

# PROCESNI PARAMETRI VISOKOTEHNOLOŠKIH METODA SPAJANJA I SVOJSTVA SPOJEVA NA ZAŠTITNOJ I INTELIGENTNOJ ODJEĆI

---

**Bobovčan Marcelić, Martina**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Textile Technology / Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:201:892065>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Textile Technology University of Zagreb - Digital Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu  
TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

Martina Bobovčan Marčelić

**PROCESNI PARAMETRI  
VISOKOTEHNOLOŠKIH METODA  
SPAJANJA I SVOJSTVA SPOJEVA NA  
ZAŠTITNOJ I INTELIGENTNOJ ODJEĆI**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu  
TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

Martina Bobovčan Marčelić

**PROCESNI PARAMETRI  
VISOKOTEHNOLOŠKIH METODA  
SPAJANJA I SVOJSTVA SPOJEVA NA  
ZAŠTITNOJ I INTELIGENTNOJ ODJEĆI**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
prof. dr. sc. Dubravko Rogale

Zagreb, 2023.



University of Zagreb  
FACULTY OF TEXTILE TECHNOLOGY

Martina Bobovčan Marčelić

**PROCESS PARAMETERS OF HIGH-TECH  
WELDING METHODS AND PROPERTIES  
OF WELDS ON PROTECTIVE AND  
INTELLIGENT CLOTHING**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:  
prof. Ph. D. Dubravko Rogale

Zagreb, 2023

*Zahvala:*

*Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Dubravku Rogaleu na velikoj potpori tijekom izrade doktorskog rada. Velika hvala i svima koji su mi pomagali tijekom ispitivanja za eksperimentalni dio doktorskog rada: prof. dr. sc. Snježani Firšt Rogale, izv. prof. dr. sc. Željku Kneziću, prof. dr. sc. Siniši Fajtu, prof. dr. sc. Jelki Geršak i prof. dr. sc. Antoneti Tomljenović. Puno hvala i mojim dečkima Grgi i Stjepanu koji su mi bili velika potpora i dočekali da mama napiše tu "knjigu". Hvala i mojim roditeljima i seki koji su mi uvijek bili spremni pomoći kad je zatrebalo.*

Tema doktorskog rada „Procesni parametri visokotehnoških metoda spajanja i svojstva spojeva na zaštitnoj i inteligentnoj odjeći“ prihvaćena je na 7. redovitoj sjednici u Fakultetskog vijeća Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta, održanoj 16. lipnja 2014. akad. god. 2013./2104., te je odobrena od Senata Sveučilišta u Zagrebu na 5. sjednici Senata održanoj 8. prosinca 2015. u akademskoj godini 2015./2016.

Znanstveno područje: tehničke znanosti

Znanstveno polje: tekstilna tehnologija

Znanstvena grana: odjevna tehnologija

Institucija u kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet

Mentor doktorskog rada: **prof. dr. sc. Dubravko Rogale**

Broj stranica: 288

Broj slika: 154

Broj tablica: 52

Broj jednadžbi: 28

Broj literaturnih referenca: 90

Jezik teksta: hrvatski jezik

Jezici sažetaka: hrvatski i engleski jezik

Datum obrane: 10. 5. 2023.

Sastav stručnog povjerenstva:

1. **prof. dr. sc. Dubravko Rogale**  
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet
2. **prof. dr. sc. Siniša Fajt**  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. **izv. prof. dr. sc. Tjeljko Knezić**  
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet

## **Kratki životopis i kompetencije mentora**

**Prof. dr. sc. Dubravko Rogale** izvodi nastavni rad na Tekstilno-tehnološkom fakultetu u Zagrebu na preddiplomskom, diplomskim i poslijediplomskom studiju. Obnašao je dužnosti predsjednika Savjeta Instituta za tekstil i odjeću pri Tehnološkom fakultetu, predstojnika Zavoda za odjevnu tehnologiju (sedam godina), prodekana za nastavu Tekstilno-tehnološkog fakulteta (dva mandata) i dužnost dekana Tekstilno-tehnološkog fakulteta (dva mandata). Redoviti je član

Akademije tehničkih znanosti Hrvatske. Bio je tajnik Odjela tekstilne tehnologije, glavni tajnik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, te dopredsjednik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske. Član je Tehnologijskog vijeća za gospodarski razvitak Hrvatske pri Hrvatskoj akademiji znanosti i umjetnosti. Član je Skupštine i član Odbora za registraciju Inženjerskih iskaznica Hrvatskog inženjerskog saveza. Predsjednik je Odbora za znanost i obrazovanje pri Hrvatskom inženjerskom savezu tekstilaca. Član je Matičnog odbora za polja kemijskog inženjstva, rudarstva, nafte i geološkog inženjstva, metalurgije, tekstilne tehnologije i grafičke tehnologije u trećem mandatu. Sudjelovao je u izradi Tehničkog leksikona Leksikografskog zavoda Miroslav Krleža za kojeg je izradio sve natuknice iz područja odjevne tehnologije i inženjstva te član Uredničkog vijeća i urednik i autor natuknica za tekstilstvo Hrvatske tehničke enciklopedije. Bio je predsjednik Tehničkog komiteta za normizaciju šivaćih strojeva i dopredsjednik Tehničkog komiteta za normizaciju sustava odjevnih veličina i oznaka pri Državnom zavodu za normizaciju i mjeriteljstvo.

Član je Povjerenstva za dodjelu znaka Hrvatska kvaliteta i Izvorno hrvatsko pri Centru za unapređivanje kvalitete Hrvatske gospodarske komore. Odlikovao ga je Predsjednik Republike

Hrvatske Redom Danice Hrvatske s likom Ruđera Boškovića za doprinos znanstvenom radu 1997. godine. 2013. dobio je Državnu nagradu tehničke kulture Faust Vrančić (Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta republike Hrvatske). 2022. godine Akademija tehničkih znanosti dodijelila mu je nagradu za životno djelo Moć znanja kao istaknutom znanstveniku koji se posebno isticao u radu HATZ-a, za njegov cjelokupan znanstvenoistraživački rad u području tehničkih znanosti i za višegodišnji doprinos napretku struke, s osobitim naglaskom na primjenu rezultata istraživačkog rada. Sveučilište u Zagrebu dodijelilo mu je 2022. godine nagradu za Inovatora godine.

**Znanstveno-istraživački rad:** područje odjevne tehnologije koje je sadržajno vezano uz područje tehnoloških procesa proizvodnje odjeće i razvoja konvencionalne i inteligentne odjeće, primjene suvremenih visokotehnoloških tehnika spajanja dijelova odjeće



metodom toplinskog spajanja kondukcijom i konvekcijom, ultrazvučne i visokofrekventne tehnike

te ispitivanja konstrukcijskih i toplinskih svojstava konvencionalne i inteligentne odjeće.

### **Znanstveni radovi značajni za područje predložene teme doktorske disertacije:**

1. Rogale, D., Fajt, S., Firšt Rogale, S. & Knezić, T. (2022) Interdependence of Technical and Technological Parameters in Polymer Ultrasonic Welding. *Machines*, 10 (10), 845, 19 doi:10.3390/machines10100845, JCR=Q2/SJR=Q2, Impact Factor: 2.899 (2021); 5-Year Impact Factor: 3.090 (2021).

2. Bobovčan Marčelić, M., Geršak, J., Rogale, D. & Firšt Rogale, S. (2022) Study of the compression properties of welded seams formed using hot wedge, hot air, ultrasonic, and high-frequency welding techniques. *Textile Research Journal*, First Published 5 Jul 2022, 1-17 doi:10.1177/00405175221109637, JCR=Q1/SJR=Q2, Impact Factor: 2.455; 5-Year Impact Factor: 2.378.

3. Rogale, D., Firšt Rogale, S., Knezić, T. & Fajt, S. (2021) New Method for Determining the Machine-Hand Welding Times Using Ultrasonic Welding Machines with Rotary Sonotrode., *Machines*, 9 (12), 1-18 doi:10.3390/machines9120330, JCR=Q2/SJR=Q2 Impact Factor: 2.899 (2021); 5-Year Impact Factor: 3.090 (2021).

4. Knezić, T., Penava, T., Šimić Penava, D. & Rogale, D. (2021) The Impact of Elongation on Change in Electrical Resistance of Electrically Conductive Yarns Woven into Fabric. *Materials*, 14 (12), 3390, 18 doi:10.3390/ma14123390, JCR=Q2/SJR=Q2, Impact Factor: 3.748 (2021); 5-Year Impact Factor: 4.042 (2021).

5. Čubrić, G., Salopek Čubrić, I., Rogale, D. & Firšt Rogale, S. (2021) Mechanical and Thermal Properties of Polyurethane Materials and Inflated Insulation Chambers. *Materials*, 14 (6), 1541, 15, doi:10.3390/ma14061541, JCR=Q2/SJR=Q2, Impact Factor: 3.748 (2021); 5-Year Impact Factor: 4.042 (2021).

Doktorski rad je izrađen u sklopu projekta financiranog od Hrvatske zaklade za znanost pod nazivom **Razvoj i toplinska svojstva inteligentne odjeće (IP-2018-01-6363)**, voditelj projekta prof. dr. sc. Dubravko Rogale.

Istraživanja su izvedena u Laboratoriju za procesne parametre u Zavodu za odjevnu tehnologiju, Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta. Dio ispitivanja izveden je u Zavodu za materijale, vlakna i ispitivanje tekstila, Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta. Ispitivanja uzoraka materijala i spojeva na KES-FB mjernim uređajima, izveden je u Laboratoriju za oblačilno inženjstvo Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru.

## PROŠIRENI SAŽETAK

Istraživanja vezana uz temu doktorskog rada započeta su od početne hipoteze, da zaštitnu i inteligentnu odjeću nije moguće realizirati samo šivanjem, već je nužna upotreba visokotehnoloških tehnika spajanja, s obzirom na dio specifičnih zahtjeva suvremene odjeće. Cilj ovog doktorskog rada je da se utvrde optimalni procesni parametri tehnika spajanja, a proučavane su tehnika ultrazvučnog spajanja, visokofrekventnog spajanja, toplinskog spajanja kondukcijom i konvekcijom, a korištena je i kombinacija tehnike šivanja i toplinskog spajanja adhezivne trake po šavu. Stoga će u doktorskome radu biti prikazane mogućnosti spajanja dijelova spomenute odjeće s pomoću visokotehnoloških tehnika spajanja koje se međusobno razlikuju s aspekta dovođenja i/ili iniciranja topline. Kod svih tehnika spajanja pravilna provedba procesa najčešće ovisi o vrijednostima tri procesna parametra spajanja, a to su temperatura/energija, pritiska sila i vrijeme kod stacionarnog spajanja tj. brzina kod kontinuiranog spajanja.

Cilj i hipoteze:

- Na svojstva spojeva dijelova suvremene zaštitne i inteligentne odjeće postavljaju se novi uvjeti koji se ne mogu postići dosadašnjim poznatim konvencionalnim tehnikama spajanja, pa je stoga nužna upotreba novih visokotehnoloških tehnika spajanja.
- Provedenim istraživanjima cilj je da se utvrdi primjerenost svake visokotehnološke tehnike spajanja, optimalni procesni parametri spajanja i karakteristična obilježja spojeva.
- Nove spoznaje sačinjavati će fundus znanja koji je potreban da bi se potaknuo daljnji razvoj suvremene zaštitne i inteligentne odjeće, kao vrijednih uporabnih predmeta visoke dodane vrijednosti u kojima je potrebno primijeniti nova i složena znanja te proizvodne metode i opremu za njihovu proizvodnju.

U doktorskome radu izvedena su, prema postavljenom planu eksperimenta, istraživanja utjecaja parametara spajanja na svojstva spojeva. Spajano je pet uzoraka materijala oznaka M10, M11, M12, M13 i M14 pomoću pet tehnika spajanja.

Za istraživanja u doktorskome radu korišten je izrazito velik raspon procesnih parametara pa je za eksperimentalni dio izrađeno više od 1800 različitih uzoraka spojeva koji su mjereni, analizirani i ocjenjivani pri čemu su utvrđeni rasponi optimalnih vrijednosti procesnih parametara spajanja za svih pet tehnika spajanja.

Na spojeve, koji imaju funkciju sastavljanja dijelova odjeće specifičnih namjera, postavljaju se određeni zahtjevi. Takvi odjevni predmeti izrađeni su od specifičnih tekstila, a da bi spojevi imali ista svojstva kao i tekstilija od koje se izrađuju, potrebno je koristiti prilikom spajanja optimalne parametre spajanja, koji su definirani u doktorskome radu za svaki uzorak

materijala i svaku tehniku spajanja. Spojevi moraju zadovoljiti estetskim izgledom ali i ostala svojstva kao što su čvrstoća, elastičnost, vodonepropusnost i dr. Na temelju iznesenih zahtjeva, kojima se definiraju značajke spoja, razmatra se o načinu na koji je potrebno projektirati spoj i tehnicu spajanja pomoću koje će se spojiti zadani dijelovi.

Primjena adekvatnih vrijednosti parametara spajanja i njihova kombinacija značajno utječu na svojstva spojeva, a time i na kvalitetu spoja.

Uzorci spojeva u prvoj fazi ocjenjivani su na temelju kriterija dali je postignut spoj ili nije, te dali je na postignutom spoju došlo do oštećenja materijala u zoni spoja. U drugoj fazi ocjenjivani su samo pozitivno ocjenjeni spojevi iz prve faze, na temelju vizualne procjene kvalitete, a kriteriji koji su se uzimali u obzir su nabiranje materijala u spoju i/ili uz spoj i oštećenje u zoni spoja. Na temelju ocjene vizualne kvalitete spojeva, dodijeljene su ocjene od 1 do 5. Na spojevima kojima su dodijeljene ocjene 3, 4 i 5, provedena su ispitivanja svojstva spojeva.

Ispitivana su vlačna, smična, savojna i kompresijska svojstva spojeva pomoću KES-FB mjernog sustava, zatim čvrstoća spoja, zrakonepropusnost spoja, vodonepropusnosti spoja i debljina spoja. Prikazan je i mogući način utvrđivanja količine različitih oblika energije koja se inicira u materijal prilikom spajanja na temelju ulaznih parametara spajanja te je određena vrijednost gustoće energije po volumenu spoja. Usporedbom vrijednosti dobiveni su podaci o količini energije koju je potrebno utrošiti za postizanje kvalitetnog spoja za svaku od tehnika spajanja. Za spojeve spajane upotrebom tehnika ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja, načinjena je analiza utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spojeva. Time će se definirati nove istraživačke metode utvrđivanja procesnih parametara primjerene za tehnike spajanja u odjevnom inženjerstvu. Analizom dobivenih rezultata ispitivanih svojstava, čije vrijednosti se mijenjaju u ovisnosti o primijenjenim procesnim parametrima spajanja na navedena svojstva spojeva, estetski izgled i na kvalitetu spojeva.

Iz rezultata ispitivanja svojstva spojeva izdvojeni su najznačajniji rezultati prema tehnikama spajanja.

Proučavanjem svojstava spojeva nastali primjenom tehnike ultrazvučnog spajanja, vidljiv je utjecaj parametara spajanja ali i način spajanja LL, NN, LN i L1N1, kako utječe na vrijednosti parametara vlačnih i smičnih svojstava spojeva. Analizom rezultata savojnih svojstava spojeva, vidljiv je utjecaj parametara spajanja na vrijednosti parametara savojnih svojstava. Povoljnija savojna svojstva imaju niže vrijednosti krutosti savijanja B i histereze krutosti savijanja 2HB, i karakteristične za spojeve koji imaju veću fleksibilnost tj. veću elastičnu savitljivost. Bolja savojna svojstva spojeva postižu se pri spajanju pri nižim brzinama spajanja od 3 i 5 mm<sup>-1</sup>, ali većim vrijednostima snage spajanja, pri kojima su uzorci ostvarili pozitivnu ocjenu na temelju vizualne procjene kvalitete spoja. Proučavanjem odnosa utjecaja parametara spajanja na vrijednosti parametara kompresijskih svojstava, uočeno je da vrlo

bitan faktor koji utječe na vrijednosti svih kompresijskih parametara je intenzitet istisnutih rubova, čija se debljina prikazuje kompresijskim parametrom  $h_m$ . Manje vrijednosti debljine  $h_m$  ukazuju da spoj ima blago istisnute rubove, a veće izmjerene vrijednosti  $h_m$  upućuju na jači intenzitet istisnutih rubova. Vrlo naglašeni istisnuti rubovi su deformacije koje nastaju kod dovođenja i/ili iniciranja prevelike količine topline u zoni spajanja. Omekšani materijal se iz područja zahvaćenog djelovanju topline, djelovanjem pritisne sile, istiskuje u rubove spoja. Povoljnija kompresijska svojstva imaju spojevi koji nemaju izrazito naglašene istisnute rubove, a vrijednosti kompresijskih parametara su niže vrijednosti  $h_0$  i  $h_m$ , niže vrijednosti deformacijskog rada WC i veću sposobnost oporavka RC. Da bi se postigli spojevi s vrlo blagim istisnutim rubovima, potrebno je koristiti veću brzinu spajanja i veću snagu ultrazvučnog spajanja. Najveće vrijednosti čvrstoće spojeva izmjerene su kod spojeva spajanih pri nižim brzinama spajanja i većim snagama ultrazvučnog spajanja. Ovi spojevi kod svih uzoraka materijala imaju naglašene istisnute rubove, ali nemaju oštećenja materijala u zoni spoja. Zraknepropusnost i vodonepropusnost također je svojstvo spojeva na koje utječu parametri ultrazvučnog spajanja, način rasporeda slojeva materijala prilikom spajanja ali i konstrukcijske karakteristike materijala. Uzorci spajani na način LL, LN i pri većim snagama ultrazvučnog spajanja i su zrakonepropusni i vodonepropusni. Analizom utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spoja kod ultrazvučnog spajanja utvrđeno je da pri nižim brzinama ultrazvučnog spajanja i višim snagama spajanja, tj. iz izračuna proizlazi, većim vrijednostima utrošene gustoća energije po volumenu, spojevi imaju veću čvrstoću. Kod ultrazvučnog spajanja pri nižim brzinama spajanja i višim vrijednostima snage ultrazvučnog spajanja također su izmjerene i najviše vrijednosti za debljinu istisnutog ruba, stoga se može zaključiti da kod pozitivno ocijenjenih spojeva, bez oštećenja u zoni spoja, veće vrijednosti istisnutog ruba ne utječu na čvrstoću spoja

Proučavanjem svojstava spojeva nastali primjenom tehnike visokofrekventnog spajanja, vidljiv je utjecaj parametara spajanja na vrijednosti parametara vlačnih i smičnih svojstava spojeva. Povoljnija savojna svojstva imaju spojevi koji su spajani pri višim vrijednostima anodne struje na način LL, dok su na spojevima spajanim na način NN pri istim parametrima spajanja vrijednosti savojnih svojstava veće. Povoljne vrijednosti kompresijskih svojstava spojeva izmjerene su na uzorcima spojeva spojenih pri nižim vrijednostima anodne struje i dužim vremenom spajanja. Pri tim parametrima visokofrekventnog spajanja spojevi imaju vrlo blago naglašene rubove, tj. niže vrijednosti debljine  $h_m$ , deformacijskog rada WC i kompresibilnosti C, te veće vrijednosti sposobnosti oporavka RC. Najveće vrijednosti čvrstoće spojeva izmjerene su kod uzoraka spojeva koji su spojeni pri duljem vremenu spajanja i većim vrijednostima jakosti anodne struje. Ovi spojevi imaju jače naglašene istisnute rubove, ali i veću čvrstoću spram onih spojeva koji su spajani pri nižim vrijednostima

anodne struje. Promatranjem utjecaja parametara visokofrekventnog spajanja na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva, utvrđeno je da svi spojevi spajani pri većim jakostima anodne struje 260 i 300 mA su zrakonepropusni i vodonepropusni. Analizom utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spoja kod visokofrekventnog spajanja utvrđeno je da su pri većim vrijednostima gustoće energije po volumenu, izmjerene i veće vrijednosti čvrstoće spojeva.

Proučavanjem svojstava spojeva nastali primjenom tehnike toplinskog spajanja kondukcijom, vidljiv je utjecaj parametara spajanja na vrijednosti parametara savojnih svojstava spojeva. Niže vrijednosti krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB, imaju spojevi spajani pri većim brzinama spajanja i nižim temperaturama spajanja. Kod spojeva nastalih spajanjem vrućim klinom, vrijednosti izmjerenih kompresijskih svojstva odnose se na debljinu spoja. Uzorci spojeva koji imaju vizualnom procjenom vrlo blago istisnute rubove, ali izmjerene veće debljine spojeva  $h_m$  izmjerene su pri većim brzinama spajanja, a temperatura spajanja ovisi o uzorku materijala. Kod ovih uzoraka vrlo kratko vrijeme se djeluje određenom temperaturom, te se omekšani materijal ne istiskuje u rubove spoja i zato je pri tim spojevima debljina spoja veća nego kod spojeva koji nastaju spajanjem pri manjim brzinama spajanja. Najveće vrijednosti čvrstoće spojeva izmjerene su kod uzoraka spojeva koji su spojeni pri većim vrijednostima temperature vrućeg klina, ali ovisno o uzorku materijal. Analizom rezultata utvrđeno je da parametri spajanja vrućim klinom utječu na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva. Ovisno o uzorku materijala, ali i načinu spajanja, najviše pozitivno ocijenjenih uzoraka je spajano na način LL, te ti spojevi ostvaruju svojstvo zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti.

Proučavanjem svojstava spojeva nastali primjenom tehnike toplinskog spajanja konvekcijom, vidljiv je utjecaj parametara spajanja na vrijednosti parametara savojnih svojstava spojeva. Povoljnija savojna svojstva imaju niže vrijednosti krutosti savijanja B i histereze krutosti savijanja 2HB, te su karakteristične za spojeve koji imaju veću fleksibilnost tj. veću elastičnu savitljivost. Kod ove tehnike spajanja omjer i vrijednosti parametara spajanja vrlo specifično utječu na svaki pojedini uzorak materijala i na način spajanja (LL, NN, LN). Povoljne vrijednosti kompresijskih svojstva spojeva izmjerene su na uzorcima spojeva spojenih pri većim brzinama spajanja i većim temperaturama ispuhujućeg vrućeg zraka. Ovi spojevi nemaju vizualno naglašene rubove, te je izmjerena manja debljina spoja  $h_m$ , manje vrijednosti deformacijskog rada WC, te veće vrijednosti sposobnosti oporavka RC. Analizom čvrstoća spojeva utvrđeno je da spojevi spajani pomoću vrućeg zraka pri većim temperaturama spajanja od 400-450 °C imaju veće čvrstoće spojeva. Utvrđeno je da na svojstva zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva utječu parametri spajanja, ali i

način spajanja i vrsta uzorka materijala. Samo spojevi spajani na uzorku materijala M10 pri svim parametrima spajanja ostvaruju pozitivne ocjene, tj, spojevi su zrakonepropusni i vodonepropusni.

Proučavanjem svojstava spojeva nastali primjenom tehnike šivanja i toplinskog spajanja konvekcijom, vidljiv je utjecaj parametara spajanja na čvrstoću spoja. Utvrđeno je da se pri šivanju uzorka materijala pri većoj duljini uboda (3 mm) s manjom finoćom igle (90 Nm), postiže veća čvrstoća spoja. Parametri toplinskog spajanja vrućim zrakom nisu mijenjani, za svaki uzorka materijala odabrani su optimalni parametri spajanja adhezivne trake po šavu. Isto tako analizom rezultata zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti i utjecaja parametara šivanja i spajanja vrućim zrakom na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva, utvrđeno je da svi uzorci šivani s većom duljinom uboda (3 mm) ostvaruju pozitivne ocjene na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva, bez obzira na finoću igle.

Rezultati istraživanja jasno ukazuju da se pomoću mehaničkih parametara moguće egzaktno i znanstveno vrednovati svojstva spojeva na tekstilnim materijalima od kojih se izrađuje zaštitna i inteligentna odjeća.

Utvrđeni rezultati ispitivanja svojstava spojeva i karakterističnih obilježja omogućuju cjelovitu komparativnu tehnološku analizu najutjecajnijih procesnih parametara spajanja pri čemu su utvrđeni rasponi optimalnih vrijednosti procesnih parametara spajanja za svih pet primijenjenih visokotehnoloških tehnika spajanja.

Nove spoznaje utvrđene u doktorskom radu pomoći će pri daljnjem razvoju suvremene zaštitne i inteligentne odjeće kao vrijednih uporabnih predmeta visoke dodane vrijednosti. Rezultati ovog dokorskog rada omogućuju daljnji znanstveni, tehnički i tehnološki razvoj suvremenih visokotehnoloških spojeva na specifičnim odjevnim predmetima.

## SAŽETAK

U doktorskom radu istražena su svojstva spojeva koji su nastali spajanjem nekoliko vrsta termoplastičnih polimernih materija primjenom visokotehnoloških metoda spajanja dijelova odjeće. Metoda spajanja uključuje osim tehnike spajanja i rukovanje strojem i detaljnu analizu procesnih parametara spajanja. Tehnike spajanja koje su se koristile za izradu uzoraka spojeva koji su ispitani u doktorskom radu su ultrazvučna tehnika spajanja, visokofrekventna tehnika spajanja, spajanje toplinskom kondukcijom, spajanje toplinskom konvekcijom i kombinacija šivanja i toplinske konvekcije, spajanje adhezivne trake po šavu. Spojevi spajani visokotehnološkim tehnikama spajanja mogu imati, ovisno o uzorku materijala i načinu projektiranja spoja, svojstvo zrakonepropusnosti i/ili vodonepropusnosti. Takvi spojevi koriste se kod spajanja dijelova odjeće specifičnih namjena kao što su zaštitna i inteligentna odjeća.

Za spajanje termoplastičnih polimernih materijala definirani su parametri spajanja, primijenjeni pri spajanju uzoraka termoplastičnih materijala. Vrednovanje kvalitete spojeva na temelju vizualnog izgleda spoja, ocjenjivano je u dvije faze. U prvoj fazi ocjenjivanja, pozitivnom ocjenom ocjenjeni su oni uzorci spojeva kod kojih je spoj ostvaren, a svi oni uzorci spojeva koji su slabo spojeni ili je prilikom spajanja došlo do oštećenja u zoni spoja i/ili okolnog područja, ocjenjeni su negativnom ocjenom. U drugoj fazi ocjenjivanja uzorcima spojeva dodijeljena je ocjena od 1 (loš spoj) do 5 (dobar spoj), na temelju kriterija oštećenja (O) ili nabiranja materijala u spoju ili uz spoj (N). Na uzorcima spojeva koji su ocjenjeni dobrom ocjenom vizualne kvalitete, provedena su ispitivanja svojstva spojeva.

U radu su prikazana ispitivanja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstva spojeva na KES-FB (eng. Kawabata Evaluation System) mjernim uređajima. Na temelju analize mjernih rezultata ispitivanih svojstava spojeva, čije vrijednosti se mijenjaju u ovisnosti o primijenjenim procesnim parametrima spajanja, utvrđen je odnos utjecaja procesnih parametara spajanja na navedena svojstva spojeva, estetski izgled i na kvalitetu spojeva. Na kvalitetu spojeva osim nabrojanih svojstava spojeva utječe i čvrstoća spoja čije su vrijednosti ispitane i također je analiziran odnos utjecaja parametara spajanja na čvrstoću spojeva.

Proučavanjem odnosa utjecaja parametara spajanja na vrijednosti izmjerenih parametara kompresijskih svojstava spojeva, uočeno je da vrlo bitan faktor koji utječe na vrijednosti svih proučavanih svojstava spojeva je debljina istisnutih rubova. Manje vrijednosti debljine istisnutih rubova ukazuju da spoj ima blago istisnute rubove, a veće izmjerene vrijednosti upućuju na jači intenzitet istisnutih rubova. Vrlo naglašeni istisnuti rubovi su deformacije koje nastaju kod dovođenja i/ili iniciranja prevelike količine topline u zoni spajanja. Omekšani materijal se iz područja zahvaćenog djelovanju topline, djelovanjem pritiskne sile, istiskuje u rubove spoja.



Iz rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva i utjecaja različitih parametara spajanja može se zaključiti da na čvrstoću spojeva značajan utjecaj imaju parametri spajanja ali i raspored slojeva materijala. Najveće vrijednosti čvrstoće spojeva izmjerene su kod spojeva spajanih pri nižim brzinama spajanja (što odgovara dužem vremenu djelovanja energije na materijal) i većim vrijednostima snage ultrazvučnog generatora/ jakosti anodne struje. Spojevi koji imaju više vrijednosti debljine istisnutih rubova, imaju veću čvrstoću spoja.

Da bi se utvrdila količina energije kojom se djeluje na materijal prilikom spajanja, provedeni su izračuni te je na temelju ulaznih parametara spajanja izračunata vrijednosti gustoće energije po volumenu. Usporedbom vrijednosti dobiveni su podaci o količini energije koju je potrebno utrošiti za postizanje kvalitetnog spoja za svaki od uzoraka materijala.

Analizom je utvrđeno da spojevi kod kojih je izračunom dobiveno da iniciraju veću gustoću energije po volumenu imaju i veću čvrstoću i veću debljinu istisnutog ruba.

**KLJUČNE RIJEČI:** *Spajanje termoplastičnih materijala, ultrazvučno spajanje, visokofrekventno spajanje, spajanje toplinskom kondukcijom, spajanje toplinskom konvekcijom, svojstva spojeva, čvrstoća spoja, gustoća energije po volumenu*

## ABSTRACT

In the doctoral thesis, the properties of welded seams created by welding several types of thermoplastic polymer materials using high-tech methods of welding clothing parts were investigated. The welding method includes, in addition to the welding technique, machine handling, and a detailed analysis of welding process parameters. The welding techniques that were used to make the welded seam samples that were examined in the doctoral thesis are the ultrasonic welding technique, high-frequency welding technique, thermal welding by conduction, thermal welding by convection and a combination of sewing and thermal welding by convection, joining adhesive tape by sewing seam. Welded seams joined by high-tech welding techniques can have, depending on the material sample and the way the welded seam is designed, the property of air tightness and/or water tightness. Such welded seams are used when joining parts of clothing for specific purposes, such as protective and intelligent clothing.

For the welding of thermoplastic polymer materials, the welding parameters are defined, applied for welding samples of thermoplastic materials. Evaluation of the quality of welded seam based on the visual appearance of the welded seam was evaluated in two phases. In the first evaluation phase, those welded seam samples where the weld was achieved were given a positive grade, and all those welded seam samples that were weakly weld or during welding were damaged in the weld zone and/or the surrounding area were given a negative grade. In the second evaluation phase, the welded seam samples were assigned a grade from 1 (bad welded seam) to 5 (good welded seam), based on the criteria of damage (O) or wrinkling of material in the weld zone or next to the weld (N). Tests of the properties of the welded seams were carried out on the samples of weld that were evaluated with a good visual quality rating.

The paper presents the results of properties measurement on KES-FB (Kawabata Evaluation System) measuring devices: tensile, shear, bending, and compression properties of welded seams. Based on the analysis of the measurement results of the examined welded seams properties, the values of which change depending on the applied welding process parameters, the relationship between the influence of the welding process parameters on the specified welded seam properties, the aesthetic appearance and the quality of the welded seam was determined. In addition to the listed properties of the welded seams, the quality of the weld is also affected by the strength of the welded seam, the values of which were tested and the relationship between the influence of the welding parameters on the strength of the welded seam was also analysed.

By studying the relationship between the influence of the welding parameters on the values of the measured parameters of the compression properties of welded seams, it was

observed that a very important factor that affects the values of all studied properties of the welded seams is the thickness of the extruded edges. Lower values of the thickness of extruded edges indicate that the welded seam has slightly extruded edges, and higher measured values indicate a higher intensity of extruded edges. The highly accentuated extruded edges are deformations that occur when a large amount of heat is introduced and/or initiated in the welding zone. The softened material is pushed out of the area affected by the heat, by the action of pressure force, into the edges of the welding seam.

From the results of testing the strength of the welded seams and the influence of different welding parameters, it can be concluded that the strength of the welded seams is significantly influenced by the welding parameters as well as the number of the material layers and their position.

The highest values of welded seam strength were measured for welded seams, welded at lower values of the welding speed (which corresponds to a longer time of energy action on the material) and higher values of the strength anode current/ultrasonic power. Welded seams that have higher values of the thickness of the extruded edges have a higher strength.

In order to determine the amount of energy exerted on the material during welding, calculations were carried out based on the input welding parameters, energy density values per volume were calculated. By comparing the values, data was obtained on the amount of energy that needs to be used to achieve a quality welded seam for each of the material samples.

The analysis determined that the welded seams where it was calculated that they initiate a higher energy density per volume have higher values of the welded seams strength and a higher values of the thickness of the extruded edge.

**KEYWORDS:** Welding of thermoplastic polymer materials, ultrasonic welding, high-frequency welding, thermal welding by conduction, thermal welding by convection, welded seam properties, strength of welded seam, energy density per volume

## SADRŽAJ

	Str.
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED TEMATIKE</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Visokotehnološke tehnike spajanja termoplastičnih polimernih materijala i njihova primjena</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 Ultrazvučno spajanje .....	10
2.1.2 Visokofrekventno spajanje .....	19
2.1.3 Spajanje toplinskom kondukcijom, .....	25
2.1.4 Spajanje toplinskom konvekcijom .....	28
<b>2.2 Zaštitna odjeća</b> .....	<b>33</b>
<b>2.3 Inteligentna odjeća</b> .....	<b>34</b>
<b>2.4 Šavovi i spojevi na zaštitnoj i inteligentnoj odjeći</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5 Mehanička svojstva i njihovo vrednovanje</b> .....	<b>42</b>
2.5.1 Vlačna svojstva .....	42
2.5.2 Smična svojstva .....	44
2.5.3 Savojna svojstva .....	45
2.5.4 Kompresijska svojstva .....	46
<b>2.6 Izračun gustoće energije po volumenu kod visokotehnoloških tehnika spajanja</b>	<b>48</b>
2.6.1 Izračun gustoće energije kod ultrazvučnog spajanja	49
2.6.2 Izračun gustoće energije kod visokofrekventnog spajanja	49
<b>2.7 Statistička obrada podataka</b>	<b>51</b>
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1 Upotrebljavani uzorci materijala</b> .....	<b>57</b>
3.1.1 Priprema uzoraka materijala za spajanje .....	63
<b>3.2 Strojevi za spajanje visokotehnološkim tehnikama</b> .....	<b>65</b>
3.2.1 Stroj za ultrazvučno spajanje .....	65
3.2.2 Stroj za visokofrekventno spajanje .....	67
3.2.3 Kombinirani stroj za spajanje toplinskom kondukcijom i konvekcijom.....	68
3.2.4 Univerzalni šivaći stroj .....	70
<b>3.3 Mjerna oprema</b> .....	<b>72</b>
3.3.1 KES-FB mjerni sustav .....	72
3.3.1.1 <i>KES-FB1 mjerni uređaj za mjerenje vlačnih i smičnih svojstava</i> .....	68
3.3.1.2 <i>KES-FB2 mjerni uređaj za mjerenje savojnih svojstava</i> .....	77

3. 3.1.3	<i>KES-FB3 mjerni uređaj za mjerenje kompresijskih svojstava .....</i>	80
3.3.2	Uređaj za ispitivanje čvrstoće spojeva (kidalica) .....	84
3.3.3	Uređaj za mjerenje zrakopropusnosti spojeva .....	87
3.3.4	Uređaj za ispitivanje vodonepropusnosti spojeva.....	88
3.3.5	Mikroskop .....	89
3.3.6	Mjerni uređaj za mjerenje karakteristika ultrazvučnih spojeva .....	90
<b>3.4</b>	<b>Ocjenjivanje spojeva.....</b>	<b>92</b>
3.4.1	Prva faza ocjenjivanja spojeva s obzirom na postignuti spoj (1-faza ocjenjivanja) .....	92
3.4.2	Druga faza ocjenjivanja vizualne kvalitete spoja i područja uz spoj (2-faza ocjenjivanja) .....	99
<b>4.</b>	<b>REZULTATI .....</b>	<b>109</b>
<b>4.1</b>	<b>Rezultati ispitivanja vlačnih svojstava spojeva izračenih visokotehnološkim tehnikama spajanja .....</b>	<b>109</b>
4.1.1	Rezultati ispitivanja vlačnih svojstava spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja .....	110
4.1.2	Rezultati ispitivanja vlačnih svojstava spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja .....	113
<b>4.2</b>	<b>Rezultati ispitivanja smičnih svojstava spojeva izračenih visokotehnološkim tehnikama spajanja .....</b>	<b>118</b>
4.2.1	Rezultati ispitivanja smičnih svojstava spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja .....	118
4.2.2	Rezultati ispitivanja smičnih svojstava spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja .....	122
<b>4.3.</b>	<b>Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izračenih visokotehnološkim tehnikama spajanja .....</b>	<b>130</b>
4.3.1	Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja .....	130
4.3.2	Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja .....	137
4.3.3	Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom .....	147
4.3.4	Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom .....	151
<b>4.4</b>	<b>Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izračenih visokotehnološkim tehnikama spajanja .....</b>	<b>156</b>

4.4.1	Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja .....	156
4.4.2	Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja.....	161
4.4.3	Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom .....	168
4.4.4	Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom .....	174
<b>4.5</b>	<b>Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva .....</b>	<b>184</b>
4.5.1	Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja .....	184
4.5.1.1	Rezultati statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja .....	192
4.5.2	Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja.....	193
4.5.2.1	Rezultati statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja .....	204
4.5.3	Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom .....	205
4.5.3.1	Rezultati statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom .....	210
4.5.4	Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom .....	211
4.5.5	Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih kombinacijom tehnike šivanja i tehnike spajanja toplinskom konvekcijom .....	216
4.5.5.1	Rezultati statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih kombinacijom tehnike šivanja i tehnike spajanja toplinskom konvekcijom .....	221
<b>4.6</b>	<b>Rezultati ispitivanja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva .....</b>	<b>223</b>
<b>4.7</b>	<b>Rezultati ispitivanja debljine spojeva na ultrazvučno spojenim uzorcima materijal.....</b>	<b>229</b>
<b>4.8</b>	<b>Izračun gustoća energije po volumenu kod visokotehnoloških tehnika spajanja .....</b>	<b>233</b>
4.8.1	Izračun gustoće energije kod ultrazvučnog spajanja .....	233

4.8.2	Izračun gustoće energije kod visokofrekventnog spajanja .....	235
<b>5.</b>	<b>RASPRAVA</b> .....	<b>240</b>
<b>5.1</b>	<b>Vlačna svojstva spojeva</b>	<b>240</b>
5.1.1	Vlačna svojstva spojeva izrađenih tehnikom ultrazvučnog spajanja.....	241
5.1.2	Vlačna svojstva spojeva izrađenih tehnikom visokofrekventnog spajanja .....	242
<b>5.2</b>	<b>Smična svojstva spojeva</b> .....	<b>244</b>
5.2.1	Smična svojstva spojeva izrađenih tehnikom ultrazvučnog spajanja.....	244
5.2.2	Smična svojstva spojeva izrađenih tehnikom visokofrekventnog spajanja .....	246
<b>5.3</b>	<b>Svojna svojstva spojeva</b> .....	<b>247</b>
5.3.1	Svojna svojstva spojeva izrađenih tehnikom ultrazvučnog spajanja ..	248
5.3.2	Svojna svojstva spojeva izrađenih tehnikom visokofrekventnog spajanja .....	250
5.3.3	Svojna svojstva spojeva izrađenih izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom .....	252
5.3.4	Svojna svojstva spojeva izrađenih izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom .....	252
<b>5.4</b>	<b>Kompresijska svojstva svojstva</b> .....	<b>253</b>
5.4.1	Kompresijska svojstva spojeva izrađenih tehnikom ultrazvučnog spajanja.....	254
5.4.2	Kompresijska svojstva spojeva izrađenih tehnikom visokofrekventnog spajanja .....	255
5.4.3	Kompresijska svojstva spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom .....	256
5.4.4	Kompresijska svojstva spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom .....	258
<b>5.5</b>	<b>Čvrstoća spoja</b> .....	<b>260</b>
5.5.1	Čvrstoća spojeva izrađenih tehnikom ultrazvučnog spajanja .....	261
5.5.2	Čvrstoća spojeva izrađenih tehnikom visokofrekventnog spajanja .....	262
5.5.3	Čvrstoća spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom	263
5.5.4	Čvrstoća spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom	264
5.5.5	Čvrstoća spojeva izrađenih kombinacijom tehnike šivanja i tehnike spajanja toplinskom konvekcijom .....	264

5.5.6	Usporedba vrijednosti čvrstoće uzoraka materijala i najviše izmjerene vrijednosti čvrstoće spojeva spajanih visokotehnološkim tehnikama spajanja	265
<b>5.6</b>	<b>Zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva .....</b>	<b>267</b>
<b>5.7</b>	<b>Debljina spojeva .....</b>	<b>269</b>
<b>5.8</b>	<b>Gustoća energije po volumenu kod ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja .....</b>	<b>269</b>
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČCI .....</b>	<b>272</b>
<b>6.1</b>	<b>Ultrazvučna tehnika spajanja i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva.....</b>	<b>273</b>
<b>6.2</b>	<b>Visokofrekventna tehnika spajanja i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva.....</b>	<b>275</b>
<b>6.3</b>	<b>Tehnika spajanja toplinskom kondukcijom i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva.....</b>	<b>277</b>
<b>6.4</b>	<b>Tehnika spajanja toplinskom konvekcijom i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva.....</b>	<b>278</b>
<b>6.5</b>	<b>Kombinirana tehnika šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom, te utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva .....</b>	<b>279</b>
<b>7.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>280</b>
	<b>PRILOZI .....</b>	<b>289</b>



## POPIS SLIKA

	Str.
<b>SI. 2.1</b> Podjela tehnika spajanja prema načinu dovođenja i/ili induciranja topline u termoplastičnom polimernom materijalu	5
<b>SI. 2.2</b> Strukture polimera	7
<b>SI. 2.3</b> Dijagram stanja i mehanička svojstva amorfni plastomera u ovisnosti o temperaturi	9
<b>SI. 2.4</b> Dijagram stanja i mehanička svojstva kristalastih plastomera u ovisnosti o temperaturi	9
<b>SI. 2.5</b> Shematski prikaz dijelova stroja kod ultrazvučnog spajanja	12
<b>SI. 2.6</b> Ultrazvučna pojačala s različitim vrijednostima faktora pojačanja	13
<b>SI. 2.7</b> Prikaz pomaka sonotrode gore-dolje za vrijeme ultrazvučnog spajanja	13
<b>SI. 2.8</b> Primjena ultrazvučnog spajanja	18
<b>SI. 2.9</b> Shematski prikaz visokofrekventnog spajanja	19
<b>SI. 2.10</b> Prikaz polarizacije dipolne molekule	20
<b>SI. 2.11</b> Prikaz stroja za visokofrekventno spajanje	22
<b>SI. 2.12</b> Presjek stroja za spajanje toplinskom konvekcijom	29
<b>SI. 2.13</b> Prikaz dijela spoja za spajanje pomoću toplinske konvekcije tt. Pfaff	29
<b>SI. 2.14</b> Primjena tehnike spajanja toplinskom konvekcijom, spajanjem adhezivne trake po šavu	31
<b>SI. 2.15</b> Uzorci ispitivanih šavova: a) obamitajući šav, b) našivanje kose trake oko ruba šava i c) kombinirani šav/spoj	38
<b>SI. 2.16</b> Kemijsko zaštitno odijelo TIP 5 izrađeno kombinacijom tehnike šivanja i tehnike toplinskog spajanja konvekcijom adhezivne trake po šavu	39
<b>SI. 2.17</b> Shematski prikaz izgleda šava i spoja kod spajanja dva sloja materijala	40
<b>SI. 2.18</b> Prikaz jednostavnog vlačnog opterećenja	43
<b>SI. 2.19</b> Odnos između uzdužne i poprečne deformacije	44
<b>SI. 2.20</b> Jednostavno smično opterećenje	44
<b>SI. 2.21</b> Prikaz karakteristične histereze smične sile	45
<b>SI. 2.22</b> Prikaz karakteristične histereze momenta savijanja, K - zakrivljenost) i M - moment savijanja	46
<b>SI. 2.23</b> Prikaz ovisnosti kompresijske sile i deformacije tijekom opterećivanja i rasterećivanja mjernog uzorka	47
<b>SI. 2.24</b> Prikaz širine sonotrode	49
<b>SI.2.25</b> Prikaz dimenzija gornje visokofrekventne elektrode	50
<b>SI. 3.1</b> Plan eksperimenta	56
<b>SI. 3.2</b> Slikovni prikaz uzoraka materijala (oznake M11, M12, M13 i M14) i opis njihove namjene	62
<b>SI. 3.3</b> a) Prikaz rasporeda slojeva materijala za izradu uzoraka spojeva i b) načina spajanja slojeva materijala (oznaka LL, NN, LN)	63
<b>SI. 3.4</b> Prikaz dimenzije uzorka materijala i pozicija spoja za a) uzorke spajane ultrazvučnom, visokofrekventnom tehnikom i kombiniranom tehnikom šivanja i spajanja adhezivne trake toplinskom konvekcijom na šav i b) uzorke spajanje toplinskom kondukcijom i konvekcijom	64

<b>SI. 3.5</b>	Stroj za ultrazvučno spajanje proizvođača Pfaff oznake Seamsonic 8310-003	65
<b>SI. 3.6</b>	Prikaz ultrazvučnog spajanja a) shematski prikaz spajanja i b) prikaz sonotrode i trolinijskog protuvaljka na stroju za ultrazvučno spajanje i c) izgled spoja nastalog ultrazvučnim spajanjem	66
<b>SI. 3.7</b>	Spajanje visokofrekventnom tehnikom spajanja a) shematski prikaz visokofrekventnog spajanja; b) izgled spojenog uzorka	67
<b>SI. 3.8</b>	Prikaz dijela stroja za visokofrekventno spajanje te gornje i donje visokofrekventne elektrode	68
<b>SI. 3.9</b>	Spajanje toplinskom kondukcijom a) shematski prikaz spajanja, b) prikaz dijela stroja za spajanje i c) izgled spoja	69
<b>SI. 3.10</b>	Spajanje toplinskom konvekcijom a) shematski prikaz spajanja, b) prikaz dijela stroja za spajanje toplinskom konvekcijom i c) izgled spoja	69
<b>SI. 3.11</b>	Univerzalni šivaći stroj tt. Pfaff 1053, šivaća igla i izgled šivanog šava	71
<b>SI. 3.12</b>	KES-FB1 mjerni uređaj za mjerenja vlačnih i smičnih svojstava	74
<b>SI. 3.13</b>	Mjerni uređaj KES-FB1 mjerenje vlačnih svojstava a) prikaz uzorka za vrijeme mjerenja, b) grafički prikaz mjerenja vlačnih svojstava uzorka spoja i c) krivulja vlačnog opterećenja i rasterećenja uzorka	75
<b>SI. 3.14</b>	Histereza momenta savijanja M za stranu lica i naličja uzorka tkanine kod zakrivljenosti K između $0 \text{ i } \pm 1,5 \text{ cm}^{-1}$	77
<b>SI. 3.15</b>	Mjerni uređaj KES-FB2 za mjerenje smičnih svojstava a) prikaz uzorka za vrijeme mjerenja i b) grafički prikaz mjerenja smičnih svojstava uzorka spoja	78
<b>SI. 3.16</b>	Histereza momenta savijanja M za stranu lica i naličja uzorka tkanine kod zakrivljenosti K između $0 \text{ i } \pm 1,5 \text{ cm}^{-1}$	79
<b>SI. 3.17</b>	KES-FB 3 mjerni sustav za mjerenje kompresijskih svojstava a) prikaz uzorka za vrijeme mjerenja i b) dijagram ovisnosti kompresijske sile i deformacije tijekom opterećivanja i rasterećivanja uzoraka	81
<b>SI. 3.18</b>	Prikaz mjernog tijela KES-FB3 mjernog uređaja prilikom mjerenja kompresijskih svojstva i širine spojeva, dobivenih: a) ultrazvučnom tehnikom spajanja, b) visokofrekventnom tehnikom spajanja, c) spajanje toplinskom kondukcijom i d) spajanje toplinskom konvekcijom	83
<b>SI. 3.19</b>	Shematski prikaz presjeka spoja s prikazom karakterističnih debljina spoja: debljina istisnutih rubova ( $d_r$ ), debljina spoja ( $d_s$ ) i debljina materijala izvan područja spajanja ( $d_i$ )	84
<b>SI. 3.20</b>	Prikaz kidalice TensoLab 3000 proizvođača Mesdan S.p.A	84
<b>SI. 3.21</b>	Dimenzije ispitnih epruveta za ispitivanje čvrstoće spojeva za a) tehniku ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja, za tehniku spajanja toplinskom kondukcijom i konvekcijom i b) kombiniranu tehniku šivanja i tehniku spajanja toplinskom konvekcijom, spajanje adhezivne trake po šavu	86
<b>SI. 3.22</b>	Prikaz uzorka spoja za vrijeme mjerenja čvrstoće spoja	86
<b>SI. 3.23</b>	Prijenosni uređaj za određivanje zrakonepropusnosti uzorka materijala i spoja	87

<b>SI. 3.24</b>	Prikaz uređaja za ispitivanje vodonepropusnosti spojeva	88
<b>SI. 3.25</b>	Prikaz a) Mikroskopa tt. Bresser LCD MICRO 40x-1600; b) Promatrani uzorak u zoni spoja	89
<b>SI. 3.26</b>	Pozicije mjerenja debljina spoja i istisnutih rubova na ultrazvučno spojenom spoju	90
<b>SI. 3.27</b>	Prikaz a) uređaja za ispitivanje karakteristika ultrazvučnih spojeva i b) prikaz mjerenja debljine na poziciji $h_{01}$	91
<b>SI. 3.28</b>	Prikaz izgleda spoja i simbola pomoću kojih je uzorak spoja ocijenjen	93
<b>SI. 3.29</b>	Prikaz načina označavanje vizualne ocjene kvalitete spoja	99
<b>SI. 3.30</b>	Prikaz uzoraka spojeva s lica spajanog materijala nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M10 tehnikom ultrazvučnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)	100
<b>SI. 3.31</b>	Prikaz uzoraka spojeva s naličja spajanog materijala nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M10 tehnikom ultrazvučnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)	101
<b>SI. 3.32</b>	Prikaz uzoraka spojeva s lica spajanog materijala nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M12 tehnikom visokofrekventnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)	102
<b>SI. 3.33</b>	Prikaz uzoraka spojeva s naličja spajanog materijala nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M12 tehnikom visokofrekventnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)	104
<b>SI. 4.1</b>	Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja	110
<b>SI. 4.2</b>	Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) u y smjeru spajanja i b) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja	111
<b>SI. 4.3</b>	Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja i b) LN i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja	112
<b>SI. 4.4</b>	Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja	114

<b>SI. 4.5</b>	Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja	115
<b>SI. 4.6</b>	Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala), b) NN (naličje na naličje spajanog materijala), c) LN (lice na naličje spajanog materijala) i d) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja	117
<b>SI. 4.7</b>	Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti G/cN (°) <sup>-1</sup> , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta $\gamma = 0,5^\circ$ cN i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta $\gamma = 5^\circ$ cN spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih a) u x smjeru i b) u y smjeru	119
<b>SI. 4.8</b>	Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti G/cN (°) <sup>-1</sup> , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta $\gamma = 0,5^\circ$ cN i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta $\gamma = 5^\circ$ cN spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u y smjeru spajanja, b) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i c) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja	120
<b>SI. 4.9</b>	Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti G/cN (°) <sup>-1</sup> , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta $\gamma = 0,5^\circ$ cN i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta $\gamma = 5^\circ$ cN spojeva izrađenih primjenom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LN (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru spajanja, b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja, c) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i d) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja	121
<b>SI. 4.10</b>	Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti G/cN (°) <sup>-1</sup> , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta $\gamma = 0,5^\circ$ cN i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta $\gamma = 5^\circ$ cN spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja	123
<b>SI. 4.11</b>	Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti G/cN (°) <sup>-1</sup> , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta $\gamma = 0,5^\circ$ cN i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta $\gamma = 5^\circ$ cN spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru spajanja, b) LL (lice na lice spajanog materijala) u y	125

	smjeru spajanja, c) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i d) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja	
<b>SI. 4.12</b>	Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti $G/cN$ ( $^{\circ}$ ) <sup>-1</sup> , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$ i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta $\gamma = 5^{\circ}/cN$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru spajanja, b) y smjeru spajanja; NN (naličje na naličje spajanog materijala), c) x smjeru spajanja i d) y smjeru spajanja	127
<b>SI. 4.13</b>	Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti $G/cN$ ( $^{\circ}$ ) <sup>-1</sup> , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$ i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta $\gamma = 5^{\circ}/cN$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu materijala LN (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru spajanja, b) y smjeru spajanja, L1N1 (lice na naličje spajanog materijala), c) x smjeru spajanja i d) y smjeru spajanja	129
<b>SI. 4.14</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN$ cm <sup>2</sup> i histereze momenta savijanja 2HB/cN cm spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	131
<b>SI. 4.15</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN$ cm <sup>2</sup> i histereze momenta savijanja 2HB/cNcm spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	132
<b>SI. 4.16</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN$ cm <sup>2</sup> i histereze momenta savijanja 2HB/cNcm spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)	133
<b>SI. 4.17</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN$ cm <sup>2</sup> i histereze momenta savijanja 2HB/cNcm spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru, prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)	134
<b>SI. 4.18</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN$ cm <sup>2</sup> i histereze momenta savijanja 2HB/cNcm spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru, prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)	135
<b>SI. 4.19</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN$ cm <sup>2</sup> i histereze momenta savijanja 2HB/cNcm spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x smjeru, prema rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spajanog materijala)	136
<b>SI. 4.20</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN$ cm <sup>2</sup> i histereze momenta savijanja 2HB/cNcm spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x smjeru, prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)	136

<b>SI. 4.21</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cNcm$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	138
<b>SI. 4.22</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cNcm$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)	139
<b>SI. 4.23</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cNcm$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)	140
<b>SI. 4.24</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cNcm$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru; b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)	141
<b>SI. 4.25</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN \text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)	142
<b>SI. 4.26</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN \text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	143
<b>SI. 4.27</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN \text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	144
<b>SI. 4.28</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN \text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	145
<b>SI. 4.29</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN \text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	147
<b>SI. 4.30</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN \text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)	148
<b>SI. 4.31</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN \text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN \text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M13 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)	149

<b>SI. 4.32</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN\text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN\text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)	150
<b>SI. 4.33</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN\text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN\text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spajanog materijala)	151
<b>SI. 4.34</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN\text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN\text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru	152
<b>SI. 4.35</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN\text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN\text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala).	153
<b>SI. 4.36</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN\text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN\text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M13 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)	155
<b>SI. 4.37</b>	Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja $B/cN\text{ cm}^2$ i histereze momenta savijanja $2HB/cN\text{ cm}$ spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)	154
<b>SI. 4.38</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)	157
<b>SI. 4.39</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)	158
<b>SI. 4.40</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)	159
<b>SI. 4.41</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)	160

<b>SI. 4.42</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u x i y smjeru	162
<b>SI. 4.43</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)	163
<b>SI. 4.44</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)	164
<b>SI. 4.45</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)	165
<b>SI. 4.46</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)	166
<b>SI. 4.47</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x i y smjeru, LN i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)	167
<b>SI. 4.48</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10 spajanih u x i y smjeru	169
<b>SI. 4.49</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)	170
<b>SI. 4.50</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M13 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)	171
<b>SI. 4.51</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)	172



<b>SI. 4.52</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada $WC$ i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti $C$ i sposobnosti oporavka $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom oznake M14 spajanih u $x$ i $y$ smjeru, LN (lice na naličje spajanog materijala)	173
<b>SI. 4.53</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada $WC$ i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti $C$ i sposobnosti oporavka $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom oznake M10 spajanih u $x$ i $y$ smjeru	174
<b>SI. 4.54</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada $WC$ i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti $C$ i sposobnosti oporavka $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u $x$ i $y$ smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)	175
<b>SI. 4.55</b>	Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada $WC$ i debljina $h_0$ i $h_m$ i b) kompresibilnosti $C$ i sposobnosti oporavka $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M13 spajanih u $x$ i $y$ smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)	176
<b>SI. 4.56</b>	Mjerenje kompresijskih svojstava	177
<b>SI. 4.57</b>	Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i snage ultrazvučnog spajanja, $P_s/W$ na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) $x$ smjeru i b) $y$ smjeru spajanja	187
<b>SI. 4.58</b>	Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i snage ultrazvučnog spajanja, $P_s/W$ na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10 L1N1 u a) $x$ smjeru i b) $y$ smjeru	188
<b>SI. 4.59</b>	Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i snage ultrazvučnog spajanja, $P_s/W$ na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) $x$ smjeru i b) $y$ smjeru spajanja	189
<b>SI. 4.60</b>	Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i snage ultrazvučnog spajanja, $P_s/W$ na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u a) $x$ smjeru i b) $y$ smjeru spajanja	190
<b>SI. 4.61</b>	Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i snage ultrazvučnog spajanja, $P_s/W$ na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M12, spajanog na način a) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u $x$ i $y$ smjeru spajanja i b) LN i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u $x$ smjeru spajanja	191
<b>SI. 4.62</b>	Uzorak spoja nastalog ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M10, spajanog na način a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)	193

<b>SI. 4.63</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M10, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	197
<b>SI. 4.64</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M11, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	198
<b>SI. 4.65</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	199
<b>SI. 4.66</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	200
<b>SI. 4.67</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	201
<b>SI. 4.68</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	202
<b>SI. 4.69</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja	203
<b>SI.4.70</b>	Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakost anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznaka M11, spojenog na načain LN i L1N1 (lice na naličje spojenog materijala) u x i y smjeru spajanja	203
<b>SI. 4.71</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzina spajanja, v/m min <sup>-1</sup> i temperatura vrućeg klina, T/°C na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	207
<b>SI. 4.72</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzina spajanja, v/m min <sup>-1</sup> i temperatura vrućeg klina, T/°C na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru	208
<b>SI. 4.73</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzine spajanja, v/m min <sup>-1</sup> i temperature vrućeg klina, T/°C na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru	209
<b>SI. 4.74</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzine spajanja, v/m min <sup>-1</sup> i temperature vrućeg klina, T/°C na čvrstoću spoja $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M13, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	209

<b>SI. 4.75</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i temperature vrućeg klina, $T/^\circ\text{C}$ na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M14, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) i LN (lice na naličje spajanog materijala) spajanog u y smjeru	210
<b>SI. 4.76</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i temperature vrućeg zraka, $T/^\circ\text{C}$ na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	213
<b>SI. 4.77</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i temperature vrućeg zraka, $T/^\circ\text{C}$ na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	213
<b>SI. 4.78</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i temperature vrućeg zraka, $T/^\circ\text{C}$ na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	214
<b>SI. 4.79</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i temperature vrućeg zraka, $T/^\circ\text{C}$ na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M13, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	214
<b>SI. 4.80</b>	Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja, $v/m \text{ min}^{-1}$ i temperature vrućeg zraka, $T/^\circ\text{C}$ na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M14, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	215
<b>SI. 4.81</b>	Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda, $d_u/\text{mm}$ i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	219
<b>SI. 4.82</b>	Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda, $d_u/\text{mm}$ i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M12, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	220
<b>SI. 4.83</b>	Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda, $d_u/\text{mm}$ i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M13, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	220
<b>SI. 4.84</b>	Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda, $d_u/\text{mm}$ i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M14, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru	221

<b>SI. 4.85</b>	Ispitivanja na a) zrakonepropusnost spoja na uzorku materijala oznake M14 (TVZ), ispitivanja vodonepropusnosti spoja na uzorcima materijala oznaka, b) na uzorku materijala oznake M13 (UZV), c) na uzorku materijala oznake M11 (UZV) i d) na uzorku materijala oznake M11 (VF)	223
<b>SI. 4.86</b>	Prikaz izmjerenih vrijednosti debljinu izratka, debljina spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s gornje strane na uzorku materijala oznake M11, spajan na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru	230
<b>SI. 4.87</b>	Prikaz izmjerenih vrijednosti debljinu izratka, debljina spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s donje strane na uzorku materijala oznake M11, spajan na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru	230
<b>SI. 4.88</b>	Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljina spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s gornje strane na uzorku materijala oznake M12, spajan na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru	232
<b>SI. 4.89</b>	Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljinu spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s donje strane na uzorku materijala oznake M12, spajan na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru	232
<b>SI. 4.90</b>	Prikaz utjecaja gustoće energije po volumenu $E_v/W$ s $\text{cm}^{-3}$ na čvrstoću spoj $F_{\text{max}}/N$ kod ultrazvučnog spajanja a) uzorka materijala oznake M10 i b) uzorku materijala oznake M11	238
<b>SI. 4.91</b>	Prikaz utjecaja gustoće energije po volumenu $E_v/W$ s $\text{cm}^{-3}$ na čvrstoću spoj $F_{\text{max}}/N$ kod visokofrekventnog spajanja a) uzorka materijala oznake M10 i b) uzorku materijala oznake M11	239
<b>SI. 5.1</b>	Mjerenje smičnih svojstava a) Izgled uzorka materijala oznake M10 za vrijeme mjerenja smičnih svojstava; b) Vrijednosti mjerenja na uzorku materijala oznake M10 bez spoja u jednom sloju	245
<b>SI. 5.2</b>	Prikaz rezultata mjerenja savojnih svojstava spojeva na uzorku materijala oznake M10 spojenih visokofrekventnom tehnikom spajanja a) Spoja spajanog pri parametrima spajanja 5 s i 300 mA i b) Spoja spajanog pri parametrima spajanja 7 s i 300 mA.	251
<b>SI. 5.3</b>	Prikaz spoja na uzorku materijala oznake M13 spojenog toplinskom kondukcijom i istezanje materijala pri kraju spoja	258
<b>SI. 5.4</b>	Prikaz spoja na uzorku materijala oznake M10 spajanog toplinskom konvekcijom i odstupanje širine spoja na početku i na kraju spoja	259
<b>SI. 5.5</b>	Prikaz spojeva na uzorku materijala oznake M11 spajanih ultrazvučnom tehnikom spajanja a) Dobar spoj; b) Loš spoj (oštećenje materijala u zoni spoja); c) Loš spoj i oštećenja; d) Mikroskopske snimke spoja, prijelaz PU omekšanog nasloja u pletiva	268

## POPIS TABLICA

	Str.
Tab. 2.1 Prikaz pet temeljnih faza kod postupka ultrazvučnog spajanja termoplastičnog polimernog materijala	15
Tab. 2.2 Svojstva i oznake polimera koji se spajaju visokofrekventnom tehnikom	21
Tab. 2.3 Prikaz pet temeljnih faza procesa visokofrekventnog spajanja polimernog materijala	24
Tab. 2.4 Prikaz pet temeljnih faza procesa spajanja toplinskom kondukcijom	27
Tab. 2.5 Prikaz pet temeljnih faza procesa spajanja toplinskom konvekcijom	32
Tab. 2.6 Jačina povezanosti između varijabli u ovisnosti o apsolutnoj vrijednosti koeficijenta korelacije	52
Tab. 3.1 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M10	57
Tab. 3.2 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M11	58
Tab. 3.3 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M12	59
Tab. 3.4 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M13	60
Tab. 3.5 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M14	61
Tab. 3.6 Pregled parametara mehaničkih i fizikalnih svojstava, određenih pomoću KES-FB mjernog sustava	73
Tab. 3.7 Prikaz parametara spajanja ultrazvučnom tehnikom uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)	94
Tab. 3.8 Prikaz parametara spajanja visokofrekventnom tehnikom spajanja uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)	95
Tab. 3.9 Prikaz parametara spajanja toplinskom kondukcijom uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)	96
Tab. 3.10 Prikaz parametara spajanja toplinskom konvekcijom uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)	97
Tab. 3.11 Prikaz parametara spajanja kombiniranom tehnikom konvencionalnog šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom adhezivne trake po šavu uz ocjenu vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)	98
Tab. 3.12 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja	104
Tab. 3.13 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja	105
Tab. 3.14 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih spajanjem toplinskom kondukcijom	106

Tab. 3.15	Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih spajanjem toplinskom konvekcijom	107
Tab. 3.16	Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih spajanjem kombinacijom šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom, spajanjem adhezivne trake po šavu	108
Tab. 4.1	Rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M10	178
Tab. 4.2	Rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M11	180
Tab. 4.3	Rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M12	181
Tab. 4.4	Rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M13	182
Tab. 4.5	Rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M14	183
Tab. 4.6	Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12	185
Tab. 4.7	Prikaz rezultata statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebe ultrazvučne tehnike spajanja na uzorcima materijala oznaka M10 i M11	192
Tab. 4.8	Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12	195
Tab. 4.9	Prikaz rezultata statističke analize ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12	204
Tab. 4.10	Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih spajanjem toplinskom kondukcijom na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14	205
Tab. 4.11	Prikaz rezultata statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih spajanjem toplinskom kondukcijom na uzorku materijala M10	211
Tab. 4.12	Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih spajanjem toplinskom konvekcijom na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14	212

Tab. 4.13	Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom kombinacije tehnike šivanja i spajanja pomoću toplinskom konvekcijom na uzorcima materijala oznaka M11, M12, M13 i M14	216
Tab. 4.14	Prikaz rezultata statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom kombinacije tehnike šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom na uzorcima materijala oznaka M11, M12, M13 i M14	222
Tab. 4.15	Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih tehnikom ultrazvučnog spajanja	224
Tab. 4.16	Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih tehnikom visokofrekventnog (VF) spajanja	225
Tab. 4.17	Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih toplinskom kondukcijom	226
Tab. 4.18	Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih toplinskom konvekcijom	227
Tab. 4.19	Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih kombinacijom tehnike šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom	228
Tab. 4.20	Prikaz vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s gornje strane na uzorku materijala oznake M11, spojenog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja	229
Tab. 4.21	Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s donje strane na uzorku materijala oznake M11, spojenog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja	229
Tab. 4.22	Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj s gornje strane, na uzorku oznake M12, LN ((lice na naličje spajanog materijala), u x smjeru spajanja	231
Tab. 4.23	Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj s donje strane, na uzorku oznake M12, spojenog na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja	231
Tab. 4.24	Debljine uzoraka materijala (dva sloja) koji se spaja ultrazvučnom tehnikom spajanja	233
Tab. 4.25	Vrijednosti potrebne energije spajanja i gustoće energije po volumenu kod ultrazvučnog spajanja	234
Tab. 4.26	Izračun otpora (R) i napona (U) kod visokofrekventnog spajanja	235
Tab. 4.27	Vrijednosti električnog rada i gustoće energije po volumenu kod visokofrekventnog spajanja	236
Tab. 5.1	Kompresijska svojstva spojeva uzoraka materijala mjerena u dva sloja	253

Tab. 5.2	Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće uzoraka materijala oznaka M10, M11, M12, M13 i M14	266
Tab. 5.3	Prikaz rezultata mjerenja najveće vrijednosti čvrstoće spoja za svaku tehniku spajanja	266



## POPIS SIMBOLA

$\Delta K$	-	promjena zakrivljenosti u području između $\pm 0,5$ i $\pm 1,5$ $\text{cm}^{-1}$ (za stranu lica, odnosno naličja).
$\Delta l$	[mm]	promjena duljine uzorka tekstilnog materijala
$\Delta M$	[cN cm]	promjena momenta savijanja za jedinicu širine uzorka, cN cm
$\Delta \text{š}$	[mm]	promjena širine uzorka tekstilnog materijala
2HB	[cN cm]	histereza momenta savijanja
2HB <sub>b</sub>	[cN cm]	širina histereze momenta svijanja uzorka sa strane naličja
2HB <sub>f</sub>	[cN cm]	širina histereze momenta svijanja uzorka sa strane lica
A	-	aritmetička sredina
a	-	konstantan član u jednadžbi modela višestruke regresije
B	[cN cm <sup>2</sup> ]	krutost savijanja
b		regresijski koeficijent u jednadžbi modela višestruke regresije
B <sub>b</sub>	[cN cm <sup>2</sup> ]	krutost savijanja na jedinicu širine uzorka sa strane naličja
B <sub>f</sub>	[cN cm <sup>2</sup> ]	krutost savijanja na jedinicu širine uzorka sa strane lica
C	-	kompresibilnost
CV	[%]	koeficijent varijacije
D	[Cm]	dipolni moment
dh	[mm]	promjena debljine tkanine
d <sub>i</sub>	[mm]	debljina uzorka materijala
d <sub>m</sub>	[cm]	debljina dva sloja materijala
d <sub>r</sub>	[mm]	debljina istisnutog ruba
d <sub>s</sub>	[mm]	debljina u području spoja
d <sub>u</sub>	[mm]	duljina uboda
E	[Ws]	energija prilikom spajanja
E <sub>v</sub>	[Ws/cm <sup>3</sup> ]	gustoća energije po volumenu
F	[cN]	vlačna sila na jedinicu površine 1 cm uzorka
F'	[cN]	vlačna sila u procesu rasterećenja po jedinici površine
F' <sub>k</sub>	[cN]	kompresijska sila u procesu rasterećenja po jedinici površine, cN
F <sub>k</sub>	[cN]	kompresijska sila na jedinicu površine
F <sub>k</sub>	[cN]	kompresijska sila po jedinici površine
F <sub>max</sub>	[N]	čvrstoća spoja
h	[mm]	debljina kod kompresijskog opterećenja
h <sub>0</sub>	[mm]	debljina kod kompresijskog opterećenja od 0,490 cN cm <sup>-1</sup>
h <sub>01</sub>	[mm]	debljina istisnutog ruba prije prvog udubljenja
h <sub>2m</sub>	[cm]	debljina dva sloja materijala
h <sub>d1</sub>	[mm]	debljina spoja prije prvog izbočenja, donja strana
h <sub>d2</sub>	[mm]	debljina istisnutog ruba prvog izbočenja na spoju, donja strana
h <sub>d3</sub>	[mm]	debljina spoja nakon prvog izbočenja, donja strana

$h_{g1}$	[mm]	debljina spoja prije prvog izbočenja, gornja strana
$h_{g2}$	[mm]	debljina istisnutog ruba prvog izbočenja na spoju, gornja strana
$h_{g3}$	[mm]	debljina spoja nakon prvog izbočenja, gornja strana
$h_{g4}$	[mm]	debljina spoja prije drugog i izbočenja na spoju, gornja strana
$h_{g5}$	[mm]	debljina istisnutog ruba drugog izbočenja na spoju
$h_{g6}$	[mm]	debljina spoja nakon drugog izbočenja
$h_{g7}$	[mm]	debljina istisnutog ruba nakon trećeg udubljenja
$h_m$	[mm]	debljina kod kompresijskog opterećenja od $49,035 \text{ cN cm}^{-2}$
$h_s$	[mm]	debljina spoja, drugo udubljenje na spoju
$h_{s1}$	[mm]	debljina spoja, prvo udubljenje na spoju
$h_{s2}$	[mm]	debljina spoja, trećeg udubljenje na spoju
$I$	[A]	jakost anodne struje
$k$	-	konstanta proporcionalnosti kod kompresijskog opterećenja
$l_0$	[mm]	početna duljina uzorka tekstilnog materijala
$l_s$	[m]	duljina spoja
$n$	-	broj mjerenja
$N_m$	-	finoća igle
$P$	[W]	električna snaga
$P_s$	[W]	snaga ultrazvučnog generatora
$Q$	[C]	električni naboj
$r$	[m]	udaljenost između između pozitivnog i negativnog naboja
$R$	[ $\Omega$ ]	otpor
$r$	-	koeficijent regresije
$r^2$	-	koeficijent determinacije
RC	[%]	sposobnost oporavka,
RT	[%]	sposobnost oporavka
$r_x$	-	koeficijent korelacije za spojeve spajane u x (poprečnom) smjeru spajanja
$r_y$	-	koeficijent korelacije za spojeve spajane u y (uzdužnom) smjeru spajanja
$S$	[ $\text{cm}^2$ ]	površina gornje visokofrekventne elektrode
$S$	[ $\text{cm}^2$ ]	površina elektrode
$\dot{s}_0$	[mm]	početna širina tekstilnog materijala
$\dot{s}_s$	[cm]	širina sonotrode
$t$	[s]	vrijeme spajanja
$\text{tg}\vartheta$	[ $^\circ$ ]	tangens kuta nagiba krivulje momenta savijanja-zakrivljenosti M (K)
$U$	[V]	napon
$v$	[ $\text{mmmin}^{-1}$ ]	brzina spajanja
$W$	[Ws]	električni rad
WC	[ $\text{cN cm}$ ]	deformacijski rad po jedinici površine $\text{cm}^2$ uzorka

$WC'$	[cN cm]	oslobođena ili reverzibilna energija po jedinici površine
$WT$	[cN cm]	deformacijski rad odnosno energija potrebna za deformaciju
$WT'$	[cN cm]	oslobođena ili reverzibilna energija po jedinici površine
$X_i$	-	nezavisna varijabla u u jednadžbi modela višestruke regresije ( $X_i, i=1,2,\dots,k$ )
$x_i$	-	vrijednost mjerenja
$Y$	-	zavisna varijabla u jednadžbi modela višestruke regresije
$\hat{Y}$	-	model jednadžbe višestruke regresije
$\sigma$	-	standardna devijacija
$\sigma_M$	[N mm <sup>2</sup> ]	vlačna čvrstoća
$\varepsilon$	[mm]	deformacija odnosno produljenje pri djelovanju vlačne sile $F$
$\varepsilon_0$	[cm]	deformacija u procesu rasterećenja tekstilnog materijala
$\varepsilon_m$	[mm]	deformacija kod maksimalne vrijednosti vlačnog opterećenja, tj. kod $F_{m=490,35}$ cN
$\varepsilon_p$	-	poprečna deformacija
$\varepsilon_p$	[cm]	deformacija kod maksimalnog vlačnog opterećenja $F_m$
$\varepsilon_r$	[cm]	deformacija u procesu rasterećenja

## 1. UVOD

Suvremenu zaštitnu i inteligentnu odjeću nije moguće projektirati i izraditi bez primjene visokotehnoloških tehnika spajanja. Posebni tehničko-tehnološki izazov predstavljaju istraživanja primjene visokotehnoloških tehnika spajanja za dijelove zaštitne i inteligentne odjeće, istraživanje optimalnih procesnih parametara spajanja kao i svojstva tako izrađenih spojeva. Tijekom razvoja inteligentne odjeće s adaptivnom regulacijom termoizolacije u Zavodu za odjevnu tehnologiju, Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta, istraživački tim je utvrdio da inteligentnu odjeću nije moguće realizirati isključivo uporabom konvencionalnih tehnika spajanja korištenih u odjevnom inženjerstvu (Firšt Rogale i sur., 2010), te je stoga izrazito važno istraživati procesne parametre visokotehnoloških tehnika spajanja i svojstva takvih spojeva, osobito pri novim patentiranim rješenjima senzoričkih i aktuatorskih naprava u inteligentnoj odjeći (Rogale i sur., 2005, Rogale i sur., 2007).

Tehnike spajanja koje su korištene u eksperimentalnom dijelu doktorskog rada razlikuju se s aspekta dovođenja topline i/ili induciranja topline na površini materijala i/ili unutar materijala, time omekšavaju materijal, te se djelovanjem pritisne sile materijal spaja (Troughton, Argon, 2007; Bentar, 2003; Hollande et al., 1998; Campo, 2006).

Za izradu uzoraka korištene su tehnika ultrazvučnog spajanja, tehnika visokofrekventnog spajanja, tehnika spajanja toplinskom kondukcijom, tehnika spajanja toplinskom konvekcijom i kombinacija tehnike šivanja i tehnike spajanja toplinskom konvekcijom adhezivne trake po šavu. Kod svih tehnika spajanja pravilna provedba procesa najčešće ovisi o vrijednostima tri parametra, a to su temperatura/energija, ovisno o vrsti materijala, pritisnoj sili kojom se vrši pritisak na spoj i vrijeme kod stacionarnog spajanja tj. brzina spajanja kod dinamičkog spajanja.

Zaštitna i inteligentna odjeća iziskuje posebna svojstva spojeva/šavova jer takva odjeća ima i posebna svojstva štiteći ljudsko tijelo protiv hladnoće, zračenja, kemijskih i bojnih otrova kao i od vremenskih utjecaja (hladnoća, vjetar i padalina).

Na spojeve, koji imaju funkciju sastavljanja dijelova odjeće specifičnih namjena, postavljaju se određeni zahtjevi. Takvi odjevni predmeti izrađeni su od posebnih tekstilija, a da bi spojevi imali ista svojstva kao i tekstilija od koje se izrađuje potrebno je upotrijebiti optimalne parametre spajanja koji su primjereni za svaku tekstiliju i tehniku spajanja. Spojevi moraju zadovoljiti estetskim izgledom ali i ostala svojstva kao što su čvrstoća, zrakonepropusnost i/ili vodonepropusnost spoja se moraju postići. Upravo na temelju iznesenih zahtijeva kojima se

definiraju značajke spoja, razmatra se o načinu na koji je potrebno projektirati spoj i tehnici pomoću koje će spojiti zadani dijelovi.

Odabir procesnih parametara spajanja direktno utječe na kvalitetu i svojstva spoja. Potrebno je istražiti utjecaj pojedinog parametra, pomoću kojih će postići spoj zahtijevanih svojstava.

Analiza kvalitete spojeva, nastalih primjenom spomenutih tehnika spajanja do sad nisu bila sveobuhvatno istraživana. Dosadašnja, početna istraživanja jasno ukazuju da je objektivnim metodama mjerenja mehaničkih svojstava i izražavanje tih svojstava pomoću mehaničkih parametara, moguće egzaktno i znanstveno vrednovanje svojstava spojeva na tekstilnim materijalima od kojih se izrađuje zaštitna i inteligentna odjeća.

S obzirom na prikazanu problematiku cilj doktorskog rada je proučiti i istražiti optimalne parametre spajanja koji najpovoljnije utječu na svojstva i kvalitetu spoja. Svojstva koja su ispitivana i analizirana su vlačna, smična, savojna i kompresijska svojstva, zatim zrakonepropusnost, vodonepropusnost i debljina spoja. Upotrebom statističkih modela proučavan je odnos utjecaja parametara spajanja na čvrstoću spoja, te je utvrđeno koji parametar (ili oba parametra) značajnije utječe na vrijednosti čvrstoće spoja.

## 2. PREGLED TEMATIKE

U ovom poglavlju dat je prikaz tematike koja je bitna za razumijevanje i analizu svojstava spojeva postignutih pri spajanju visokotehnološkim tehnikama spajanja, a koji utječu na kvalitetu gotovih odjevnih predmeta. Opisane su tehnike spajanja uz shematski prikaz, opis načina rada i primjenu, te uloga procesnih parametara spajanja na kvalitetu spoja.

Također je dat osvrt na radove različitih autora, koji u svojim radovima istražuju spojeve koji se najčešće koriste na odjevnim predmetima specijalnih namjena.

### 2.1 Visokotehnološke tehnike spajanja i njihova primjena

Visokotehnološkim tehnikama spajanja spajaju se materijali koji imaju veliki udio termoplastičnog polimernog udjela u sastavu. Najčešće se spajaju termoplastični polimerni materijali koji zbog svojih svojstava utječu na dobru spojivost i pozitivnu ocjenu kvalitete spoja. Polimerni materijali su zbog svojih svojstava, mehaničkih i fizikalnih, bolji izbor u usporedbi s prirodnim materijalima npr. polimerni materijali imaju veću otpornost na koroziju, otpornost na povišene temperature, minimalnu adsorpciju vode, otpornost na habanje i mnogo drugih svojstava. Primjena visokotehnoloških tehnika spajanja u stalnom je porastu, zbog sve veće primjene umjetnih polimernih materijala u svim granama industrije, koje prati i razvoj nove opreme i strojeva za spajanje.

U odjevnoj industriji također se sve više primjenjuje spajanje krojnih dijelova upotrebom različitih nekonvencionalnih, visokotehnoloških tehnika spajanja (Rogale i Dragčević, 2002) Najčešće korišteni način spajanja dijelova odjeće je i dalje konvencionalnim šivanjem, iglom i koncem. Takav način spajanja krojnih dijelova ima nekoliko nedostataka npr. na mjestima proboja igle dolazi do oštećenja materijala, još veća oštećenja se javljaju pri velikim brzinama šivanja, zbog trenja dolazi do zagrijavanja igle, oštećenja konca i materijala, a moguća su i nabiranja materijala zbog neprilagođenih procesnih parametara šivanja (Vulkov, 2009). Samo šivanjem nije moguće postići spoj koji će imati svojstva zrakonepropusnosti, vodonepropusnosti, u tom slučaju za spajanje dijelova odjeće potrebna je upotreba visokotehnoloških tehnika spajanja, koje omogućuju postizanje spoja koji će zadovoljiti određene zahtjeve.

Zbog različitih tehnika spajanja termoplastičnih polimernih materijala razlikovati će se i strojevi i oprema koji se koriste u tu svrhu, a biti će potrebna i drugačija stručna znanja i

suradnja u tehničkoj pripremi proizvodnje kao i samo vođenje procesa proizvodnje (Rogale i Dragčević, 2002).

Svaka tehnika spajanja ima posebnu primjenu, način i proces spajanja. Izbor tehnike spajanja ovisi od vrste polimernog materijala koji je potrebno spojiti, od načina dovođenja i/ili iniciranja topline unutar materijala, do primjene optimalnih parametara koji rezultiraju zadovoljavajućom kvalitetom spoja. Postoji više od petnaest različitih, zasebno identificiranih tehnika spajanja polimernih materijala, a neke od njih se već dugi niz godina koriste u komercijalnoj praksi (Wise, 1999; Troughton, 2008; Park and Grewell, 2003). Spajanje je definirano prema njemačkoj normi DIN 1910, dio 3, te se u njoj spajanje definira kao spajanje plastomernih i fizikalno umreženih elastoplastomernih tvorevina pri djelovanju pritisne sile i topline uz ili bez primjene dodatnog materijala. Površine polimernog materijala koje se spajaju, zagrijavanjem moraju prijeći u kaplasto, elastoviskozno stanje i djelovanjem pritisne sile formira se homogeni spoj (Čatić, 2006). Spajanje se još opisuje kao postupak dobivanja trajno spojenih dijelova polimernih materijala koji se mogu postići bez nanošenja adheziva i drugih kemijskih produkata, kao što su ljepila i sl., na površinu materijala (Amanat et al., 2010).

Istraživanjem se utvrdilo da je upotreba jednolike količine energije na cijeloj duljini spoja kod procesa spajanja jedan od najbitnijih elemenata, te je od iznimne važnosti postići distribuciju jednolike gustoće energije u svakom segmentu spoja (Vujasinović and Rogale, 2013).

Tehnike spajanja koje se koriste za izradu spojeva razlikuju se s aspekta dovođenja i/ili iniciranja topline na mjestu spoja u termoplastičnom polimernom materijalu (Grewell i Bentar, 2007). Svi procesi spajanja mogu se podijeliti na dvije glavne skupine: unutarnje zagrijavanje (eng. *internal heating*) i površinsko zagrijavanje (eng. *external heating*), gdje se zagrijava samo površinski sloj ili više slojeva uzoraka materijala (Bentar, 2003a; Troughton, 2008; Ageorges et al., 2001; Petrie, 2015).

Prema tome tehnike spajanja mogu biti podijeljene prema sl. 2.1 na:

- Unutarnje zagrijavanje termoplastičnog polimernog materijala koje se ostvaruje djelovanjem mehaničkih titraja na termoplastični polimerni materijal, uslijed čega dolazi do pretvaranja mehaničke energije u toplinu. U zoni spoja dolazi do omekšavanja materijala i djelovanjem pritisne sile, formira se spoj. Na takvom procesu stvaranja topline zasniva se tehnika ultrazvučnog spajanja kod koje je potrebno pretvoriti mehanički rad u energiju da bi došlo do zagrijavanja termoplastičnog polimernog materijala na potrebnu temperaturu.

- Unutarnje zagrijavanje termoplastičnog polimernog materijala koje se ostvaruje djelovanjem visokofrekventnog izmjeničnog elektromagnetskog polja na termoplastični polimerni materijal uslijed čega započinje gibanje makromolekula te dolazi do stvaranja topline, a potom se na omekšani materijal djeluje pritiskom silom te nastaje spoj. Iniciranjem topline prilikom spajanja termoplastičnog polimernog materijala, očituje se promjenom faznog stanja, a mijenja se i njegova unutarnja energija. Na unutarnjem procesu zagrijavanja polimernog materijala i stvaranja topline u termoplastičnom polimernom materijalu zasniva se tehnika visokofrekventnog spajanja.
- Površinsko kontaktno zagrijavanje površine termoplastičnog polimernog materijala pomoću dovođenja topline putem kondukcije i djelovanja pritiskne sile na nastali spoj. Na takvoj tehnici spajanja se zasniva spajanje vrućim klinom.
- Površinsko beskontaktno zagrijavanje površine termoplastičnog polimernog materijala dovođenjem topline konvekcijom uz djelovanje pritiskne sile u području izvođenja spoja. Na takvoj tehnici spajanja temelji se tehnika spajanja vrućim zrakom (Bentar, 2003a).



**Sl. 2.1** Podjela tehnika spajanja prema načinu dovođenja i/ili induciranja topline u termoplastičnom polimernom materijalu

Prijenos topline i brzina zagrijavanja bitni su podatci o kojima ovisi trajanje ciklusa spajanja. Prema podjeli tehnika spajanja prikazane na sl. 2.1 koje se dijele prema načinu dovođenja



i/ili iniciranja topline, najbrži zagrijavanje i prijenos topline postiže se ultrazvučnom tehnikom spajanja, zatim nešto sporije zagrijavanje postiže se kod visokofrekventnog spajanja, a najsporije zagrijavanje, tj. najdulji ciklus postiže se spajanjem kondukcijom (vrućim klinom) i konvekcijom (vrućim zrakom) (Bentar, 2003a).

Sa stajališta strukture tehnološke operacije spajanja svaku od navedenih tehnika spajanja moguće je na temelju predhodno određenih parametara spajanja izvesti prema pet temeljnih faza:

- pozicioniranje materijala, tj. dovođenje termoplastičnog polimernog materijala u kontakt s dijelom stroja za spajanje,
- prijenos topline, ultrazvučne i visokofrekventne energije (induciranjem topline unutra volumena materijala (unutarnje zagrijavanje), kontaktnim ili bezkontaktnim površinskim zagrijavanjem slojeva materijala (kondukcijom i konvekcijom),
- spajanje omekšanih slojeva materijala djelovanjem pritisne sile na u zoni spajanja,
- intermolekularna difuzija termoplastičnog polimernog materijala i
- hlađenje te ponovna rekristalizacija omekšanog termoplastičnog polimernog materijala u zoni spoja (Benatar, 2003a).

Svaka temeljna faza uslijed procesa spajanja biti će opisana i shematski prikazana za svaku tehniku spajanja pojedinačno.

Kod odabira tehnike spajanja, veliku ulogu imaju vrste polimernog materijala i njihova međusobna kompatibilnost, ako se spaja više različitih materijala.

Jedna od bitnih značajki za primjenu polimernih materijala jest njihovo ponašanje pri zagrijavanju. S tim u vezi polimeri se općenito mogu svrstati u tri skupine:

- plastomeri ili kako ih se još naziva termoplasti (zagrijavanjem omekšavaju, tale se i hlađenjem očvršćuju)
- elastomeri (zagrijavanjem omekšaju, ali se ne tale)
- duromeri (zagrijavanjem ne mogu omekšati) (Amanat, 2010).

Uz navedene tri skupine pojavili su se elastoplastomeri koji prilikom zagrijavanja omekšavaju i tale se kao plastomeri ali imaju izraženo svojstvo elastičnosti poput elastomera (Čatić, 2006).








Termoplasti (termoplastični polimerni materijali) zagrijavanjem do temperature mekšanja ne mijenjaju kemijsku strukturu, pa je njihova prerada samo proces povratne promjene agregatnog stanja. Pri temperaturama omekšanja i taljenja, termoplasti se mogu po želji

oblikovati, a uzastopnim zagrijavanjem i hlađenjem mogu se ponavljati bez bitnih promjena temeljnih svojstava (Jovanović, 1997).

Kod termoplastičnih polimera koji su osjetljivi na porast temperature treba voditi računa da se pri višim temperaturama povećava deformabilnost i smanjuju mehanička svojstva. Najpoznatiji termoplastični polimeri su: polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinilklorid (PVC), politetrafluoretilen (PTFE), poliuretan (PU), poliamid (PA) i polietilentereftalat (PET).

Elastomeri, pak imaju sposobnost velikog reverzibilnog istezanja, taljivi su i topljivi materijali koji bubre (kaučuk i guma). U duromere koji imaju izraženo svojstvo mekšanja i taljenja samo u fazi prerade kada ih se oblikuje, spadaju i različite vrste smola. U konačnom obliku to su trodimenzijske, molekularno umrežene strukture, pa se zato zagrijavanjem na visoke temperature ne tale već se razaraju primarne kemijske veze i razgrađuje materijal.

Prema sastavu, polimerni materijali su homogeni i kompoziti (mješavine, smjese, punjeni i ojačavani), a prema stupnju uređenosti svoje strukture, oni su amorfni, kristalasti i kristalni. Dio plastomera je kristalast, dok su duromeri, elastomeri i dio plastomera amorfni. Strukture polimera prikazane su na sl. 2.2 (Čatić, 2006).

	PLASTOMERI			ELASTOMERI		DUROMERI	
	AMORFNI		KRISTALASTI	ELASTO-PLASTOMERI	UMREŽENI		
Građa molekule	linearna	linearna granata	linearna		rahlo umrežena		prostorno umrežena
Shematski prikaz strukture							
Strukturalna uređenost	amorfn		djelomice kristalna, anizotropna	djelomice kristalna, izotropna	amorfn do slabo sređena		amorfn

### SI. 2.2 Strukture polimera (Čatić, 2006)

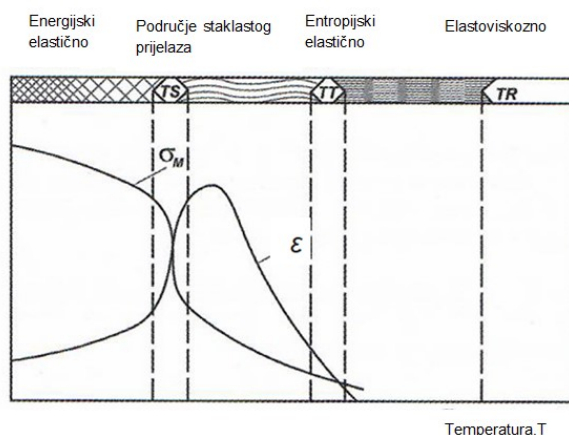
Za spajanje polimernih materijala korištenjem visokotehnoških tehnika spajanja najčešće se koriste termoplastični polimerni materijali. Sposobnost spajanja određenog termoplastičnog materijala ovisi o molekularnoj strukturi polimera. Ovisno o temperaturi koja se dovodi i/ili inicira u polimernom materijalu postoje tri stanja, staklasto, gumasto i kapljasto. Djelovanjem temperature dolazi do prijelaza iz jednog u drugo stanje, pa tako postoje temperaturna područja, koja se predočuju određenim temperaturama. Prijelaz iz staklastog u

gumasto stanje prikazuje se temperaturom staklišta ( $T_g$ ). Kod amorfni plastomera prijelaz iz gumastog u kapljasto stanje predočen je temperaturom tecišta ( $T_f$ ), a kod kristalastih plastomera taj prilaza stanja prikazuje temperatura tališta ( $T_t$ ). Stanja polimera odražavaju se na pokretljivost makromolekula. U staklastom stanju spriječeni su procesi promjene cijele makromolekule (makrobraunovo gibanje) i toplinsko gibanje dijelova lanaca u bočnih lanaca jedne makromolekule (mikrobraunovo gibanje). U gumastom stanju omogućeno je toplinsko gibanje dijela lanaca i bočnih lanaca jedne makromolekule (mikrobraunovo gibanje), dok u kapljastom stanju atomi ili molekule slobodno pokretljive. Djelovanjem intermolekularnih sila lanci makromolekula još su uvijek povezani, tako da dolazi do promjene mjesta cijele makromolekule i toplinskog gibanja segmenata lanaca i bočnih lanaca makromolekule. Promjena mjesta omogućena je oslobađanjem sekundarnih veza. Prijelazom temperature tecišta ( $T_f$ ) dolazimo u termoplastično područje u kojem se ostvaruje spajanje materijala i to prvenstveno kao rezultat intermolekularne difuzije i to samo dodirnih dijelova molekula. Dakle spajaju se oni termoplasti koji su sposobni da pri zagrijavanju prelaze u termoplastično stanje, pri kojem molekule polimera postižu sposobnost premještanja u pograničnim slojevima i difundiraju tako u plastični materijal.

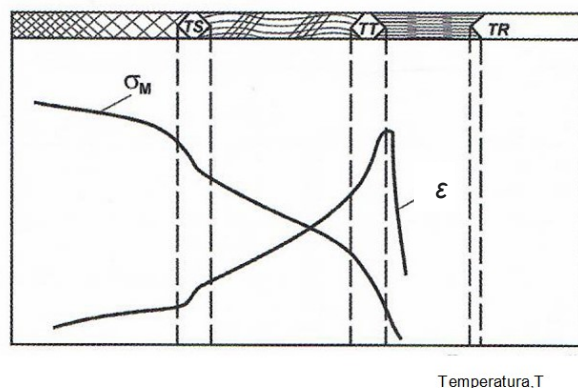
Ponašanje polimernih materijala za vrijeme spajanja, prikazuje promjenu stanja i mehaničkih svojstava, vlačne čvrstoće ( $\sigma_M$ ) i istežanja ( $\epsilon$ ), amorfni plastomera sl. 2.3 i kristalastih plastomera, sl. 2.4, kao funkciju temperature (Čatić, 2006).

