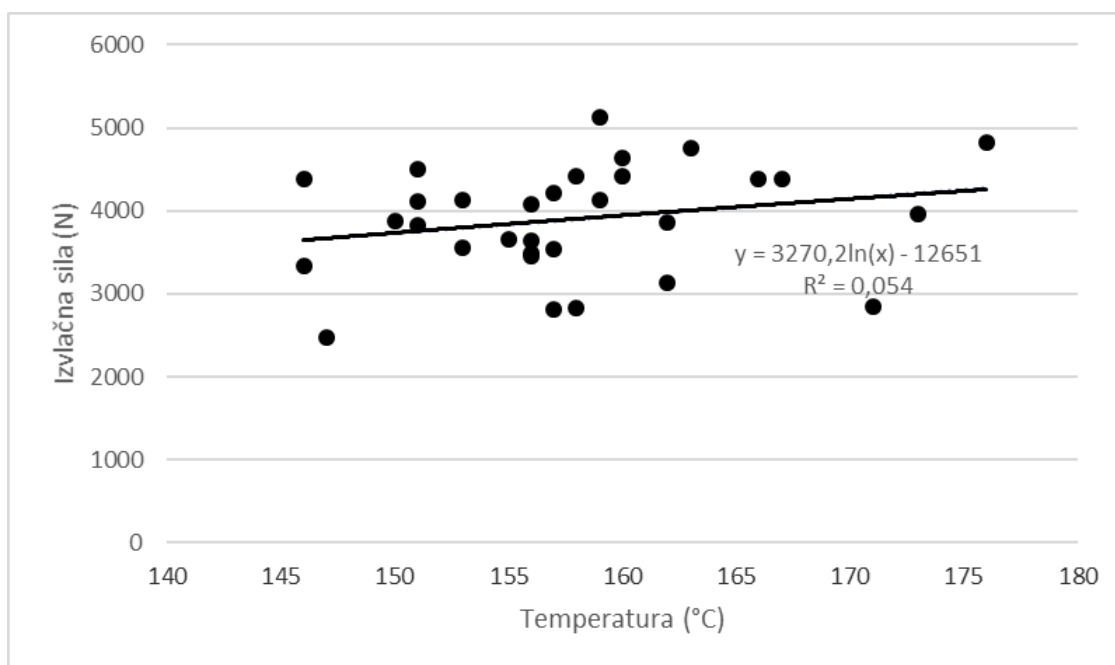
Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od $157 \text{ }^\circ\text{C}$ zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže statistički višu prosječnu temperaturu koja je viša zato što dolazi do prijenosa topline s površine i moždanika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador i postiže najmanje prosječne temperature od $75,9 \text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 27).



Slika 27. Prosječne temperature prema sondama (1520_100)

5. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA

Na grafu 5 vidljivo je da se porastom temperature povećava izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 3896,97 N sa standardnom devijacijom od 649,24, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 158 °C sa standardnom devijacijom od 7,35. Maksimalna temperatura iznosila je 176 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 5119,99 N kod 159 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se povećanjem temperature povećava izvlačna sila. R - kvadrat linije trenda iznosi 0,054 što pokazuje veliko rasipanje podataka.



Graf 5. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (1520_100)

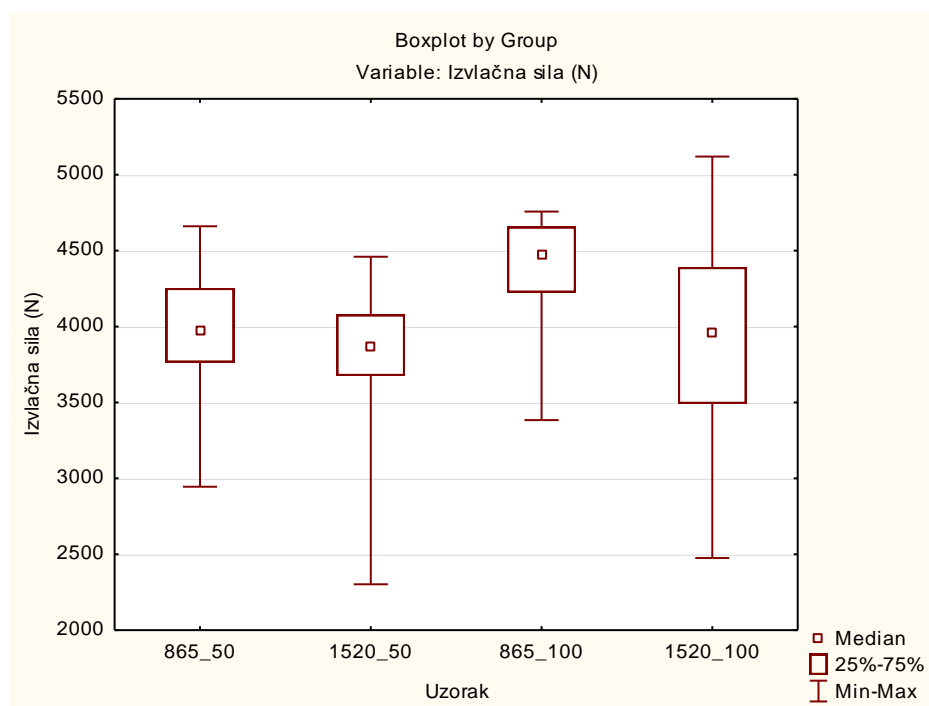
5.2 Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka

Rezultati ispitivanja izvlačne sile prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati izvlačne sile statističke obrade uzoraka

Breakdown Table of Descriptive Statistics					
N=91 (No missing data in dep. var. list)					
Uzorak	Izvlačna sila (N) Means	Broj uzoraka N	Izvlačna sila (N) Std.Dev.	Izvlačna sila (N) Minimum	Izvlačna sila (N) Maximum
865_50	3941,80	21	435,37	2944,94	4661,02
1520_50	3813,03	30	426,73	2302,04	4460,19
865_100	4378,75	9	428,66	3383,87	4757,56
1520_100	3896,97	31	642,24	2475,48	5119,99
All Grps	3927,29	91	531,73	2302,04	5119,99

Iz tablice 4 i slike 28 vidljiva je usporedba izvlačnih sila za tipove uzoraka. Statističkom analizom (Scheffe test) utvrđeno je da postoji statistička razlika između uzoraka 1520_50 i 865_100. Nadalje, ne postoji statistička razlika između ostalih uzorka. Najveći iznos izvlačne sile postigao je uzorak iz skupine 1520_100 u iznosu od 5119,99 N.



Slika 28. Usporedba izvlačnih sila ovisno o frekvenciji vrtnje i pomaku

5.3 Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja

Provedena je statistička analiza temperatura zavarivanja kod uzoraka (Tablica 3).

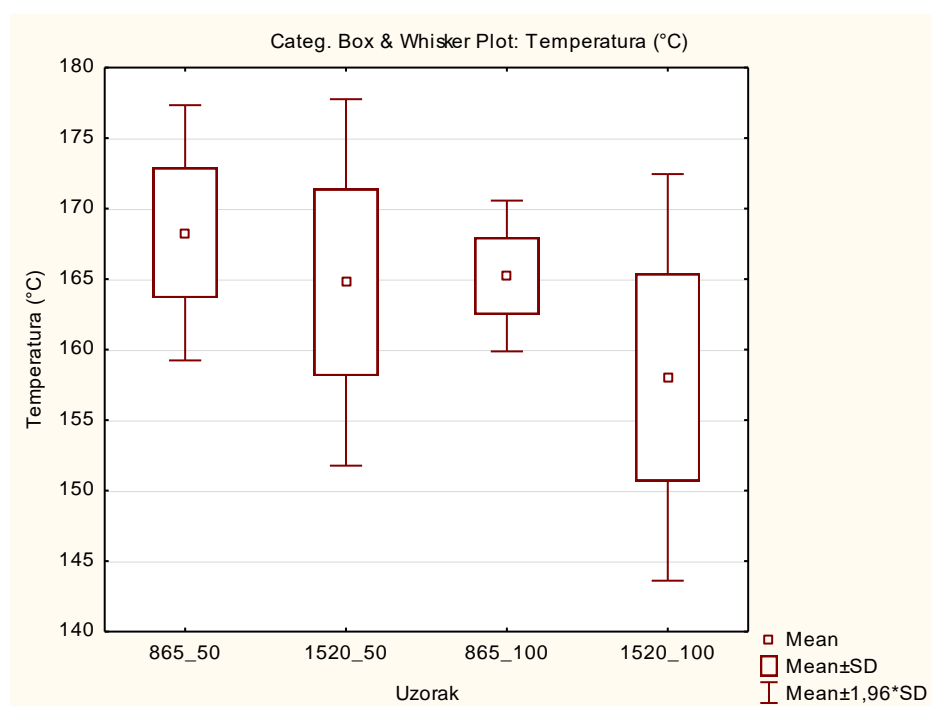
Tablica 5. Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka

Breakdown Table of Descriptive Statistics					
N=92 (No missing data in dep. var. list)					
Uzorak	Temperatura (°C) Means	Broj uzoraka N	Temperatura (°C) Std.Dev.	Temperatura (°C) Minimum	Temperatura (°C) Maximum
865_50	168,28	21	4,61	160,00	177,00
1520_50	164,76	30	6,63	152,00	182,00
865_100	165,22	9	2,72	162,00	171,00
1520_100	158,03	32	7,35	146,00	176,00
All Grps	163,27	92	7,37	146,00	182,00

5. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA

Statističkom analizom rezultata ispitivanja utvrđeno je kako temperatura ovisi o frekvenciji vrtnje i pomaku vertikalne osi moždanika u bazu uzorka. Maksimalna temperatura kod uzorka frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} s pomakom moždanika po vertikalnoj osi u iznosu $1,11 \text{ m/min}$ (1520_50) iznosi oko 182 °C , dok kod uzorka iste frekvencije vrtnje (1520_100) s pomakom moždanika po vertikalnoj osi u iznosu $2,03 \text{ m/min}$ iznosi 176 °C . Kod uzorka s frekvencijom vrtnje u iznosu od 865 min^{-1} s pomakom moždanika po vertikalnoj osi u iznosu $1,11 \text{ m/min}$ (865_50) maksimalna temperatura iznosi oko 177 °C , a uzorka frekvencije vrtnje 865 min^{-1} s pomakom moždanika po vertikalnoj osi u iznosu $2,03 \text{ m/min}$ (865_100) iznosi 171 °C .

Međutim utvrđeno je kako postoji statistička razlika (Scheffe test) između uzorka 1520_100 sa svim ostalim uzorcima vidljivo na slici 29.



Slika 29. Usporedba temperatura zavarivanja u odnosu na frekvenciju vrtnje i pomak moždanika

6. ZAKLJUČAK

Sukladno s postavljenim ciljevima istraživanja zaključci su sljedeći:

Frekvencija vrtnje moždanika oko vertikalne osi kod zavarivanja utječe na temperaturu i samim time na čvrstoću zavarenog spoja. Međutim, definiranjem brzine pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi (1,11 i 2,03 m/min) pri zavarivanju navedenim frekvencijama vrtnje (865 i 1520 min⁻¹), dobiveni rezultati pokazuju kako brzina pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi ima utjecaj na temperaturu i čvrstoću zavarenog spoja.

Temeljem ispitivanja zavarivanja zaključeno je kako su najveće srednje vrijednosti izvlačne sile postignute kod skupine uzoraka s frekvencijom vrtnje 865 min⁻¹ s pomakom moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosu 2,03 m/min (865_100) s maksimalnom izvlačnom silom u iznosu od 4757,56 N, minimalnom izvlačnom silom u iznosu od 3383,87 N, te prosječnom izvlačnom silom u iznosu od 4378,75 N.

Uzorci zavareni brzinom pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosu 1,11 m/min s frekvencijama vrtnje u iznosu 1520 i 865 min⁻¹ postižu prosječno veće temperature (164 i 168 °C) od uzoraka zavarenih istim frekvencijama vrtnje s pomakom moždanika u smjeru vertikalnoj osi u iznosu 2,03 m/min (158 i 165 °C), međutim, uzorci zavareni s brzinom pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosu 2,03 m/min postižu veće prosječne iznose izvlačnih sila u odnosu na uzorke zavarene s brzinom pomaka moždanika u iznosu od 1,11 m/min.

Prema dobivenim rezultatima i zaključcima potrebna su daljnja ispitavanja rotacijskog zavarivanja moždanika u svrhu istraživanja frekvencije, brzine pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi kako bi se postigla optimalna temperatura, i izvlačna čvrstoća zavarenog spoja. Kod frekvencije vrtnje 865 min⁻¹ potrebno je provesti ispitivanje u svrhu pronalaska optimalnog pomaka moždanika kako bi se smanjio okretni moment na moždanik i ne bi dolazilo do loma.