Iz dijagrama se mogu se vidjeti pojedine faze koje se događaju za vrijeme procesa spajanja tj. dovođenja i/ili iniciranja topline kod amorfni i kristalastih plastomera.

Svojstva materijala nejednoliko se mijenjaju s promjenom temperature.



**Sl. 2.3** Dijagram stanja i mehaničkih svojstava amorfni plastomera u ovisnosti o temperaturi (Čatić, 2006)



**SI. 2.4** Dijagram stanja i mehaničkih svojstava kristalastih plastomera u ovisnosti o temperaturi (Čatić, 2006)

Općenito, primjenjivost određene tehnike spajanja povezana je s reologijom polimera. Visoka viskoznost omekšanog materijala otežava spajanje i smanjuje broj primjenjivih tehnika spajanja (Torres i Aragon, 2014).

Spajanje se mora izvoditi vrlo oprezno i mora se striktno pridržavati zadanih parametara, zato što se blizu temperature tečenja nalazi temperatura raspada ( $T_r$ ). To je temperatura kod koje dolazi do razaranja kemijskih veza tj. dolazi do raspada materijala.

Vrlo važno pri procesu spajanja koristiti optimalne parametre spajanja i voditi računa da u toku spajanja ne dođe do lokalnih pregrijavanja, što se očituje u stvaranju mjehurića, požutjelosti i znatnom sniženju čvrstoće. Stupanj raspada ovisi kako od temperature tako i od vremena djelovanja na materijal. Zato se kod spajanja mora omogućiti kratko zagrijavanje, kod kojeg temperatura zagrijavanja nikad ne smije prijeći vrijednost temperature raspada (Čatić, 2006).

Nakon zagrijavanja slijedi hlađenje na sobnoj temperaturi. Pojave i stanja koja se događaju tokom hlađenja su reverzibilne onim pojavama koje su se događale tokom spajanja tj. materijal prelazi preko svih navedenih stanja obrnutim putem, sve do krutog stanja (Bhudolia et al., 2020; Čatić, 2006; Villegas i Palardy, 2016). Tokom hlađenja postupno dolazi do uspostavljanja sekundarnih veza i lanci molekula ostaju u stanju kojeg su zauzeli nakon završnog hlađenja (Mitelea et al., 2009).

Termoplastični polimerni materija imaju sposobnost spajanja s više različitih tehnika spajanja. Kod spajanja dva ili više različita termoplastična polimerna materijala, potrebno je istražiti kojom od tehnika spajanja se oni mogu spojiti i pri kojim parametrima spajanja. Različiti termoplastični polimerni materijali da bi se mogli uspješno spojiti moraju zadovoljiti dva zahtjeva:

- moraju imati približno jednaku temperaturu omekšavanja, što je osnovni uvjet za uspješno spajanje dva ili više različita termoplastična materijala.
- moraju imati sličnu molekularnu strukturu (Shi i Littel, 2000).

Termoplastični polimerni materijali vrlo su otporni na oštećenja, imaju veliku čvrstoću na savijanje i mogućnost recikliranja. Iz tog razloga termoplastični polimerni materijali imaju dobra svojstva spojivosti za spajanje dva slična termoplastična kompozitna materijala ili termoplastičnog materijala s različitim materijalima (Bhudolia et al., 2020).

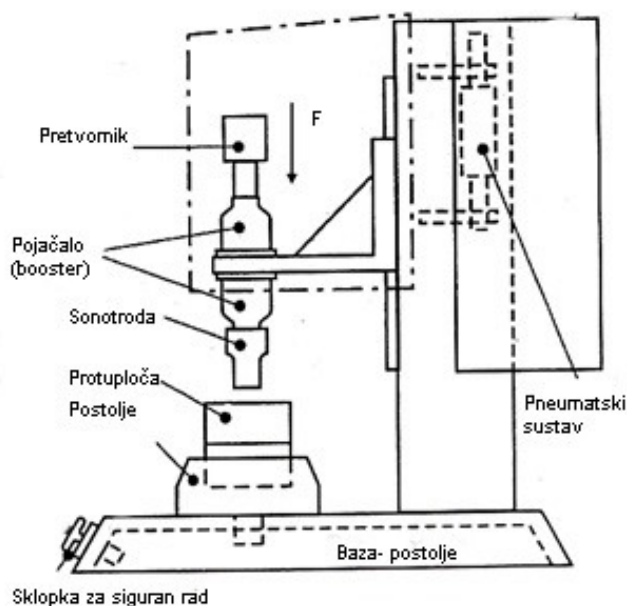
### 2.1.1. Ultrazvučno spajanje

Ultrazvučna tehnika spajanja zasniva se na principu unutarnjeg zagrijavanja polimernog materijala, uslijed čega dolazi do iniciranja topline unutar slojeva materijala, djelovanjem ultrazvučne energije titraja, dolazi do međumolekularnog trenja (Bentar, 2003b). Na mjestu djelovanja ultrazvučne energije, u zoni spoja, dolazi do omekšavanja svih slojeva materijala počevši od prvog sloja koji je u dodiru s sonotrodom, pa sve do posljednjeg sloja koji sudjeluje u formiranju spoja, (Agegores, 2001). Uslijed zagrijavanja materijala dolazi do miješanja rastaljenog polimernog materijala koje je uvjetovano gibanjem dodirne površine sonotrode u pravcu gore-dolje. Kod odabira polimernih materijala za spajanje vrlo važan utjecaj ima svojstvo spojivosti materijala i međusobne kompatibilnosti s drugim materijalima koji sudjeluju u formiranju spoja (Villegas i Palardy, 2016). Za postizanje visokokvalitetnog spoja potrebno je zagrijati jedan ili više slojeva istih ili različitih materijala na temperaturu koja osigurava prelazak u elastoviskozno stanje u zoni spoja. Sposobnost spajanja polimernih materijala ne ovisi samo o vrijednosti topline inicirane u zoni spajanja već i o svojstvima polimernih materijala koji se spajaju. Važan utjecaj koji osigurava pretvaranje mehaničke energije u toplinsku energiju je definiranje količine energije koja je potrebna da se polimerni materijal dovede do temperature omekšavanja (Gutnik et al., 2002; Li et al., 2004). Za postizanje kvalitetnog spoja potrebno je dovesti određenu količinu energije (Vujasinović i Rogale, 2013), stoga je vrlo bitno poznavanje molekularne strukture polimernog materijala da ne bi došlo do oštećenja materijala ili pak do smanjene čvrstoće spoja (Suresh et al., 2007). Tehnika ultrazvučnog spajanja ima vrlo dobru primjenu kod spajanja različitih termoplastičnih polimernih materijala koji čine spoj, a da se pritom ne dovodi u pitanje kvaliteta spoja i mehanička svojstva spoja (Bhudolia et al., 2020).

Kod spajanja termoplastičnih polimernih materijala upotrebom ultrazvučne energije ne primjenjuju se otapala, niti adhezivi, a automatizacijom procesa spajanja, povećava se kvaliteta spojeva i produktivnost procesa (Khmelev et al., 2007; Villegas i Bersee, 2010).

Na sl. 2.5 prikazan je shematski prikaz stroja za ultrazvučno spajanje sa svim svojim dijelovima. Unutar kućišta stroja nalazi se ultrazvučni sustav koji se sastoji se od nekoliko glavnih komponenta koje su zadužene za stvaranje, pojačavanje i prenošenje ultrazvučnih titraja, a to su:

- ultrazvučni generator,
- ultrazvučni pretvornik,
- ultrazvučno pojačalo (eng. booster)
- sonotroda (Troughton, 2008; Kumar, 2013).



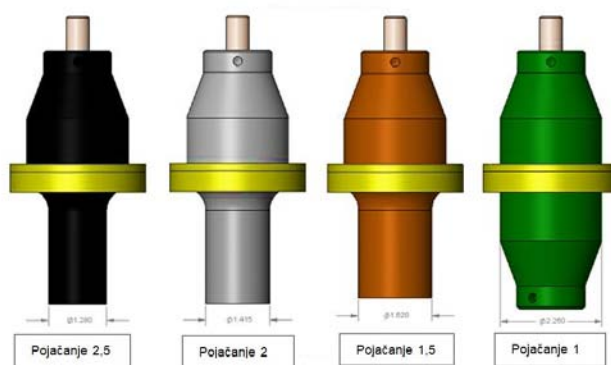
**Sl. 2.5** Shematski prikaz dijelova stroja kod ultrazvučnog spajanja (Troughton, 2008).

Ultrazvučni generator pretvara mrežni napon frekvencije 50-60 Hz u električni signal frekvencije najčešće od 18-40 kHz. Ova frekvencija nalazi se izvan ljudskog područja čujnosti u ultrazvučnom području. Ultrazvučni pretvornik nadalje pretvara električni signal u mehaničke titraje korištene u procesu spajanja (Firšt Rogale i sur., 2014; Grewel et al., 2003; Knorre, 2004).

Ultrazvučno pojačalo je dio ultrazvučnog sustava, postavljen između ultrazvučnog pretvornika i sonotrode. Njegova funkcija je da poveća amplitudu ultrazvučnih titraja s

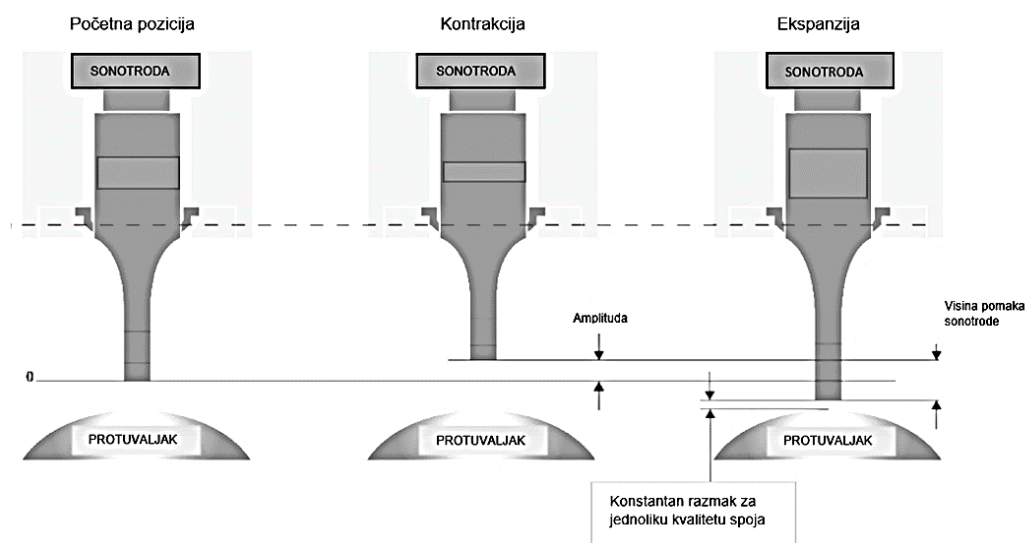
ultrazvučnog pretvornika i prenosi ih na sonotrodu. Ultrazvučno pojačalo tada mijenja amplitudu s različitim faktorima povećanja, čije vrijednosti su veće od 1. Amplituda koja je dobivena nakon povećanja s vrijednošću faktora na ultrazvučnom pojačalu većim od 1 iznosi oko 20  $\mu\text{m}$  (Grewel et al., 2003; Kumar, 2013; Bhudolia et al., 2020). Na sl. 2.6 prikaz je nekoliko vrsta ultrazvučnih pojačala.

Sonotroda ima funkciju da poveća amplitudu ultrazvučnog titraja, prenosi ultrazvučne titraje na površinu materijala uslijed procesa spajanja, vrši pritisak na materijal ali izvodi i transport materijala zajedno s protuvaljkom ukoliko je spajanje kontinuirano (Firšt Rogale i sur., 2014). Amplituda sonotrode je određena gibanjem sonotrode (visinom pomaka sonotrode prilikom gibanja gore-dolje) koje se prenosi na površinu materijala od njezine najveće vrijednosti pa do najmanje vrijednosti pomaka (*eng. Peak-to-peak*).



SI. 2.6 Ultrazvučna pojačala s različitim vrijednostima faktora pojačanja (www.afmeng.com)

Na sl. 2.7 prikaz je pomaka, tj. titraja sonotrode iz nultog položaja, kontrakcije (skraćenja) i ekspanzije (produljenja). Kod ekspanzije sonotrode, kada je sonotroda u donjem položaju prilikom gibanja gore-dolje, potrebno je osigurati konstantan razmak između sonotrode i protuvaljaka radi jednolike kvalitete spoja (Grewell i Bentar, 2007). Vrijednosti krajnjih točaka (*peak-to-peak*) amplitude iznosi oko 20 do 25  $\mu\text{m}$ , a to je zapravo udaljenost kojim se giba pretvornik gore-dolje za vrijeme mehaničkih titraja (Grewell, Bentar i Park, 2003). Odabirom oblika sonotrode može se utjecati na vrijednost amplitude, a time i na kvalitetu spoja (Grewel i Bentar, 2007). Materijali od kojeg se izrađuje sonotroda su titan, nehrđajući čelik ili aluminijaska bronca (Kumar, 2013).



**Sl. 2.7** Prikaz pomaka sonotrode gore-dolje za vrijeme ultrazvučnog spajanja (www.hermannultrasonics.com)

Gravurni protuvaljak ima zadaću pridržavanja materijala na koji se dovodi sonotroda, transport materijala za vrijeme spajanja koji obavlja zajedno sa sonotrodom i pomoćnim transportnim valjcima, te ostavljanje otiska na omekšanom materijalu (Rogale et al., 2012). Oblik i vrsta spoja ovise o gravuri na protuvaljku, tako spoj može biti kontinuirani linijski, cik-cak, točkasti, isprekidani (Vujasivović i Rogale, 2013), a može se na gravurnom protuvaljku ugravirati logotip proizvođača odjevnog artikla. Promjenom gravurnog protuvaljka može se osim na estetski izgled i oblik spoja utjecati i na njegova svojstva kao što su vodonepropustnost, zrakonepropusnost, elastičnost (Vujasinović i Rogale, 2013) i čvrstoću spoja (Bhudolia et al., 2020).

U tab. 2.1 opisano je i shematski prikazano pet temeljnih faza postupka ultrazvučnog spajanja dva sloja polimernog materijala.

Svojstva spojivosti termoplastičnih materijala, oblik i dimenzija spoja, zahtjevi koji se postavljaju na spoj i na gotov proizvod, vrlo su bitni za određivanje optimalnih procesnih parametara kod ultrazvučnog spajanja. Osnovni parametri ultrazvučnog spajanja su oni koji određuju odnos između mehaničke energije titranja, koja se pretvara u toplinsku energiju, i vremena djelovanje mehaničkih titraja određene amplitude u zoni spajanja termoplastičnog polimernog materijala.

Parametri ultrazvučnog spajanja su amplituda titraja na vrhu sonotrode, frekvencija mehaničkih titraja, vrijeme izlaganja polimernog materijala mehaničkim titrajima, tj. vrijeme spajanja i pritisna sila koja djeluje na uzorak materijal u zoni spajanja (Bhudolia et al., 2020). Pomoćni parametri obuhvaćaju parametre koji se odnose na sam režim spajanja, oni na neki



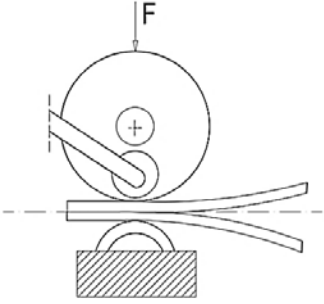
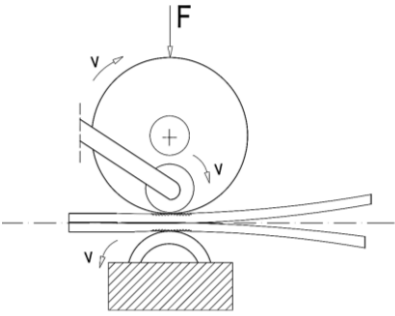
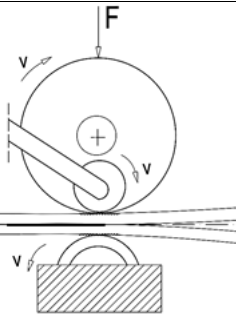
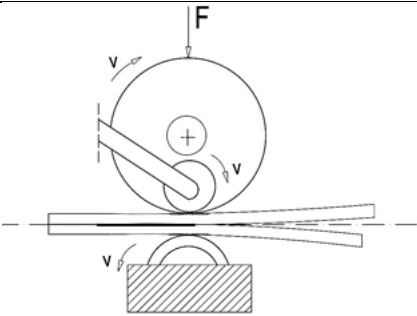
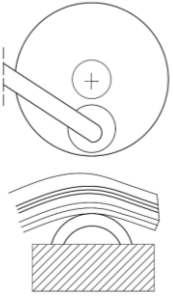
način određuju vrijednost osnovnih parametara i imaju sekundarni efekt na kvalitetu spoja. U pomoćne parametre ubrajaju se oblik, veličina i materijal od kojeg je izrađena sonotroda i protuvaljak (Gutnik et al., 2002; Khmelev et al., 2007).

Kod ultrazvučnog spajanja, amplituda ultrazvučnih titraja se podešava prije procesa spajanja i održava se konstantnom za vrijeme procesa spajanja. U većini ultrazvučnih procesa spajanja, pritisna sila je relativno jednolika ili malo opada za vrijeme procesa spajanja. Razlog tomu je što termoplastični materijali za vrijeme procesa ultrazvučnog spajanja prolaze kroz nekoliko temperaturnih stanja, pa zbog zagrijavanja materijala može doći i do malih varijacija u debljini materijala (Grewell i Bentar, 2007). Vrijednosti procesnih parametara koji utječu na temperaturu omekšavanja polimera su djelovanje pritisne sile, vrijeme odnosno brzina spajanja (Gutnik et al., 2002) ali i oblik protuvaljka (Rogale et al., 2022).

Povećanjem djelovanja pritisne sile na materijal za vrijeme ultrazvučnog spajanja dolazi do promjene i ostalih parametara. Skraćuje se vrijeme spajanja, te je potrebno manje energija da se postigne temperatura omekšavanja u zoni spoja, a opada vrijednost čvrstoće spoja (Vulkov, 2009).

Količina pritisne sile, kojom se djeluje, utječe na prijenos i količinu ultrazvučne energije koja se dovodi na materijal u zoni spajanja. Kod ultrazvučnog spajanja bolji prijenos ultrazvučne energije postiže se kada površina protuvaljka ima izbočenja, u smislu ugraviranih točaka, linija, natpisa i sl., nego kada je površina glatka, što utječe i na svojstva i kvalitetu gotovog spojnog dijela (Potente, 1984; Shi i Littel, 2000; Zhang et al., 2021). Analizom rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva utvrđeno je da primjenom veće vrijednosti pritisne sile za vrijeme ultrazvučnog spajanja, postižu se spojevi s velikom čvrstoćom, ali samo do određene vrijednosti pritisne sile, nakon toga čvrstoća počinje opadati, a javljaju se i oštećenja na spoju. Slični rezultati dobiveni su s povećanjem vremena spajanja tj. smanjenja brzine spajanja, povećava se i čvrstoća spoja, ali svakako treba pripaziti na oštećenje koja mogu nastati pri odabranim parametrima spajanja (Shi i Littel, 2000). Također s povećanjem amplitude titraja, povećava se i čvrstoća do maksimalne vrijednosti, nakon koje počinje opadati. Uspoređujući utjecaj sva tri parametra (pritisna sila, vrijeme i amplituda titraja) na čvrstoću spoja, autori Shi, W. i Littel, T. u svom radu došli su do zaključka da amplituda titraja ima najveći utjecaj na čvrstoću spoja, te da je amplituda titraja najznačajniji parametar kojim se može utjecati na čvrstoću spoja i njegova svojstva (Shi i Littel, 2000).

Tab. 2.1 Prikaz pet temeljnih faza kod postupka ultrazvučnog spajanja termoplastičnog polimernog materijala (Grewel i Bentar, 2007; Levy, 2011; Villegas i Bersee, 2010).

1. faza	Dovođenje dva ili više slojeva materijala u radnu zonu i pozicioniranje materijala. Nakon toga se spušta sonotroda u donji položaj, uslijed čega dolazi do kontakta s materijalom.	
2. faza	Sonotroda djeluje okomito na materijal i dovodi ultrazvučne mehaničke titraje određene amplitude koji djeluju u zoni spajanja određeno vrijeme. Mehanički titraji prenose se kroz sve slojeve materijala, izazivajući trenje unutar strukture materijala, a time i iniciranja topline.	
3. faza	Iniciranjem topline unutar strukture materijala dolazi do zagrijavanja materijala na temperaturu omekšavanja.	
4. faza	Sonotroda vrši pritisak omekšanog materijala na gravurni protuvaljak i time se ostvaruju spajanje materijala tj. formiranje spoja. Oblik spoja ovisi o gravuri na gravurnom protuvaljku.	
5. faza	Hlađenje materijala tj. mjesta spajanja uslijed čega se ponovo stvaraju međumolekularne veze, koje su u procesu omekšavanja bile raskinute. Formiranje trajnog spoja.	

Povećanjem djelovanja pritisne sile na materijal za vrijeme ultrazvučnog spajanja dolazi do promjene i ostalih parametara. Skraćuje se vrijeme spajanja, te je potrebno manje energija da se postigne temperatura omekšavanja u zoni spoja, a opada vrijednost čvrstoće spoja (Vulkov, 2009).

Količina pritisne sile, kojom se djeluje, utječe na prijenos i količinu ultrazvučne energije koja se dovodi na materijal u zoni spajanja. Kod ultrazvučnog spajanja bolji prijenos ultrazvučne energije postiže se kada površina protuvaljka ima izbočenja, u smislu ugraviranih točaka, linija, natpisa i sl., nego kada je površina glatka, što utječe i na svojstva i kvalitetu gotovog spojnog dijela (Potente, 1984; Shi i Littell, 2000; Zhang et al., 2021). Analizom rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva utvrđeno je da primjenom veće vrijednosti pritisne sile za vrijeme ultrazvučnog spajanja, postižu se spojevi s velikom čvrstoćom, ali samo do određene vrijednosti pritisne sile, nakon toga čvrstoća počinje opadati, a javljaju se i oštećenja na spoju. Slični rezultati dobiveni su s povećanjem vremena spajanja tj. smanjenja brzine spajanja, povećava se i čvrstoća spoja, ali svakako treba pripaziti na oštećenje koja mogu nastati pri odabranim parametrima spajanja (Shi i Littell, 2000). Također s povećanjem amplitude titraja, povećava se i čvrstoća do maksimalne vrijednosti, nakon koje počinje opadati. Uspoređujući utjecaj sva tri parametra (pritisna sila, vrijeme i amplituda titraja) na čvrstoću spoja, autori Shi, W. i Littell, T. u svom radu došli su do zaključka da amplituda titraja ima najveći utjecaj na čvrstoću spoja, te da je amplituda titraja najznačajniji parametar kojim se može utjecati na čvrstoću spoja i njegova svojstva (Shi i Littell, 2000).

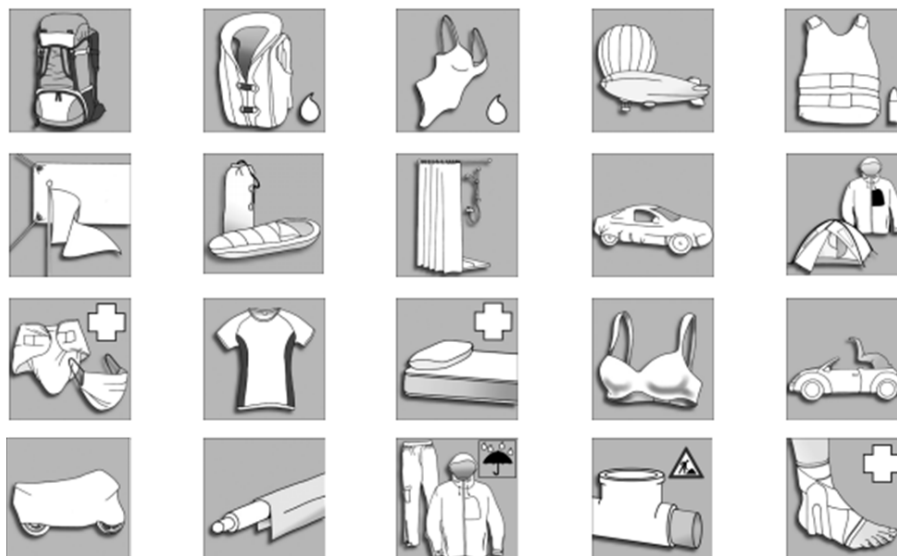
Mnogi znanstvenici proučavaju mehanizam zagrijavanja tj. dovođenja/iniciranja topline i svojstva spojeva kod ultrazvučnog spajanja. U početku se pretpostavljalo da je zagrijavanje tj. iniciranje topline za vrijeme ultrazvučnog spajanja izazvano trenjem kontaktnih površina. Eksperimentalni rezultati pokazuju da glavni faktor zagrijavanja pri ultrazvučnom spajanju nije trenje između dvije kontaktne površine uzoraka materijala već viskoelastično ponašanje termoplastičnog polimernog materijala (Palardy et al., 2018). Do sada su mnogi istraživači potvrdili da mehanizam zagrijavanja kod ultrazvučnog spajanja se može objasniti viskoelastičnom disipacijom topline u polimeru. Zbog velike brzine spajanja te male kontaktne površine između sonotrode i materijala vrlo je teško promatrati i procijeniti temperaturno područje i proces omekšavanja materijala u zoni spajanja, koristeći se pritom postojećim tehnikama (Zhang et al., 2010). Grupa autora istraživanjem je došla do zaključka da se za vrijeme ultrazvučnog spajanja, zagrijavanje materijala moguće precizno mjeriti samo na površini materijala, a za proučavanje prijenosa topline kroz slojeve materijala potrebno je izraditi numerički model (Levy et al., 2011).

Autori Tolunay, M. N., Dawson, P. R. i Wang, K. K. eksperimentalno su proučavali mehanizam zagrijavanja materijala prilikom ultrazvučnog spajanja. Spajali su polistiren pri različitim vrijednostima ultrazvučnih parametara, te su mjerili temperaturu pomoću temperaturnih senzora na površini i unutar slojeva materijala. Istodobno su mjerili i ulazne parametre: snagu, brzinu i amplitudu titraja. Brzina zagrijavanja materijala na površini najveća je na početku ciklusa spajanja, ali značajno usporava kad se postigne temperatura od 250 °C (temperatura staklišta za polistiren) na površini materijala. Temperatura u unutrašnjosti između slojeva počinje rasti kad je materijal zagrijan do temperature staklišta. Povećanjem temperature postiže se veća intermolekularna pokretljivost polimernih lanaca, dolazi do zapletanja lanaca i to oni koji su udaljeniji od površine materijala, tj. onih koji su udaljeniji od djelovanja sonotrode (Tolunay et al., 1983). Na uzorcima spojeva ispitivana je čvrstoća i mjerenja su kompresijska svojstva spoja. Utvrdili su da čvrstoća spoja ovisi o količini inicirane topline i stupnju omekšanja materijala koji je istisnut iz zone spajanja.

Strojevi za ultrazvučno spajanje mogu se podijeliti na kontinuirane i diskontinuirane. Diskontinuirano ultrazvučno spajanje pogodno je za točkaste spojeve, ravne spojeve različitih debljina kontura. Ultrazvučni strojevi za kontinuirano spajanje, koriste se za duge spojeve i dijele se prema stupnju mehanizacije, prema metodi transporta materijala i prema količini dovedene energije (Vulkov, 2009).

Ultrazvučno spajanje ima široku primjenu u više industrijskih grana, ali ima i veliku primjenu u odjevnoj industriji, sl. 2.8, zbog mogućnosti izrade dugih spojeva primjenom kontinuiranog spajanja.

Ultrazvučno spajanje se u odjevnom inženjerstvu može koristiti za spajanje, rezanje, izradu i oblikovanje rupa, reljefnog utiskivanja i ukrašavanja ukrasnim elementima na polimernim materijalima koji mogu biti u tkanoj ili pletenoj formi, u formi netkanog tekstila ili folija, stoga ultrazvučna tehnika predstavlja vrlo dobru alternativu konvencionalnim tehnikama rezanja i spajanja (Nikolić i sur., 2007).



SI. 2.8 Primjena ultrazvučnog spajanja ([www.pfaff.com](http://www.pfaff.com))

Prednosti ultrazvučnog spajanja su:

- velika čvrstoća spoja
- postojanost spojeva i otpornost na otapala
- minimalna oštećenja na površini spoja koja se javljaju uslijed primjene neadekvatnih procesnih parametara spajanja
- kratko vrijeme izvođenja spajanja, primjena u proizvodnji velikih serija i mogućnost automatizacije procesa
- spajanje se odvija bez korištenja drugih supstanci npr. termoplastične vrpce, lijepila i dr.
- lokalizirano zagrijavanje materijala u zoni spoja (Grewell et al., 2003; Villegas i Bersee, 2010; Bhudolia et al., 2020).

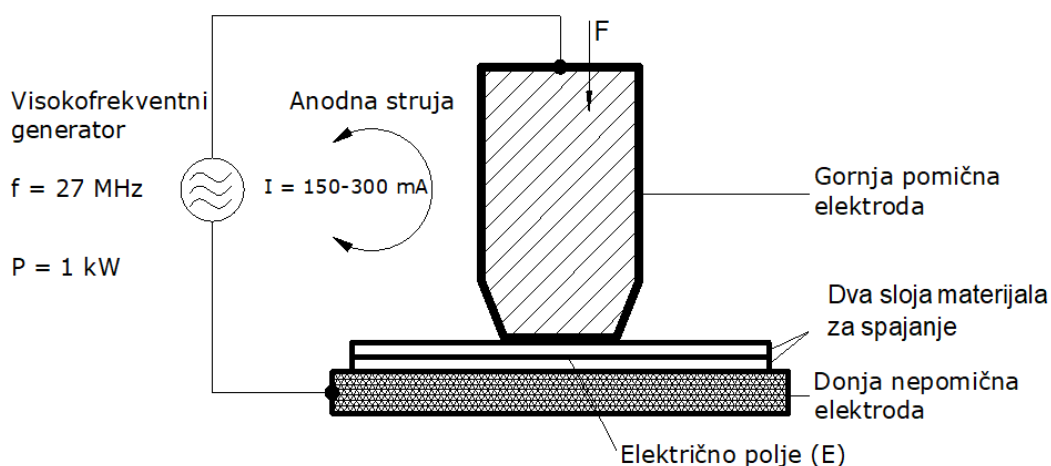
Nedostatci ultrazvučnog spajanja su:

- nemogućnost postizanja kvalitetnih spojeva kod spajanja debljih materijala (bolje opremljeni strojevi za ultrazvučno spajanje mogu spajati materijale do maksimalne debljine od 3 mm)
- nemogućnost spajanja tvrdih i krutih materijala zbog otežanog prijenosa titraja i iniciranja topline kroz slojeve materijala ne postiže se temperatura na kojoj slojevi materijala omekšaju (Bhudolia et al., 2020).

### 2.1.2. Visokofrekventno spajanje

Visokofrekventno spajanje zasniva se na procesu unutarnjeg zagrijavanja termoplastičnog polimernog materijala koje nastaje uslijed međusobnog trenja čestica u električnom polju između elektrode i protuelektrode, na kojeg djeluje visokofrekventni generator.

Strojevi za visokofrekventno spajanje su prilagođeni specifičnoj tehnici koja se koristi za spajanje polimernih materijala prema shematskom prikazu na sl. 2.9. Materijal za spajanje postavlja se između elektroda priključenih na visokofrekventni generator. Djelovanjem visokofrekventnog generatora javlja se toplina u spajanom polimernom materijalu, koji se nalazi između dviju elektrode, a potom se djelovanjem pritiskne sile omekšani slojevi materijala spajaju (Rogale et al., 2011a).



**Sl. 2.9** Shematski prikaz visokofrekventnog spajanja (Rogale et al, 2011a)

Razlog pojave topline u polimernom materijalu je što se materijal za spajanje sastoji od makromolekula s izraženom polarizacijom tako da na nekim svojim dijelovima ima izražene električne naboje. Dipolarne molekule u električnom polju orijentiraju se spram silnica tog polja tako da se pozitivna strana dipola okreće prema negativnom naboju u električnom polju i obrnuto, negativna strana dipola okreće prema pozitivnom naboju u električnom polju, te dolazi do gibanja molekula (Rogale et al., 2011a).

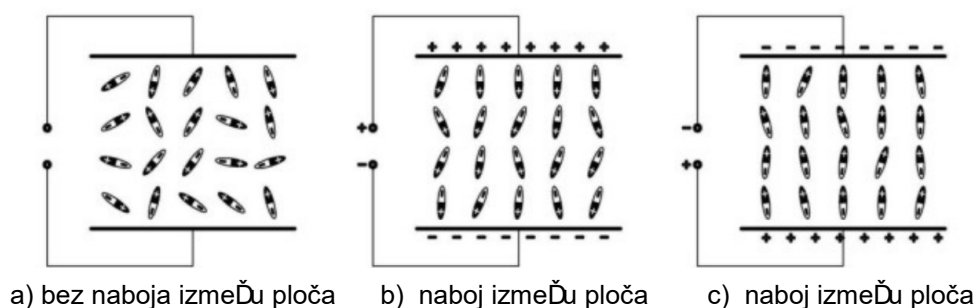
Mijenjanjem smjera silnica započinje i promjena položaja polarizirane molekule. Ukoliko se postigne dovoljno brza promjena električnog polja te orijentacija molekula postaje dovoljno

brza, dolazi do pojave disipacije topline unutar materijala koji se nalazi u promjenjivom električkom polju (Rogale et al., 2011a). Gibanje molekula dva identična ili različita polimerna materijala, uzrokuje zagrijavanje strukture materijala, povećanu pokretljivost polimernih lanca i omekšavanje. Polimerni lanci spajanih slojeva materijala prodiru jedan u drugoga, miješaju se, isprepliću, te dolazi do stvaranja spoja (Torres i Aragon, 2014).

Spajanje polimernih materijala strujama visoke frekvencije ostvaruje se zbog pretvorbe električne energije u toplinsku unutar samog materijala. Dakle, struja visoke frekvencije dovodi se visokofrekventnim elektrodama i polarizira molekule polimernih materijala što rezultira iniciranjem topline. Dielektrični materijali imaju polarnu molekularnu strukturu, jedna strana molekule je pozitivno nabijena, dok je druga strana negativno nabijena (-Q ili +Q), a dipolni moment (D) takve molekule proporcionalan je s njihovom udaljenošću (r) što je prikazano izrazom (2.1):

$$D = Q \cdot r \quad (2.1)$$

Udaljenost između naboja molekule određena je kemijskom vezom i nastoji biti konstantna, ali molekule mogu rotirati i vibrirati. Kada dielektrični materijal nije izložen vanjskom električnom polju molekule su nasumično orijentirane u prostoru te je materijal mikroskopski gledano električki neutralan (a). Kada je dielektrični materijal izložen električnom polju dipolne molekule imaju tendenciju da se poravnaju (b i c), polariziraju u električnom polju, sl. 2.10 (Čebular et al., 2011).



**Sl. 2.10** Prikaz polarizacije dipolne molekule (Čebular et al., 2011)

Ovom tehnikom spajanja nije moguće spajati sve vrste polimernih materijala. Polimerni materijali koji se spajaju ovom tehnikom su: PVC (polivinil-klorid), PA (poliamid), PU (poliuretan), PET (polietilentereftalat), EVA (etilen vinil acetat) i PEVA (polietilen vinil acetat). Polimerni materijali koji se ne mogu spajati ovom tehnikom su: PTFE (politetrafluoretilen), PS (polistiren), PP (polipropilen), PE (polietilen) i acetat. Ovi materijali imaju vrlo visoku temperaturu omekšavanja (Troughton, 2008).

Za spajanje polimernih materijala visokofrekventnom tehnikom spajanja važno poznavati sposobnost spojivosti materijala, ovo svojstvo ovisi uglavnom o molekularnoj strukturi unutar polimernog materijala (Mitelea et al., 2009), ali i o svojstvu dielektičnosti. Svojstva polimernih materijala koji se najčešće koriste kod visokofrekventnog spajanja prikazani su u tab 2.2 (Grewell i Benatar, 2007).

Tab.2.2 Svojstva i oznake polimera koji se spajaju visokofrekventnom tehnikom

Oznaka	Čvrstoća (MPa)	Produljenje (%)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Toplinska vodljivost (W/mK)	Dielektrični faktor tg δ	Dielektrična konstanta ε
PA Poliamid	800	50-130	1120	0,18-0,21	$2 \times 10^{-2}$	3,5
PEHD polietilen visoke gustoće	350	200-1000	950	0,33-0,44	$5 \times 10^{-4}$	2,3
PELD polietilen niske gustoće	150	300-1000	920	0,28-0,30	$3 \times 10^{-4}$	2,3
PP polipropilen	350	700-800	905	0,19-0,22	$6 \times 10^{-4}$	2,2
PVC M Polivinilklorid meki	200	100-400	1350	0,13-0,15	$1 \times 10^{-2}$	3

Jednoliko omekšavanje polimernog materijala u procesu VF spajanja ključna je karakteristika kojom se postiže spoj jednolike čvrstoće po cijeloj duljini. Iniciranje topline ovisi uvelike o debljini uzoraka materijala koji se spajaju, stoga je više učinkovito spajanje tanjih materijala, jer se efekt iniciranja topline zadržava samo na kontaktnom području, površini VF elektrode, u kojem dolazi do zagrijavanja svih slojeva materijala koji se spajaju (Mitelea, 2017). Debljina slojeva materijala koji se spajaju, tj. razmak između elektrode i protuelektrode ne smije biti veći od 1,5 mm. Razlog tome je što u prostoru između dvije elektrode, na udaljenosti od maksimalno 1,5 mm, električno polje je dovoljno jako da inducira zagrijavanje materijala i njegovo omekšavanje, ukoliko je taj razmak veći, jakost električnog polja je oslabljena i spoj koji se dobije neće biti dovoljno kvalitetan i imat će smanjenu čvrstoću (Troughton, 2008).

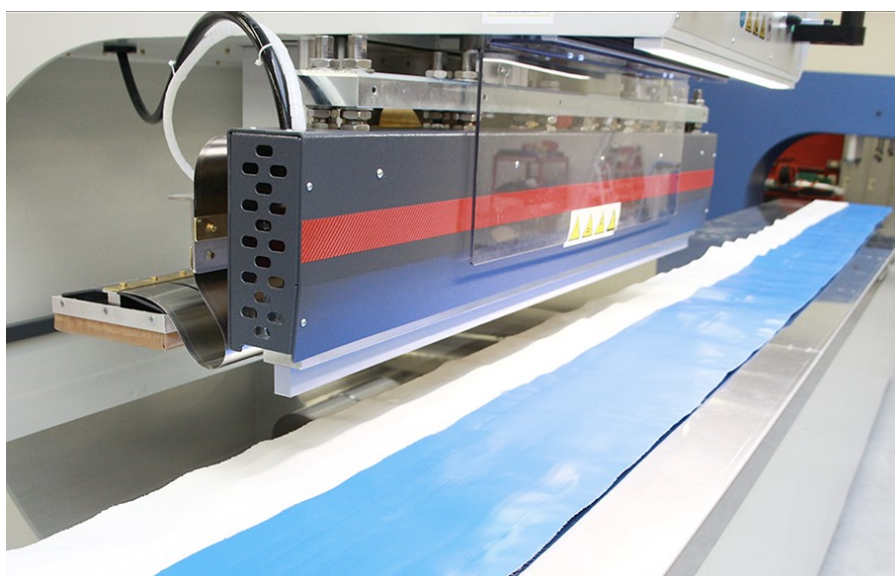
Istraživanje utjecaja parametara VF spajanja na čvrstoću spoja vrlo je važno jer se ova tehnika spajanja najčešće koristi za spajanje predmeta čiji spojevi moraju imati svojstvo zrakonepropusnosti, tj. za spajanje predmeta u koje se upuhuje zrak. Spoj kod ovakvih uporabnih predmeta je najslabija komponenta, jer ako spoj nije dovoljno čvrst i elastičan, uporaba ovakvih predmeta je upitna (Čubrić, et al., 2021). Osnovni parametri VF spajanja su temperatura spajanja (ona se razvija uslijed VF procesa), tlak spajanja i vrijeme spajanja.



Osim osnovnih parametara VF spajanja na kvalitetu spoja utječe veličina gornje elektrode, koja određuje veličinu i oblik zone spajanja koja pak u ovisnosti o debljini i broju slojeva materijala uvelike utječe na analizu i istraživanje i određivanje vrijednosti osnovnih parametara (Yang et al., 2015; Ruiz i Rios, 2020).

Utvrđeno je da je za površinu od  $1 \text{ cm}^2$  spoja, potrebna približna snaga od 50-80 W, ovisno o vrsti materijala i njegovoj debljini (Firšt Rogale i sur., 2014).

Strojevi za visokofrekventno spajanje koriste visokofrekventne oscilatore s pojačalima snage. Međutim, takva pojava može se učinkovito iskoristiti pri visokofrekventnim spajanjima polimernih materijala (Rogale et al., 2011a) sl. 2.11.



**Sl. 2.11** Prikaz stroja za visokofrekventno spajanje (<https://www.weldmaster.com/rflex-travel>)

Stroj za visokofrekventno spajanje sastoji se od dvije glavne komponente: visokofrekventnog generatora i sustava za spuštanje elektrode. Visokofrekventni generator služi kao izvor energije i stvaranje visokofrekventnog polja. Visokofrekventno polje razvija se pomoću visokofrekventnog oscilatora koji oscilira na frekvenciji od 27,12 MHz, i pojačalom snage do 5 kW. Pneumatski sustav sastoji se od gornjeg i donjeg dijela. Gornji dio predstavlja nosač VF elektrode i ona je pomična, a donji dio je uzemljena radna ploča sa donjom nepomičnom protuelektrodom. Funkcija pneumatskog sustav kod VF spajanja je mehanički pritisak gornje VF elektrode određenom pritiskom silom na slojeve materijala koji se spajaju (Hollande et al., 1998).

Visokofrekventne elektrode za spajanje dijelova polimernog materijala mogu biti različitih dimenzija i oblika, a o njihovom obliku i dimenzijama ovisi izgled spoja. Ovisno o duljini spoja

i nosač elektroda mora biti prilagođen duljini elektrode i konstruiran tako da osiguravaju ravnomjerni pritisak elektrode po čitavoj njezinoj duljini.

Prema obliku postoje ravne i zakrivljene elektrode, a izrađuju se ovisno o željenom izgledu spoja (Dixson i Grewell, 2003). Materijali od kojih se izrađuju VF elektrode najčešće se izrađuju od mesinga, bakra ili aluminijska čija je površina prekrivena tankim slojem bakra. Visokofrekventno spajanje koristi se kod izrada velikih serija proizvodnog artikla, razlog tome je skupa izrada elektrode (Troughton, 2008).

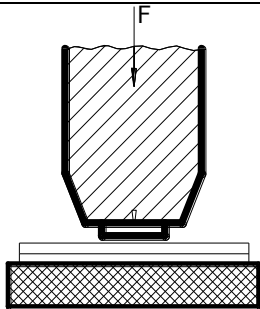
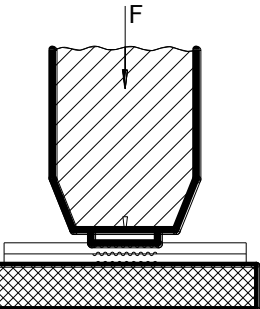

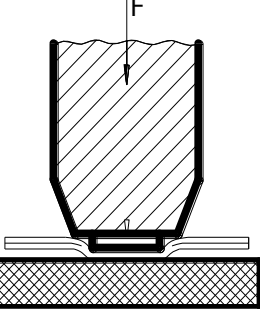
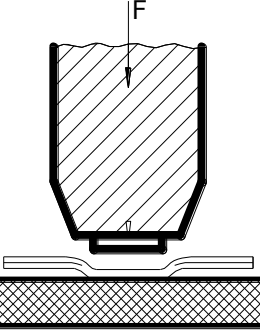
Parametri spajanja koje je potrebno podesiti na stroju za visokofrekventno spajanje su jakost anodne struje, vrijeme djelovanja anodne struje na termoplastični polimerni materijal i pritisna sila kojom djeluje gornja elektroda na materijal.

Prednosti ovoga postupak su kratki ciklus spajanja (od 2 s do 9 s), visoka energetska učinkovitost i mogućnost automatizacije proizvodnje. VF tehnika spajanja vrlo je pogodna za tanke materijale, koji se mogu spajati u više slojeva. Glavni nedostatak ove tehnike je nemogućnost spajanja svih polimernih materijala, sposobnost spajanja imaju samo neprovodljivi materijali s polarnom strukturom i visokim faktorom dielektričnih gubitaka, tg  $\delta$ . Nedostatak ove tehnike spajanja je i ograničena debljine slojeva materijala koji se spajaju, te oblik spoja koji ovisi o obliku elektrode (Čebular et al., 2011; Troughton, 2008).

Ovom tehnikom spajanja nastaju trajni spojevi kojim se spajaju dijelovi odjeće i obuće, odjeće za kišu, cerade, asortiman za pakiranje, zračni madraci, medicinski proizvodi, vrećice i dr.

U tab. 2.3 opisano je i shematski prikazano pet temeljnih faza procesa visokofrekventnog spajanja dva sloja termoplastičnog polimernog materijala.

Tab. 2.3 Prikaz pet temeljnih faza procesa visokofrekventnog spajanja polimernog materijala

1. faza	<p>Postavljanje materijala u radnu zonu, na donju elektrodu na mjestu gdje se je planira spoj. Gornja elektroda dovodi se u donji položaj u kontakt s materijalom i tako vrši pritisak na materijal, određenom pritiskom silom.</p> <p>Razmak između elektrode i protuelektrode ovisi o debljini slojeva materijala koji se spajaju, a on ne bi smio biti veći od 1,5 mm.</p>	
2. faza	<p>Na polimerni materijal koji se nalazi između elektrode i protuelektrode, priključene na VF generator, djeluje elektromagnetsko polje i dolazi do pojave topline po čitavom volumenu materijala.</p>	
3. faza	<p>Uslijed pojave topline po čitavom volumenu materijala na mjestu spajanja dolazi do omekšavanja materijala.</p>	
4. faza	<p>Elektroda vrši pritisak na omekšani dio materijala i tako ostvaruje spajanje materijala tj. formiranje spoja.</p> <p>Oblik spoja ovisi o obliku elektrode.</p> <p>Vrijeme spajanja ovisi o vrsti polimernog materijala koji spajamo, debljini materijala i o veličini elektrode, a potrebno ga je namjestiti prije svakog ciklusa spajanja.</p>	
5. faza	<p>Hlađenje spoja, formiranje trajnog spoja, podizanje elektrode u gornji položaj i odlaganje izratka spajanog materijala.</p>	

### 2.1.3. Spajanje toplinskom kondukcijom

Ova tehnika spajanja se najčešće koristi kada odjevni predmet treba imati svojstvo vodonepropusnosti, otpornosti na trenje i postojanosti. Spajanje toplinskom kondukcijom (upotrebom vrućeg klina) kontinuirano je spajanje. Ovom tehnikom spajanja najviše se spajaju termoplastični materijali i/ili naslojene tekstilije od kojih su najčešće poliuretan (PU), polietilen (PE), polivinil klorid (PVC) i polipropilen (PP). Princip rada strojeva za toplinsko spajanje temelji se na zagrijavanju vrućeg klina, koji se dovodi u kontakt s površinom materijala koji se zagrijava do temperature omekšanja, a potom se pod djelovanjem pritiskne sile, formira spoj. Kod ove tehnike spajanja poseban problem predstavlja niska toplinska vodljivost polimernih materijala koja se manifestira kroz površinsko zagrijavanje materijala, a unutrašnjost im ostaje hladna (Rogale i sur., 2011b). Za vrijeme spajanja vrući klin nalazi se u direktnom kontaktu s materijalom, prenosi toplinu na slojeve materijala (Marczis i Czigani 2006), na koje u vrlo kratkom vremenskom intervalu djeluje pritiskna sila valjaka (Petrie, 2015). Spajanje toplinskom kondukcijom uslijed direktnog kontakta vrućeg klina s površinom materijala može izazvati površinske nepravilnosti, oštećenjima u vidu rupica u zoni spoja i slično. Također ako materijal koji se spaja ima oscilacije u debljini, na taj način se neravnomjerno prenosi toplina, te može doći do oštećenja, ali i na mjestima gdje je debljina materijala veća, i do slabije spojenog dijela spoja, što ima značajan utjecaj na čvrstoću spoja. Spajanje pomoću kondukcije najpogodnije je za spajanje tankih i vrlo glatkih materijala s aspekta čvrstoće i kvalitete spoja (Petrie, 2015).

Parametri spajanja koje je potrebno podesiti su temperatura vrućeg klina, pritiskna sila transportinih valjaka i brzina spajanja (Wise, 1999). Prilikom spajanja toplinskom kondukcijom vrlo je teško odrediti optimalne parametre spajanja, zbog velikog broja termoplastičnih i ostalih polimernih materijala koji se koriste za različitu primjenu.

Provedbom eksperimenta utvrđeno je da se čvrstoća spoja povećava proporcionalno sa vremenom spajanja i temperaturom zagrijanog vrućeg klina, ali to uvelike ovisi o vrsti polimernog materijala ili više njih koji se spaja (Amanat, 2010).

Grijaće tijelo, vrući klin izrađen je od nehrđajućeg čelika koji je precizno poliran i obrađen. Što je grijaće tijelo bolje obrađeno to će kvaliteta spoja biti bolja. Grijaće tijelo može biti različito konstruirano o čemu ovisi oblik i širina spoja. Vrući klin također može biti obložen slojem materijala kao što je Teflon koji pomaže da ne dođe do nakupljanja ostataka omekšanog polimernog materijala na grijaće tijelo. Različite izvedbe vrućeg klina iziskuju različite parametre djelovanja. Primjenom vrućeg klina koji nije obložen Teflonom ili nekim sličnim materijalom pri temperaturi zagrijavanja od 300 °C do 400 °C vrijeme spajanja će biti

kraće, a ostatci materijala nakupljeni na klinu će sami oksidirati ili ih se mora mehanički otkloniti (Troughton, 2008).

Posmični valjci, koji osim zadaće transporta materijala, pritiskom silom s gornje strane djeluju na omekšani materijal (Rogale i sur., 2010). Mogu biti izrađeni od čelika i silikona, a izbor ovisi o vrsti materijala koji spajamo.

Ovom tehnikom spajanja nastaju kontinuirani spojevi, kojom se spajaju dijelovi odjeće, cerade, šatori i predmeti slične namjene.

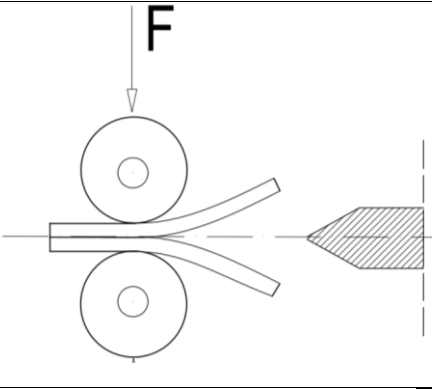
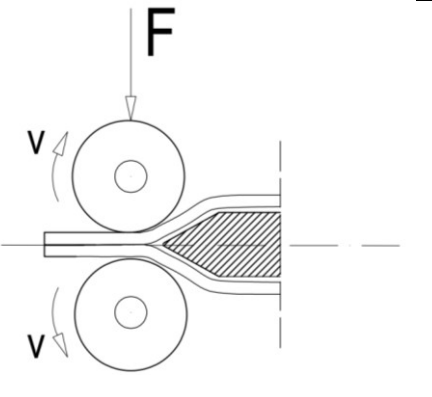
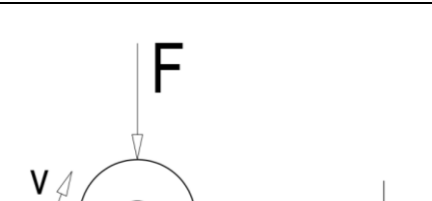
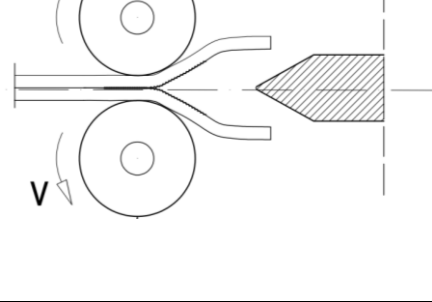
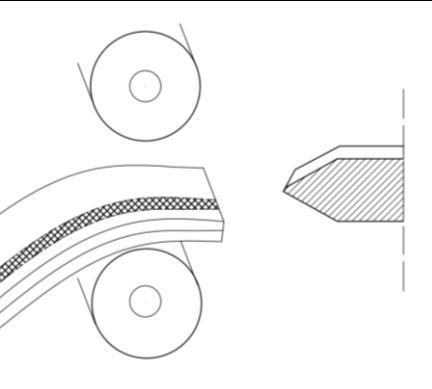
Nedostatak ove tehnike spajanja je da se kod procesa spajanja na površinu vrućeg klina nakupljaju ostatci omekšanog polimernog materijala, a posebno je to izražajno kod materijala koji imaju visoku temperaturu omekšavanja, koji se onda prenose s grijaćeg tijela na spoj te time narušavaju kvalitetu i estetski izgled spoja (Amanat, 2010).

U tab. 2.4 opisano je i shematski prikazano pet temeljnih faza procesa toplinskog spajanja dva sloja polimernog materijala pomoću toplinske kondukcije (vrućeg klina).

Za spajanje termoplastičnih materijala potrebno temperaturu podesiti da je ona od 100-250 °C veća od temperature omekšanja materijala koji se spaja. Brzina je spajanja je veća kod tanjih materijala, kao i tlak spajanja koji je niži kod netkanih materijala i folija (Petrie, 2015).

Debljina omekšanog sloja, koji se međusobno miješaju tijekom djelovanja pritiskne sile valjaka, utječe na čvrstoću spoja (Petrie, 2015).

Tab. 2.4 Prikaz pet temeljnih faza procesa toplinskog spajanja materijala kondukcijom

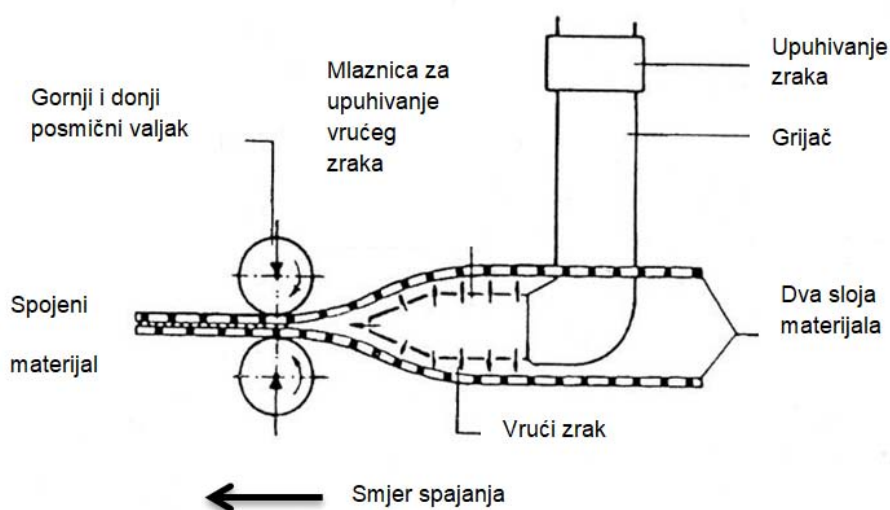
1. faza	Dovođenje materijala u radnu zonu i postavljanje između dva posmična valjka koji imaju funkciju transporta materijala i pritiska na materijal. Gornji valjak se spušta u donji položaj te s donjim valjkom izvodi pritisak i zadržava materijal.	
2. faza	Grijaće tijelo, vrući klin, dovodi se u kontakt sa površinom materijala koji spajamo te pomoću kondukcije prenosi toplinu na materijal	
3. faza	Materijal se lokalno zagrijava i dolazi do omekšavanja površine ne samo na dijelu koji je u kontaktu sa vrućim klinom veći i dio materijala u području oko vrućeg klina.	
4. faza	Posmični valjci izvode transport materijala u zadanom vremenskom intervalu ali izvode i pritisak na materijal koji je omekšan i time ostvaruju spajanje materijala tj. formiranje spoja. Vrući klin se vraća u početni položaj te prestaje prijenos topline na površinu materijala.	
5. faza	Hlađenje spoja, vraćanje gornjeg valjka u gornji, početni položaj, te odlaganje materijala.	

#### 2.1.4. Spajanje toplinskom konvekcijom

Ova tehnika spajanja temelji se na zagrijavanju toplinskom konvekcijom, dovođenjem izvora topline, vrućeg zraka kroz mlaznicu grijaćeg tijela, sl. 2.12, na površinu polimernog materijala koji se lokalno zagrijava do temperature omekšanja, a zatim se pod djelovanjem pritisne sile materijali međusobno spajaju (Marczis i Czigani 2006). Parametri koji su ključni za spajanje polimernih materijala ovom tehnikom su temperatura vrućeg zraka, tlak ispuhujućeg zraka, pritisna sila i brzina prolaska materijala tj. vrijeme spajanja (Amanat, 2010). Svaki od navedenih parametara ima vrlo važan utjecaj na krajnji rezultat spajanja, tj. na kvalitetu spoja.

Temperatura zraka kojeg grijač dovodi do ventilatora može se podesiti na upravljačkoj ploči. Podešava se ovisno o vrsti materijala koji se spaja, a može iznositi i do 650°C, ovisno o izvedbi stroja. Brzina spajanja ovisi o postavljenoj temperaturi, vrsti materijala kojeg spajamo, debljini materijala i debljini dodatnog materijala (adhezivna traka). Kod ove tehnike spajanja važno je da parametri imaju konstantne vrijednosti tijekom cijelog procesa spajanja. Ukoliko se spajaju dva različita materijala treba voditi računa i o njihovoj međusobnoj kompatibilnosti. Također treba osigurati da dijelovi materijala koji se spajaju na ovaj način budu potpuno očišćeni od bilo kakve prljavštine i masnoća kako bi se dobio kvalitetan spoj (Troughton, 2008).

Grijaće tijelo zagrijava grijač, koji je u obliku električne zavojnice omotan oko keramičke jezgre i nalazi se unutar kućišta stroja. Temperatura zraka obično se namješta pomoću vrijednosti na digitalnom prikazu koji se nalazi na upravljačkoj ploči, te pomoću mikroprocesora i ugrađenih toplinskih senzora izvodi kontrolu temperature i osiguravaju konstantnu temperaturu tijekom procesa spajanja (Nikolić i sur., 2007).



**Sl. 2.12** Presjek stroja za spajanje toplinskom konvekcijom (Troughton 2008).

Osim za spajanje dijelova odjevnih predmeta, tendi i sl. ova tehnika spajanja se također koristi za spajanje adhezivne trake na šavove koji su izvedeni pomoću konvencionalnih strojnih šivaćih uboda primjenom igle i konca, sl. 2.13 (Rogale i sur., 2010). Tako se dobiva spoj koji je zrakonepropustan i vodonepropustan. Adhezivne trake (plastične vrpce), širine do 25 mm, mogu biti izrađene od različitih polimernih materijala. Kod toplinskog spajanja adhezivne trake na šav, vrlo je bitan odabir adhezivnih traka, čije specifikacije nam određuju temperaturu spajanja, a i kompatibilnost s materijalima na koje se spajaju.



**Sl. 2.13** Prikaz dijela stroja za spajanje spaja pomoću toplinske konvekcije tt. Pfaff

Izvedba stroja za toplotno spajanje pomoću konvekcije ista je kao i kod kondukcije samo se razlikuje grijaće tijelo pomoću kojeg se zagrijava površina materijala. Kod toplinske kondukcije je to vrući klin, a kod toplinske konvekcije vrući zrak.

Posmični valjci i kod ove tehnike spajanja mogu biti izrađeni od čelika i silikona. Oni imaju funkciju transporta materijala, kao i kod tehnike spajanja toplinskom kondukcijom, te izvode pritisak na omekšani materijal.

Adhezivna traka postavlja se na naličje materijala na već sašiveni šav. Potrebno je prije početka rada podesiti temperaturu vrućeg zraka, ovisno o vrsti adhezivne trake. Zagrijavanjem se površina adhezivne trake omekšava, a potom se djelovanjem pritisne sile valjaka koji ujedno izvode i transport materijala, adhezivna traka spoji na šav. Takav spoj (šav i adhezivna traka) ima potpuno drugačija svojstva nego šav izrađen iglom i koncem. Spoj je zrakonepropustan i vodonepropustan. Na mjestima proboda materijala iglom nastaju rupice, te rupice na materijalu zatvaraju se adhezivnim slojem trake. Adhezivne trake mogu biti tkane i netkane ovisno o zahtjevima koje odjevni predmet mora zadovoljavati. Također



adhezivne trake mogu biti jednoslojne, dvoslojne ili troslojne. Jednoslojne adhezivne trake koriste se kod PVC i PU. Dvoslojne adhezivne trake imaju najveću primjenu, šav na koji je spojena dvoslojna adhezivna traka ima svojstvo zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti. Troslojne adhezivne trake najčešće se koriste za deblje i teške materijale od kojih se izrađuje zaštitna odjeća (Jakubčioniene et al., 2012).

Netkane adhezivne trake imaju puno prednosti kao što je niža temperatura potrebna za spajanje, takvi šavovi imaju veliku fleksibilnost te dobra savojna svojstva (Jana, 2011).

Temperatura omekšanja adhezivnih traka ne smije biti visoka, zbog utjecaja na dimenzijsku stabilnost, promjenu boje uzorka materijala i uporabna svojstva materijala (da spoj ne bude prekrut u odnosu na materijal). S druge strane pak upotreba preniske temperature spajanja može imati kao posljedicu loš spoj, koji neće imati svojstvo zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti (Jakubčioniene et al., 2012).

U tab. 2.5 opisano je i shematski prikazano pet temeljnih faza procesa toplotnog spajanja dva sloja polimernog materijala pomoću vrućeg zraka (konvekcijom).

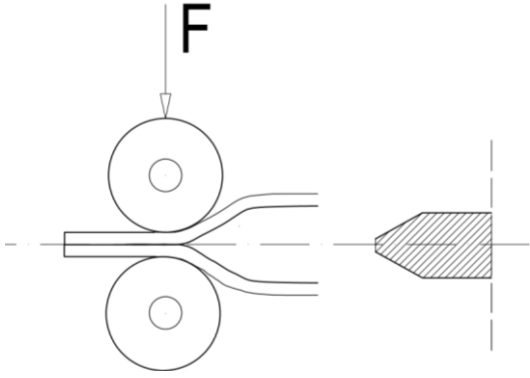
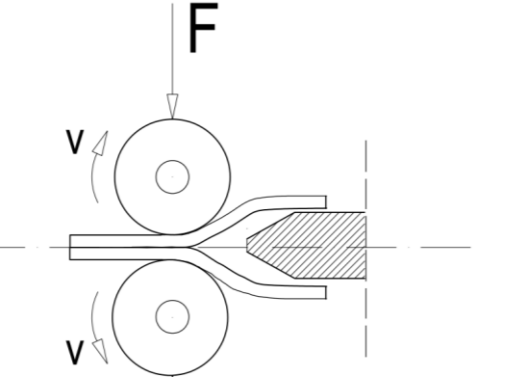
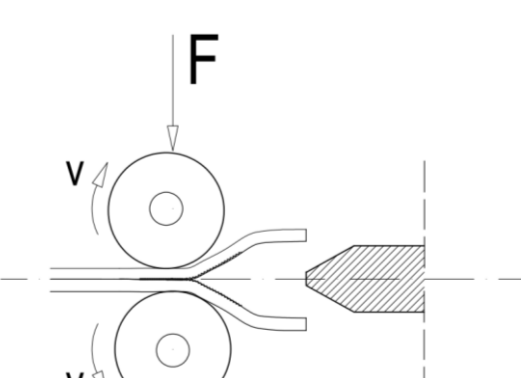
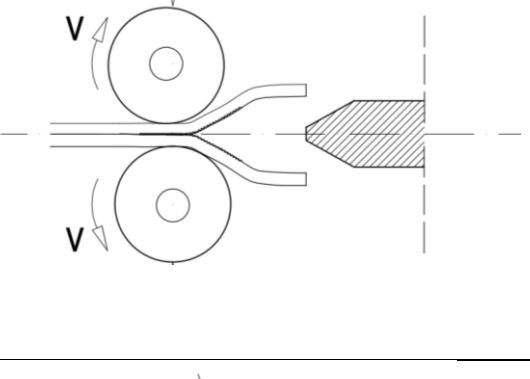
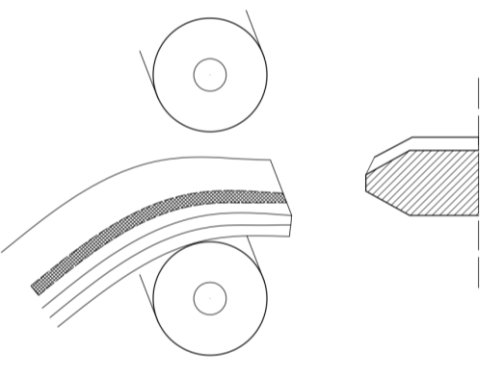
Ova tehnika spajanja koristi se kod izrade kabanica, radnih odjela, šatora, specijalne zaštitne odjeće za otvorene prostore izložene atmosferskim padalinama ili utjecaju morske vode, sjedala za motocikle i sličnih predmeta koji moraju zadovoljiti svojstvo zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spoja sl. 2.14.



**Sl. 2.14** Primjena tehnike spajanja toplinskom konvekcijom, spajanjem adhezivne trake po šavu

Za razliku od spajanja vrućim klinom, spajanje vrućim zrakom zahtijeva veću potrošnju energije i bučnije je za radnika (Petrie, 2015).

Tab. 2.5 Prikaz pet temeljnih faza procesa toplotnog spajanja materijala konvekcijom

1. faza	Dovođenje materijala u radnu zonu i postavljanje između dva posmična valjka koji imaju funkciju transporta materijala i pritiska na materijal. Gornji valjak se spušta u donji položaj te sa donjim valjkom izvodi pritisak i zadržava materijal.	
2. faza	Grijaće tijelo tj. vrući zrak dovodi se u blizinu površine materijala koji se spaja te pomoću konvekcije prenosi toplinu na materijal.	
3. faza	Materijal se lokalno zagrijava i dolazi do omekšavanja površine materijala.	
4. faza	Posmični valjci izvode transport materijala u zadanom vremenskom intervalu ali izvode i pritisak na materijal koji je omekšan i time ostvaruju spajanje materijala tj. formiranje spoja. Grijaće tijelo se vraća u početni položaj i tu prestaje prijenos topline na površinu materijala.	
5. faza	Hlađenje spoja, podizanje gornjeg valjka u gornji, početni položaj i odlaganje materijala.	

## 2.2 Zaštitna odjeća

Zaštitna odjeća koristi se za zaštitu ljudskog zdravlja od niza raznih opasnosti i klimatskih promjena s kojima se čovjek susreće. Ljudsko tijelo tijekom obavljanja radnog procesa izloženo je opasnostima. Mnoge ozljede i oboljenja te i s time povezane smetnje u proizvodnom procesu, mogli bi se izbjeći korištenjem visokokvalitetne zaštitne odjeće (Horvat i Regent, 2009). Zato projektiranje ovakve vrste odjevnih predmeta mora biti izvedeno s obzirom na zahtjeve i očekivanja. Projektiranje zaštitne odjeće, kao sastavnog dijela osobne zaštite opreme (OZO) iznimno je složene prirode. Ona mora biti projektirana i proizvedena tako da su predviđeni oni uvjeti upotrebe za koju je namijenjena, a da korisnik može obavljati normalno svakodnevne aktivnosti propisane radnim mjestom i pritom se ugodno osjećati uz najveću moguću razinu adekvatne zaštite. Da bi se odabrala odjeća koja će odgovarati namjeni i specifičnostima radnog mjesta, potrebno je uz procjenu rizika napraviti analizu ergonomske zahtjeva radnog mjesta, uvjeta okoliša na radnom mjestu, proučiti njezin utjecaj na rad i na ugođaj čovjeka određenom prostoru. Zaštitna odjeća definira se kao posebno projektirana i izrađena odjeća koja osigurava unaprijed određene zahtjeve i/ili funkcionalnost nositelju (Geršak i Maričić, 2013).

Prema definiciji autorima Horvat i Regent zaštitna odjeća je osobna zaštitna oprema koja štiti ljudsko tijelo od štetnih utjecaja, a podijeljena je zaštitnu odjeću koja štiti cijelo tijelo (kombinezon) i zaštitna odjeća za pojedine dijelove tijela (jakna, hlače itd.) (Horvat i Regent, 2009). Prema Direktivi 89/686/EEC i pripadajućim normama, zaštitna odjeća mora osigurati, osim onih posebnih zahtjeva koji osiguravaju potrebnu zaštitu, odgovarajuću tehničku funkcionalnost, kao i potrebnu razinu udobnosti (Geršak i Maričić, 2013). Područje zaštitne odjeće ima širok spektar specifičnosti primjene za svaku vrstu potencijalne opasnosti. Štiteći nosioca svojom funkcijom, zaštitna odjeća omogućava sigurnije obavljanje određenih poslova i smanjuje mogućnost ozljede na radu. Izrađuje se od više vrsta inovativnih tekstilnih materijala koji svojim svojstvima daju odjeći zaštitnu funkciju (Gupta, 2011a).

Podjela zaštitne odjeće vrlo je kompleksna, zbog toga što je teško obuhvatiti sve vrste zaštite koju bi takva odjeća trebala pružati. Ovisno o krajnjem korisniku zaštitna odjeća se dijeli na industrijsku, vojnu, civilnu, medicinsku, sportsku i svemirsku zaštitnu odjeću. Ista vrsta zaštitne odjeće npr. kemijska zaštitna odjeća, ima puno tipova unutar skupine. Kemijska zaštitna odjeća sastoji se od 6 tipova i svaki od tipova ima drugačije zahtjeve i norme prema kojima se vrši ispitivanje svojstava takve odjeće (Zahul et al., 2005; Van Langenhove et al., 2005).

Osobna zaštitna odjeća najčešće pruža više zaštitnih funkcija, uz zaštitu od topline ili hladnoće, zaštitna odjeća pruža i mehaničku zaštitu, zaštitu od presijecanja pilom itd., te se može podijeliti na slijedeće vrste:

1. Kemijska zaštitna odjeća (pruža zaštitu od vanjskih bioloških i radioaktivnih agensa)
2. Toplinska zaštitna odjeća (obuhvaća i zaštitu odjeću za zavarivače i vatrogasnu zaštitnu odjeću)
3. Tehnička zaštitna odjeća (odjeća koja pruža mehaničku zaštitu, upozoravajuća odjeća visoke uočljivosti i antistatika odjeća)
4. Odjeća za zaštitu od nevremena i hladnoće
5. Vatrogasna intervencijska odjeća (Horvat i Regent, 2009).

Zaštitna odjeća mora biti projektirana na način da pruža zaštitu od opasnosti na koje radnik može naići tijekom obavljanja poslova na radnom mjestu. Odjeća koja pruža zaštitu od posjekotina, abrazije, balističku zaštitu, eksplozije, vatre i ekstremne vrućine, opasne prašine i čestica, nuklearne, biološke i kemijske opasnosti, od visokog napona, statičkog elektriciteta i ekstremne hladnoće (Geršak, 2013). Stoga se za projektiranje zaštitne odjeće postavljaju vrlo složeni uvjeti s obzirom na karakterizaciju materijala, dizajn, kvalitetu i norme, čime će biti osigurana djelotvornost zaštitne odjeće pri upotrebi. Zaštitni učinak odjeće uglavnom ovisi o karakteristikama materijala od kojih je ona izrađena ali isto tako i o tehnologiji izrade odjeće (Geršak i Marčić, 2013). Za optimizaciju zaštitne odjeće potrebno je poznavanje svojstava tekstilnih materijala koji su ugrađeni u odjeću jer svaki novi dodani sloj tekstilnog materijala u odjevnom sustavu mijenja svojstva zaštite (Hursa i sur., 2013).

### **2.3 Inteligentna odjeća**

Inteligentna odjeća je zasad najsloženija vrsta i predstavlja najviši dosadašnji stadij razvoja odjeće. Osnovno svojstvo inteligentne odjeće je mogućnost razabiranja stanja u okolišu, ispravna interpretacija tog stanja, donošenje racionalne odluke o novoj prilagodbi odjevnog predmeta spram eventualnih promjena u okolišu, te automatski provodi tu prilagodbu primjenom ugrađenih izvršnih naprava u odjevnom predmetu. Njezino osnovna karakteristika što je i razlikuje od druge odjeće je smisljena autonomna prilagodba kao reakcija na uočene promjene u okolišu, te time iskazuje jednostavan način inteligentnog ponašanja. Na sastanku Tematske grupe stručnjaka skupine 6 pod nazivom Smart Textiles & Clothing održanoj 2006.

godine. Stručnjaci su se složili da u inteligentni odjevni predmet moraju biti ugrađene tri skupine uređaja: senzori, mikroracunala, mikroprocesori ili mikrokontroleri i aktuatori (Firš Rogale i sur., 2014).

Na Zavodu za odjevnu tehnologiju Tekstilno-tehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu prije 20 godina skupina znanstvenika pod vodstvom prof. dr. sc. Dubravka Rogalea započela je s razvojem inteligentne odjeće. Od tada je razvijeno nekoliko funkcionalnih prototipova inteligentne odjeće s aktivnom toplinskom zaštitom. Primarni cilj je da se pasivni karakter termičke zaštite odjeće pretvori u aktivni način, da odjeća sama određuje toplinsko stanje tijela (temperatura tijela, toplinski tok, relevantna vlaga i temperatura zraka unutar odjeće i/ili neki drugi termodinamički parametri) i okoliša. Na temelju izmjerenih podataka odjeća sama podešava karakteristike i vrijednosti toplinske izolacije odjavnog predmeta. U tom smislu inteligentni odjevni predmet mora imati ugrađene mjerne senzore i uređaje, elektronički sklop ili računalo za upravljanje, te sustav aktuatora za podešavanje termičkih karakteristika (Firš Rogale i sur., 2014).

Tijekom dugogodišnjeg razvoja i rada na ovoj vrsti inteligentnog odjavnog predmeta jedan od zaključaka je da se inteligentni odjevni predmet s aktivnom termičkom zaštitom nikako ne može izraditi samo upotrebom konvencionalne tehnike šivanja, već je nužna primjena visokotehnoških tehnikom spajanja (Rogale i sur., 2005; Firš Rogale et al., 2018; Rogale et al., 2020). Konvencionalna tehnika šivanja može se koristiti za izradu vanjske školjke inteligentnog odjavnog predmeta, njegove podstave i ponekih ugradbenih elemenata (Firš Rogale i sur., 2014.). Inteligentni odjevni predmet s adaptivnim termoizolacijskim svojstvima sastoji od više antropometrijski oblikovanih segmentiranih termoizolacijskih komora međusobno povezanih mrežastom strukturom smještenih između vanjske, osnovne tkanine i podstave konstruiranih tako da komore mijenjaju svoju debljinu i termoizolacijska svojstva razmjerno količini upuhanog zraka (Čubrić et al., 2021). Komore kao i spojevi moraju imati potrebnu konstrukcijsku čvrstoću i svojstvo zrakonepropusnosti te zadovoljavati uvjete elastičnosti pri nošenju, aktivaciji i deaktivaciji komora tako da se moraju spajati visokotehnoškim tehnikama spajanja, da bi se realizirale sve nabrojene karakteristike (Rogale i sur., 2003; Rogale i sur., 2005). Za razvoj i izradu inteligentne odjeće osim znanja vezanih uz tekstil i odjeću potrebna su i znanja vezana uz elektroniku, telekomunikaciju, biotehnologiju, medicinu i ostala područja. Cilj razvoja inteligentne odjeće je ugradnja elektronike izravno u tekstilni materijal, da odjevni predmet ima što manje dijelova koje je potrebno prije pranja i održavanja odvojiti (Mattila, 2006).

## 2.5 Šavovi i spojevi na zaštitnoj i inteligentnoj odjeći

Zaštitna i inteligentna odjeća izrađuje se od više različitih materijala, te izrada takve specifične odjeće zahtijeva iskustvo i vrlo detaljan pristup prilikom tehničke pripreme i proizvodnje odjeće (Stull, 2005). Šavovi i/ili spojevi moraju biti prilagođeni funkciji koju trebaju zadovoljiti, a odabir šivanog šava i/ili spoja ovisi o namjeni odjevnog predmeta (McLoughlin i Hayes, 2013) i vrsti materijala. Kvaliteta šavova i/ili spojeva ključan je čimbenik kod određivanja kvalitete odjevnog predmeta (Shi et al., 2017). Primjena određene tipa šivanog šava ili spoja određuje se na temelju krojnog dijela koji se šiva/spaja, a kod odabira tehnike spajanja ona još ovisi i o izgledu protuvaljaka ili o obliku visokofrekventne elektrode. Spojevi i/ili šavovi lošije kvalitete utječu i na smanjenje čvrstoće spoja/ šava, a time i do smanjenja vijeka trajanja odjevnog predmeta ili potpune nefunkcionalnosti i neupotrebljivosti odjevnog predmeta (Gurarda, 2008).

Najčešće korištena tehnika spajanja slojeva materijala je konvencionalnim postupkom šivanjem, ali zbog specifičnosti funkcionalne zaštitne i inteligentne odjeće potrebno je koristiti i druge visokotehnološke tehnike spajanja (Gupta, 2011b). Šivanjem iglom i koncem može se smanjiti ili potpuno ugroziti funkcionalnost odjevnog predmeta (Suner et al., 2012), zato je potrebno posebnu pažnju posvetiti načinu izrade tj. postupku spajanja 2D dijelova odjeće u 3D odjevni predmet. Ako takva odjeća treba imati svojstva vodonepropusnosti i/ili zrakonepropusnosti, tada šavovi i/ili spojevi također moraju imati ista svojstva, te se osim šivanja koriste i visokotehnološke tehnike spajanja (Hunter i Fan, 2009). Upotrebom visokotehnoloških tehnika spajanja pri izradi odjeće specifičnih namjena mijenja se i pristup dizajnu, konstrukciji, tehnologiji izrade odjeće ali ima i utjecaj na ekonomske čimbenike (Carr i Latham, 2008). Potrebno je već pri dizajnu odrediti koji dio odjevnog predmeta će se spajati kojom tehnikom spajanja, te ne temelju donesenih odluka, napraviti konstrukcijsku pripremu, vodeći računa da svaki stroj za spajanje ima specifičan način spajanja, te je potrebno osigurati dodatak za spajanje koji ovisi o širini spoja.

Šav predstavlja mjesto spajanja minimalno dva sloja tekstilnog materijala, a dobiva se tehnikom šivanja, upotrebom igle i konca. Spajanje termoplastičnih polimernih materijala opisuje se kao postupak postizanja trajno spojenih dijelova, koji se dobiva bez nanošenja adhezivnih sredstava i drugih kemijskih produkata kao što su ljepila i sl. na površinu materijala (Amant et al., 2010).

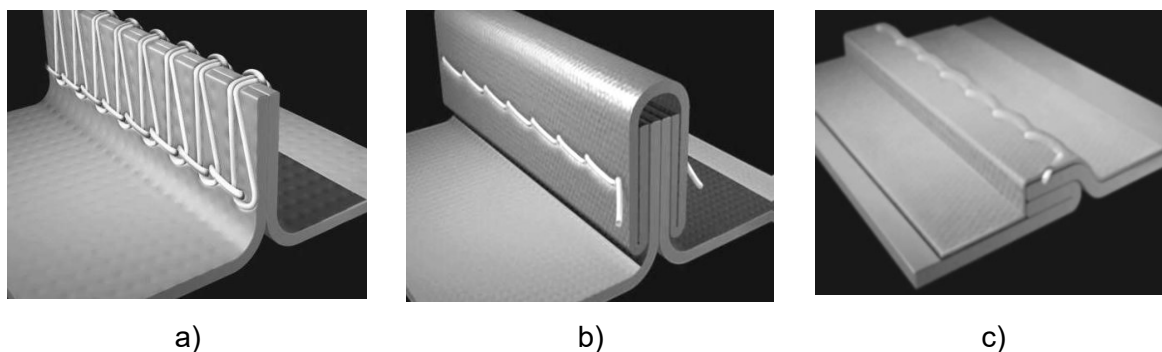
Šivaći ubod je osnovna jedinica ulančavanja konca oblikovana od jednog ili više konaca ili petlji konca koji su sami sa sobom, odnosno međusobno ulančani ili isprepleteni te su detaljno opisani u međunarodnom standardu ISO 4915. Šivani šav sastoji se od niza šivaćih

uboda ili niza tipova šivaćih uboda na jednom ili više slojeva materijala. Prema standardu ISO 4916 šivani šavovi razvrstani su u osam skupina s obzirom na tip i najmanji broj slojeva materijala u šavu (Rogale i sur., 2011b; Nayak i Padhye, 2018).

Uslijed spajanja dijelova odjeće šivanjem, nastaje šav, a na mjestima proboja igle nastaju rupice tj. strukturna oštećenja materijala. Osim oštećenja materijala, dolazi i do smanjenja čvrstoće materijala na mjestu šava. Šav koji je nastao spajanjem dijelova odjeće kod izrade zaštitnog odjevnog predmeta ima veliki utjecaj na svojstva i stupanj zaštite specijalnih zaštitnih odjevnih predmeta. Tako kod toplinske zaštitne odjeće smanjuje se stupanj zaštite u zoni šava prilikom izlaganja nositelja visokim temperaturama. Ovisno o tipovima šivanih šavova i vrsti spojeva nastalih upotrebom tehnika spajanja, koji se koriste kod izrade toplinske zaštitne odjeće ovisi i stupanj zaštite tj. svojstva toplinske zaštite mogu varirati. Utvrđeno je da bolja svojstva toplinske zaštite pruža zaštitna odjeća koja je izrađena upotrebom kombinacija konvencionalnog šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom adhezivnih traka na šav, od zaštitne odjeće koja je izrađena samo tehnikom šivanja. Tehnologijom i načinom izrade utječe se na toplinsku zaštitu specijalnih odjevnih predmeta. (Song 2017). Još bolji rezultati postižu se upotrebom tehnika spajanja gdje nema proboja igle već se dovođenjem ili iniciranjem topline na materijal, dijelovi odjevnog predmeta trajno spajaju.

Grupa autora Grinevičiute, D. i sur. u svojem radu opisuju svojstva spojeva na vatrogasnoj zaštitnoj odjeći, koja se sastoji od nekoliko slojeva posebnih materijala koji imaju određena svojstva koja se postupkom šivanja i/ili spajanja ne smiju narušiti. Najčešće je korištena kombinacija konvencionalnog šivanja i spajanja adhezivne trake (PU 100%) po površini šava. Šavovi/spojevi na vatrogasnoj zaštitnoj odjeći moraju biti čvrsti, izdržljivi prilikom izlaganja visokim temperaturama ali i vodonepropusni (Grinevičiute et al., 2014).

Autori Vinches i Halle u svom radu proučavaju šavove i spojeve te zatvarače na kemijskoj zaštitnoj odjeći, te napominju da je ovo područje još uvijek nedovoljno istraženo. Sva prethodna ispitivanja funkcionalnih zaštitnih svojstva na nekoliko vrsta kemijskih zaštitnih odjela odnosila su se na ispitivanja zaštitnog odijela u dijelu gdje nema šavova, spojeva i zatvarača. Rezultati njihovog ispitivanja na kemijskoj zaštitnoj odjeći TIP 5, kombinezon, (TIP 5 je zaštitna odjeća koja pruža zaštitu od prodora opasnih kemijskih čestica) su pokazali da tip šivanog šava i način projektiranja spoja utječu na stupanj prodora kemijskih čestica za 90 %. Ispitivanja su provedena na tri zaštitna odjela od kojih je prvo i drugo izrađeno tehnikom šivanja, razlikuju se prema tipu šivaćeg uboda i tipu šivaćeg šava sl. 2.15 a) i b), a treće kombinacijom tehnike šivanja i toplinskog spajanja adhezivne trake po šavu. sl. 2.15 c) (Vinches i Halle, 2017).



**Sl. 2.15** Uzorci ispitivanih šavova a) obamitajući šav, b) našivanje kose trake oko ruba šava i c) kombinirani šav/spoj, šivanje i spajanje adhezivne trake preko šava (Vinches i Halle, 2017)

Šavovi, spojevi i zatvarač na odjevnom predmetu nisu u ravnini s osnovnim materijalom, oni su izbočene komponente i njihova izloženost djelovanju kemijskih čestica pod određenim pritiskom nije ista kao izloženost osnovnog materijala, ako su šavovi/spojevi izvedeni da se nalaze s vanjske strane odjevnog predmeta. Šavovi i/ili spojevi na zaštitnoj odjeći podvrgnuti su samo ispitivanju njihovih mehaničkih svojstava ali i ne izloženosti djelovanja kemijskih mikro-čestica. Najbolja svojstva prilikom ispitivanja dobivena su na zaštitnom odjelu koje je izrađeno od kombinacije tehnike šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom adhezivne trake na šav, sl. 2.15 c), a najlošija svojstva prilikom ispitivanja dobivena su na zaštitnom odjelu koje je bilo izrađeno upotrebom obamitajućeg uboda sl. 2.15 a). Kod ispitivanja prelaska kemijskih čestica u području zatvarača, jedino zatvarač koji je bio projektiran tako da je umetnut ispod letvice sl. 2.16, je dao pozitivne rezultate (Vinches i Halle, 2017).

Prednosti spojeva postignutih ultrazvučnim, visokofrekventnim ili toplinskim spajanjem u usporedbi s šivanim šavom su te da spojevi imaju glatku površinu i svojim bešavnom strukturom pružaju nosiocu veću udobnost. Spojevi nastali spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja imaju dobru postojanost, čvrstoću, fleksibilnost i elastičnost. Odjevni predmeti koji su izrađeni spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja su lakši od onih koji su izrađeni šivanjem.



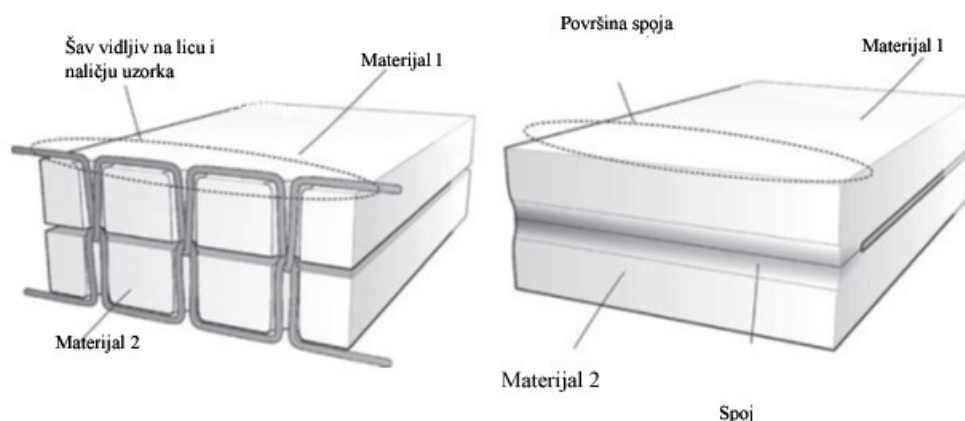


**Sl. 2.16** Kemijsko zaštitno odijelo TIP 5 izrađen kombinacijom tehnike šivanja i tehnike toplinskog spajanja konvekcijom, spajanjem adhezivne trake po šavu, (Vinches i Halle, 2017)

Prilikom projektiranja zaštitne i inteligentne odjeće posebnu pažnju potrebno je posvetiti položaju šavova/spojeva. Prevelik broj šavova/spojeva na zaštitnoj i inteligentnoj odjeći može umanjiti njihovu zaštitnu funkciju, pa je potrebno ograničiti broj šavova i /ili spojeva na minimum (Stull, 2005; Hunter i Fan, 2009). Kod definiranja šavova i/ili spojeva najprije je potrebno zadovoljiti osnovne zahtjeve i svojstva koje specijalni odjevni predmet treba pružiti. Prema odabranim materijalima, njihovim mehaničkim i fizikalnim svojstvima i funkciji odjavnog predmeta odabire se način spajanja šavova i/ili spojeva (Radhakrishnan i Kumari, 2017). Upotreba tehnika spajanja kod izrade odjeće najprije se počela koristiti samo za kratke spojeve kao što su izrada rupice za gumbe i slični elementi. Danas se za spajanje odjeće primjenjuju i tehnike spajanja koje pružaju mogućnost spajanja dugih spojeva primjenom strojeva za kontinuirano spajanje. Spajanjem se postiže vodonepropusnost i/ili zrakonepropusnost spojeva, povećava se trajnost i elastičnost spoja, a može se utjecati i na estetsku komponentu spoja. Spomenuta svojstva spojeva vrlo su bitna kod sportske odjeće i donjeg rublja, a najčešće tehnike spajanja kojom se izrađuju ovi tipovi odjeće je ultrazvučna tehnika spajanja, visokofrekventna tehnika spajanja i tehnike spajanja toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom. Vrlo je važno naglasiti da se svojstva spojeva razlikuju od svojstva šavova (Carr i Latham, 2008).

Kod šivanih šavova razvijen je sustav kontrole kvalitete i dijeli se na kontrolu parametra šivaćeg stroja i ocjenu vizualnog izgleda šivanog šava. Parametri koji utječu na kvalitetu šivanog šava, a ovisni su o karakteristikama materijala i broju slojeva koji se šivaju, su konac za šivanje (Nayak et al., 2013), duljina uboda i šivaća igla, sl. 2.17 (Firšt Rogale et al., 2012).

Tehnikama spajanja, spajati se mogu samo termoplastični polimerni materijali i naslojene tekstilije. Ultrazvučnim, visokofrekventnim i toplinskim spajanjem kondukcijom i konvekcijom postižu se spojevi kojima se može izrađivati odjeća za vanjsku upotrebu, sport i rekreaciju, donje rublju i dr. Spajanje pomoći visokotehnoških tehnika spajanja ima široku primjenu, koristi se kod izrade šatora, tendi, zračnih jastuka, filtere itd. Općenito, parametri koji utječu na kvalitetu spojeva su dovedena energija, vrijeme (tj. brzina) i pritisna sila u zoni spoja. Vrijednosti parametara spajanja visokotehnoškim tehnikama imaju ključnu ulogu za postizanje kvalitetnog spoja (Mitelea et al., 2009). Čvrstoća je jedan od elemenata o kojoj ovisi kvaliteta spoja, koji je spajan visokotehnoškom tehnikom spajanja, a njezine vrijednosti mogu biti nešto niže nego čvrstoća materijala koji se spaja (Khmelev, Slivin i Abramov, 2008). U usporedbi s šivanim šavovima, kvalitetu spojeva ostavrenih spajanjem visokotehnoškim tehnikama spajanja, vrlo je teško kontrolirati, ali optimizacijom parametara spajanja može se utjecati na kvalitetu spoja i vizualni izgled spoja. Spoj se najčešće nalazi između dva sloja materijala i teško je kontrolirati kvalitetu postignutih spojeva, zbog nastanka mikro oštećenja na materijalu u zoni spoja, koja mogu značajno utjecati na svojstva i kvalitetu gotovog proizvoda, sl. 2.17 (Gries et al., 2018).



**Sl. 2.17** Shematski prikaz izgleda šava i spoja kod spajanja dva sloja materijala (Gries et al. 2018).

Prema autorima McLoughlin, J. i Hayes, S. kvaliteta spoja može ocjenjivati prema nekoliko kriterija:

- estetski izgled spoja i područja uz spoj,

- čvrstoća spoja,
- postojanost,
- spoj ne smije utjecati na udobnost odjevnog predmeta,
- odabir primjenjive tehnike spajanja i mogućnosti postizanja primjenjivog spoja s obzirom na tehničke karakteristike stroja za spajanje.

Spojevi osim nabrojanih kriterija kvalitete koje moraju zadovoljiti, moraju zadovoljiti i sve ostale zahtjeve koji su postavljeni na odjevni predmet koji se izrađuje. Najčešće su to odjevni predmeti koji su namijenjeni za sport, rekreaciju ali i rad na otvorenom. Takva odjeća mora biti vodonepropusna ali i paropropusna i ugodna za nošenje (McLoughlin i Hayes, 2013).

Autori Vujasinović E. i Rogale D. također navode kriterije za ocjenjivanje kvalitete spoja koji se mogu primijeniti na gotovo sve vrste spojeva. Ocjenjivanje kvalitete uključuje izvedbu, uvijete i svojstva spojeva, a svaka analiza spojeva s obzirom na kvalitetu spoja treba započeti s provjerom ovih kriterija:

- vizualni izgled spoja,
- osjećaj opipa spoja (oštri rubovi, istisnuti rubovi itd.),
- postojanost spoja,
- elastičnost spoja,
- otpornost na trenje,
- jednostavna njega odjevnog predmeta koji je izrađen spajanjem i
- ekonomski aspekti spajanja (Vujasinović i Rogale, 2013).

Kvaliteta spoja ima značajan utjecaj na kvalitetu i svojstva gotovog odjevnog predmeta (Jana, 2011). Autori Jakubičioniene. et al. navode da kvaliteta spoja ovisi o utjecaju parametara spajanja kao što su temperatura, intenzitet djelovanja pritisne sile i vrijeme spajanja. Da bi se postigao kvalitetan spoj potrebno je optimizirati parametre spajanja. Kod spajanja potrebno je odabrati one parametre kojima će se postići temperatura koja će biti veća od temperature tališta termoplastičnog materijala. Dovođenje ili iniciranje previsoke temperature unutar materijala, dovodi to promjene dimenzijske stabilnosti i boje materijala u zoni spajanja. Vrsta, konstrukcijske karakteristike i površinska svojstva materijala imaju veliki utjecaj na kvalitetu i svojstva spoja. Neki od kriterija koje spoj treba zadovoljavati su:

- odgovarajuća čvrstoća (ovisno o vrsti materijala i tehnici spajanja),
- otpornost na pranje i čišćenje odjevnog predmeta i
- postojanost boje i teksture materijala u zoni spoja (Jakubičioniene et al., 2011).