7. PRILOZI

7.1 Usporedba izvlačnih sila (statistička obrada)

Tablica 6. Deskriptivna statistika izvlačne sile zavarivanja

Uzorak	Breakdown Table of Descriptive Statistics N=92 (No missing data in dep. var. list)								
	S Means	Broj uzoraka N	S Std.Dev.	S Variance	S Minimum	S Maksimum	S Q25	S Median	S Q75
865_50	3941,8	21	435,37	189549,1	2944,94	4661,02	3764,43	3975,70	4253,737
1520_50	3813,0	30	426,73	182101,3	2302,04	4460,19	3675,22	3863,35	4078,516
865_100	4378,7	9	428,66	183752,0	3383,87	4757,56	4224,52	4470,33	4657,825
1520_100	3896,9	31	649,24	421525,0	2475,48	5119,99	3491,89	3960,06	4390,859
All Grps	3927,2	91	531,73	282739,7	2302,04	5119,99	3548,81	3975,70	4291,423

S = izvlačna sila

Tablica 7. Testiranje homogenosti varijance izvlačne sile

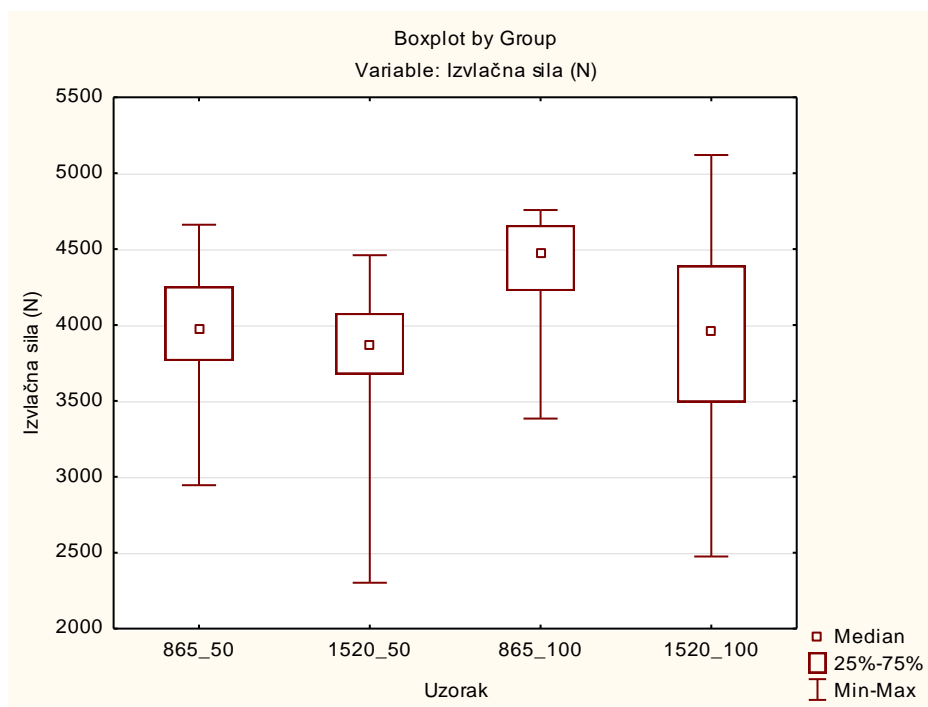
Variable	Levene Test of Homogeneity of Variances Marked effects are significant at $p < ,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
Izvlačna sila (N)	924122,1	3	308040,7	8762341	87	100716,6	3,058491	0,032472

Tablica 8. Višestruka usporedba (Kruskal -Wallis test) izvlačnih sila

Depend.: Izvlačna sila	Multiple Comparisons p values (2-tailed); Izvlačna sila (N) Independent (grouping) variable: Uzorak Kruskal-Wallis test: $H(3, N=91) = 10,00295$ $p = ,0185$			
	865_50 R:46,429	1520_50 R:38,833	865_100 R:70,556	1520_100 R:45,516
865_50		1	0,131188	1
1520_50	1		0,009466	1
865_100	0,131188	0,009466		0,073753
1520_100	1	1	0,073753	

Tablica 9. Višestruki post hoc test izvlačnih sila

Uzorak	Scheffe Test; Variable: Izvlačna sila (N) Marked differences are significant at $p < ,05000$			
	865_50 M=3941,8	1520_50 M=3813,0	865_100 M=4378,8	1520_100 M=3897,0
865_50		0,856741	0,219094	0,992445
1520_50	0,856741		0,046333	0,939325
865_100	0,219094	0,046333		0,116326
1520_100	0,992445	0,939325	0,116326	

**Slika 30.** Usporedba izvlačnih sila

7.2 Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja (statistička obrada)

Tablica 10. Deskriptivna statistika temperature zavarivanja

Breakdown Table of Descriptive Statistics N=92 (No missing data in dep. var. list)					
Uzorak	Temperatura (°C) Means	Broj uzoraka N	Temperatura (°C) Std.Dev.	Temperatura (°C) Minimum	Temperatura (°C) Maksimum
865_50	168,2857	21	4,616740	160,0	177,0
1520_50	164,7667	30	6,631603	152,0	182,0
865_100	165,2222	9	2,728451	162,0	171,0
1520_100	158,0313	32	7,354982	146,0	176,0
All Grps	163,2717	92	7,372511	146,0	182,0

Tablica 11. Testiranje homogenosti varijance temperature zavarivanja

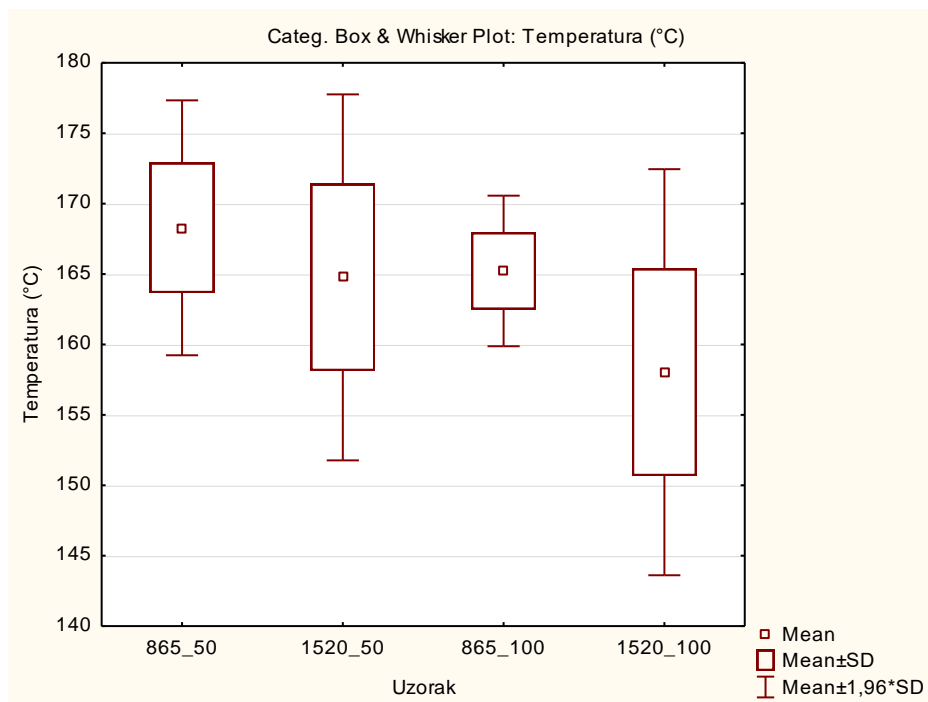
Variable	Levene Test of Homogeneity of Variances Marked effects are significant at $p < ,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
Izvlačna sila (N)	111,7093	3	37,23642	1448,493	88	16,46015	2,262217	0,086773

Tablica 12. Analiza homogenosti temperature

Variable	Analysis of Variance Marked effects are significant at $p < ,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
Izvlačna sila (N)	2258886	3	752962,1	23187689	87	266525,2	2,825107	0,043334

Tablica 13. Višestruki post hoc test temperature

Uzorak	Scheffe Test; Variable: Izvlačna sila (N) Marked differences are significant at $p < ,05000$			
	865_50 M=168,29	1520_50 M=164,77	865_100 M=165,22	1520_100 M=158,03
865_50		0,277853	0,680213	0,000002
1520_50	0,277853		0,998130	0,000917
865_100	0,680213	0,998130		0,030826
1520_100	0,000002	0,000917	0,030826	