## 2.5 Mehanička svojstva i njihovo vrednovanje

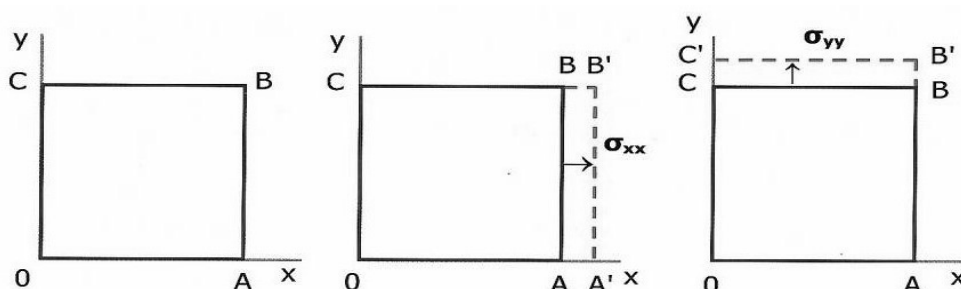
Razvoj metodologije objektivnog mjerenja mehaničkih svojstava plošnih tekstilija započinje 1920. a 1930. F. T. Pierce, postavio je temeljnu teoriju mehanike tekstilnih plošnih proizvoda. Mnogi istraživači u periodu od 1950. do 1970. proučavali su mehanička svojstva i razvijali metode za njihovo mjerenje i vrednovanje. Godine 1991. S. Kawabata razvio je automatsku mjernu opremu za objektivno mjerenje karakteristika tkanina Kawabata Evaluation System (KES-FB). Osnovni koncept mjernog sustava za objektivno mjerenje i vrednovanje opipa tekstilnih plošnih proizvoda na temelju osjeta doživljaja pri dodiru tkanine rukom i/ili prstima, objektivnim metodama mjerenja mehaničkih svojstava i izražavanje tih svojstava pomoću mehaničkih parametara (Geršak 2014). KES-FB mjerni sustav služil za ispitivanje mehaničkih i fizikalnih svojstava, istraživanja opipa tkanina. Mjerni podaci koji se pri tome dobiju, mogu se koristiti za računalnu simulaciju nošenja konvencionalnog i inteligentnog odjevnog predmeta na virtualnom čovjekovom tijelu, dinamičko modeliranje ponašanja pada tkanine i razvoj upravljačkih funkcija inteligentnih šivaćih strojeva.

Mehanička svojstva su odgovor tekstilnih materijala na djelovanje vanjskih sila pri čemu se mijenja njihov oblik i volumen. Djelovanjem vanjskih sila dolazi do određene napetosti tekstilnih materijala i njihove deformacije. Prestankom djelovanja sila, tekstilni materijal se vraća u prvobitno stanje, a deformacija ovisi od napetosti pri vlačnom djelovanju. Na sposobnost opiranja djelovanju vanjskih sila utiče niz faktora kao što su svojstva vlakana, pređa od kojih je vlakno izrađeno, struktura pletiva i sl. Svojstva koja se ubrajaju u mehanička svojstva su vlačna svojstva, svojstvo istežanja, svojstvo smicanja, svojstvo savijanja i kompresijska svojstva.

### 2.5.1 Vlačna svojstva

Vlačna svojstva su jedno od najznačajnijih karakteristika kvalitete i upotrebni svojstava tekstilnih plošnih proizvoda. Pri proučavanju vlačnih svojstava tekstilnih materijala, tkanine kao nehomogeni materijal najčešće se prikazuju modelom mreže koji se u neopterećenom stanju sastoji od dviju jednakih prostorno raspoređenih niti (osnova i potka) koje se križaju pod pravim kutom. Ako je definirana mreža izložena homogenim vlačnim opterećenjima njene se komponente naprezanja izražavaju kao linearna funkcija koordinata. S tog stajališta ravne linije u neopterećenoj mreži ostaju ravne linije i u deformiranoj mreži, pa tako ostaju usporedne samo u istom smjeru, a mreža se može raširiti ili skupiti. Osim o

naprezanju, deformacija ovisi i o utječe deformabilnosti tijela, odnosno tekstilnog materijala, sl. 2.18.



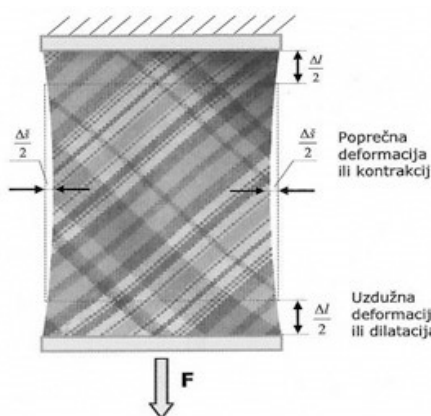
Sl. 2.18 Prikaz jednostavnog vlačnog opterećenja (Geršak, 2014)

Kod vlačnih opterećenja dolazi do složenih vlačnih deformacija zbog specifične strukture tekstilnih plošnih proizvoda. U smjeru djelovanja vlačnog opterećenja dolazi do uzdužne pozitivne deformacije, tj. istežanja ili produljenja sustava osnovnih niti. Istovremeno se, kao i kod ostalih realnih tijela, osim naprezanja i uzdužne deformacije (produljenja) javljaju i poprečne deformacije u obliku suženja presjeka.

Uzdužna deformacija, koja je posljedica jednoosnog opterećenja, izražava se kao specifična deformacija ili diletacija  $\varepsilon_o$  i opisuje se izrazom (2.2), a poprečna deformacija ili kontrakcija  $\varepsilon_p$ , koja se naziva kod tkanina smanjena širina  $\Delta\check{s}$  u smjeru potke, u odnosu na početno stanje širine  $\check{s}_0$ , sl. 2.19, a opisuje se izrazom (2.3) (Geršak, 2014). Nastale deformacije su istovremene i međusobno ovisne.

$$\varepsilon_o = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

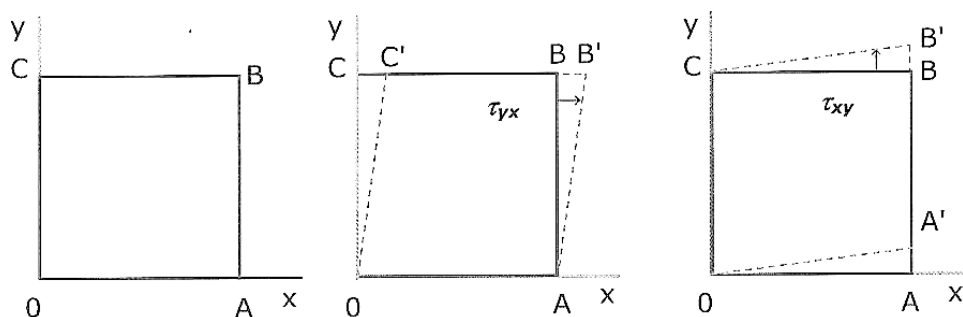
$$\varepsilon_p = \frac{\Delta\check{s}}{\check{s}_0} \quad (2.3)$$



Sl. 2.19 Odnos između uzdužne i poprečne deformacije (Geršak, 2014)

## 2. 5. 2 Smična svojstva

Prema istraživanjima brojnih istraživača koji su istraživali osnove smičnih svojstava kod tkanina, dokazali su da je mehanizam smičnog ponašanja tkanina jedna od bitnih karakteristika koje utječu na kvalitetu opipa, fleksibilnost i drapiranje tkanina. Smične deformacije tkanina utječu na svojstva savitljivosti i na vlačna svojstva tkanina u različitim smjerovima. Proučavanjem smičnih deformacija, uzorak tekstilnog materijala koji se ispituje može se tretirati kao model mreže. Primjer mreže izložene jednostavnom smičnom opterećenju, čije su komponente naprezanja  $\tau_{yx}$  i  $\tau_{xy}$  izražene su kao linearna funkcija koordinata i prikazan je na sl. 2.20 (Geršak, 2014).

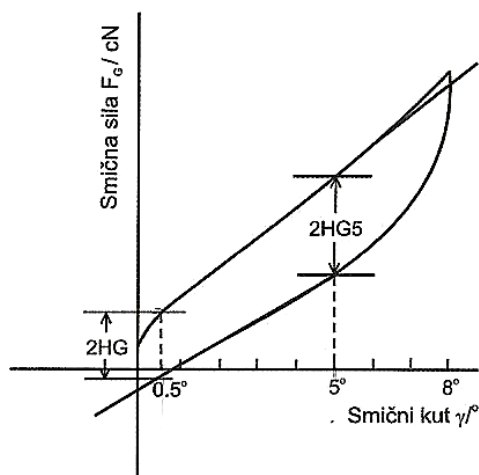


Sl. 2.20 Jednostavno smično opterećenje (Geršak, 2014)

Nastala smična deformacija tkanine posljedica je pomaka u kojem je promijenjen kut između sustava niti osnove i potke.

Struktura tkanine sastoji se od prepleta sustava niti osnove i potke bez dodatnih veza između prepletenog sustava niti u području dodirnih točaka, smična krutost u tkanini uzduž niti osnove i potke vrlo je mala u usporedbi s vrijednošću vlačne krutosti uzduž smjera niti. Smičnu krutost uzrokuje otpor prema promjeni kuta preplitanja osnovinih i potkinih niti, koji je uzorkovan trenjem i elastično ograničenje prema rotaciji kuta prepleta između osnove i potke.

Deformacije nastale tijekom smičnog opterećenja mogu se prikazati pomoću histereze smične sile sl. 2.21. Histereza smične sile definira se kao sila trenja koja se pojavljuje među veznim točkama sustava osnovnih i potkinih niti pri pomaku jedne niti niz drugu i preko vlačnih/kompresijskih sila, kad se sustav osnovnih i potkinih niti međusobno rasteže/stlači.

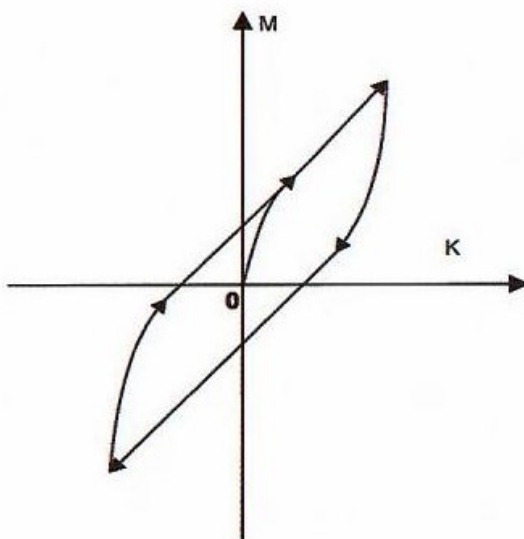


SI. 2.21 Prikaz karakteristične histereze smične sile (Geršak, 2014)

### 2. 5. 3 Savojna svojstva

Istraživanje savojnih svojstava zasniva se na osnovnom konceptu savijanja krutih tijela što se može objasniti s pomoću primjera savijanja štapa koji je u jednom smjeru izložen silama savijanja dok je sustav vanjskih sila smanjen na dvije sile koje djeluju u longitudinalnom smjeru x osi. Kod rotacije oko osi, efekt sile savijanja izložen je u svakom dijelu štapa okomito na os x. Područje iznad površine simetrije, koje sadrži neutralne sile (neutralno područje), izloženo je silama sabijanja ili kompresije, dok je njegov vanjski dio izložen silama rastezanja. Deformirana uzdužna os konzolnog nosača elastična je linija (Geršak, 2014).

Savijanje tekstilnog materijala općenito nije linearno, jer su tekstilni materijali izrađeni od pređa odnosno vlakana koja imaju veliku slobodu gibanja unutar strukture tkanja ili pletiva. Zbog fleksibilnosti tekstilnih materijala i unutarnjeg trenja među vlaknima koja su neposredno povezana s gibanjem, tkanine se ponašaju nelinearno tijekom savijanja, te tako svaki tekstilni materijal ima specifičnu histerzu momenta savijanja, sl. 2.22 (Geršak, 2014).



**Sl. 2.22** Prikaz karakteristične histereze momenta savijanja, K - zakrivljenost) i M - moment savijanja (Geršak, 2014)

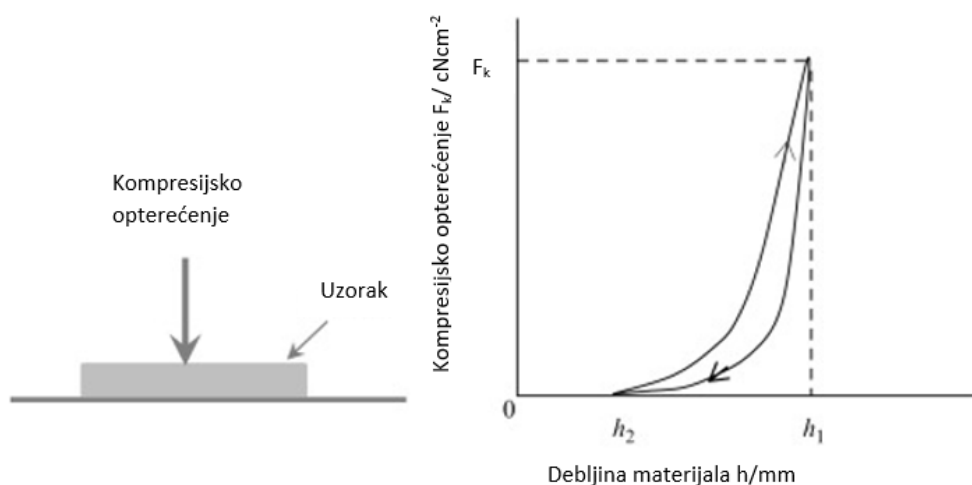
Parametri koji karakteriziraju ponašanje tkanina prilikom savijanja su njihova krutost savijanja (B) i fleksija krutosti, te pripadajuće histereze, koje su u stvari mjerilo relaksacije. Savojna svojstva imaju značajan utjecaj na sposobnost oblikovanja tkanina, opip, ponašanje pri drapiranju te očuvanje nabora (Geršak, 2014).

#### 2. 5. 4 Kompresijska svojstva

Kompresijskim svojstvima opisuje se ponašanje materijala kod kompresijskog opterećenja koje djeluje okomito na plošnu tekstiliju (Geršak, 2014). Može se još definirati kao smanjenje početne debljine tekstilnog materijala koje se događa pri povećanju kompresijskog opterećenja. Kompresija se može izraziti kao defromacija, odnosno omjer između razlike u debljini tekstilnog materijala mjerne pri dva različita pritiska i početne debljine. Omjer opterećenja (razlike u između manjeg i većeg kompresijskog opterećenja) i deformacije daje Youngov modul teksilnog materijala u smjeru normale na površinu tekstilnog materijala (Pierce, 1930).

Ponašanje tekstilnog materijala pri djelovanju kompresijskog opterećenja i rasterećenja općenito se opisuje odnosom između primijenjene sile po jedinici površine i debljine tkanine, a prikazuje se histereznom krivuljom, sl. 2.23 (odnos između debljine  $h/\text{mm}$  i kompresijskog opterećenja  $F/\text{cN cm}^{-2}$ ) (Murthyguru, 2005).





**SI. 2.23** Prikaz ovisnosti kompresijske sile i deformacije tijekom opterećivanja i rasterećivanja mjernog uzorka

Povezanost između debljine  $h$  i kompresijskog opterećenja  $F_k$ , nije linearna, već se ona prikazuje slijedećim izrazom (2.4) (Geršak, 2014):

$$h = \frac{k}{\sqrt[3]{F_k}} \quad (2.4)$$

Gdje je:

$h$  - debljina tekstilnog materijala, mm,  
 $k$  - konstanta proporcionalnosti,  
 $F_k$  – kompresijska sila na jedinicu površine, cN

Svojstva kompresije obično se koriste za opisivanje punoće, stišljivosti/kompresibilnost tekstilnog plošnog proizvoda, te utječu na oblikovanje odjevnog predmeta.

## 2. 6 Izračun gustoće energije po volumenu kod visokotehnoloških tehnika spajanja

Na temelju definiranih parametara spajanja kojima su postignuti kvalitetni i pozitivno ocjenjeni spojevi za svaki uzoraka materijala bit će izračunata količina energije koja je utrošena prilikom spajanja.

### 2. 6.1 Izračun gustoće energije kod ultrazvučnog spajanja

Izračun gustoće energije po volumenu za svaki parametar ultrazvučnog spajanja i za svaki uzorak materijala bit će izračunati i prikazani.

Prma izrazu 2.5 izračunato je vrijeme spajanja na duljini spoja od 0,2 m.

$$t = \frac{l_s}{v} \quad (2.5)$$

Gdje je:

- t – vrijeme spajanja (s)
- $l_s$  – duljina spoja (m)
- v – brzina spajanja (m/s).

Energija potrebna za spajanje izračunava se prema izrazu:

$$P_s = \frac{E}{t} \quad (2.6)$$

$$E = P_s \cdot t \quad (2.7)$$

Gdje je:

- E - energija prilikom spajanja (W s)
- $P_s$  - snaga ultrazvučnog generatora (W)
- t – vrijeme ultrazvučnog spajanja (s).

Gustoća energije po volumenu se računa prema izrazu:

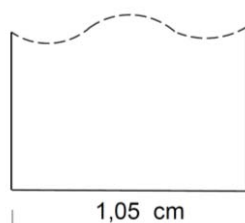
$$E_V = \frac{P_s \cdot t}{\check{s}_s \cdot l_s \cdot h_{2m}} = \frac{E}{\check{s}_s \cdot l_s \cdot h_{2m}} \quad (2.8)$$

Gdje je:

- $E_V$  – gustoća energije po volumenu (W s cm<sup>-3</sup>)
- $P_s$  – snaga ultrazvučnog spajanja (W)

$t$  – vrijeme ultrazvučnog spajanja (s)  
 $E$  – energija prilikom spajanja (W s)  
 $\mathring{s}_s$  – širina sonotrode (cm)  
 $l_s$  – duljina spoja (cm)  
 $h_{2m}$  – debljina dva sloja materijala (cm).

Širina sonotrode kod spajanja svih uzoraka materijala je ista i iznosi 1,05 cm sl. 2.24.



SI. 2.24 Prikaz širine sonotrode

## 2.6.2 Izračun gustoće energije kod visokofrekventnog spajanja

Izračun gustoće energije po volumenu za svaki parametar visokofrekventnog spajanja i za svaki uzorak materijala proveden je i prikazan u nastavku rada.

Električni rad ( $W$ ) ovisi o naponu ( $U$ ), jakosti struje ( $I$ ) i vremenu ( $t$ ), izraz 2.9:

$$W = U \cdot I \cdot t \quad (2.9)$$

Gdje je:

$W$  – električni rad (J) ili (Ws)

$U$  – napon (V)

$I$  – jakost anodne struje (A)

$t$  – vrijeme (s).

Električna snaga,  $P$  je električni rad realiziran u jedinici vremena, a jednadžba je dana u izrazima od 2.10 do 2.12.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = I \cdot U \quad (2.10)$$

$$P = I^2 \cdot R \quad (2.11)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (2.12)$$

Gdje je:

P – električna snaga (W)

I – jakost anodne struje (A)

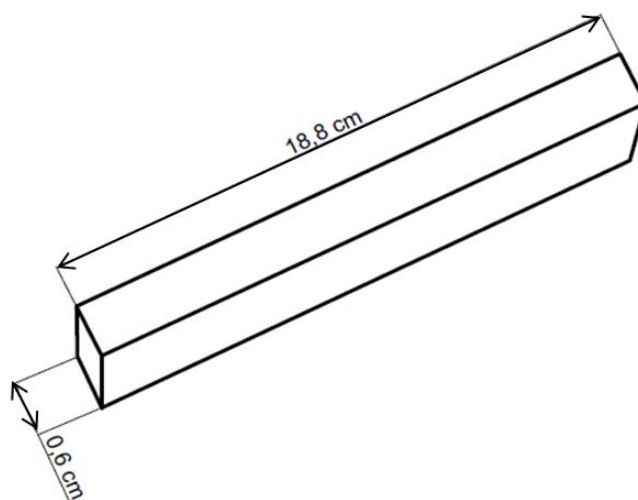
U – napon (V)

R – otpor ( $\Omega$ ).

Električnu snagu koja je potrebna za visokofrekventno spajanje izračunava se prema izrazu 2.13:

$$P = \frac{W}{S} \quad (2.13)$$

Površina elektrode, S iznosi  $11,28 \text{ cm}^2$ ; a dimenzije su prikazane na sl. 2.25.



#### SI. 2.25 Prikaz dimenzija gornje visokofrekventne elektrode

Otpor (R) se izračunava prema izrazu 2.14:

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (2.14)$$

Gdje je:

P – električna snaga (W)

I – jakost anodne struje (A)

R – otpor ( $\Omega$ ).

Napon (U) izračunavamo prema izrazu 2.15:

$$U = \sqrt{P \cdot R} \quad (2.15)$$

Gdje je:

P – električna snaga (W)

U – napon (V)

R – otpor ( $\Omega$ ).

Gustoća energije po volumenu se računa prema izrazu 2.16.

$$E_V = \frac{U \cdot I \cdot t}{S \cdot h_{2m}} = \frac{W}{S \cdot h_{2m}} \quad (2.16)$$

Gdje je:

U – napon (V)

I – jakost anodne struje (A)

t – vrijeme (s)

S – površina gornje visokofrekventne elektrode ( $\text{cm}^2$ )

$h_{2m}$  – debljina dva sloja materijala (cm)

W – električni rad (W s).

## 2.7 Satistička obrada podataka

Statističkom obradom podataka računate su slijedeće vrijednosti: aritmetička sredina A, standardna devijacija  $\sigma$ , koeficijent varijacije CV, koeficijent korelacije r, jednačba multiple regresije  $\hat{Y}$  i koeficijent determinacije  $r^2$ .

Aritmetička sredina A, definira se kao prosječna vrijednost dobivena kao zbroj svih vrijednosti podijelimo s njihovim brojem, a određuje se prema izrazu (Papić, 2005):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.17)$$

gdje je:  $x_i$ - vrijednost mjerenja

$n$  - broj mjerenja

Standardna devijacija  $\sigma$ , definirana je kao prosječno odstupanje od aritmetičke sredine, a izračunava se prema izrazu (Papić, 2005):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - A)^2}{n}} \quad (2.18)$$

Koeficijent varijacije CV, je relativna mjera disperzije i predstavlja postotni udio standardne devijacije u odnosu na vrijednost aritmetičke sredine, a izračunava se prema izrazu (Papić, 2005):

$$CV = \frac{\sigma}{A} \times 100 \quad (2.19)$$

Korelacija predstavlja međusobnu povezanost između različitih pojava predstavljenih vrijednostima dvaju varijabli. Pri tome povezanost znači da je vrijednost jedne varijable moguće s određenom vjerojatnošću predvidjeti na osnovi saznanja o vrijednosti druge varijable.

Koeficijent korelacije je brojčani pokazatelj jakosti i smjera veze između varijabli, te poprima vrijednosti između -1 i 1. Pozitivan koeficijent korelacije ukazuje na proporcionalnost nezavisne varijable X i zavisne varijable Y, tj. rast jedne varijable uzrokuje rast druge varijable. Negativan koeficijent korelacije ukazuje na obrnutu proporcionalnost.

Vrijednosti koeficijenta ukazuju na jačinu povezanosti između varijabli (tab. 2.6) (Petz, 1981).

Tab. 2.6 Jačina povezanosti između varijabli u ovisnosti o apsolutnoj vrijednosti koeficijenta korelacije:

Vrijednost koeficijenta korelacije	Jačina povezanosti između varijabli
$ r  = 1$	potpuna korelacija
$0,8 \leq  r  < 1$	jaka korelacija
$0,5 \leq  r  < 0,8$	srednje jaka korelacija
$0,2 \leq  r  < 0,5$	relativno slaba korelacija
$0 \leq  r  < 0,2$	nezatna korelacija
$ r  = 0$	potpuna odsutnost korelacije

Višestruka linearna regresijska analiza proučava ovisnost između zavisne varijable (Y) i većeg broja nezavisnih varijabli ( $X_i$ ). Cilj regresijske analize je da se veza između promatranih varijabli izrazi odgovarajućim analitičko-matematičkim izrazom, tj. regresijskim modelom. Oblik jednadžbe modela višestruke regresije ( $\hat{Y}$ ) s više nezavisnih varijabli ( $k=1, 2, \dots$ ) prikazan je izrazom (2.20) (Papić, 2005):

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k \quad (2.20)$$

- a - konstantan član tj. očekivana vrijednost zavisne varijable (Y) kada je vrijednost svih nezavisnih varijabli ( $X_i, i=1,2,\dots,k$ ) nula
- b - regresijski koeficijent koji pokazuje prosječnu promjenu zavisne varijable (Y) kada se odgovarajuća nezavisna varijabla ( $X_i$ ) poveća za jedan, a ostale varijable su nepromijenjene.

Koeficijent determinacije ( $r^2$ ) definira se kao omjer sume kvadrata odstupanja, protumačene regresijom i sume kvadrata ukupnih odstupanja. U okviru regresijske analize koeficijent determinacije interpretira se kao proporcija veze između promatranih varijabli objašnjena primijenjenim regresijskim modelom.

### 3. EKSPERIMENTALNI RAD

Cilj ovog doktorskog rada je da se utvrde optimalni procesni parametri tehnika spajanja, a proučavane su tehnika ultrazvučnog spajanja, visokofrekventnog spajanja, toplinskog spajanja kondukcijom i konvekcijom, s obzirom na dio specifičnih zahtjeva suvremene zaštitne i inteligentne odjeće. Do sad najčešće korištena konvencionalna tehnika šivanjem, ne može zadovoljiti nove tehnološke potrebe i svojstva spojeva na odjeći specifičnih namjena. Stoga će se u nastavku rada biti prikazane mogućnosti spajanja dijelova spomenute odjeće s pomoću visokotehnoloških tehnika spajanja koje se međusobno razlikuju s aspekta dovođenja i/ili iniciranja topline (tehnike ultrazvučnog, visokofrekventnog, spajanja vrućim klinom i vrućim zrakom, te kombinirana tehnika šivanja i spajanja vrućim zrakom adhezivne trake po površini šava).

Hipotezama istraživanja želi se utvrditi činjenica da se suvremena zaštitna i inteligentna odjeća ne mogu spajati samo konvencionalnom tehnikom, već se moraju koristiti i visokotehnološke tehnike spajanja.

Cilj i hipoteze:

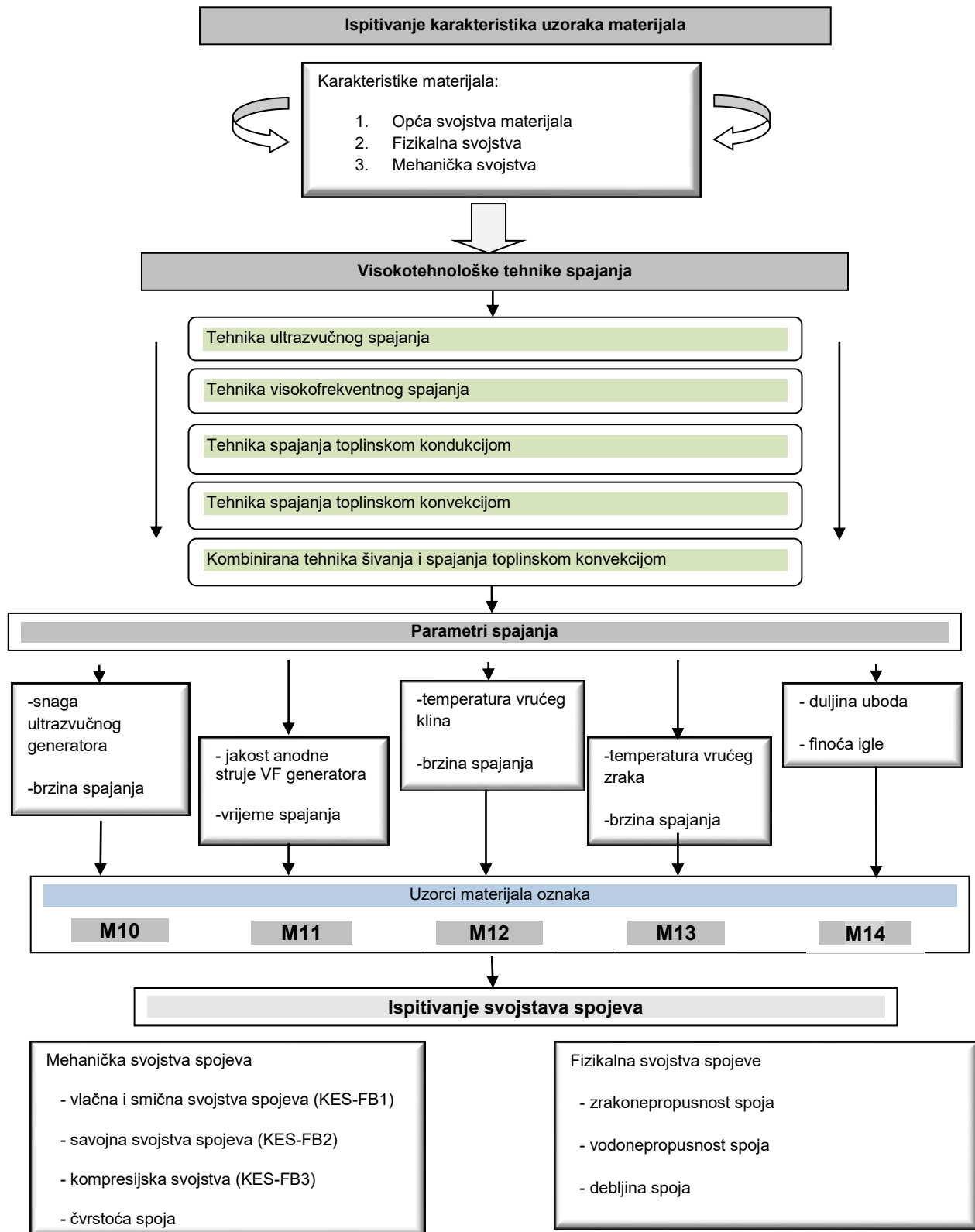
- Na svojstva spojeva dijelova suvremene zaštitne i inteligentne odjeće postavljaju se novi uvjeti koji se ne mogu postići dosadašnjim poznatim konvencionalnim tehnikama spajanja, pa je stoga nužna upotreba novih visokotehnoloških tehnika spajanja.
- Provedenim istraživanjima cilj je da se utvrdi primjerenost svake visokotehnološke tehnike spajanja, optimalni procesni parametri spajanja i karakteristična obilježja spojeva.
- Nove spoznaje sačinjavati će fundus znanja koji je potreban da bi se potaknuo daljnji razvoj suvremene zaštitne i inteligentne odjeće, kao vrijednih uporabnih predmeta visoke dodane vrijednosti u kojima je potrebno primijeniti nova i stoga znanja te proizvodne metode i opremu za njihovu proizvodnju.

Na osnovu pregleda tematike, svrhe i definiranih hipoteza doktorskog rada, u ovom poglavlju bit će opisani i predstavljeni:

1. plan eksperimenta,
2. opis upotrebljavanih uzoraka materijala (oznaka M10, M11, M12, M13, i M14),
3. opis korištenih strojeva za izradu spojeva pri definiranim parametrima spajanja (stroj za ultrazvučno spajanje, stroj za visokofrekventno spajanje, kombinirani stroj za spajanje vrućim klinom i vrućim zrakom; univerzalni šivaći stroj,
4. opis korištene mjerne opreme i instrumenata za ispitivanje svojstva spojeva i
5. ocjena spoja (1.-faza i 2.-faza)

Izrada uzoraka spojeva i eksperimentalna mjerenja u okviru ovog istraživanja napravljena su u skladu s planom eksperimenta koji je prikazan na sl. 3.1. Istraživana su svojstva spojeva izrađena na pet odabranih uzoraka materijala (oznake M10, M11, M12, M13 i M14) od kojih se izrađuje zaštitna odjeća i dijelovi inteligentnog odjevnog predmeta. Spojevi su izrađeni upotrebom četiri visokotehnološke tehnike spajanja i kombiniranom tehnikom šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom adhezivne trake na šav, pri definiranim parametrima spajanja. Strojevi za spajanje smješteni su u Laboratoriju za procesne parametre u Zavodu za odjevnu tehnologiju, Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta u kojem su napravljeni i dio ispitivanja svojstava spojeva. Uzorci materijala i spojeva ispitivani standardiziranim metodama mjerenja čvrstoće spoja u Zavodu za materijale, vlakna i ispitivanje tekstila, Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta. Napravljena su ispitivanja uzoraka materijala i spojeva na KES-FB mjernim uređajima u Laboratoriju za oblačilno inženjstvo Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru, Slovenija.







SI. 3.1 Plan eksperimenta


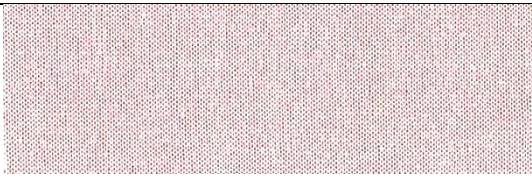
### 3. 1 Upotrebljavani uzorci materijala

Tekstilni materijali koji su korišteni za izradu uzoraka spojeva, koriste se za izradu specijalne zaštitne odjeće i za pojedinih dijelova inteligentne odjeće. Uzorci materijala su PU folija i naslojena pletiva, te će u nastavku rada u tab. od 3.1 do tab. 3.5 bit će prikazane njihove osnovne karakteristike, te fizikalna i mehanička svojstva.


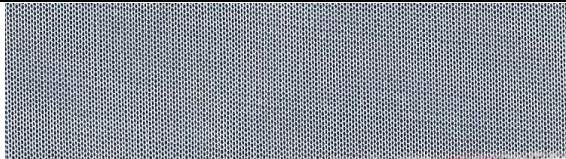
Tab. 3.1 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M10

Svojstva materijala		Materijal oznake M10	
		uzdužni smjer	poprečni smjer
Izgled materijala	Lice materijala		
	Naličje materijala		
Sirovinski sastav	%	PU 100 % folija	
Masa	m / gm <sup>-2</sup>	217,13	
Debljina	d /mm	0,081	
Zrakopropusnost	Q /cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,000	
Vlačna svojstva	LT	1,101	1,192
	WT / cN cm	14,70	15,71
	RT / %	92,50	88,34
Smična svojstva	G / cN (°) <sup>-1</sup>	12,85	12,68
	2HG / cN	9,30	9,80
	2HG5 / cN	16,58	16,30
Savojna svojstva	B / cN cm <sup>2</sup>	0,0903	0,0961
	2HB / cN cm	0,0272	0,0294
Kompresijska svojstava	LC	0,287	
	WC/ cN cm	0,013	
	RC / %	99,88	
	h <sub>0</sub> /mm	0,243	
	h <sub>m</sub> / mm	0,222	
Prekidna sila	F <sub>max</sub> /N	405,40	881,92
Prekidno istezanje	ε [%]	445,87	902,87

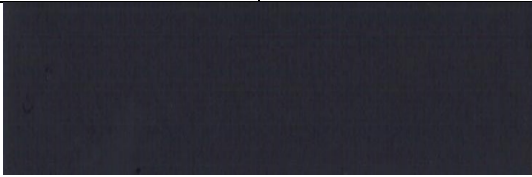

Tab. 3.2 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M11

Svojstva materijala		Materijal oznake M11	
		uzdužni smjer	poprečni smjer
Izgled materijala	Lice materijala		
	Naličje materijala		
Sirovinski sastav	%	47% PU nasloj 53% PES pletivo	
Masa	m /gm <sup>-2</sup>	151,49	
Debljina	d /mm	0,447	
Zrakopropusnost	Q /cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,000	
Vlačna svojstva	LT	0,843	1,119
	WT / cN cm	53,50	61,00
	RT / %	40,56	55,41
Smična svojstva	G / cN (°) <sup>-1</sup>	4,47	4,07
	2HG / cN	6,15	5,85
	2HG5 / cN	8,15	8,17
Savojna svojstva	B / cN cm <sup>2</sup>	0,0393	0,0344
	2HB / cN cm	0,0533	0,0386
Kompresijska svojstava	LC	0,576	
	WC/ cN cm	0,136	
	RC / %	62,93	
	h <sub>0</sub> /mm	0,703	
	h <sub>m</sub> / mm	0,672	
Prekidna sila	F <sub>max</sub> /N	239,70	326,51
Prekidno istežanje	ε [%]	390,80	171,03



Tab. 3.3 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M12

Svojstva materijala		Materijal oznake M12	
		uzdužni smjer	poprečni smjer
Izgled materijala	Lice materijala		
	Naličje materijala		
Sirovinski sastav	%	50% PU nasloj 50% PES pletivo	
Masa	m /gm <sup>-2</sup>	184,030	
Debljina	d /mm	0,285	
Zrakopropusnost	Q /cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,000	
Vlačna svojstva	LT	0,623	0,752
	WT / cN cm	5,25	11,50
	RT / %	69,52	62,77
Smična svojstva	G / cN (°) <sup>-1</sup>	3,86	3,93
	2HG / cN	2,63	2,50
	2HG5 / cN	6,03	6,15
Savojna svojstva	B / cN cm <sup>2</sup>	0,0529	0,0212
	2HB / cN cm	0,0217	0,0097
Kompresijska svojstava	LC	0,519	
	WC/ cN cm	0,062	
	RC / %	67,92	
	h <sub>0</sub> /mm	0,464	
	h <sub>m</sub> / mm	0,416	
Prekidna sila	F <sub>max</sub> /N	189,50	245,4
Prekidno istežanje	ε [%]	237,20	121,54

Tab. 3.4 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M13

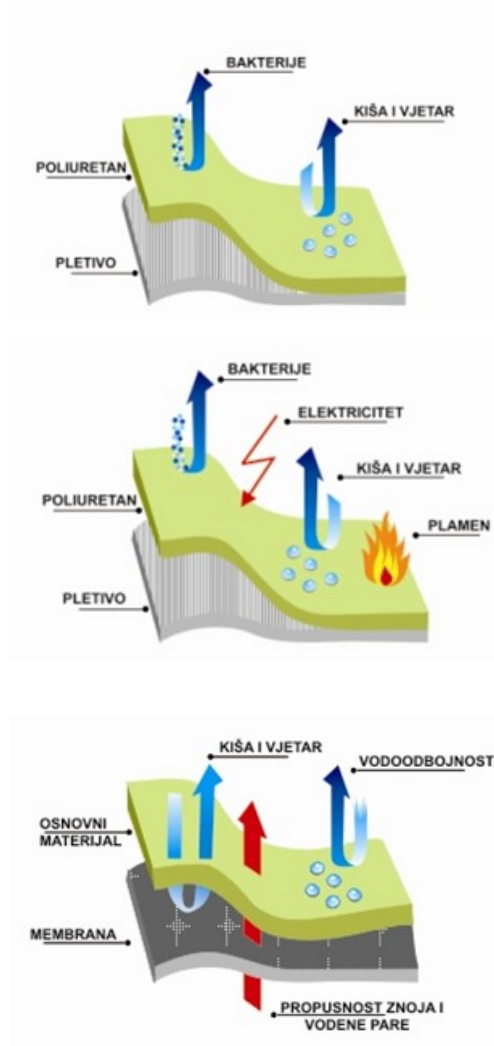
Svojstva materijala		Materijal oznake M13	
		uzdužni smjer	poprečni smjer
Izgled materijala	Lice materijala		
	Naličje materijala		
Sirovinski sastav	%	47% PU nasloj 53% PA pletivo	
Masa	m /gm <sup>-2</sup>	200,26	
Debljina	d /mm	0,554	
Zrakopropusnost	Q /cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,000	
Vlačna svojstva	LT	0,766	0,860
	WT / cN cm	7,30	14,80
	RT / %	58,90	62,84
Smična svojstva	G / cN (°) <sup>-1</sup>	4,16	4,13
	2HG / cN	3,17	3,30
	2HG5 / cN	5,00	5,00
Svojna svojstva	B / cN cm <sup>2</sup>	0,0493	0,0366
	2HB / cN cm	0,0536	0,0522
Kompresijska svojstva	LC	0,567	
	WC/ cN cm	0,169	
	RC / %	56,24	
	h <sub>0</sub> /mm	0,805	
	h <sub>m</sub> / mm	0,689	
Prekidna sila	F <sub>max</sub> /N	211,00	292,3
Prekidno istezanje	σ [%]	318,43	165,11

Tab. 3.5 Prikaz osnovnih karakteristika, te fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka materijala oznake M14

Svojstva materijala		Materijal oznake M14	
		uzdužni smjer	poprečni smjer
Izgled materijala	Lice materijala		
	Naličje materijala		
Sirovinski sastav	%	58% PU nasloj 42% PES pletivo	
Masa	m /gm <sup>-2</sup>	120,94	
Debljina	d /mm	0,193	
Zrakopropusnost	Q /cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,000	
Vlačna svojstva	LT	1,033	0,888
	WT / cN cm	55,50	46,20
	RT / %	66,58	76,41
Smična svojstva	G / cN (°) <sup>-1</sup>	4,20	3,88
	2HG / cN	2,63	1,97
	2HG5 / cN	6,55	6,02
Savojna svojstva	B / cN cm <sup>2</sup>	0,0366	0,0173
	2HB / cN cm	0,0139	0,0092
Kompresijska svojstava	LC	0,475	
	WC/ cN cm	0,042	
	RC / %	101,59	
	h <sub>0</sub> /mm	0,373	
	h <sub>m</sub> / mm	0,337	
Prekidna sila	F <sub>max</sub> /N	159,17	150,29
Prekidno istezanje	ε [%]	203,03	111,58

Uzorci materijala koji su korišteni za izradu spojeva razlikuju se prema sirovinskom sastavu, debljini i ostalim karakteristikama. Na sl. 3.2 slikovni je prikaz svakog od uzoraka materijala i opis njihovih karakteristika i za koju namjenu se upotrebljavaju.

Materijal oznake M10 je PU folija, koja posjeduje vrlo dobra svojstva, ima visoku UV i hidrolitičku postojanost, te pokazuje vrlo dobra svojstva prilikom spajanja svim tehnikama spajanja.



### Materijali oznake **M11** i **M14**

Namijenjeni su za izradu zaštitnih odjevnih predmeta za nošenje u nepovoljnim vremenskim uvjetima (kiše i vjetra), te ima antibakterijsku obradu.

### Materijal oznake **M12**

Namijenjen je za izradu zaštitnih odjevnih predmeta gdje za nosioca postoji potencijalna opasnost od vatre.

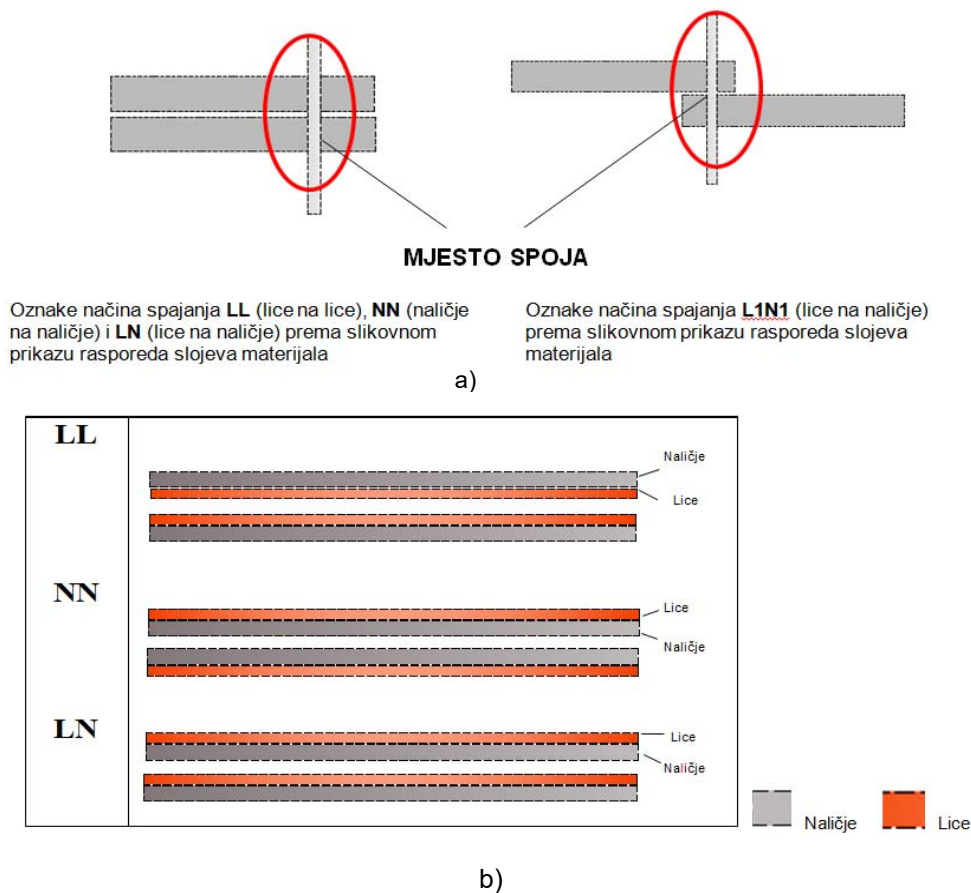
### Materijal oznake **M13**

Namijenjen je za izradu zaštitnih odjevnih predmeta za nošenje u nepovoljnim vremenskim uvjetima (kiše i vjetra) uz istovremeno propuštanje znoja i vlage.

Sl. 3.2 Slikovni prikaz uzoraka materijala (oznake M11, M12, M13 i M14) i opis njihove namjene ([www.cateks.hr](http://www.cateks.hr))

### 3.1.1. Priprema uzoraka materijala za spajanje

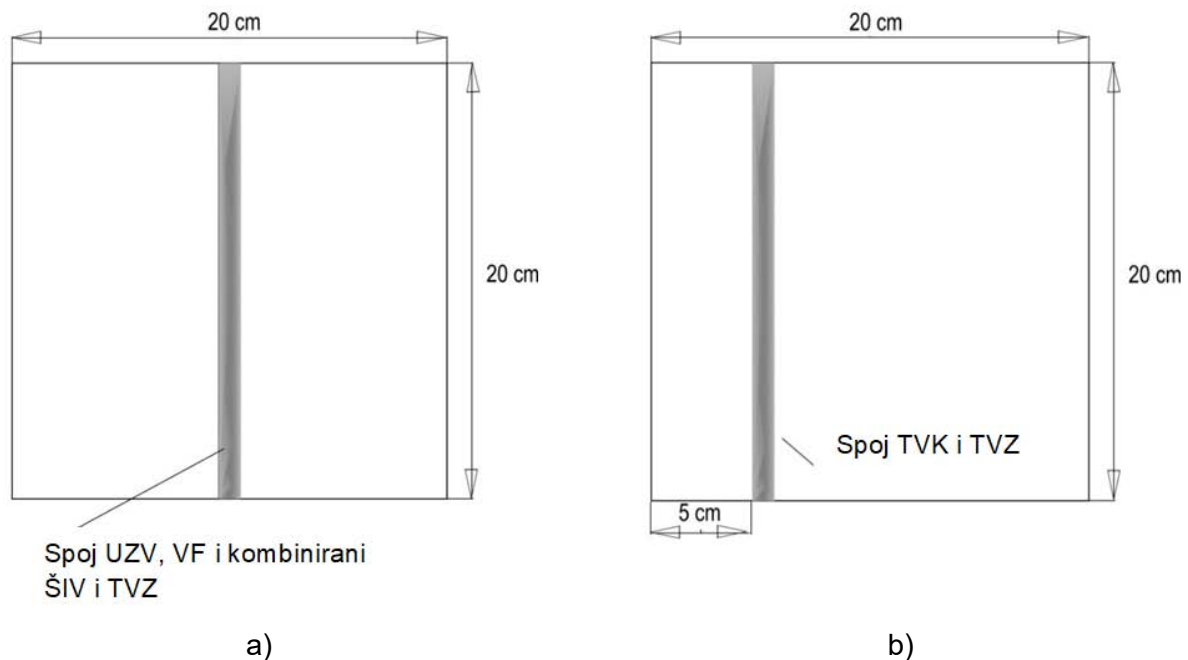
Za izradu spojeva spomenuti uzorci materijala (oznake M10, M11, M12, M13 i M14) spajani su u dva sloja i to prema rasporedu slojeva materijala prikazanom na sl. 3.3 i to tako da su slojevi materijala postavljeni lice na lice spajanog materijala (oznaka LL) naličje na naličje spajanog materijala (oznaka NN), lice na naličje spajanog materijala (oznaka LN) i lice na naličje spajanog materijala (oznaka L1N1) ali prema slikovnom prikazu rasporeda slojeva materijala. Uzorci su spajani u x smjeru i u y smjeru. Oznaka x odnosi se na spoj koji je izrađen okomito na smjer nizova pletiva, a oznaka y kada je spoj izrađen u smjeru nizova pletiva što se odnosi na uzorke naslojenih pletiva oznaka M11, M12 i M13. Kad je riječ o uzorku materijala oznake M10 (folija) oznaka x označava spoj koji je spojen po širini folije, a oznaka y označava spoj koji je spojen po duljini folije.



**Sl. 3.3** Prikaz a) rasporeda slojeva materijala za izradu uzoraka spojeva i b) načina spajanja slojeva materijala (oznaka LL, NN, LN)



Uzorci dimenzija 20 x 20 cm spajani su visokotehnološkim tehnikama spajanja i kombiniranom tehnikom šivanja i spajanja vrućim zrakom adhezivne trake po šavu. Uzorci materijala spajani tehnikom ultrazvučnog (UZV), visokofrekventnog spajanja (VF) i kombinacijom šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom (vrućim zrakom, TVZ), spojeni su po sredini izrezanog uzorka (10 cm od ruba materijala) kao što je prikazano na sl. 3.4a) i to na način LL (lice na lice), NN (naličje na naličje), LN (lice na naličje) i L1N1 (lice na naličje). Uzorci materijala spajani tehnikom toplinskom kondukcijom (vrućim klinom, TVK) i toplinskom konvekcijom (vrućim zrakom, TVZ) ostvareni su na način da su slojevi materijala spajani 5 cm od ruba materijala sl. 3.4b). Zbog konstrukcijskih karakteristika stroja za spajanje toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom nije bilo moguće napraviti spoj po sredini uzorka kao kod preostale tri tehnike spajanja.



**SI. 3.4** Prikaz dimenzije uzorka materijala i pozicija spoja a) za uzorke spajane ultrazvučnom, visokofrekventnom tehnikom i kombiniranom tehnikom šivanja i spajanja adhezivne trake toplinskom konvekcijom na šav i b) za uzorke spajane toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom

### 3.2 Strojevi za spajanje visokotehnološkim tehnikama

Za izradu spojeva korišteni su stroj za ultrazvučno spajanje, stroj za visokofrekventno spajanje, kombinirani stroj za spajanje toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom i univerzalni šivaći stroj. Uzorci materijala spajani su pri definiranim parametrima spajanja za svaku od tehnika spajanja.

#### 3.2.1 Stroj za ultrazvučno spajanje

Ultrazvučni stroj namijenjen je za kontinuirano spajanje termoplastičnih polimernih materijala pomoću ultrazvučne energije koja se prenosi preko sonotrode u strukturu materijala koji se spaja.

Za izradu uzoraka spajanih tehnikom ultrazvučnog spajanja korišten je stroj tt. Pfaff oznake Seamsonic 8310-003, sl. 3.5.

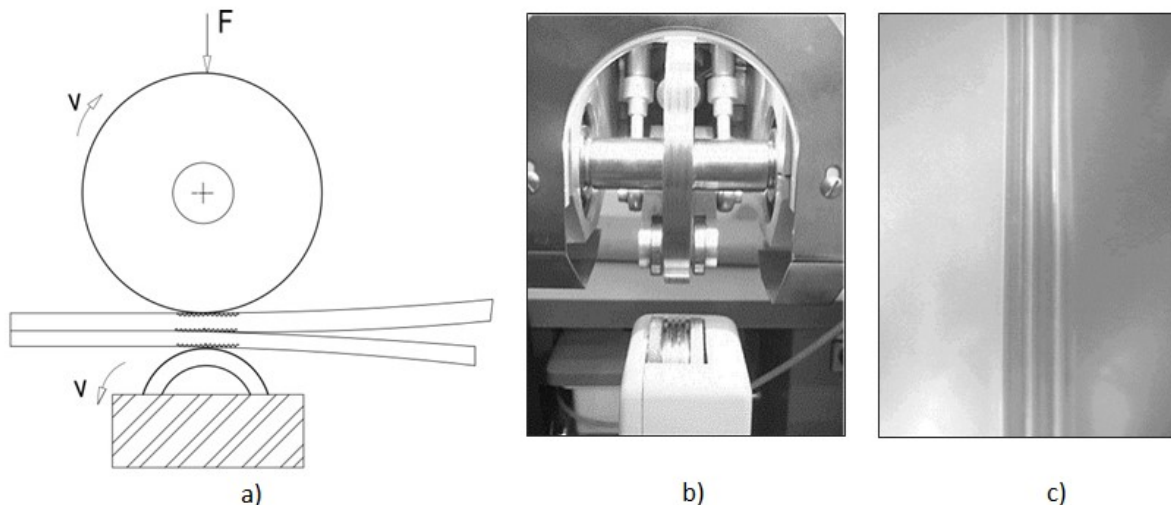


**Sl. 3.5** Stroj za ultrazvučno spajanje proizvođača Pfaff oznake Seamsonic 8310-003

Stroj za ultrazvučno spajanje radi pri snazi ultrazvučnog generatora do 400 W i frekvenciji od 35 kHz. Sonotroda izrađena od slitine aluminija i titana prenosi ultrazvučne titraje na materijal

prilikom spajanja. Promjer sonotrode je 106 mm, širina sonotrode je 1,05 mm, a sila njenog pritiska na materijal u zoni spajanja je 0-800 N. Donji protuvaljak, promjera 65 mm, ima zadaću transporta materijala uslijed spajanja. Izgled spoja ovisi o obliku gravure na površini oboda protuvaljka. Amplituda na vrhu sonotrode iznosi oko 60  $\mu\text{m}$  (Firšt Rogale i sur., 2014). Uzorci su spajani trolinijskim uzorkom na gravurnom protuvaljku, sl. 3.4b), čija širina iznosi 8 mm. Stroj je opremljen procesnim mikroracionalom koji ima ekran osjetljiv na dodir, na čijem sučelju je glavni izbornik s podizbornicima. Pomoću postavka odabiru se parametri spajanja, brzina spajanja koja je u dm/min i amplituda titraja koja je izražena u postotku koji se preračunava u snagu ultrazvučnog spajanja ovisno o snazi ultrazvučnog generatora. Kao primjer ako je amplituda titraja podešena na 50 %, što bi značilo 50 % od 400 W, da je snaga pri tim parametrima ultrazvučnog spajanja 200 W. U podizborniku postoje opcije kao što su odgoda početka titraja sonotrode i transporta materijala (*eng. Delays*), mogućnost nastavka transporta materijala nakon završetka titraja sonotrode (*eng. Run Out*), te mogućnost da se nakon završetka titraja sonotrode, za nekoliko mm vrati unatrag transport materijala (*eng. Autorevers*). Brzina spajanja je od minimalne 0,6 m/min do maksimalne 13,6 m/min (<https://www.pfaff.com>).

Na slici 3.6 dat je a) shematski prikaz ultrazvučnog spajanja, b) izgled dijela stroja i c) izgled spoja.



**Sl. 3.6** Prikaz ultrazvučnog spajanja, a) shematski prikaz spajanja, b) prikaz sonotrode i trolinijskog protuvaljka na stroju za ultrazvučno spajanje i c) izgled spoja

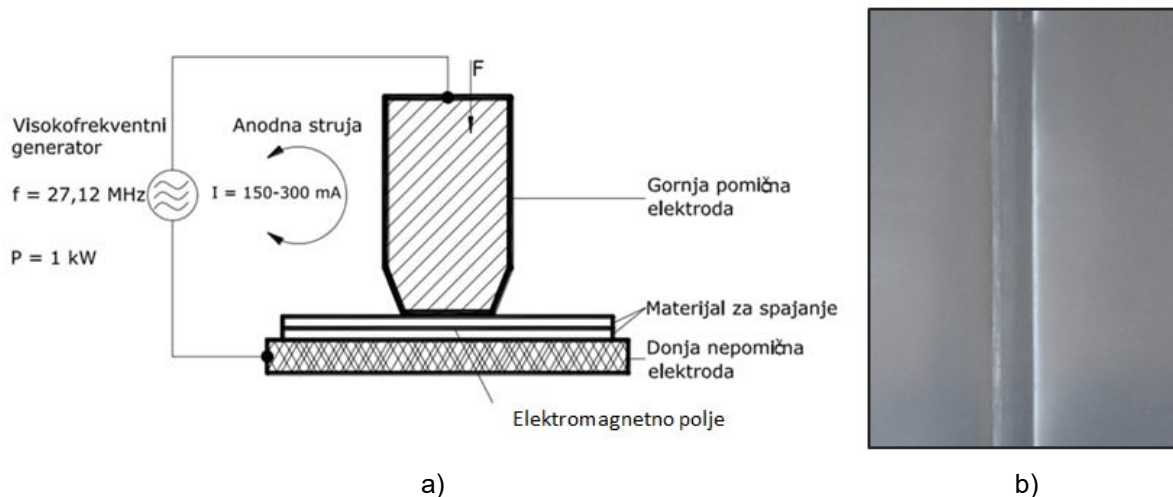
Parametri spajanja ultrazvučnom tehnikom spajanja koje je potrebno podesiti su:

- razmak između sonotrode i protuvaljka, a podešava se za svaki uzorak materijala zasebno jer ovisi o debljini uzorka materijala, a o tome ovisi pritisak sonotrode na materijal (oko 160 N),
- brzina spajanja tj. vrijeme djelovanja ultrazvučne energije i
- snaga ultrazvučnog generatora.

### 3.2.2 Stroj za visokofrekventno spajanje

Na stroju za visokofrekventno spajanje izrađeni su spojevi na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12. Uzorci materijala oznaka M13 i M14 ne spajaju se pomoću tehnike visokofrekventnog spajanja.

Za visokofrekventno spajanje korišten je diskontinuirani stroj proizvođača Siatem oznake SG6/2. Stroj posjeduje visokofrekventni oscilator koji oscilira na frekvenciji od 27,12 MHz i ima pojačalo snage od 800 W. Uzorak materijala za spajanje postavlja se između gornje (pomične) i donje visokofrekventne elektrode, sl. 3.7, te djelovanjem elektromagnetskog polja dolazi do iniciranja topline u zoni spajanja, omekšavanja i djelovanjem pritisne sile gornje visokofrekventne elektrode nastaje spoj (Rogale, Bobovčan i Firšt Rogale, 2011)



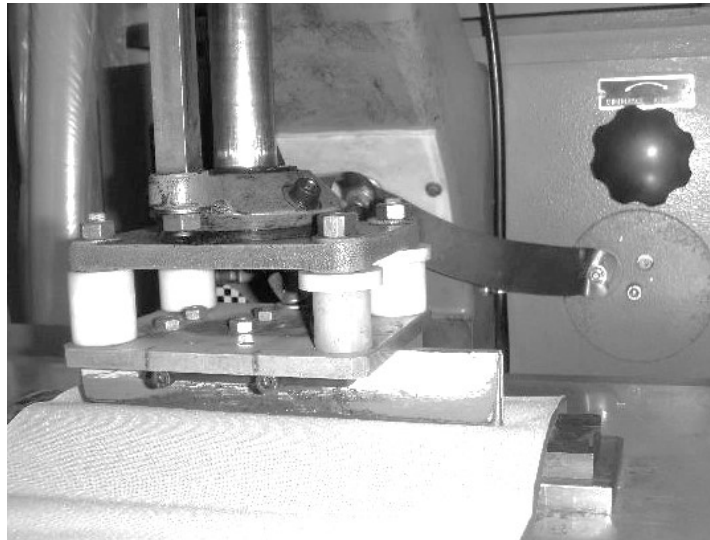
**Sl. 3.7** Spajanje visokofrekventnom tehnikom spajanja a) Shematski prikaz visokofrekventnog spajanja; b) izgled spojenog uzorka

O obliku visokofrekventne elektrode ovisi i izgled spoja. Za izradu uzoraka korištena je visokofrekventna elektroda u obliku ravne linije, a na uzorku spajanog materijala nastao je spoj

istog oblika kao i gornja visokofrekventna elektroda, sl. 3.8 b). Dimenzije gornje pomične visokofrekventne elektrode su duljina 188 mm i širina 6 mm.

Parametre koje je potrebno podesiti prije spajanja materijala su:

- jakost anodne struje,
- vrijeme djelovanja elektromagnetskog polja na termoplastični polimerni materijal i
- pritisna sila kojom djeluje gornja elektroda na materijal.

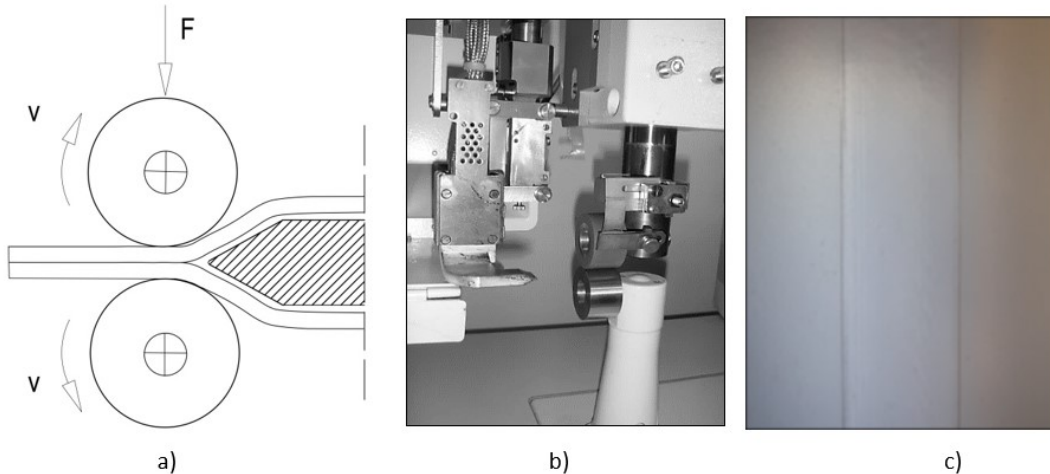


**Sl. 3.8** Prikaz dijela stroja za visokofrekventno spajanje te gornje i donje visokofrekventne elektrode

### 3.2.3 Kombinirani stroj za spajanje toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom

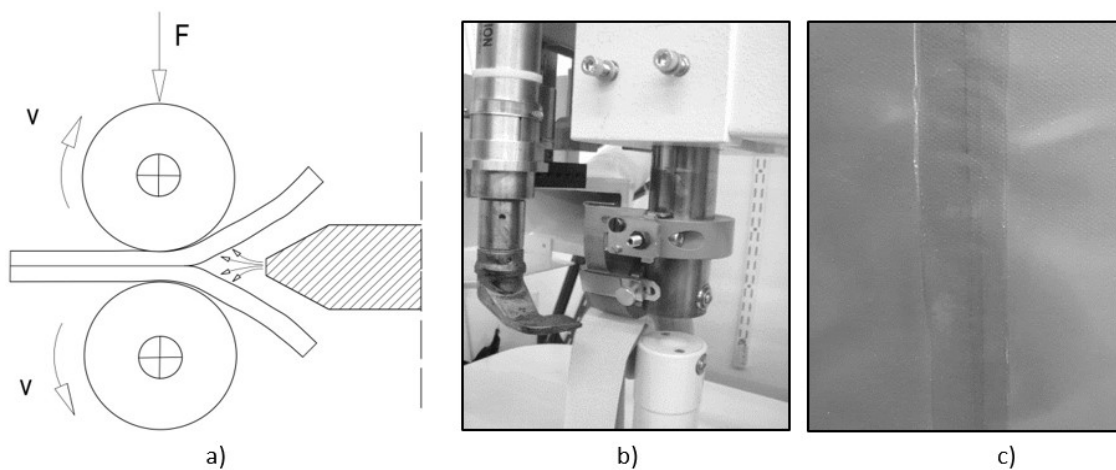
Za spajanje toplinskom kondukcijom (vrućim klinom) i toplinskom konvekcijom (vrućim zrakom) korišten kombinirani stroj tt. Pfaff oznake Weldchampion 8304-020 koji ima mogućnost zamjene grijaćeg elementa (vrući klin, sl. 3.9 ili mlaznice za vrući zrak, sl. 3.10). Kod spajanja toplinskom kondukcijom snaga stroja iznosi 1 kW, a maksimalna temperatura spajanja je do 550 °C. Kod spajanja toplinskom konvekcijom snaga je 3 kW, a maksimalna temperatura spajanja je do 650 °C. Brzina spajanja je 0-10 m/min, posmik materijala je valjčani, a širina spoja može varirati od 5 mm do 20 mm (Firšt Rogale i sur., 2014).

Spajanje toplinskom kondukcijom je kontinuirani proces, transport izvode valjci koji imaju zadaću osim transporta materijala i da određenom pritiskom silom djeluju na zagrijane slojeve termoplastičnog materijala, sl. 3.9.



**Sl. 3.9** Spajanje tehnikom toplinske kondukcije a) shematski prikaz spajanja, b) prikaz dijela stroja za spajanje i c) izgled spoja

Spajanje pomoću vrućeg zraka temelji se zagrijavanju slojeva termoplastičnog polimernog materijala na mjestu dovođenja vrućeg zraka, što uzrokuje omekšavanje termoplastičnog polimernog materijala, koji se pod djelovanjem pritiskne sile valjaka međusobno spajaju, sl. 3.10. Spajanje vrućim zrakom također je kontinuirano.



**Sl. 3.10** Spajanje tehnikom toplinske konvekcije a) shematski prikaz spajanja, b) prikaz dijela stroja za spajanje i c) izgled spoja

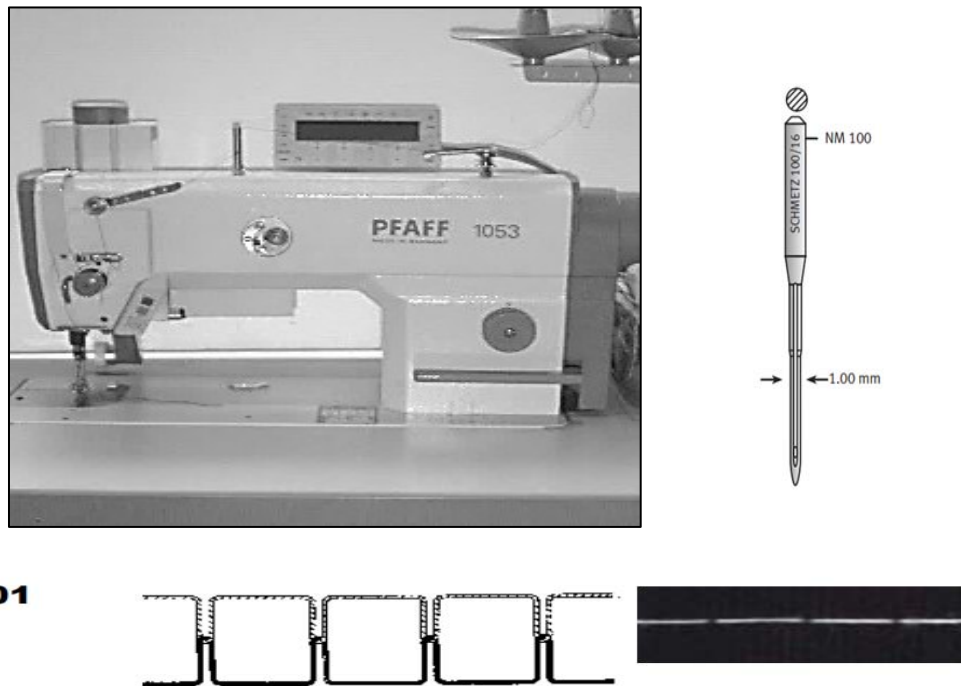
Parametri spajanja toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom koje je potrebno podesiti su:

- temperatura spajanja
- vrijeme djelovanja topline koje se određuje na temelju podešavanja brzine spajanja,
- pritisna sila transportnih valjaka,
- te kod spajanja toplinskom konvekcijom, podešavanje tlaka vrućeg zraka o kojem ovisi brzina strujanja vrućeg zraka.

### 3.2.4 Univerzalni šivaći stroj

Na univerzalnom šivačem stroju spajani su uzorci materijala (oznake M11, M12, M13 i M14) prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice). Šivaći stroj tt. Pfaff 1053, sl. 3.11 je univerzalni jednoigleni šivaći stroj koji šiva dvostrukim zrnčanim ubodom tipa 301, maksimalnom brzinom šivanja od 5500 ub/min. Maksimalna duljina uboda,  $d_u$ /mm koja se može podesiti na ovom stroju je 3 mm.

Opremljen je procesnim mikroracionalom manje skupine upravljačkih funkcija tako da može regulirati brzinu šivanja, automatski učvršćivati početak i kraj šava, podizati i spuštati pritisnu nožicu i rezati konac po završetku šivanja. Također pomoću fotoelektričkog osjetila može prepoznati kraj šava i tu se zaustaviti. Ovaj tip univerzalnog šivaćeg stroja posjeduje snažan elektronički reguliran servo-motor ugrađen u stup glave stroja i ima takav sustav ležajeva da ne zahtjeva podmazivanje (Rogale, i sur., 2011).



SI. 3.11 Univerzalni šivaći stroj tt. Pfaff 1053, šivaća igla i izgled šivanog šava (www.schmetz.com)

Parametri šivanja koji su se mijenjali kod izrade uzoraka šivanih šavova su

- duljina uboda  $d_u$ /mm od 2 mm i 3 mm i
- finoća šivaće igle od 90 Nm i 100 Nm

Konac koji je korišten za šivanje je finoće tex 3 x 14 i sirovinskog sastava 100 % PES, a šivaća igla je oznake SES s malim kuglastim vrhom.



### 3.3 Mjerna oprema

O ovom poglavlju opisana su svi mjerni uređaji i oprema koji su korišteni za ispitivanje mehaničkih i fizikalnih svojstava materijala i uzoraka spojeva spojenih visokotehnološkim tehnikama spajanja.

#### 3.3.1 KES-FB mjerni sustav

KES-FB mjerni sustav koristi se objektivno vrednovanje fizikalnih i mehaničkih svojstava materijala. Pomoću mjernog sustava KES-FB izmjerena su vlačna i smična, savojna te kompresijska svojstva uzoraka materijala i spojeva. Za mjerenja su korišteni mjerni uređaji:

- KES-FB1 mjerni uređaji za mjerenje vlačnih i smičnih svojstava
- KES-FB2 mjerni uređaji za mjerenje savojnih svojstava
- KES-FB3 mjerni uređaji za mjerenje kompresijskih svojstava
- KES-FB4 mjerni uređaji za mjerenje površinskih svojstava

Mjerni sustav pomoću odgovarajuće programske opreme omogućava vrednovanje 15 parametara mehaničkih i fizikalnih svojstava koji su prikazani u tab. 3.6. Mjerenja mehaničkih svojstava, kao što su vlačna, smična, savojna i kompresijska svojstva izvode se kod malih opterećenja do određene maksimalne sile, nakon čega se izvodi mjerenje povratnog ili reverzibilnog procesa pri jednakoj brzini rasterećenja (Geršak, 2014).

Jedinice parametara mehaničkih svojstava u tab. 3.6 su izvorne jedinice dobivene pomoću KES-FB mjernog sustava, gdje je opterećenje izraženo kao sila na jedinicu dužine, odnosno širine mjernog uzorka (20 cm) Mjerenja uzoraka provedena su u standardnim uvjetima ispitivanja: relativna vlažnost zraka  $65\pm 2\%$  i temperatura prostorije  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Za ispitivanje uzoraka spojeva pripremljeni su uzorci dimenzija 20 x 20 cm, s time da se spoj nalazi u sredini uzorka (10 cm od ruba) kao na prikazu, sl. 3.4 a). Ispitivan je jedan uzorak spoja na svakom mjernom uređaju.

Tab. 3.6 Pregled parametara mehaničkih i fizikalnih svojstava, određenih pomoću KES-FB mjernog sustava (Geršak, 2014)

Mjerna oznaka	Mjerno svojstvo	Parametri	Oznaka	Jedinica*
KES-FB1	Vlačna svojstva	- deformacijski rad - sposobnost oporavka - linearnost krivulje	WT RT LT	cN cm cm <sup>-2</sup> % -
	Smična svojstva	- smična krutost - visina histereze smične sile pri ± 0,5° - visina histereze smične sile pri ± 5,0°	G 2HG 2HG5	cN cm <sup>-1</sup> st <sup>-1</sup> cN cm <sup>-1</sup> cN cm <sup>-1</sup>
KES-FB2	Svojstva savijanja	- krutost savijanja - histereza momenta savijanja	B 2HB	cN cm <sup>2</sup> cm <sup>-1</sup> cN cm cm <sup>-1</sup>
KES-FB3	Svojstva kompresije	- deformacijski rad - sposobnost oporavka - linearnost kompresijske krivulje	WC RC LC	cN cm cm <sup>-2</sup> % -
		-debljina plošnog proizvoda -masa na jedinicu površine	h W	mm mg cm <sup>-2</sup>
KES-FB4	Površinska svojstva: trenje i hrapavost	- koeficijent površinskog trenja - prosječna vrijednost apsolutnog odstupanja koeficijenta trenja MIU - geometrijska hrapavost	MIU MMD SMD	- - µm

### 3.3.1.1 KES-FB1 mjerni uređaj za mjerenje vlačnih i smičnih svojstava

KES-FB1 mjerni uređaj, sl. 3.12, koristi se za mjerenje vlačnih i smičnih svojstava materijala. Mjerenje vlačnih svojstava uzoraka primjenom KES-FB1 mjernog uređaja temelji se na ispitivanju vlačne deformacije uzoraka, efektivnih dimenzija 5 x 20 cm, sl. 3.13a).

\* Jedinice parametara mehaničkih svojstava su izvorne jedinice, dobivene pomoću KES-FB AUTO mjernog sustava, gdje je opterećenje izraženo kao sila na jedinicu dužine odnosno širine ispitanog uzorka (20 cm).



**Sl. 3.12** KES-FB1 mjerni uređaj za mjerenja vlačnih i smičnih svojstava

Uzorak za ispitivanje postavlja se između dvije stezaljke, te se izlaže djelovanju jednoosnog vlačnog opterećenja. Prilikom mjerenja jedna stezaljka je fiksna dok se druga pomiče konstantnom brzinom do maksimalne vrijednosti sile  $F_m = 490,35 \text{ cNcm}^{-1}$ . Kad se postigne maksimalna vrijednost sile, pokretna stezaljka se počne vraćati u početni položaj. Tada dolazi do rasterećenja uzorka i vraćanja u početni položaj. Tijekom mjerenja uređaj KES-FB1 bilježi vrijednosti deformacije u ovisnosti o vlačnom opterećenju. Izvorni grafički prikaz rezultat mjerenja prikazan je histereznom krivuljom sl. 3.13 b), dok je na sl. 3.13 c) dat prikaz krivulje opterećenje-deformacija uslijed djelovanja vlačnog opterećenje i rasterećenja.

Parametri vlačnih svojstava koje bilježi mjerni uređaj KES-FB1 su deformacijski rad WT, linearnost krivulje LT, sposobnost oporavka RT i rastezanje EMT (Geršak, 2014).

Deformacijski rad WT, predstavlja energiju potrebnu za vlačnu deformaciju na mjernom uzorku, a definiran je izrazom:

$$WT = \int_0^{\varepsilon_m} F d\varepsilon \quad (3.1)$$

gdje je:

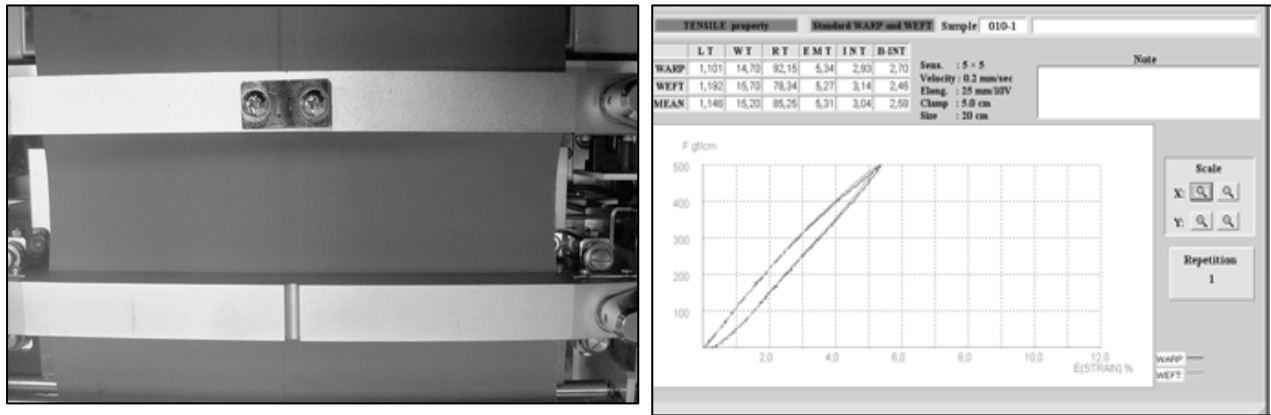
WT – deformacijski rad, predstavlja energiju potrebnu za vlačnu deformaciju na mjernom uzorku, cN cm

F – vlačna sila koja djeluje uzorak površine 1 cm uzorka, cN

$\varepsilon$  – deformacija odnosno produljenje pri djelovanju vlačne sile F, cm

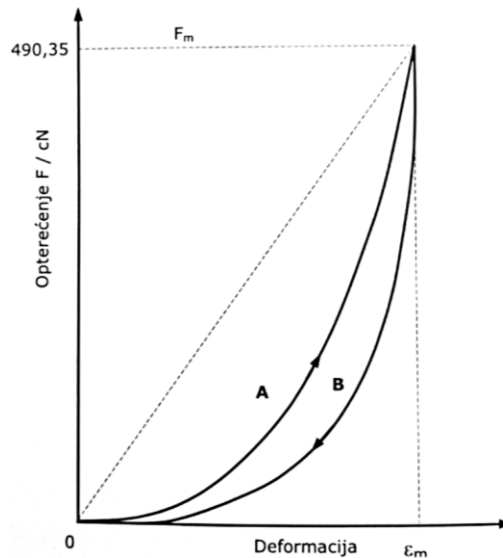
$\varepsilon_m$  – deformacija kod maksimalne vrijednosti vlačnog opterećenja, tj. kod  $F_m = 490,35 \text{ cN}$ , mm (Geršak, 2014).

Deformacijski rad WT, usko je povezan sa svojstvima kao što su fleksibilnost, mekoća, glatkoća i kompaktnost tkanine (Geršak, 2014).



a)

b)



c)

**SI. 3.13** Mjerni uređaj KES-FB1 za mjerenje vlačnih svojstava a) prikaz uzorka za vrijeme mjerenja, b) grafički prikaz mjerenja vlačnih svojstava uzorka spoja i c) krivulja vlačnog opterećenja i rasterećenja uzorka

Linearnost krivulje LT opterećenje-deformacija  $F_m$  kao parametar vlačnih svojstava utječe na kvalitetu kao i na opip tkanine, te su vrijednosti povezane s subjektivnom procjenom elastičnosti mjernih uzoraka i sposobnosti oporavka. Niske vrijednosti linearnosti LT, predstavljaju tkanine mekog opipa ili tkanine za koje je karakteristična viša vrijednost rastezljivosti, dok više vrijednosti linearnosti LT, upućuju na elastične krute tkanine.

Sposobnost oporavka RT, je sposobnost materijala da apsorbira energiju u slučaju elastične deformacije i da tu energiju oslobodi prilikom rasterećenja, definirana je izrazom (Geršak, 2014):

$$RC = \frac{WT'}{WT} \cdot 100 \quad (3.2)$$

pri čemu je:

$$WT' = \int_{\varepsilon_m}^0 F' d\varepsilon_r \quad (3.3)$$

gdje je:

RT – sposobnost oporavka, %,

WT' – oslobođena ili reverzibilna energija po jedinici površine, cN cm

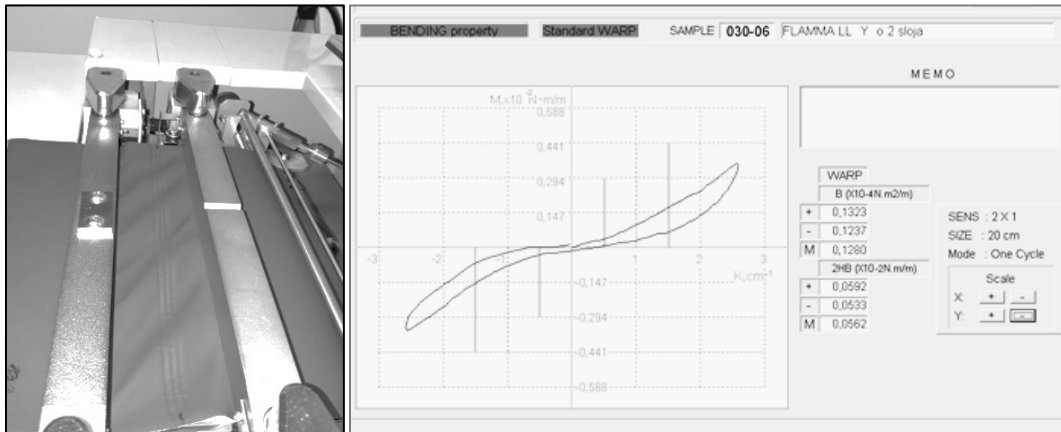
F' – vlačna sila u procesu rasterećenja po jedinici površine, cN

$\varepsilon_r$  – deformacija u procesu rasterećenja, cm

$\varepsilon_m$  – deformacija kod maksimalnog vlačnog opterećenja  $F_m$ , cm.

Sposobnost oporavka RT je značajan parametar koji utječe na ponašanje tkanina na gotovom odjevnom predmetu. Niske vrijednosti sposobnosti oporavka imaju uzorci koji su elastični i mekši na dodir. Sposobnost oporavka RT predstavlja mjerilo elastičnosti materijala kod vlačne deformacije i sposobnost njezinog oporavka nakon rasterećenja (Geršak, 2014).

Određivanje smičnih svojstava pomoću KES-FB1 mjernog uređaja temelji se na istraživanju smične deformacije uzorka efektivnih dimenzija 5x20 cm. Uzorak se postavlja između dvije stezaljke jedna je fiksna, a druga pomična. Širina između dvije stezaljke je 5 cm. Pomičnu stezaljku pokreće koračajni motor koji ju pomiče paralelno s fiksnom stezaljkom do smičnog kuta od +8°. Nakon što se postigne smični kut od +8°, stezaljka se vraća u početni položaj i započinje gibanje u suprotnom smjeru do kuta od -8°, te se ponovno vraća u početni položaj, sl. 3.14a). Smični parametri koji mjerni uređaj KES-FB1 bilježi su smična krutost G, visina histereza smične sile 2HG kod smičnog kuta od ± 0,5° i visina histereza smične sile 2HG5 kod smičnog kuta od ± 5°. Grafički prikaz histereze smične deformacije uzorka dat je na sl. 3.14b).



a)

b)

**Sl. 3.14** Mjerni uređaj KES-FB1 za mjerenje smičnih svojstava a) prikaz uzorka za vrijeme mjerenja i b) grafički prikaz mjerenja smičnih svojstava uzorka spoja

Smična krutost  $G$  ovisna je o konstrukcijskim parametrima tekstilnog plošnog proizvoda. Nekompaktni uzorci, manje površinske mase imaju niže vrijednosti smične krutosti  $G$ , dok kompaktni i čvrsti uzorci imaju više zabilježene vrijednosti smične krutosti  $G$ .

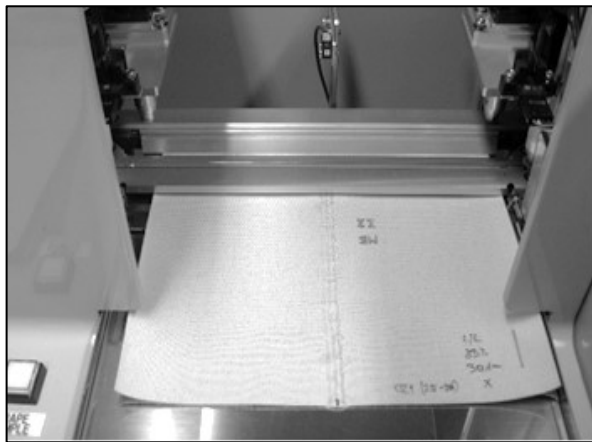
Histerenze smične sile 2HG i 2HG5, koje predstavljaju razliku između smične sile  $F_G$  potrebne za smičnu deformaciju i smične sile u procesu rasterećenja uzorka, predstavljaju energiju koju tkanina izgubi tijekom smične deformacije. Parametri 2HG i 2HG5 usko su povezani, obično se koriste paralelno. Parametar 2HG5 služi za predviđanje izgleda gotovog odjevnog predmeta, dok je za vrednovanje opipa značajnija vrijednost histerenze smične sile 2HG.

Niže vrijednosti histerenze smične sile 2HG5 pozitivno utječu na podatnost tekstilnog plošnog uzorka i njegovu mekoću i fleksibilnost, takvi uzorci imaju dobru sposobnost oblikovanja. Veće vrijednosti histerenze smične sile 2HG5 daju osjećaj krutosti i takvi uzorci imaju smanjenu elastičnost (Geršak, 2014).

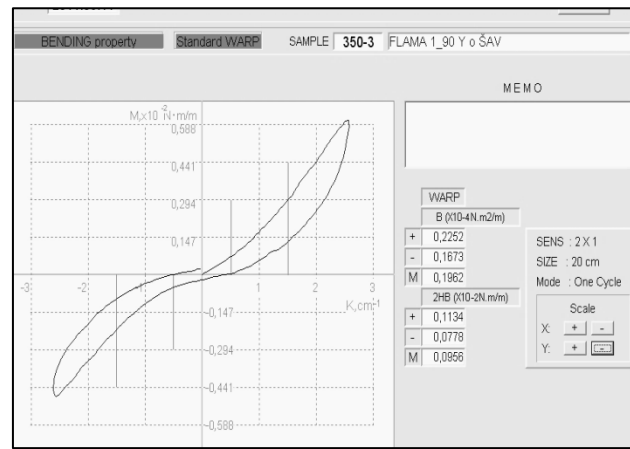
### 3.3.1.2 KES-FB2 mjerni uređaj za mjerenje savojnih svojstava

Svojstva savijanja uzorka mjerena su na KES-FB 2 mjernom sustavu sl. 3.15a), a mjerenje se temelji na određivanju deformacija uzoraka kao čistog savijanja, pošto se uzorak dimenzija 20 x 1 cm savija po kružnici do maksimalne zakrivljenosti od  $\pm 2,5 \text{ cm}^{-1}$ . U trenutku postizanja maksimuma, započinje gibanje stezaljke u suprotnom smjeru, mjerni uređaj mjeri reverzibilni proces koji se preko nultog položaja stezaljke nastavlja u suprotnom smjeru. Za vrijeme

ispitivanja savojnih svojstava uzorak se savija na način da je u prvom mjernom ciklusu na unutarnjoj strani zakrivljenosti lice plošnog proizvoda, a u drugom mjernom ciklusu naličje uzorka. Na osnovi dobivene krivulje deformacije savijanja, gdje se mjeri promjena momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti, tj. radijusu savijanja na jedinicu širine uzorka, utvrđuje se parametri savojnih svojstava koji karakteriziraju ponašanje uzorka na opterećenja savijanja, odnosno krutosti savijanja B na jedinicu debljine i histereze momenta savijanja 2HB, (Geršak, 2014). Na sl. 3.15b) prikaz je karakteristične histereze savijanja.



a)



b)

**Sl. 3.15** Mjerni uređaj KES-FB2 za mjerenje smičnih svojstava a) prikaz uzorka za vrijeme mjerenja i b) grafički prikaz mjerenja smičnih svojstava uzorka spoja

Oblik histerezne krivulje savijanja ovisi o konstrukcijskim parametrima materijala, ovisi o finoći vlakana/pređe, gustoći niti, unutarnjem trenju među vlaknima u pređi i trenju kontaktnih površina sustava niti osnove i potke, elastičnim svojstvima i masi materijala. Krutost savijanja B usko je povezana s fleksibilnošću/deformabilnošću tkanine i primarni je čimbenik kod ocjenjivanja krutosti materijala. Vrijednosti histereze momenta savijanja 2HB opisuju elastičnu savitljivost uzorka i predstavljaju energiju koju uzorak tkanine gubi tijekom savojne deformacije (Geršak, 2014).

Na sl. 3. 16 prikaz je savojne deformacije tj. savojnog opterećenja i rasterećenja uzorka u ovisnosti o zakrivljenosti K.

Krutost savijanja B se određuje kao tangens kuta nagiba krivulje moment savijanja - zakrivljenost  $M(K)$  između zakrivljenosti  $K=0,5$  i  $K =1,5 \text{ cm}^{-1}$  za stranu lica i između  $K= -0,5$  i  $K =$

-1,5 cm<sup>-1</sup> za stranu naličja, tj. mođe se objasniti kao omjer promjene momenta savijanja  $\Delta M$  i promjene zakrivljenosti  $\Delta K$  sl. 3.16 prema izrazu (4 i 5) (Geršak, 2014).

$$B = \text{tg}\varnothing = \frac{\Delta M}{\Delta K} \dots\dots(3.4)$$

gdje je:

$\text{tg}\varnothing$  - tangens kuta nagiba krivulje momenta savijanja-zakrivljenosti M (K)

$\Delta M$ . – promjena momenta savijanja za jedinicu širine uzorka, cN cm,

$\Delta K$ . - promjena zakrivljenosti u području između  $\pm 0,5$  i  $\pm 1,5$  cm<sup>-1</sup> (za stranu lica, odnosno naličja).

Krutost savijanja B prikazuje se kao srednja vrijednost krutosti savijanja za stranu lica  $B_f$  i krutosti savijanja za stranu naličja  $B_b$  i prikazuje se izrazom:

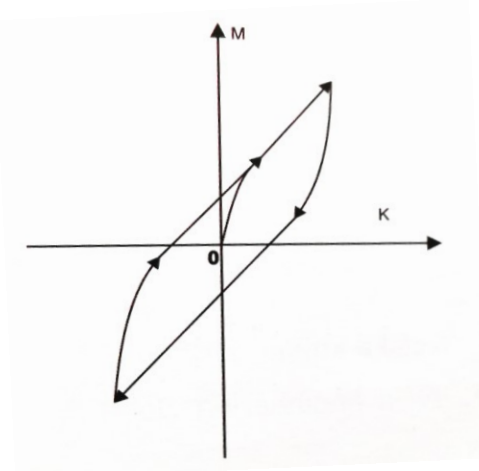
$$B = \frac{B_f + B_b}{2} \quad (3.5)$$

gdje je:

B – krutost savijanja, cN cm<sup>2</sup>

$B_f$ – krutost savijanja na jedinicu širine uzorka sa strane lica, cN cm<sup>2</sup>

$B_b$ – krutost savijanja na jedinicu širine uzorka sa strane naličja, cN cm<sup>2</sup>.



**Sl. 3.16** Histereza momenta savijanja M za stranu lica i naličja uzorka tkanine kod zakrivljenosti K između 0 i  $\pm 1,5$  cm<sup>-1</sup>



Histereza momenta savijanja  $2HB$  po jedinici širine uzorka, dobivena je kao srednja vrijednost širine histereze momenta savijanja  $2HB_f$  u području zakrivljenosti  $K=0,5$  do  $1,5 \text{ cm}^{-1}$  za stranu lica i širinu histereze  $2HB_b$  u području zakrivljenosti  $K=-0,5$  do  $-1,5 \text{ cm}^{-1}$  za stranu naličja, izračunala se prema izrazu (6) (Geršak, 2014):

$$2HB = \frac{2HB_f + 2HB_b}{2} \quad (3.6)$$

gdje je:

$2HB$  – histereza momenta savijanja, cN cm

$2HB_f$  – širina histereze momenta savijanja uzorka sa strane lica, cN cm

$2HB_b$  – širina histereze momenta savijanja uzorka sa strane naličja, cN cm.

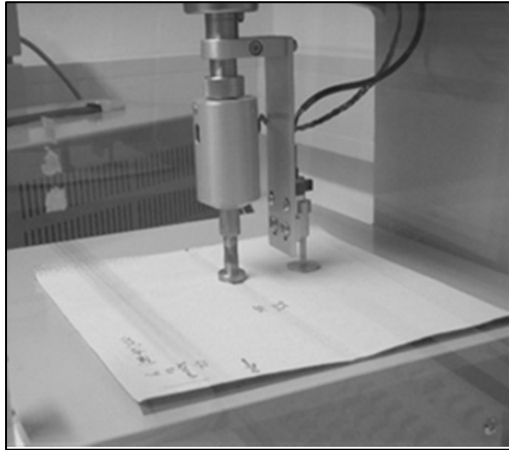
Manje vrijednosti krutosti savijanja  $B$  imaju uzorci koji su fleksibilni i boljeg opipa, dok visoke vrijednosti krutosti savijanja utječu na sposobnost oblikovanja, povećavaju otpor materijala na savijanje i deformiranje.

Histereza momenta savijanja  $2HB$  predstavlja energiju koju tkanina izgubi tijekom svoje savojne deformacije. Što je veća elastična savitljivost tkanine, to je manja vrijednost histereze momenta savijanja  $2HB$ . Visoke vrijednosti  $2HB$  pripisujemo uzorcima koji su kruti na dodir i koji imaju niži stupanj elastičnog oporavka (Geršak, 2014).

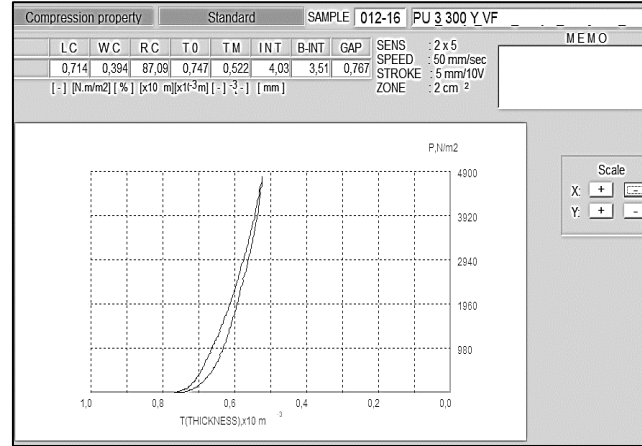
### 3.3.1.3 KES-FB3 mjerni uređaj za mjerenje kompresijskih svojstava

Ispitivanje kompresijskih svojstava provedeno je, s obzirom na dobivenu strukturu spojeva, na mjernom uređaju KES-FB3, sl. 3.17. Ispitivanja kompresijskih svojstava pomoću KES-FB3 mjernog uređaja temelji se na istraživanju kompresijske deformacije uzorka, koji se u području efektivne površine od  $2 \text{ cm}^2$  izlaže kompresijskom opterećenju od  $49,035 \text{ cN/cm}^2$ , koje djeluje okomito na površinu pri konstantnoj brzini opterećivanja od  $20 \text{ } \mu\text{m/s}$ . Kao rezultat dobiva se grafički prikaz s histereznom krivuljom, sl. 3.17b), koja pokazuje promjene debljine uzorka u ovisnosti o djelovanju kompresijskog opterećenja, te se dobiju vrijednosti karakterističnih

parametara kompresijskih svojstava: deformacijski rad WC, linearnost krivulje LC, sposobnost oporavka RC, te debljina uzorka  $h_0$  pri djelovanju kompresijskog opterećenja od  $0,49 \text{ cN/cm}^2$  i debljina uzorka  $h_m$  pri djelovanju kompresijskog opterećenja od  $49,035 \text{ cN/cm}^2$ .



a)



b)

**SI. 3.17** KES-FB 3 mjerni sustav za mjerenje kompresijskih svojstava a) prikaz uzorka za vrijeme mjerenja i b) dijagram ovisnosti kompresijske sile i deformacije tijekom opterećivanja i rasterećivanja uzoraka

Parametar WC predstavlja mjeru kompresibilnosti (stlačljivosti) tkanine i usko je povezan s njezinom debljinom, a vrijednosti deformacijskog rada odražavaju se na opip. Veće vrijednosti deformacijskog rada WC daju osjećaj punoće/voluminoznosti, a niže vrijednosti WC daju nešto krući opip spoja u mjestu mjerenja.

Deformacijski rad WC predstavlja energiju potrebnu za kompresijsku deformaciju i izračunava se prema izrazu (7) (Geršak, 2014):

$$WC = \int_{h_0}^{h_m} F_k dh \quad (3.7)$$

gdje je:

- WC – deformacijski rad po jedinici površine  $\text{cm}^2$  uzorka,  $\text{cN cm}$
- $h_0$  – debljina kod kompresijskog opterećenja od  $0,490 \text{ cN cm}^{-2}$ , mm,
- $h_m$  – debljina kod kompresijskog opterećenja od  $49,035 \text{ cN cm}^{-2}$ , mm,
- $F_k$  – kompresijska sila po jedinici površine, cN,
- dh – promjena debljine tkanine, mm.

Sposobnost relaksacije RC određuje odnos između oslobođene ili reverzibilne energije prilikom

rasterećenja i apsorbirane energije kod kompresijskog opterećenja, te određena je izrazom (8, 9). Parametar RC odražava sposobnost oporavka materijala kod kompresijskog rasterećenja i mjera je njezine volumenske fleksibilnosti. Veće vrijednosti sposobnosti oporavka RC daju osjećaj elastičnosti i pozitivno utječu na vrijednost ukupnog opipa, te daju puniji i mekši opip, dok niže vrijednosti parametra RC upućuju na krući i glatki opip spoja.

$$RC = \frac{WC'}{WC} \cdot 100 \quad (3.8)$$

pri čemu je:

$$WC' = \int_{h_0}^{h_m} F'_k dh \quad (3.9)$$

gdje je:

RC – sposobnost oporavka, %,

WC' – oslobođena ili reverzibilna energija po jedinici površine, cN cm

F'<sub>k</sub> – kompresijska sila u procesu rasterećenja po jedinici površine, cN, (Kawabata, 1980; Geršak, 2014).

Veličina koja proizlazi iz omjera razlika debljina spoja mjerenih pri dvije različite vrijednosti kompresijskog opterećenja je kompresibilnost C (Geršak, 2014), a određena je izrazom (10):

$$C = \frac{h_0 - h_m}{h_0} \quad (3.10)$$

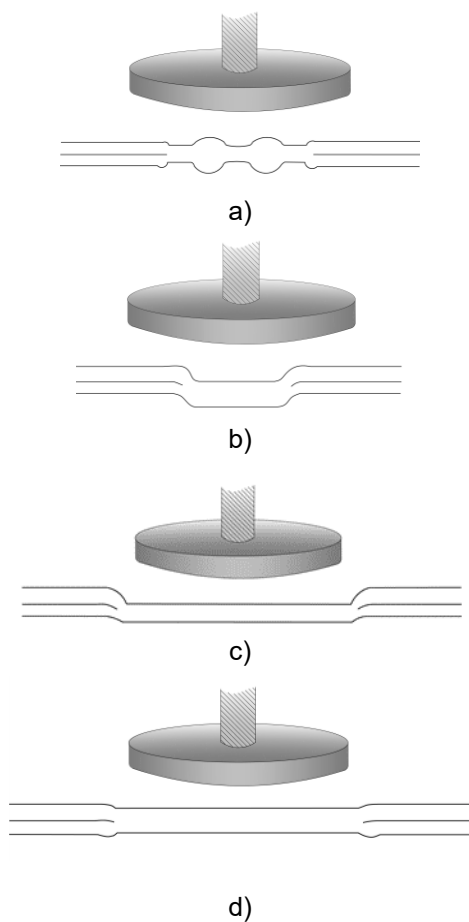
gdje je:

h<sub>0</sub> – debljina kod kompresijskog opterećenja od 0,490 cN cm<sup>-2</sup>, mm,

h<sub>m</sub> – debljina kod kompresijskog opterećenja od 49,035 cN cm<sup>-2</sup>, mm.

Veće vrijednosti kompresibilnosti C imaju spojevi koji imaju veću razliku između debljina h<sub>0</sub> i h<sub>m</sub> tj. spojevi koji su voluminozni i imaju izrazito istisnute rubove. Niže vrijednosti kompresibilnosti imaju spojevi koji su na opip krući i glatki, te nemaju izrazito naglašene istisnute rubove (Geršak, 2014).

S obzirom na različite dimenzije tj. širine spojeva, koje su uvjetovane primjenom pojedine tehnike spajanja, razlikovat će se mjesto mjerenja kompresijskih svojstava pomoću KES-FB3 mjernog sustava. Širina spojeva dobivenih spajanjem toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom iznosi 20 mm, tehnikom ultrazvučnog spajanja iznosi 9 mm, dok širina spoja kod VF tehnike spajanja 7 mm, sl. 3.18, (Bobovčan Marcelić et al., 2022).



Spoj nastao primjenom tehnike ultrazvučnog spajanja, širina spoja 9 mm. Mjerna površina KES-FB3 mjernog uređaja bilježi vrijednosti debljine istisnutog ruba spoja  $d_r$  (prema slici 3.19)

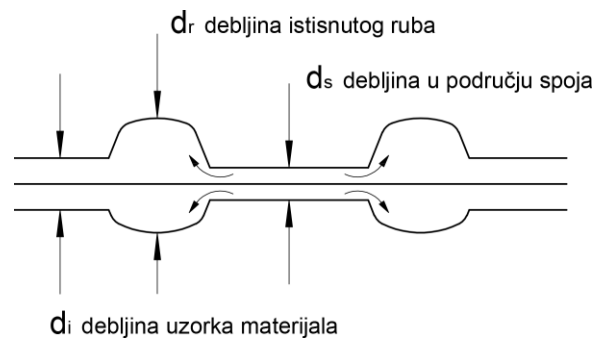
Spoj nastao primjenom tehnike visokofrekventnog spajanja, širina spoja 7 mm. Mjerna površina KES-FB3 mjernog uređaja bilježi vrijednosti debljine istisnutog ruba spoja  $d_r$  (prema slici 3.19)

Spoj nastao primjenom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom, širina spoja 20 mm. Mjerna površina KES-FB3 mjernog uređaja bilježi vrijednost debljine spoja  $d_s$  (prema sl. 3.19).

Spoj nastao primjenom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom, širina spoja 20 mm. Mjerna površina KES-FB3 mjernog uređaja bilježi vrijednost debljine spoja  $d_s$  (prema sl. 3.19).

**Sl. 3.18** Prikaz mjernog tijela KES-FB3 mjernog uređaja prilikom mjerenja kompresijskih svojstva i širine spojeva, dobivenih a) ultrazvučnom tehnikom spajanja, b) visokofrekventnom tehnikom spajanja, c) spajanje toplinskom kondukcijom i d) spajanje toplinskom konvekcijom

Mjerenje kompresijskih svojstava primjenom KES-FB3 mjernog uređaja kod spojeva dobivenih ultrazvučnom i VF tehnikom spajanja odgovara zapravo dimenzijama istisnutih rubova spoja, dok kod tehnika spajanja toplinskom kondukcijom i toplinskom konvekcijom mjerenje se vrši unutar područja spoja, tako da se dobivene vrijednosti odnose na stvarnu debljinu spoja  $d_s$  (Bobovčan Marcelić et al., 2022), prema sl. 3.19.



**Sl. 3.19** Shematski prikaz presjeka spoja s prikazom karakterističnih debljina spoja: debljina istisnutih rubova ( $d_r$ ), debljina spoja ( $d_s$ ) i debljina materijala izvan područja spajanja ( $d_i$ )

### 3.3.2 Uređaj za ispitivanje čvrstoće spoja, kidalica

Za ispitivanje mehaničkih svojstva čvrstoće spoja korištena je kidalica proizvođača Mesdan S.p.A oznake Tensolab 3000, sl.3.20. Mjerenja uzoraka provedena su u standardnim uvjetima ispitivanja u laboratoriju: relativna vlažnost zraka  $65 \pm 2 \%$  i temperatura prostorije  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Sl. 3.20** Prikaz kidalice Tensolab 3000 proizvođača Mesdan S.p.A

Kidalica se koristi za ispitivanje čvrstoće pređe i plošnih proizvoda, konvencionalnog i tehničkog tekstila, a mjerenja se mogu izvoditi na više mjernih područja:

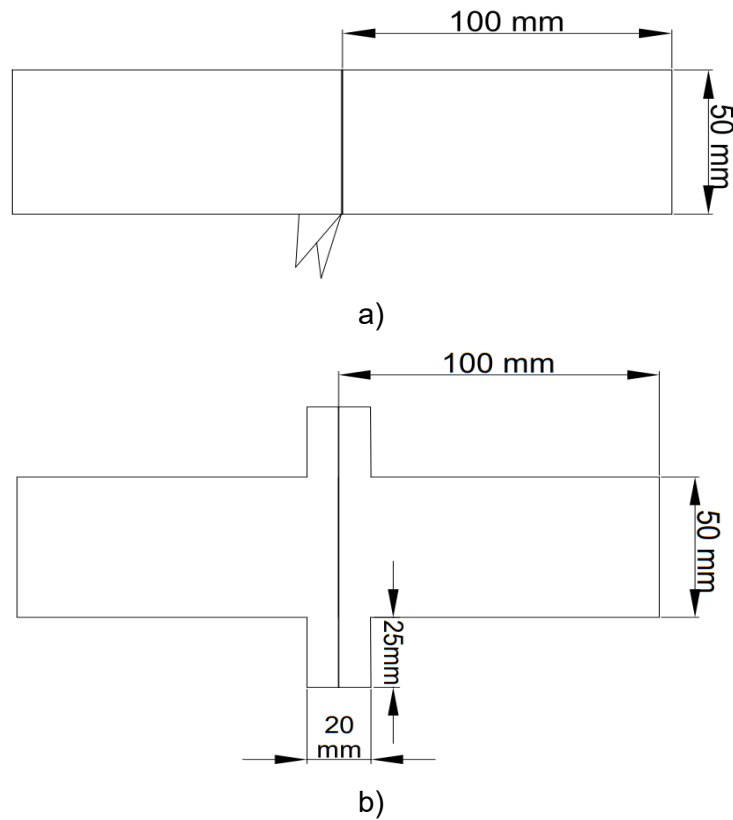
- 2 daN za elastomere,
- 10 daN za uobičajene pređe,
- 100 daN za pređe visoke čvrstoće, konvencionalni i tehnički tekstil,
- 1000 daN za pređe visoke čvrstoće konvencionalni i tehnički tekstil i
- 3000 daN za pređe visoke čvrstoće konvencionalni i tehnički tekstil

Uređaj je opremljen mehaničkim i pneumatskim stezaljkama. Brzina provođenja testa može se podešavati i iznosi  $10-500 \text{ mmmin}^{-1}$  pri točnosti mjerenja od 0,1 mm. Uređaj je povezan s računalom i opremljen programskim paketom, što omogućuje ispitivanja u skladu s velikim brojem standardiziranih metoda ispitivanja vlačnih i tlačnih svojstava.

Uzorci su ispitivani pri definiranim parametrima, koji su podešavani zbog velikog istežanja uzoraka materijala. Udaljenost između stezaljki 100 mm, širina epruvete 50 mm, predopterećenje 1 N i brzina 100 mm/min.

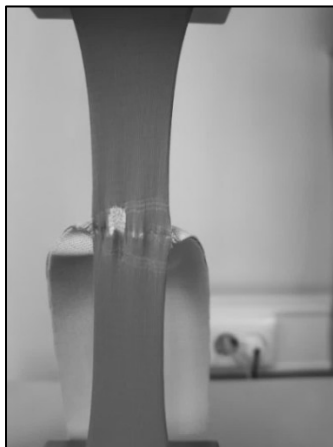
Zbog malih dimenzija uzoraka ispitivanje je provedeno na tri uzorka jednog tipa spoja (isti parametri spajanja) za svaku od tehnika spajanja. Kod kombinacije šivanja i spajanje vrućim zrakom ispitivanje je provedeno na dva uzorka.

Priprema ispitnih epruveta uzoraka spojeva izvedena je prema prikazu na sl. 3.21a) i b).



**SI. 3.21** Dimenzije ispitnih epruveta za ispitivanje čvrstoće spojeva a) za tehniku ultrazvučnog, tehniku visokofrekventnog spajanja, tehnike spajanje vrućim klinom i vrućim zrakom i b) za kombiniranu tehniku šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom adhezivne trake po šavu

Na slici 3.22 prikaz je uzorka spojenog ultrazvučnom tehnikom spajanja za vrijeme ispitivanja na kidalici.



**SI. 3.22.** Prikaz uzorka spoja za vrijeme mjerenja čvrstoće spoja na kidalici

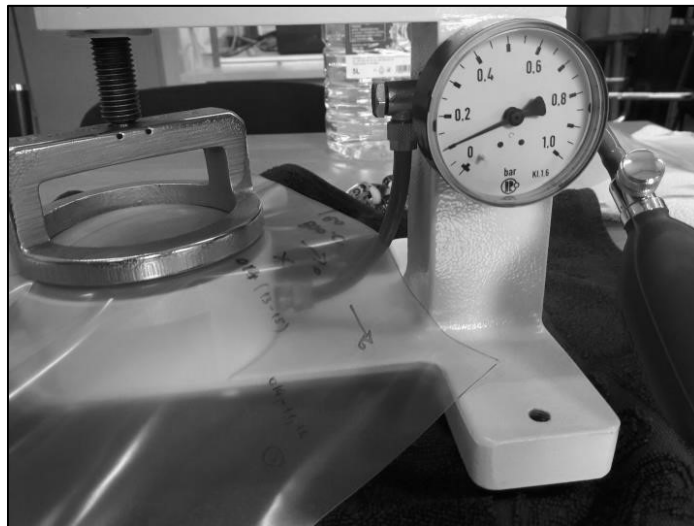
### 3.3.3 Uređaj za mjerenje zrakopropusnosti spojeva

Na uređaju za ispitivanje zrakonepropusnosti spojeva proizvođača Pfaff naziva *Seam testing device* oznake 95-203-99-71/895, sl. 3.23, ispitivani su uzorci spojeva. Stupanj zrakonepropusnosti određuje količina zraka koji prolazi okomito kroz područje materijala ili spoja koji se ispituje. Promjer mjernog područja koje se ispituje iznosi 10 cm.

Uzorak za ispitivanje se postavi između dvije stezaljke te se učvrsti gornja stezaljka okretanjem u smjeru kazaljke na satu. Ručnom pumpom upuhuje se zrak okomito na uzorak spoja, te se na ispitivanom uzorku stvori kalota, koja je postojana u slučaju kad je spoj zrakonepropustan. Na mjernom uređaju očitava se vrijednosti tlaka, kojem je uzorak spoja bio izložen za vrijeme mjerenja. Ako se nakon nekog vremena tlak pri mjerenju ne mijenja i ne opadaju vrijednosti, uzorak je zrakonepropustan, a ako pak tlak opada ispitivani uzorak spoja je zrakopropustan ([www.pfaff.com](http://www.pfaff.com)).

Spojevi su ispitivani do vrijednosti tlaka od maksimalno 0,1 bara. Ispitivan su uzorci spoja s definiranim parametrima po x i y osi.

Ova metoda ispitivanja zrakonepropusnosti spojeva služi za brzu provjeru svojstava zrakonepropusnosti spojeva u industrijskim pogonima i može se primijeniti na ispitivanje zrakonepropusnosti svih tekstilnih plošnih materijala i spojeva.



**Sl. 3.23** Prijenosni uređaj za određivanje zrakonepropusnosti uzorka materijala i spoja



### 3.3.4 Uređaj za ispitivanje vodonepropusnosti spojeva

Za ispitivanje vodonepropusnosti spojeva korišten je uređaj proizvođača Pfaff oznake 1181, sl. 3.24.

Uzorak spoja se postavi na donju stezaljku, čija površina je prekrivena vodom tako da je lice ispitivanog uzorka okrenuto djelovanju vode. Spusti se gornja stezaljka, te se materijal stegne između stezaljki. Zatim se pokrene dovod vode na ispitivani uzorak, tj. podesi se vrijednost hidrostatskog tlaka koji djeluje na ispitivani uzorak. Istovremeno se započne mjerenje vremena, te se zabilježe vremenske vrijednosti kod pojave 1. i 3. kapljice vode na različitim mjestima na naličju uzorku spoja ([www.pfaff.com](http://www.pfaff.com)).



**Sl. 3.24** Prikaz uređaja za ispitivanje vodonepropusnosti spojeva

Spojevi su ispitivani do vrijednosti hidrostatskog tlaka od maksimalno 0,1 bara. Ispitivan je jedan uzorak spoja s definiranim parametrima po x i y osi.

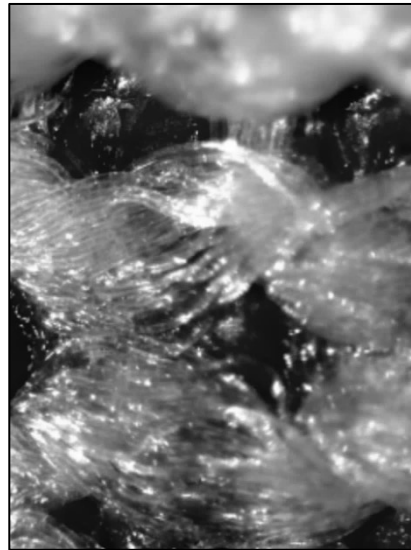
### 3.3.5 Mikroskop

Pomoću mikroskopa proizvođača Bresser LCD MICRO 40x-1600 analizirani su uzorci spojeva spajani s više različitih visokotehnoloških tehnika spajanja, sl. 3.25.

Mikroskop je opremljen sa dvije LED lampe. Jačina osvjetljenja može se regulirati u 3 stupnja. Na regulatoru osvjetljenja namjestiti na položaj „I“ u slučaju kad se uzorak osvjetljava odozdo (s propuštanjem svjetlosti) ili u poziciji „II“ kada se uzorak osvjetljava s gornje strane s propuštanjem svjetlosti. U poziciji „III“ uzorak može biti osvjetljen s gornje i donje strane u isto vrijeme.



a)



b)

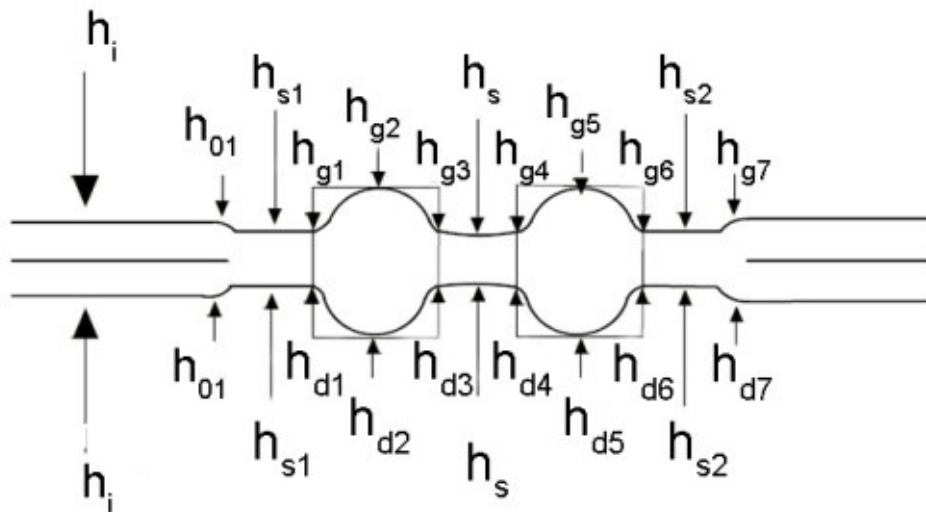
**Sl. 3.25** Prikaz a) mikroskopa tt. Bresser LCD MICRO 40x-1600; b) promatrani uzorak u zoni spoja

U slučaju kad se promatraju netransparentni uzorci, koristi se gornje osvjetljenje. Maksimalno povećanje na LCD mikroskopu je  $4 \times 400 = 1600$  puta. Na slici 3.25b) može se vidjeti prijelaz nanosa (PU), koji je za vrijeme spajanja omekšan. Djelovanjem pritisne sile omekšani materijal prelazi u prostore između očica pletiva, prelazi na stranu pletiva, molekule termoplastičnog materija se međusobno isprepliću, tale, te se hlađenjem postiče spoj.

### 3.3.6 Mjerni uređaj za mjerenje karakteristika ultrazvučnih spojeva

Mjerni uređaj je namijenjen za ispitivanje karakteristika spojeva spojenih tehnikom ultrazvučnog spajanja pri različitim parametrima spajanja. Mjerni uređaj ima mogućnost mjerenja razlike između debljine spoja i debljine istisnutog ruba spoja na istom mjernom uređaju s istim pritiskom silom, pri konstantnom predopterećenjem mjernog uzorka. Dobivenim vrijednostima razlike između izmjerenih debljina na određenim pozicijama, sl. 3.26, na širini spoja, vrlo lako se može utvrditi intenzitet debljine istisnutog ruba spoja, čije vrijednosti izravno utječu na kvalitetu i čvrstoću spoja. Na temelju izmjerenih vrijednosti debljine spoja i debljine istisnutog ruba će se utvrditi parametri spajanja uzorka materijala ultrazvučnom tehnikom spajanja.

Probna mjerenja na uređaju za ispitivanje karakteristika ultrazvučnih spojeva mjerena su na uzorcima materijala oznaka M11 i M12 s pomoću vrlo preciznog komparatora s točnošću od 0,001 mm, dok su mjerenja na materijalu oznake M10 mjerena na komparatoru s preciznošću od 0,01 mm.



**Sl. 3.26** Pozicije mjerenja debljina spoja i istisnutih rubova na ultrazvučno spojenom spoju

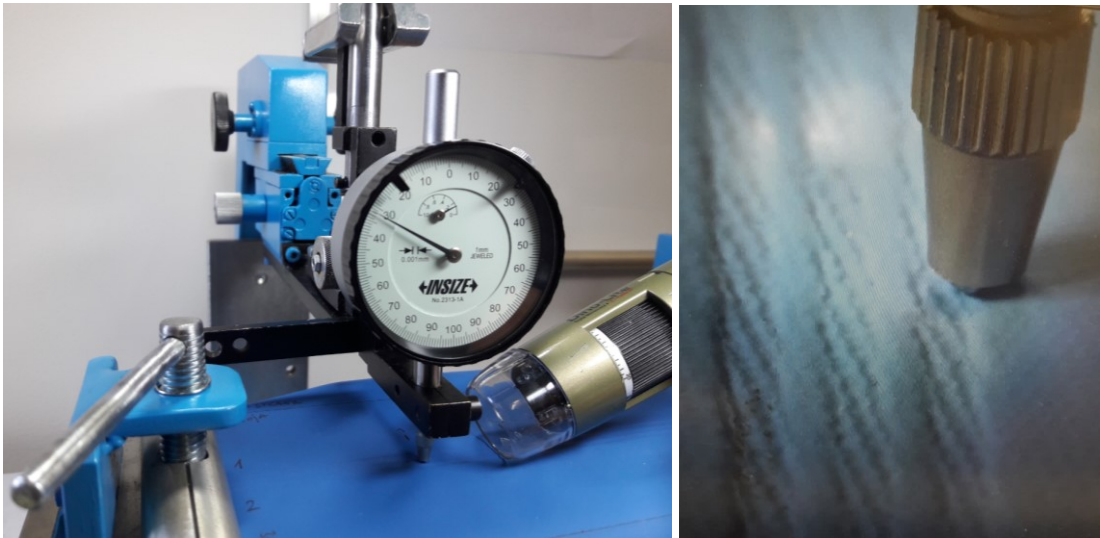
Napomena:

**g-** označava mjerenja mjerena s **gornje** strane spoja

**d-** označava mjerenja mjerena s **donje** strane spoja

Prilikom mjerenja na uređaju za ispitivanje karakteristika ultrazvučno spojenih spojeva bitno je odrediti mjesta mjerenja te pozicije mjerenja. U nastavku teksta prikazane su pozicije mjerenja i

definiranje oznaka mjerenja debljine spoja i istisnutih rubova spoja, sl. 3.27. Uzorak spoja mjeri se na pet mjernih mjesta udaljenih 1,5 cm jedno od drugog mjernog mjesta. Mjerenje se provodi najprije s gornje strane spoja, pa se uzorak okrene i mjeri se uzorak spoja s donje strane na istih pet mjernih mjesta.



**Sl. 3.27** Prikaz a) uređaja za ispitivanje karakteristika ultrazvučnih spojeva i b) prikaz mjerenja debljine na poziciji  $h_{01}$

Uređaj je razvijen u sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost, naziva Razvoj i toplinska svojstva inteligentne odjeće ThermIC, oznake IP-2018-01-6363, voditelj projekta prof. dr. sc. Dubravko Rogale. Uređaj za određivanje karakteristika spojeva stvorenih tehnikom ultrazvučnog spajanja izložen je na izložbama inovacija, te su za njega dobivene sljedeće nagrade:

- Rogale D., Knezić T., Firšt Rogale S., Bobovčan Marčelić M. : Innovation Device for testing the characteristics of ultrasonic welding - Silver medal, 11th European exhibition of creativity and innovation EUROINVENT 2019, Iasi, Romania, 16-18 May 2019,
- Rogale D., Knezić T., Firšt Rogale S., Bobovčan Marčelić M.: Innovation Device for testing the characteristics of ultrasonic welding - Excellence Innovation Award for achieving excellency in innovation through dedication and the consistent wish to push the boards of what can be obtained through science and technology, Rector University Politehnica of Bucharest professor Mihnea Costoiu, 11th European

exhibition of creativity and innovation EUROINVENT 2019, Iasi, Romania, 16-18 May 2019,

- Rogale D., Knezić T., Firšt Rogale S., Bobovčan Marcelić M.: Innovation Device for testing the characteristics of ultrasonic welding - WIIPA Grand Award, World Invention Intellectual Property Associations at International and Invention Show INTARG 2019, Katowice, Poland, 4-5 June 2019,
- Rogale D., Knezić T., Firšt Rogale S., Bobovčan Marcelić M.: Innovation Device for testing the characteristics of ultrasonic welding - Platinum Award, International and Invention Show INTARG 2019, Katowice, Poland, 4-5 June 2019,
- Rogale D., Knezić T., Firšt Rogale S., Bobovčan Marcelić M.: Innovation Device for testing the characteristics of ultrasonic welding (2019) - Diploma on account of winning Platinum Medal at INTARG 2019, Ministry of Investment and Economic Development at International and Invention Show INTARG 2019, Katowice, Poland, 4-5 June 2019.

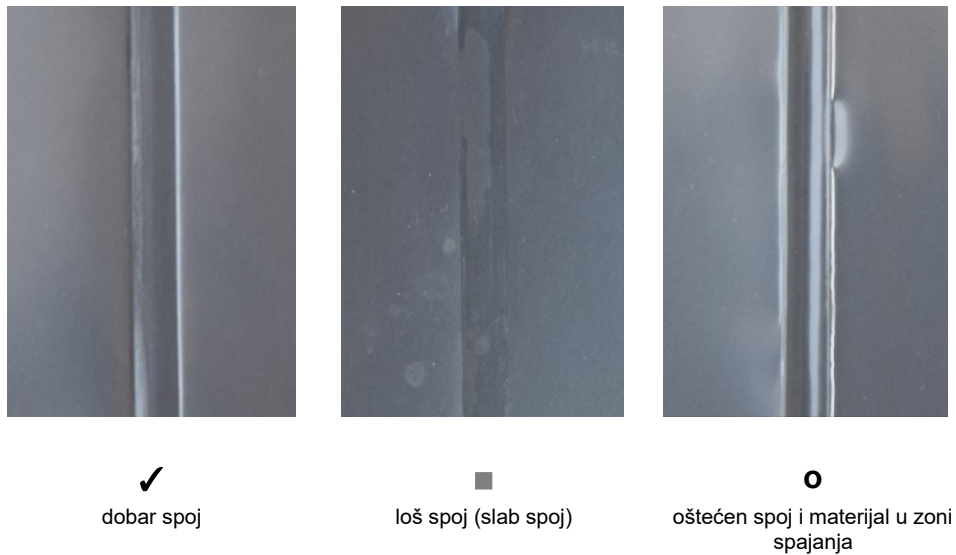
### **3.4 Ocjenjivanje spojeva**

Nakon postupka spajanja uzoraka materijala pri određenim parametrima spajanja za svaku visokotehnološku tehniku spajanja, potrebno je ocijeniti spojeve, da bi se ispitivanja spojeva izvodila samo na pozitivno ocjenjenim uzorcima, zbog prevelikog broja uzoraka. Ocjenjivanje spojeva provedeno je u dvije faze.

#### **3.4.1 Prva faza ocjenjivanja spojeva s obzirom na postignuti spoj (1-faza ocjenjivanja)**

U prvoj fazi provedeno je spajanje uzoraka materijala oznaka M10, M11, M12, M13 i M14 primjenom sve četiri visokotehnološke tehnike spajanja i kombinirane tehnike šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom adhezivne trake po šavu. Uzorci su spajani u dva sloja na način LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala), LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) primjenom odabranih procesnih parametara spajanja, prikazanih u tablicama od 3.7 do 3.11 za svaku tehniku spajanja. Prva

faza ocjenjivanja izgleda spoja provedena je na način vizualne ocjene s aspekta dali je postignut spoj na uzorku materijala pri određenom procesnom parametru spajanja ili ne, te dali je došlo do oštećenja materijala u zoni spajanja. Za svaku visokotehnološku tehniku spajanja primijenjen je velik broj procesnih parametara spajanja čije vrijednosti su navedene u tablicama u nastavku. Ocjene spojeva, dobivenih primjenom pojedinih tehnika spajanja u ovisnosti o primijenjenim parametrima spajanja prikazane su u tablicama od 3.7. do 3.11. Ocjene su prikazane pomoću simbola koji se nalaze u legendi tablice. Na sl. 3.28 dat je primjer izgleda spoja. Ocjene spoja su simboli, ✓ (dobar spoj), ■ (loš, slab spoj) i o (oštećen spoj i materijal u zoni spajanja), (Bobovčan Marčelić et al., 2022).



**Sl. 3.28** Prikaz izgleda spoja i simbola pomoću kojih je uzorak spoja ocijenjen

Tab. 3.7 Prikaz parametara spajanja ultrazvučnom tehnikom uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)

Parametri ultrazvučnog spajanja		Oznaka materijala M10	Oznaka materijala M11			Oznaka materijala M12			Oznaka materijala M13			Oznaka materijala M14		
v/ m min <sup>-1</sup>	P <sub>s</sub> /W	LL i L1N1	LL	LN	NN	LL	LN	NN	LL	LN	NN	LL	LN	NN
		Vizualna ocjena spoja	Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja		
3	200	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Uzorak materijala oznake M14 se ne spaja tehnikom ultrazvučnog spajanja, pri zadanim parametrima. Spoj se ostvaruje kod spajanja pri snazi ultrazvučnog spajanja od 372 W i brzini spajanja od 1 m min <sup>-1</sup> kod rasporeda slojeva spajanog materijala L/L, L/N i N/N		
	252	✓	■	■	✓	■	■	■	■	■	■			
	280	o	■	■	✓	■	✓	✓	■	■	■			
	332	o	✓	■	✓	✓	✓	✓	■	■	✓			
	372	o	✓	✓	✓	✓	✓	✓	■	■	✓			
5	200	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	252	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	280	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	332	o	✓	■	✓	■	■	■	■	■	■			
	372	o	✓	■	✓	■	✓	■	■	■	■			
7	200	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	252	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	280	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	332	o	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	372	o	✓	■	✓	■	■	■	■	■	■			

Napomena: Vizualna ocjena dobar spoj (✓), slab spoj (■) i oštećenje materijala u mjestu spoja (o)

Tab. 3.8 Prikaz parametara spajanja visokofrekventnom tehnikom spajanja uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)

Parametri VF spajanja		Oznaka materijala M10	Oznaka materijala M11			Oznaka materijala M12			Oznaka materijala M13			Oznaka materijala M14		
t/s	I/mA	LL i L1N1	LL	LN	NN	LL	LN	NN	LL	LN	NN	LL	LN	NN
		Vizualna ocjena spoja	Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja		
3	140	■	■	■	■	■	■	■	Uzorak materijala oznake M13 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja	Uzorak materijala oznake M14 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja				
	180	■	■	■	■	■	■	■						
	220	✓	■	■	■	✓	■	■						
	260	✓	✓	■	■	✓	■	■						
	300	✓	✓	■	■	✓	■	■						
5	140	■	■	■	■	■	■	■						
	180	■	■	■	■	✓	■	■						
	220	✓	■	■	■	✓	■	■						
	260	✓	✓	✓	■	✓	✓	✓						
	300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						
7	140	■	■	■	■	■	■	■						
	180	✓	✓	■	■	✓	■	■						
	220	✓	✓	■	■	✓	■	■						
	260	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						
	300	✓	✓	✓	■	✓	✓	✓						
9	140	■	■	■	■	■	■	■						
	180	✓	■	■	■	✓	■	■						
	220	✓	✓	■	✓	✓	■	✓						
	260	✓	o	✓	✓	✓	✓	✓						
	300	o	o	o	✓	✓	✓	✓						

Napomena: Vizualna ocjena dobar spoj (✓), slab spoj (■) i oštećenje materijala u mjestu spoja (o)



Tab. 3.9 Prikaz parametara spajanja toplinskom kondukcijom uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)

Parametri spajanja toplinskom kondukcijom (TVK)		Oznaka materijala M10	Oznaka materijala M11			Oznaka materijala M12			Oznaka materijala M13			Oznaka materijala M14		
v/ m min <sup>-1</sup>	T/°C		L/L	L/N	N/N	L/L	L/A	N/N	L/L	L/N	N/N	L/L	L/N	N/N
		Vizualna ocjena spoja	Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja		
3	300	■	■	■	○	Kod spajanja uzorka materijala oznake M12 pri zadanim parametrima došlo je do razvoja štetnih plinova i lijepljena nanosa na površinu vrućeg klina prilikom kojeg je došlo i do nagrizanja i oštećenja površine klina	■	■	✓	✓	✓	■		
	350	■	○	○	○		■	■	○	✓	○	○		
	400	✓	○	○	○		■	■	■	○	○	○		
	450	✓	○	○	○		■	■	■	○	○	○		
	500	✓	○	○	○		■	■	■	○	○	○		
4	300	■	■	■	✓		■	■	✓	✓	✓	○		
	350	■	○	○	○		■	■	○	✓	○	○		
	400	■	○	○	○		■	■	■	○	○	○		
	450	✓	○	○	○		■	■	■	○	○	○		
	500	✓	○	○	○		■	■	■	○	○	○		
5	300	■	■	■	■	■	■	■	✓	✓	■			
	350	■	○	○	✓	■	■	■	✓	○	○			
	400	■	○	○	○	■	■	✓	○	○	○			
	450	✓	○	○	○	■	■	○	○	○	○			
	500	✓	○	○	○	■	■	■	○	○	○			

Napomena: Vizualna ocjena dobar spoj (✓), slab spoj (■) i oštećenje materijala u mjestu spoja (○)

Tab. 3.10 Prikaz parametara spajanja toplinskom konvekcijom uz ocjene vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)

Parametri spajanja toplinskom konvekcijom (TVZ)		Oznaka materijala M10	Oznaka materijala M11			Oznaka materijala M12			Oznaka materijala M13			Oznaka materijala M14		
v/ m min <sup>-1</sup>	T/°C	LL i L1N1	L/L	L/N	N/N	L/L	L/A	N/N	L/L	L/N	N/N	L/L	L/N	N/N
		Vizualna ocjena spoja	Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja			Vizualna ocjena spoja		
3	300	■	■	■	■	Kod spajanja uzorka materijala oznake M12 pri zadanim parametrima došlo je do razvoja štetnih plinova, pa se tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom nije spajao uzorak materijala oznake M12.	■	■	✓	■	■	■		
	350	■	■	■	■		■	■	✓	■	■	■		
	400	✓	■	■	○		■	■	○	■	■	■		
	450	○	○	○	○		■	■	○	■	■	■		
	500	○	○	○	○		○	○	○	○	○	■		
4	300	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	
	350	■	■	■	✓		■	■	✓	■	■	■		
	400	■	■	■	■		■	■	✓	■	■	■		
	450	✓	■	■	■		■	○	○	■	■	■		
	500	○	○	■	■		■	○	○	○	○	○		
5	300	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	350	■	■	✓	■	■	■	✓	■	■	■			
	400	■	■	■	✓	■	■	✓	■	■	✓			
	450	■	■	■	✓	■	■	○	■	■	✓			
	500	✓	○	○	○	■	○	○	■	■	✓			

Napomena: Vizualna ocjena dobar spoj (✓), slab spoj (■) i oštećenje materijala u mjestu spoja (○)

Tab. 3.11 Prikaz parametara spajanja kombiniranom tehnikom konvencionalnog šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom adhezivne trake po šavu uz ocjenu vizualnog izgleda spojeva (1-faza ocjenjivanja)

Parametri šivanja		Oznaka materijala M10	Oznaka materijala M11		Oznaka materijala M12		Oznaka materijala M13		Oznaka materijala M14	
d <sub>u</sub> /mm	Nm	Uzorak oznake M10 nije šivan	L/L	<b>Parametri spajanja toplinskom konvekcijom:</b> -Odgoda kretanja 15 ms - tlak 2,3 bara - brzina spajanja 3 m min <sup>-1</sup> - temperatura vrućeg zraka 250 °C	L/L	<b>Parametri spajanja toplinskom konvekcijom:</b> - Odgoda kretanja 15 ms - tlak 2,5 bara - brzina spajanja 3 m min <sup>-1</sup> - temperatura vrućeg zraka 220 °C	L/L	<b>Parametri spajanja toplinskom konvekcijom:</b> Odgoda kretanja 15 ms - tlak 2,3 bara - brzina spajanja 4 m min <sup>-1</sup> - temperatura vrućeg zraka 400 °C	L/L	<b>Parametri spajanja toplinskom konvekcijom:</b> Odgoda kretanja 15 ms - tlak 2 bara - brzina spajanja 4 m min <sup>-1</sup> - temperatura vrućeg zraka 400 °C
2	90		✓		✓		✓		✓	
	100		✓		✓		✓		✓	
3	90		✓		✓		✓		✓	
	100		✓		✓		✓		✓	

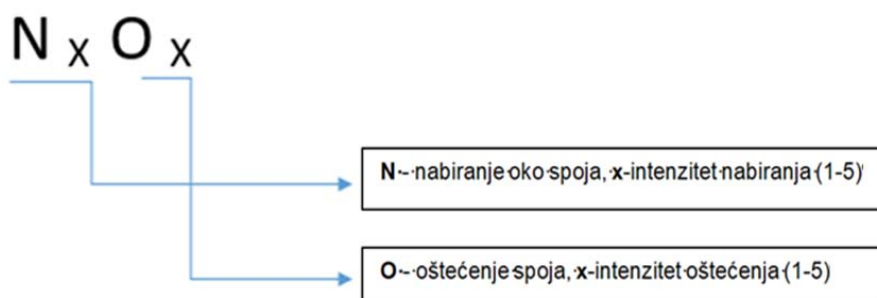
Napomena: Vizualna ocjena dobar spoj (✓), slab spoj (■) i oštećenje materijala u mjestu spoja

### 3.4.2 Druga faza ocjenjivanja vizualne kvalitete spoja i područja uz spoj uzoraka spojenih visokotehnološkim tehnikama spajanja (-2 faza ocjenjivanja)

U drugoj fazi ocjenjivanja vizualne kvalitete spojeva ocjenjivao se izgled spojeva koji su nakon prve faze ocjenjivanja dobili ocjenu dobar spoj (✓). Da bi se pristupilo ocjenjivanju vizualne kvalitete spoja najprije je potrebno definirati kriterije kojima će se ocijeniti spoj i područje uz spoj. Za definiranje kriterija vizualne kvalitete spoja korištena je modificirana metoda AATCC test-Method 88B (Nabiranje šava nakon pranja i odrđavanja). Za ocjenjivanja vizualne kvalitete spoja koristit će se kriterij nabiranja materijala u području spoja  $N_x$ , te dati ocjena intenziteta nabiranja (ocjena  $x$  od 1 do 5) i drugi kriterij, oštećenje materijala u području spoja  $O_x$ , te dati ocjena intenziteta oštećenja (ocjena  $x$  od 1 do 5). U nastavku je dat primjer izgleda spoja i ukupna vizualna ocjena (lice i naličje) intenziteta nabiranja  $N_x$  i oštećenja  $O_x$ , za spoj s lica i naličja, sl. 3.29.

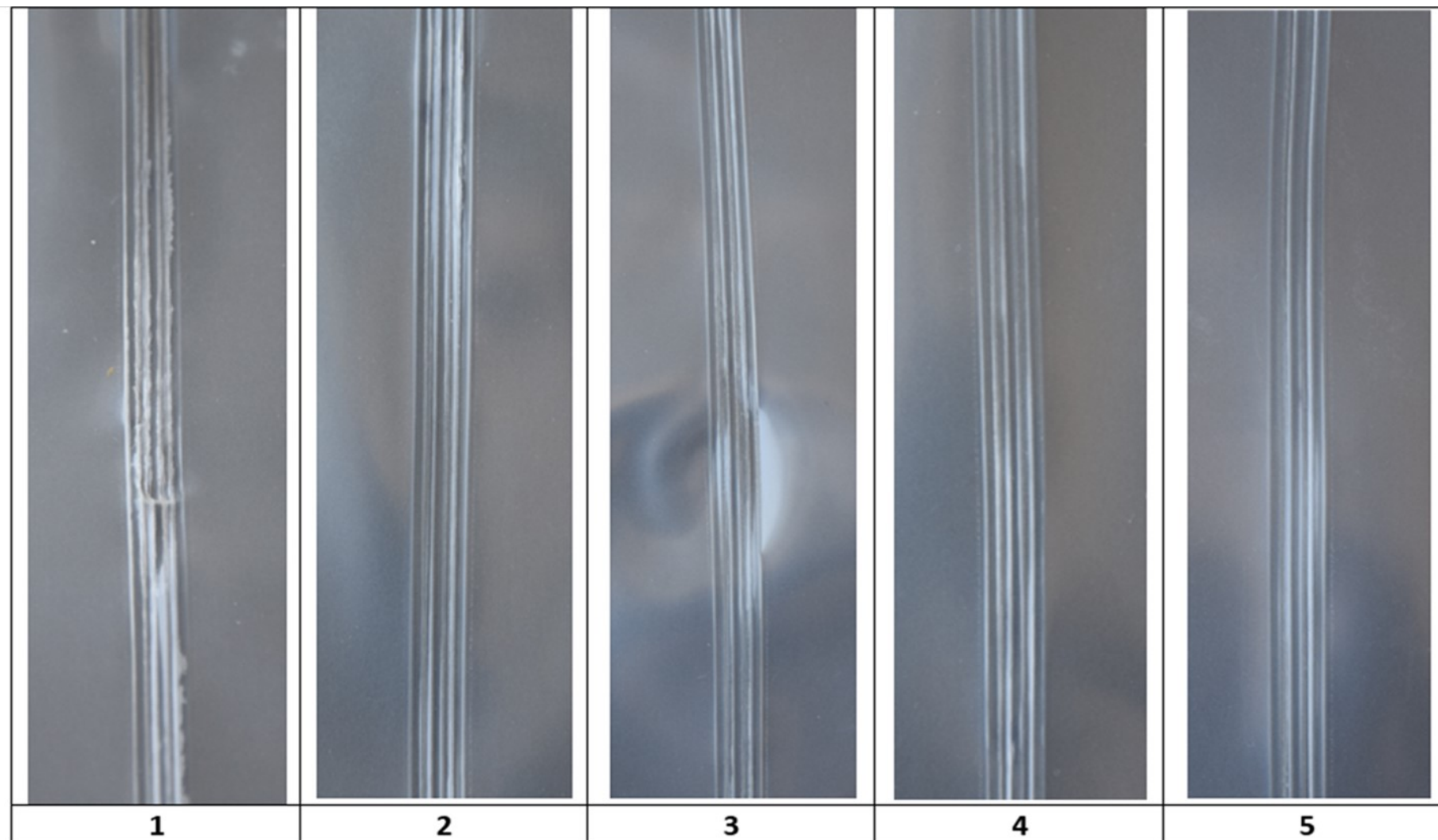
Kod vizualnog izgleda kriteriji koji se ocjenjuju su:

- o Nabiranje spoja ( $N_x$ )
- o Oštećenje spoja ili materijal u zoni spoja ( $O_x$ )

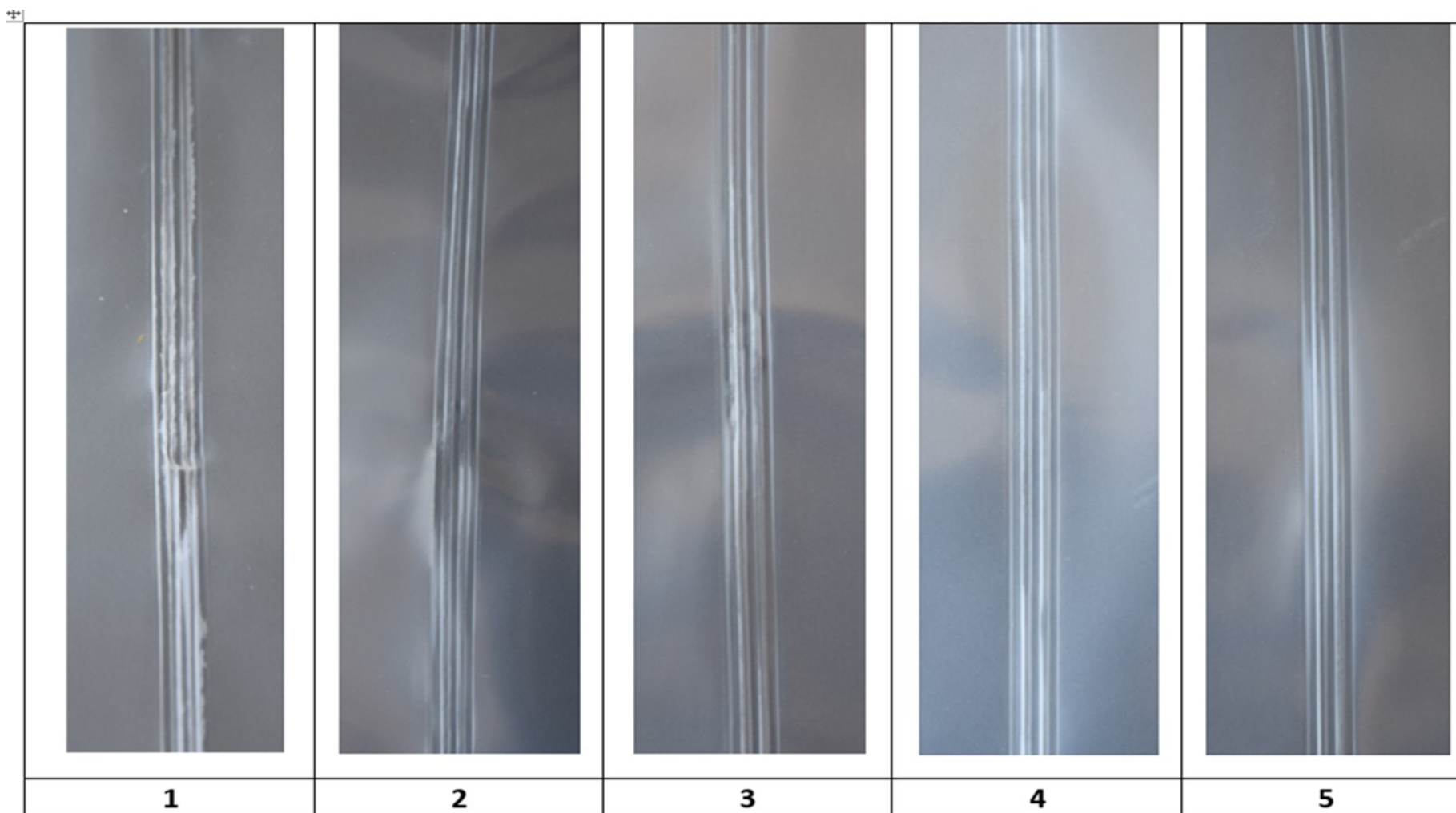


Sl. 3.29 Prikaz načina označavanje vizualne ocjene kvalitete spoja

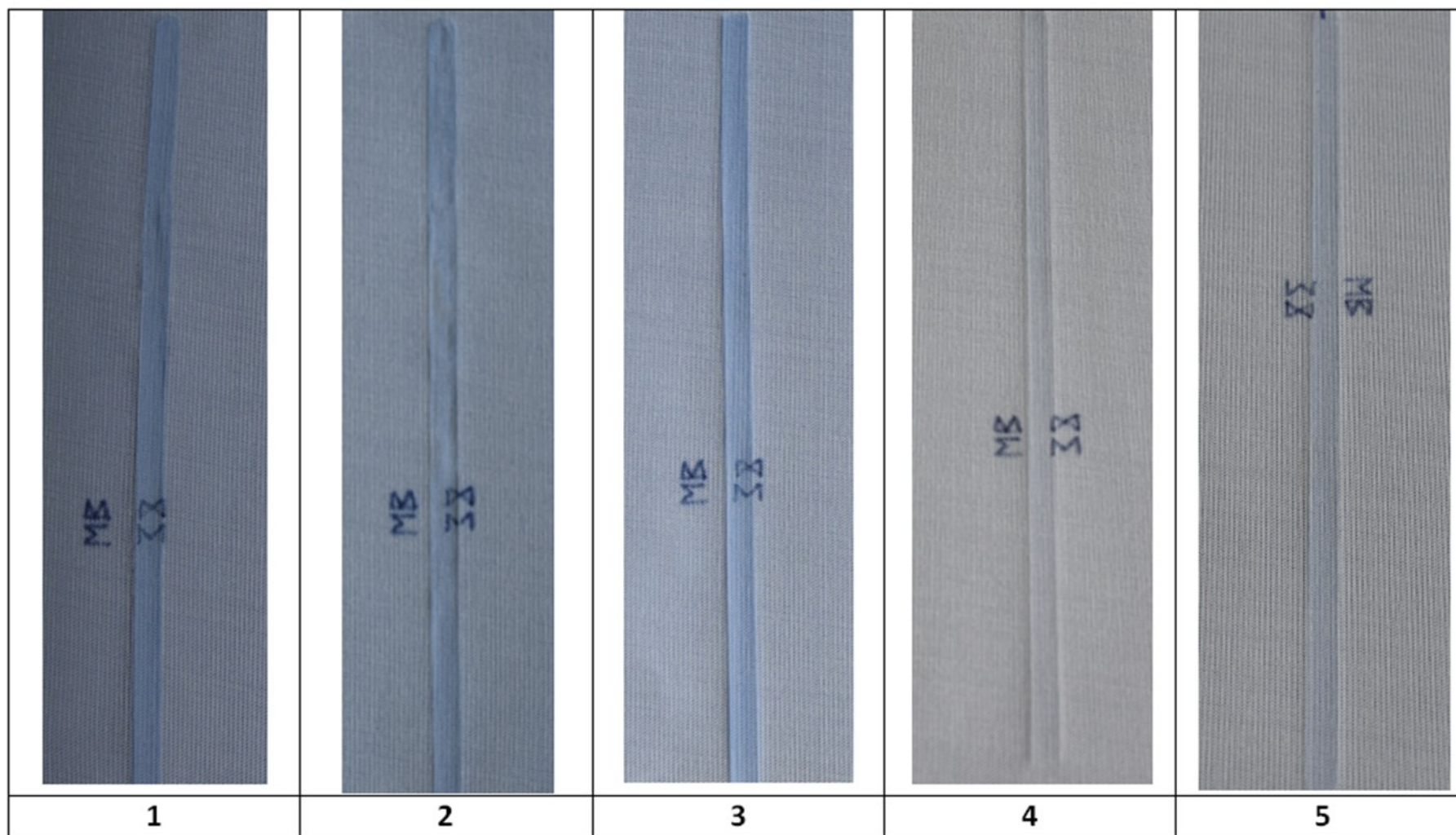
Prikaz primjera ocjene vizualne kvalitete spojeva s lica i naličja spoja, na primjeru uzorka materijala oznake M10 i tehnike ultrazvučnog spajanja te na uzorku materijala oznake M12 i tehnike VF spajanja, sl. od 3.30 do 3.33.



Sl. 3.30 Prikaz uzoraka spojeva s lica nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M10 tehnikom ultrazvučnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)

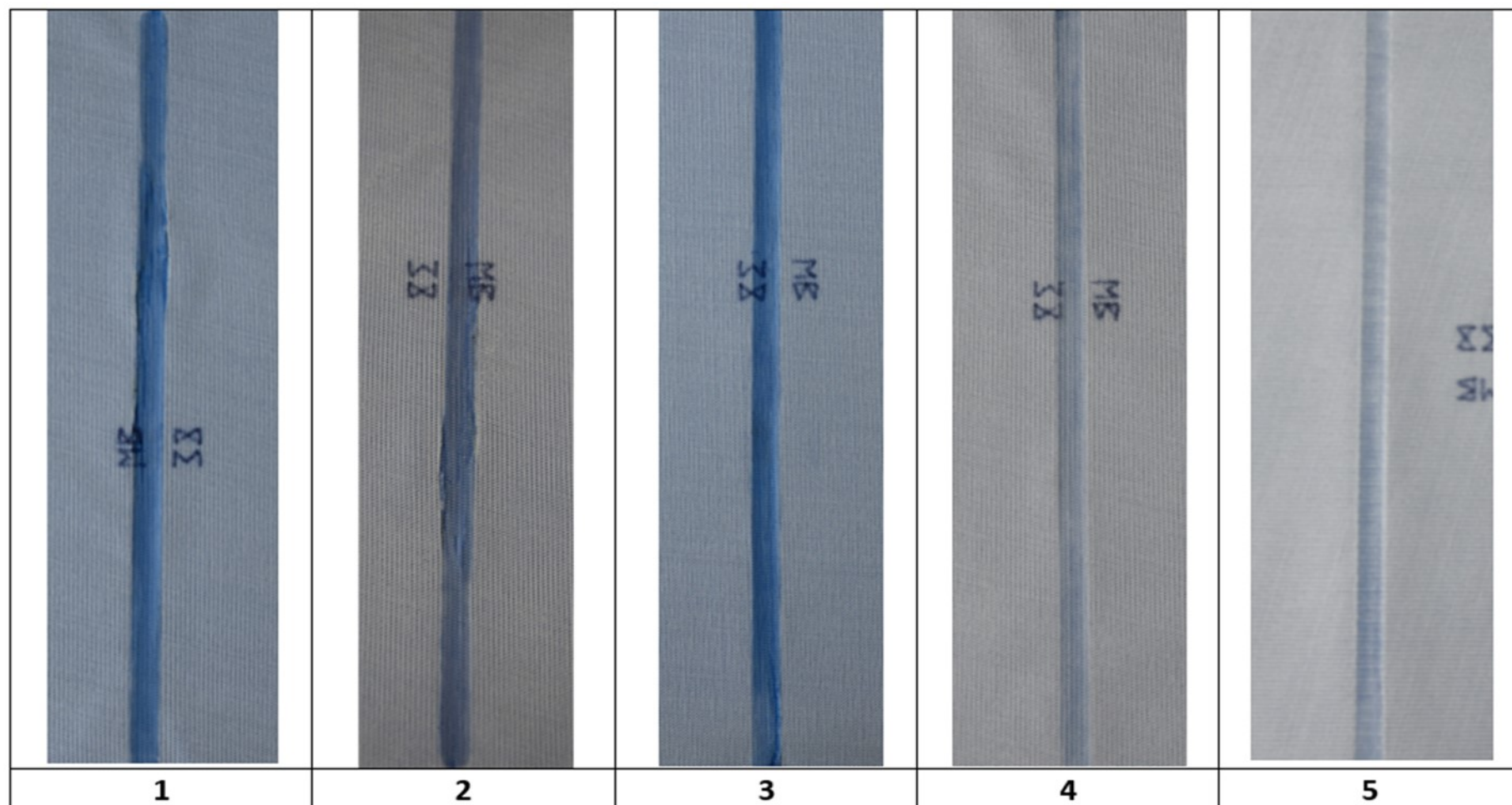


**Sl. 3.31** Prikaz uzoraka spojeva s naličja nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M10 tehnikom ultrazvučnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)



Sl.

3.32 Prikaz uzoraka spojeva s lica nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M12 tehnikom visokofrekventnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)



**SI. 3.33** Prikaz uzoraka spojeva s naličja nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M12 tehnikom visokofrekventnog spajanja s dodijeljenim ocjenama vizualne kvalitete (od 1 do 5)



Tab. 3.12 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja

Parametri spajanja		Oznaka materijala M10		Oznaka materijala M11						Oznaka materijala M12						Oznaka materijala M13						Oznaka materijala M14				
v/m min <sup>-1</sup>	P <sub>s</sub> /W	LL i L1N1		LL		LN i L1N1		NN		LL		LN i L1N1		NN		LL		LN i L1N1		NN		LL	LN i L1N1	N/N		
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y					
3	200	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Uzorak materijala oznake M14 se ne spaja tehnikom ultrazvučnog spajanja, pri zadanim parametrima				
	252	3 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	280	-	-	-	-	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-					
	332	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	2 N <sub>5</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>5</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>					
	372	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>					
5	200	5 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	252	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	280	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	332	-	-	1 N <sub>5</sub> O <sub>1</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	-	-	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-			
	372	-	-	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	-	-	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-		-			
7	200	1 N <sub>5</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>5</sub> O <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	252	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	280	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	332	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	372	-	-	1 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	-	-	3 N <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

Tab. 3.13 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja

Parametri spajanja		Oznaka materijala M10		Oznaka materijala M11				Oznaka materijala M12				Oznaka materijala M13			Oznaka materijala M14										
t/s	I/mA	LL i L1N1		LL		LN i L1N1		NN		LL		LN i L1N1		NN		LL	LN i L1N1	NN	LL	LN i L1N1	NN				
		x	y	X	y	X	y	X	y	X	y	X	y	X	y										
3	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Uzorak materijala oznake M13 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja	Uzorak materijala oznake M14 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja								
	180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-										
	220	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-										
	260	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-										
	300	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-										
5	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Uzorak materijala oznake M13 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja						Uzorak materijala oznake M14 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja				
	180	-	-	-	-	-	-	-	-	1 N <sub>5</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>5</sub> O <sub>1</sub>	-	-	-											-
	220	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-											-
	260	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>											3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>
	300	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>											4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>
7	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		Uzorak materijala oznake M13 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja	Uzorak materijala oznake M14 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja								
	180	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	1 N <sub>4</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>4</sub> O <sub>1</sub>	-	-	-	-	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-											-
	220	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-											-
	260	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>											4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>
	300	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	-	-	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>											3 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>
9	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Uzorak materijala oznake M13 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja						Uzorak materijala oznake M14 se ne spaja visokofrekventnom tehnikom spajanja				
	180	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-											-
	220	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	5 N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	-	-	2 N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	-	-	3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>											3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>
	260	4 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	4 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	-	-	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>1</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>1</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>											3 N <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	300	1 N <sub>4</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>4</sub> O <sub>1</sub>	-	-	-	-	1 N <sub>3</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>3</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>											2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>

Tab. 3.14 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom

Parametri spajanja		Oznaka materijala M10		Oznaka materijala M11				Oznaka materijala M12	Oznaka materijala M13				Oznaka materijala M14										
v/ m min <sup>-1</sup>	T/°C	LL		LL		LN		NN		LL, LN, NN	LL		LN		NN		LL		LN		NN		
		x	y	x	y	x	y	x	y		x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	
3	300	-	-	-	-	-	-	-	-	Spajanjem uzorka materijala oznake M12 pri zadanim parametrima došlo je do razvoja štetnih plinova i stvaranje nanosa na površini klina prilikom kojeg je došlo i do nagrizanja i oštećenja površine klina	-	-	-	-	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	
	350	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	
	400	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	450	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	1 N <sub>1</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>1</sub> O <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	300	-	-	-	-	-	-	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>		-	-	-	-	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	
	350	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	
	400	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	-	-		
	350	-	-	-	-	-	-	3 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-		
	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-		
	450	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	500	1 N <sub>2</sub> O <sub>1</sub>	1 N <sub>2</sub> O <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tab. 3.15 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom

Parametri spajanja		Oznaka materijala M10		Oznaka materijala M11				Oznaka materijala M12	Oznaka materijala M13				Oznaka materijala M14											
v/ m min <sup>-1</sup>	T/°C	LL		LL		LN		NN		LL	LN		NN		LL		LN		NN					
		x	y	x	y	x	y	x	y		x	y	x	y	x	y	x	y	x	y				
3	300	-	-	-	-	-	-	-	-	Spajanjem uzorka materijala oznake M12 pri zadanim parametrima došlo je do razvoja štetnih plinova te se uzorak materijala oznake M12 nije spajao tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom	-	-	-	-	3 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		
	350	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	3 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		
	400	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	500	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	300	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	350	-	-	-	-	-	-	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>		-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
	400	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	
	450	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	500	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	350	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-		
	400	-	-	-	-	-	-	3 N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-		
	450	-	-	-	-	-	-	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 N <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-		
	500	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	3 N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2 N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-		

Tab. 3.16 Prikaz ocjene vizualne kvalitete spojeva u 2.-fazi ocjenjivanja spojeva nastalih kombinacijom šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom, spajanjem adhezivne trake po šavu

Parametri šivanja		Oznaka materijala M10	Oznaka materijala M11		Oznaka materijala M12		Oznaka materijala M13		Oznaka materijala M14		
du/ mm	Nm	Uzorak M10 nije spajan na ovaj način	L/L		L/L		L/L		L/L		Parametri spajanja toplinskom konvekcijom: - odgoda kretanja 15 ms - tlak 2 bara - brzina spajanja 4 m min <sup>-1</sup> - temperatura vrućeg zraka 400 °C
2	90		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	
			100	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	
3	90		4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	
	100		4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	4 N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	

## 4. REZULTATI

Na temelju provedenih istraživanja na mjernim uzorcima koji su opisani u eksperimentalnom dijelu ove disertacije, u ovom poglavlju prikazani su svi rezultati istraživanja svojstava spojeva koji su izrađeni upotrebom visokotehnoloških tehnika spajanja.

U prvom dijelu prikazana su rezultati ispitivanja spojeva mjerenih na mjernim uređajima KES-FB mjernog sustava i to redom: vlačna, smična, savojna i kompresijska svojstva spojeva. Prikazani su i rezultati mjerenja zrakopropusnosti i vodonepropusnosti spojeva, čvrstoće spojeva, debljine spojeva, te je prikazan postupak izračuna gustoće energije spajanja potrebne za  $1 \text{ cm}^3$  spoja.

### 4.1 Rezultati ispitivanja vlačnih svojstava spojeva izrađenih visokotehnološkim tehnikama spajanja

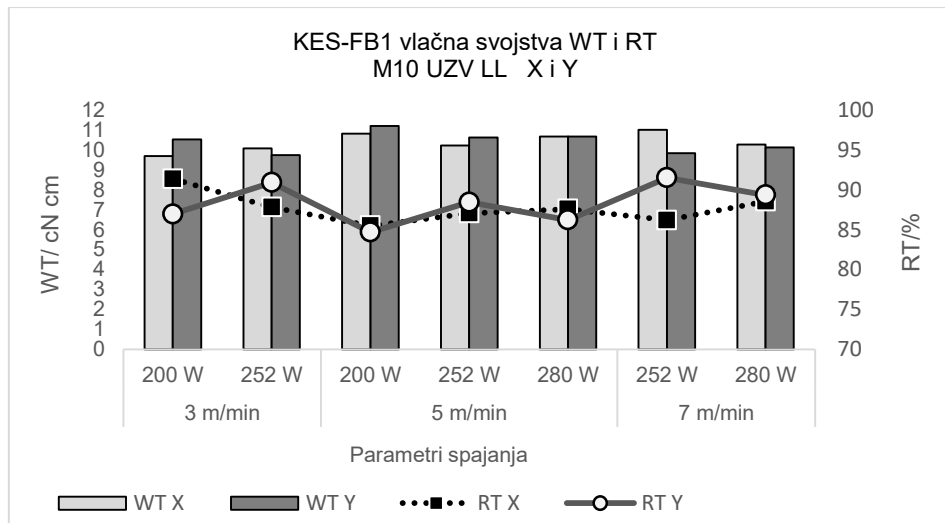
U ovom poglavlju prikaz je svih mjernih rezultata ispitivanja vlačnih svojstva spojeva izmjerenih na mjernom uređaju KES-FB1. Mjerni rezultati prikazani su u obliku grafova za svaku tehniku spajanja, a opisan je i zaključak statističke obrade mjernih rezultata.

#### 4.1.1 Rezultati ispitivanja vlačnih svojstava spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja

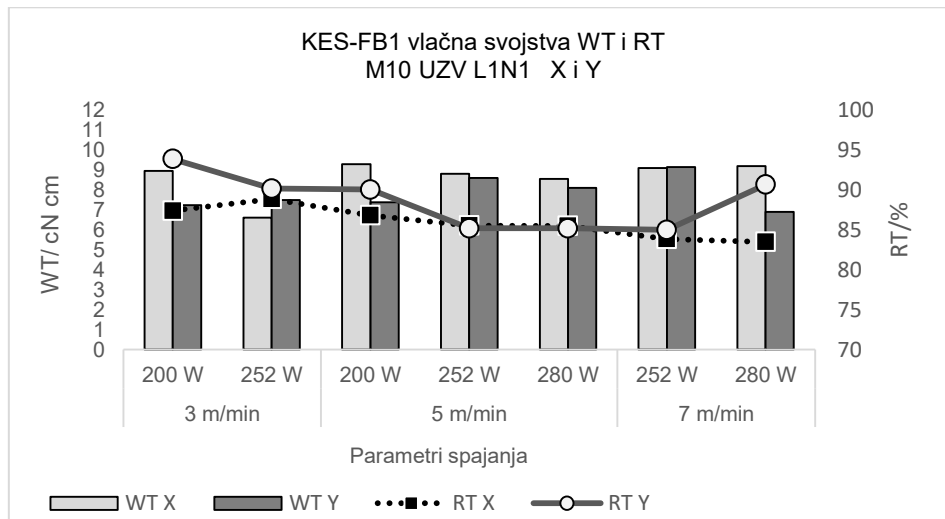
Mjerni rezultati vlačnih svojstava spojeva postignutih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M12 i M13, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala), LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.1 do 4.3.

U grafičkim prikazima dat je odnos između vlačnih parametara, deformacijskog rada WT i sposobnost oporavka, RT za spojeve spajane pri definiranim parametrima spajanja a) u x (poprečnom) smjeru i b) za spojeve spajane u y (uzdužnom) smjeru.

Na sl. 4.1 prikaz je odnosa parametara vlačnih svojstava za spojeve izrađene ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M10 prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)



a)



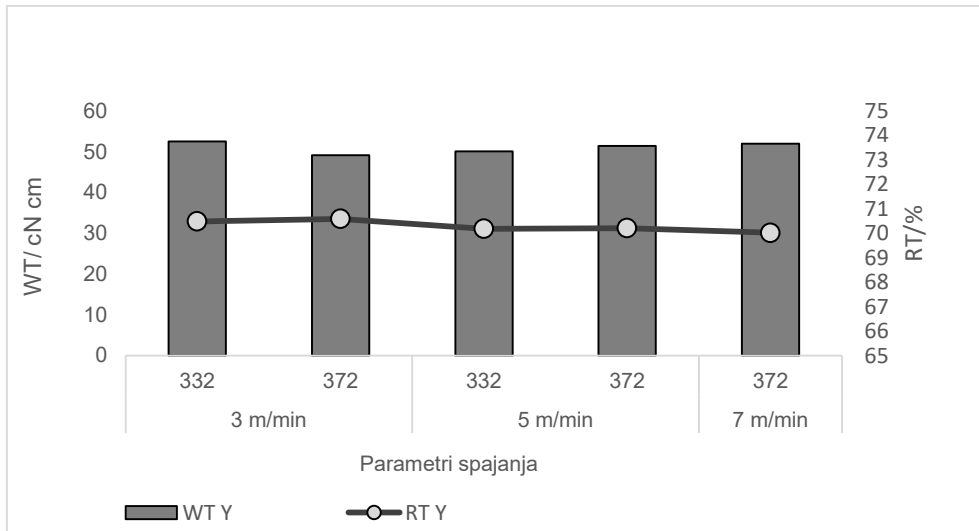
b)

**SI. 4.1** Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja

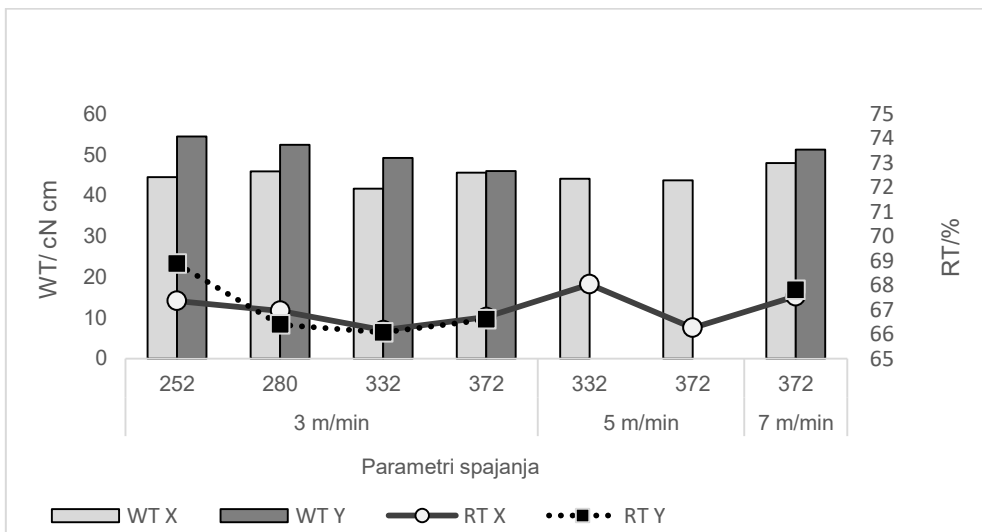
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada, WT i sposobnosti oporavka, RT za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi - 0,857, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi - 0,956, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi - 0,673, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara.

Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi - 0,858, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

Na sl. 4.2 prikaz je odnosa parametara vlačnih svojstava za spojeve izrađene ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) NN (naličje na naličje spajanog materijala).



a)



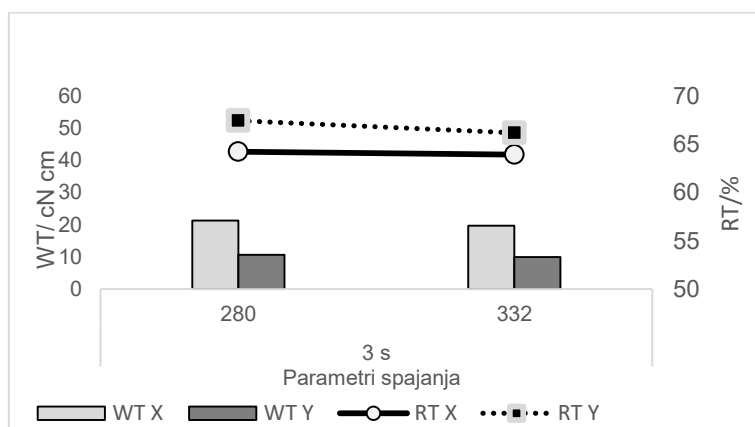
b)

**SI. 4.2** Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) u y smjeru spajanja i b) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja

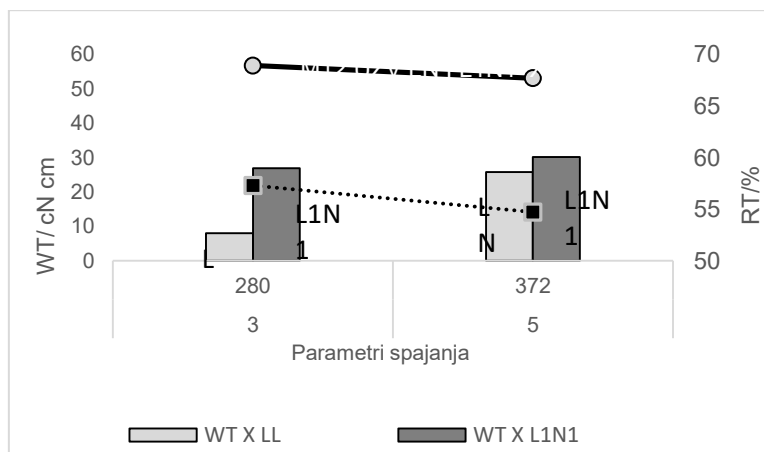


Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada, WT i sposobnosti oporavka, RT za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajano materijala) u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi -0,365, što ukazuje na negativnu i slabu korelaciju između parametara. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajano materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,499 što ukazuje na relativno slabu korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi 0,645, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između vlačnih parametara.

Na sl. 4.3 prikaz je odnosa parametara vlačnih svojstava za spojeve izrađene ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala M12 prema rasporedu slojeva materijala a) NN (naličje na naličje spajano materijala) i b) LN i L1N1 (lice na naličje spajano materijala)



a)



b)

**SI. 4.3** Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) NN (naličje na naličje spajano materijala) u x i y smjeru spajanja i b) LN i L1N1 (lice na naličje spajano materijala) u x smjeru spajanja

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara vlačnih svojstava.

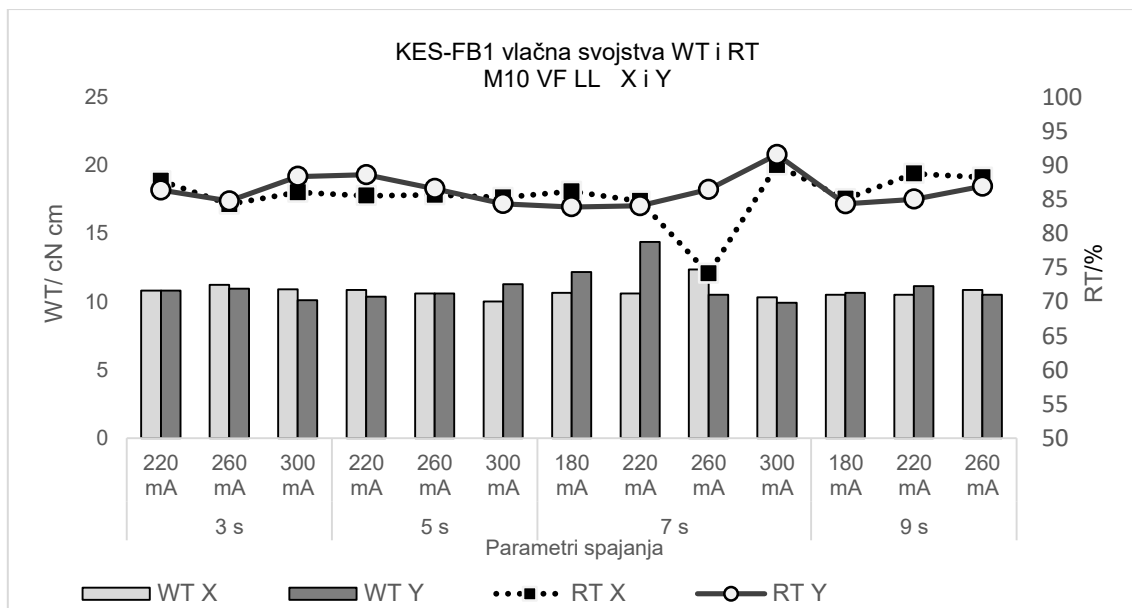
#### 4.1.2 Rezultati ispitivanja vlačnih svojstava spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja

Mjerni rezultati vlačnih svojstava spojeva postignutih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.4 do 4.6.

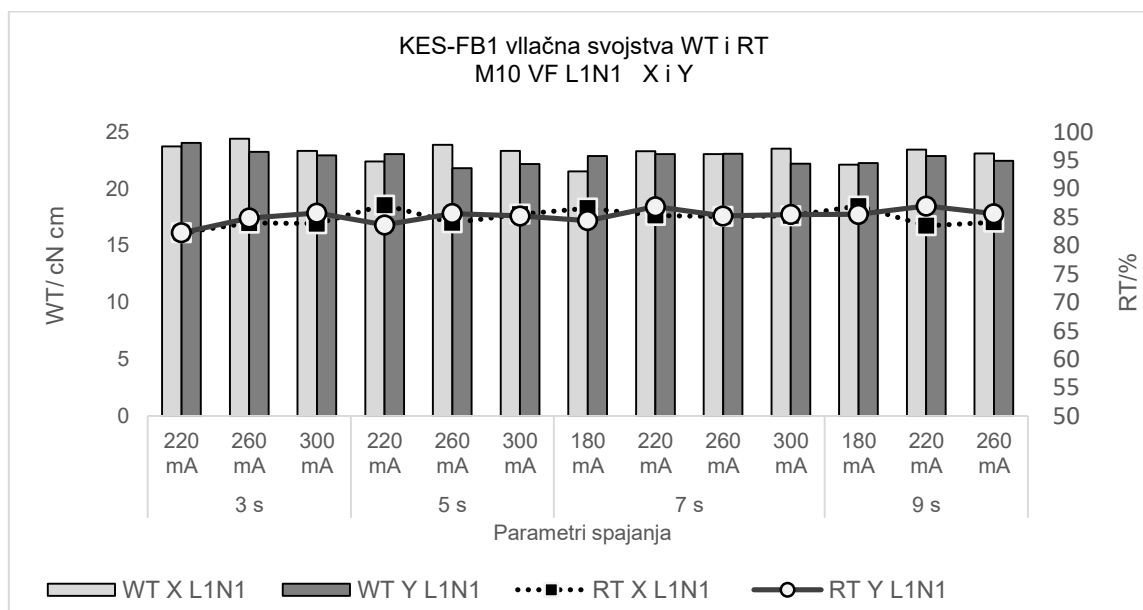
U grafičkim prikazima dat je odnos između vlačnih parametara, deformacijskog rada  $WT/cN\ cm$  i sposobnost oporavka,  $RT/\%$  za spojeve spajane pri definiranim parametrima spajanja a) u x smjeru i b) za spojeve spajane u y smjeru.

Na sl. 4.4 prikaz je odnosa parametara vlačnih svojstava za spojeve izrađene visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M10 prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala).

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada,  $WT$  i sposobnosti oporavka,  $RT$  za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi  $-0,853$ , što ukazuje na negativnu ali jaku korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi  $-0,638$ , što ukazuje na negativnu i srednje jaku korelaciju između parametara. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi  $-0,799$ , što ukazuje na negativnu i srednje jaku korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi  $-0,511$  što ukazuje na negativnu i srednje jaku korelaciju između parametara.



a)

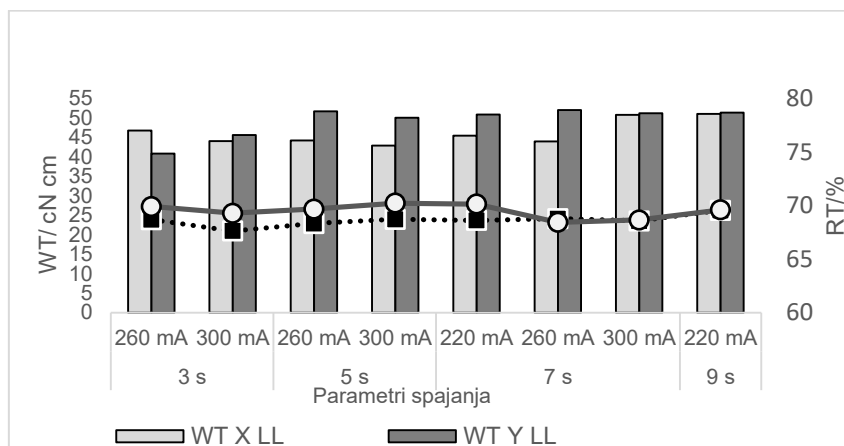


b)

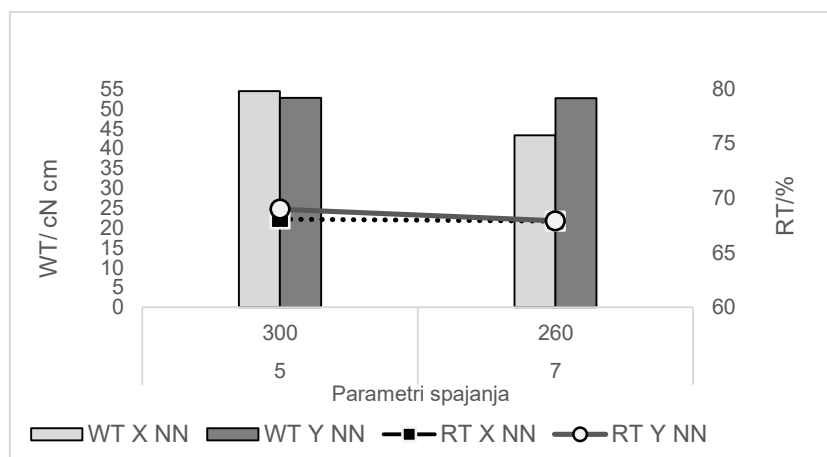
**SI. 4.4** Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajano materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajano materijala) u x i y smjeru spajanja

Na sl. 4.5 prikaz je odnosa parametara vlačnih svojstava za spojeve izrađene visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu

slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) NN (naličje na naličje spajanog materijala).



a)



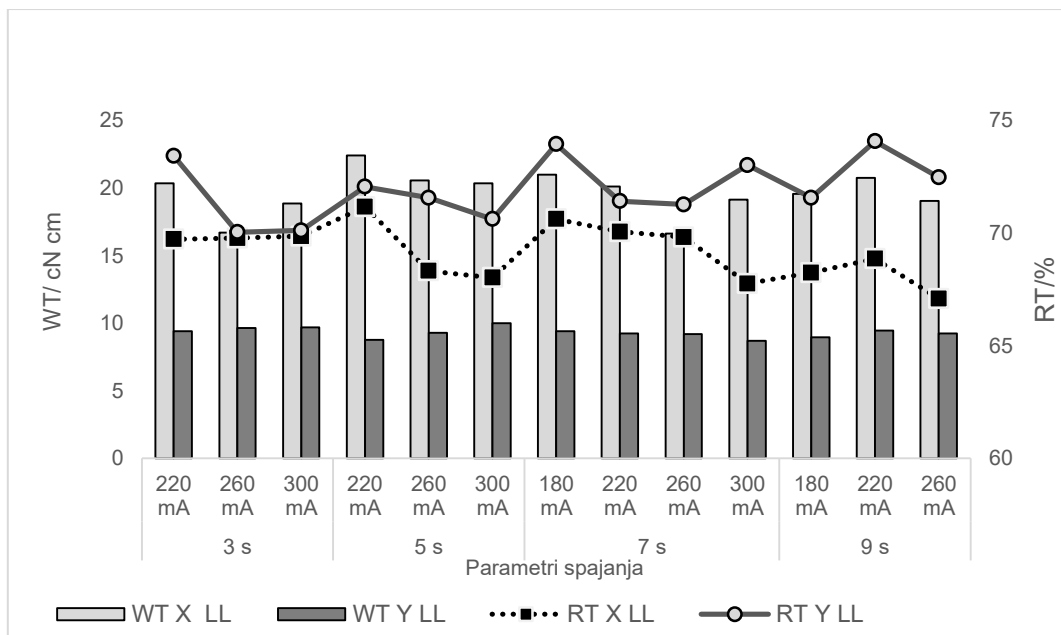
b)

**Sl. 4.5** Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja

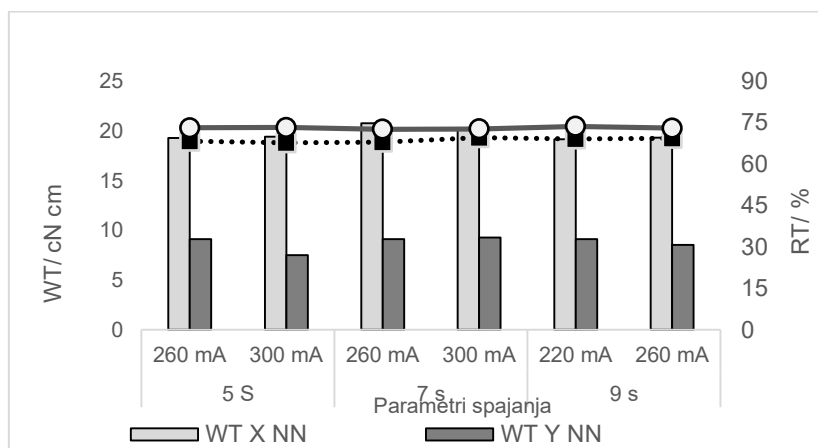
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada, WT i sposobnosti oporavka, RT za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi -0,853, što ukazuje na negativnu i jaku korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi -0,638, što ukazuje na negativnu i srednje jaku korelaciju između parametara. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog

materijala) zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara vlačnih svojstava.

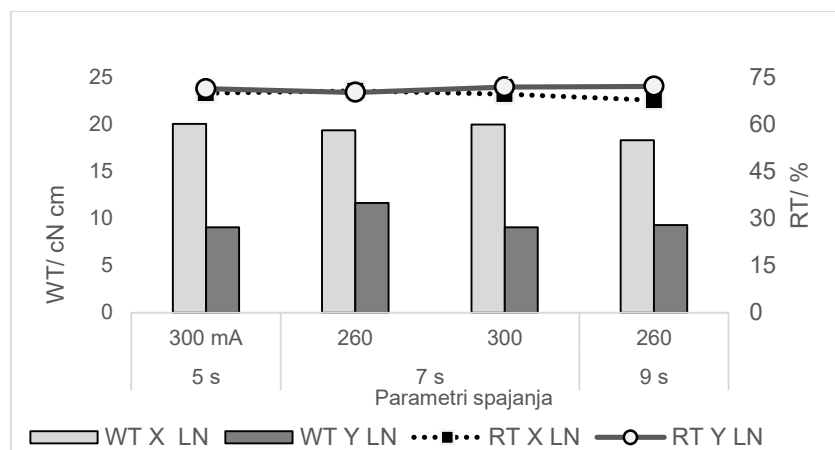
Na sl. 4.6 prikaz je odnosa parametara vlačnih svojstava za spojeve izrađene visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala M12 prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajano materijala) i b) NN (naličje na naličje spajano materijala); c) LN (lice na naličje spajano materijala) i d) L1N1 (lice na naličje spajano materijala).



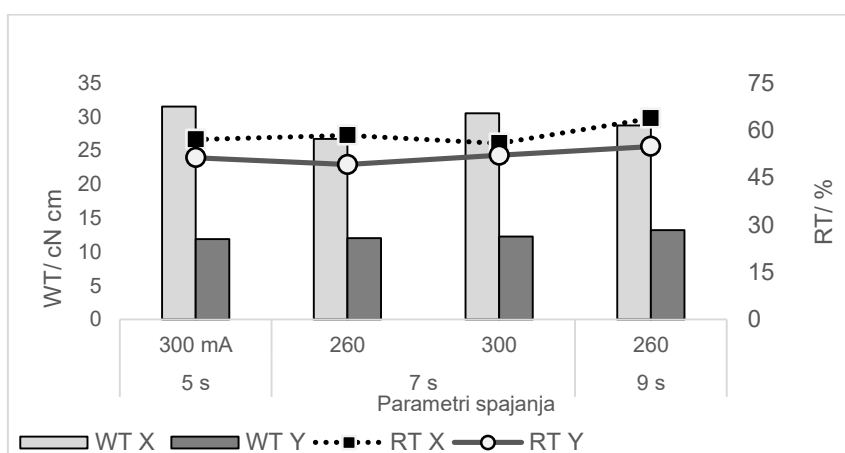
a)



b)



c)



d)

**SI. 4.6** Prikaz vrijednosti vlačnih parametara, deformacijskog rada WT/ cN cm i sposobnost oporavka, RT/ %, spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala), b) NN (naličje na naličje spajanog materijala), c) LN (lice na naličje spajanog materijala) i d) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja.

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada, WT i sposobnosti oporavka, RT za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,172, što ukazuje na neznatnu korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi -0,365, što ukazuje na negativnu i relativno slabu korelaciju između parametara. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi -0,198, što ukazuje na negativnu i neznatnu korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi -0,220, što ukazuje na negativnu i neznatnu korelaciju između parametara. Za spojeve spajane prema

rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,748, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi -0,902 što ukazuje na negativnu i jaku korelaciju između parametara. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi -0,426, što ukazuje na negativnu i relativno slabu korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije  $r_y$  za spojeve spajane u y smjeru iznosi 0,873, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

## **4.2. Rezultati ispitivanja smičnih svojstava spojeva postignutih visokotehnološkim tehnikama spajanja**

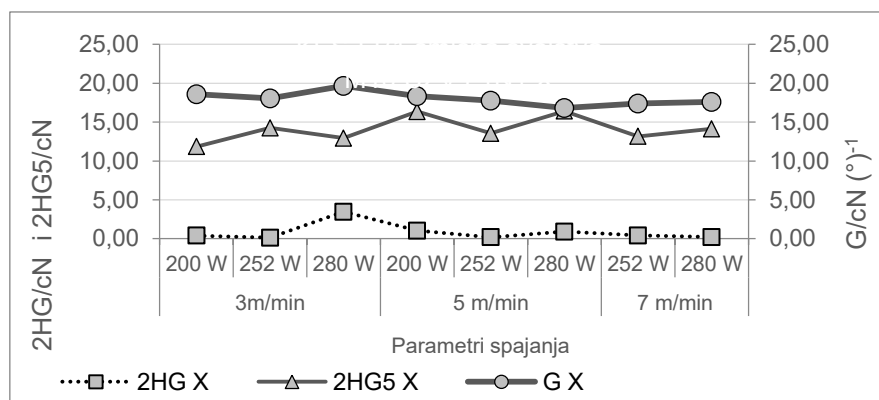
U ovom poglavlju prikaz je mjernih rezultata ispitivanja smičnih svojstava spojeva izmjenjenih na mjernom uređaju KES-FB1. Mjerni rezultati prikazani su u obliku grafova za svaku visokotehnološku metodu spajanja, a opisan je i zaključak statističke obrade mjernih rezultata.

### **4.2.1 Rezultati ispitivanja smičnih svojstava spojeva postignutih ultrazvučnom tehnikom spajanja**

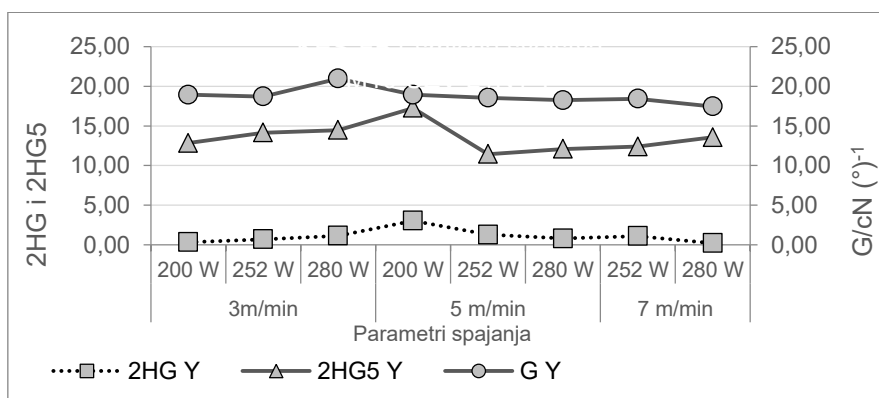
Mjerni rezultati smičnih svojstava spojeva postignutih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorcima materijala oznake M10, M11 i M12 spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice), NN (naličje na naličje) LN (lice na naličje) i L1N1 (lice na naličje) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.7 do 4.9.