**Slika 31.** Usporedba temperatura zavarivanja uzoraka

8. LITERATURA

- 1.) Babrauskas, V. 2001: Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Inteflam 2001, Interscience Communication Ltd, London, 71-88.
- 2.) Belleville, B., Stevanovic, T., Pizzi, A., Cloutier, A., Blanchet, P. 2012.: Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. J Adhesion Sci. Technol., 24 (8-10): 556-576
- 3.) Ganne-Chedeville, C.; Pizzi, A.; Thomas, A.; Leban, J.M.; Bocquet, J.-F.; Despres, A.; Mansouri, H., 2005: Parameter interactions in two-block welding and the wood nail concept in wood dowel welding. J. Adhesion Sci. Technol., 19 (13-14): 1157 - 1174.
- 4.) Ganne-Chedeville, C., Properzi, M., Pizzi, A., Leban, J.-M., Pichelin, F. 2007: Edge and face linear vibration welding of wood panels. Holz Roh Werkst., 65:83-85
- 5.) Ganne-Chedeville, C.; Properzi, M.; Leban, J. M.; Pizzi, A.; Pichelin, F. 2008: Interface microstructure development during wood welding. Proceedings of Final Conference in COSTE 34, Bonding of Timber, Enhancing bondline performance, Sopron, Hungary, 6-7 May, 130-140.
- 6.) Gfeller B., Pizzi A., Zanetti M., Properzi M., Pichelin F., Lehmann M., Delmotte L., 2004: Solidwood joints by in situ welding of structural wood constituents. Holzforschung 58(1):45–52 (2004)20
- 7.) Gfeller, B.; Zanetti, M.; Properzi, M.; Pizzi, A.; Pichelin, F.; Lehmann, M.; Delmotte, L. 2003: Woodbonding by vibrational welding. J. Adhesion Sci. Technol., 17 (11): 1573-1589.
- 8.) Kanazawa, F.; Pazzi, A.; Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation, J Adhesion Sci. Technol., 19 (12): 1025 –1038

8. LITERATURA

- 9.) Pizzi, A.; Properzi, M.; Leban, J.M.; Zanetti, M.; Piche-lin, F. 2003: Mechanically – induced wood welding. *Ma-deras. Ciencia y tecnologia*, 5 (2): 101 – 106
- 10.) Pizzi. A.; Leban, J. M.; Kanazawa, F., Properzi, M.; Pichelin, F. 2004: Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 18 (11): 1263-1278.
- 11.) Rodriguez, G., Diouf, P., Blanchet, P., Stevanovic, T. 2010.: Wood –Dowel Bonding by High-Speed Rotation Welding –Application to Two Canadian Hardwood Species. *J Adhesion Sci. Technol.*, 24 (2010): 1423 –1436
- 12.) Stamm, B., Natterer, J., navi, P. 2005: Joining of wood layers by friction welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19 (13 –14): 1129 -1139
- 13.) Sutthoff, B., Franz, U., Hentschel, H., Schaaf, A. 1996.: Verfahren zum reibschweissartigen Fügen und Verbinden von Holz. *Patentschrift DE,196(20), 273*
- 14.) Trajković, J., Despot, R., 1996.: *BUKOVINA, Drvna industrija* 47 (4) 171
- 15.) Zoulalian, A.; Pizzi, A., 2007: Wood-dowel rotation wel-ding – a heat – transfer model. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 21 (2): 97-108. doi:10.1163/156856107780437435
- 16.) Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., Hrovat, B., 2008: Zavarivanje masivnog drva, *Drvna industrija*, 59 (3) 113 –119
- 17.) Župčić, I. 2010.; Čimbenici koji utječu na spajanje tokarenih bukovih elemenata tehnikom zavarivanja. *Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb*
- 18.) Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., 2011: Vrijeme trajanja zavarivanja kao važan čimbenik zavarivanja bukovine, *Drvna industrija*, 62 (2) 115 –121

8. LITERATURA

19.) Župčić, I., Vlaović, Z., Domljan, D., Grbac, I. 2014.: Influence of Various Wood Species and Cross-Sections on Strength of a Dowel Welding Joint. *Drvna industrija* 65 (2) 121 -127

*** HRN ISO 13061-1:2015 Fizikalna i mehanička svojstva drva – Metode ispitivanja za manje uzorke masivnog drva – 1. dio: Određivanje sadržaja vode za provođenje ispitivanja fizikalnih i mehaničkih svojstava

2. *** HRN ISO 13061-2:2015 Fizikalna i mehanička svojstva drva – Metode ispitivanja za manje uzorke masivnog drva – 2. dio: Određivanje gustoće za provođenje ispitivanja fizikalnih i mehaničkih svojstava

Internet izvori:

<https://www.wood-database.com/european-beech/> slika 4.