U grafičkim prikazima dat je odnos između smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (^{\circ})^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^{\circ}/cN$  za spojeve spojene pri definiranim parametrima spajanja u x i y smjeru spajanja. Na sl. 4.7 prikaz je odnosa smičnih parametara spojeva, izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M10 prema rasporedu materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala). Uzorci spajani LL (lice na lice spajanog materijala) nisu mogli biti izmjereni zbog velikih nabora koji su se javili za vrijeme mjerenja, te

mjerni uređaj KES-FB1 nije zabilježio mjerne vrijednosti. Razlog tome je prevelika istezljivost uzorka materijala oznake M10.



a)



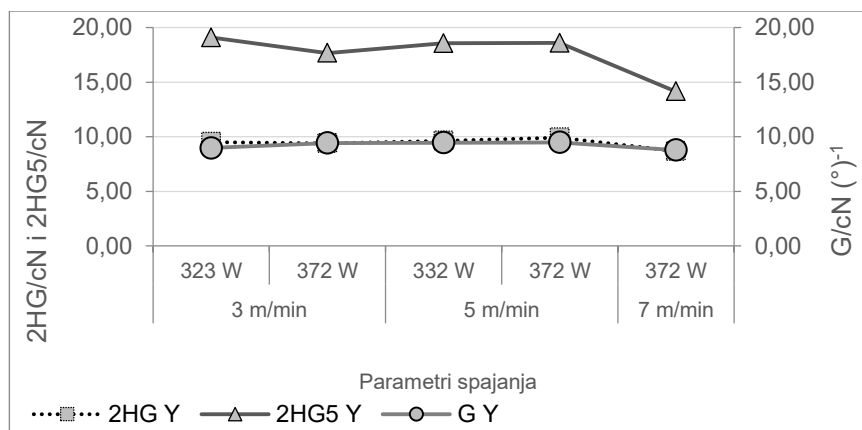
b)

**Sl. 4.7** Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (^{\circ})^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^{\circ}/cN$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih a) u x smjeru; b) u y smjeru

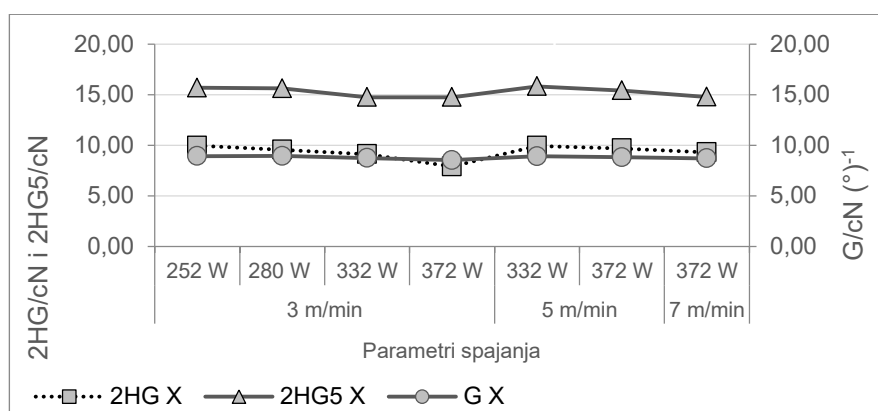
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^{\circ}/cN$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi -0,066, što ukazuje na potpunu odsutnost korelacije i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,675, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između smičnih parametara.

Na sl. 4.8 prikaz je odnosa smičnih parametara spojeva, izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu materijala a) LL (lice na lice spajano materijala) u y smjeru spajanja, b) NN (naličje na naličje spajano materijala) u x i y smjeru spajanja.

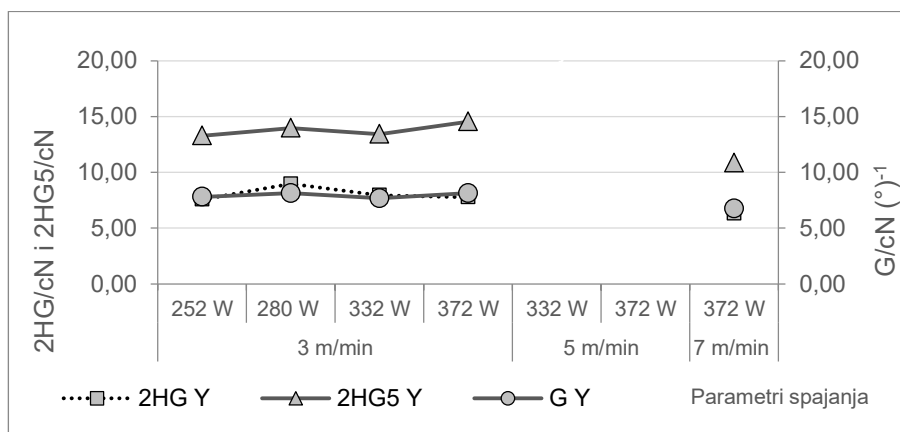




a)



b)

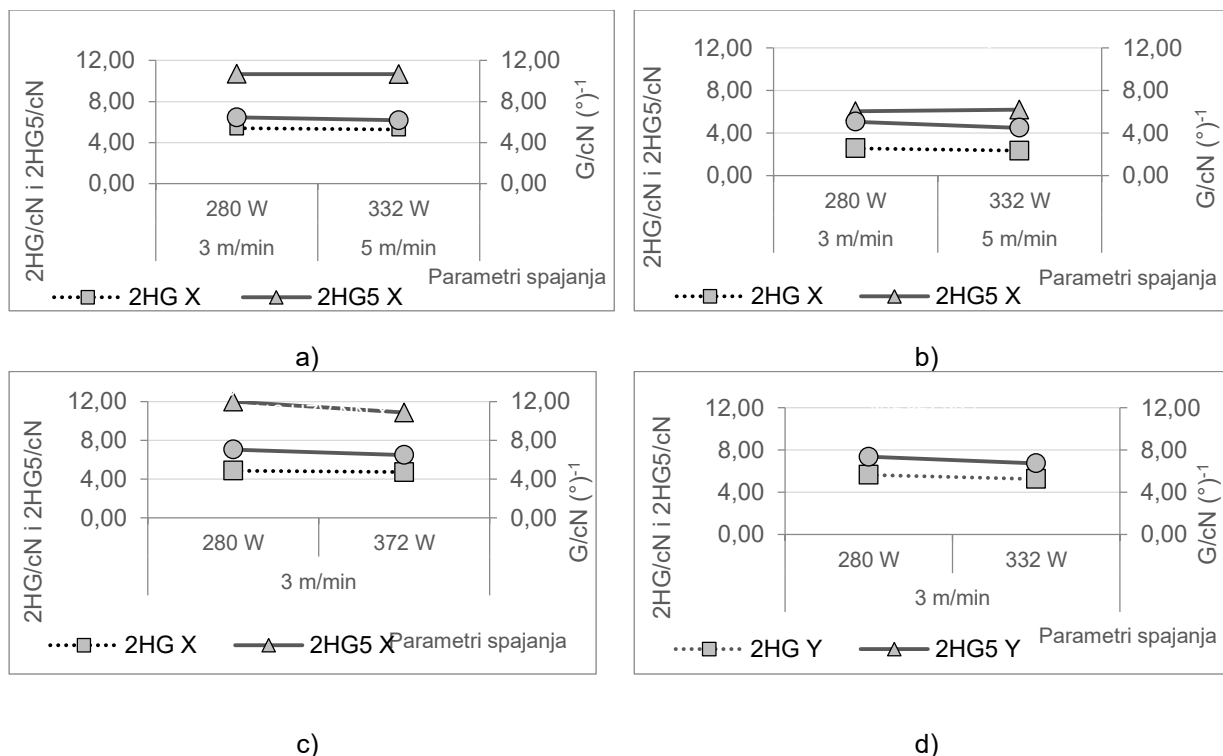


c)

**SI. 4.8** Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (^{\circ})^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^{\circ}/cN$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu slojeva materijala) LL (lice na lice spajanog materijala) u y smjeru spajanja, b) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja i c) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^\circ$  cN i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^\circ$  cN za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u y smjeru spajanja koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,969 što ukazuje na jaku korelaciju. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,770 što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,811, što ukazuje na jaku korelaciju između vlačnih parametara.

Na sl. 4.9 prikaz je odnosa smičnih parametara spojeva, izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu materijala a) LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja, b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja, c) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i d) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja.



**Sl. 4.9** Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti  $G/cN$  ( $^\circ$ )<sup>-1</sup>, histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^\circ$  cN i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^\circ$  cN spojeva izrađenih primjenom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) LN (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru spajanja, b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja, c) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i d) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja

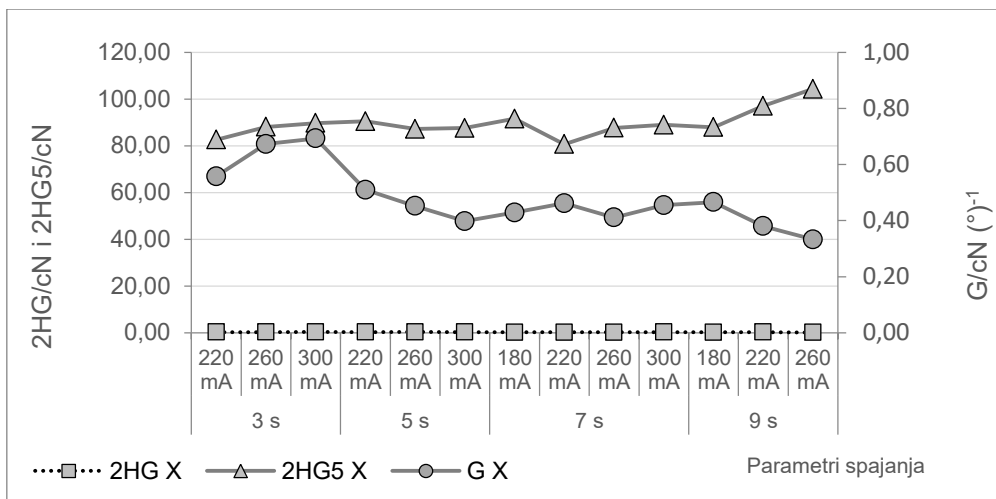
Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva na uzorku materijala M12, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara vlačnih svojstava.

#### 4.2.2 Rezultati ispitivanja smičnih svojstava spojeva postignutih visokofrekventnom tehnikom spajanja

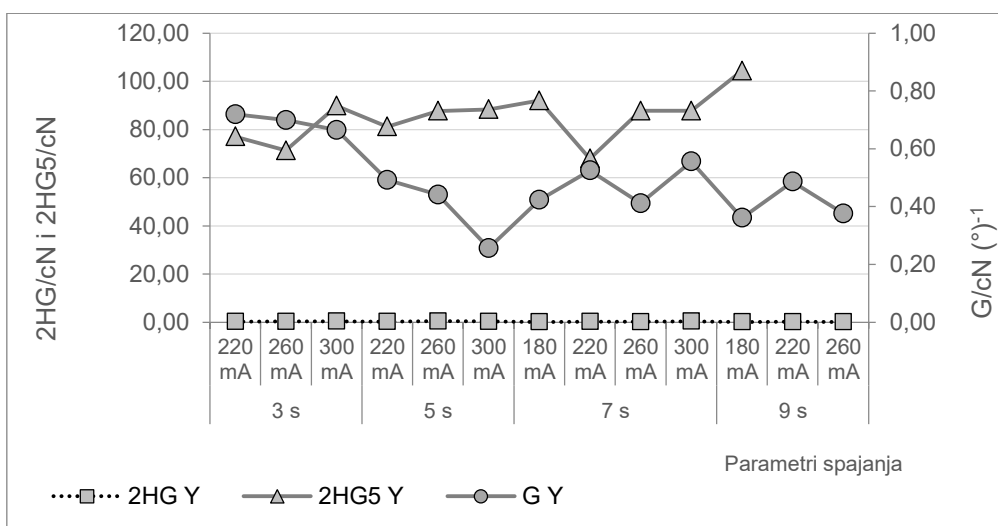
Mjerni rezultati smičnih svojstava spojeva postignutih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.10 do sl. 4.13.

U grafičkim prikazima dat je odnos između smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (^{\circ})^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^{\circ}/cN$  za spojeve spojene pri definiranim parametrima spajanja u x i y smjeru spajanja. Na sl. 4.10 prikaz je odnosa smičnih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M10 prema rasporedu materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala). Uzorci spajani LL (lice na lice spajanog materijala) nisu mogli biti izmjereni zbog velikih nabora koji su se javili za vrijeme mjerenja, te mjerni uređaj KES-FB1 nije zabilježio mjerne vrijednosti. Razlog tome je prevelika istezljivost uzorka materijala oznake M10.

Izračunom koeficijenta korelacije, r između parametara histereze smične sile 2HG i histereze smične sile 2HG5 za spojeve spajane prema rasporedu slijeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi -0,248 što ukazuje na negativnu i relativno slabu korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi -0,275, što ukazuje na negativnu i relativno slabu korelaciju između vlačnih parametara.



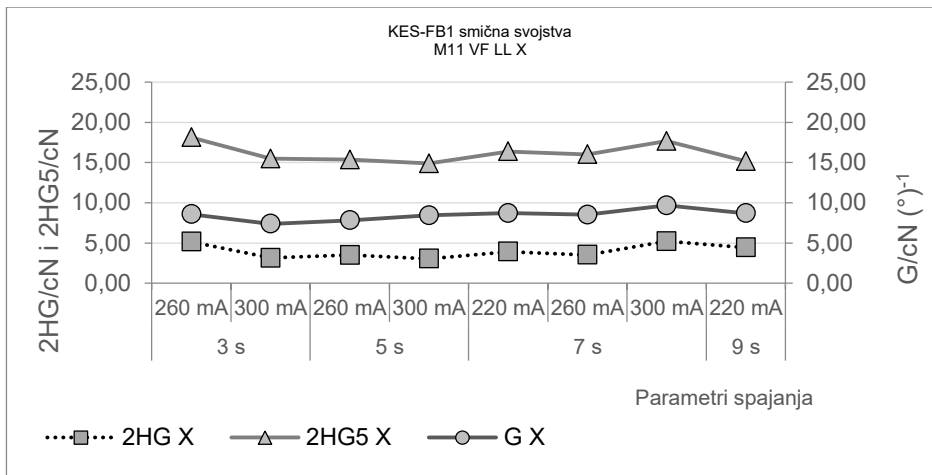
a)



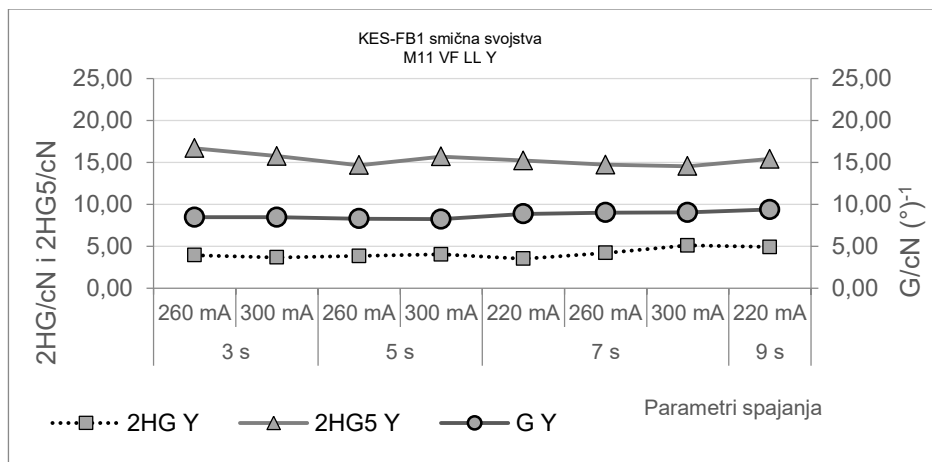
b)

**Sl. 4.10** Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (^{\circ})^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^{\circ}/cN$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih prema rasporedu slojeva materijala a) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja

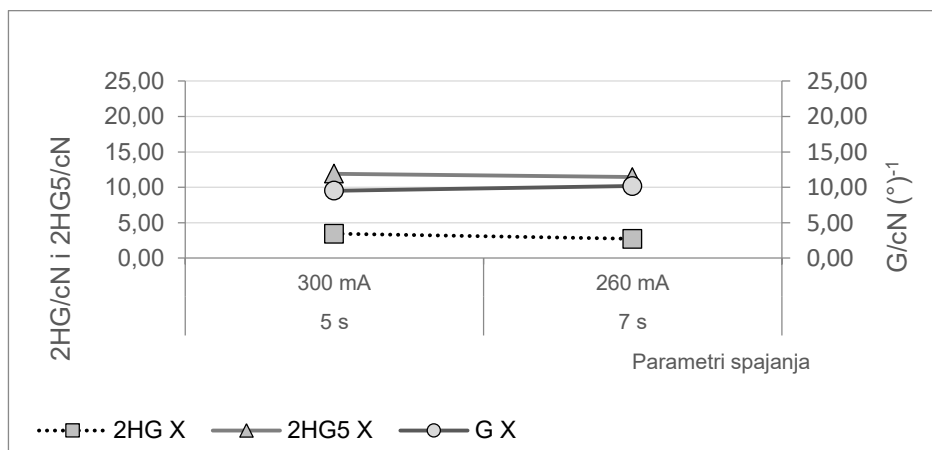
Na sl. 4.11 prikaz je odnosa smičnih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom metodom spajanja, na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala) a) u x smjeru spajanja i b) u y smjeru spajanja, te uzorci spajani prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala) c) u x smjeru spajanja i d) u y smjeru spajanja.



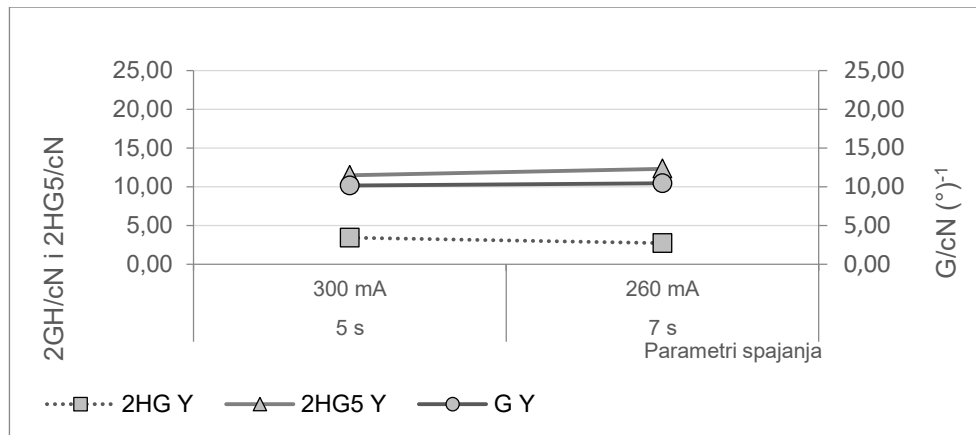
a)



b)



c)

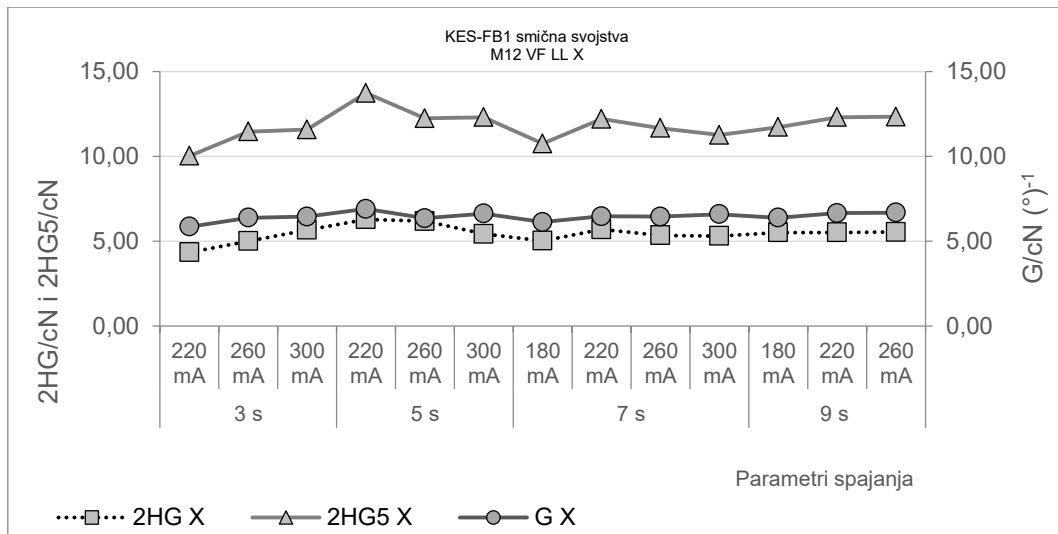


d)

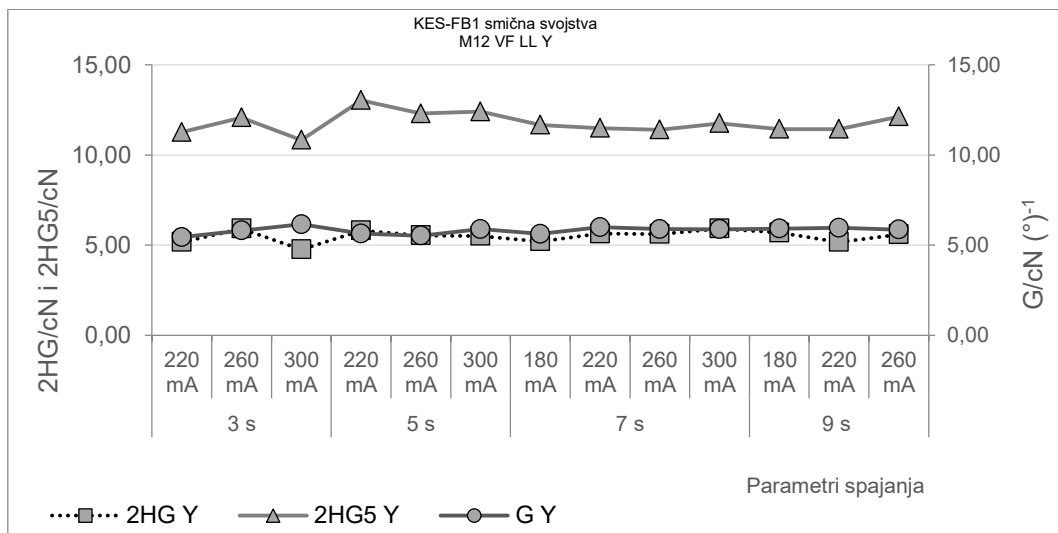
**Sl. 4.11** Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (°)^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5°/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5°/cN$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu materijala a) LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru spajanja, b) LL (lice na lice spajanog materijala) u y smjeru spajanja, c) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja i d) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru spajanja

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara histereze smične sile 2HG i histereze smične sile 2HG5 za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,827 što ukazuje na jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi – 0,345, što ukazuje na negativnu i relativno slabu korelaciju između vlačnih parametara. Za spojeve spajane prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala) zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva na uzorku materijala oznake M11, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara vlačnih svojstava.

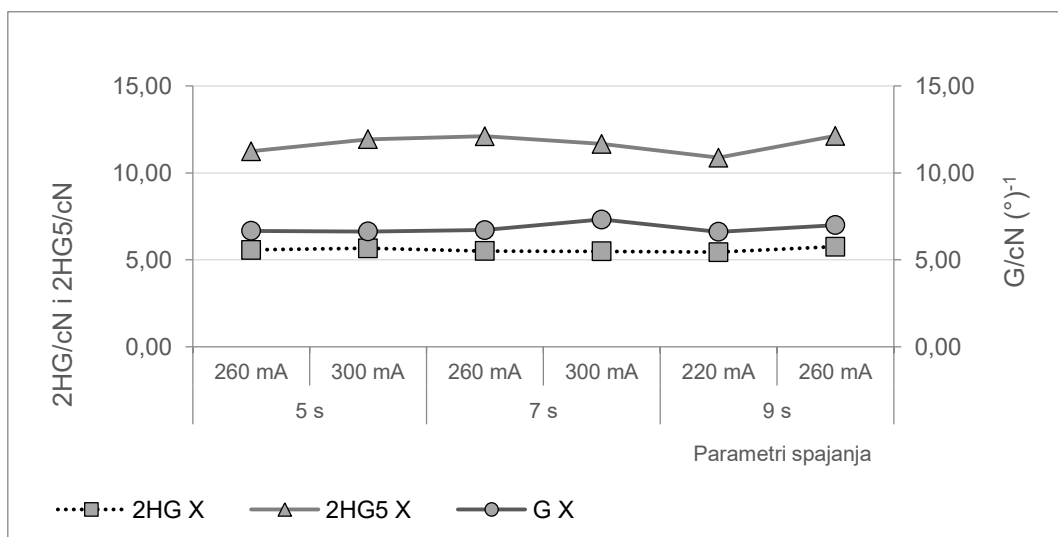
Na sl. 4.12 prikaz je odnosa smičnih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu materijala LL (lice na naličje spajanog materijala) a) u x smjeru spajanja i b) u y smjeru spajanja, te prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala) c) u x smjeru spajanja i d) u y smjeru spajanja.

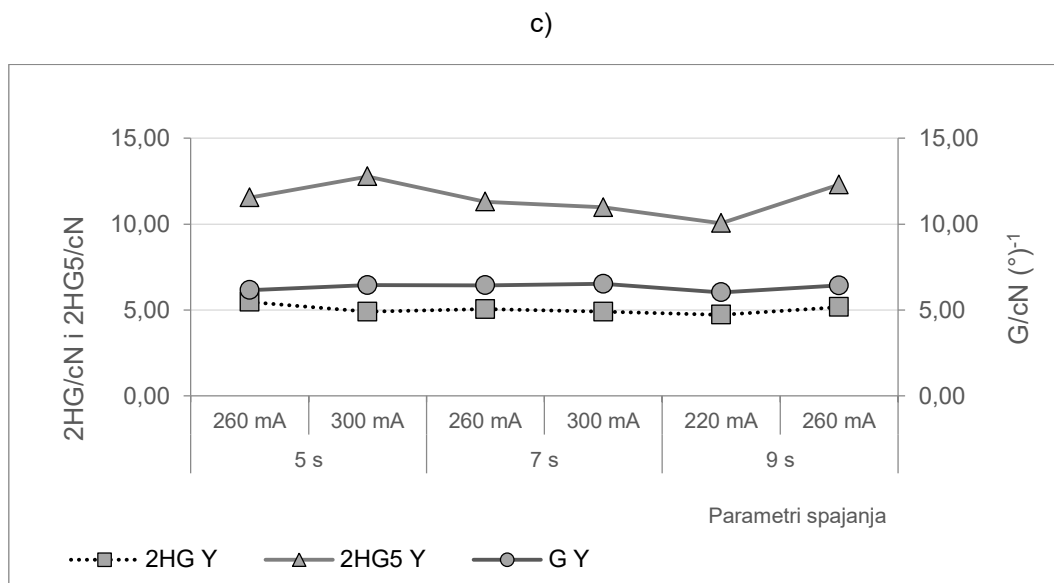


a)



b)





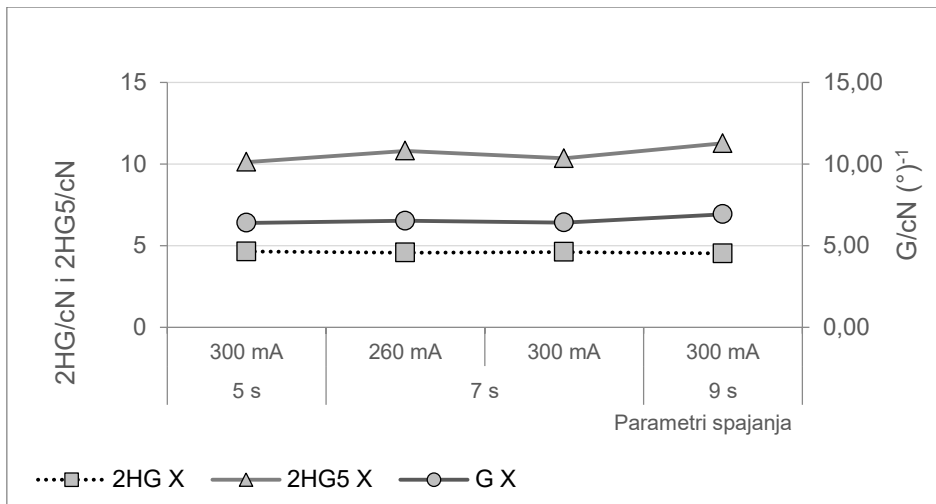
**Sl. 4.12** Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (^{\circ})^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^{\circ}/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^{\circ}/cN$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru spajanja, b) y smjeru spajanja; NN (naličje na naličje spajanog materijala), c) x smjeru spajanja i d) y smjeru spajanja

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara histereze smične sile 2HG i histereze smične sile 2HG5 za spojeve spajane prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru spajanja  $r_x$  iznosi 0,88 i u smjeru spajanja  $y$   $r_y$  iznosi 0,60.

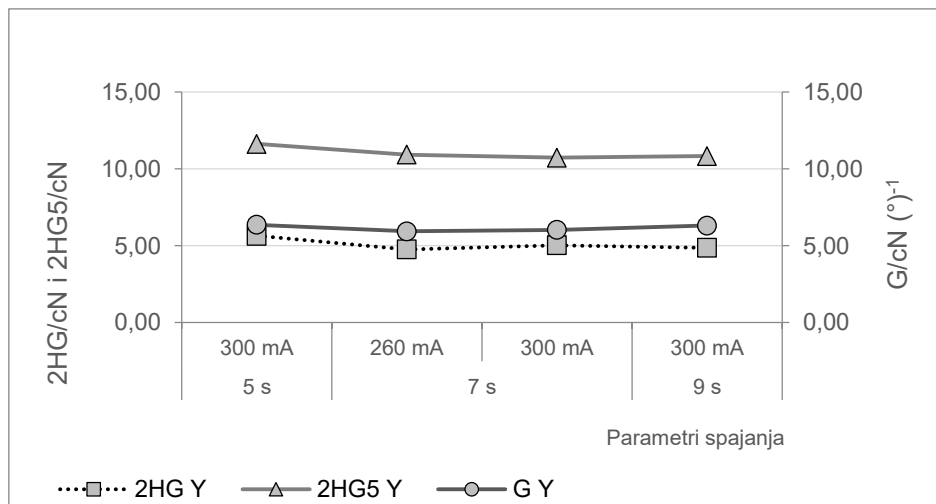
Koeficijent korelacije za spojeve spajane na način NN (naličje na naličje) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,624, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,369 što ukazuje na relativno slabu korelaciju između vlačnih parametara.

Na sl. 4.13 prikaz je odnosa smičnih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom metodom spajanja, na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu materijala LN (lice na naličje spajanog materijala) a) u x smjeru spajanja i b) u y smjeru spajanja; te prema rasporedu materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) c) u x smjeru i d) u y smjeru.

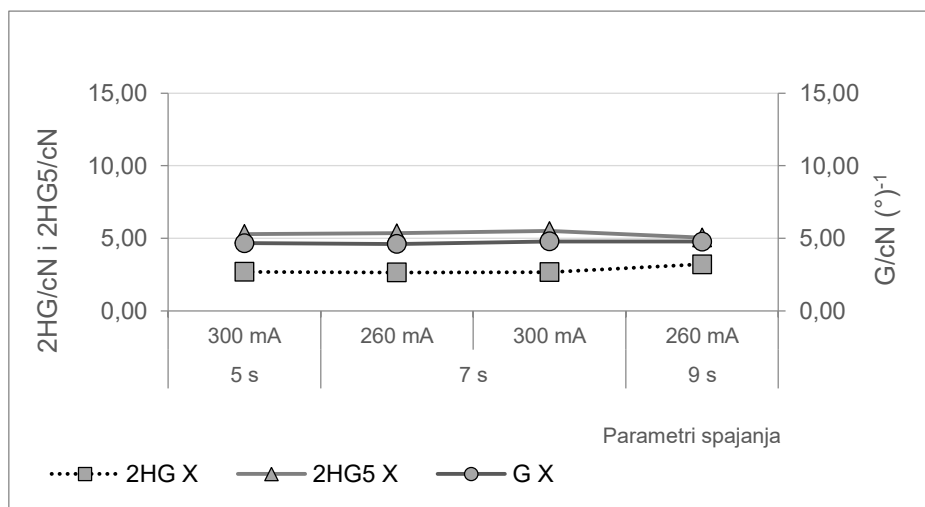




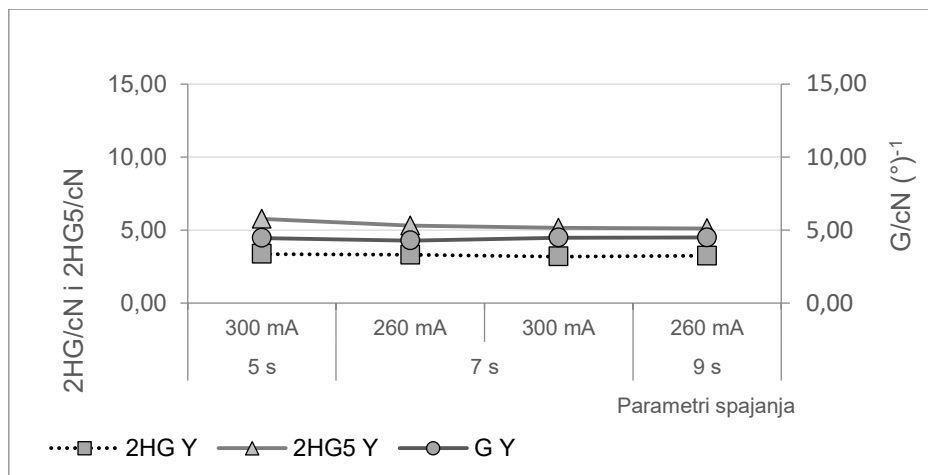
a)



b)



c)



d)

**SI. 4.13** Prikaz odnosa vrijednosti smičnih parametara smične krutosti  $G/cN (\text{°})^{-1}$ , histereze smične sile 2HG kod smičnog kuta  $\gamma = 0,5^\circ/cN$  i histereze smične sile 2HG5 kod smičnog kuta  $\gamma = 5^\circ/cN$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih prema rasporedu materijala LN (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru spajanja, b) y smjeru spajanja, L1N1 (lice na naličje spajanog materijala), c) x smjeru spajanja i d) y smjeru spajanja

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara histereze smične sile 2HG i histereze smične sile 2HG5 za spojeve spajane prema rasporedu materijala LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi -0,99, što ukazuje na jaku i negativnu korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,88 što ukazuje na jaku korelaciju između vlačnih parametara. Koeficijenta korelacije, za spojeve spajane prema rasporedu materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja  $r_x$  iznosi -0,89 i u smjeru spajanja y  $r_y$  iznosi 0,87.

### **4.3. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih visokotehnološkim metodama spajanja**

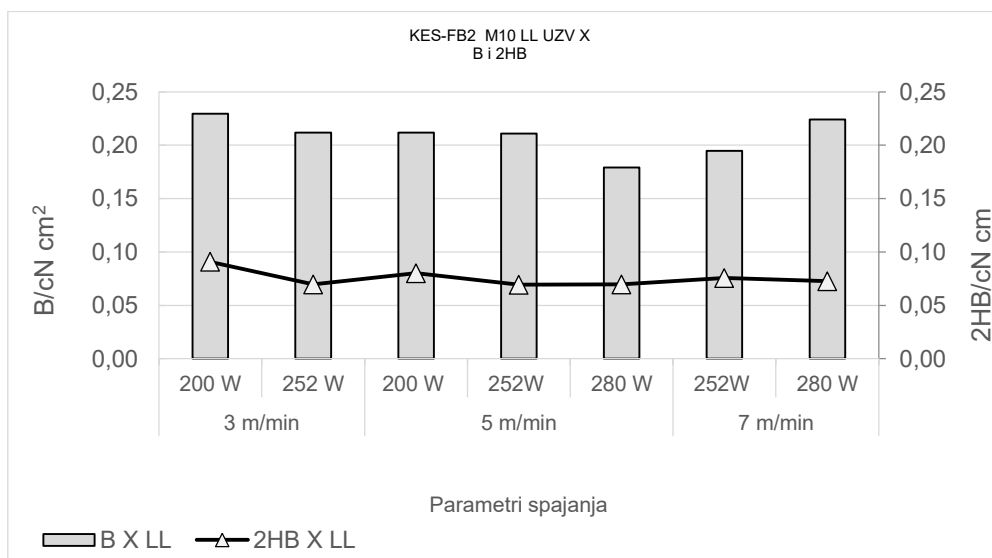
U ovom poglavlju prikaz je svih mjernih rezultata ispitivanja savojnih svojstava spojeva izmjerenih na mjernom uređaju KES-FB2. Uspoređivani su parametri krutost savijanja B i histereza momenta savijanja 2HB, te je njihova međusobna povezanost prikazana korelacijom r. Vrijednosti promatranih kompresijskih parametara prikazane su u obliku grafova za svaku visokotehnološku metodu spajanja.

#### **4.3.1 Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih ultrazvučnom metodom spajanja**

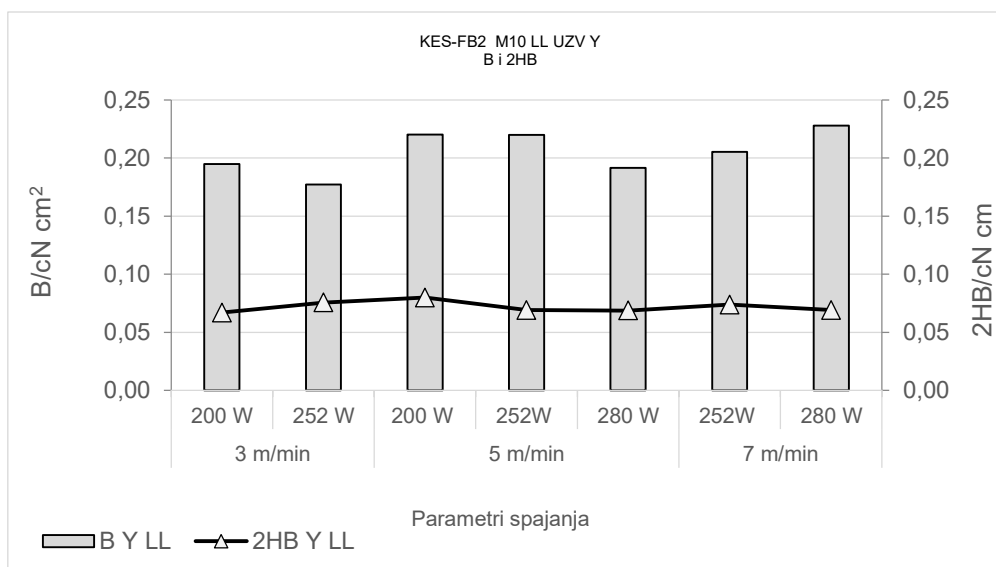
Mjerni rezultati savojnih svojstava spojeva postignutih ultrazvučnom metodom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M12 i M13, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.14 do sl. 4.21.

U grafikonima dat je odnos između savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cNcm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cNcm$  za spojeve spojene pri definiranim parametrima spajanja a) u x smjeru i b) za spojeve spajane u y smjeru.

Na sl. 4.14 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih tehnikom ultrazvučnog spajanja na uzorku materijala oznake M10.



a)

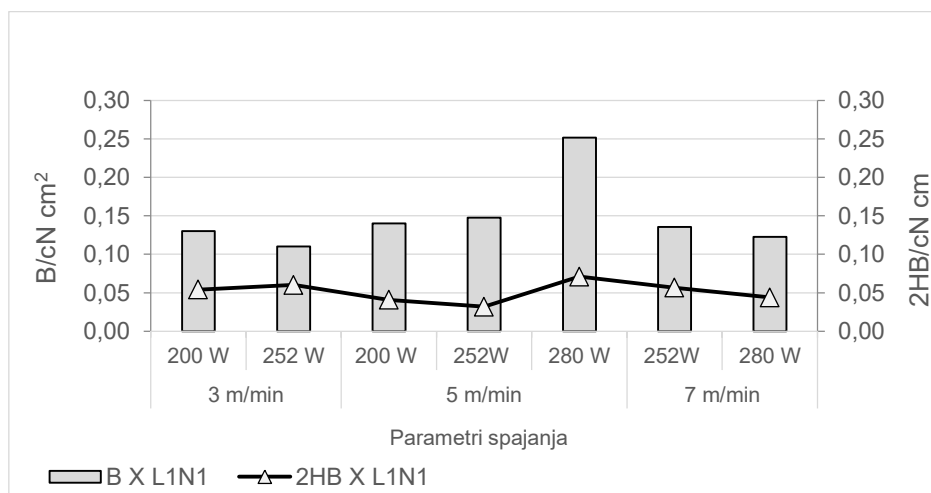


b)

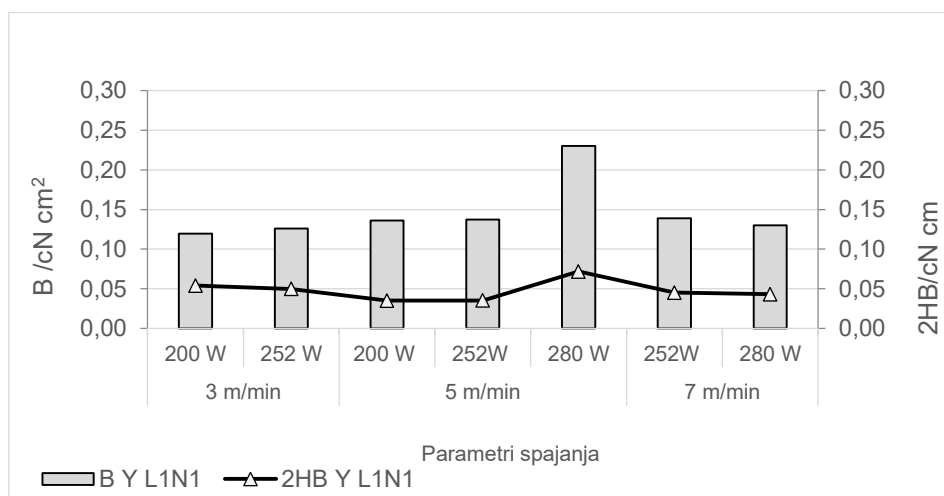
**SI. 4.14** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,529 što ukazuje na relativno slabu korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,018, što ukazuje na odsutnost korelacije.

Na sl. 4.15 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih ultrazvučnom metodom spajanja na uzorku materijala oznake M10 prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala).



a)

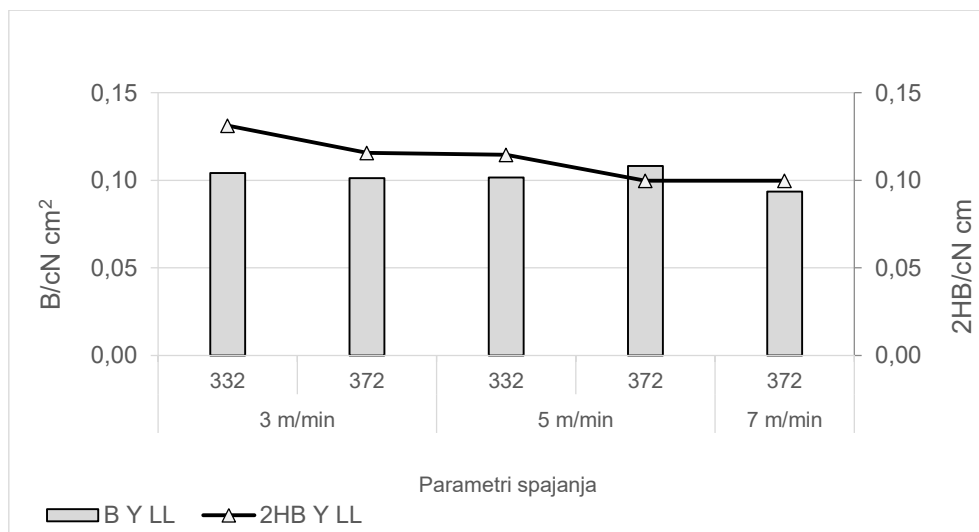


b)

**SI. 4.15** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cNcm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cNcm$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,498 što ukazuje na relativno slabu korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,739 što ukazuje na srednje jaku korelaciju.

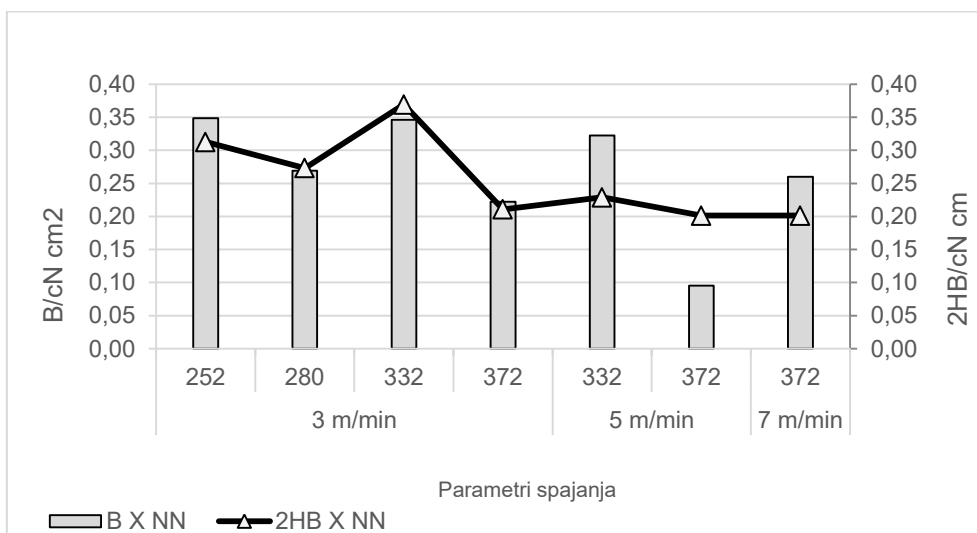
Na sl. 4.16 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih ultrazvučnom metodom spajanja na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) u y smjeru spajanja. Uzorci spojeva spajani u x smjeru nisu pozitivno ocjenjeni.



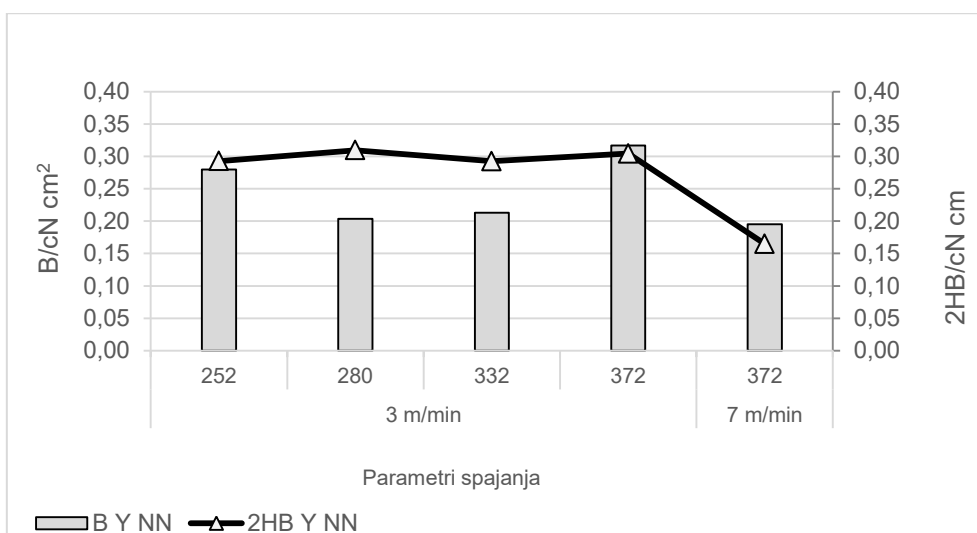
**Sl. 4.16** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cNcm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cNcm$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,227 što ukazuje na neznatnu korelaciju.

Na sl. 4.17 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih tehnikom ultrazvučnog spajanja na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala).



a)

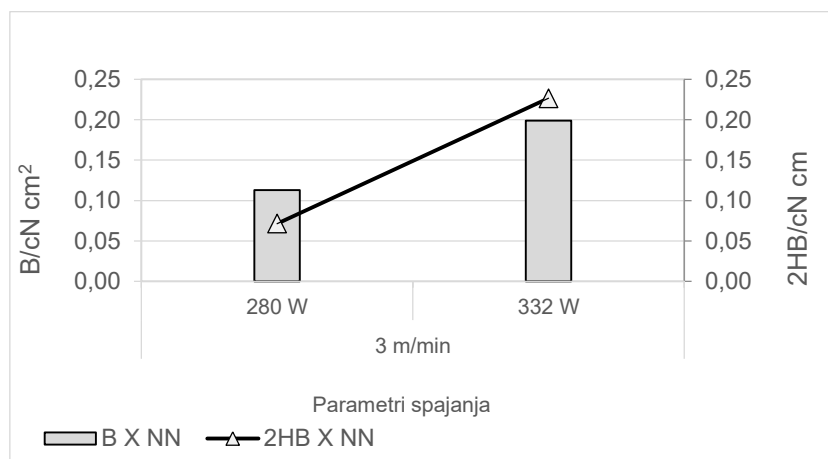


b)

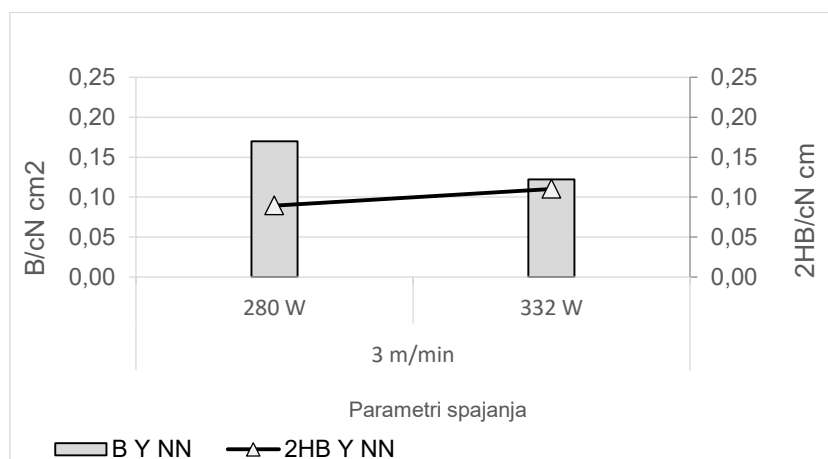
**SI. 4.17** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cNcm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cNcm$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru, prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,693 što ukazuje na srednje jaku korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,471, što ukazuje na relativno slabu korelaciju.

Na sl. 4.18 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)



a)



b)

**Sl. 4.18** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cNcm$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru, prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provoden izračun koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava.

Na sl. 4.19 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spajanog materijala).

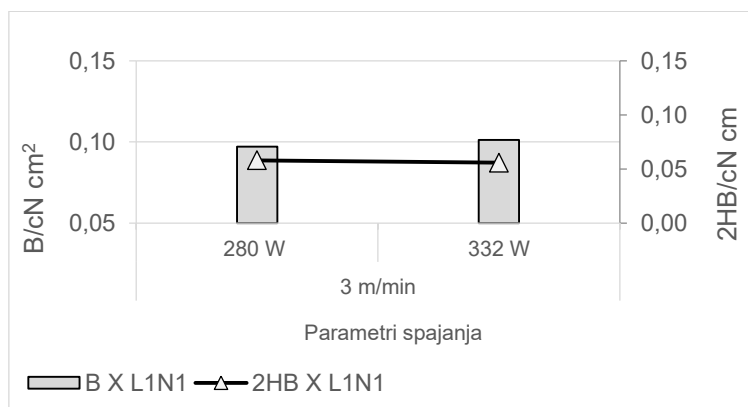




**SI. 4.19** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\text{ cm}^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\text{ cm}$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x smjeru, prema rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije proveden izračun koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava.

Na sl. 4.20 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala).



**SI. 4.20** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\text{ cm}^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\text{ cm}$  spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x smjeru, prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije proveden izračun koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava.

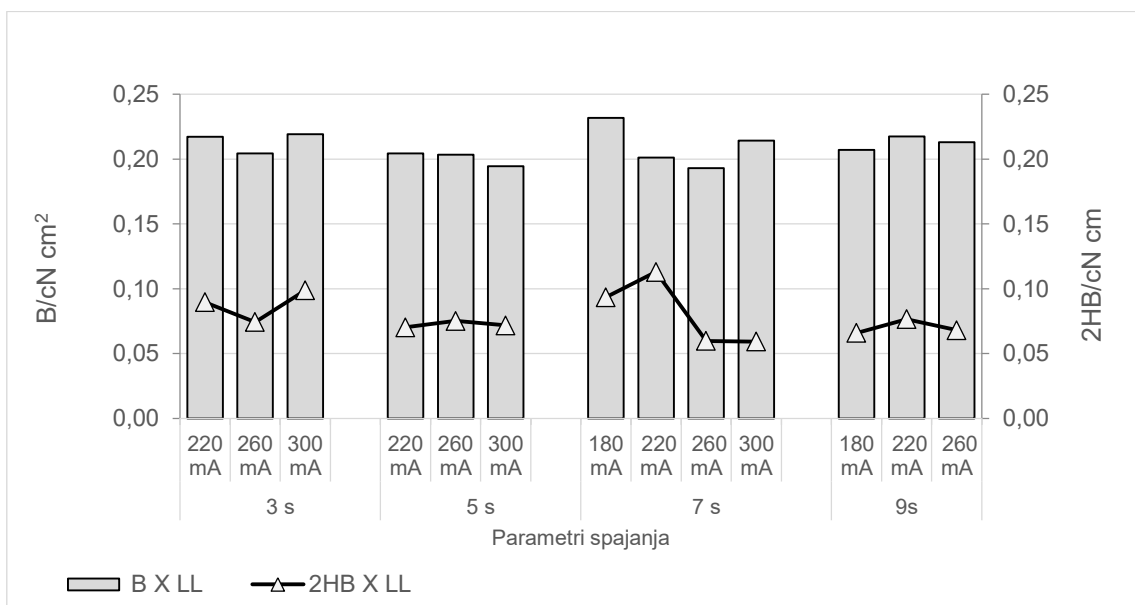
#### 4. 3. 2 Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja

Mjerni rezultati savojnih svojstava spojeva postignutih visokofrekventnom metodom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.21 do 4.28.

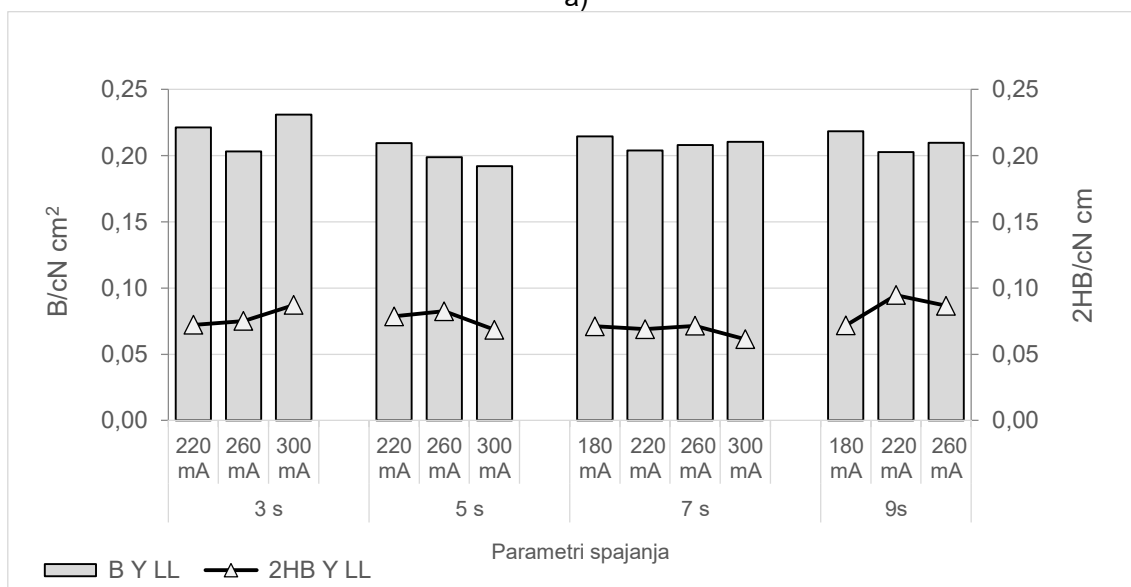
U grafikonima dat je odnos između savojnih parametara krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB za spojeve spojene pri definiranim parametrima spajanja a) u x smjeru i b) za spojeve spajane u y smjeru.

Na sl. 4.21 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom metodom spajanja na uzorku materijala oznake M10.

Izračunom koeficijenta korelacije, r između parametara krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,340 što ukazuje na relativno slabu korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,089, što ukazuje na odsutnost korelacije.



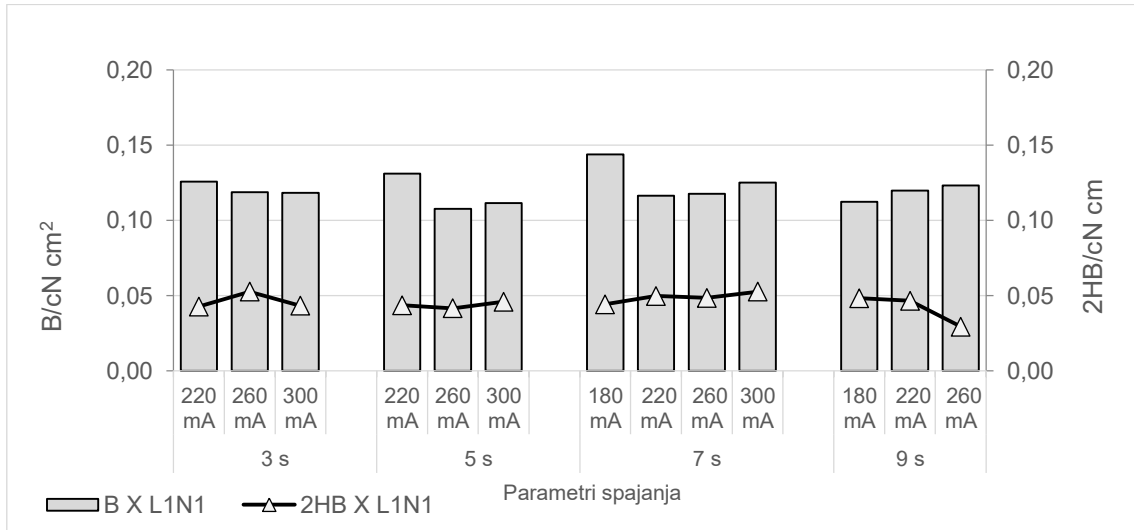
a)



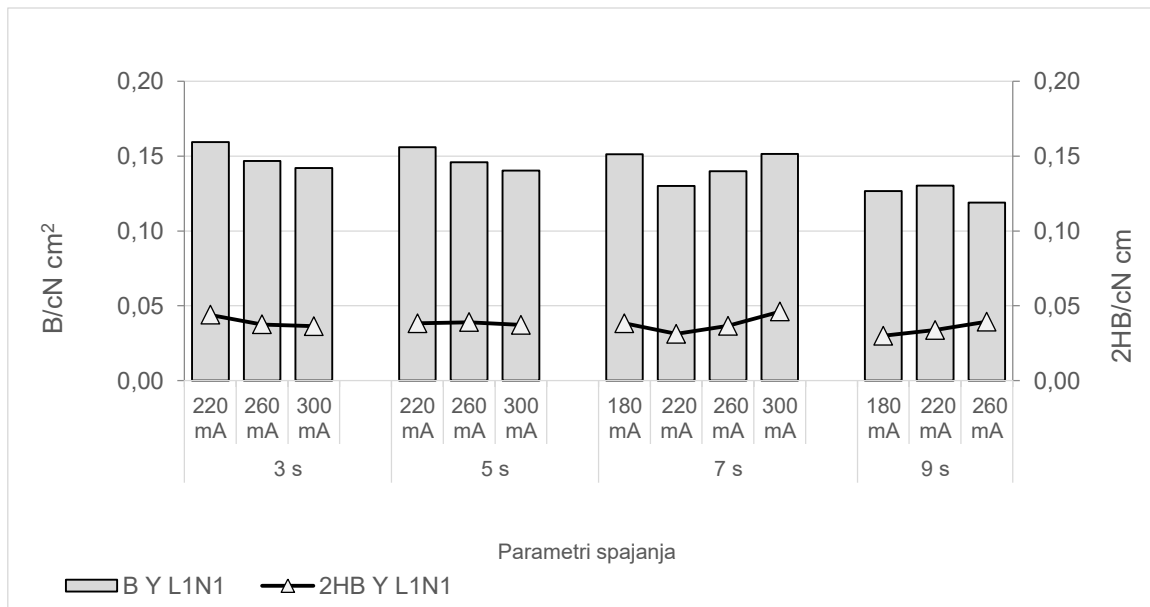
b)

**Sl.4,21** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\text{ cm}^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\text{ cm}$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

Na sl. 4.22 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala M10 prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanih materijala)



a)

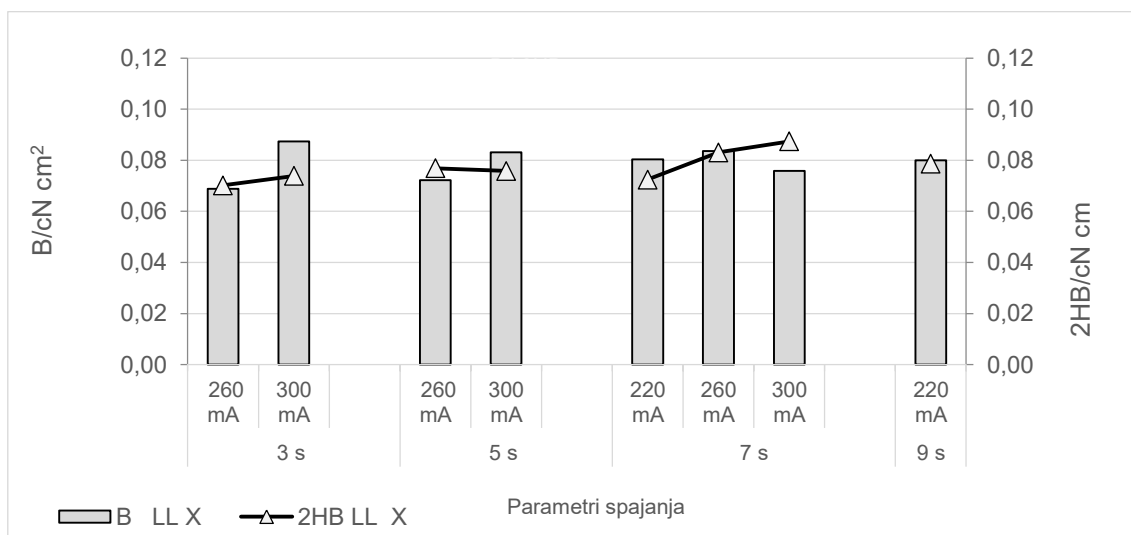


b)

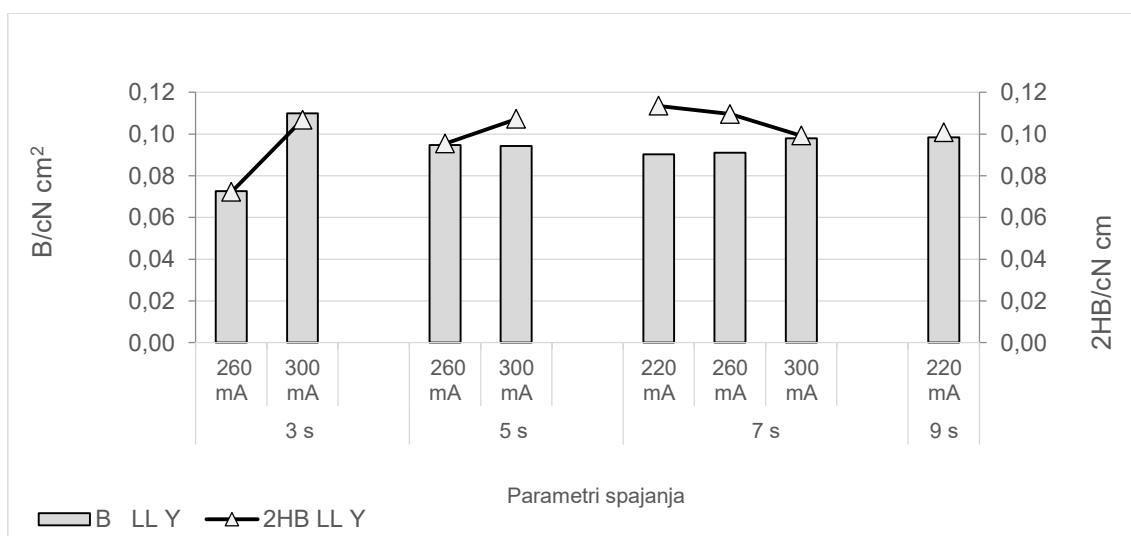
**SI. 4.22** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,875, što ukazuje na jaku korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,826, što ukazuje na jaku korelaciju.

Na sl. 4.23 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala).



a)



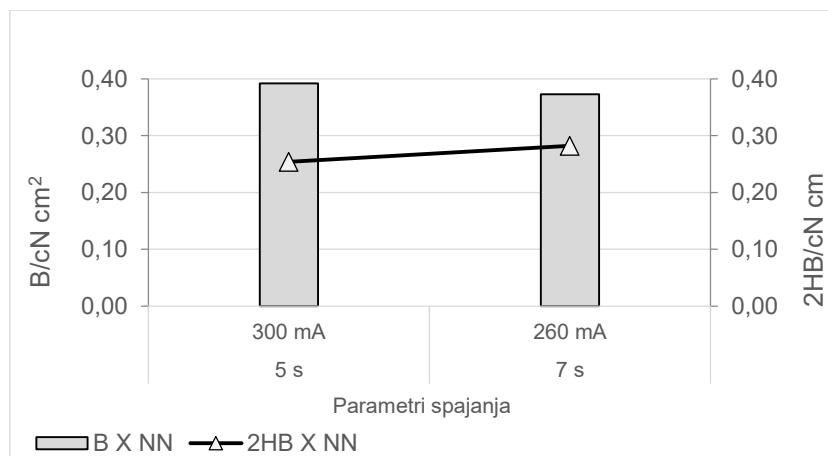
b)

**SI. 4.23** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\text{ cm}^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\text{ cm}$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)

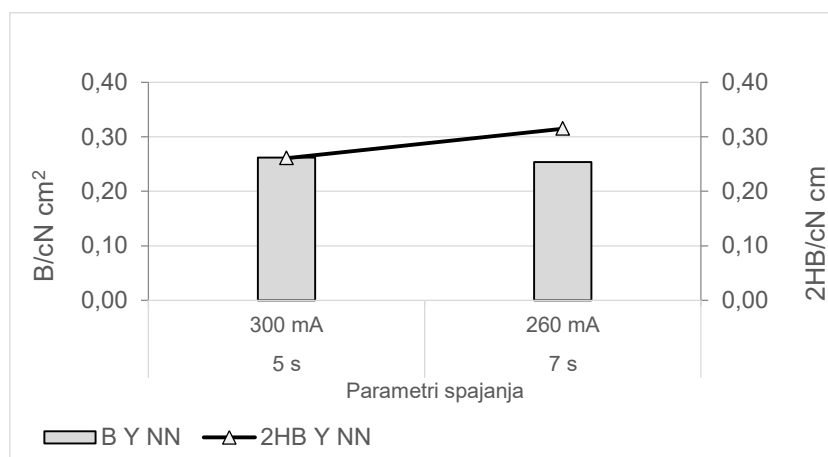
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,124

što ukazuje na neznatnu korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,661 što ukazuje na srednje jaku korelaciju.

Na sl. 4.24 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala).



a)

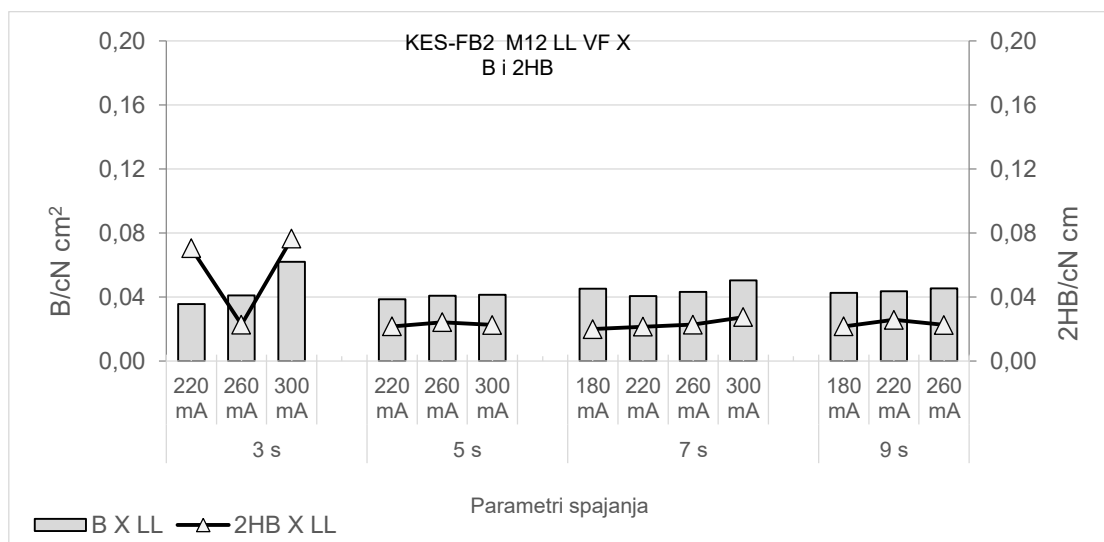


b)

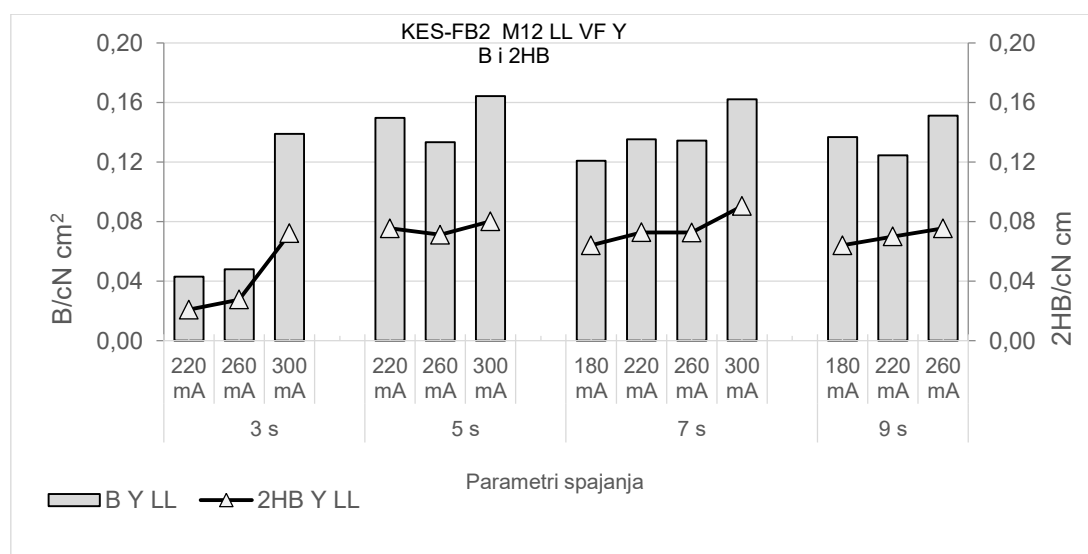
**SI .4.24** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cNcm$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih prema rasporedu slojeva NN (naličje na naličje spajanog materijala) nije provedena statistička obrada mjernih rezultata.

Na sl. 4.25 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala).



a)



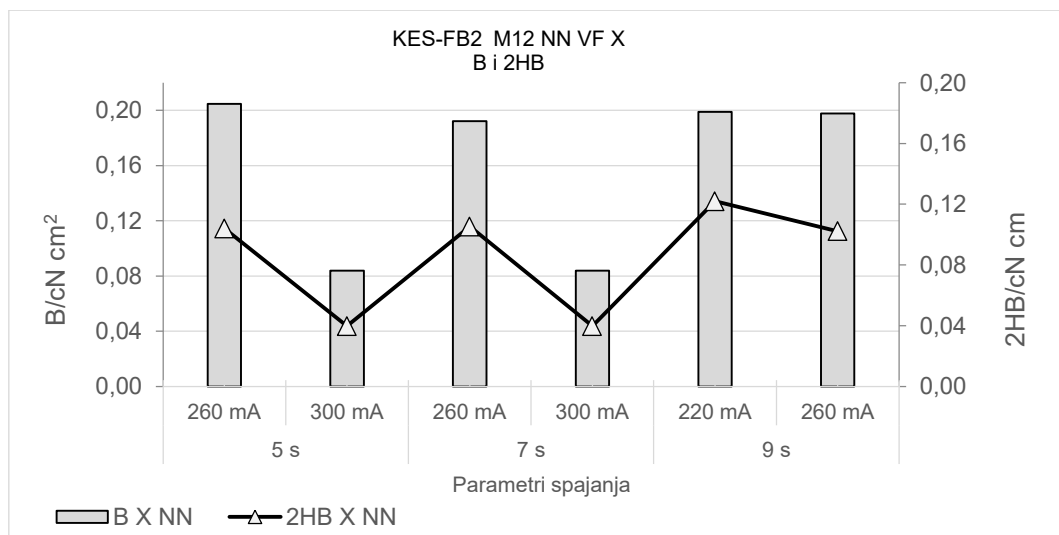
b)

**Sl. 4.25** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)

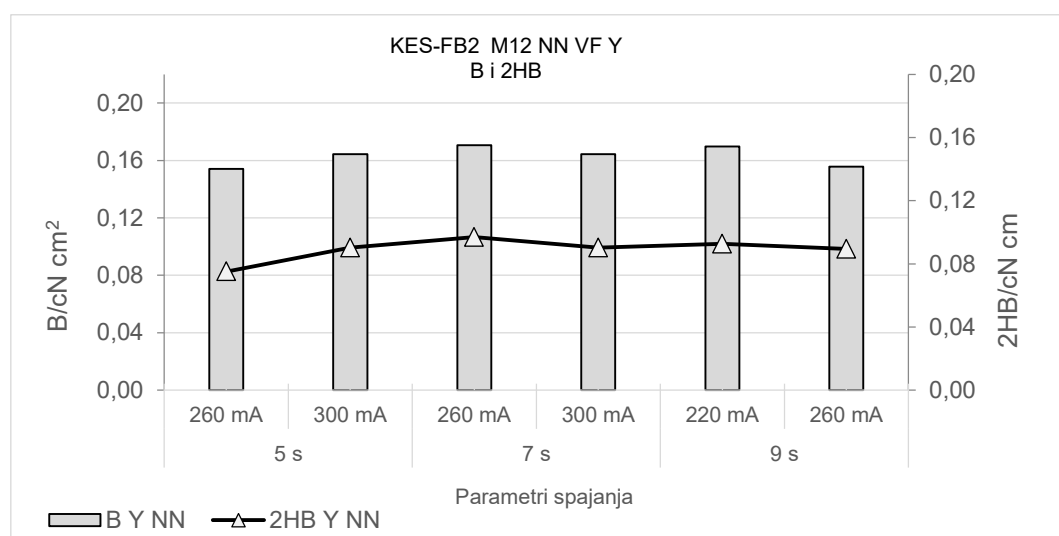
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,678

što ukazuje na srednje jaku korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,980, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

Na sl. 4.26 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajano materijala).



a)



b)

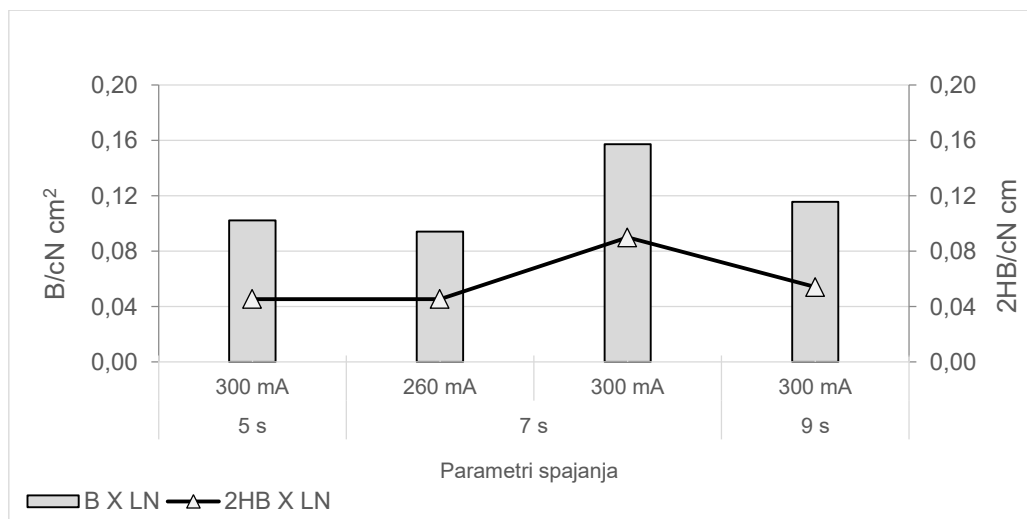
**SI. 4.26** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,979,

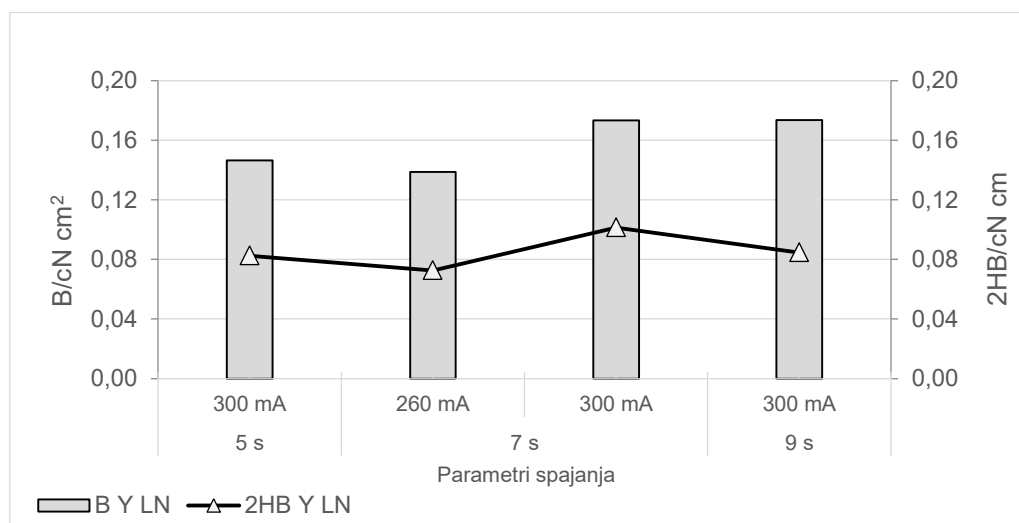


što ukazuje na jaka korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,817, što ukazuje na jaku korelaciju.

Na sl. 4.28 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spojenog materijala).



a)



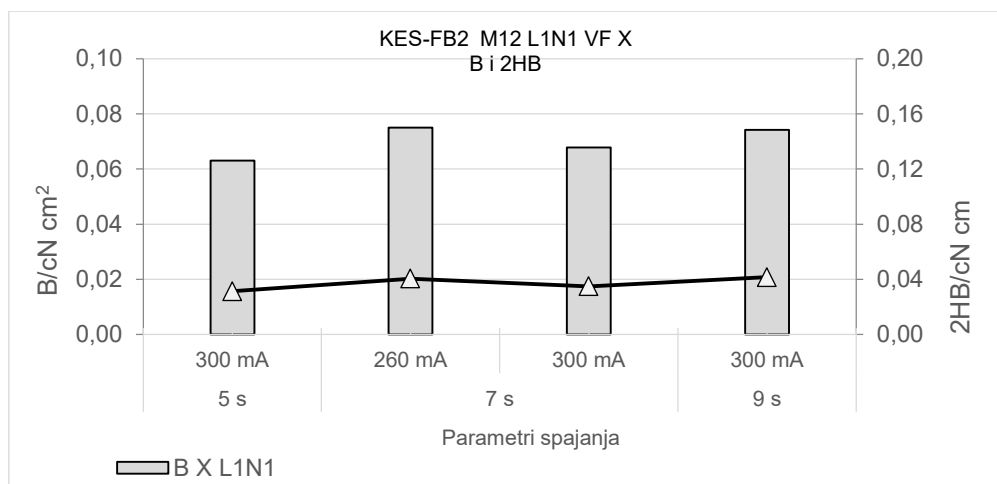
b)

**Sl. 4.27** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

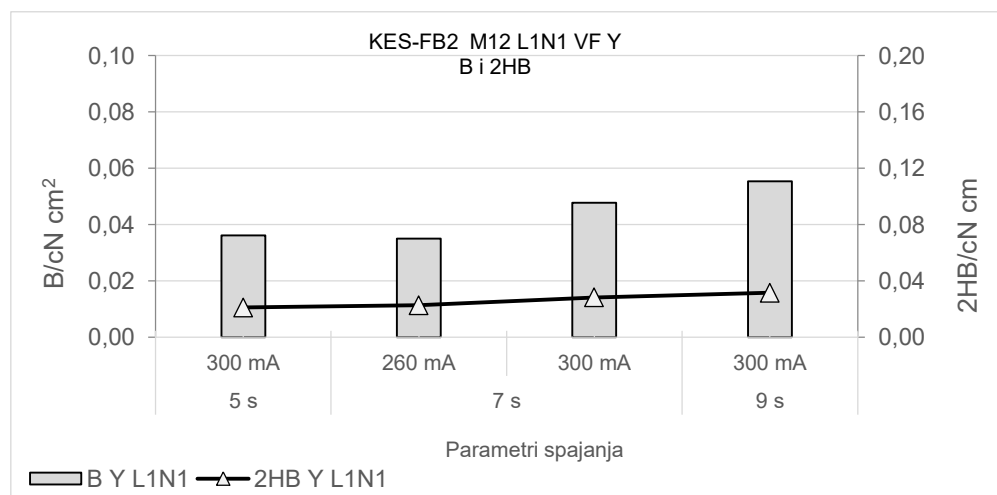
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,987

što ukazuje na jaku korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,792 što ukazuje na srednje jaku korelaciju.

Na sl. 4.28 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu slojeva materijala L1N1 (lice na naličje spajanog materijala).



a)



b)

**SI. 4.28** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,987

što ukazuje na jaku korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,982 što ukazuje na jaku korelaciju.

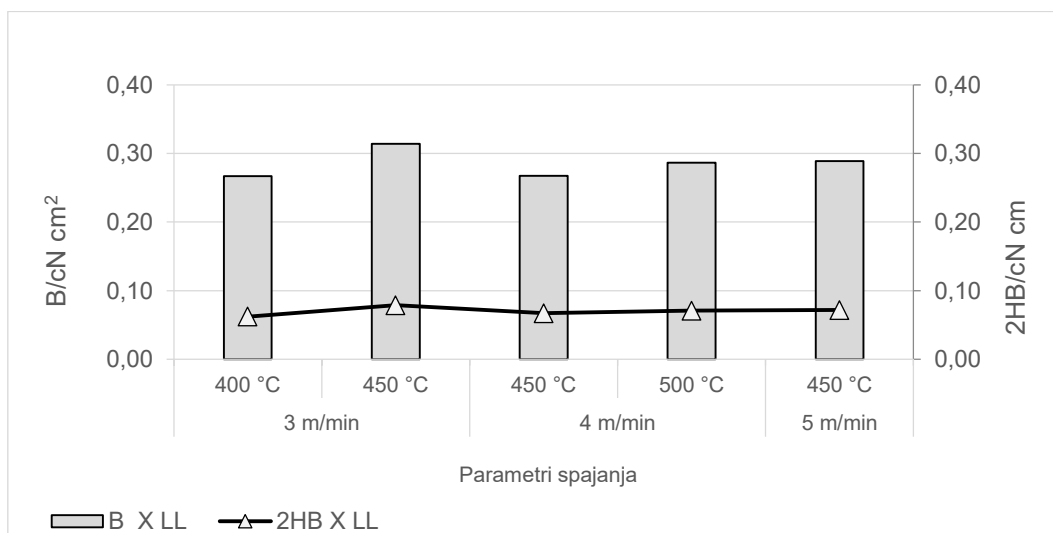
#### 4. 3. 3 Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom

Mjerni rezultati savojnih svojstava spojeva postignutih spajanja toplinskom kondukcijom na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) i LN (lice na naličje spajanog materijala spajanog materijala), prikazani su u obliku grafova od sl. 4.29 do 4.33.

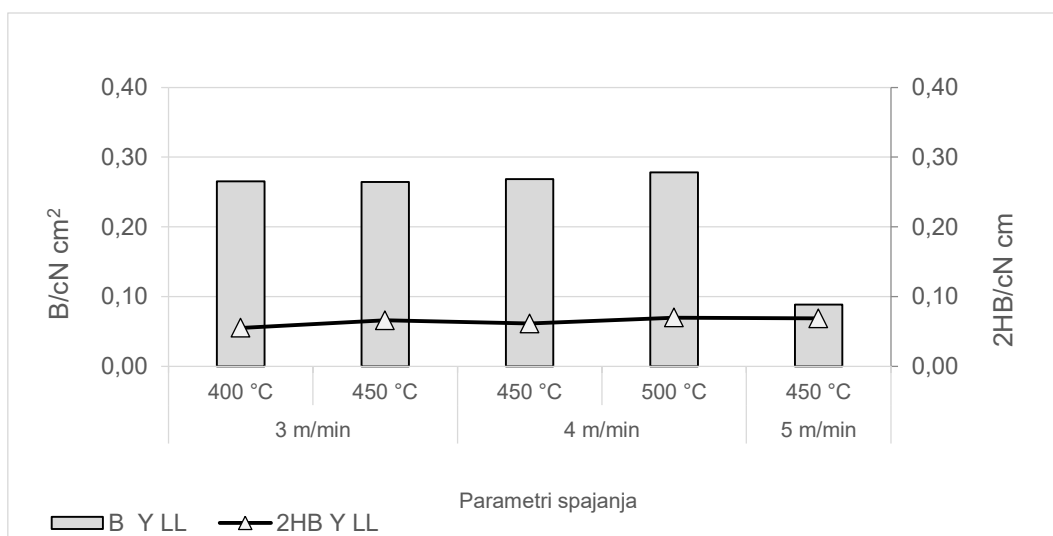
U grafikonima dat je odnos između savojnih parametara krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB za spojeve spajane pri definiranim parametrima spajanja a) u x smjeru i b) za spojeve spajane u y smjeru.

Na sl. 4.29 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10.

Izračunom koeficijenta korelacije, r između parametara krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,961 što ukazuje na jaku korelaciju i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi -0,379 što ukazuje na obrnutu relativno slabu korelaciju.



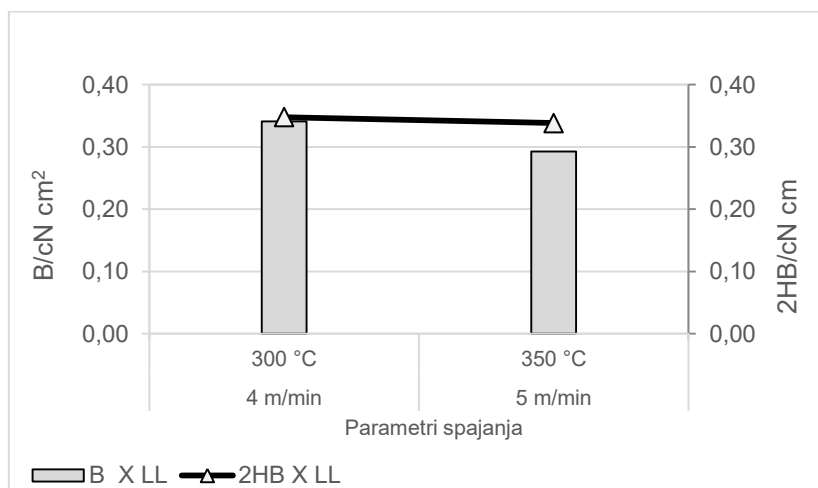
a)



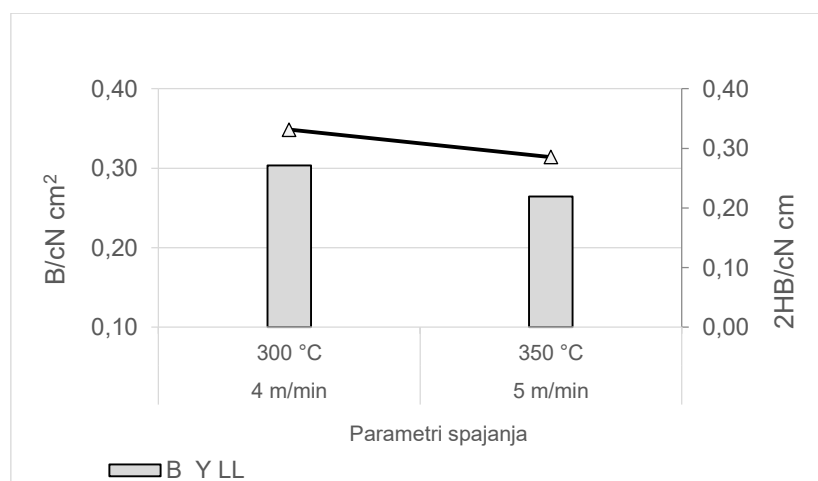
b)

**Sl. 4.29** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

Na sl. 4.30 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva spajanih toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M11, prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spojenog materijala).



a)

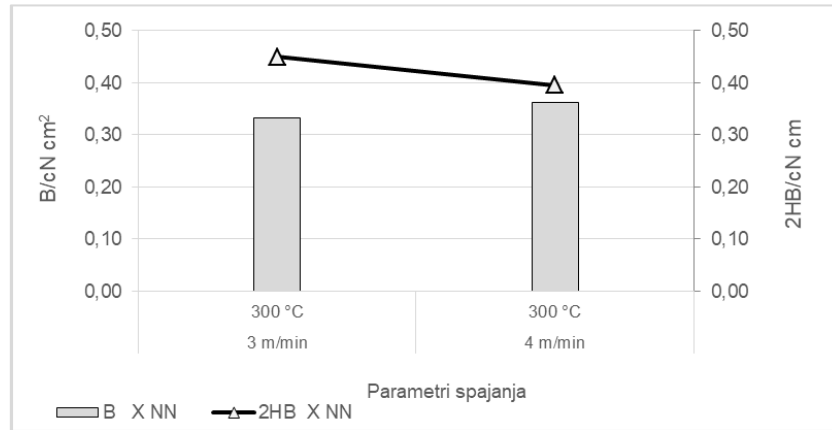


b)

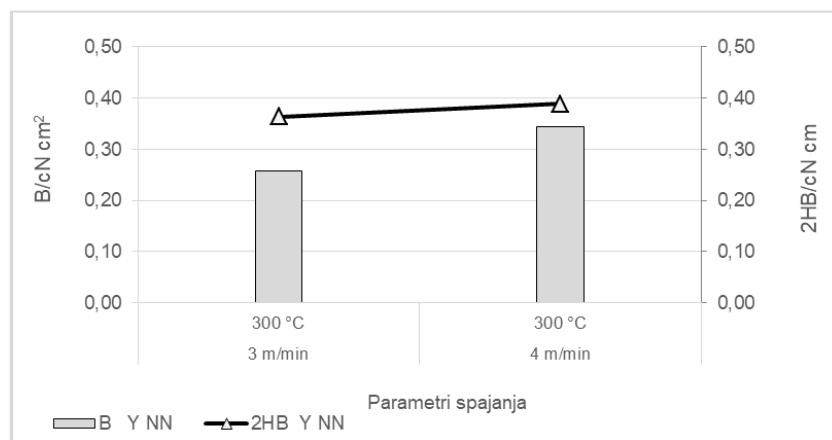
**Sl. 4.30** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava

Na sl. 4.31 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M13, prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spojenog materijala).



a)

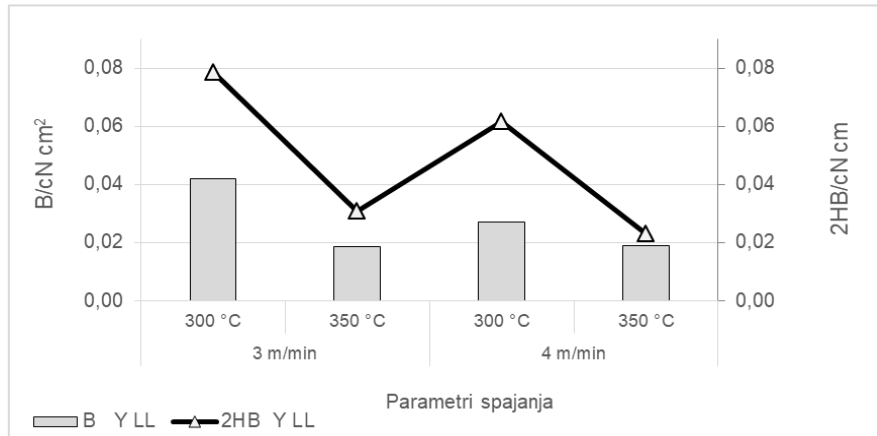


b)

**Sl. 4.31** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M13 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava.

Na sl. 4.32 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih metodom spajanja vrućim klinom na uzorku materijala M14, prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice).

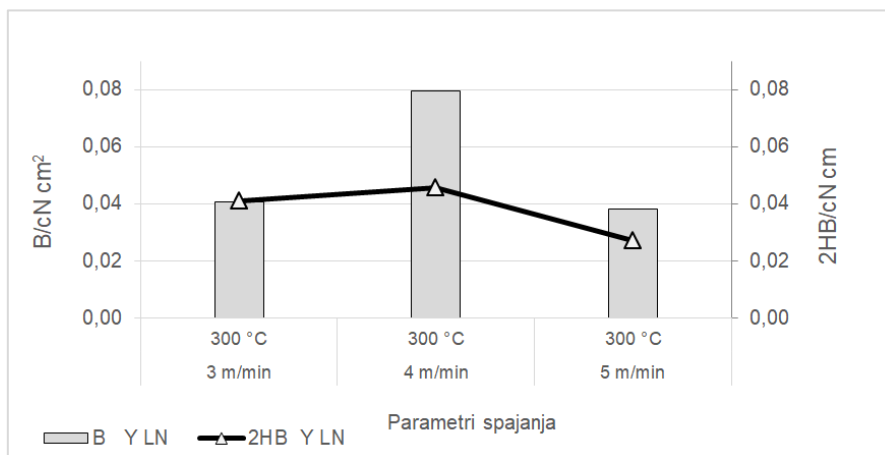


**Sl. 4.32** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,941 što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

Na sl. 4.33 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih spajanjem toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M14, prema rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spajanog materijala).

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,734 što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara.



**Sl. 4.33** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\text{ cm}^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\text{ cm}$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LN (lice na naličje spajanog materijala)

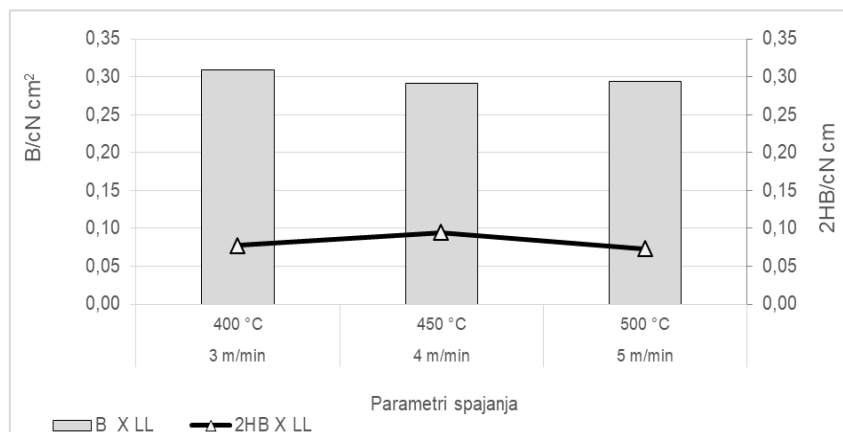
#### 4. 3. 4 Rezultati ispitivanja savojnih svojstava spojeva izrađenih izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom

Mjerni rezultati savojnih svojstava spojeva postignutih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) i LN (lice na naličje spajanog materijala), prikazani su u obliku grafova od sl. 4.34 do 4.37.

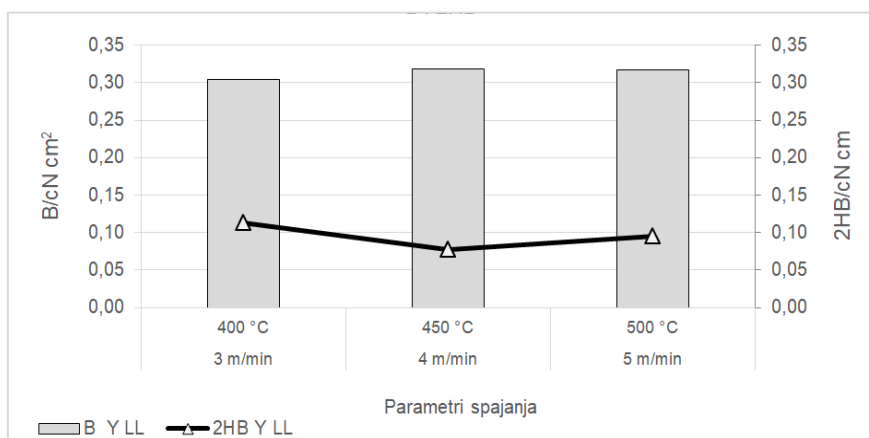
U grafikonima dat je odnos između savojnih parametara krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB za spojeve spajane pri definiranim parametrima spajanja a) u x smjeru i b) za spojeve spajane u y smjeru.

Na sl. 4.34 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih spajanjem toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M10.





a)

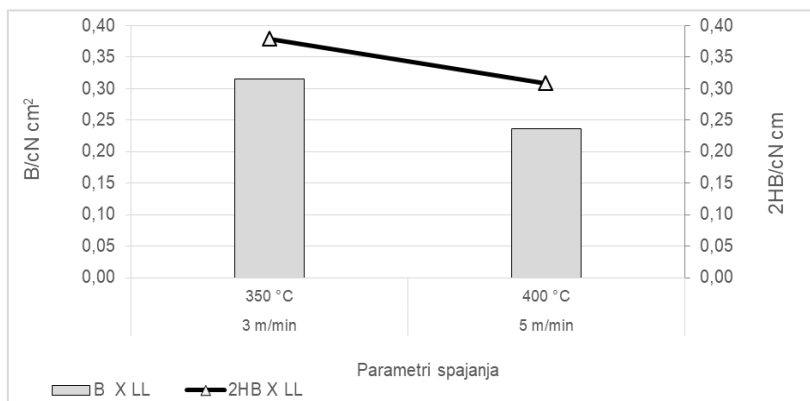


b)

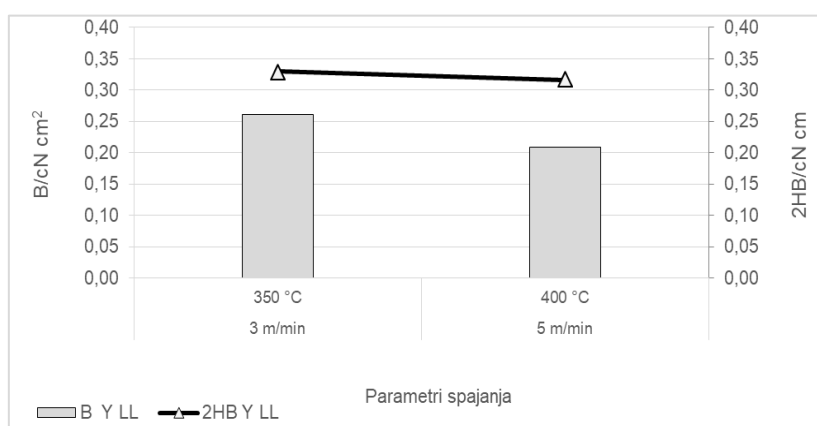
**Sl. 4.34** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M10 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara krutosti savijanja  $B$  i histereze momenta savijanja  $2HB$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi  $-0,383$  što ukazuje na relativno slabu i negativnu korelaciju koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi  $-0,902$  (jaka korelacija).

Na sl. 4.35 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih izrađenih spajanjem toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M11.



a)

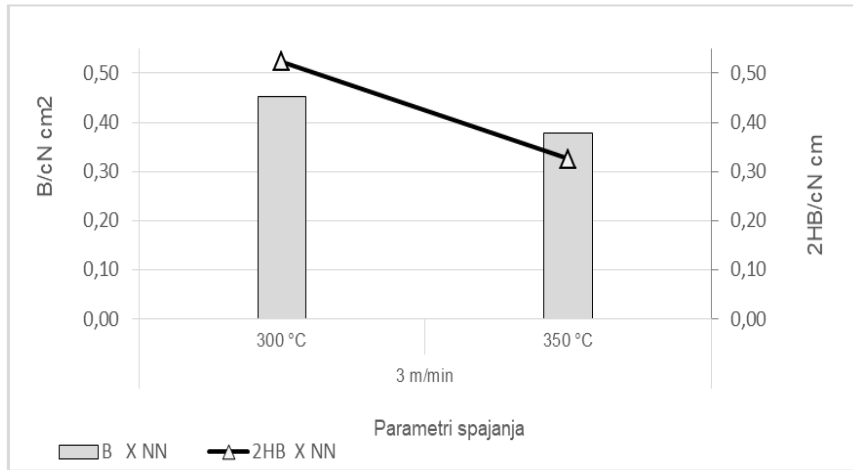


b)

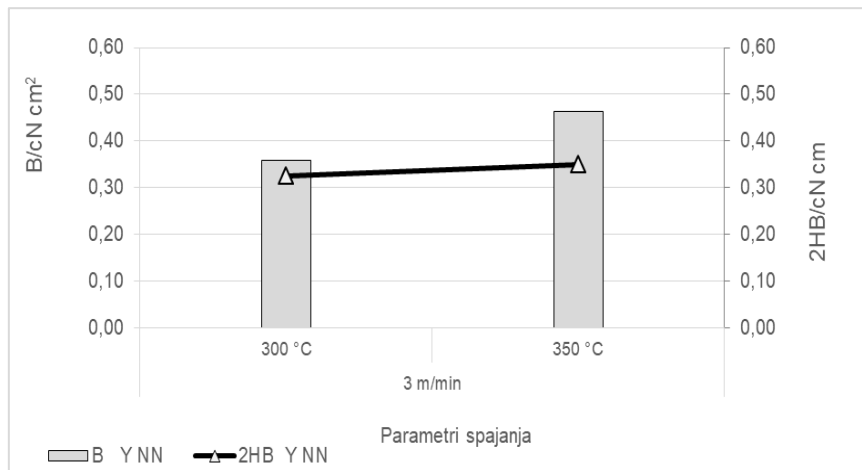
**SI. 4.35** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u a) x smjeru; b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava

Na sl. 4.36 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih metodom spajanja vrućim zrakom na uzorku materijala M13



a)

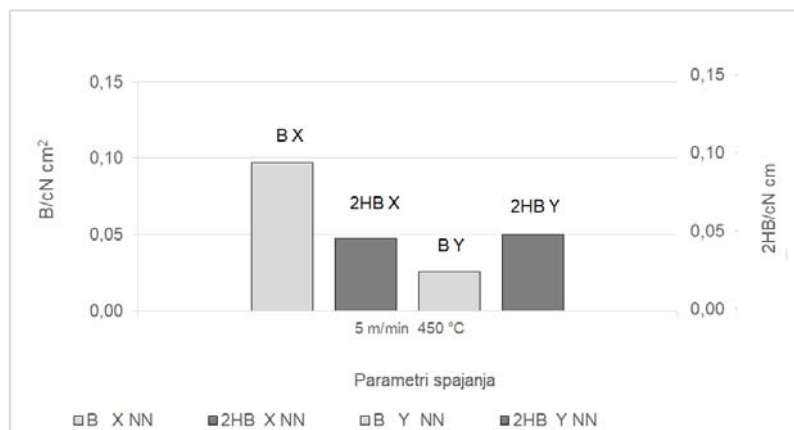


b)

**Sl. 4.36** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M13 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava.

Na sl. 4.37 prikaz je odnosa savojnih parametara spojeva izrađenih metodom spajanja vrućim zrakom na uzorku materijala M14.



**SI. 4.37** Prikaz odnosa vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\text{ cm}^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\text{ cm}$  spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u a) x smjeru i b) y smjeru prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara savojnih svojstava.

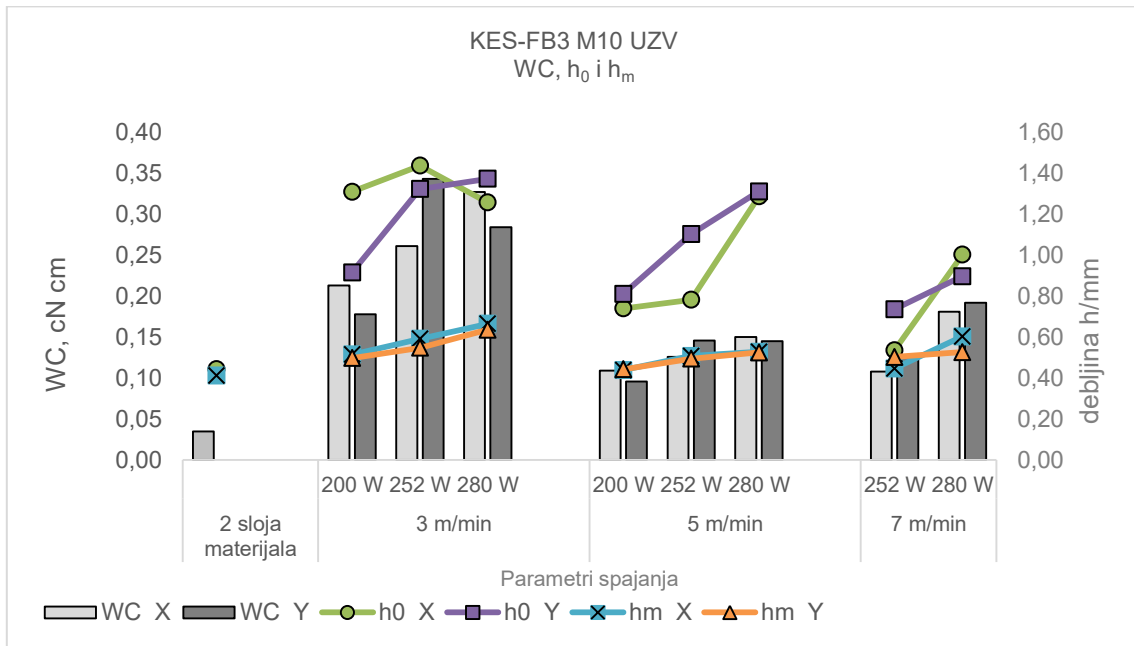
#### **4. 4 Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih visokotehnološkim tehnikama spajanja**

U ovom poglavlju prikaz je svih mjernih rezultata ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izmjerenih na mjernom uređaju KES-FB3. Mjerni rezultati prikazani su u obliku grafova za svaku visokotehnološku tehniku spajanja, a opisan je i zaključak statističke obrade mjernih rezultata.

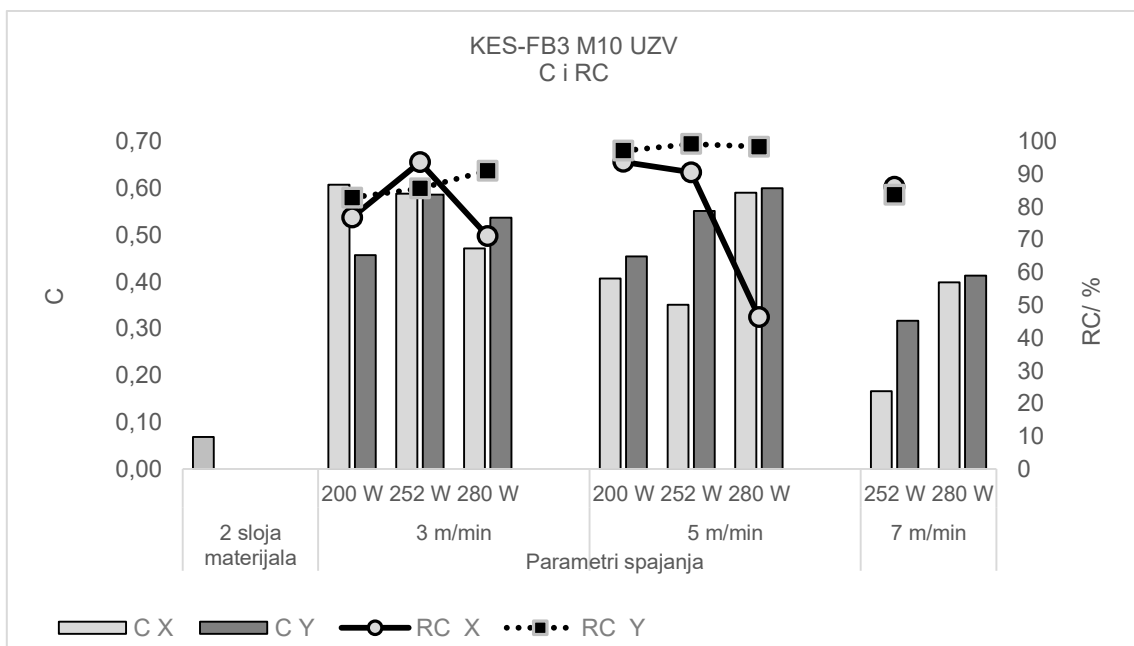
##### **4. 4. 1 Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja**

Mjerni rezultati kompresijskih svojstava spojeva postignutih ultrazvučnom metodom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M12 i M13, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.38 do sl. 4.41. Na grafičkim prikazima dat je odnos između kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$ , te b) odnos između kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka,  $RC$  za uzorak dva sloja materijala i spojeve spojene pri definiranim parametrima ultrazvučnog spajanja.

Na sl. 4.38 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M10 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala)



a)



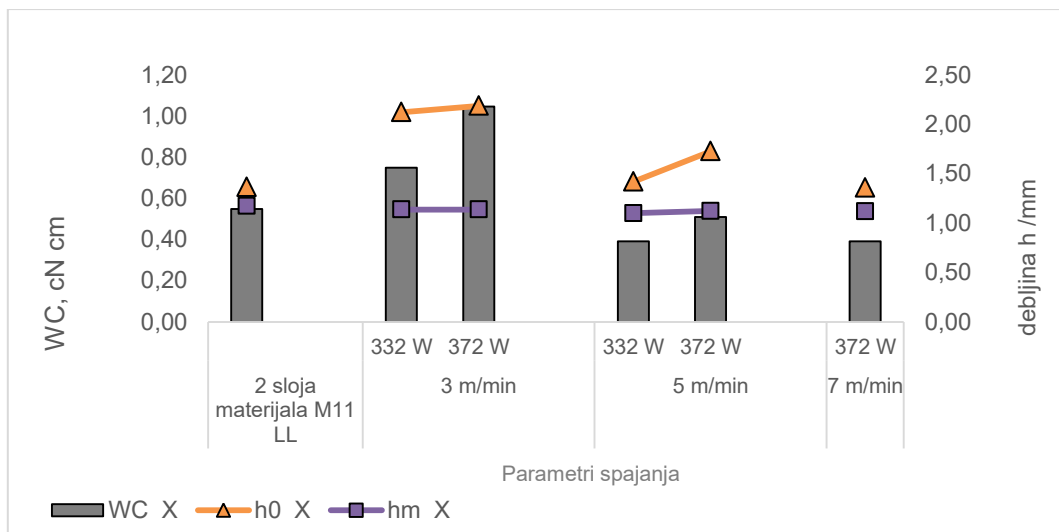
b)

**Sl. 4.38** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)

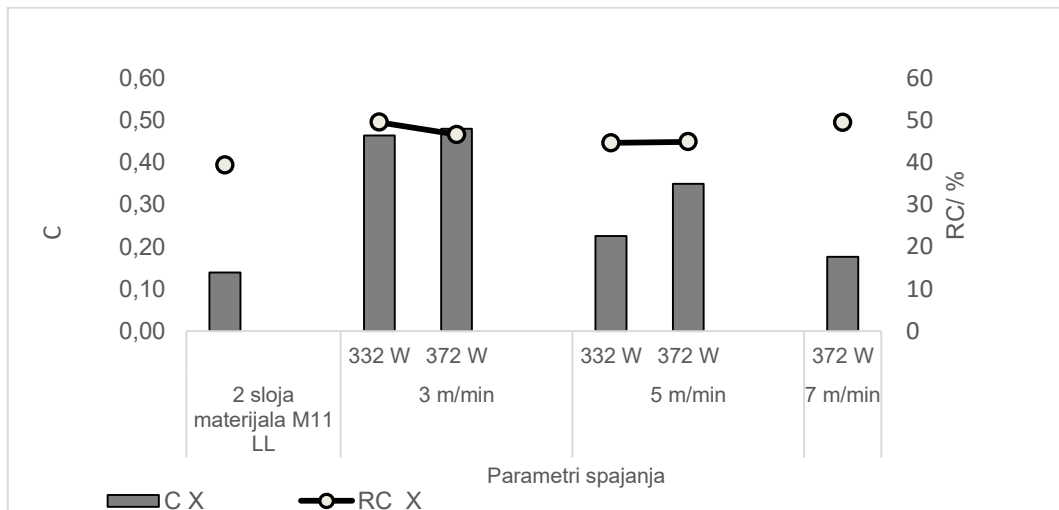
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada WC i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,881 što ukazuje na jaku

korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,756, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara.

Na sl. 4.39 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala M11 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spojenog materijala).



a)

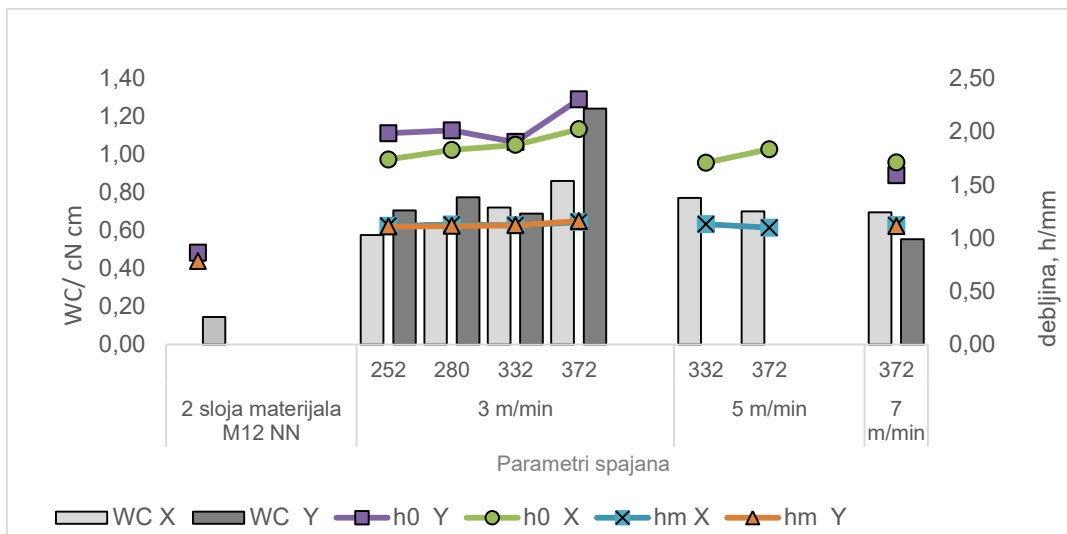


b)

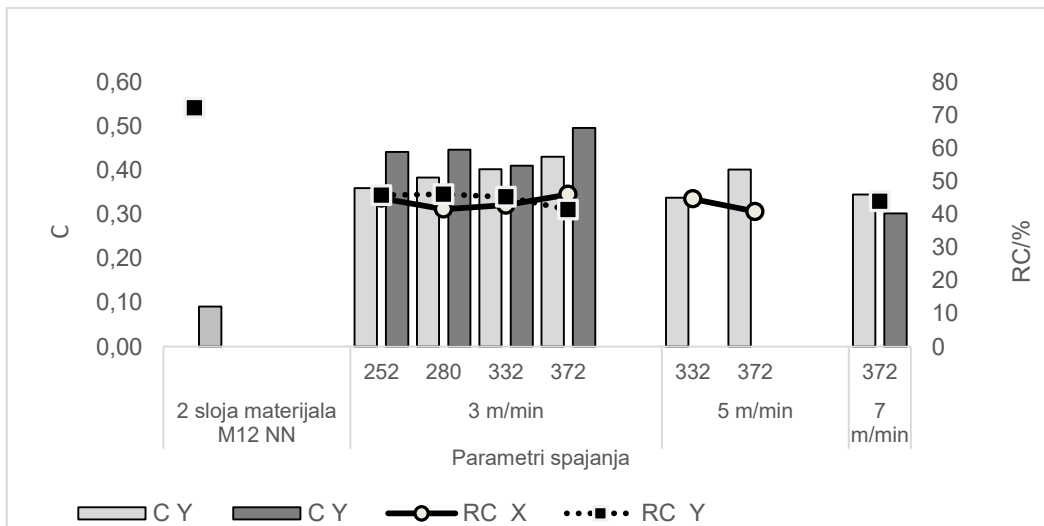
**Sl. 4.39** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u y smjeru, LL (lice na lice spajano materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u  $y$  smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,801, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

Na sl. 4.40 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala M11 prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje)



a)



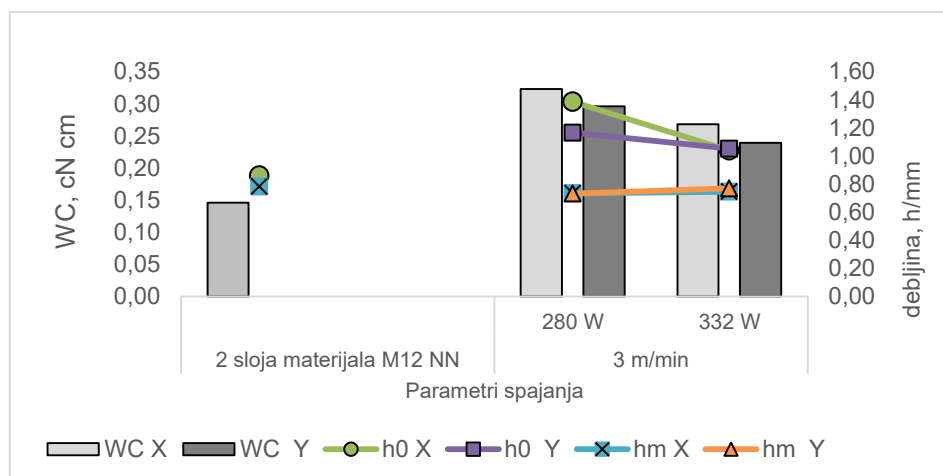
b)

**SI. 4.40** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u  $x$  i  $y$  smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)

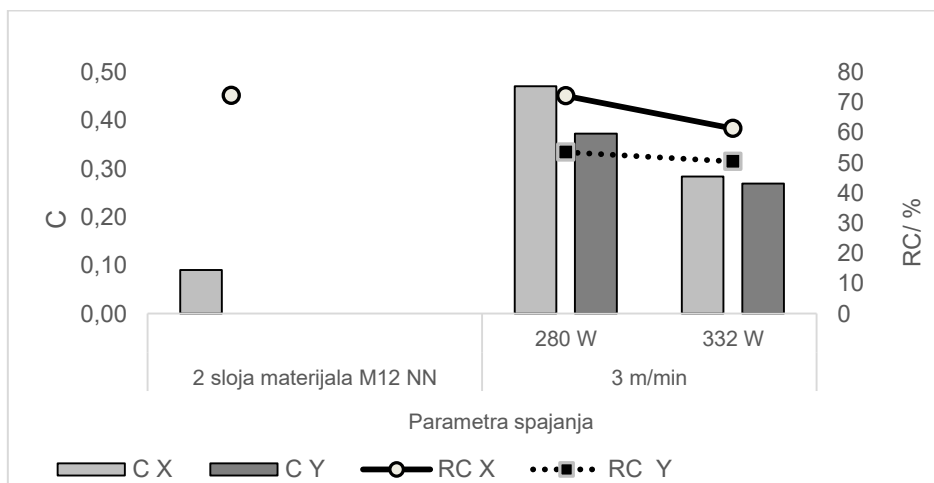


Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada WC i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,650 što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,941 što ukazuje na jaku korelaciju između kompresijskih parametara.

Na sl. 4.41 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala M12 prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)



a)



b)

**SI. 4.41** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)

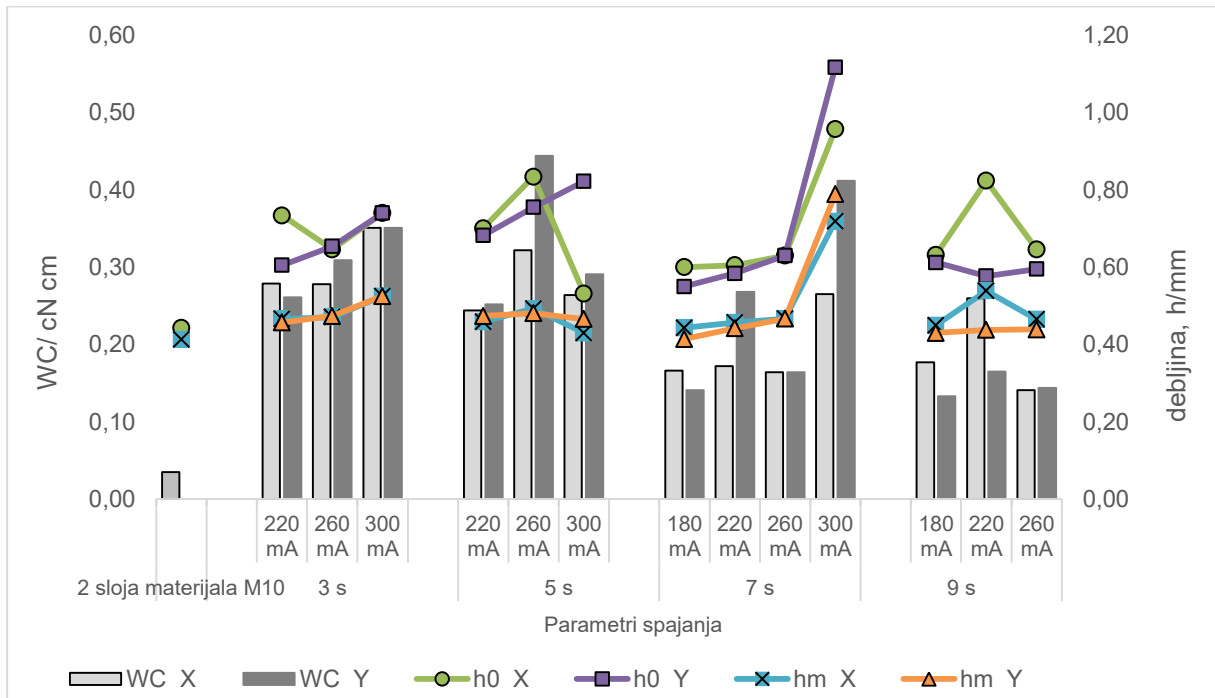
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u  $x$  smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,116, što ukazuje na neznatnu korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u  $y$  smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,667, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara.

#### 4. 4. 2 Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja

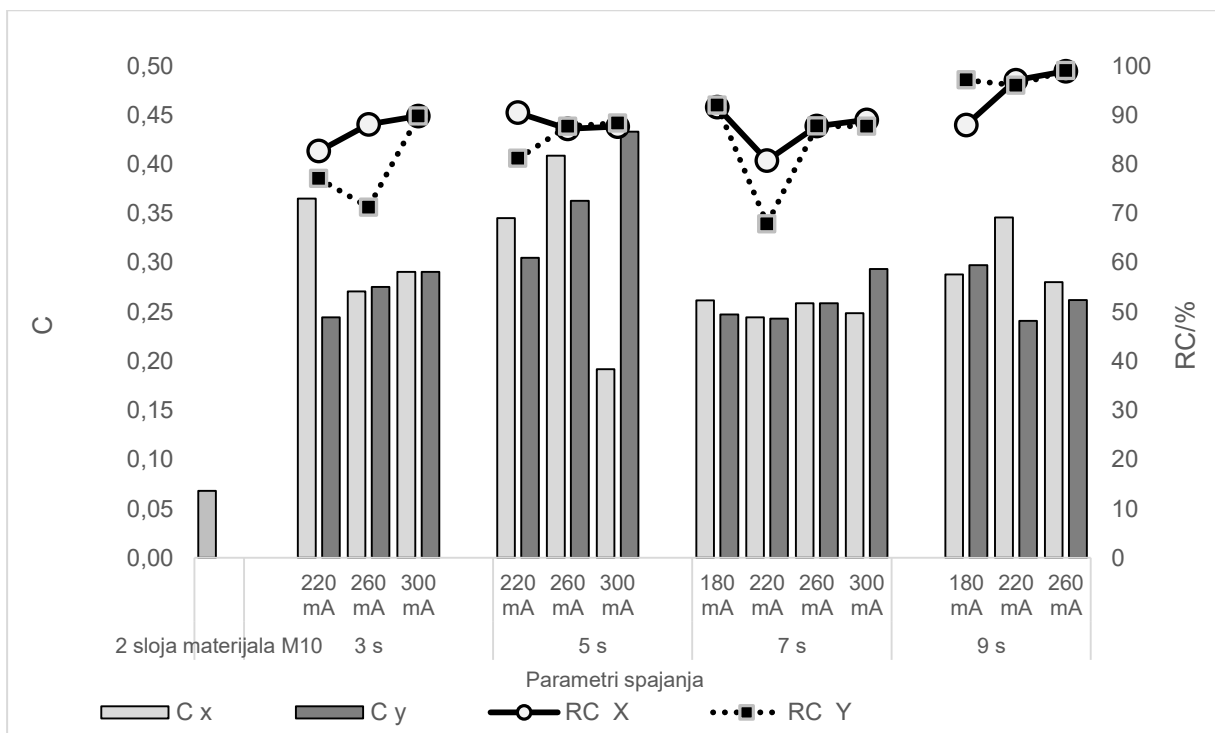
Mjerni rezultati kompresijskih svojstava spojeva postignutih VF tehnikom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, spajanih u  $x$  i  $y$  smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.42 do sl. 4.47. Na grafičkim prikazima dat je odnos između kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$ , te odnos između b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , za uzorak dva sloja materijala i spojeve spojene pri definiranim parametrima spajanja.

Na sl. 4.42 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih VF tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M10

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u  $x$  smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,336 što ukazuje na relativno slabu korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u  $y$  smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,623, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara.



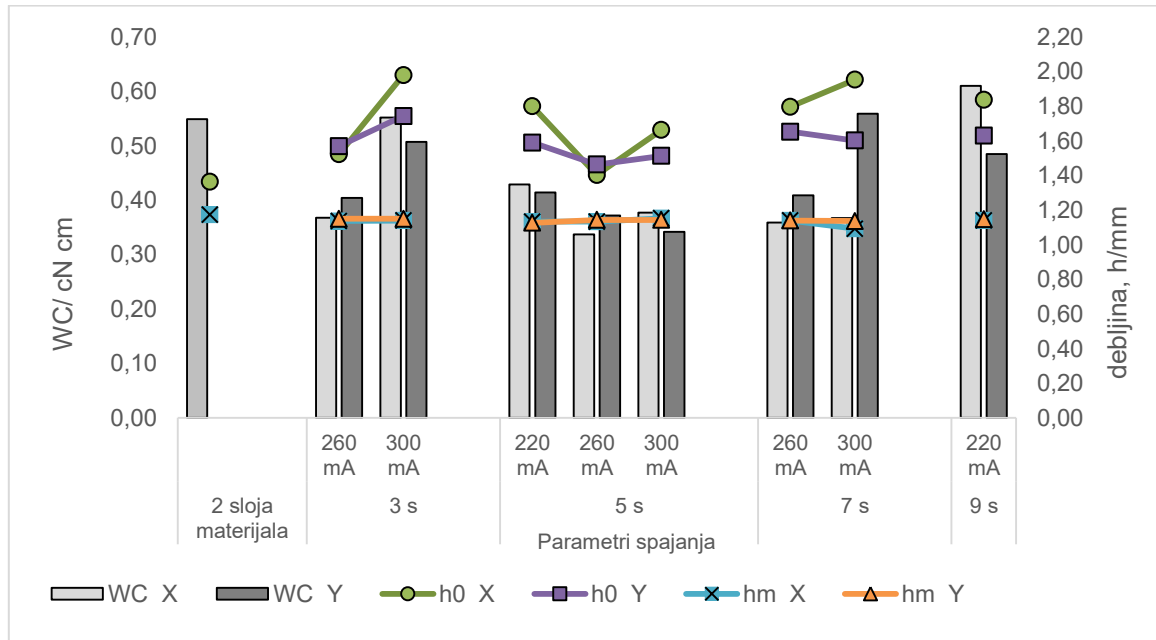
a)



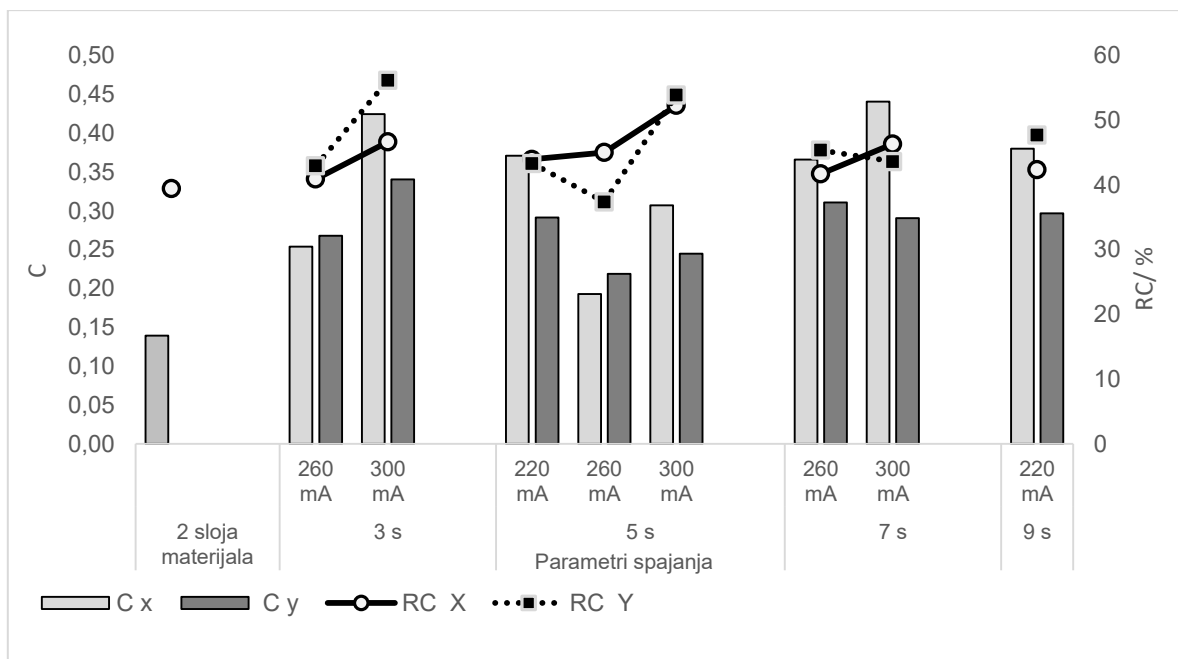
b)

**SI. 4.42** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) Deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$ ; i b) Kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M10 spajanih u x i y smjeru

Na sl. 4.43 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala).



a)

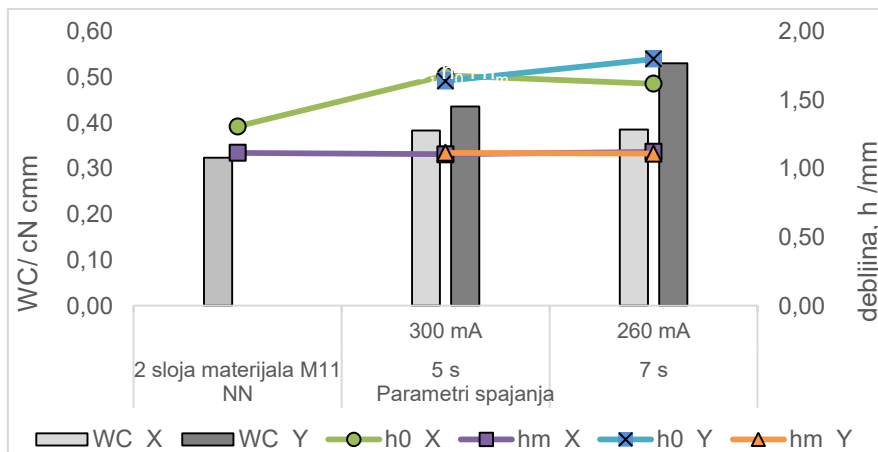


b)

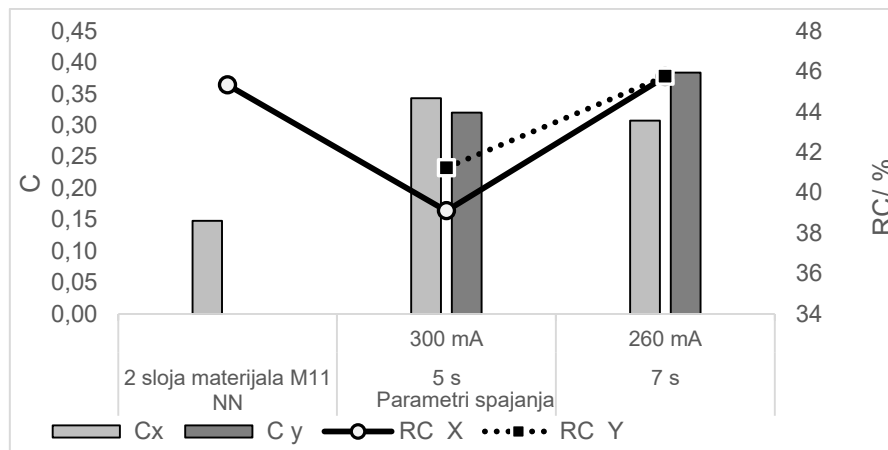
**Sl. 4.43** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada WC i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,229 što ukazuje na relativno slabu korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,043, što ukazuje na potpunu odsutnost korelaciju između parametara.

Na sl. 4.44 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)



a)

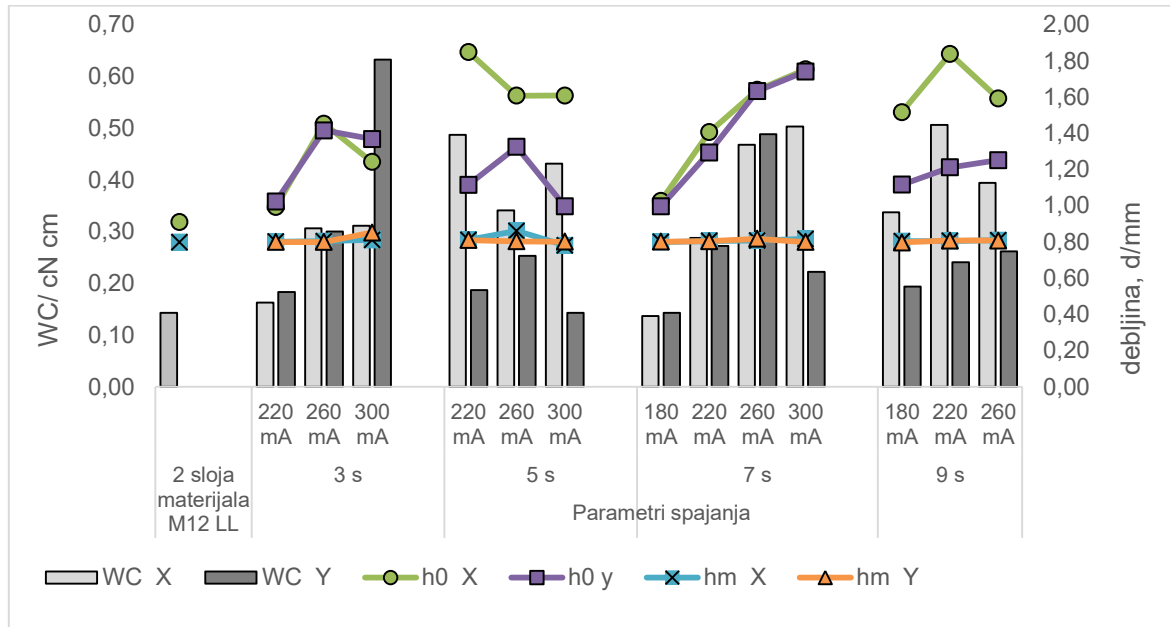


b)

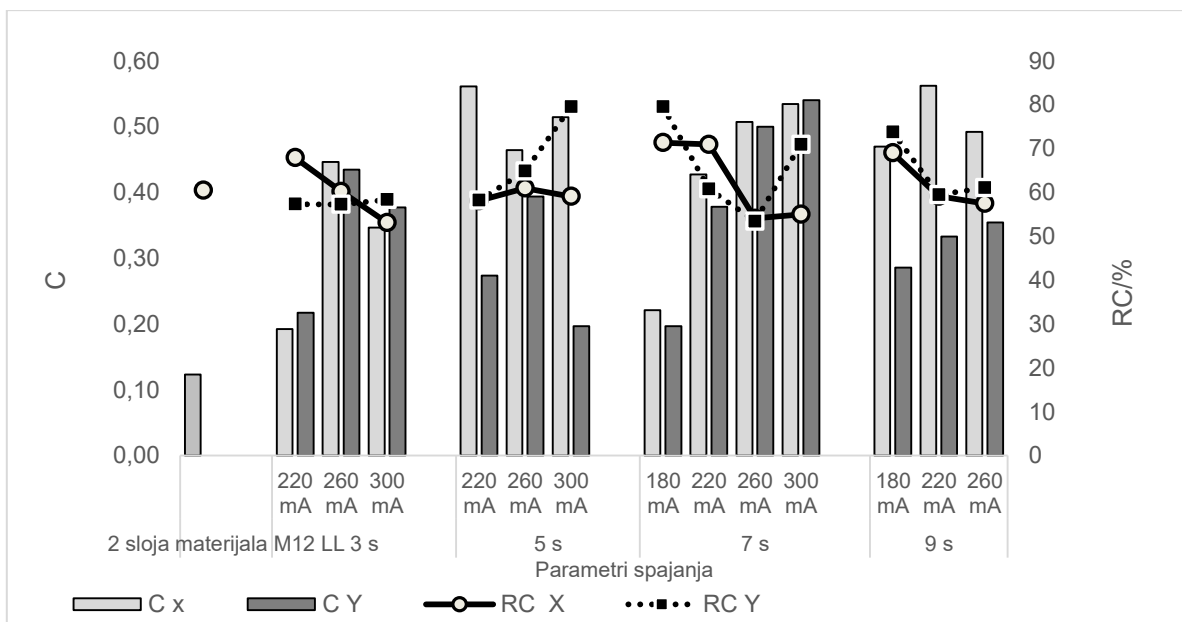
**SI. 4.44** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M11 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara kompresijskih svojstava.

Na sl. 4.45 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala)



a)

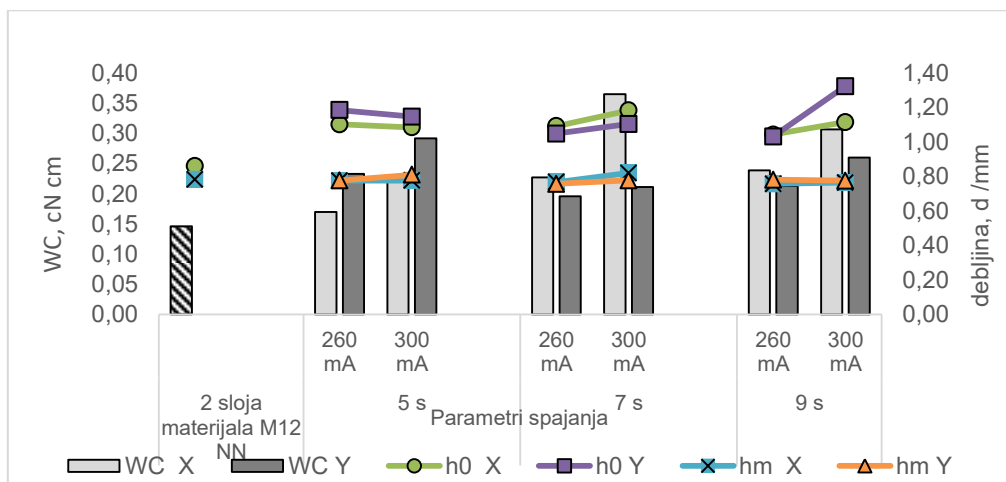


b)

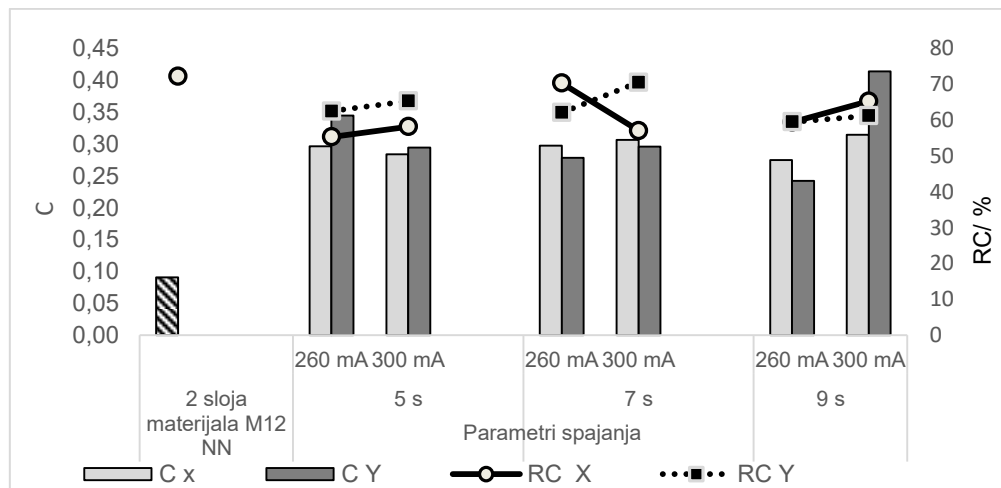
**SI. 4. 45** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$ , b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada WC i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,068 što ukazuje na potpunu odsutnost korelacije između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,883 što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

Na sl. 4.46 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala oznake M12 prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje spojenog materijala).



a)

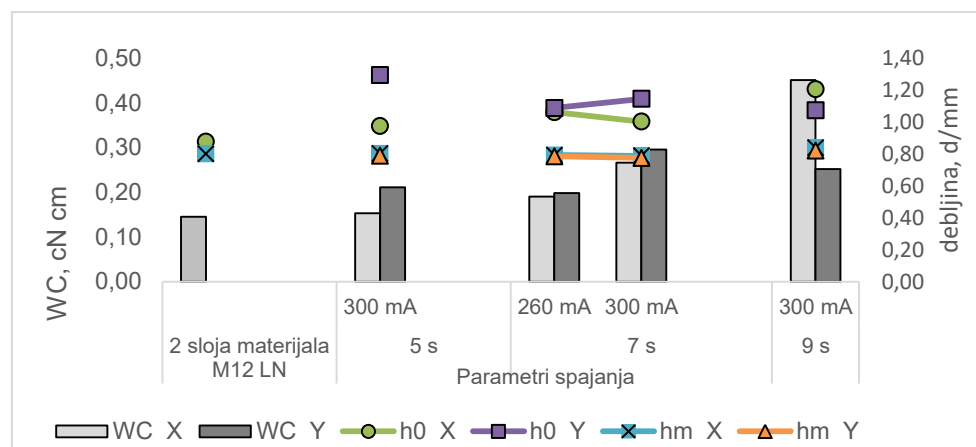


b)

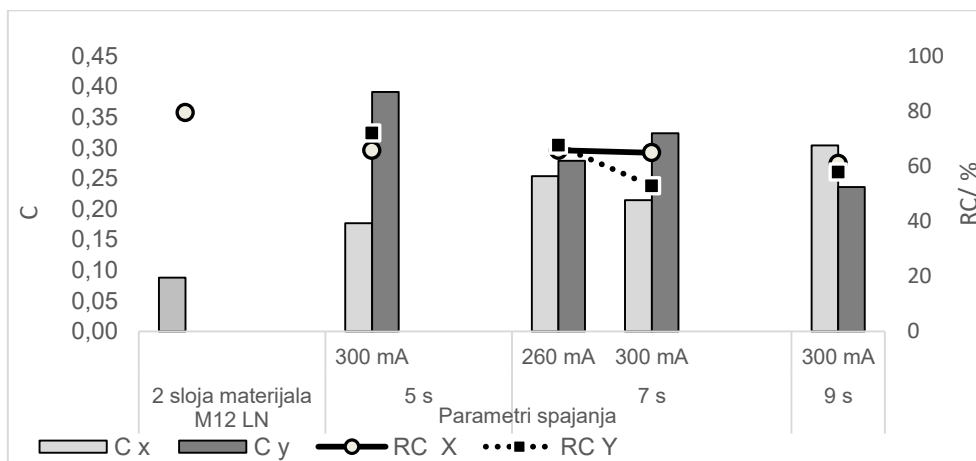
**Sl. 4.46** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spojenog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u  $x$  smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,622 što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u  $y$  smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,428 što ukazuje na relativnu slabu korelaciju između parametara.

Na sl. 4.47 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja, na uzorku materijala M12 prema rasporedu materijala LN (lice na naličje spojenog materijala)



a)



b)

**SI. 4.47** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorku materijala oznake M12 spajanih u  $x$  i  $y$  smjeru, LN i L1N1 (lice na naličje spojenog materijala)



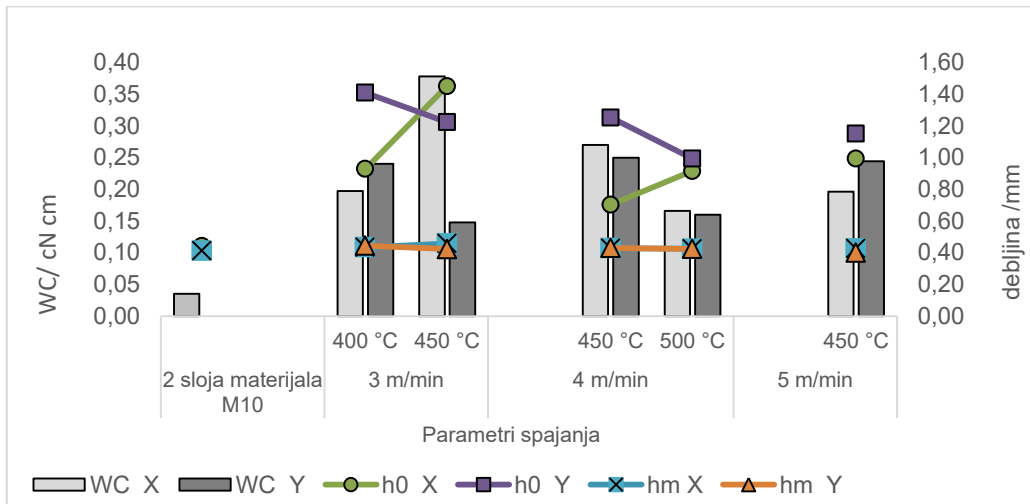
Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u  $x$  smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,879 što ukazuje na jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u  $y$  smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,073 što ukazuje na potpunu odsutnost korelacije između parametara.

#### 4. 4.3 Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom

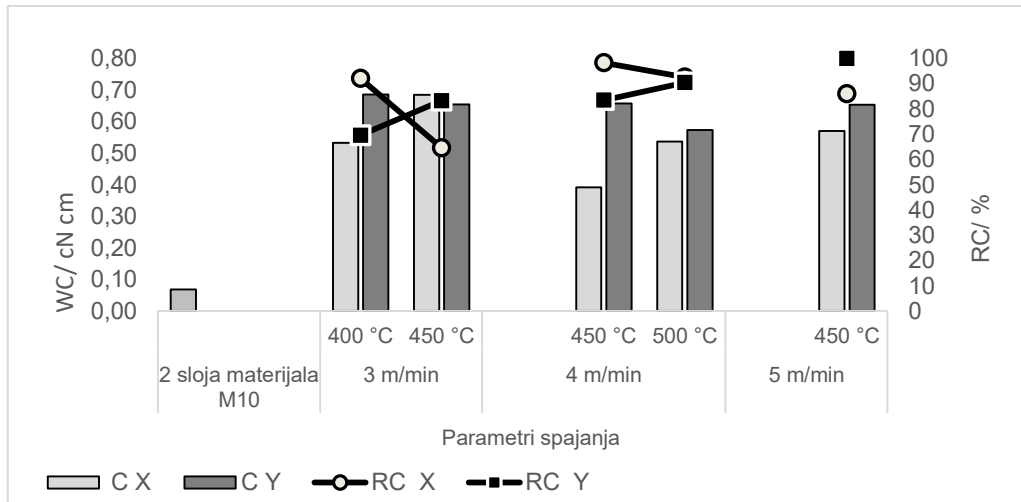
Mjerni rezultati kompresijskih svojstava spojeva postignutih spajanjem toplinskom kondukcijom (vrućim klinom) na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14, spajanih u  $x$  i  $y$  smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spojenog materijala), NN (naličje na naličje spojenog materijala) LN (lice na naličje spojenog materijala) i L1N1 (lice na naličje spojenog materijala) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.48 do sl. 4.52. Na grafičkim prikazima dat je odnos između kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$ , te odnos između b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , za uzorak dva sloja materijala i spojeve spojene pri definiranim parametrima spajanja.

Na sl. 4.48 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva izrađenih spajanjem toplinskom kondukcijom, na uzorku materijala oznake M10

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u  $x$  smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,870 što ukazuje na jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u  $y$  smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,758 što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara.



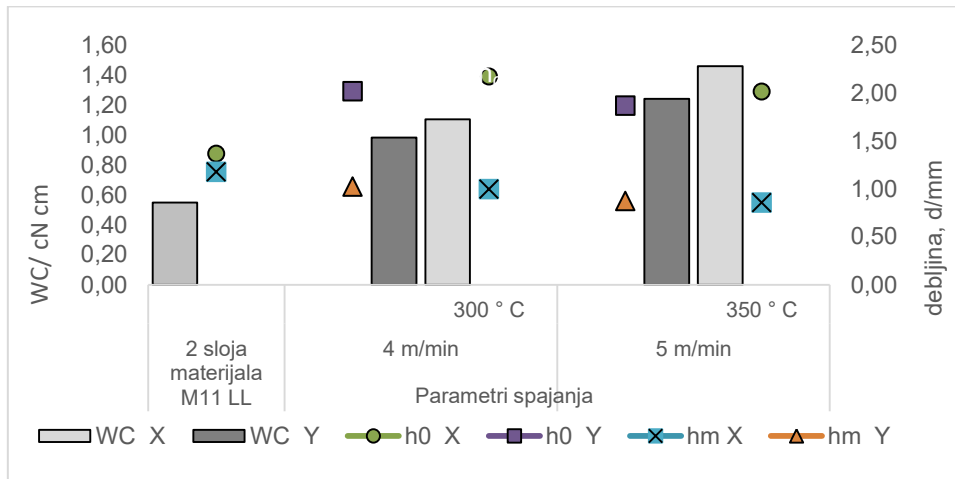
a)



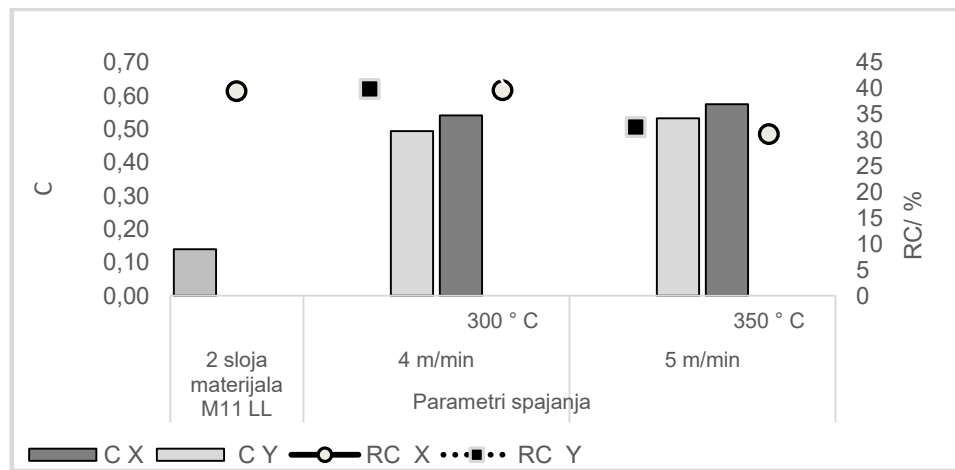
b)

**Sl. 4.48** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10 spajanih u x i y smjeru

Na sl. 4.49 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva izrađenih spajanjem toplinskom kondukcijom, na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spojenog materijala)



a)

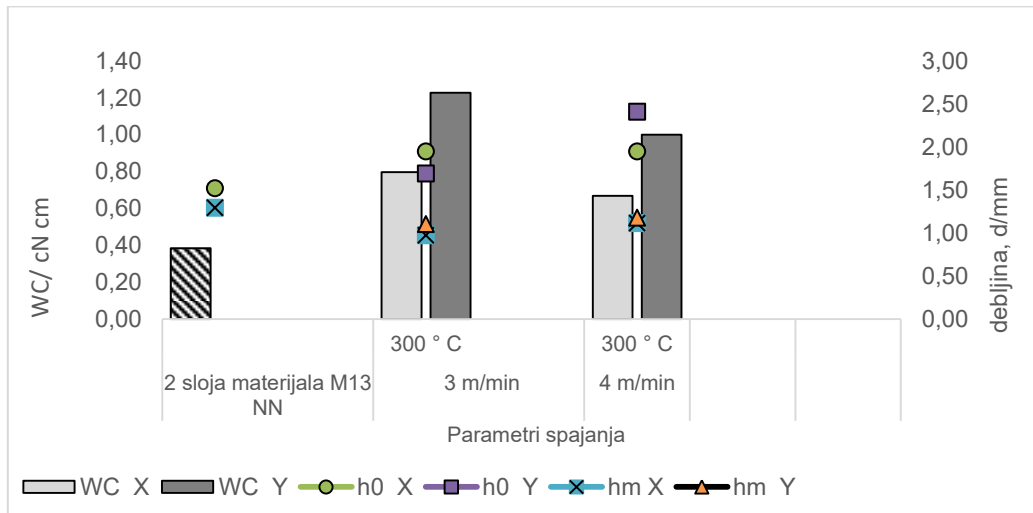


b)

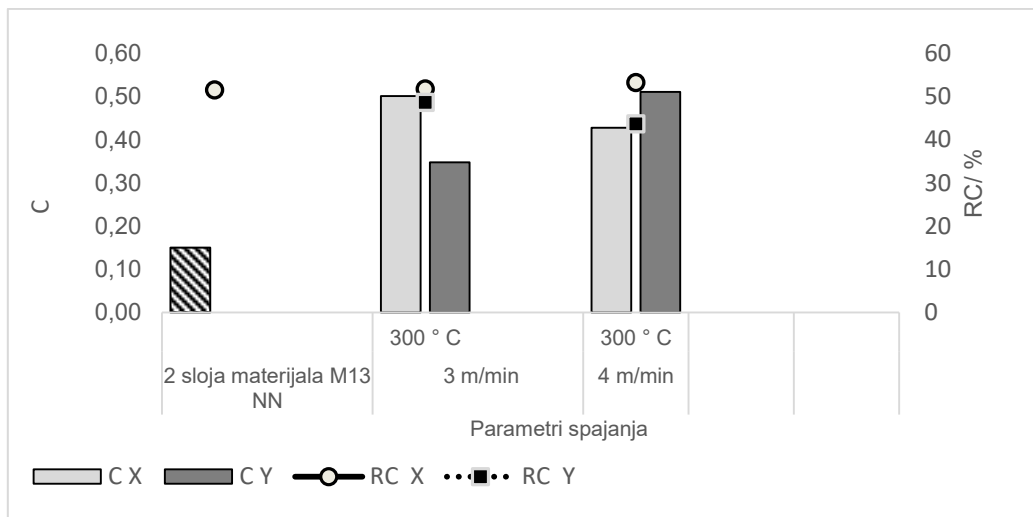
**Sl. 4.49** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara kompresijskih svojstava.

Na sl. 4.50 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom, na uzorku materijala oznake M13 prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje spojenog materijala))



a)

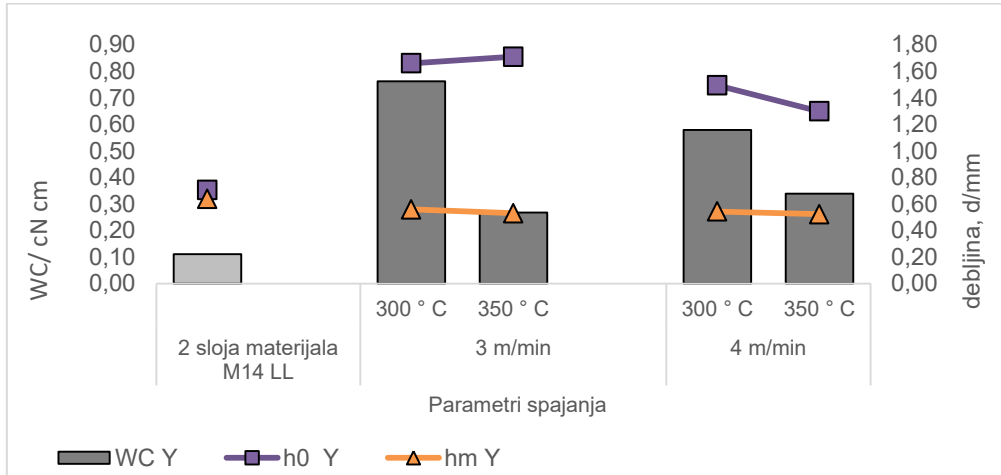


b)

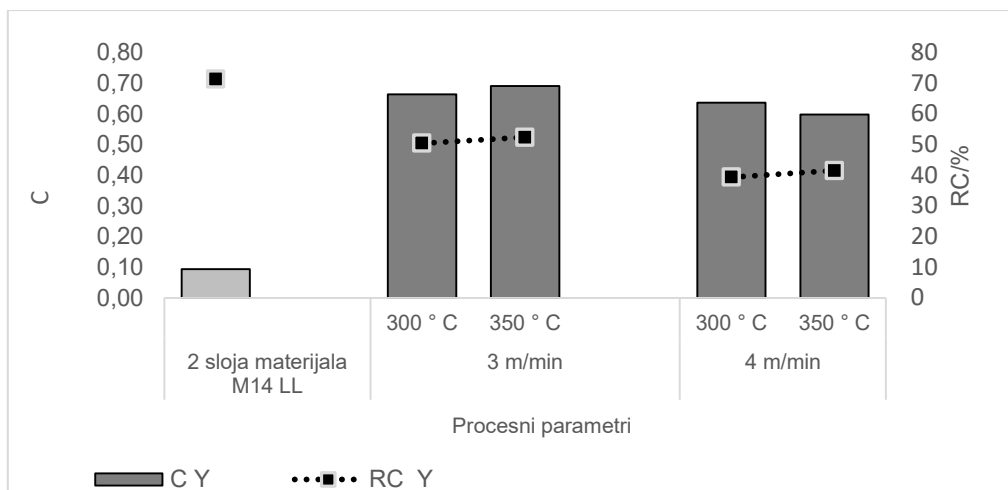
**SI. 4.50** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja vrućim klinom na uzorku materijala M13 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi - 0,987, što ukazuje na negativnu i jaku korelaciju između parametara. Koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru je također negativan,  $r_y$  iznosi - 0,999 što ukazuje na jaku korelaciju između promatranih kompresijskih parametara.

Na sl. 4.51 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih spajanjem toplinskom kondukcijom, na uzorku materijala oznake M14 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala)



a)

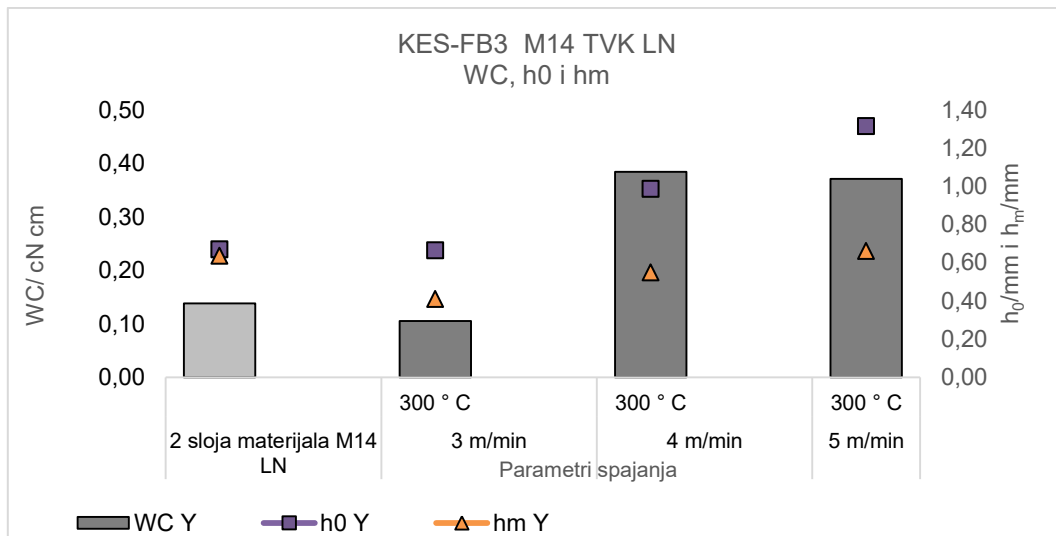


b)

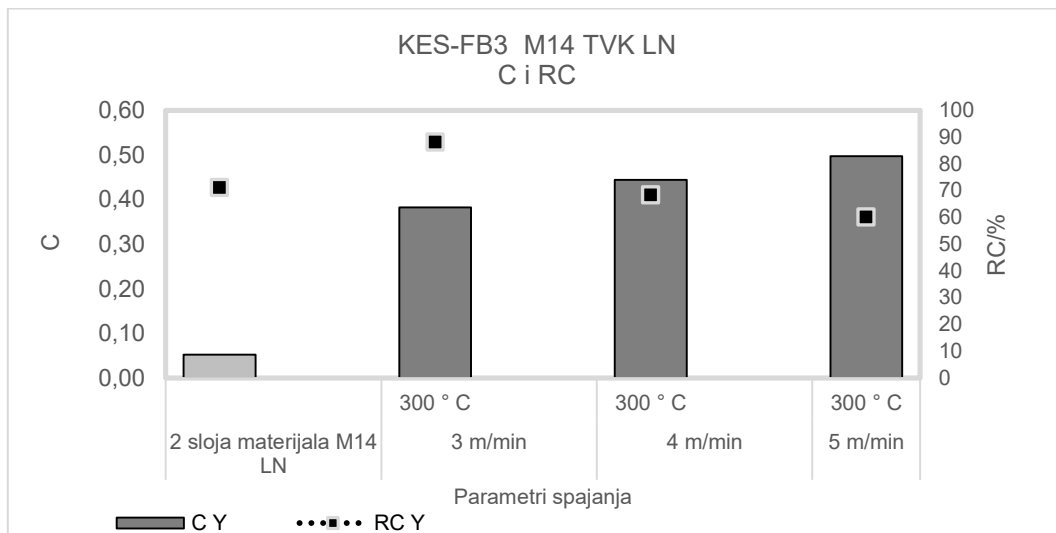
**Sl. 4.51.** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M14 spajanih u x i y smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada WC i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi - 0,995, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi - 0,951 što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

Na sl. 4.52 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih metodom spajanja vrućim klinom, na uzorku materijala M14 prema rasporedu materijala LL (lice na lice)



a)



b)

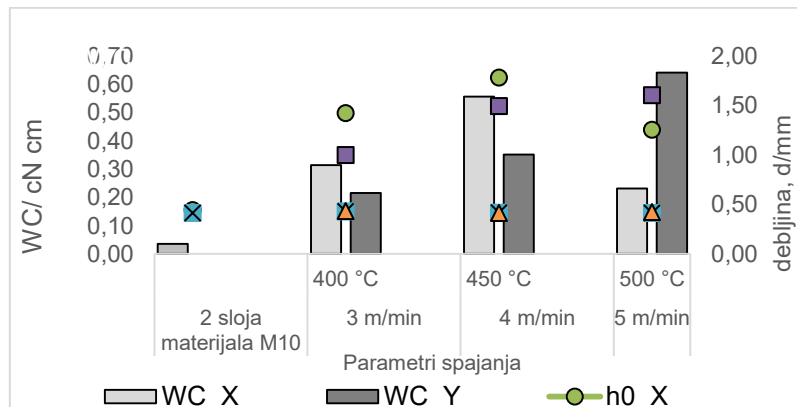
**SI. 4.52** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom oznake M14 spajanih u x i y smjeru, LN (lice na naličje spajanog materijala))

Izračunom koeficijenta korelacije, r između parametara deformacijskog rada WC i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u x smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,607, što ukazuje na srednje jaku korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,873, što ukazuje na jaku korelaciju između parametara.

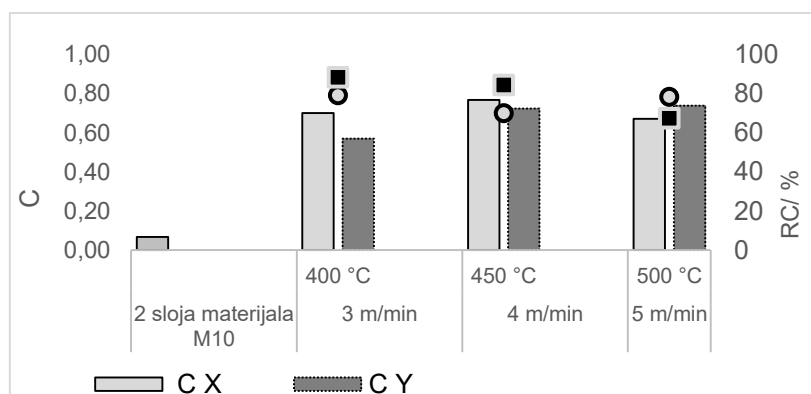
#### 4. 4. 4 Rezultati ispitivanja kompresijskih svojstava spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom

Mjerni rezultati kompresijskih svojstava spojeva postignutih metodom spajanja vrućim zrakom na uzorcima materijala M10, M11, M13 i M14, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice), NN (naličje na naličje) LN (lice na naličje) i L1N1 (lice na naličje) prikazani su u obliku grafova od sl. 4.53 do sl. 4.55. Na grafičkim prikazima dat je odnos između kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$ , te odnos između b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , za uzorak dva sloja materijala i spojeve spojene pri definiranim parametrima spajanja.

Na sl. 4.53 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M10 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala)



a)

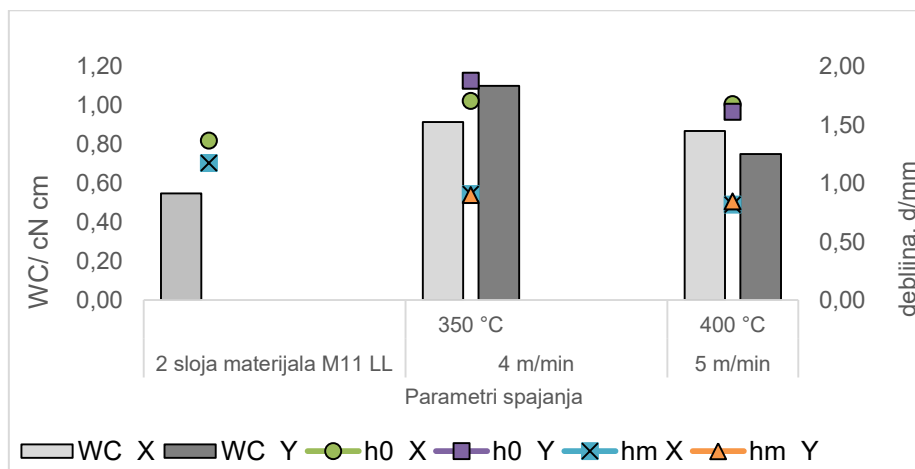


b)

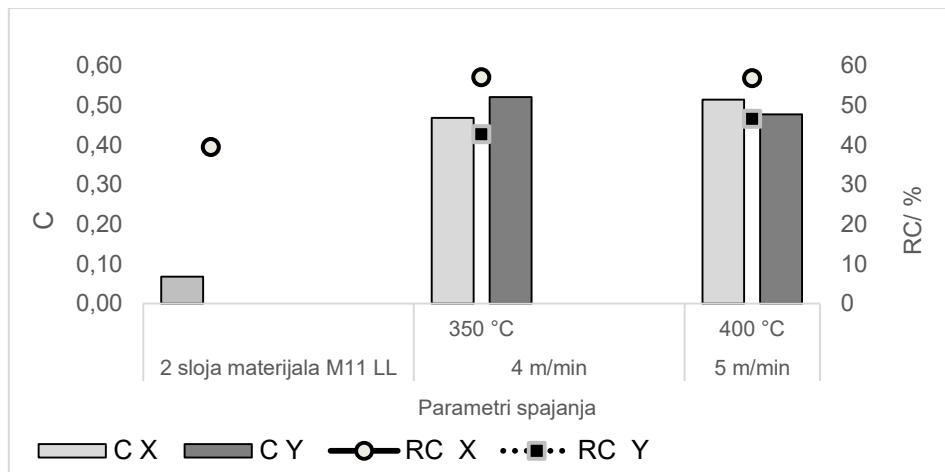
**Sl. 4.53** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom oznake M10 spajanih u x i y smjeru

Izračunom koeficijenta korelacije,  $r$  između parametara deformacijskog rada  $WC$  i debljine  $h_m$  za spojeve spajane u  $x$  smjeru koeficijent korelacije  $r_x$  iznosi 0,152, što ukazuje na neznatnu korelaciju između parametara i koeficijent korelacije za spojeve spajane u  $y$  smjeru koeficijent korelacije  $r_y$  iznosi 0,118, što ukazuje na neznatnu korelaciju između parametara

Na sl. 4.54 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M11 prema rasporedu materijala LL (lice na lice spajanog materijala)



a)



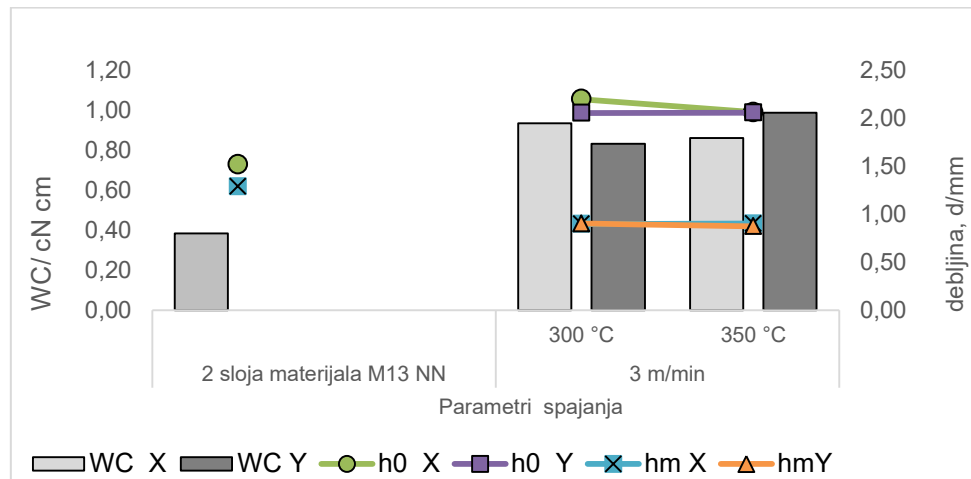
b)

**SI.4.54** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada  $WC$  i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti  $C$  i sposobnosti oporavka  $RC$ , na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M11 spajanih u  $x$  i  $y$  smjeru, LL (lice na lice spajanog materijala)

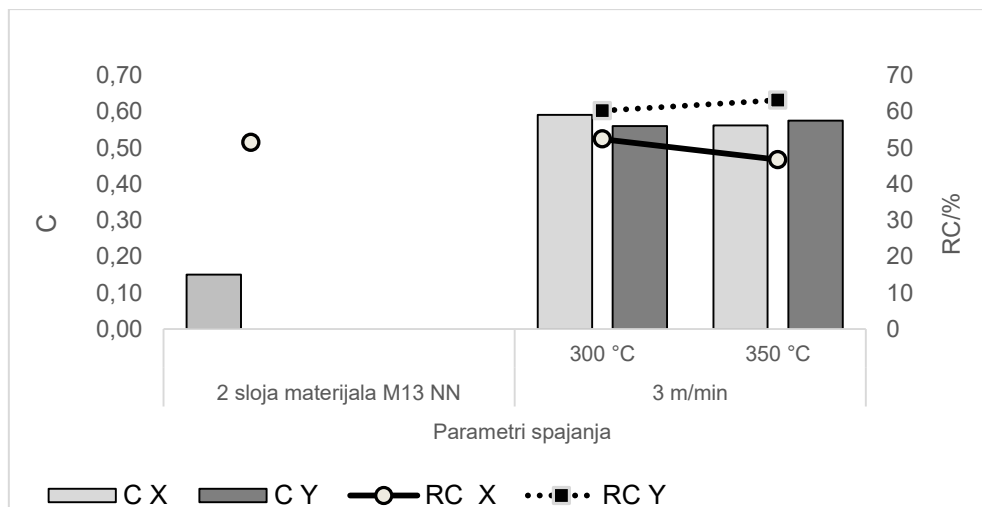


Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara kompresijskih svojstava.

Na sl. 4.55 prikaz je odnosa kompresijskih parametara spojeva, izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom, na uzorku materijala oznake M13 prema rasporedu materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala)



a)



b)

**Sl. 4.55** Prikaz odnosa vrijednosti kompresijskih parametara a) deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  i b) kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC, na spojevima izrađenim upotrebom tehnike spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M13 spajanih u x i y smjeru, NN (naličje na naličje spajanog materijala)

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva, nije provedena statistička analiza izračuna koeficijenta korelacije između vrijednosti parametara kompresijskih svojstava.

Na sl. 4.56. prikaz je mjerenja kompresijskih svojstava spoja na uzorku materijala oznake M11 koji je spojen visokofrekventnom tehnikom spajanja.



**Sl. 4.56** Mjerenje kompresijskih svojstava

Rezultati svih mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva prikazani su u tablicama od 4.1 do 4.5.



Nastavak tablice tab. 4.1 rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnoškim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M10

Toplinsko spajanje kondukcijom																																									
Parametri spajanja		v/mm <sup>-1</sup>	T/C°	LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>											
				x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y												
TVK	LL	3	400	Napomena: Spojevi spajani tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom nisu mogli biti ispitani na vlačna i smična svojstva na KES-FB1 mjernom sustavu																								0,2671	0,2652	0,0622	0,051	0,171	0,240	0,197	0,240	92,04	69,550	0,929	1,410	0,434	0,444
			450																									0,3142	0,2643	0,0768	0,0659	0,151	0,148	0,378	0,148	64,54	83,273	0,1451	1,224	0,458	0,423
		4	500																									0,2676	0,2683	0,0671	0,0613	0,106	0,146	0,270	0,250	104,24	83,455	0,703	1,253	0,428	0,430
			5																									450	0,2867	0,2781	0,0708	0,0698	0,146	0,120	0,166	0,160	92,54	90,417	0,916	0,993	0,425
																														0,2891	0,2884	0,0717	0,0686	0,140	0,132	0,196	0,244	86,00	100,00	0,993	1,152
Toplinsko spajanje konvekcijom																																									
Parametri spajanja		v/mm <sup>-1</sup>	T/C°	LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>											
				x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y												
TVZ	LL	3	400	Napomena: Spojevi spajani toplinskom metodom vrućim zrakom nisu mogli biti ispitani na vlačna i smična svojstva na KES-FB1 mjernom sustavu																								0,3087	0,3037	0,0773	0,0934	0,127	0,168	0,314	0,215	79,140	88,143	1,424	0,999	0,428	0,431
			450																									0,3188	0,2920	0,0778	0,0942	0,257	0,136	0,556	0,351	69,840	84,225	1,782	1,495	0,415	0,414
		5	500																									0,3176	0,2935	0,0953	0,0725	0,120	0,228	0,231	0,642	78,280	67,365	1,255	1,605	0,413	0,422





Tab. 4.4 Rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnološkim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M13

Materijal oznake M13				Vlačna svojstva (KES-FB1)								Smična svojstva (KES-FB1)				Savojna svojstva (KES-FB2)				Kompresijska svojstva (KES-FB3)																				
Parametri spajanja				LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>										
Ultrazvučna tehnika spajanja																																								
UZV	v/mmin <sup>-1</sup>	P <sub>s</sub> /W	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y										
	-	-	Napomena: Uzorak materijala oznake M13 ne spaja se ultrazvučnom tehnikom spajanja																																					
Visokofrekventna tehnika spajanja																																								
Parametri spajanja				LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>										
VF	t/s	I/mA	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y										
	-	-	Napomena: Uzorak materijala oznake M13 ne spaja se visokofrekventnom tehnikom spajanja.																																					
Toplinsko spajanje kondukcijom																																								
TVK	Parametri spajanja			LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>										
		v/mmin <sup>-1</sup>	T/C°	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y									
	NN	3	300	Napomena: spojevi spajani tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom nisu mogli biti ispitani na vlačna i smična svojstva na KES-FB1 mjernom sustavu																							0,3611	0,3435	0,3955	0,3892	0,699	0,530	0,797	1,122	51,74	48,60	1,519	1,686	0,971	1,102
		4	300																								0,3891	0,3728	0,3978	0,3954	0,302	0,375	0,668	0,999	53,24	43,64	1,946	2,408	1,113	1,177
Toplinsko spajanje konvekcijom																																								
TVZ	Parametri spajanja			LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>										
		v/mmin <sup>-1</sup>	T/C°	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y									
	NN	3	300	Napomena: spojevi spajani tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom nisu mogli biti ispitani na vlačna i smična svojstva na KES-FB1 mjernom sustavu																							0,4530	0,3581	0,5237	0,3257	0,298	0,302	0,935	0,833	52,44	60,28	2,200	2,057	0,899	0,904
			350																								0,3782	0,4631	0,3255	0,3488	0,289	0,347	0,861	0,988	46,74	63,17	2,065	2,059	0,904	0,875

Tab. 4.5 Rezultati mjerenja vlačnih, smičnih, savojnih i kompresijskih svojstava spojeva dobiveni spajanjem visokotehnoškim tehnikama spajanja na uzorku materijala oznake M14

Materijal oznake M14			Vlačna svojstva (KES-FB1)								Smična svojstva (KES-FB1)				Savojna svojstva (KES-FB2)				Kompresijska svojstva (KES-FB3)											
Parametri spajanja			LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>	
Ultrazvučna tehnika spajanja																														
	v/mmin <sup>-1</sup>	P <sub>g</sub> /W	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
UZV	-	-	Napomena: Uzorak materijala oznake M14 ne spaja se ultrazvučnom tehnikom spajanja																											
Visokofrekventna tehnika spajanja																														
Parametri spajanja			LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>	
	t/s	I/mA	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
VF	-	-	Napomena: Uzorak M14 ne spaja se visokofrekventnom tehnikom spajanja																											
Toplinsko spajanje kondukcijom																														
Parametri spajanja			LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>	
	v/mmin <sup>-1</sup>	T/C°	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
TVK	LL	3	300	Napomena: spojevi spajani tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom nisu mogli biti ispitani na vlačna i smična svojstva na KES-FB1 mjernom sustavu																										
			350																											
		4	300																											
			350																											
	LN	3	300	-	0,0420	-	0,0786	-	0,240	-	0,762	-	50,380	-	1,659	-	0,558													
		4	300	-	0,0186	-	0,0307	-	0,227	-	0,267	-	52,340	-	1,709	-	0,529													
		5	300	-	0,0271	-	0,0616	-	0,340	-	0,579	-	39,317	-	1,493	-	0,543													
				-	0,0190	-	0,0231	-	0,200	-	0,338	-	41,463	-	1,297	-	0,522													
			-	0,0408	-	0,0410	-	0,171	-	0,105	-	88,180	-	0,722	-	0,410														
			-	0,0795	-	0,0457	-	0,260	-	0,384	-	63,390	-	0,664	-	0,548														
			-	0,0382	-	0,0270	-	0,297	-	0,371	-	60,100	-	0,979	-	0,661														
Toplinsko spajanje konvekcijom																														
Parametri spajanja			LT		WT		RT		EMT		G		2GH		2GH5		B		2HB		LC		WC		RC		h <sub>o</sub>		h <sub>m</sub>	
	v/mmin <sup>-1</sup>	T/C°	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y		
TVZ	N	5	450	Napomena: spojevi spajani spajani tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom nisu mogli biti ispitani na vlačna i smična svojstva na KES-FB1 mjernom sustavu																										
				0,0968	0,0253	0,0474	0,0498	0,210	0,304	0,337	0,517	63,13	61,80	1,070	1,636	0,402	0,670													



## 4.5 Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva

Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva prikazani su za svaku tehniku spajanja zasebno u obliku tablica. U tablici se nalaze oznake uzorka materijala, parametri spajanja, smjer spajanja, te izmjerene vrijednosti čvrstoće spoja  $F_{max}/N$ , vrijednosti aritmetičke sredine. Također su izražene i vrijednosti standardne devijacije,  $\sigma$  [N], i koeficijenta varijacije, CV [%] za vrijednosti čvrstoće spojeva. Rezultati čvrstoće spoja u ovisnosti o parametrima spajanja prikazani su u obliku 3D grafikona.

### 4.5.1 Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja

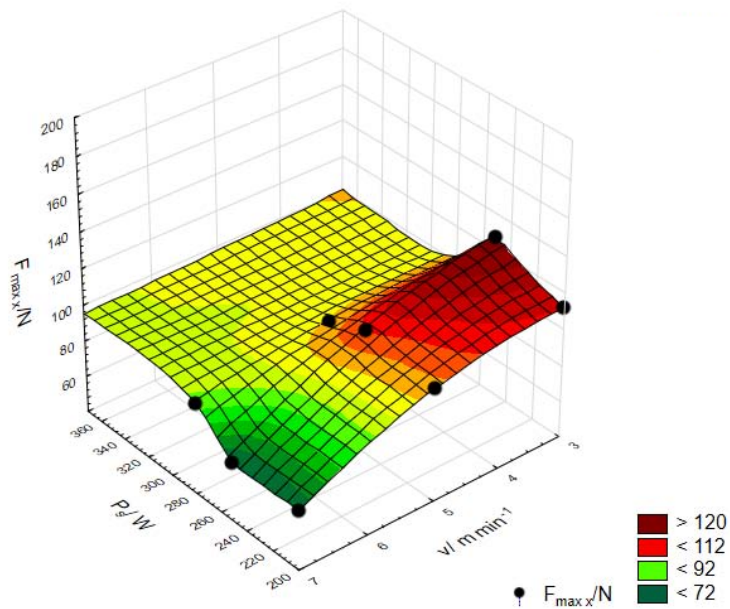
Mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja izvedena su na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, te su njihove vrijednosti maksimalne sile  $F_{max}/N$  prikazane u tab 4.6. Vrijednosti čvrstoće spojeva,  $F_{max}/N$ , prikazane su za spojeve spajane u x i y smjeru. Oznaka x odnosi se na spoj koji je izrađen okomito na smjer nizova pletiva i oznaka y kada je spoj izrađen u smjeru nizova pletiva što se odnosi na uzorke naslojenih pletiva oznaka M11 i M12. Kad je riječ o uzorku materijala oznake M10, folija oznaka x označava spoj koji je spojen okomito na smjer ekstruzije folije, a oznaka y označava spoj koji je spojen u smjeru ekstruzije folije.

Tab. 4.6 Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom ultrazvučne metode spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12

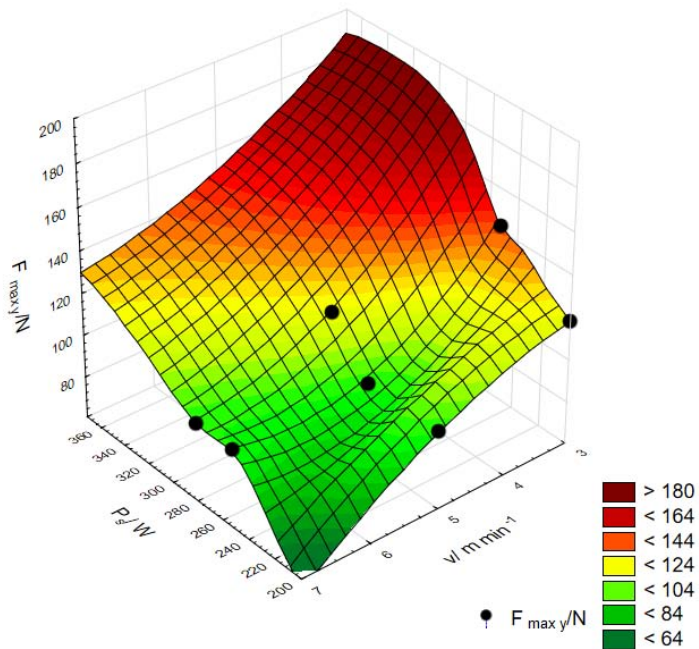
Ultrazvučna tehnika spajanja							
	Raspored slojeva materijala	Parametri spajanja			Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije
		Smjer spajanja	v/mmin <sup>-1</sup>	P <sub>s</sub> /W	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
Materijal oznake <b>M10</b>	<b>LL</b>	x	3	200	117,63	5,28	4,49
		y			118,20		
		x	3	252	126,47	14,32	11,32
		y			142,33		
		x	5	200	102,43	11,98	11,70
		y			96,87		
		x	5	252	108,67	9,83	9,04
		y			96,83		
		x	5	280	100,38	4,28	4,27
		y			119,03		
		x	7	252	71,70	4,91	6,85
		y			97,20		
		x	7	280	90,17	6,01	6,67
		y			97,00		
	<b>L1N1</b>	x	3	200	282,60	90,34	31,97
		y			242,03		
		x	3	252	250,00	61,03	24,41
		y			226,93		
		x	5	200	256,37	71,80	28,01
		y			261,90		
		x	5	252	270,67	40,77	17,76
		y			222,77		
		x	5	280	288,07	30,15	12,09
		y			257,70		
		x	7	252	208,00	82,44	39,64
		y			151,83		
x	7	280	286,93	36,35	12,67		
y			144,23			60,24	41,77
Materijal oznake <b>M11</b>	<b>LL</b>	Smjer spajanja	v/m min <sup>-1</sup>	P <sub>s</sub> /W	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
		y	3	332	45,40	9,51	20,96
		y	3	372	53,80	5,74	10,10
		y	5	332	19,94	0,94	4,71
		y	5	372	22,57	6,38	28,29
	y	7	372	15,10	1,90	15,58	
	<b>NN</b>	x	3	252	25,93	10,73	41,39
		y			43,17		
		x	3	280	28,20	9,86	34,97
		y			61,80		
		x	3	332	47,27	3,37	7,12
		y			73,23		
		x	3	372	69,37	5,67	8,18
		y			73,03		
		x	5	332	19,70	0,70	3,55
		x			5		
		x	7	272		17,47	5,85
		y			34,67	11,97	
		<b>LN</b>	y	3	372	39,53	8,01
	<b>L1N1</b>	y	3	372	167,67	38,66	23,06

Materijal oznake M12							
Materijal oznake M12	NN	Smjer spajanja	$v/m \text{ min}^{-1}$	$P_s/W$	Fmax /N	$\sigma$ [N]	CV [%]
		x	3	280	29,57	3,87	13,09
		y			31,83	5,49	17,24
		x	3	332	37,17	0,51	1,38
	y	35,60			3,57	10,02	
	LN	x	3	280	28,43	1,10	3,87
		x	5	332	29,50	14,08	47,71
	L1N1	x	3	280	90,27	10,10	11,19
		x	5	332	115,17	6,47	5,62

Mjerni rezultati čvrstoće spojeva postignutih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10 i M11, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spojenog materijala), NN (naličje na naličje spojenog materijala) LN (lice na naličje spojenog materijala) i L1N1 (lice na naličje spojenog materijala) prikazani su u 3D grafičkim prikazima u kojima je prikazan odnos utjecaja parametara spajanja brzine spajanja i snage ultrazvučnog spajanja na čvrstoću spoja od sl. 4.57 do 4.60.