<https://www.wood-database.com/european-beech/> slika 5.

8.1 Popis slika

Slika 1. Krivulje eksperimentalne i procijenjene vrijednosti temperature rotacijskog zavarivanja (Zoulalian i Pizzi, 2007.).....	6
Slika 2. Dva načina zarezivanja uzorka prilikom mjerenja temperature pomoću termalne kamere (Kanazawa i dr., 2005.).....	7
Slika 3. Rendgenski prikaz rasporeda gustoće zavara i površine zavarivanja na poprečnom presjeku moždanika: a) blizu vrha umetanja, b) blizu dna umetanja (Pizzi i dr., 2004.)...8	
Slika 3.1. SEM mikroskopski prikaz ispreplitanja vlaknaca na kontaktnim površinama (slika a i b) (Pizzi i dr., 2004.).....	8
Slika 4. Poprečni presjek bukovine.....	12
(https://www.wood-database.com/european-beech/ , 22.04.2019.)	
Slika 5. Tangentni presjek bukovine.....	13
(https://www.wood-database.com/european-beech/ , 22.04.2019.)	
Slika 6. Radijalno-tangentna tekstura.....	17
Slika 7. Shematski prikaz ispitnog uzorka bukovine.....	17

8. LITERATURA

Slika 8. Ispitni uzorak bukovine.....	17
Slika 9. Pozicija provrta za ispitne sonde.....	18
Slika 10. Bušenje provrta za moždanike.....	18
Slika 11. Bušenje provrta za sonde.....	18
Slika 12. Shematski prikaz moždanika za ispitivanje.....	19
Slika 13. Bukovi moždanik za ispitivanje.....	19
Slika 14. Uzorak za zavarivanje.....	20
Slika 15. softver izrađen od strane tvrtke M-electronic.....	21
Slika 16. Sonde za mjerenje temperature.....	21
Slika 17. Ispitni uzorak sa sondama za mjerenje temperature.....	22
Slika 18. Zavareni uzorak pripremljen za ispitivanje.....	22
Slika 19. Shimadzu AG-X 100 KN.....	23
Slika 20. Čeljust i nastavak za prihvat moždanika.....	24
Slika 21. Priprema uzorka za ispitivanje izvlačne sile.....	25
Slika 22. Prosječne temperature prema sondama (865_50).....	27
Slika 23. Pucanje moždanika uslijed velikih sila pri zavarivanju (865_50).....	28
Slika 24. Prosječne temperature prema sondama (865_100).....	29
Slika 25. Pucanje moždanika uslijed velikih sila pri zavarivanju (865_100).....	30
Slika 26. Prosječne temperature prema sondama (1520_50).....	31
Slika 27. Prosječne temperature prema sondama (1520_100).....	33
Slika 28. Usporedba izvlačnih sila skupina uzoraka ovisno o frekvenciji vrtnje i pomaku.....	36
Slika 29. Usporedba temperatura zavarivanja u odnosu na frekvenciju vrtnje i pomak moždanika.....	37

8.2. Popis tablica

Tablica 1. Fizička svojstva bukovine.....	13
Tablica 2. Mehanička svojstva bukovine.....	13
Tablica 3. Oznake uzoraka.....	15
Tablica 4. Rezultati izvlačne sile statističke obrade uzoraka.....	35
Tablica 5. Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka.....	36

8.3. Popis grafikona

Graf 1. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (865_50).....	28
Graf 2. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (865_100).....	30
Graf 3. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (1520_50).....	32
Graf 4. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (1520_100).....	34

Sažetak

Jasmin Horak

**ISTRAŽIVANJE TEMPERATURE KOD ROTACIJSKOG ZAVARIVANJA
MOŽDANIKA**

Rotacijsko zavarivanje drva je novija metoda spajanja drva bez upotrebe ljepila, uz pomoć utjecaja topline koja nastaje trenjem pri kontaktu drvnih elemenata koji se spajaju. U procesu zavarivanja zbog utjecaja trenja i tlaka između površina koje se zavaruju oslobađa se toplina koja rastali površinske slojeve (lignin i hemicelulozu) te se hlađenjem formira spoj.