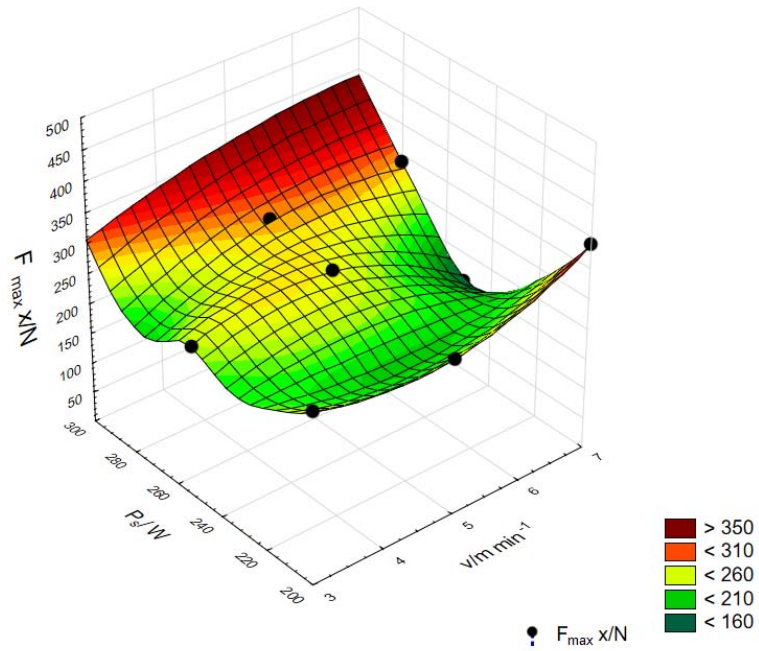


a)

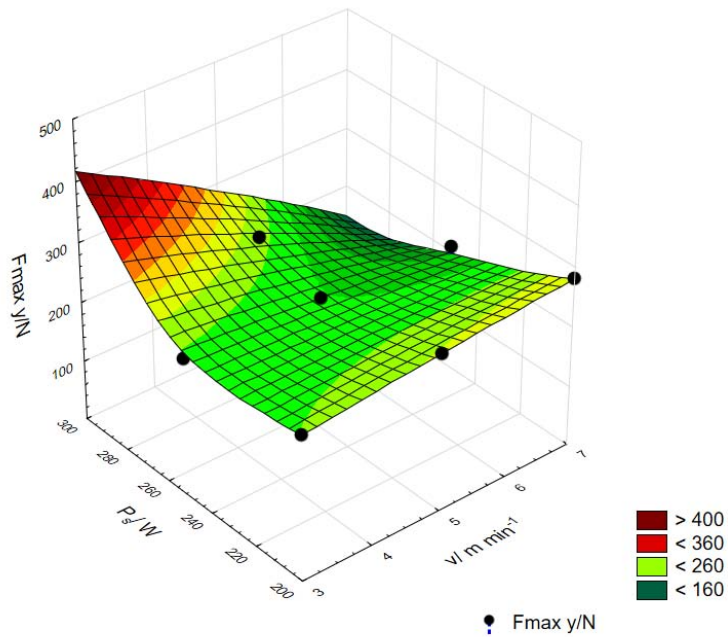


b)

**SI. 4.57** Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja,  $v/m \cdot min^{-1}$  i snage ultrazvučnog spajanja,  $P_s/W$  na čvrstoću spoja  $F_{max}$ /N, spojenog uzorka materijala oznake M10 LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru spajanja

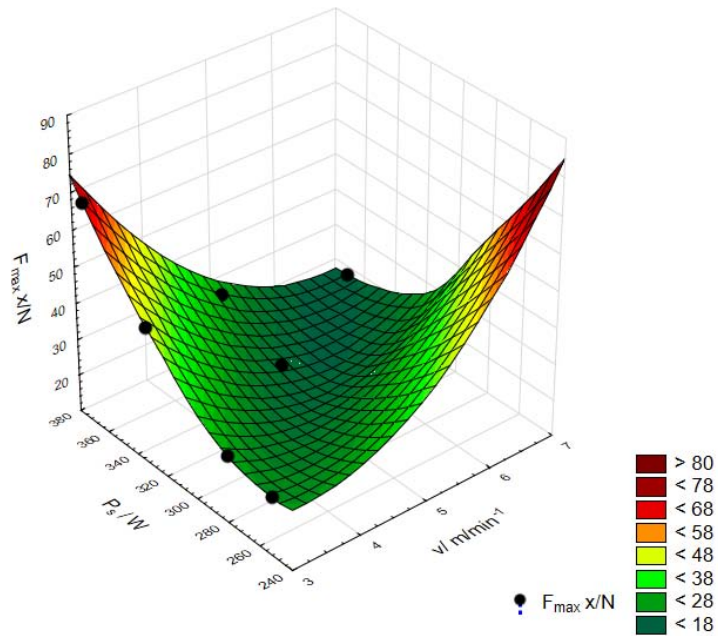


a)

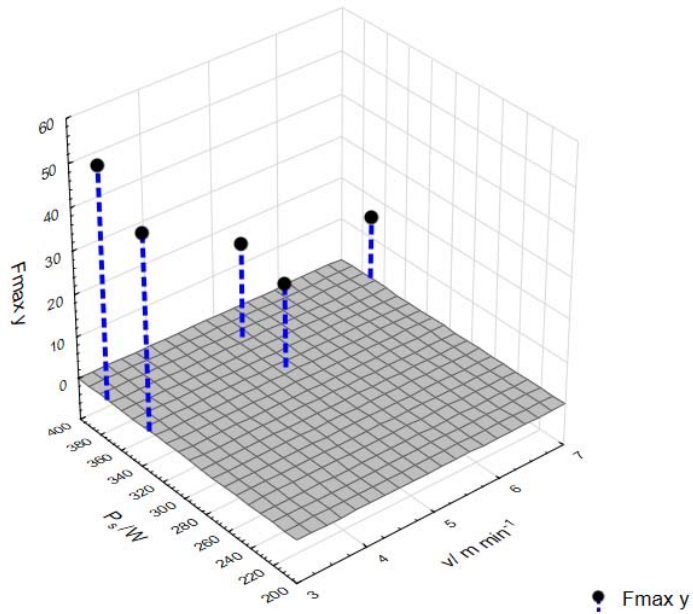


b)

**SI. 4.58** Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i snage ultrazvučnog spajanja,  $P_s/W$  na čvrstoću spoja  $F_{\max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10 L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru

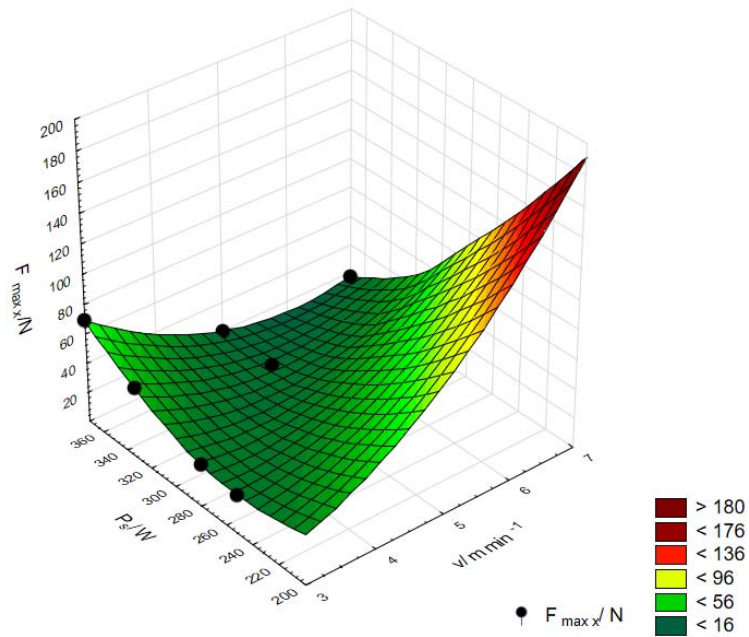


a)

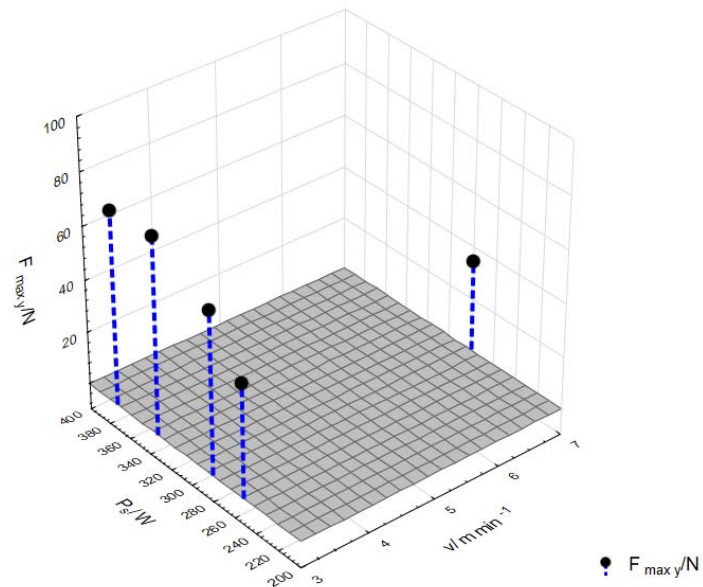


b)

**SI. 4.59** Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i snage ultrazvučnog spajanja,  $P_s/W$  na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru spajanja



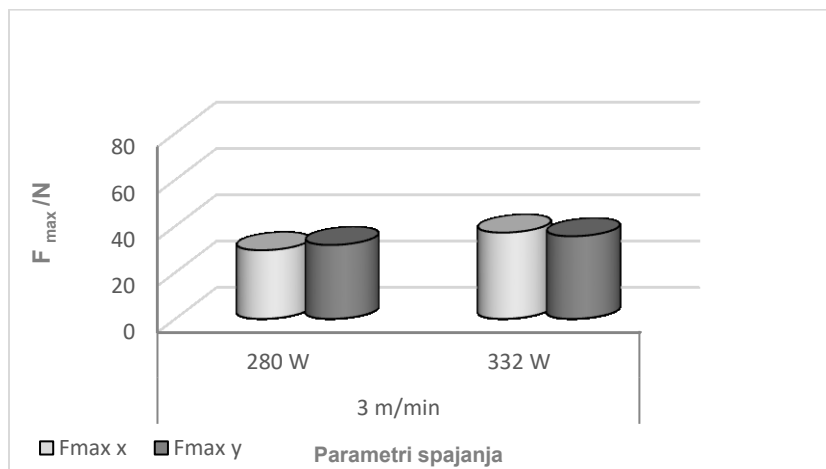
a)



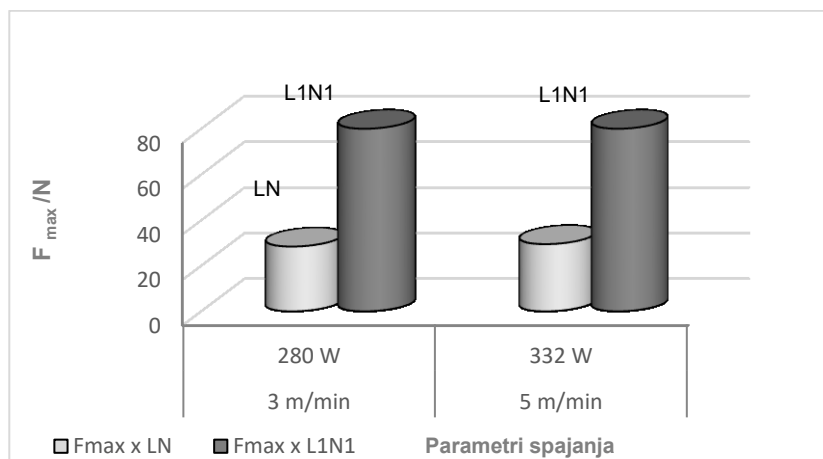
b)

**SI. 4.60** Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i snage ultrazvučnog spajanja,  $P_s/W$  na čvrstoću spoja  $F_{\max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru spajanja

Mjerni rezultati čvrstoće spojeva postignutih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M12, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u grafičkim prikazima u kojima je prikazan odnos utjecaja parametara spajanja brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i snage ultrazvučnog spajanja  $P_s/W$  na čvrstoću spoja  $F_{\max}/N$ , sl. 4.61.



a)



b)

**SI. 4.61** Prikaz odnosa ultrazvučnih parametara spajanja, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i snage ultrazvučnog spajanja,  $P_s/W$  na čvrstoću spoja  $F_{\max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M12, spajanog na način a) NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja i b) LN i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja



#### 4. 5. 1. 1 Rezultati statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih ultrazvučnom tehnikom spajanja

U tab. 4.7 prikazani su rezultati statističke analize rezultata dobivenih na temelju izmjerenih vrijednosti čvrstoće ultrazvučno spojenih spojeva na uzorcima materijala oznaka M10 i M11. Primjenom modela višestruke linearne regresije na uzorcima spojeva ispitan je statistički odnos između jedne zavisne varijable i dvije nezavisne varijable. Model višestruke linearne regresije proveden je kod uzoraka koji su ostvarili pozitivnu ocjenu vizualne kvalitete, te imaju dovoljan broj uzoraka. Na uzorku materijala oznake M12 zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka nije provedena statistička obrada vrijednosti modelom višestruke linearne regresije.

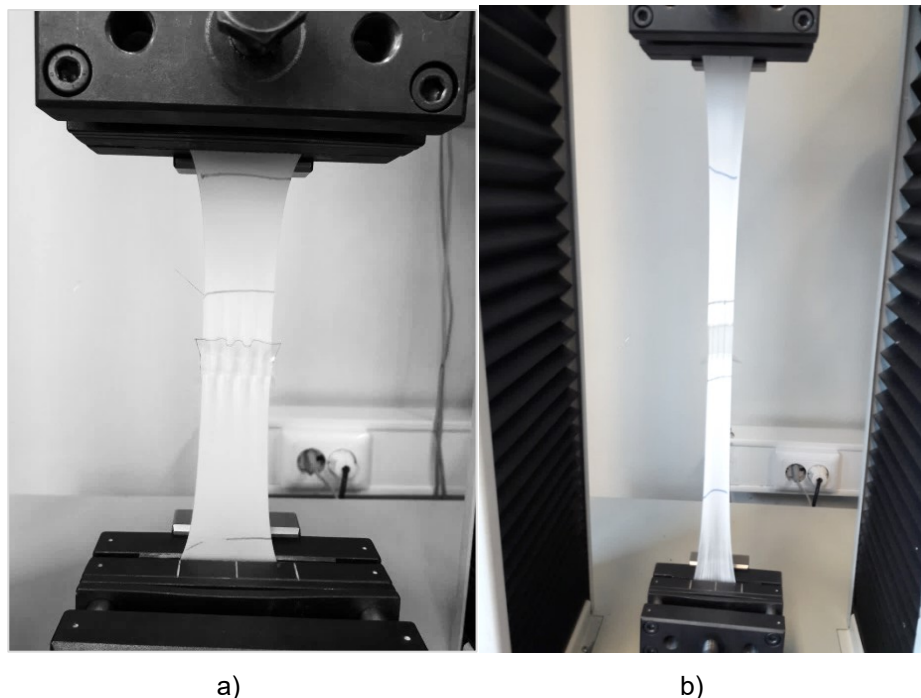
Statistički parametri koji su dobiveni regresijskim modelom prikazani su u tab. 4.7, to su koeficijent regresije ( $r$ ), koeficijent determinacije ( $r^2$ ), vrijednost-p uz statističku značajnost od 5% te jednadžba pravca regresije  $\hat{Y}$ .

Tab. 4.7 Prikaz rezultata statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebe ultrazvučne metode spajanja na uzorcima materijala M10 i M11

Ultrazvučna tehnika spajanja	Materijal oznake M10						
	Raspored slojeva materijala	Smjer spajanja	$r$	$r^2$	p-vrijednost (t-test) $\alpha=0,05$		Jednadžba pravca regresije $\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2$
					$b_1$ v/ m min <sup>-1</sup>	$b_2$ P <sub>s</sub> , W	
LL	x		0,9447	0,8925	<b>0,001</b>	0,171	$\hat{Y} = 124,25 - 10,94 X_1 + 0,13 X_2$
	y		0,9397	0,8829	<b>0,002</b>	<b>0,010</b>	$\hat{Y} = 76,48 - 13,47 X_1 + 0,40 X_2$
L1N1	x		0,2286	0,0522	0,956	0,638	* Regresijski model nije statistički značajan
	y		0,6518	0,4248	0,680	0,141	* Regresijski model nije statistički značajan
	Materijal oznake M11						
LL	y		0,9528	0,9070	<b>0,004</b>	0,373	$\hat{Y} = 6,53 - 10,28 X_1$
NN	x		0,9479	0,9084	<b>0,004</b>	<b>0,009</b>	$\hat{Y} = -25,22 - 12,82 X_1 + 0,34 X_2$
	y		0,9475	0,8977	<b>0,050</b>	0,110	$\hat{Y} = 21,71 - 10,87 X_1$

\* Napomene: regresijski model nije statistički značajan, p-vrijednost za  $b_1$  i  $b_2$  su veće od 0,05

Na sl. 4.62 prikaz je mjerenja čvrstoće spoja na uzorku materijala oznake M10 nastalog primjenom ultrazvučne tehnike spajanja na način spajanja LL (lice na lice spojenog materijala) i L1N1 (lice na naličje spojenog materijala).



**Sl. 4.62** Uzorak spoja nastalog ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M10, spajanog na način a) LL (lice na lice spajanog materijala) i b) L1N1 (lice na naličje spajanog materijala)

#### 4. 5. 2 Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja

Mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih visokofrekventnom metodom spajanja izvedena su na uzorcima materijala M10, M11 i M12, te su njihove vrijednosti maksimalne sile  $F_{max}/N$  prikazane na tab 4.8. Prikazane vrijednosti čvrstoće spoja  $F_{max}/N$  su vrijednosti aritmetičke sredine maksimalne vrijednosti sile izmjerene za svaki od parametara visokofrekventnog spajanja. Također su izražene i vrijednosti standardne devijacije,  $\sigma$  [N] i koeficijenta varijacije, CV [%].

Vrijednosti čvrstoće spojeva,  $F_{max}/N$ , prikazane su u x i y smjeru. Oznaka x odnosi se na spoj koji je izrađen poprečnom smjeru i oznaka y kada je spoj izrađen u uzdužnom smjeru.

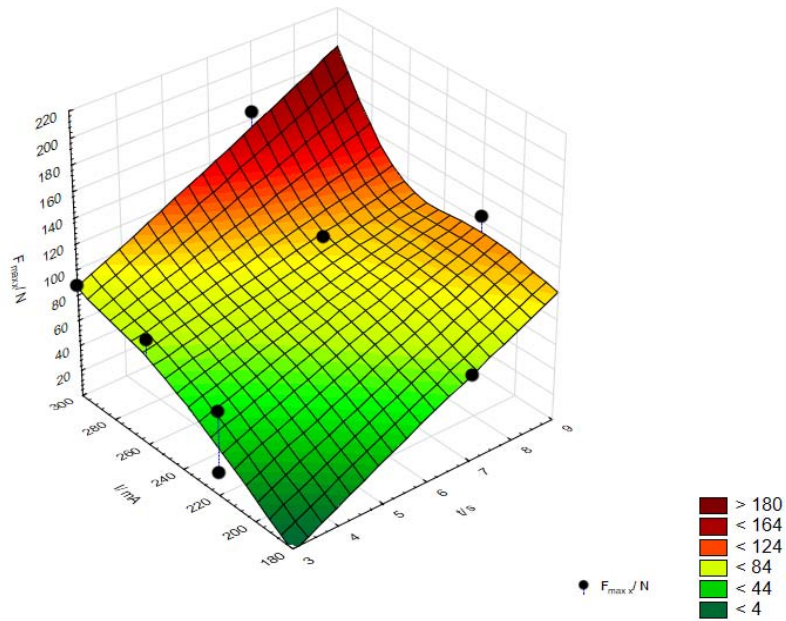
Tab 4.8 Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorcima materijala oznake M10, M11 i M12

Visokofrekventna tehnika spajanja							
	Raspored slojeva materijala	Parametri spajanja			Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije
		Smjer spajanja	t/s	I/ mA	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
Materijal oznake M10	LL	x	3	220	18,33	12,58	68,63
		y			48,68	19,2	39,49
		x	3	260	82,47	2,76	3,34
		y			79,93	1,33	1,66
		x	3	300	87,65	0,78	0,89
		y			95,47	2,63	2,76
		x	5	220	53,97	12,29	22,77
		y			61,33	1,27	2,06
		x	5	260	81,63	4,52	5,53
		y			82,97	1,90	2,29
		x	5	300	107,73	2,48	2,30
		y			95,17	2,61	2,74
		x	7	180	67,70	5,55	8,20
		y			67,30	0,53	0,79
		x	7	220	84,33	2,37	2,81
		y			78,83	4,44	5,63
		x	7	260	101,90	0,46	0,45
		y			102,20	0,70	0,68
		x	7	300	165,83	6,64	4,00
		y			167,26	5,26	3,60
		x	9	180	119,93	8,15	6,80
		y			98,87	2,40	2,43
		x	9	220	178,33	6,86	3,85
		y			124,43	2,57	2,07
	x	9	260	84,90	0,72	0,85	
	y			99,77	1,86	1,86	
	L1N1	Napomena: rezultati ispitivanja čvrstoće spoja na uzorku oznake M10 spojenog L1N1 (lice na naličje spojenog materijala) su nevažeći, jer su zbog velike istezljivosti materijala i načina spajanja ispitivani uzorci imali prekid uz donju stezaljku kidalice te su odbačeni					
Materijal oznake M11	LL	Smjer spajanja	t/s	I/ mA	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
		x	3	260	12,17	2,53	20,81
		y			69,40	4,78	6,88
		x	3	300	112,87	2,57	2,28
		y			89,87	6,43	7,16
		x	5	260	71,57	9,23	12,90
		y			71,03	4,30	6,06
		x	5	300	99,57	3,88	3,90
		y			79,63	5,40	6,78
		x	7	220	71,97	10,55	14,66
		y			47,50	5,68	11,96
		x	7	260	99,50	1,78	1,79
		y			81,43	5,31	6,52
		x	7	300	92,33	3,67	3,20

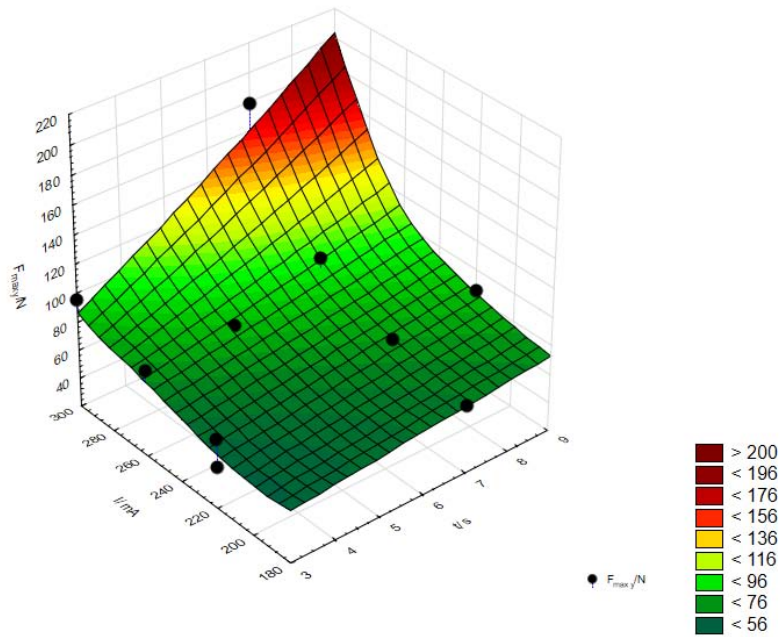
		y			89,83	5,57	6,21
		x	9	220	58,83	12,02	20,44
		y			73,87	3,36	4,54
	<b>NN</b>	x	5	300	5,43	1,34	24,72
		y			10,90	0,70	6,42
		x	7	260	15,90	1,74	10,97
	<b>LN</b>	y			20,67	2,39	11,55
		x	9	260	2,00	0,46	22,91
	<b>L1N1</b>	y			4,63	0,77	16,76
		x	9	260	23,20	6,08	26,25
		y			36,63	9,97	27,20
Materijal oznake M12		Smjer spajanja	t/s	I/ mA	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
		<b>LL</b>	x	3	220	3,87	0,40
	y				7,77	0,85	10,95
	x		3	260	13,43	1,07	7,96
	y				30,30	1,85	6,11
	x		3	300	18,95	1,91	10,07
	y				14,50	0,20	1,38
	x		5	220	36,63	2,28	6,23
	y				17,83	0,91	5,09
	x		5	260	34,17	2,07	6,07
	y				22,87	2,78	12,15
	<b>LL</b>	x	5	300	41,37	1,98	4,80
		y			38,06	1,66	5,91
		x	7	180	7,83	7,11	90,85
		y			15,40	1,47	9,57
		x	7	220	36,30	1,60	4,41
		y			32,00	0,82	2,56
		x	7	260	47,87	3,17	6,64
		y			36,83	2,25	6,11
		x	7	300	45,90	1,38	3,03
		y			43,57	2,34	5,38
	<b>NN</b>	x	9	180	28,00	2,55	9,11
		y			19,13	0,41	2,18
		x	9	220	42,23	0,20	0,49
		y			31,40	1,64	5,21
		x	9	260	44,10	0,95	2,16
		y			39,37	2,08	5,29
		x	5	260	37,90	3,72	9,83
		y			22,77	6,92	30,42
		x	5	300	42,63	19,84	46,52
		y			35,07	10,24	29,20
	<b>NN</b>	x	7	260	43,40	6,01	13,85
		y			44,77	2,14	4,78
		x	7	300	57,90	3,39	5,85
		y			44,63	3,56	7,99
		x	9	220	11,23	2,54	22,63
		y			11,37	2,53	22,28
		x	9	260	59,20	6,67	11,28
		y			31,33	4,47	14,28
	<b>LN</b>	x	5	300	17,03	1,68	9,90
y				16,70	1,49	8,94	
<b>LN</b>	x	7	260	5,93	2,69	45,42	
	y			7,03	3,28	46,73	
<b>LN</b>	x	7	300	39,97	4,67	11,69	

		y			14,70	2,09	14,25		
		x	9	260	48,97	3,33	6,80		
		y			38,13	1,05	2,75		
	<b>L1N1</b>		x	5	300	126,30	30,06	23,80	
			y			81,23	4,40	5,42	
			x	7	260	149,78	11,41	7,61	
				y			84,40	21,59	25,58
				x	7	300	179,47	5,13	2,86
				y			119,30	1,20	1,01
				x	9	260	94,00	12,95	13,77
				y			97,03	18,86	19,44

Mjerni rezultati čvrstoće spojeva postignutih visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u 3D grafovima u kojima je prikazan odnos utjecaja parametara spajanja, vremena spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , sl od 4.63 do 4.68. Kod uzoraka spojeva gdje je mali broj pozitivno ocjenjenih uzoraka, dat je prikaz mjernih podataka u obliku grafova, sl. od 4.69 do sl. 4.70.

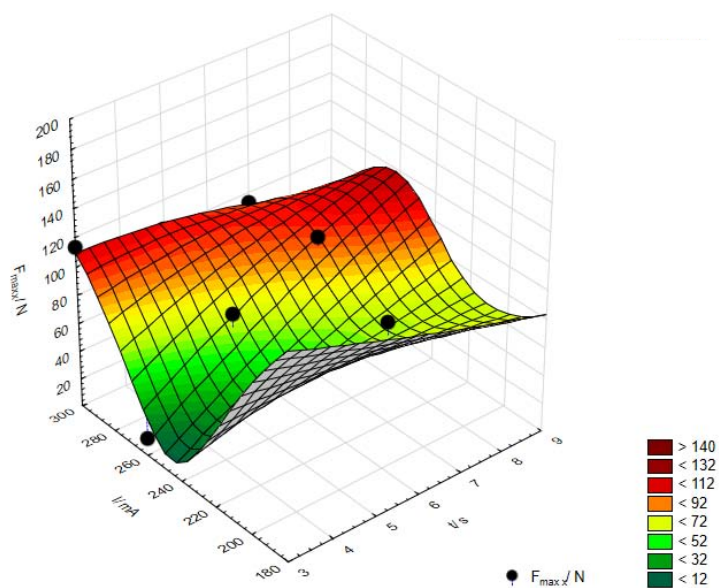


a)

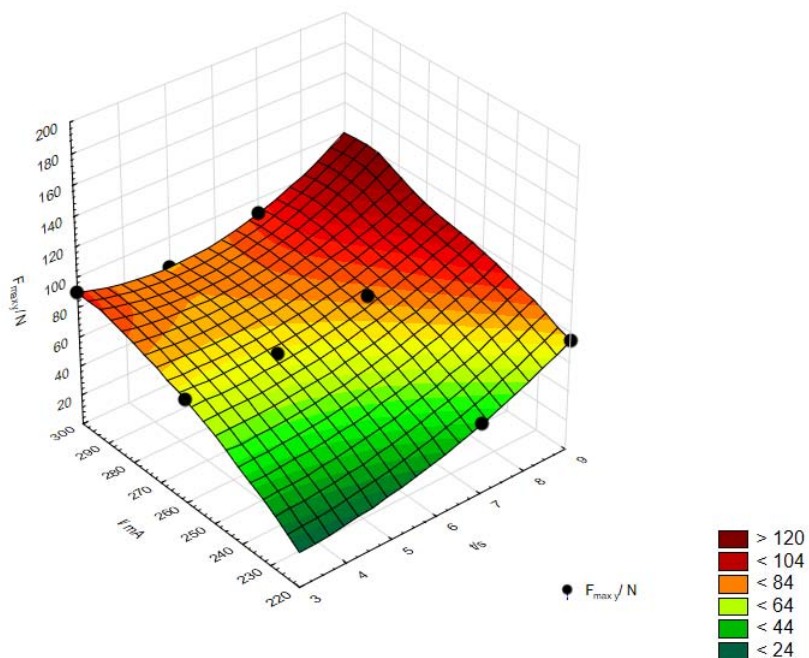


b)

**SI. 4.63** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja,  $t/s$  i jakosti anodne struje,  $I/ mA$  na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M10, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru

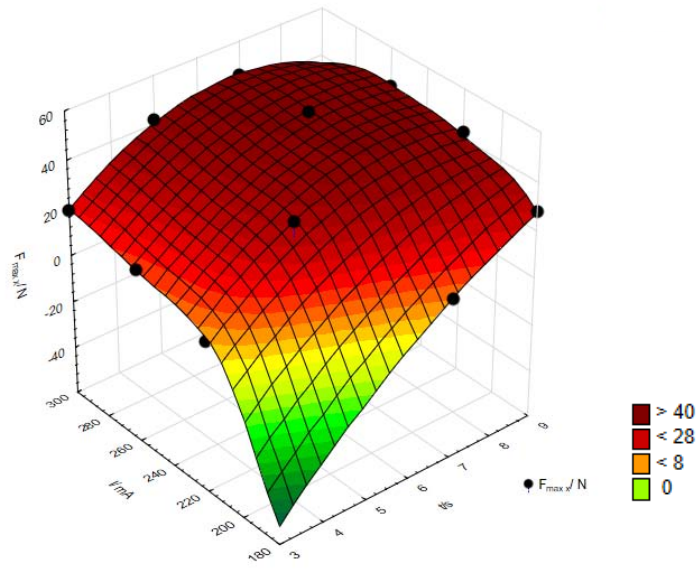


a)

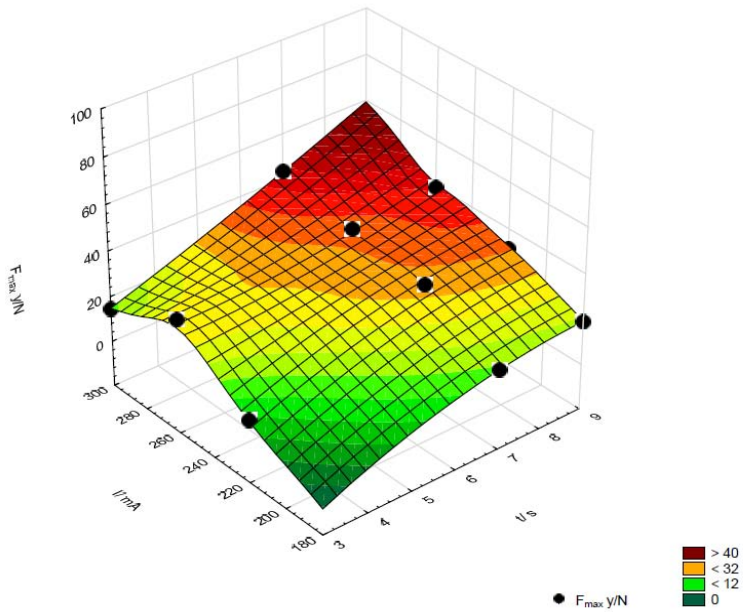


b)

**SI. 4.64** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja,  $t/s$  i jakosti anodne struje,  $I/ mA$  na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M11, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru



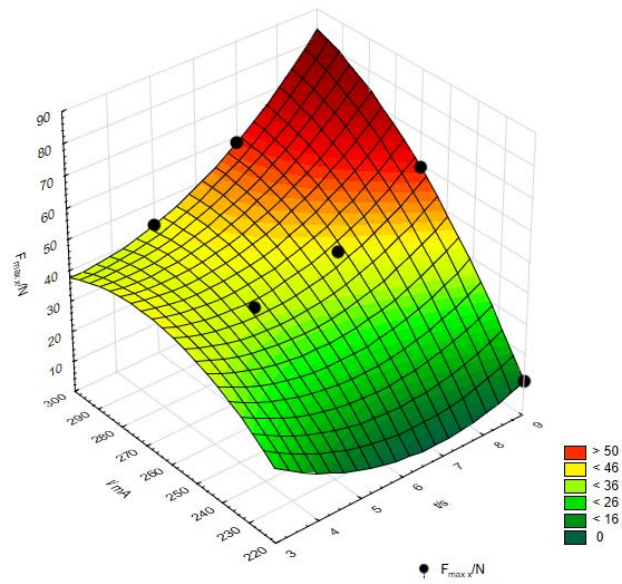
a)



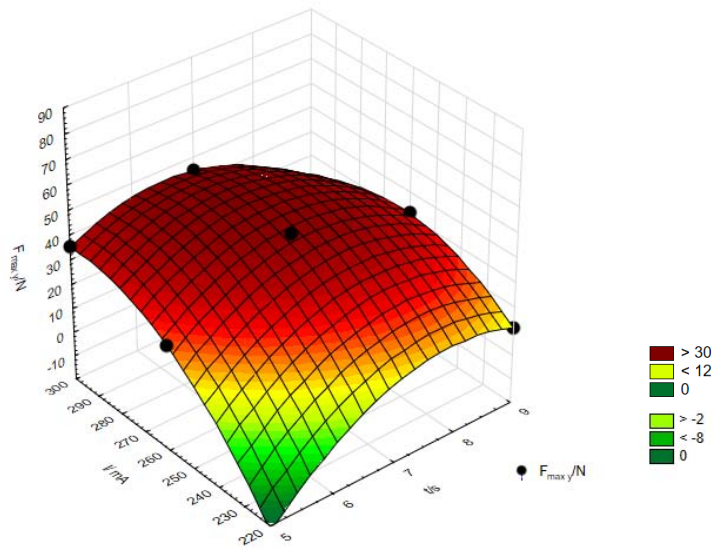
b)

**SI. 4.65** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja,  $t/s$  i jakosti anodne struje,  $I/ mA$  na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru



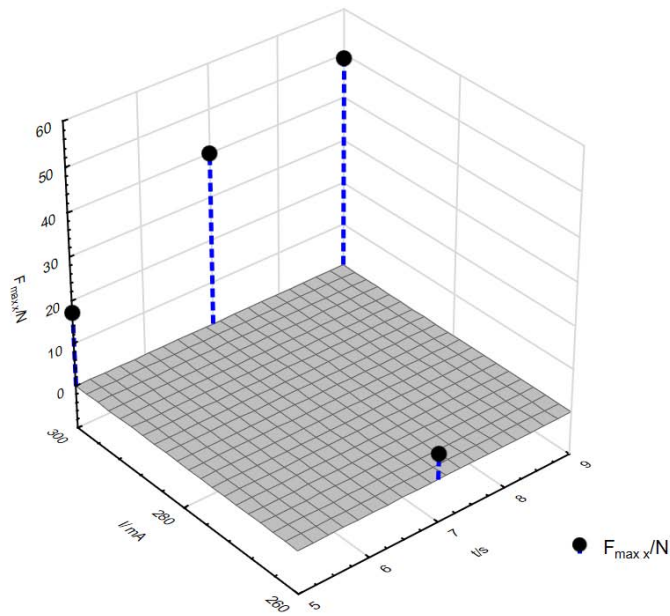


a)

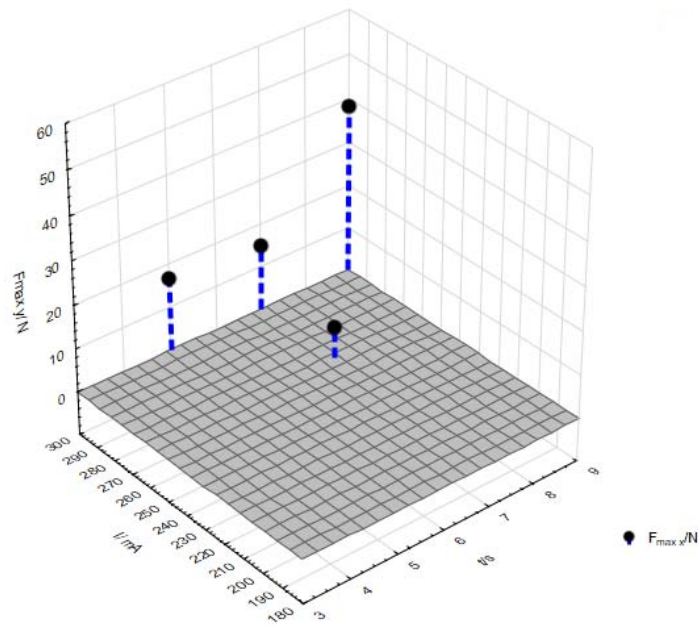


b)

**SI. 4.66** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru

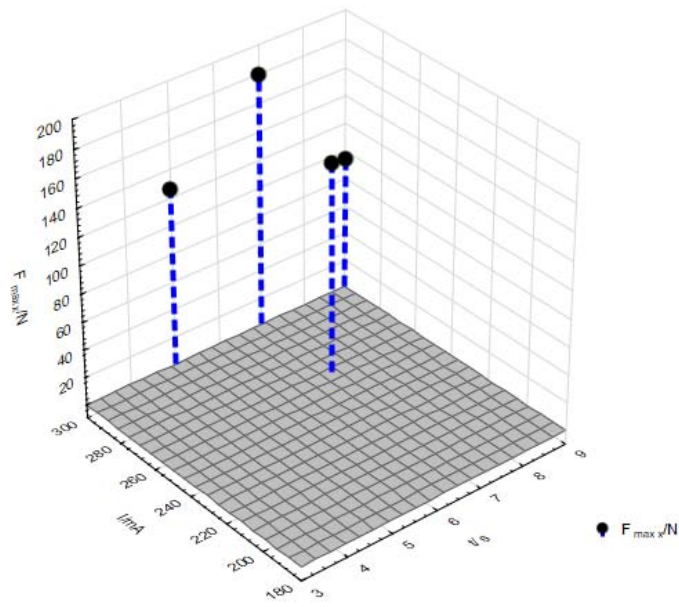


a)

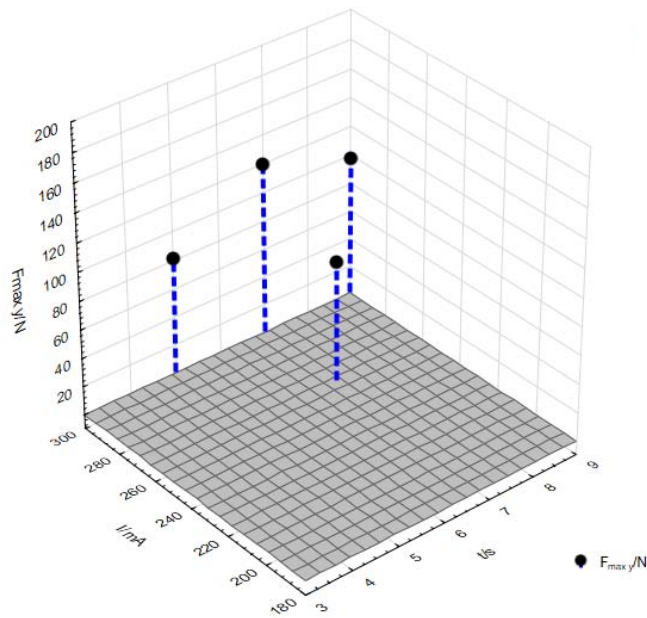


b)

**Sl. 4.67** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja  $F_{max\ x}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru



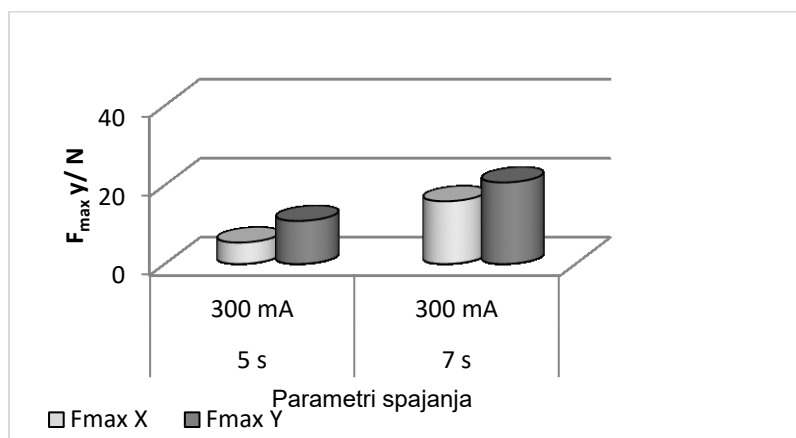
a)



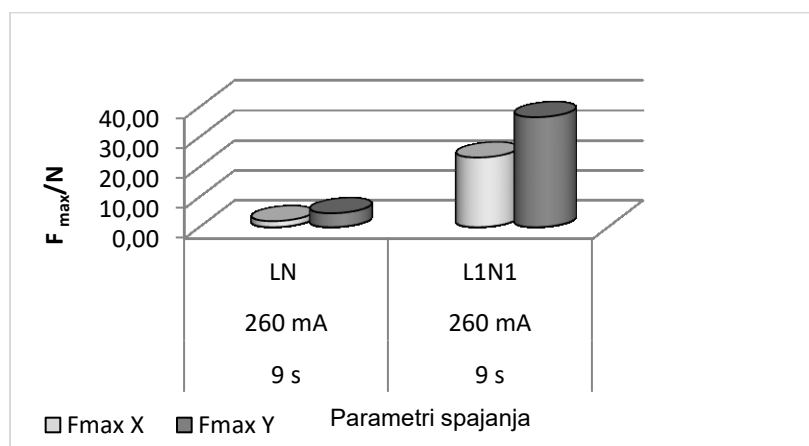
b)

**SI. 4.68** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru i b) y smjeru

Zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka, mjerni rezultati čvrstoće spojeva postignutih visokofrekventnom metodom spajanja na uzorcima materijala M11 i M12, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala NN (naličje na naličje) LN (lice na naličje) i L1N1 (lice na naličje) prikazani su u grafičkim prikazima na sl. od sl. 4.69 do sl. 4.70. U njima je dat prikaz utjecaja parametara visokofrekventnog spajanja, vremena spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ .



**Sl. 4.69** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakosti anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x i y smjeru spajanja



**Sl. 4.70** Prikaz odnosa visokofrekventnih parametara spajanja, vrijeme spajanja, t/s i jakost anodne struje, I/ mA na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , na uzorku materijala oznaka M11, spojenog na način LN i L1N1 (lice na naličje spojenog materijala) u x i y smjeru spajanja

#### 4. 5. 2. 1 Rezultati statističke analize mjernih podataka ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih visokofrekventnom tehnikom spajanja

Primjenom modela višestruke linearne regresije na uzorcima spojeva ispitan je statistički odnos između jedne zavisne varijable i dvije nezavisne varijable. Model višestruke linearne regresije proveden je kod uzoraka koji su ostvarili pozitivnu ocjenu vizualne kvalitete. Statistički parametri koji su dobiveni regresijskim modelom prikazani su u tab. 4.9, a to su koeficijent regresije ( $r$ ), koeficijent determinacije ( $r^2$ ), vrijednost-p uz statističku značajnost od 95%, te jednadžba pravca regresije  $\hat{Y}$ . Na uzorku materijala oznake M11 spojevi spajani na način NN (naličje na naličje spojenog materijala) i uzorku materijala oznake M13 zbog malog broja pozitivno ocjenjenih uzoraka nije provedena statistička obrada vrijednosti modelom višestruke linearne regresije.

Tab 4.9. Prikaz rezultata statističke analize ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom visokofrekventne tehnike spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12

Materijal oznake M10						
Raspored slojeva materijala	Smjer spajanja	r	$r^2$	p-vrijednost (t-test) $\alpha=0,05$		Jednadžba pravca regresije $\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2$
				$b_1$ t, s	$b_2$ I, mA	
LL	x	0,8464	0,7164	<b>0,001</b>	<b>0,009</b>	$\hat{Y} = -129,72 + 13,10 X_1 + 0,58 X_2$
	y	0,8214	0,6748	<b>0,003</b>	<b>0,001</b>	$\hat{Y} = -110,29 + 8,51 X_1 + 0,60 X_2$
Materijal oznake M11						
LL	x	0,6927	0,4798	0,213	0,290	* Regresijski model nije statistički značajan
	y	0,8362	0,6993	0,087	<b>0,020</b>	$\hat{Y} = -42,99 + 0,39 X_2$
Materijal oznake M12						
LL	x	0,8430	0,7107	<b>0,001</b>	<b>0,004</b>	$\hat{Y} = -62,04 + 5,46X + 0,24X$
	y	0,8441	0,7124	<b>0,003</b>	<b>0,004</b>	$\hat{Y} = -45,14 + 3,68X + 0,20X$
NN	x	0,8114	0,6583	0,351	0,098	* Regresijski modeli nisu statistički značajni
	y	0,7851	0,6163	0,565	0,130	
LN	x	0,9566	0,9152	0,188	0,251	
	y	0,8931	0,7978	0,382	0,406	
L1N1	x	0,4299	0,1848	0,755	0,842	
	y	0,5678	0,3225	0,728	0,694	

#### 4. 5. 3 Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom

Mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom (vrućim klinom) izvedena su na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14 te su njihove vrijednosti maksimalne sile  $F_{max}/N$  prikazane na tab. 4.10. Prikazane vrijednosti čvrstoće spoja  $F_{max}/N$  su vrijednosti aritmetičke sredine sile izmjerenih za svaki od parametara spajanja toplinskom kondukcijom. Također su izražene i vrijednosti standardne devijacije,  $\sigma$  [N], i koeficijenta varijacije, CV [%] za vrijednosti čvrstoće spojeva.

Vrijednosti čvrstoće spojeva,  $F_{max}/N$ , prikazane su u x i y smjeru. Oznaka x odnosi se na spoj koji je izrađen u poprečnom smjeru spajanja i oznaka y kada je spoj izrađen u uzdužnom smjeru spajanja.

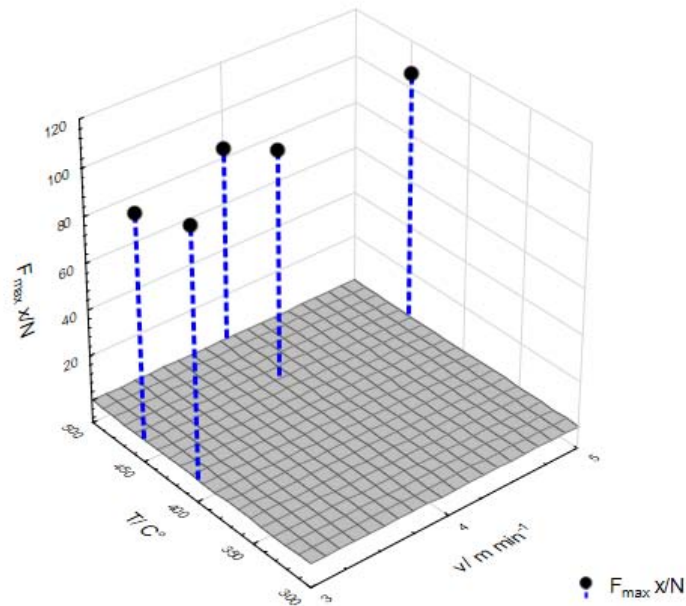
Tab 4.10 Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih spajanjem toplinskom kondukcijom na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14

Tehnika spajanja toplinskom kondukcijom							
	Raspored slojeva materijala	Parametri spajanja			Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije
		Smjer spajanja	v/m min <sup>-1</sup>	T/ C°	Fmax /N	$\sigma$ [N]	CV [%]
Materijal oznake M10	LL	x	3	400	106,57	2,80	2,63
		y			92,13		
		x	3	450	96,60	8,97	9,28
		y			104,57		
		x	4	450	94,93	4,28	4,37
		y			97,37		
		x	4	500	84,03	14,69	17,48
		y			89,97		
		x	5	450	106,06	4,34	4,09
		y			103,17		
	x	3	400	421,60	38,33	9,09	
	y			356,85			55,07
	x	3	450	448,50	84,63	35,03	
	y			241,55			12,73
	x	4	450	428,80	103,95	24,24	
	y			211,30			27,29
	x	4	500	246,05	103,60	42,11	
	y			291,45			154,50
	x	5	450	295,85	101,47	34,30	
	y			311,95			71,77

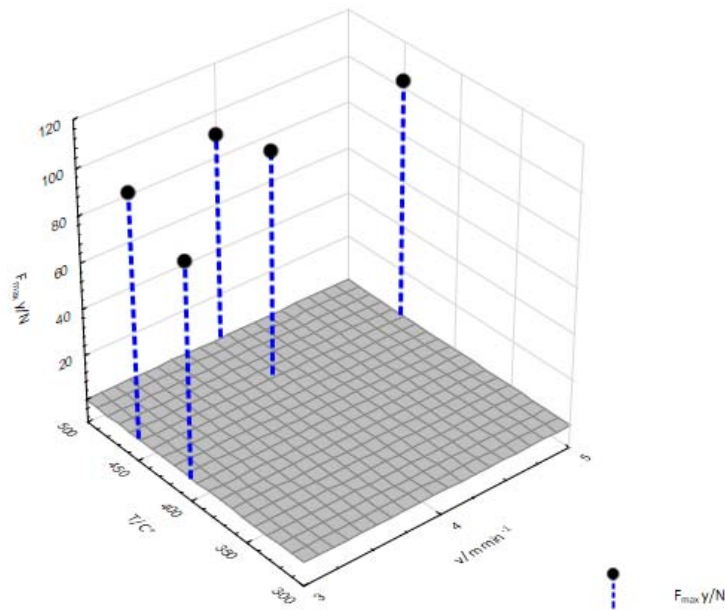
Materijal oznake <b>M11</b>	<b>NN</b>	Smjer spajanja	v/m min <sup>-1</sup>	T/ C°	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
		x	4	300	34,30	19,40	56,60
		x	5	350	46,13	2,36	5,12
Materijal oznake <b>M13</b>	<b>NN</b>	Smjer spajanja	v/m min <sup>-1</sup>	T/ C°	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
		x	3	300	33,67	15,44	45,85
	y	60,30			6,95	11,52	
	x	4	300	6,60	4,06	61,51	
	y			5,53	6,64	120,05	
Materijal oznake <b>M14</b>	<b>LL</b>	Smjer spajanja	v/m min <sup>-1</sup>	T/ C°	Fmax /N	σ [N]	CV [%]
		y	3	300	36,43	1,99	5,45
		y	3	350	40,20	2,25	5,60
		y	4	300	44,63	5,7	12,88
	<b>LN</b>	y	4	350	41,79	1,19	2,85
		y	3	300	5,23	0,96	18,36
		y	4	300	5,10	0,95	18,29
		y	5	300	2,50	0,36	14,42

Mjerni rezultati čvrstoće spojeva postignutih spajanjem toplinskom kondukcijom na uzorcima materijala oznake M10 spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) LN (lice na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) prikazani su u 3D grafičkim prikazima u kojima je prikazan odnos utjecaja parametara spajanja brzine spajanja, v/ m min<sup>-1</sup> i temperature vrućeg klina, T/°C na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , od sl. 4.71 do sl. 4.72.

Zbog malog broja pozitivno ocijenjenih uzoraka spojeva, izmjerene vrijednosti čvrstoća spojeva postignutih na uzorcima materijala oznaka M11, M13 i M14 prikazane su u obliku grafikona od sl. 4.73 do sl. 4.75.



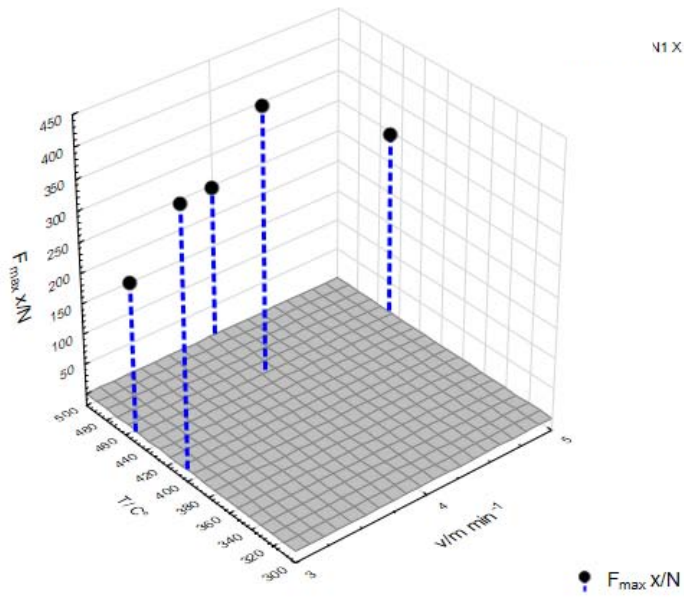
a)



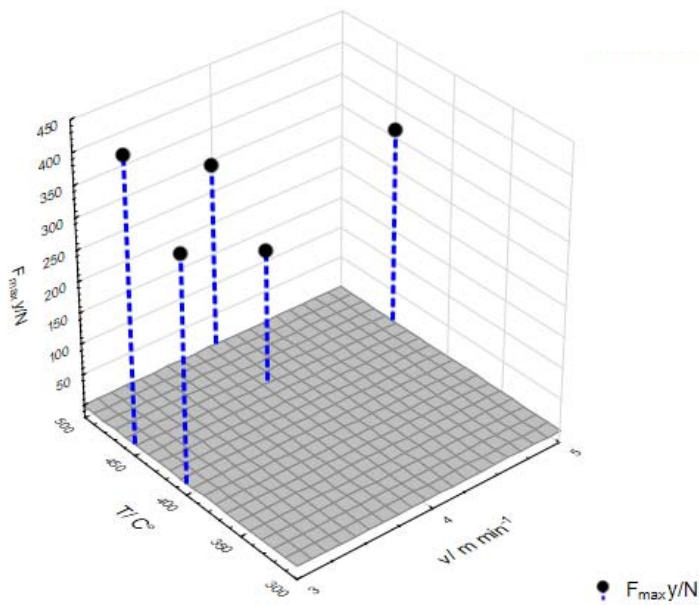
b)

**Sl. 4.71** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzina spajanja,  $v/\text{m min}^{-1}$  i temperatura vrućeg klina,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{\text{max}}/\text{N}$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u a) x smjeru; b) y smjeru



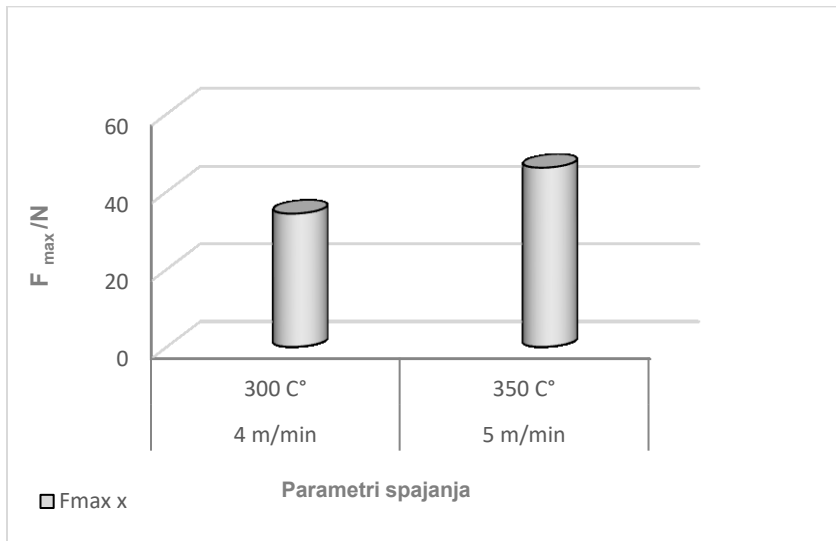


a)

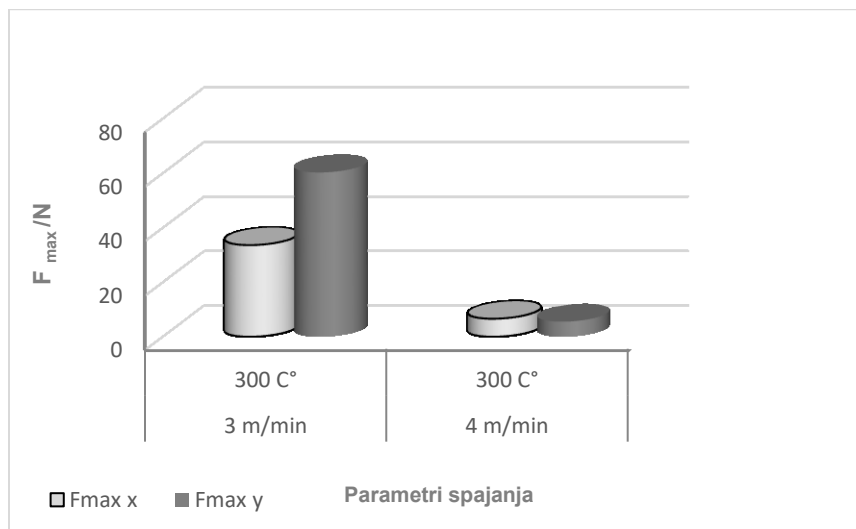


b)

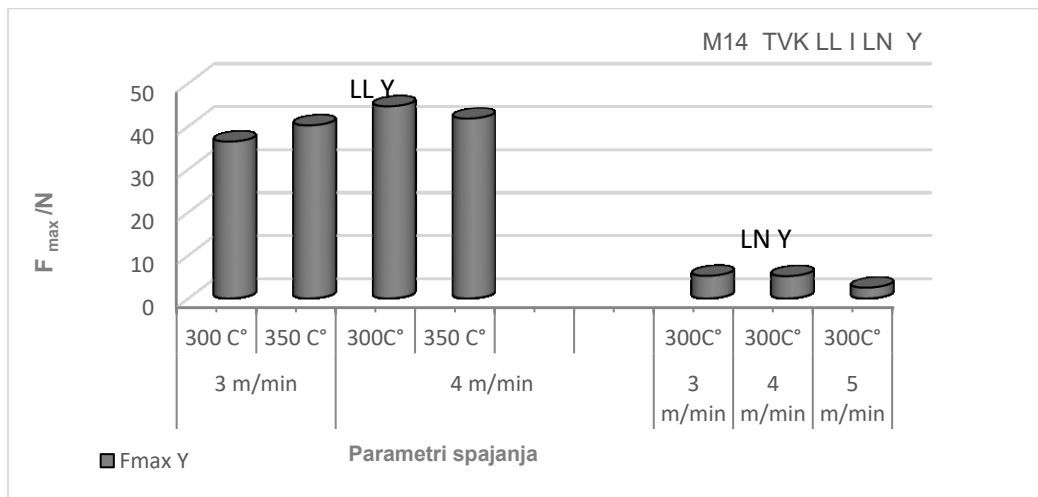
**SI. 4.72** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzina spajanja,  $v/\text{m min}^{-1}$  i temperatura vrućeg klina,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{\text{max}}/\text{N}$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u a) x smjeru; b) y smjeru



SI. 4.73 Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg klina,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{max}/\text{N}$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru



SI. 4.74 Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg klina,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{max}/\text{N}$ , spojenog uzorka materijala oznake M13, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



**SI. 4.75** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom kondukcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg klina,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M14, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) i LN (lice na naličje spajanog materijala) spajanog u y smjeru

#### 4. 5. 3. 1 Rezultati statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom kondukcijom

U tab. 4.11 prikazani su rezultati statističke analize rezultata dobivenih na temelju mjernih rezultata čvrstoće spojeva postignutih spajanjem toplinskom kondukcijom. Primjenom modela višestruke linearne regresije na uzorcima spojeva ispitan je statistički odnos između jedne zavisne varijable i dvije nezavisne varijable. Model višestruke linearne regresije proveden je kod uzoraka koji su ostvarili pozitivnu ocjenu vizualne kvalitete.

Statistički parametri koji su dobiveni regresijskim modelom prikazani su u tab. 4.11, a to su koeficijent regresije ( $r$ ), koeficijent determinacije ( $r^2$ ), vrijednost-  $p$  uz statističku značajnost od 95%, te jednadžba pravca regresije  $\hat{Y}$ .

Tab. 4.11 Prikaz rezultata statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10

Tehnika spajanja toplinskom kondukcijom	Materijal oznake M10						
	Raspored slojeva materijala	Smjer spajanja	r	r <sup>2</sup>	p-vrijednost (t-test) α=0,05		Jednadžba pravca regresije Ŷ= a+ b <sub>1</sub> X <sub>1</sub> +b <sub>2</sub> X <sub>2</sub>
	LL	x	0,8464	0,9572	b <sub>1</sub> v/m min <sup>-1</sup> 0,092	b <sub>2</sub> T/ °C 0,021	Ŷ = -129,72 +13,10X + 0,58X
y		0,8214	0,7085	0,744	0,782		
L1N1	x	0,9783	0,4798	0,772	0,313	* Regresijski modeli nisu statistički značajni	
	y	0,2802	0,3366	0,464	0,973		

Kod uzoraka materijala oznaka M11, M13 i M14 je mali broj uzoraka spojeva koji su ostvarili pozitivnu vizualnu ocjenu kvalitete spoja, te nije bilo moguće provesti statističku analizu prema modelu višestruke linearne regresije.

#### 4. 5. 4 Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom

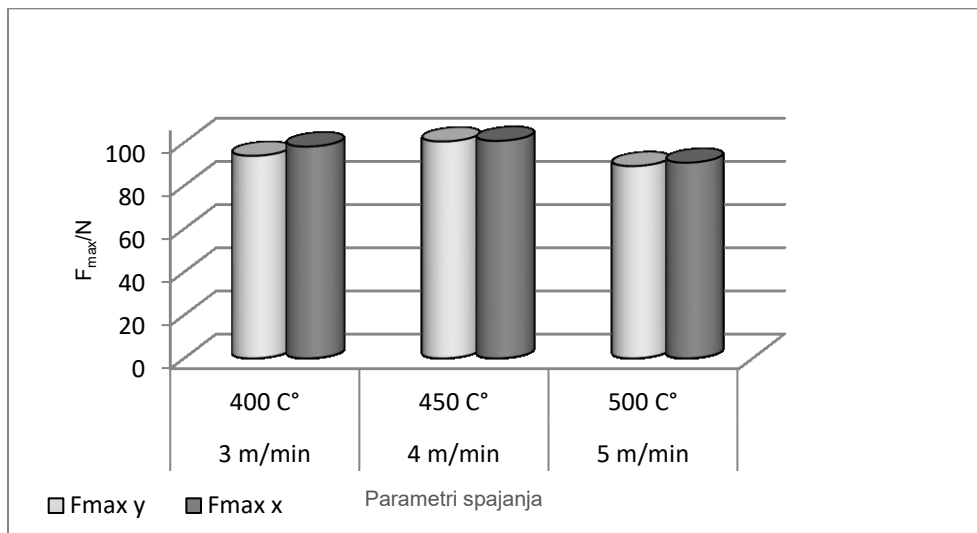
Mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih tehnikom spajanja toplinskom konvekcijom (vrućim zrakom) izvedena su na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14, te su njihove vrijednosti maksimalne sile  $F_{max}/N$  prikazane na tab. 4.12. Prikazane vrijednosti čvrstoće spoja  $F_{max}/N$  su vrijednosti aritmetičke sredine sile izmjerenih za svaki od parametara spajanja vrućim zrakom. Također su izražene i vrijednosti standardne devijacije,  $\sigma$  [N], i koeficijenta varijacije, CV [%] za vrijednosti čvrstoće spojeva.

Vrijednosti čvrstoće spojeva,  $F_{max}/N$ , prikazane su u x i y smjeru. Oznaka x odnosi se na spoj koji je izrađen okomito na smjer nizova pletiva i oznaka y kada je spoj izrađen u smjeru nizova pletiva što se odnosi na uzorke naslojenih pletiva oznaka M11, M13 i M14. Kad je riječ o uzorku materijala oznake M10, folija, oznaka x označava spoj koji je spojen okomito na smjer ekstruzije folije, a oznaka y označava spoj koji je spojen u smjeru ekstruzije folije.

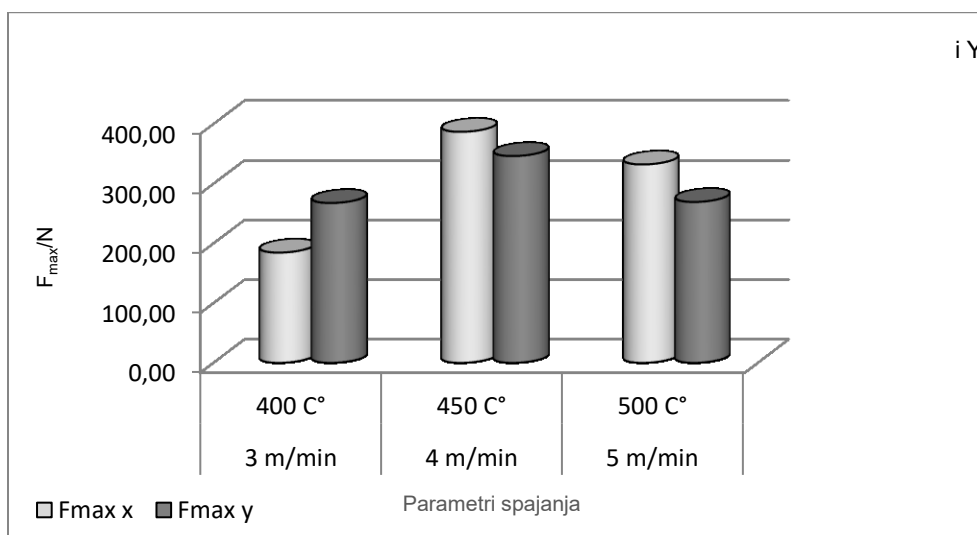
Tab. 4.12 Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih spajanjem toplinskom konvekcijom na uzorcima materijala oznaka M10, M11, M13 i M14

Tehnika spajanja toplinskom konvekcijom							
Materijal oznake	Raspored slojeva materijala	Parametri spajanja			Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Koefficient varijacije
		Smjer spajanja	v/m min <sup>-1</sup>	T/ C°			
Materijal oznake <b>M10</b>	<b>LL</b>	x	3	400	98,17	2,37	2,42
		y			93,87		
		x	4	450	100,80	1,42	1,41
		y			100,53		
		x	5	500	90,70	6,91	7,75
		y			89,13		
	<b>L1N1</b>	x	3	400	184,57	125,36	36,21
		y			346,23		
		x	4	450	386,93	161,20	60,23
		y			267,65		
		x	5	500	332,30	202,45	75,15
		y			269,40		
Materijal oznake <b>M11</b>	<b>NN</b>	x	4	350	58,73	12,23	20,82
		y			51,87		
		x	5	400	58,87	7,57	12,26
		y			61,70		
Materijal oznake <b>M13</b>	<b>NN</b>	x	3	300	54,97	11,96	21,75
		y			54,23		
		x	3	350	61,73	6,70	10,67
		y			62,80		
Materija oznake <b>M14</b>	<b>LL</b>	x	5	450	20,23	6,07	30,00
		y			27,57		

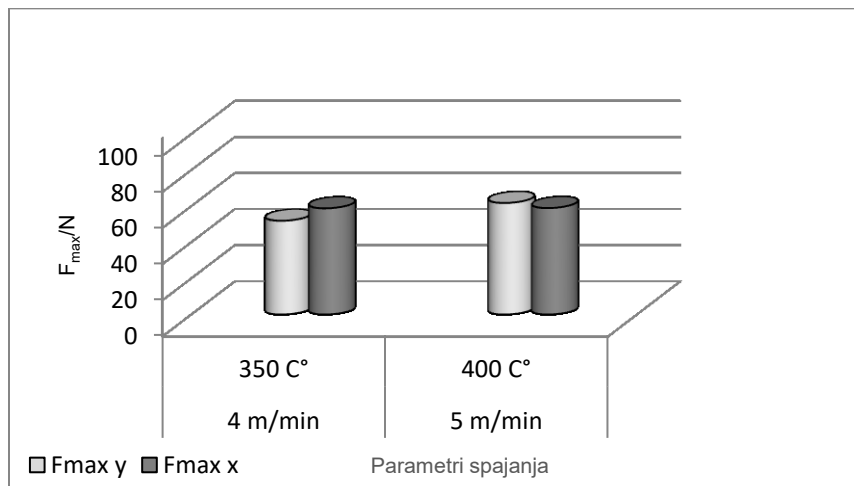
Spajanjem toplinskom konvekcijom vrlo mali broj uzoraka spojeva ocijenjen je pozitivnom ocjenom (dobar spoj), pa su izmjerene vrijednosti čvrstoće spoja prikazane u obliku histograma za sve uzorke materijala, od sl. 4.76 do sl. 4.80.



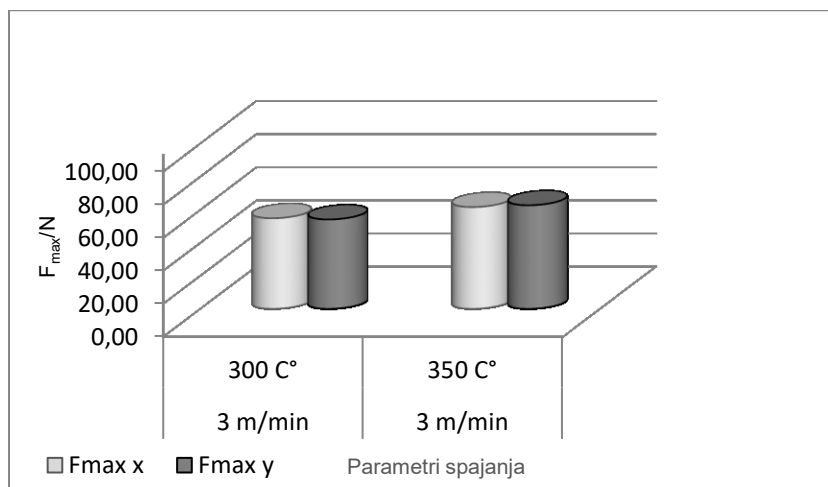
**SI. 4.76** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg zraka,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



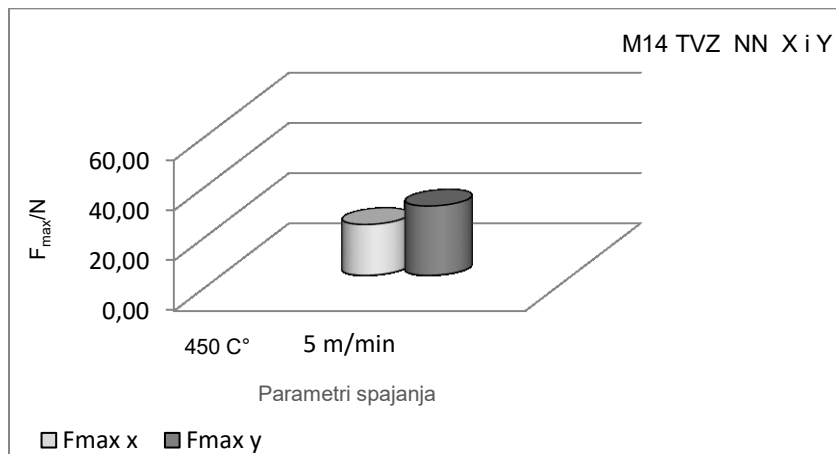
**SI. 4.77** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg zraka,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M10, spajanog na način L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



**SI. 4.78** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg zraka,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



**SI. 4.79** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg zraka,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M13, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



**SI. 4.80** Prikaz odnosa parametara spajanja toplinskom konvekcijom, brzine spajanja,  $v/m \text{ min}^{-1}$  i temperature vrućeg zraka,  $T/^\circ\text{C}$  na čvrstoću spoja  $F_{\text{max}}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M14, spajanog na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru

#### 4. 5. 5 Rezultati ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih kombinacijom tehnike šivanja i tehnike spajanja toplinskom konvekcijom

Mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih kombinacijom tehnike šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom spajajući adhezivnu traku vrućim zrakom, izvedena su na uzorcima materijala oznaka M11, M12, M13 i M14 te su njihove vrijednosti maksimalne sile  $F_{\text{max}}/N$  izmjerene prije prekida u zoni spoja/šava prikazane na tab 4.13.

Vrijednosti čvrstoće spojeva,  $F_{\text{max}}/N$ , prikazane su u x i y smjeru. Oznaka x odnosi se na spoj koji je izrađen okomito na smjer nizova pletiva i oznaka y kada je spoj izrađen u smjeru nizova pletiva što se odnosi na uzorke naslojenih pletiva oznaka M11, M12, M13 i M14.

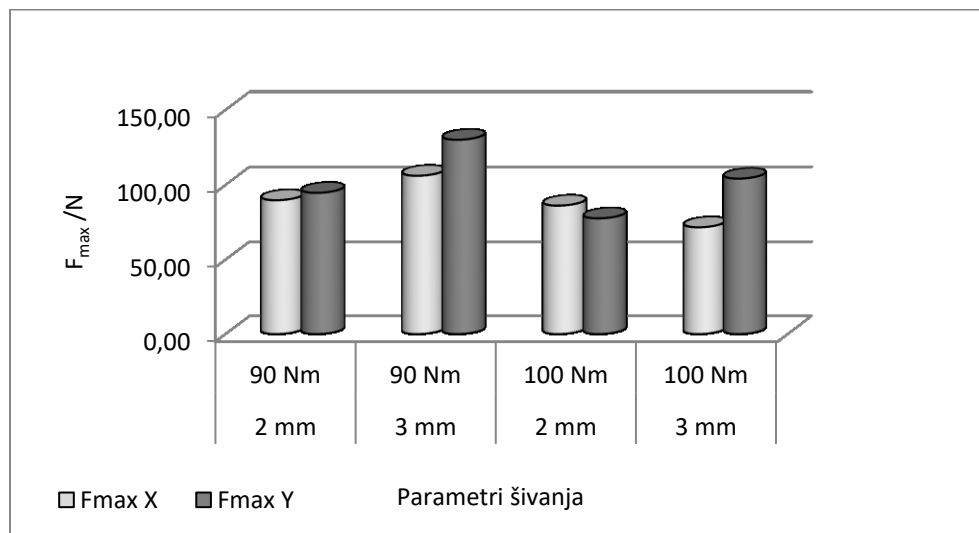


Tab. 4.13 Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom kombinacije metode šivanja i metode spajanja pomoću vrućeg zraka na uzorcima materijala M11, M12, M13 i M14

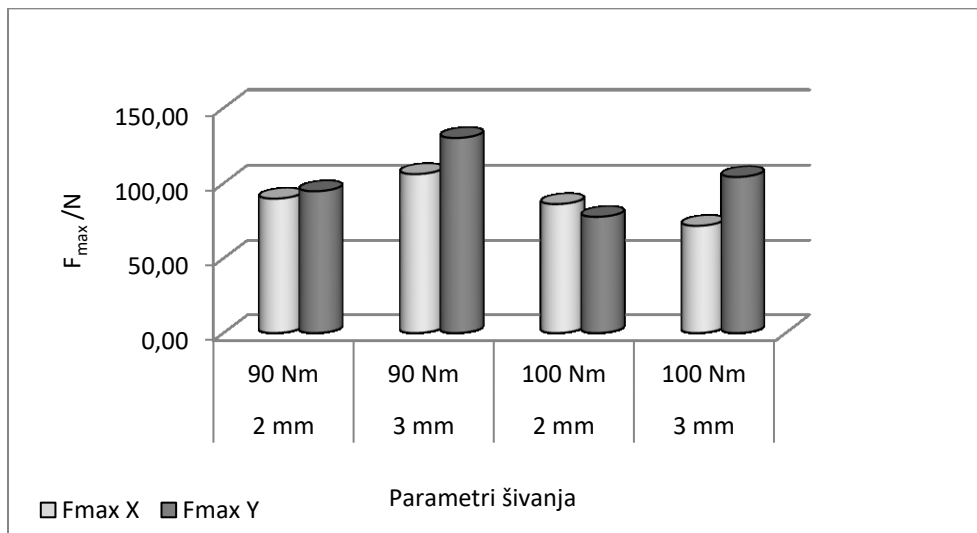
Kombinacija šivanja i toplinskog spajanja konvekcijom					
Kombinirana tehnika šivanja i spajanja adhezivne trake po šavu toplinskom konvekcijom Parametri spajanja vrućim zrakom: v=3 m/min; T= 250 C°					
Materijal oznake <b>M11</b>	Raspored slojeva materijala	Parametri šivanja			Čvrstoća spoja
		Smjer spajanja	d <sub>u</sub> /mm	Nm	Fmax /N
	LL	x	2	90	89,80
		y			94,70
		x	3		106,10
		y			130,10
		x	2	100	86,20
		y			77,70
		x	3		71,70
		y			104,20
Kombinirana tehnika šivanja i spajanja adhezivne trake po šavu toplinskom konvekcijom Parametri spajanja vrućim zrakom: v=3 m/min; T= 220 C°					
Materijal oznake <b>M12</b>	LL	Smjer spajanja	d <sub>u</sub> /mm	Nm	Fmax /N
		x	2	90	47,30
		y			28,50
		x	3		45,60
		y			36,80
		x	2	100	48,30
		y			37,60
		x	3		42,80
y	41,00				
Kombinirana tehnika šivanja i spajanja adhezivne trake po šavu toplinskom konvekcijom Parametri spajanja vrućim zrakom: v=3 m/min; T= 220 C°					
Materijal oznake <b>M13</b>	LL	Smjer spajanja	d <sub>u</sub> /mm	Nm	Fmax /N
		x	2	90	278,40
		y			155,20
		x	3		362,20
		y			116,00
		x	2	100	133,00
		y			97,20
		x	3		126,60
y	137,40				

Kombinirana tehnika šivanja i spajanja adhezivne trake po šavu toplinskom konvekcijom Parametri spajanja vrućim zrakom: $v=3$ m/min; $T= 250$ C° *					
Materijal oznake M14	LL	Smjer spajanja	$d_u$ /mm	Nm	Fmax /N
		x	2	90	73,80
		y	3		77,00
		x			48,40
		y	57,00		
		x	2	100	63,33
		y	3		68,40
		x			91,20
		y	88,60		

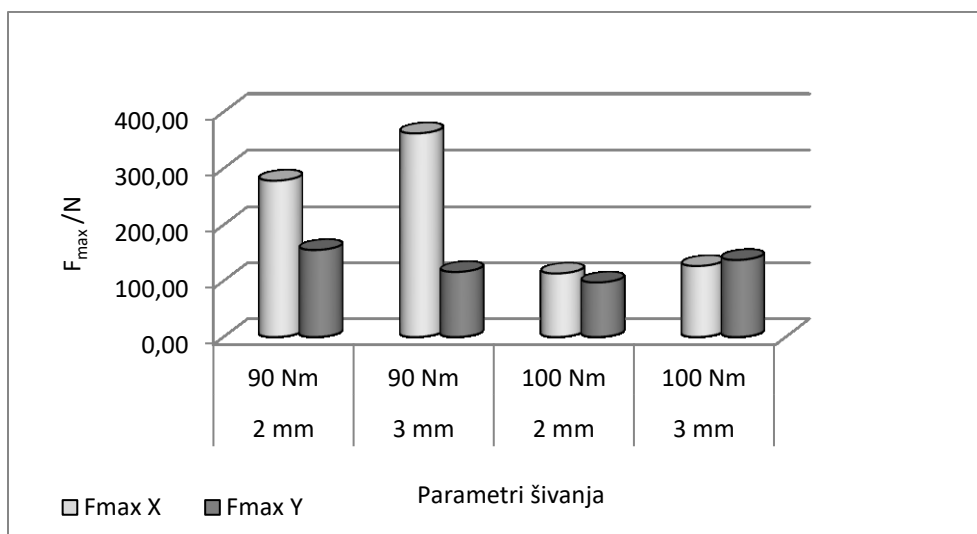
Mjerni rezultati čvrstoće spojeva postignutih kombinacijom tehnika šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom na uzorcima materijala oznaka M11, M12, M13 i M14, spajanih u x i y smjeru i prema rasporedu slojeva materijala LL (lice na lice spajanog materijala) prikazani su u obliku grafova u kojima je prikazan odnos utjecaja parametara šivanja duljina uboda  $d_u$ /mm i finoće igle Nm, na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , od sl. 4.81 do 4.84.



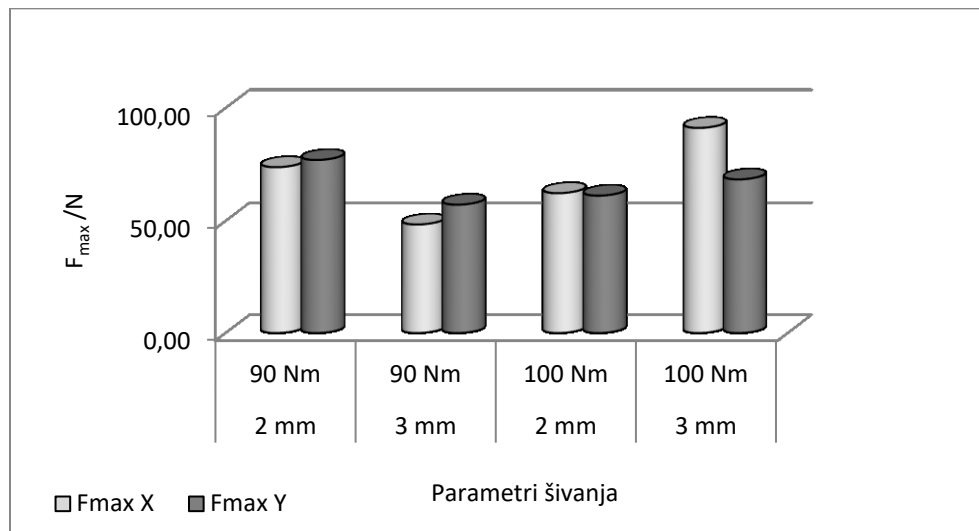
**Sl. 4.81** Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda,  $d_u$ /mm i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M11, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



**SI. 4.82** Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda,  $d_u$ /mm i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M12, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



**SI. 4.83** Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda,  $d_u$ /mm i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M13, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru



**SI. 4.84** Prikaz odnosa parametara šivanja duljine uboda,  $d_u$ /mm i debljine igle, Nm na čvrstoću spoja  $F_{max}/N$ , spojenog uzorka materijala oznake M14, spajanog na način LL (lice na lice spajanog materijala) u x smjeru i y smjeru

#### 4. 5. 5. 1 Rezultati statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih kombinacijom tehnike šivanja i i tehnike spajanja toplinskom konvekcijom

U tab. 4.14 prikazani su rezultati statističke analize rezultata dobivenih na temelju mjernih rezultata čvrstoće spojeva postignutih kombinacijom tehnika šivanja i spajanja toplinskom kondukcijom adhezivne trake po šavu. Primjenom modela višestruke linearne regresija na uzorcima spojeva ispitan je statistički odnos između jedne zavisne varijable i dvije nezavisne varijable. Model višestruke linearne regresije proveden je kod uzoraka koji su ostvarili pozitivnu ocjenu vizualne kvalitete.

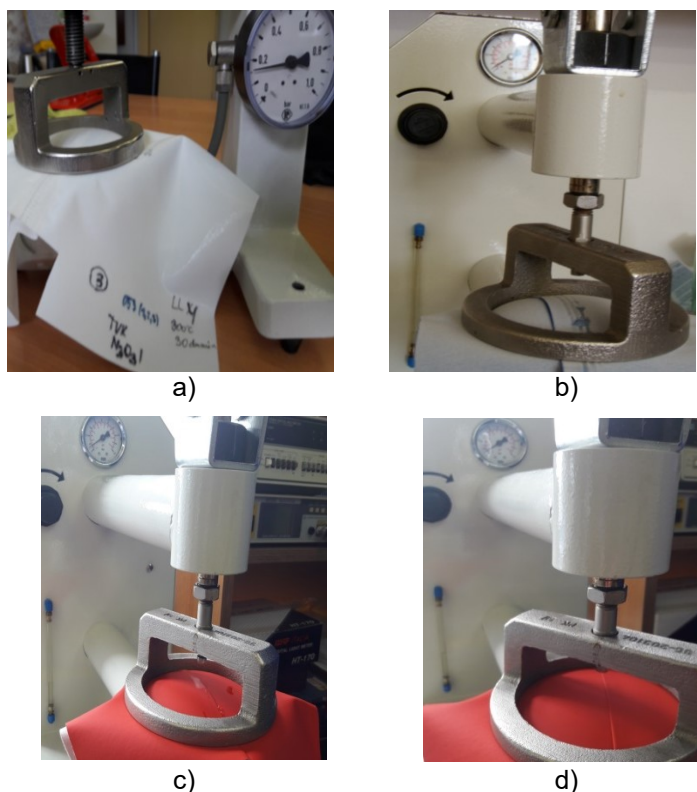
Statistički parametri koji su dobiveni regresijskim modelom prikazani su u tab. 4.14, a to su koeficijent regresije ( $r$ ), koeficijent determinacije ( $r^2$ ), vrijednost- p uz statističku značajnost od 95%, te jednadžba pravca regresije  $\hat{Y}$ .

**Tab. 4.14** Prikaz rezultata statističke analize rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom kombinacije metoda šivanja i spajanja vrućim zrakom na uzorcima materijala M11, M12, M13 i M14

Kombinacija tehnika šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom	Materijal oznake <b>M11</b>						
	Raspored slojeva materijala	Smjer spajanja	R	R <sup>2</sup>	p-vrijednost (t-test) α=0,05		Jednadžba pravca regresije Ŷ= a+ b <sub>1</sub> X+b <sub>2</sub> X
					b <sub>1</sub> du/mm	b <sub>2</sub> debljina igle, Nm	
	<b>LL</b>	x	0,7772	0,6041	0,896	0,433	* Regresijski model nije statistički značajni
		y	0,9931	0,9862	<b>0,009</b>	0,130	Ŷ = 0,228,07 + 30,95 X <sub>1</sub>
	Materijal oznake <b>M12</b>						
	<b>LL</b>	x	0,8901	0,7923	0,304	0,718	* Regresijski modeli nisu statistički značajan
		y	0,9638	0,9289	0,252	0,224	
	Materijal oznake <b>M13</b>						
	<b>LL</b>	x	0,9856	0,9716	0,399	0,110	* Regresijski modeli nisu statistički značajan
y		0,4187	0,1754	0,991	0,725		
Materijal oznake <b>M14</b>							
<b>LL</b>	x	0,5017	0,2517	0,959	0,663	* Regresijski modeli nisu statistički značajan	
	y	0,4449	0,1979	0,722	0,892		

#### 4. 6 Rezultati ispitivanja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva

U tablicama od 4.15 do 4.19 prikaz je rezultata mjerenja zrakonepropusnosti (oznaka **z**) i vodonepropusnosti (oznaka **v**) spojeva. Ocjena **+** ili **-** uz oznaku **z** ili **v** označava dali je spoj zrakonepropusan/vodonepropusan **+** ili zrakopropusan/vodopropusan **-**. Zrakonepropusnost i vodonepropusnost mjereni su kako za koju tehniku spajanja, a tako i za svaki uzorak materijala pri drugačijim vrijednostima tlaka, te je u napomenama u svakoj tablici navedeno pri kojem tlaku su očitani rezultati. Zelenom bojom su označena zrakonepropusni i vodonepropusni spojevi. Na sl. 4. 85 prikaz je ispitivanja spojeva na zrakopropusnost i vodopropusnost za više uzorka materijala.