Istraživanje se temelji na utjecaju temperature na izvlačnu čvrstoću kod rotacijskog zavarivanja moždanika. Ispitivanje je provedeno zavarivanjem moždanika na dubinu od 20 mm, frekvencijama vrtnje 865 i 1520 min⁻¹, brzinom pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosima 1,11 i 2,03 m/min. Uzorci za ispitivanje i moždanici izrađeni su od bukovine (*Fagus Sylvatica* L.).

Za uzorke zavarene frekvencijom vrtnje u iznosu 865 min⁻¹ s pomakom moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosu 1,11 m/min dobiveni su prosječni rezultati izvlačne sile u iznosu 3941 N kod prosječne temperature u iznosu 168 °C, za uzorke zavarene frekvencijom vrtnje u iznosu 865 min⁻¹ s pomakom moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosu 2,03 m/min dobiveni su prosječni rezultati izvlačne sile u iznosu 4378 N kod prosječne temperature u iznosu 165 °C, za uzorke zavarene frekvencijom vrtnje u iznosu 1520 min⁻¹ s pomakom moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosu 1,11 m/min dobiveni su prosječni rezultati izvlačne sile u iznosu 3813 N kod prosječne temperature u iznosu 164 °C, a za uzorke zavarene frekvencijom vrtnje u iznosu 1520 min⁻¹ s pomakom moždanika u smjeru vertikalne osi u iznosu 2,03 m/min dobiveni su prosječni rezultati izvlačne sile u iznosu 3896 N kod prosječne temperature u iznosu 150 °C.

Ciljevi rada su istraživanje utjecaja topline pri navedenim frekvencijama vrtnje i brzini pomaka moždanika u smjeru vertikalne osi na izvlačnu čvrstoću spoja. Rezultati ovog ispitivanja biti će korisni u daljnjim istraživanjima.

Ključne riječi: zavarivanje drva, temperatura, čvrstoća zavarenog spoja

Summary

Jasmin Horak

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON ROTARY WELDING

Rotary welding of wood is a newer method of joining wood without the use of adhesives, with the help of heat-caused by frictional contact with the joining of wood elements. In the welding process due to friction and pressure between the welded surfaces, heat is released from the surface layers (lignin and hemicellulose) and the compound is formed by cooling. This paper will explain the welding of wood through previous researches and conduct a rotary welding test.

For samples welded at 865 min^{-1} with spindle rotation in the direction of vertical axis in the amount of 1.11 m / min , the average yields of 3941 N at the average temperature of $168 \text{ }^{\circ} \text{C}$ were obtained, for the samples welded by the rotation frequency in the amount of 865 min^{-1} with spindle rotation in the direction of the vertical axis in the amount of 2.03 m / min , the average yields of 4378 N at the average temperature of $165 \text{ }^{\circ} \text{C}$ were obtained, for the samples with a spin speed of 1520 min^{-1} with spindle rotation in the direction of the vertical axis in the amount of $1,11 \text{ m / min}$, the average yields of 3813 N at the average temperature of $164 \text{ }^{\circ} \text{C}$ were obtained, and for the samples welded at a rotation frequency of 1520 min^{-1} with spindle rotation in the direction of the vertical axis in the amount of 2.03 m / min , the average yields of 3896 N at the average temperature of $150 \text{ }^{\circ} \text{C}$ were obtained.

The research is based on the effect of heat on the pulling strength for rotary welding. The test was carried out by welding the spindle at a depth of 20 mm , rotation frequencies 865 and 1520 min^{-1} , spindle rotation in the direction of the vertical axis in the amounts of 1.11 and 2.03 m / min . Test specimens and seedlings were made from beech wood (*Fagus Sylvatica L.*).

The objectives of the study are to study the influence of heat at the specified rotational frequencies and the speed of rotation of the spindle in the direction of the vertical axis to the pulling strength of the coupling. The results of this study will be useful in further research.

Key words: welding of wood, temperature, strength of the welded joint