**Sl. 4.85** Ispitivanja na a) zrakonepropusnost spoja na uzorku materijala oznake M14 (TVZ), ispitivanja vodonepropusnosti spoja na uzorcima materijala oznaka, b) na uzorku materijala oznake M13 (UZV), c) na uzorku materijala oznake M11 (UZV) i d) na uzorku materijala oznake M11 (VF)

Tab. 4.15 Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih tehnikom ultrazvučnog spajanja

Tehnika ultrazvučnog spajanja	Parametri spajanja		Materijal oznake M10		Materijal oznake M11					Materijal oznake M12						
	v/ mmin <sup>-1</sup>	P <sub>s</sub> /W	LL i L1N1		LL		NN		LN i L1N1		LL		LN i L1N1		NN	
			X	Y	X	Y	X	Y			X	Y	X	Y	X	Y
Tehnika ultrazvučnog spajanja	3	200	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		252	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	-	-	-	-	-	-
		280	-	-	-	-	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	-	-	-	Z.- V.-	Z.- V.+	Z.- V.+
		332	-	-	-	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	-	-	-	-	Z.- V.+	Z.- V.+
		372	-	-	-	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	Z.+ V.+	-	-	-	-
	5	200	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		252	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		280	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		332	-	-	-	Z.+ V.+*	Z.- V.-	-	-	-	-	-	-	Z.- V.-	-	-
		372	-	-	-	Z.+ V.+*	Z.- V.-	-	-	-	-	-	-	Z.- V.-	-	-
	7	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		252	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		280	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		332	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		372	-	-	-	Z.- V.-	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	-	-	-	-	-	-
Napomene:			Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni mjereno pri 0,1 bar		Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar *spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i/ili vodonepropusni pri tlaku od 0,05 bara					Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,05 bara						

Z +	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan	Z -	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan
V +		V -	

Tab. 4.16 Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih tehnikom visokofrekventnog (VF) spajanja

Tehnika visokofrekventnog spajanja	Parametri spajanja		Materijal oznake M10		Materijal oznake M11						Materijal oznake M12					
	t/s	I/mA	LL i L1N1		LL		NN		LN i L1N1		LL		NN		LN i L1N1	
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	y	X	Y
3	140		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	180		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	220		Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	-	-	-	-	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	-	-
	260		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-
	300		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-
5	140		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	180		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	220		Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-
	260		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-
	300		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	Z.+ V.+	Z.+ V.+
7	140		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	180		Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-
	220		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-
	260		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-
	300		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+
9	140		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	180		Z.- V.-	Z.- V.-	-	-	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-
	220		Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	-	-
	260		Z.+ V.+	Z.+ V.+	-	-	-	-	Z.- V.-	Z.- V.-	Z.+ V.+	Z.+ V.+	Z.- V.-	Z.- V.-	Z.+ V.+	Z.+ V.+
	300		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Napomene:			Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar		Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,05 bara						Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar		Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,05 bara		Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,05 bara	

Z +	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan	Z -	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan
V +		V -	



Tab. 4.17 Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih tehnikom toplinske kondukcije

Tehnika spajanja toplinskom kondukcijom	Parametri spajanja		Materijal oznake M10		Materijal oznake M11					Materijal oznake M13					Materijal oznake M14							
	v/m min <sup>-1</sup>	T/°C	LL		LL		NN		LN i L1N1		L/L		NN		LN i L1N1		LL		NN		LN i L1N1	
			x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
3	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	z.-	z.-	-	-	-	z.+	-	-	-	z.-	
												v.-	v.-				v.+				v.-	
	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	z.+	-	-	-	-	
																	v.+					
	400	z.+	z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450	z.+	z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	300	-	-	-	-	z.-	-	-	-	-	-	z.-	z.-	-	-	-	z.+	-	-	-	z.-	
						v.-						v.-	v.-				v.+				v.-	
	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	z.+	-	-	-	-	
																	v.+					
	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450	z.+	z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	500	z.+	z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	z.-	
																					v.-	
	350	-	-	-	-	z.-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
						v.-																
	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450	z.+	z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Napomene:			Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar		Svi spojevi su zrakonepropusni i vodonepropusni					Svi spojevi su zrakonepropusni i vodonepropusni					Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar							

z +	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan	z -	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan
v +		v -	

Tab. 4.18 Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih tehnikom toplinske konvekcije

Tehnika spajanja toplinskom konvekcijom	Parametri spajanja		Materijal oznake M10		Materijal oznake M11						Materijal oznake M13						Materijal oznake M14					
	v/ m <sub>1</sub> min <sup>-1</sup>	T/°C	LL		LL		NN		LN i L1N1		LL		NN		LN i L1N1		LL		NN		LN i L1N1	
			x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
3	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Z.-	Z.-	-	-	-	-	-	-	
	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Z.-	Z.-	-	-	-	-	-	-	
	400	Z.+	Z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	350	-	-	-	-	Z.-	Z.-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450	Z.+	Z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	400	-	-	-	-	Z.-	Z.-	-	-	-	-	-	Z.+	Z.+	-	-	-	-	-	-	-	
	450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Z.+	Z.+	-	-	-	
	500	Z.+	Z.+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Napomene:			Svi spojevi su zrakopropusni i vodopropusni						Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,05 bara						Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar							

<b>z +</b>	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan	<b>z -</b>	Spoj zrakopropustan/vodopropustan
<b>v +</b>		<b>v -</b>	

Tab. 4.19 Prikaz rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva spojenih kombinacijom šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom

Kombinacijom šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom	Parametri kod šivanja		Materijal oznake <b>M11</b>				Materijal oznake <b>M12</b>				Materijal oznake <b>M13</b>				Materijal oznake <b>M14</b>			
	du/mm	Nm	LL		Parametri spajanja: -odgoda kretanja 15 ms - tlak spajanja 6 bara -brzina spajanja 3 m/min -temperatura vrućeg zraka 250 °C	LL		Parametri spajanja: -odgoda kretanja 15 ms - tlak spajanja 6 bara -brzina spajanja 3 m/min -temperatura vrućeg zraka 220 °C	LL		Parametri spajanja: -odgoda kretanja 15 ms - tlak spajanja 6 bara -brzina spajanja 4 m/min -temperatura vrućeg zraka 400 °C	LL		Parametri spajanja: -odgoda kretanja 15 ms - tlak spajanja 6 bara -brzina spajanja 4 m/min -temperatura vrućeg zraka 400 °C				
			X	Y		X	Y		X	Y		X	Y					
	2	90	Z.- V.-	Z.- V.-		Z.- V.-	Z.- V.-		Z.- V.-	Z.- V.-		Z.- V.-	Z.- V.-					
		100	Z.- V.-	Z.- V.-		Z.+ V.+	Z.+ V.+		Z.- V.-	Z.- V.-		Z.+ V.+	Z.+ V.+					
	3	90	Z.+ V.+	Z.+ V.+		Z.+ V.+	Z.+ V.+		Z.+ V.+	Z.+ V.+		Z.+ V.+	Z.+ V.+					
		100	Z.+ V.+	Z.+ V.+		Z.+ V.+	Z.+ V.+		Z.+ V.+	Z.+ V.+		Z.+ V.+	Z.+ V.+					
Napomene:			Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar				Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar				Spojevi koji imaju oznaku + su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od 0,1 bar							

<b>z +</b>	Spoj zrakonepropustan/vodonepropustan	<b>z -</b>	Spoj zrakopropustan/vodopropustan
<b>v +</b>		<b>v -</b>	

#### 4.7 Rezultati ispitivanja debljine spojeva na spojevima spojenim tehnikom ultrazvučnog spajanja

Na mjernom uređaju za ispitivanje karakteristika ultrazvučnih spojeva ispitivane su debljine spojeva koji su mjerene na različitim mjestima na širini spoja. Ispitivanja debljina spojeva izvedena su na dva uzorka materijala oznaka M11 i M12 koji su spajani pri više različitih vrijednosti snage ultrazvučnog spajanja i pri brzini od  $3 \text{ mmin}^{-1}$ .

U tablici 4.20 i 4.21 prikaz je mjernih vrijednosti debljina spojeva izvedenih na uzorku materijala oznake M11 spojen tehnikom ultrazvučnog spajanja, naličje na naličje (NN) u uzdužnom smjeru, (y).

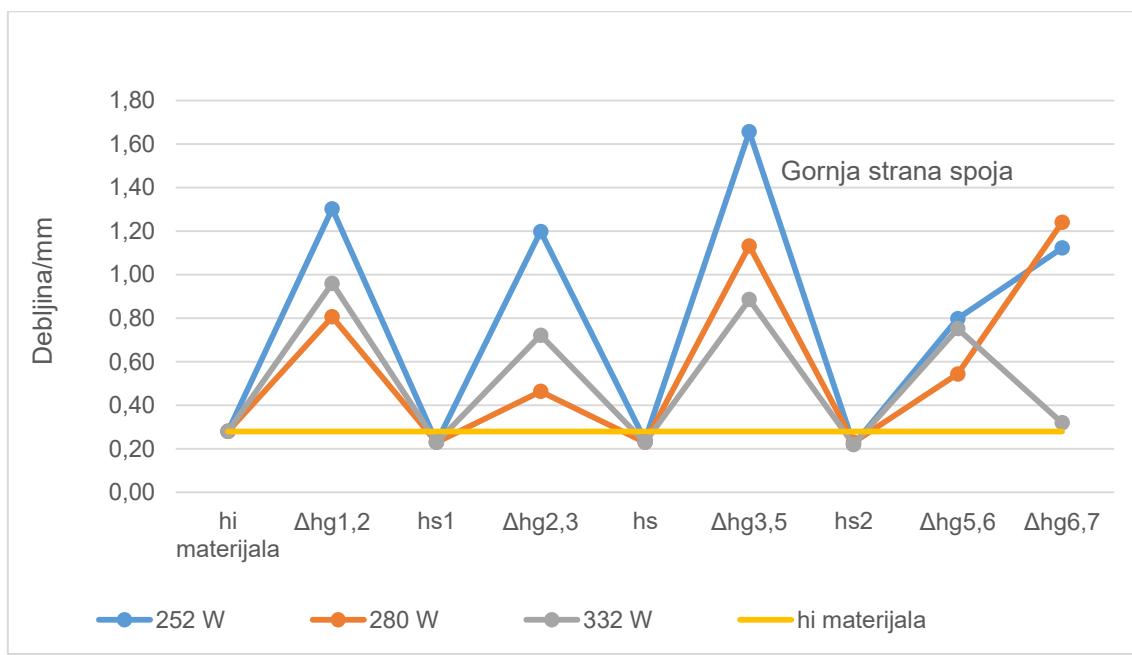
Mjerenja su izvedena s gornje strane spoja prikazana su u tab. 4. 20 i sl. 4.86 i s donje strane spoja tab. 4.21 i sl. 4.87.

Tab. 4.20 Prikaz vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s gornje strane na uzorku materijala oznake M11, spojen na način NN (naličje na naličje spajanog materija) u y smjeru spajanja

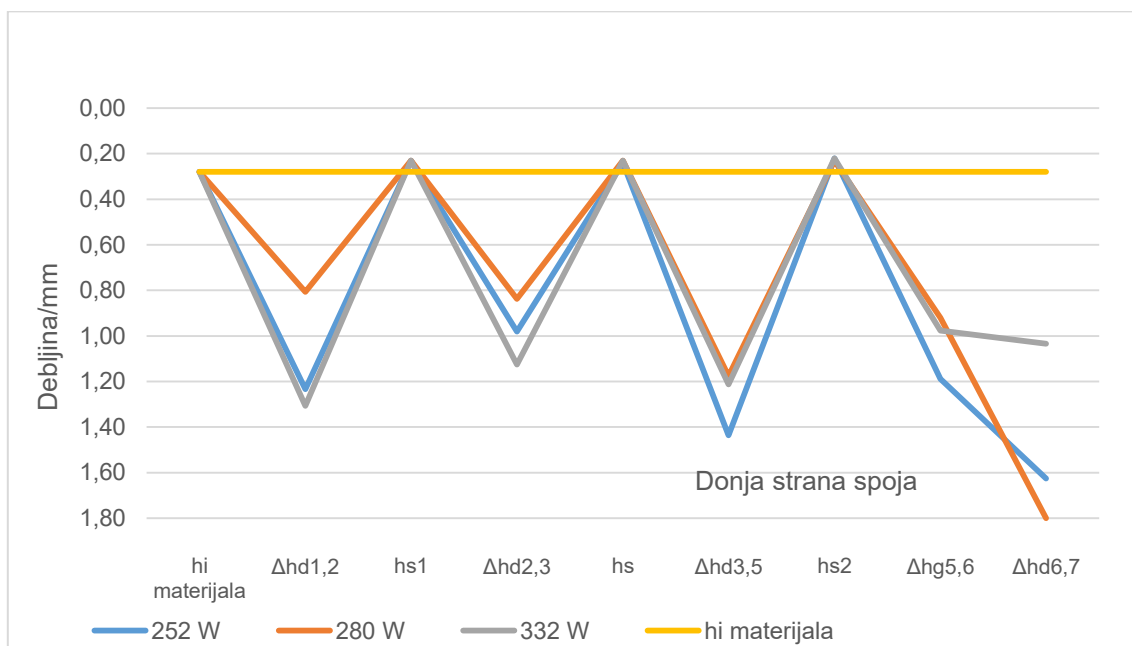
Gornja strana spoja									
Oznaka materijala M11 spojen na način NN (naličje na naličje spajanog materija) u y smjeru spajanja									
Mjesta mjerenja na spoju									
$P_s/W$	$h_i/\text{mm}$	$\Delta h_{g1,2}$	$h_{s1}$	$\Delta h_{g2,3}$	$h_s$	$\Delta h_{g3,5}$	$h_{s2}$	$\Delta h_{g5,6}$	$\Delta h_{g6,7}$
252	0,28	1,30	0,23	1,20	0,24	1,66	0,22	0,80	1,12
280	0,28	0,81	0,23	0,46	0,23	1,13	0,23	0,54	1,24
332	0,28	0,96	0,23	0,72	0,23	0,89	0,22	0,75	0,32

Tab. 4.21 Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjereno s donje strane na uzorku materijala oznake M11, spojen na način NN (naličje na naličje spajanog materija) u y smjeru spajanja

Donja strana spoja									
Oznaka materijala M11 spojen na način NN (naličje na naličje spajanog materija) u y smjeru spajanja									
Mjesta mjerenja na spoju									
$P_s/W$	$h_i/\text{mm}$	$\Delta h_{d1,2}$	$h_{s1}$	$\Delta h_{d2,3}$	$h_s$	$\Delta h_{d3,5}$	$h_{s2}$	$\Delta h_{d5,6}$	$\Delta h_{d6,7}$
252	0,28	1,23	0,23	0,98	0,24	1,44	0,22	1,19	1,63
280	0,28	0,81	0,23	0,84	0,23	1,18	0,23	0,92	1,80
332	0,28	1,31	0,23	1,13	0,23	1,21	0,22	0,98	1,03



**SI. 4.86** Prikaz izmjerenih vrijednosti debljinu izratka, debljina spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjeren s gornje strane na uzorku materijala oznake M11, spajan na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru



**SI. 4.87** Prikaz izmjerenih vrijednosti debljinu izratka, debljina spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjeren s donje strane na uzorku materijala oznake M11, spajan na način NN (naličje na naličje spajanog materijala) u y smjeru

Uzorak materijala oznake M12 spojen tehnikom ultrazvučnog spajanja pri brzini od  $3 \text{ mm}^{-1}$  i snazi ultrazvučnog spajanja od 252 W, 280 W i 332 W. Uzorak materijala je spojen na način lice na naličje (LN) u poprečnom smjeru spajanja(x).

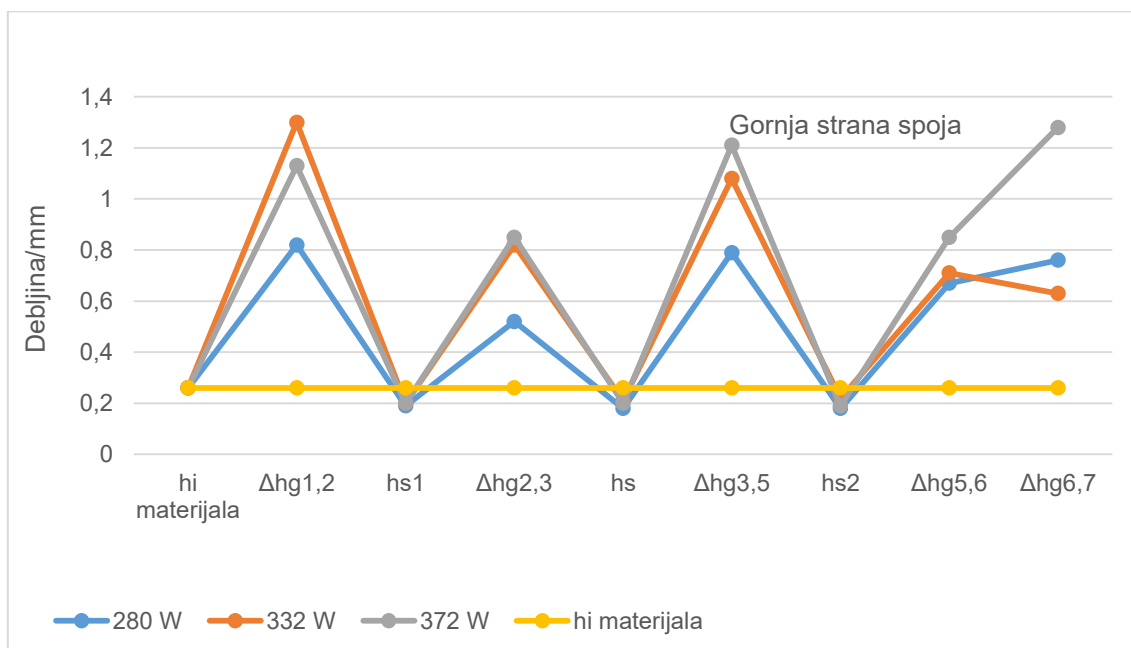
Prikaz rezultata mjerenja i grafički prikaz nalaze se u tab. 4.22 i sl. 4.88 za spoj mjeren s gornje strane i tab.4.23 i sl. 4.89 za spoj mjeren s donje strane.

Tab. 4.22 Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj s gornje strane, na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način LN (lice na naličje) u x smjeru spajanja

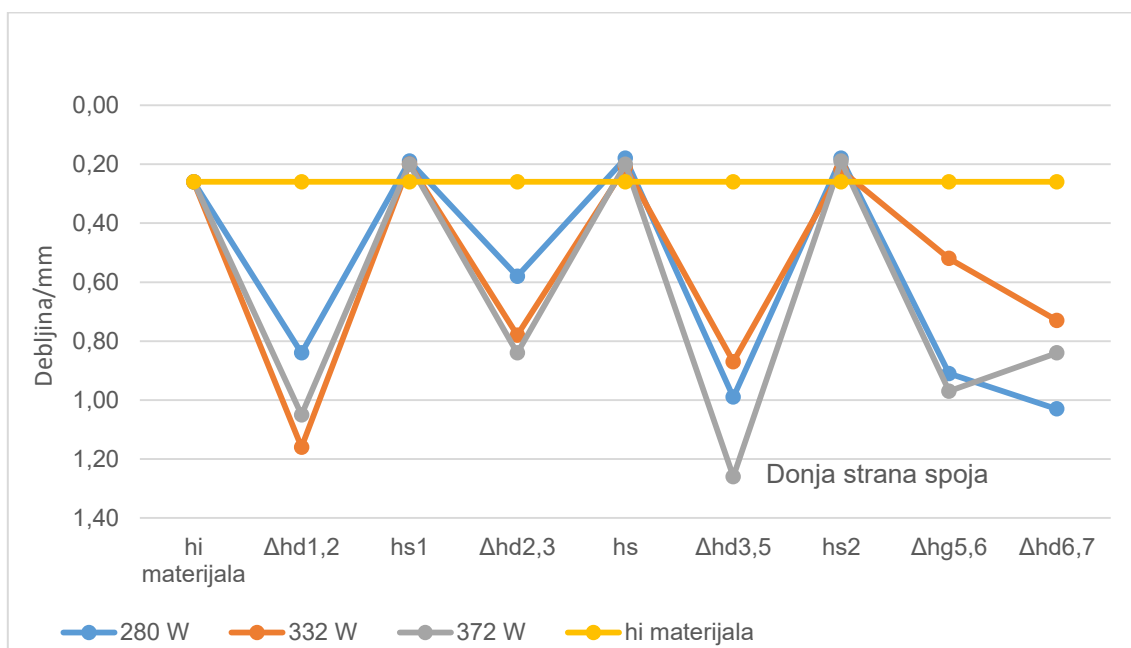
Gornja strana spoja									
Oznaka materijala M12, spajanog na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja									
Mjesta mjerenja na spoju									
$P_s/W$	$h_i/mm$	$\Delta h_{g1,2}$	$h_{s1}$	$\Delta h_{g2,3}$	$h_s$	$\Delta h_{g3,5}$	$h_{s2}$	$\Delta h_{g5,6}$	$\Delta h_{g6,7}$
280	0,26	0,82	0,19	0,52	0,18	0,79	0,18	0,67	0,76
332	0,26	1,30	0,20	0,82	0,21	1,08	0,22	0,71	0,63
372	0,26	1,13	0,20	0,85	0,20	1,21	0,19	0,85	1,28

Tab. 4.23 Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljine spojeva i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj s donje strane, na materijala oznake M12, spajanog na način LN (lice na naličje) u x smjeru spajanja

Donja strana spoja									
Oznaka materijala M12, spajanog na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru spajanja									
Mjesta mjerenja na spoju									
$P_s/W$	$h_i/mm$	$\Delta h_{d1,2}$	$h_{s1}$	$\Delta h_{d2,3}$	$h_s$	$\Delta h_{d3,5}$	$h_{s2}$	$\Delta h_{g5,6}$	$\Delta h_{d6,7}$
280	0,26	0,84	0,19	0,58	0,18	0,99	0,18	0,91	1,03
332	0,26	1,16	0,20	0,78	0,21	0,87	0,22	0,52	0,73
372	0,26	1,05	0,20	0,84	0,20	1,26	0,19	0,97	0,84



**SI. 4.88** Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljina spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjeran s gornje strane na uzorku materijala oznake M12, spajan na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru



**SI. 4.89** Prikaz izmjerenih vrijednosti za debljinu izratka, debljinu spoja i razlike između vrijednosti debljine spoja i istisnutog ruba za spoj mjeran s donje strane na uzorku materijala oznake M12, spajan na način LN (lice na naličje spajanog materijala) u x smjeru

## 4. 8 Rezultati izračuna gustoće energije po volumenu kod visokotehnoloških tehnika spajanja

Na temelju definiranih parametara spajanja kojima su postignuti kvalitetni i pozitivno ocjenjeni spojevi za svaki uzoraka materijala bit će izračunata količina energije koja je utrošena prilikom spajanja.

### 4. 8. 1 Rezultati izračuna gustoće energije kod ultrazvučnog spajanja

Prema izvodu 2.8 dat je primjer izračuna gustoće energije po volumenu za parametre ultrazvučnog spajanja, vrijeme spajanja 2,4 s, snaga ultrazvučnog spajanja 200 W, širina sonotrode 1,05 cm, duljina spoja 20 cm i debljina uzorka materijala oznake M10 iznosi 0,041 cm, za ostale uzorke materijala vrijednosti debljine dva sloja materijala prikazane su u tab. 4.24.

Tab. 4.24 Debljine uzorka materijala (dva sloja) koji se spaja ultrazvučnom tehnikom spajanja

Materijal oznake	Debljina dva sloja materijala, $d_m/cm$
<b>M10</b>	0,041
<b>M11</b>	0,110
<b>M12</b>	0,079

Uvrštavanjem podataka izračunata je potrošnja energije po volumenu kod ultrazvučnog spajanja uzorka materijala oznake M10 koji je spajan pri parametrima spajanja: snazi ultrazvučnog generatora 200 W i vremenu spajanja 2,4 s.

$$E = P \cdot t = 200 \cdot 2,4 = 480 \text{ W s}$$

Izračun gustoće energije po volumenu kod ultrazvučnog spajanja iznosi:

$$E_V = \frac{P \cdot t}{\check{s}_s \cdot l_s \cdot h_{2m}} = \frac{E}{\check{s}_s \cdot l_s \cdot h_{2m}} = \frac{480}{1,05 \cdot 20 \cdot 0,041} = \frac{480}{0,861} = 557,49 \text{ W s cm}^{-3}$$

Prema primjeru izračunata je gustoća energije po volumenu za sve parametre ultrazvučnog spajanja i spajane uzorke materijala (oznaka M10, M11 i M12), te su vrijednosti prikazane u tab 4.25.



Tab. 4.25 Vrijednosti potrebne energije spajanja i gustoće energije po volumenu kod ultrazvučnog spajanja

Parametri spajanja		Energija za spajanje EW s	Gustoća energije po volumenu $E_v/W \text{ s cm}^{-3}$
Vrijeme spajanja t/s	Snaga ultrazvučnog spajanja $P_s/W$		
<b>Materijal oznake M10</b>			
3,6	200	720,00	836,24
	252	907,20	1053,66
	280	1008,00	1170,73
	332	1195,20	1388,15
	372	1339,20	1555,40
2,4	200	480,00	557,49
	252	604,80	702,44
	280	672,00	780,49
	332	796,80	927,76
	372	892,80	1036,93
1,7	200	340,00	394,89
	252	428,40	497,56
	280	476,00	552,85
	332	564,40	655,52
	372	632,40	734,49
<b>Materijal oznake M11</b>			
3,6	252	907,20	392,39
	280	1008,00	435,99
	332	1195,20	516,96
	372	1339,20	579,24
2,4	332	796,80	344,64
	372	892,80	386,16
1,7	372	632,40	273,53
<b>Materijal oznake M12</b>			
3,6	280	1008,00	611,28
	332	1195,20	724,80
	372	1339,20	812,13
2,4	332	796,80	483,20

\*Napomena: vrijednosti gustoće el. energije se odnose na duljinu spoja od 20 cm

## 4. 8. 2 Izračun gustoće energije kod visokofrekventnog spajanja

Izračun gustoće energije po volumenu za svaki parametar visokofrekventnog spajanja i za svaki uzorak materijala proveden je i prikazan u nastavku u tab. 4.27.

Pri snazi od 800 W i jakosti struje od 0,3 A otpor (R) iznosi 8,89 kΩ, a za ostale parametre rezultati izračuna prikazani su u tab. 4.26.

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{800}{0,3^2} = 8,89 \text{ k}\Omega$$

Napon (U) izračunavamo prema izrazu:

$$U = \sqrt{P \cdot R}$$

$$U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{800 \cdot 8888} = 2666 \text{ V}$$

Pri snazi od 800 W i otporu 8,89 kΩ, napon pri visokofrekventnom spajanju je 2668 V, a za ostale parametre rezultati izračuna prikazani su u tab. 4.26.

Tab. 4.26 Izračun otpora (R) i napona (U) kod visokofrekventnog spajanja

I/A	R/ Ω	U/V
0,18	24 691	4 444
0,22	16 528	3 636
0,26	11 816	3 074
0,30	8 888	2 666

Prema primjeru izračunata je gustoća energije potrebna za spoj spajan pri parametrima visokofrekventnog spajanja jakosti anodne struje od 0,22 A i vremenu spajanja od 7 s.

$$W = U \cdot I \cdot t = 2666 \cdot 0,22 \cdot 7 = 4 105,6 \text{ Ws}$$

Gustoća energije po volumenu se računa prema izrazu:

$$E_V = \frac{U \cdot I \cdot t}{S \cdot h_{2m}} = \frac{W}{S \cdot h_{2m}} = \frac{4106,5}{11,28 \cdot 0,041} = \frac{4106,5}{0,462} = 8888,5 \text{ Ws/cm}^3$$

Debljine za dva sloja materijala prikazane u tablici 4.24.

Prema izrazima izračunate su vrijednosti električnog rada  $W$  i gustoće energije po volumenu za sve parametre visokofrekventnog spajanja i sve uzorke materijala koji se spajaju ovom tehnikom spajanja, te su vrijednosti prikazane u tablici 4.27.

Tab. 4.27 Vrijednosti električnog rada i gustoće energije po volumenu kod visokofrekventnog spajanja

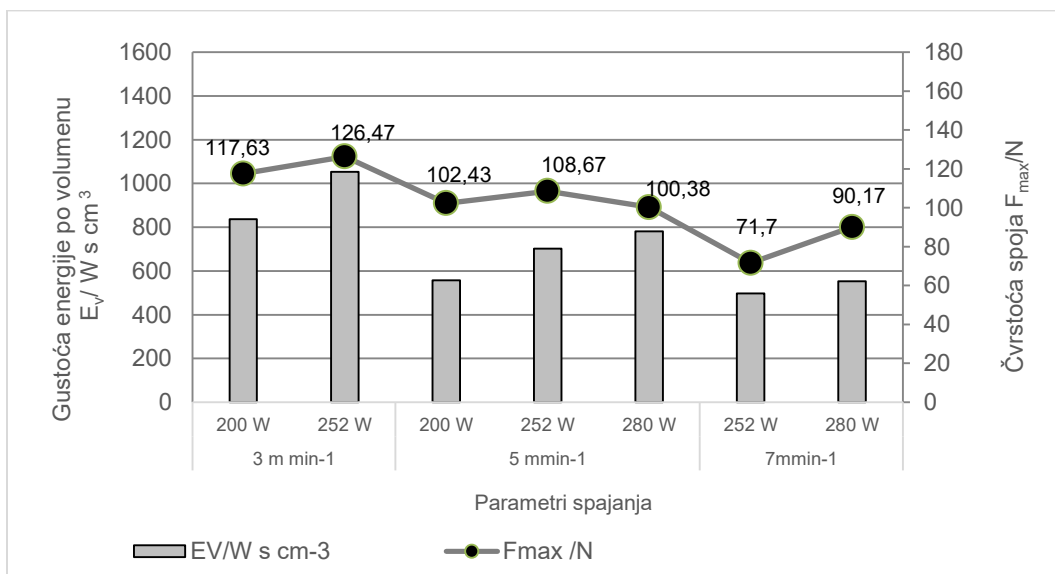
Parametri spajanja		Volumen $V/\text{cm}^3$	Električni rad $W/W$ s	Gustoća energije po volumenu $E_V/W$ s $\text{cm}^{-3}$	
Vrijeme spajanja t/s	Jakost anodne struje I/A				
<b>Materijal oznake M10</b>					
3	0,22	0,462	2399,8	5194,4	
	0,26		2397,7	5188,3	
	0,30		2399,4	5193,5	
5	0,22		3999,6	8657,1	
	0,26		3996,2	8656,2	
	0,30		3999,0	8655,8	
7	0,18		5599,4	12119,9	
	0,22		5599,4	12119,9	
	0,26		5594,7	12109,7	
	0,30		5598,6	12118,2	
9	0,18		7199,3	15582,9	
	0,22		7199,3	15582,9	
	0,26		7193,2	15569,7	
<b>Materijal oznake M11</b>					
3	0,26		1,242	2397,7	1930,5
	0,30	2399,4		1931,9	
5	0,26	3996,2		3217,6	
	0,30	3999,0		3219,8	
7	0,22	5599,4		4508,4	
	0,26	5594,7		4504,6	
	0,30	5598,6		4507,7	
9	0,22	7199,3		5796,3	

Parametri spajanja		Volumen $V/cm^3$	Električni rad $W/W s$	Gustoća energije po volumenu $E_v/W s cm^{-3}$
Vrijeme spajanja t/s	Jakost anodne struje I/A			
<b>Materijal oznake M12</b>				
3	0,22	0,928	2399,8	2586,0
	0,26		2397,7	2583,7
	0,30		2399,4	2585,6
5	0,22		3999,6	4309,9
	0,26		3996,2	4306,3
	0,30		3999,0	4309,3
7	0,18		5599,4	6033,8
	0,22		5599,4	6033,8
	0,26		5594,7	6028,8
	0,30		5598,6	6033,0
9	0,18		1799,3	7757,9
	0,22		7199,3	7757,9
	0,26	7193,2	7751,3	

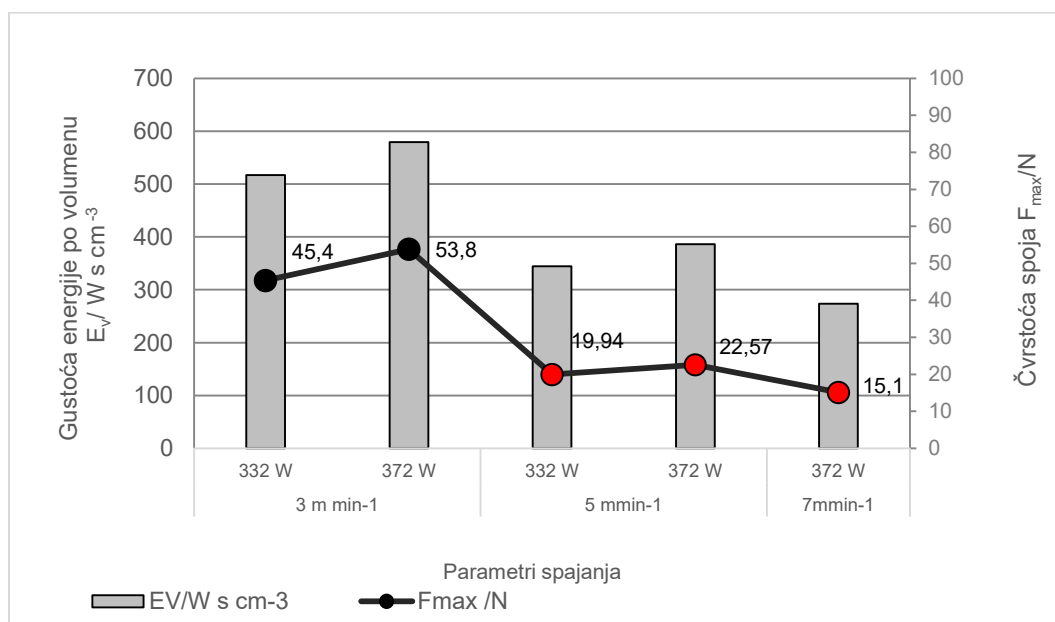
\*Napomena: vrijednosti gustoće energije se odnose na duljinu spoja od 20 cm

#### 4. 8. 3 Analiza utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spojeva kod tehnike ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja

Na temelju izračuna podataka za gustoću energije po volumenu kod ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja na uzorcima materijala oznaka M10 i M11 spajanih na način LL (lice na lice spajanog materijala), načinjena je analiza utjecaja na čvrstoću ispitanih uzoraka. Rezultati analize prikazani su na sl. 4.90. za spojeve spojene ultrazvučnom tehnikom, a na sl. 4.91 dat je prikaz utjecaja gustoće energije po kubnom centimetru na čvrstoću spojeve spajanih visokofrekventnom tehnikom spajanja. Oznake čvrstoće spojeva označene crvenom bojom na grafičkom prikazu, niže su izmjerene vrijednosti čvrstoće spojeva.

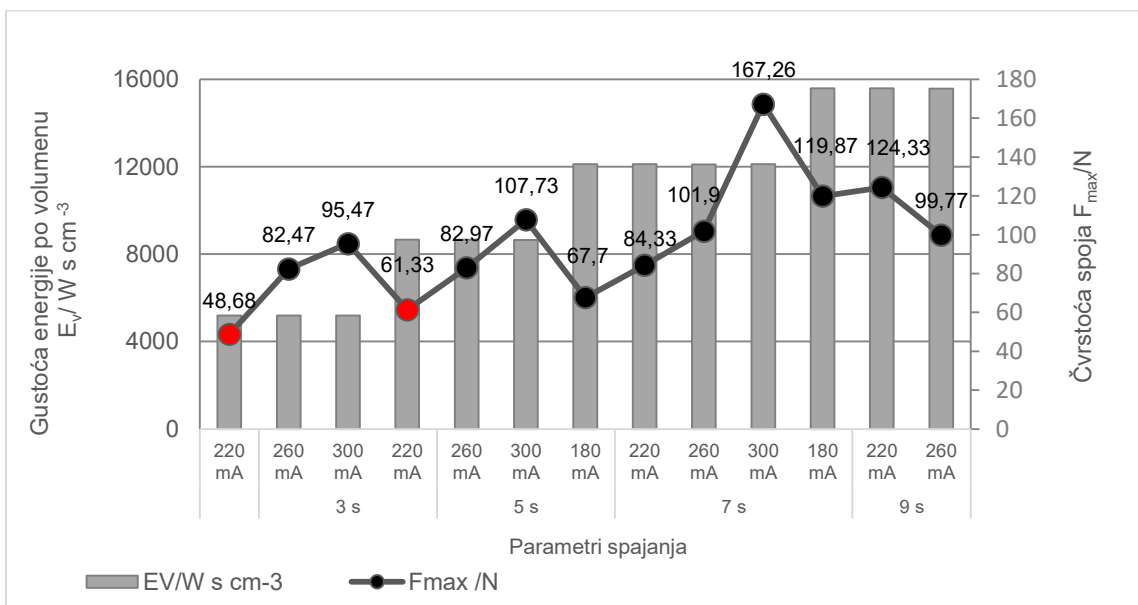


a)

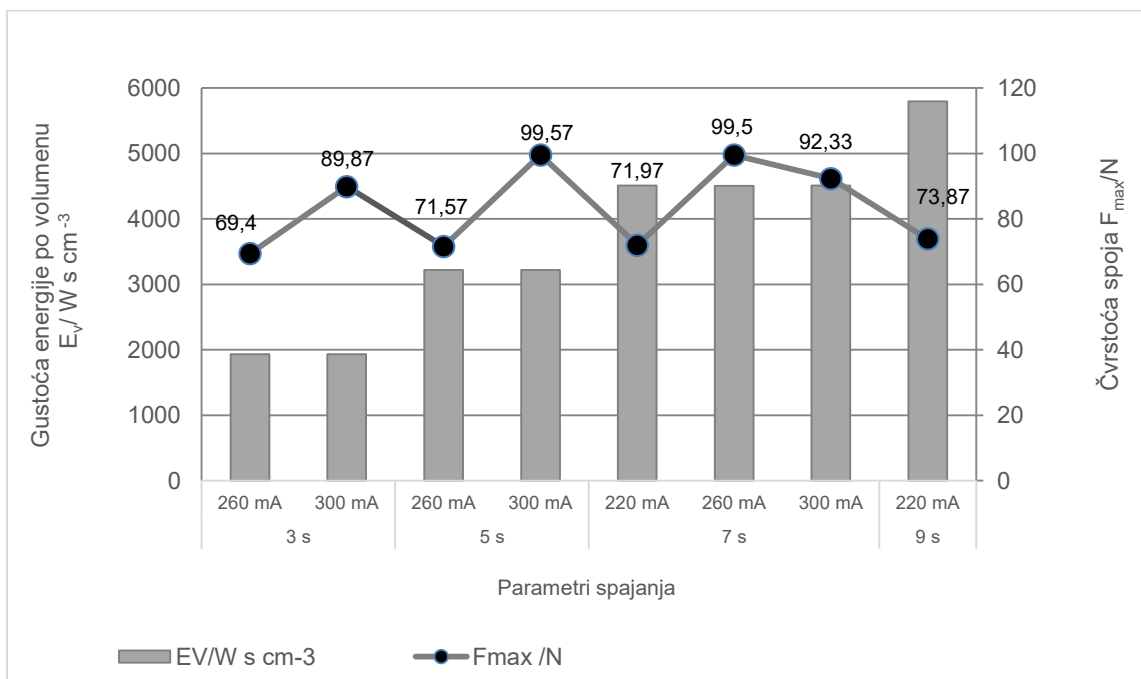


b)

SI. 4.90 Prikaz utjecaja gustoće energije po volumenu  $E_v/W \text{ s cm}^{-3}$  na čvrstoću spoj  $F_{max}/N$  kod ultrazvučnog spajanja a) uzorka materijala oznake M10 i b) uzorku materijala oznake M11



a)



b)

SI. 4.91 Prikaz utjecaja gustoće energije po volumenu  $E_v/W \text{ s cm}^{-3}$  na čvrstoću spoj  $F_{max}/N$  kod visokofrekventnog spajanja a) uzorka materijala oznake M10 i b) uzorku materijala oznake M11

## 5 RASPRAVA

U doktorskom radu izvedena su, prema postavljenom planu eksperimenta, sl. 3.1, istraživanja utjecaja parametara spajanja na svojstva spojeva. Spajalo se pet uzoraka materijala oznaka M10, M11, M12, M13 i M14 pomoću pet tehnika spajanja. Uzorci spojeva u prvoj fazi ocjenjivani su na temelju kriterija dali je postignut spoj ili nije, te dali je na postignutom spoju došlo do oštećenja materijala u zoni spoja. U drugoj fazi ocjenjivani su samo pozitivno ocjenjeni spojevi iz prve faze, na temelju vizualne procjene kvalitete, a kriteriji koji su se uzimali u obzir su naboranje materijala u spoju i/ili uz spoj i oštećenje u zoni spoja. Na temelju ocjene vizualne kvalitete spojeva, dodijeljene su ocjene od 1 do 5. Na spojevima kojima su dodijeljene ocjene 3, 4 i 5, provedena su ispitivanjima svojstava spojeva. Ispitivana su vlačna, smična, savojna i kompresijska svojstva, zatim čvrstoća spoja, zrakonepropusnost spoja, vodonepropusnosti spoja i debljina spoja. Također je na temelju ulaznih procesnih parametara spajanja izračunata gustoća energije po volumenu, za spojeve spajane upotrebom tehnika ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja, te je načinjena analiza utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spojeva.

U ovom poglavlju dokorskog rada bit će na temelju rezultata i dosadašnjih spoznaja iz područja spajanja tekstilnih materijala, proučavanja parametara spajanja i svojstava spojeva, analizirani rezultati mjerenja, za svako svojstvo zasebno.

Oznake način spajanja slojeva materijala:

LL (lice na lice spajanog materijala), LN (lice na naličje spajanog materijala), NN (naličje na naličje spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala s drugačijim rasporedom slojeva materijala).

### 5.1 Vlačna svojstava spojeva

Iz rezultata mjerenja vlačnih svojstava prikazanih u poglavlju 4.1 za ultrazvučnu i visokofrekventnu tehniku spajanja, za uzorke spojeve nastale preostalim tehnikama spajanja nisu provedena ispitivanja vlačnih svojstava.

### 5. 1. 1 Vlačna svojstava spojeva nastalih primjenom ultrazvučnog spajanja

Na temelju proučavanja parametara vlačnih svojstava spojeva i područja oko spoja na uzorku materijala oznake M10 koji je spajan na način LL (lice na lice spajanog materijala) i L1N1 (lice na naličje spajanog materijala) u poprečnom (x) smjeru i uzdužnom (y) smjeru spajanja, utvrđeno je da nema većih odstupanja između vrijednosti promatranih parametara (WT i RT) u x i y smjer spajanja. sl. 4.1a) i sl. 4.1b). Koeficijenti korelacije za uzorke spajane na način LL (lice na lice spajanog materijala), koji objašnjava odnos između deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT u x smjeru iznosi - 0,86, dok u y smjeru iznosi - 0,96. U oba smjera spajanja povezanost između parametara je jaka i negativna, odnosno linearnim povećanjem vrijednosti deformacijskog rada WT dolazi do linearnog opadanja vrijednosti sposobnosti oporavka RT. Spajanjem na način L1N1 (lice na naličje spajanog materijala), koeficijent korelacije koji prikazuje odnos između deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT za spojeve spajane u x smjeru iznosi - 0,67, što ukazuje na srednje jaku i negativnu korelaciju. Za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije iznosi - 0,86, te ukazuje na jaku i negativnu korelaciju.

Najviše vrijednosti deformacijskog rada WT kod spojeva spajanih na način LL u x i y smjeru očitane su kod snage spajanja od 200 W i brzini spajanja od 5 mmin<sup>-1</sup>, a kod istih parametara spajanja očitane su i najniže vrijednosti sposobnosti oporavka RT, sl.4.1.a).

Usporedbom vrijednosti deformacijskog rada na spojevima spajanim na način LL i L1N1, nešto više vrijednosti imaju spojevi spajani na način LL. Više vrijednosti deformacijskog rada povezuju se s boljom fleksibilnošću, mekoćom i glatkoćom. Vrijednosti sposobnosti oporavka su vrlo slične kod načina spajanja LL i L1N1, a vrijednosti istezanja su nešto veće kod načina spajanja L1N1, tab. 4.1.

Proučavanjem vrijednosti parametara vlačnih svojstava na uzorku materijala oznake M11 koji je spajan na način LL (pozitivno su ocjenjeni uzorci spojeva spajani u y smjeru) i NN (naličje na naličje spojenog materijala). Spojevi spajani na način LN (lice na naličje spojenog materijala) i L1N1 zbog velikog istezanja uzoraka, vrijednosti parametara vlačnih svojstava nisu zabilježene na mjernom uređaju KES-FB1. Vrijednosti deformacijskog rada i sposobnosti oporavka vrlo su slične kod svih uzoraka spojeva. Za deformacijski rad WT vrijednosti se kreću 43,71 cN cm pa do 54,49 cN cm, a vrijednosti sposobnosti oporavka RT kreću se od 66,16 % do 70,59 %. Koeficijenti korelacije koji označava povezanost između promatranih vlačnih parametara deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT za uzorke spojeva spajane na način LL, NN nisu statistički značajni. Iz vrijednosti koeficijenta



korelacije vidljivo je da je korelacija slaba i da povezanost između promatranih vlačnih parametara je relativno slaba i nije značajna.

Iz odnosa uspoređivanih vrijednosti vlačnih parametara deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT promatranih na uzorku materijala oznake M12 na uzorcima spojeva spajanih na način NN (spojevi spajani u x i y smjeru), LN i L1N1 spojevi spajani u x smjeru spajanja, vidljivo je da su vrijednosti deformacijskog rada WT za spojeve spajane u x smjeru veće od vrijednosti deformacijskog rada za spojeve spajane u y smjeru. Vrijednosti sposobnosti oporavka RT veće su kod spojeva spajanih u y smjeru. Iz rezultata ispitivanja spojeva spajanih na način LN i L1N1 u x smjeru vidljivo je da je deformacijski rad WT niži pri spojevima LN, od spojeva spajanih na način L1N1. Vrijednosti sposobnosti oporavka RT značajno su niže kod načina spajanja L1N1 nego kod spojeva spajanih na način LN. Više vrijednosti sposobnosti oporavka RT pripisuju se elastičnosti materijala i spoja, gdje je sposobnost oporavka RT nakon rasterećenja oko 70 %.

#### 5.1. 2 Vlačna svojstva spojeva nastalih primjenom visokofrekventnog spajanja

Analizom rezultata vrijednosti vlačnih parametara na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, promatran je odnos između deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT na uzorcima spojeva spojenih u x i y smjeru spajanja. Ispitivanjem vlačnih parametara spojeva na uzorku materijala oznake M10 dobivene su slične vrijednosti za spojeve spajane u smjeru x i y smjeru spajanja. Usporedbom vrijednosti deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT spojeva spajanih na način LL i L1N1 vidljive su razlike vrijednosti deformacijskog rada WT. Vrijednosti sposobnosti oporavka RT su slične na oba načina spajanja i kreću se od 83 % do 90 %, vrlo visoke vrijednosti oporavka mogu se pripisati sposobnosti materijala da dobro apsorbira energiju u slučaju elastične deformacije i tu energiju oslobađaju prilikom rasterećenja. Visoke vrijednosti sposobnosti oporavka RT povezuju se sa smanjenom mekoćom materijala. Više vrijednosti deformacijskog rada WT imaju spojevi spajani na način L1N1 i kreću se oko 23 cN cm, dok kod spojeva postignutih spajanjem na način LL te vrijednosti se kreću oko 10,60 cN cm, sl. 4.4 a) i b). Veće vrijednosti deformacijskog rada povezane su s većom fleksibilnosti spojeva. Istezanje materijala tab. 4.1. je značajnije kod uzoraka spojeva spojenih na način L1N1 i kreće se oko 9,2 % dok su vrijednosti istezanja za spojeve spajane na način LL, oko 4,3 %.

Statističkom obradom rezultata dobiveni su korelacijski koeficijenti koji prikazuju odnos između dva vlačna parametra, deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT. Korelacijski parametri za spojeve spajane na način LL u x smjeru je - 0,85 što označava jaku i negativnu korelaciju i u y smjeru spajanja koeficijent korelacije iznosi - 0,64 što označava srednje jaku i negativnu korelaciju. Spojevi spajani na način L1N1 u x smjeru imaju koeficijent korelacije - 0,80 što označava jaku i negativnu korelaciju između promatranih parametara i u smjeru y - 0,51 što ukazuje na srednje jaku i negativnu korelaciju. Svi korelacijski koeficijenti su negativni iz čega se zaključuje da porastom vrijednosti jednog od promatranih parametara dolazi do pada vrijednosti drugog vlačnog parametra.

Uzorak materijala oznake M11 spajan je na način LL i NN u x i y smjeru spajanja. Analizom izmjerenih vrijednosti vlačnih parametara spojeva i okolnog područja, uspoređivana su vrijednosti deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT, te je vidljivo da pri načinu spajanja LL, sl. 4.5 a) razlike vrijednosti deformacijskog rada WT ali i sposobnosti oporavka RT za spojeve spajane u x i y smjeru spajanja pri kraćem djelovanju anodne struje od 3 s i 5 s su malo veće za spojeve spajane u y smjeru, dok kod spajanja pri vremenu od 7 s i anodnoj struji od 300 mA i 9 s i anodnoj struji 220 mA vrijednosti deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT za x i y smjer spajanja gotovo su identične.

Izračunom koeficijenta korelacije, usporedbom deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT, u x smjeru on iznosi - 0,85 što ukazuje na jaku i negativnu korelaciju. Koeficijent korelacije za y smjer spajanja iznosi - 0,64 što ukazuje na srednje jaku i negativnu korelaciju. Što se može interpretirati da povećanjem vrijednosti deformacijskog rada WT dolazi do smanjenja vrijednosti sposobnosti oporavka RT, što je izraženije kod spojeva spajanih u x smjeru.

Usporedbom vrijednosti deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT za spojeve spajane na način LL i NN. Veće vrijednosti deformacijskog rada WT očitane su kod spojeva spajanih na način NN oko 55 cN cm, a vrijednosti sposobnosti oporavka RT veće su kod spojeva spajanih na način LL, što ukazuje da su spojevi s višim vrijednostima sposobnosti oporavka RT elastičniji.

Vrijednosti deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT spojeva na uzorku materijala oznake M12 spajanih na način LL, NN, LN i L1N1, prikazani su na sl. 4.6 od a) do d). Usporedbom vrijednosti deformacijskog rada WT čije vrijednosti se kod spojeva spajanih na način LL, NN i LN kreću oko 20 cN cm u x smjeru spajanja i oko 9 cN cm u y smjeru spajanja. Kod većih vrijednosti jakosti anodne struje od 300 mA zabilježene su nešto niže vrijednosti RT. Kod analize vrijednosti sposobnosti oporavka RT spojeva spajanih na način

LL, NN i LN nema većih odstupanja vrijednosti, ali nešto niže vrijednosti zabilježene su kod uzoraka koji spojeva koji su spajani u smjeru x. Nešto drugačiji odnos između vrijednosti zabilježene su kod načina spajanja L1N1, gdje su vrijednosti sposobnosti oporavka RT nešto niže, a vrijednosti deformacijskog rada WT veće.

Izračunom koeficijenta korelacije između uspoređivanih vlačnih parametara deformacijskog rada WT koeficijenti korelacije su vrlo niski i nisu značajniji, osim kod načina spajanja LN za spojeve spajane u y smjeru koeficijent korelacije iznosi - 0,90. Interpretacijom koeficijenta može se zaključiti da postoji jaka i negativna korelacija između deformacijskog rada WT i sposobnosti oporavka RT. Kod načina spajanja L1N1 u smjeru y koeficijent korelacije iznosi 0,87, što upućuje na jaku korelaciju između promatranih vlačnih parametara te linearan porast jedne varijable, u ovom slučaju, deformacijskog rada WT odgovara linearnom porastu druge varijable, sposobnosti oporavka RT.

## 5.2 Smična svojstava spojeva

Iz rezultata mjerenja smičnih svojstava prikazanih u poglavlju 4.2 za ultrazvučnu i visokofrekventnu tehniku spajanja bit će analizirani dobiveni mjerni rezultati. Smični parametri koji su uspoređivani su vrijednosti smične krutosti G i histereze smičnih sila 2HG i 2GH5.

### 5.2.1 Smična svojstava spojeva nastalih primjenom tehnike ultrazvučnog spajanja

Analizom rezultata mjerenja parametara smičnih svojstava spojeva i područja oko spoja na uzorku materijala oznake M10 koji je spajan na način L1N1 u poprečnom (x) smjeru i uzdužnom (y) smjeru spajanja, uspoređivane su vrijednosti smične krutosti G i histereze smičnih sila 2HG i 2GH5, sl. 4.7 a) i b). Vrijednosti smične krutosti G i histereza smičnih sila 2HG i 2HG5 slične su za x i y smjer spajanja. Za uzorak materijala M10 vrijednosti smične krutosti G su vrlo visoke i kreću se od 17,39 cN ( $^{\circ}$ )<sup>-1</sup> pa do 18,92 cN ( $^{\circ}$ )<sup>-1</sup>, tab 4.1. Visoke vrijednosti smične krutosti pripisuju se vrlo kompaktnim i čvrstim materijalima. Vrijednosti histereze smične sile 2HG kreću se 0,12 cN pa do 1,11 cN, a vrijednosti histereze smične sile 2HG5 kreću se od 11,84 cN pa do 17,25 cN sl. 5.1. a). Vrijednosti 2HG5 značajno su

više od karakterističnih vrijednosti koje se kreću od 1 cN do 3 cN. Visoke vrijednosti 2HG5 upućuju na krute materijale što se odražava na tehnološke procese i izgled gotovog odjevnog predmeta. Materijal oznake M10 je PU folija koja se koristi za unutarnje dijelove inteligentnog odjevnog predmeta, za izradu zračnih komora, pa neće utjecati na izgled vanjskog dijela odjevnog predmeta, vrijednosti uzorka materijala oznake M10 bez spoja date su na sl. 5.1. b). Izračunom koeficijenta korelacije između vrijednosti histereza smičnih sila 2HG i 2HG5 u x smjeru spajanja  $r_x$  iznosi - 0,10 što označava odsutnost korelacije, a u y smjeru spajanja,  $r_y$  iznosi 0,68 što označava srednje jaku povezanost promatranih smičnih parametara.



Sl. 5.1 Mjerenje smičnih svojstava a) izgled uzorka oznake M10 za vrijeme mjerenja smičnih svojstava; b) vrijednosti mjerenja uzorka materijala oznake M10 bez spoja u jednom sloju.

Uzorak materijala oznake M11 spajan je na način LL u y smjeru, i NN u x i y smjeru, sl. 4.8. Kod svih uzoraka spojeva vrijednosti smične krutosti G i histereze smične sile 2HG su gotovo iste, dok vrijednosti histereze smične sile 2HG5 su nešto više kod uzoraka spojeva koji su spajani na način LL, što ukazuje da su uzorci spojeva spajani na način LL krući u odnosu na uzorke spajane na način NN. Usporedbom koeficijenta korelacije koji ukazuje na odnos između vrijednosti histereze smičnih sila 2HG i 2HG5 za uzorke spojeva spajane na način LL  $r_y$  iznosi 0,97, ukazuje na vrlo jaku povezanost između parametara. Koeficijenti korelacije za spojeve u x smjeru spajanja iznosi  $r_x = 0,77$  i u y smjeru spajanja  $r_y = 0,81$ .

Vrijednosti smičnih parametara na uzorku materijala oznake M12 koji je spajan prema rasporedu slojeva materijala LN, L1N1 u x smjeru spajanja, i NN u x i y smjeru spajanja, su vrlo slične, sl. 4.9. Nešto niže vrijednosti smične krutosti pokazuju spojevi koji su spajani na način L1N1 oko  $4,48 \text{ cN } (^\circ)^{-1}$ , dok najviše vrijednosti su očitane kod spoja spajanog na način NN u y smjeru spajanja  $7,35 \text{ cN } (^\circ)^{-1}$ , tab. 4.3. Niže vrijednosti smične krutosti G imaju uzorci koji su manje kompaktni. Vrijednosti histereze smičnih sila 2HG su gotovo dvostruko niže od

vrijednosti histereze smične sile 2HG5 kod svih uzoraka materijala. Veće vrijednosti histereze smične sile 2HG5 očitavaju se kroz smanjenu elastičnost. Najviše vrijednosti 2HG5 iznose 11,99 cN kod uzorka spoja spajanog NN i parametrima ultrazvučnog spajanja, brzini spajanja  $3 \text{ m min}^{-1}$  i snazi spajanja od 280 W.

#### 5.2.2 Smična svojstva spojeva nastalih primjenom tehnike visokofrekventnog spajanja

Proučavanjem vrijednosti parametara smičnih svojstava spojeva i područja oko spoja na uzorku materijala oznake M10 koji je spajan na način L1N1 (lice na naličje) u poprečnom (x) smjeru i uzdužnom (y), uspoređivane su vrijednosti smične krutosti G i histereza smičnih sila 2HG i 2GH5, sl. 4.10a) i b). Vrijednosti histereze smične sile 2HG5 su vrlo visoke, a najviše vrijednosti imaju uzorci spajani u y smjeru i pri parametrima spajanja, vremenu spajanja od 9 s i jakosti anodne struje od 220 mA (105,11 cN) i 260 mA (106,90 cN). Visoke vrijednosti histereze smične sile 2HG5 imaju uzorci koji imaju smanjenu elastičnost. Razlog tome su osim karakteristika uzorka materijala i parametri visokofrekventnog spajanja dugo vrijeme spajanja od 9 s i visoke vrijednosti jakosti anodne struje. Spojevi spajani pri tim parametrima su vrlo kruti na opip i tako na taj način zapravo onemogućuju uzorku materijala smičnu deformaciju, već dolazi do nabiranja materijala kao na sl. 5.1 a) i visokih vrijednosti histereze smične sile 2GH5. Smična svojstva mjerilo su stabilnosti ispitivanog uzorka u odnosu na mehaničke deformacije u ravnini i imaju značajan utjecaj na gipkost i podatnost materijala.

Rezultati mjerenja smičnih parametara na uzorku materijala oznake M11 koji je spajan na način LL i NN u poprečnom (x) i uzdužnom (y) smjeru spajanja prikazani su na sl. 4.12. Vrijednosti smične krutosti G ne odstupaju u ovisnosti o smjeru spajanja, ali nešto veće vrijednosti pokazuju spojevi spajani pri dužem vremenu spajanja od 7 s i 9 s, kod načina rasporeda slojeva materijala NN. Vrijednosti smične krutosti kreću se od  $7,40 \text{ cN } (^{\circ})^{-1}$  pa do  $10,44 \text{ cN } (^{\circ})^{-1}$ . Duže vrijeme spajanja utječe na veću kompaktnost uzorka tj. manju fleksibilnost uzorka spoja i okolne zone spoja.

Vrijednosti histereze smične sile 2HG vrlo malo odstupaju nezavisno od parametara spajanja i smjera spajanja, ali kod vrijednosti uzoraka spojeva spajanih na način NN su nešto niže. Vrijednosti 2HG kreću se od 2,72 cN do 5,15 cN. Kod vrijednosti histereze smične sile 2HG5 vidljivo je vrlo malo odstupanje vrijednosti za spojeve spajane na način LL u x i y smjeru spajanja i te vrijednosti kreću se od 14,90 cN do 17,67 cN. Kod uzoraka spojeva spajanih na način NN nešto su niže vrijednosti 2HG5 od 11,44 cN do 12,33 cN.

Niže vrijednosti 2HG i 2HG5 utječu na bolju podatnost i imaju dobru sposobnost oblikovanja kod izrade odjevnog predmeta.

Značajniji koeficijent korelacije koji prikazuje odnos između parametara histereza smičnih sila 2HG i 2HG5 za uzorke spajane na način LL u x smjeru i iznosi  $r_x = 0,83$  što ukazuje na jaku korelaciju između dva promatrana smična parametra.

Promatranjem odnosa između smičnih parametara na uzorku materijala oznake M12 spajanog VF tehnikom spajanja na način LL, NN, LN i L1N1 u poprečnom (x) i uzdužnom (y) smjeru spajanja. Na uzorku spajanom na način LL, NN i LN vrijednosti smične krutosti G u x i y smjeru imaju slične vrijednosti i kreću se od  $6,16 \text{ cN } (^{\circ})^{-1}$  do  $7,32 \text{ cN } (^{\circ})^{-1}$ . Vrijednosti su više od karakterističnih vrijednosti, a više vrijednosti smične krutosti imaju kompaktniji uzorci materijala, što se u ovom slučaju ovog uzorka može pripisati nasloju od PU. Niže vrijednosti smične krutosti G imaju uzorci koji su spajani na način L1N1 u x u y smjeru spajanja, vrijednosti su od  $4,28 \text{ cN } (^{\circ})^{-1}$  do  $4,79 \text{ cN } (^{\circ})^{-1}$ , ali i vrijednosti histereza smičnih sila 2HG (od  $2,67 \text{ cN}$  do  $3,36 \text{ cN}$ ) i 2HG5 (od  $5,12 \text{ cN}$  do  $5,76 \text{ cN}$ ). Zbog rasporeda slojeva materijala L1N1 uzorci spojeva u x i y smjeru spajanja su fleksibilniji i pogodniji za izradu odjevnog predmeta. Vrijednosti histereza smičnih sila za načine spajanja LL, NN i LN za 2HG kreću se od  $4,34 \text{ cN}$  do  $6,28 \text{ cN}$ , a za 2HG5 kreću se od  $10,02 \text{ cN}$  do  $12,41 \text{ cN}$ .

Značajniji koeficijenti korelacije koji pokazuju značajnu povezanost između histereza smičnih sila 2HG i 2GH5 zabilježeni su na uzorcima spojeva spajanim na način LN u x smjeru  $r_x$  iznosi  $-0,99$  i u y smjeru  $r_y$  iznosi  $0,88$ , te kod uzoraka spajanih na način L1N1 u x smjeru koeficijent korelacije iznosi  $r_x$  iznosi  $-0,89$  i u y smjeru  $r_y$  iznosi  $0,87$ . Ovi koeficijenti ukazuju na jaku korelaciju između promatranih smičnih parametara.

### 5.3 Savojna svojstva spojeva

Na temelju rezultata ispitivanja utjecaja procesnih parametara spajanja na savojna svojstva spojeva prikazanih u poglavlju 4.3, bit će za svaku tehniku spajanja zasebno analizirani dobiveni mjerni rezultati. Promatran je i odnos parametara savojnih svojstava krutost savijanja B i histereza momenta savijanja 2HB, te je njihova međusobna povezanost prikazana koeficijentom korelacije  $r_x$  i  $r_y$ . Sve vrijednosti smične krutosti B i histereze momenata savijanja 2HB odnose se na jedinicu površine od  $1 \text{ cm}$  ispitivanog uzorka.

### 5. 3. 1 Savojna svojstva spojeva nastalih primjenom tehnike ultrazvučnog spajanja

Analizirani su mjerni rezultati savojnih svojstava spojeva postignutih tehnikom ultrazvučnog spajanja na uzorcima materijala oznaka M10, M11 i M12, spajanih u x i y smjeru spajanja i prema rasporedu slojeva materijala LL, NN, LN i L1N1 prikazanih na sl. 4.14 do 4.21. Usporedbom vrijednosti savojnih parametara krutosti savijanja  $B/cN\ cm^2$  i histereze momenta savijanja  $2HB/cN\ cm$  na uzorku materijala oznake M10 spajanom na način LL, vidljivo je da s porastom snage ultrazvučnog spajanja pri brzinama spajanja od  $3\ mmin^{-1}$  i  $5\ mmin^{-1}$  dolazi do pada vrijednosti smične krutosti B i histereze momenta savijanja  $2HB$ , za spojeve spajane u poprečnom smjeru (x) i u uzdužnom smjeru spajanja (y) (tab. 4.1). Vrijednosti savojnih parametara na uzorcima spojeva spajanim pri brzini spajanja od  $7\ mmin^{-1}$ , s porastom snage spajanja s 252 do 280 W dolazi do rasta vrijednosti smične krutosti B i histereze momenta savijanja  $2HB$  u x i y smjeru spajanja. Više vrijednosti smične krutosti i histereze momenta savijanja karakteristične su za nerastezljive i krute uzorke, koji su manje fleksibilni. Najniža izmjerena vrijednost krutosti savijanja B iznosi  $0,177\ cN\ cm^2$ , očitana je kod uzorka spojenog u uzdužnom smjeru spajanja pri brzini spajanja od  $3\ mmin^{-1}$  i snazi ultrazvučnog spajanja od 252 W. Niže vrijednosti krutosti savijanja utječu na bolju fleksibilnost i bolju sposobnost oblikovanja kod procesa spajanja/šivanja. Najniža vrijednost histereze momenta spajanja  $2HB$  očitana je kod uzorka spoja spajanog u uzdužnom smjeru pri brzini spajanja od  $3\ mmin^{-1}$  i snazi 200 W i iznosi  $0,067\ cN\ cm$ , a niže vrijednosti histereze momenta savijanja karakteristične su za uzorke koji imaju veću elastičnost savijanja. Pri brzini spajanja od  $3\ mmin^{-1}$  i nižim snagama spajanja od 200 W i 252 W očitane su najniže vrijednosti za krutost savijanja i histerezu momenta savijanja, te ti uzorci imaju najpogodnija savojna svojstva spoja kod spajanja uzorka materijala M10 na način LL ultrazvučnom tehnikom spajanja.

Kod uzoraka istog materijala spajanih na način L1N1 vrijednosti krutosti savijanja B su za oko 40 % niže nego kod uzoraka spajanih na način LL, a vrijednosti histereze momenta savijanja su niže za oko 35 %. Najniže vrijednosti krutosti savijanja ( $B = 0,11\ cN\ cm^2$ ) izmjerene su kod uzorka spajanog u x smjeru pri brzini od  $3\ mmin^{-1}$  i snazi od 252 W, a najniže vrijednosti histereze momenta savijanja ( $2HB = 0,03\ cN\ cm$ ) izmjerene su na uzorku spajanom u y smjeru pri brzini od  $5\ mmin^{-1}$  i snazi 252 W. Uzorci spojeva spajani pri spomenutim parametrima imaju najpogodnija savojna svojstva, koja značajno utječu na ponašanje prilikom nošenja gotovog odjevnog predmeta. Pri ovim parametrima spajanja uzorci spojeva imaju veću elastičnost savijanja i bolju fleksibilnost. Najveće vrijednosti krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja  $2HB$ , izmjerene su na spoju koji je spajan u

x i y smjeru pri brzini spajanja od  $5 \text{ mmin}^{-1}$  i snazi 280 W, te su te vrijednosti za oko 50 % veće od najnižih izmjerenih vrijednosti savojnih parametara. Visoke vrijednosti histereze momenta savijanja su karakteristične za nerastezljive uzorke, s nižim stupnjem elastičnog oporavka i krutog opipa, a visoke vrijednosti krutosti savijanja se očituju kroz veći otpor uzorka spoja na savijanje.

Koeficijent korelacije koji prikazuje odnos između krutosti savijanja i histereze momenta savijanja za uzorke spajane u y smjeru, iznosi  $r_y = 0,74$  i ukazuje na srednje jaku korelaciju između promatranih savojnih parametara, za spojeve spajane u x smjeru korelacija je vrlo slaba.

Iz rezultata savojnih svojstava spojeva, spajanih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M11 na način spajanja LL u y smjeru spajanja, sl. 4.16, vidljivo je da s porastom snage ultrazvučnog spajanja i brzine spajanja opadaju vrijednosti krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB. Najniže vrijednosti oba savojna parametra ( $B = 0,09 \text{ cN cm}^2$  i  $2HB = 0,1 \text{ cN cm}$ ) očitane su pri brzini spajanja od  $7 \text{ mmin}^{-1}$  i snazi od 372 W. Uzorci spojeva koji su spajani na način NN, sl. 4.17, u x i y smjeru spajanja pokazuju slično ponašanje kao i uzorci spajani na način LL. Kod spojeva spajanih u poprečnom smjeru najniže vrijednosti krutosti savijanja ( $B = 0,10 \text{ cN cm}^2$ ) i histereze momenta savijanja ( $2HB = 0,20 \text{ cN cm}$ ) očitane su kod uzoraka spojeva spajanih pri brzini od  $5 \text{ mmin}^{-1}$  i snazi ultrazvučnog spajanja 372 W. Koeficijent korelacije između promatranih savojnih parametara iznosi  $r_x = 0,69$ , te ukazuje na srednje jaku korelaciju. Uzorci spojeva spajani u uzdužnom (y) smjeru imaju najniže vrijednosti krutosti savijanja ( $B = 0,19 \text{ cN cm}^2$ ) i histereze momenta savijanja ( $2HB = 0,16 \text{ cN cm}$ ) na uzorku spoja spajanog pri brzini od  $7 \text{ mmin}^{-1}$  i snazi 372 W. Kod oba načina spajanja LL i NN veću elastičnu savitljivost imaju uzorci spajani pri većoj snazi ultrazvučnog spajanja. Razlog tome je deformacija koja se javlja prilikom spajanja. Omekšani materijal iz zone spoja (udubine na spoju), se istiskuje u rubove spoja. Prilikom ispitivanja savojnih svojstava, kod savijanja uzorka spojeva koji su spajani pri većim snagama spajanja, pružaju manji otpor prilikom savijanja. Na temelju dobivenih krivulja savojne deformacije, koja se očituje kao promjena momenta savijanja M u ovisnosti o zakrivljenosti K, na temelju kojih su utvrđuju krutost savijanja B i histereza momenta savijanja 2HB.

Na uzorku materijala oznake M12 ultrazvučnom tehnikom spajanja spajani su uzorci spojeva na način NN u x i y smjeru spajanja. Najniže vrijednosti krutosti spajanja ( $B = 0,11 \text{ cN cm}^2$ ) i histerezi momenta savijanja ( $2HB = 0,07 \text{ cN cm}$ ) ima uzorak spoja spajan u x smjeru spajanja pri brzini spajanja od  $3 \text{ mmin}^{-1}$  snazi od 280 W. Na uzorku spajanom u y smjeru vrijednosti savojnih svojstava su nešto više, što se očituje kroz manju elastičnu savitljivost



spoja. Kod uzoraka spojeva spajanih na način LN i L1N1 u x smjeru spajanja su postignuti pozitivno ocijenjeni uzorci. Pri većoj snazi ultrazvučnog spajanja, izmjerene su niže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja. Najniže vrijednosti krutosti spajanja ( $B = 0,09 \text{ cN cm}^2$ ) i histerezi momenta savijanja ( $2HB = 0,05 \text{ cN cm}$ ) ima uzorak spoja spajan pri brzini spajanja od  $3 \text{ mm}^{-1}$  i snazi od  $280 \text{ W}$ , pri istim parametrima spajanja kao i spoj spajan na način NN.

Kod uzoraka spajanih na način L1N1 vrijednosti savojnih svojstava su niže nego kod spojeva spajanih na način LN, pa se može zaključiti da spoj ostvaren na način L1N1 ima povoljnija savojna svojstva, veću elastičnu savitljivost i veću fleksibilnost.

### 5. 3. 2 Savojna svojstva spojeva nastalih primjenom tehnike visokofrekventnog spajanja

Iz analize rezultata savojnih svojstava spojeva, nastalih visokofrekventnim spajanjem uzorka materijala oznake M10 na način spajanja LL, sl. 4.21, nema većih odstupanja vrijednosti savojnih parametara između spajanja u x i y smjeru. Najniže vrijednosti krutosti savijanja ( $B = 0,19 \text{ cN cm}^2$ ), očitane su kod uzorka koji je spajan pri vremenu spajanja od  $5 \text{ s}$  i jakosti anodne struje od  $300 \text{ mA}$ . Najniže vrijednosti histereza momenta savijanja ( $2HB = 0,05 \text{ cN cm}$ ) očitane su kod spoja spojenog pri vremenu spajanja od  $7 \text{ s}$  i jakosti anodne struje  $300 \text{ mA}$ . Oba uzorka spoja su spajana pri većim vrijednostima anodne struje koja uslijed vremena djelovanja omekšani materijal istiskuje iz područja spoja u područje rubova spoja. Prilikom ispitivanja uzorak se podvrgava savojnoj deformaciji, te dolazi do savojnog opterećenja i rasterećenja uzorka spoja u ovisnosti o zakrivljenosti K. Prikaz rezultata mjerenja dat je histereznom krivuljom M (K), (Geršak 2014), za uzorke koji imaju najniže vrijednosti za krutost savijanja i histerezu momenta savijanja sl. 5.2 a) i b).

Rezultati mjerenja savojnih svojstava na uzorku materijala oznake M10 spajan na način L1N1, prikazani na sl. 4. 22, ukazuju da se pri višim vrijednostima jakosti anodne struje, izmjerene nešto niže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja. Najniže vrijednosti oba savojna parametra ( $B = 0,111 \text{ cN cm}^2$  i  $2HB = 0,035 \text{ cN cm}$ ) očitane su kod uzorka spoja spajanog pri vremenu spajanja od  $5 \text{ s}$  i anodnoj struji od  $300 \text{ mA}$ . Pri istim parametrima visokofrekventnog spajanja pri oba načina spajanja (LL i L1N1) na uzorku materijala oznake M10 su očitane najniže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja. Na uzorcima spoja spajanih na način L1N1, vrijednosti krutosti savijanja su niže za

oko 45 %, a za vrijednosti histereze momenta savijanja su niže za oko 30 %, a razlog tome je u rasporedu slojeva materijala prilikom spajanja (prema sl. 3.3).



**SI. 5.2** Prikaz rezultata mjerenja savojnih svojstava spojeva na uzorku materijala oznake M10 visokofrekventnom tehnikom spajanja a) spoja spajanog pri parametrima 5 s i 300 mA i b) spoja spajanog pri parametrima spajanja 7 s i 300 mA.

Uzorak materijala oznake M11 spajan je visokofrekventnom tehnikom spajanja na način spajanja LL, te je analizom rezultata utvrđeno da su rezultati krutosti savijanja i histereze momenta savijanja najniži kod uzoraka spojeva koji su spajani pri vrijednostima anodne struje od 220 do 260 W, pri vremenima spajanja od 3, 5 i 7 s. Kod uzoraka spojeva koji su spajani na način NN, vrijednosti savojnih parametara su značajno veće. Veće vrijednosti krutosti savijanja izmjerene su kod uzoraka spojeva koji su spajani u poprečnom (x) smjeru spajanja, te su one karakteristične za uzorke koji su manje fleksibilni i pružaju veći otpor prilikom savijanja.

Analizom rezultata ispitivanja savojnih svojstava spojeva na uzorku materijala oznake M12 koji su spajani na način LL niže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja očitane su kod uzoraka koji su spajani u poprečnom (x) smjeru spajanja i to pri nižim vrijednostima anodne struje. Spojevi spajani u poprečnom smjeru imaju bolju fleksibilnost od spojeva spajanih u uzdužnom smjeru.

Rezultati mjerenja na uzorcima spojeva spajanih na način NN ukazuju da se spajanjem pri višim vrijednostima anodne struje od 300 mA kod svih vremena spajanja u x smjeru, značajno utječe na savojna svojstva koja su pri tim parametrima spajanja niža. Niže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja kod spajanja upotrebom veće količine energije, kod uzorka materijala oznake M12, dolazi do veće fleksibilnosti u zoni spoja i okolnom području. Ti uzorci spojeva pružaju manji otpor pri savijanju od onih koji su spajani pri nižim vrijednostima anodne struje, što je suprotno od spajanja na način LL.

Analizom rezultata spojeva koji su spajani na način LN i L1N1, vidljivo je da su vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja za spojeve spajane na način L1N1 niže za oko 40 % od onih spojeva koji su spajani na način LN. Kod oba načina spajanja najniže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja očitane su pri kraćem vremenu spajanja od 5 s i većoj količini utrošene energije od 300 mA.

### 5. 3. 3 Savojna svojstva spojeva nastalih primjenom tehnike spajanja toplinskom kondukcijom

Uzorak materijala M10 spajani su toplinskom kondukcijom na način spajanja LL, te je analizom rezultata utvrđeno da su rezultati krutosti savijanja i histereze momenta savijanja niži kod uzoraka spojeva koji su spajani pri nižoj temperaturi i pri manjoj brzini spajanja koje se očituje kao kraće vrijeme spajanja. Kod uzoraka materijala oznaka M11 i M14 uzorci koji su pozitivno ocjenjeni su spajani na način LL, a kod uzork materijala oznake M13 uzorci su spajani na način NN. Niže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja kod sva tri uzorka materijala (oznaka M11, M13 i M14) očitane su pri većim brzinama spajanja (4 i 5  $\text{mmmin}^{-1}$ ) i nižim temperaturama spajanja (300 i 350 °C). Pri kraćem djelovanju, što se očituje kroz veću brzinu spajanja, i nižoj temperaturi spajanja nastaju spojevi koji nisu kruti, nego su fleksibilniji i koji imaju veću elastičnu savitljivost.

### 5. 3. 4 Savojna svojstva spojeva nastalih tehnike spajanja toplinskom konvekcijom

Na temelju analize rezultata savojnih svojstava spojeva spajanih toplinskom konvekcijom utvrđeno je za uzorak materijala oznake M10 koji je spajan na način LL pri većoj brzini spajanja i većoj temperaturi spajanja, da se postižu spojevi koji imaju najniže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta savijanja ( $B = 0,293 \text{ cN cm}^2$  i  $2HB = 0,072 \text{ cN cm}$ ). Rezultati mjerenja na uzorku materijala oznake M11 spajan na način LL, ukazuju da spojevi spajani u smjeru y imaju nešto niže vrijednosti histereze momenta savijanja. Najniže vrijednosti očitane su pri najvećoj brzini spajanja od 5  $\text{mmmin}^{-1}$  i temperaturi od 400 °C. Na uzorku materijala oznake M13 spajanog na način NN analizirani su rezultati mjerenja savojnih svojstava. Najniža izmjerena vrijednost krutosti savijanja ( $B = 0,358 \text{ cN cm}^2$ ) i histereze momenta savijanja ( $2HB = 0,325 \text{ cN cm}$ ) očitana je na spoju spajanom u y smjeru pri parametrima spajanja 3  $\text{mmmin}^{-1}$  i 300 °C. Dok je najniža vrijednost krutosti savijanja ( $B =$

0,025 cN cm<sup>2</sup>) i histereze momenta savijanja (2HB = 0,047 cN cm) izmjerena na uzorku materijala oznake M14 na spoju spajanom u y smjeru pri parametrima spajanja od 5 mm<sup>-1</sup> i 450 °C. Niže vrijednosti krutosti savijanja i histereze momenta, povoljnije utječu na izgled i ponašanje odjevnog predmeta uslijed nošenja. Takvi spojevi imaju povoljna savojna svojstva i fleksibilniji su kod savijanja.

#### 5. 4 Kompresijska svojstava spojeva

Analizirane promjene vrijednosti kompresijskih svojstava spojeva, koje su povezane s primjenom različitih procesnih parametara spajanja, prikazane u poglavlju 4.4, a u nastavku teksta bit će analizirani mjerni podaci za svaku tehniku spajanja. Izmjerena su i kompresijska svojstva dva sloja materijala, te su vrijednosti prikazane u tab. 5.1.

Na temelju odnosa debljina  $h_m$  izmjerene za dva sloja materijala i debljine  $h_m$  izmjerene na spoju, analizirat će se vrijednosti debljina istisnutih rubova/debljina spoja naspram debljine dva sloja materijal koji se spajaju. Zbog širine spoja i promjera mjernog tijela na KES-FB3 mjernom uređaju, kod spajanja ultrazvučnom i visokofrekventnim tehnikom spajanja vrijednosti kompresijskih parametara se odnose na debljinu istisnutog ruba, a kod spajanja toplinskom kondukcijom i konvekcijom, izmjerene vrijednosti odnose na debljinu spoja (prema sl. 3.18).

Tab. 5. 1 Kompresijska svojstva spojeva uzoraka materijala mjerena u dva sloja

Dva sloja uzorka materijala oznaka	WC/ cN cm	$h_0$ /mm	$h_m$ /mm	C	RC/%
M10	0.035	0.443	0.413	0.068	89,23
M11	0,549	1,364	1,101	0,139	39,42
M12	0,146	0,788	0,785	0,115	72,21
M13	0,384	1,519	1,291	0,150	51,53
M14	0,111	0,704	0,638	0,094	71,26

Gdje je

WC – deformacijski rad izmjeren na uzorku od cm<sup>2</sup>, cN cm,

$h_0$  – debljina izmjerena pri maksimalnom opterećenju od 0.490 cN cm<sup>-2</sup>, mm,

$h_m$  – debljina izmjerena pri maksimalnom opterećenju od 49.035 cN cm<sup>-2</sup>, mm

C – kompresibilnost

RC – sposobnost oporavka, %.

#### 5. 4. 1 Kompresijska svojstava spojeva nastalih primjenom tehnike ultrazvučnog spajanja

Na temelju rezultata mjerenja kompresijskih svojstava spojeva nastalih spajanjem tehnikom ultrazvučnog spajanja na uzorku materijala oznake M10, spajanog na način LL u x i y smjeru, sl. 4.38, vidljivo je da nema značajniji razlika između kompresijskih svojstava za spojeve spajane u x ili y smjeru spajanja. Veće vrijednosti deformacijskog rada WC, debljine  $h_m$  i  $h_0$  i kompresibilnosti C izmjerene su kod uzoraka spojeva postignutih pri nižoj brzini spajanja od  $3 \text{ mm}^{-1}$  pri snagama spajanja od 252 i 280 W. Vizualnom ocjenom kvalitete spoja, ti uzorci imaju izrazito naglašene istisnute rubove, ali nije došlo do oštećenja materijala prilikom spajanja. Procesni parametri pri kojima su spajani je mala brzina spajanja, što odgovara duljem vremenu djelovanja i veće vrijednosti snage ultrazvučnog spajanja. Prevelika količina energije dovedena je na mjesto spajanja uslijed čega dolazi do istiskivanja omekšanog materijala iz zone spoja u rubove spoja. Kod ultrazvučnog spajanja izgled spoja je trolinijski, koji je nastao kao posljedica djelovanja pritisne sile na omekšani materijal koji se utiskuje u protuvaljak, o čijem obliku na površni njegovog oboda ovisi izgled spoja. Veće vrijednosti deformacijskog rada WC karakteristične su za voluminoznije uzorke spojeva, a usko su povezane s debljinom. Izmjerene vrijednosti sposobnosti oporavka RC kod ovih spojeva je nešto niža. Parametar RC odražava sposobnost oporavka uzorka kod kompresijskog rasterećenja i mjera je volumenske stabilnosti uzorka. Niže vrijednosti sposobnosti oporavka RC, karakteristične su za uzorke koji su krući na opip, imaju manju elastičnost prilikom djelovanja kompresijskog opterećenja. Ovi spojevi imaju izražajnije istisnute rubove i to je razlog zašto su na opip manje voluminozni. Najniže vrijednosti kompresijskih parametara WC,  $h_0$ ,  $h_m$ , i C; te veće vrijednosti sposobnosti oporavka RC očitani su kod uzorka spoja spajanog pri parametrima spajanja  $7 \text{ mm}^{-1}$  i 252 W i to za spoj spajan u x (poprečnom) smjeru spajanja. Vizualnom ocjenom, ovaj spoj ima blago istisnute, što je vidljivo i po nižim očitanim vrijednostima debljine  $h_m$  koje su samo za oko 8 % veće od debljine  $h_m$  izmjerene za dva sloja uzorka materijala M10.

Analizom rezultata kompresijskih svojstava spojeva koji su nastali ultrazvučnim spajanjem uzorka materijala oznake M11, na način LL sl. 4.39, ali i kod uzoraka spajanih na način NN, sl. 4.40, vidljivo je da pri većim brzinama spajanja od  $7 \text{ mm}^{-1}$  i snazi spajanja od 372 W uzorci spojeva imaju niže vrijednosti deformacijskog rada WC, manje debljine  $h_0$ ,  $h_m$ , niže vrijednosti kompresibilnosti C, a najviše izmjerene vrijednosti sposobnosti oporavka RC.

Debljina spoja  $h_m$  koja mjeri debljinu istisnutog ruba na spoju je 1,3 % manja od debljine uzorka materijala mjerenog u dva sloja (prema tab. 5.1). Uzorci spojeva spajani pri ovim parametrima ultrazvučnog spajanja ( $7 \text{ mm}^{-1}$  i 372 W) imaju najmanji intenzitet istisnutih

rubova i mekši su na opip od onih koji su spajani pri nižoj brzini spajanja od  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i snazi spajanja od 372 W.

Kod spojeva nastalih ultrazvučnim spajanjem pri različitim parametrima na uzorku materijala oznake M12, spajanom na način NN, vidljivo je da pri brzini spajanja od  $3 \text{ mmin}^{-1}$ , niže vrijednosti deformacijskog rada WC, manje debljine  $h_0$ ,  $h_m$  i niže vrijednosti kompresibilnosti C, imaju spojevi spajani pri višoj snazi spajanja od 332 W. Vrijednosti sposobnosti oporavka RC su također nešto niže, te se nakon rasterećenja kompresijskog opterećenja uzorak spoja ne vraća odmah u prvobitno stanje.

Debljina istisnutog ruba  $h_m$  za spoj spajan pri parametrima spajanja ( $3 \text{ mmin}^{-1}$  i 332 W) je za 2 % manja od debljine uzorka materijala mjenog u dva sloja (prema tab. 5.1). Razlog tome je da prilikom spajanja nije došlo do deformacije koja bi uzrokovala naglašenu strukturu istisnutih rubova i time djelovala na ostale kompresijske parametre.

#### 5. 4. 2 Kompresijska svojstava spojeva nastalih primjenom tehnike visokofrekventnog spajanja

Kod uzorka materijala oznake M10 spajanog tehnikom visokofrekventnog spajanja u x i y smjeru spajanja očitane su nešto veće vrijednosti deformacijskog rada WC u x smjeru spajanja, dok su vrijednosti za debljine  $h_0$  i  $h_m$  približno sličnih vrijednosti u oba smjera spajanja. Iz prikazanih rezultata na sl. 4.42 najviše očitane vrijednosti deformacijskog rada WC i debljina  $h_0$  i  $h_m$  imaju spojevi spajani pri većim vrijednostima anodne struje 300 mA i vremenu spajanja od 7 s. Vrijednosti sposobnosti oporavka RC su kod ovog uzorka spoja nešto niže. Uzorci spojeva spajani pri ovim parametrima vizualnom ocjenom imaju izrazito istisnute rubove, koji su na opip voluminozni, što se vidi i iz vrijednosti debljine  $h_m = 0,789$  mm. Usporedbom debljina, debljina istisnutog ruba  $h_m$  je za 191 % veća od debljine za dva sloja materijala. Najniže očitane vrijednosti deformacijskog rada WC, manje debljine  $h_0$ ,  $h_m$  i niže vrijednosti kompresibilnosti C, imaju spojevi spajani pri nižim vrijednostima jakosti anodne struje 180 mA i vremenu spajanja od 7 i 9 s. Vrijednosti sposobnosti oporavka RC su također nešto veće kod spojeva spajanih pri ovim parametrima. Ovi spojevi imaju blago istisnute rubove, njihova kompresibilnost je niža jer nisu voluminozni kao spojevi koji imaju veće vrijednosti parametra WC. Izmjerena debljina istisnutog ruba  $h_m = 0,430$  mm. Usporedbom debljina  $h_m$ , debljina istisnutog ruba je za oko 4 % veća od debljine za dva sloja materijala. Pojava istisnutog ruba je zapravo deformacije koja se događa za vrijeme visokofrekventnog spajanja do koje dolazi kada se materijal izlaže duže vrijeme velikim jakostima anodnih struja. Oblik spoja kod visokofrekventnog spajanja ovisi o obliku gornje pomične elektrode, koja djeluje određenom pritisnom silom na omekšani materijal u mjestu

spoja uslijed procesa spajanja. Ako se na materijal djeluje prevelikom količinom energije i taj proces traje dulje vrijeme dolazi do istiskivanja vrlo omekšanog materijala iz zone spoja uz rubove elektrode i nastaju istisnuti rubovi.

Analizirana su i rezultati mjerenja kompresijskih parametara spojeva koji su nastali spajanjem uzorka materijala oznake M11, na način spajanja LL u x i y smjeru. Najniže vrijednosti debljine istisnutih rubova  $h_m = 1,13$  mm očitane su i za spojeve spajane u x i y smjeru pri parametru spajanja 5 s i 220 mA. Usporedbom debljina, debljina istisnutog ruba je za oko 3,5 % veća od debljine mjerene kod dva sloja materijala. Vrijednosti debljine  $h_m$  rastu s povećanjem jakosti anodne struje pri svim vremenima spajanja. Analizom rezultata ostalih kompresijskih parametara deformacijski rad WC raste s porastom vrijednosti anodne struje pri svim vremenima spajanja, kao vrijednosti sposobnosti oporavka RC. Uzorci materijala oznake M11 spajani su i na način spajanja NN u x i y smjeru spajanja. Pri vremenu spajanja od 7 s i anodnoj struji od 260 mA zabilježene su najniže vrijednosti debljine istisnutog ruba ( $h_m = 1,12$  mm) u x i y smjeru spajanja. Debljine istisnutog ruba veće su za oko 4 % od debljine dva sloja materijala. Na spojevima spajanim pri navedenim parametrima spajanja očitane su i najveće vrijednosti debljine  $h_0$ , deformacijskog rada WC, kompresibilnosti C i sposobnosti opravka RC.

Uzorci spojeva nastali spajanjem uzorka materijala oznake M12 na način LL u x i y smjeru, analizirani su, te je utvrđeno da najmanju debljinu  $h_m = 0,797$  mm ima uzorak spajan pri parametrima spajanja 9 s i 180 mA. Najmanja debljina istisnutog ruba je samo za 2 % veća od izmjerene vrijednosti za dva sloja materijala. Debljine istisnutih rubova nešto su veće kod spojeva spajanim pri većim vrijednostima anodne struje. Vrijednosti ostalih kompresijskih parametara kod uzorka spoja spajanog pri spomenutim parametrima su niže vrijednosti deformacijskog rada WC, što se očituje kroz manju voluminoznost i veće vrijednosti sposobnosti oporavka RC. Uzorak spojeva nastali spajanjem uzorka materijala oznake M12 na način NN i LN u x i y smjeru ima u odnosu na način spajanja LL, niže vrijednosti deformacijskog rada WC, sposobnosti oporavka RC, kompresibilnosti C i niže vrijednosti debljina  $h_m$ . Izmjerene vrijednosti debljine  $h_m$  istisnutih rubova, gotovo su jednake kao debljina dva sloja materijala.

#### 5. 4. 3 Kompresijska svojstava spojeva nastalih primjenom spajanja toplinskom kondukcijom

Na temelju rezultata mjerenja kompresijskih svojstava spojeva nastalih spajanjem toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10, spajanog na način LL u x i y smjeru, sl. 4.48,

vidljivo je da. niže vrijednosti deformacijskog rada WC, debljine  $h_m$  i  $h_0$  i veće vrijednosti kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC su izmjerene su kod uzoraka spojeva spajanog pri većoj brzini spajanja od  $5 \text{ mmin}^{-1}$  i temperaturi vrućeg klina od  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mjesto na spoju na kojem su mjerene vrijednosti kompresijskih parametara odnose se na debljinu spoja, prema sl. 3.18 i 3.19. Mjerno tijelo KES-FB 3 mjernog sustava manje od širine spoja te se mjerenja odnose na debljinu spoj, a ne na istisnute rubove u zoni spoja. Vizualnom ocjenom kvalitete spoja, ti uzorci imaju blago naglašene istisnute rubove, a debljina spojeva je kod uzorka materijala oznake M10 niža kod većih brzina spajanja. Pri parametrima spajanja  $5 \text{ mmin}^{-1}$  i  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  očitana je najmanja debljina spoja  $h_{m,i}$  ona je za 2,5 % manja od debljine dva sloja materijala.

Na uzorku materijala oznake M11 spajanog na način LL, iz prikaza mjernih rezultata sl. 4.49, vidljivo je da pri većim brzinama spajanja spojevi imaju manje debljine  $h_0$  i  $h_m$ , ali veće vrijednosti deformacijskog rada WC, te nešto niže vrijednosti kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC. Veće vrijednosti deformacijskog rada WC karakteristične su za voluminoznije uzorke spojeva, a povezane su s debljinom spoja. Ovi uzorci spojeva imaju blago naglašene istisnute rubove. Niže vrijednosti parametra RC, karakteristične su za uzorke koji su krući na opip, imaju manju sposobnost oporavka prilikom djelovanje kompresijskog opterećenja/rasterećenja.

Analizom mjernih rezultata kompresijskih svojstava na uzorku materijala oznake M13 spajanog na način NN u i x y smjeru, vidljivo je da su vrijednosti deformacijskog rada WC, debljine, kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC veće kod spojeva koji su spajani u uzdužnom (y) smjeru, gdje je uslijed spajanja došlo do manjeg rastezanja uzorka materijala uslijed spajanja od onog u poprečnom (x) smjeru spajanja. Promatranjem kompresijskih svojstava, vidljivo je da s povećanjem brzine spajanja dolazi do povećanja debljine spoja, manjih vrijednosti deformacijskog rada WC i veće sposobnosti oporavka RC. Najniže vrijednosti debljine spoja očitane su kod dužeg vremena spajanja, tj. kod manje brzine spajanja od  $4 \text{ mmin}^{-1}$  i temperature vrućeg klina  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , te debljina spoja spajanog pri ovim parametrima je za 12 % manja od debljine mjerene za dva sloja uzorka materijala oznake M13. Kod manjih brzina spajanja i nižih temperatura spajanja postižu se vizualnom ocjenom dobri spojevi, koji imaju blago naglašene rubove ali nisu istisnuti. Debljina izmjerena unutar spoja je manja od debljine mjerene za dva sloja materijala, a razlog tome je zagrijavanje površinskih slojeva materijala. U postupku spajanja omekšani površinski sloj materijala, PU nanos, se toliko omekša da prodire u pletivo, između prostora unutar očica pletiva i na taj način debljina spoja je manja od dva sloja materijala. Kod ove tehnike spajanja može doći do istezanja spoja po duljini, na taj način može dio spoja biti duži od uzorka materijala za 1-2 mm, sl. 5.3.





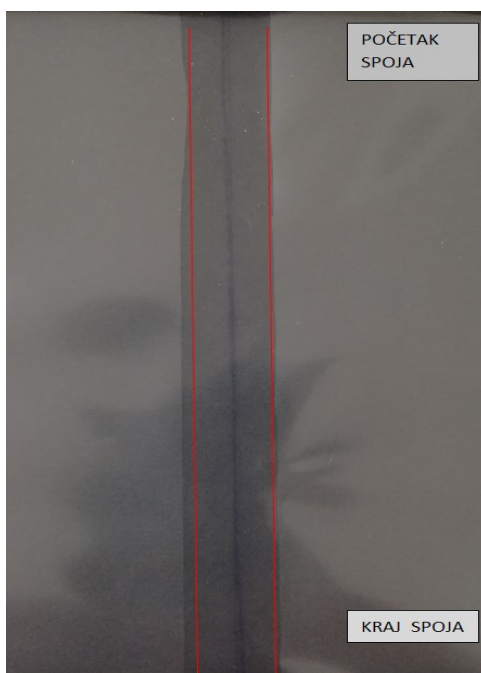
**Sl. 5.3** Prikaz spoja na uzorku materijala oznake M13 spojenog pomoću vrućeg klina i istežanje materijala pri kraju spoja u području spoja

Kod spajanja uzorka materijala oznake M14 toplinskom kondukcijom, pozitivno su ocjenjeni uzorci spajani na način LL i LN u uzdužnom smjeru spajanja (y). Usporedbom vrijednosti kompresijskih parametara na uzorcima spojeva spajanim na način LL, deformacijski rad WC ima više vrijednosti kod spojeva spajanih pri manjim brzinama spajanja i pri nižoj temperaturi spajanja. Kod načina spajanja LN odnos je obrnut, veće vrijednosti deformacijskog rada WC su očitane kod većih brzina spajanja i nižim temperaturama spajanja. Vrijednosti sposobnosti oporavka RC su veće kod spojeva spajanih na način LN i to pri manjim brzinama spajanja. Analizom rezultata debljine, utvrđeno je da su niže vrijednosti debljine  $h_m$  izmjerene na spoju spajanim na način LN ( $h_m = 0,410$  mm). Usporedbom s debljinom dva sloja materijala, debljina spoja ima za oko 35 % manje vrijednosti debljine.

#### 5. 4. 4 Kompresijska svojstava spojeva nastalih primjenom spajanja toplinskom konvekcijom

Na temelju analize izmjerenih vrijednosti kompresijskih svojstava i utjecaja parametara spajanja vrućim zrakom na promjene tih svojstava, utvrđeno je da su najniže vrijednosti debljine spoja  $h_m$  izmjerene na spojevima spajanim na način spajanja LL u x i y smjeru i pri parametrima spajanja brzinama spajanja 4 i 5  $\text{mm}^{-1}$  i temperaturi spajanja od 450 i 500 °C.

Vrijednosti ostalih kompresijskih parametara nemaju značajnije razlike, kod svih pozitivno ocjenjenih uzoraka spojeva. Usporedbom debljina za dva sloja materijala, debljina spoja je oko 2 % veća. Vizualnom ocjenom spojevi spajani pri navedenim parametrima nemaju oštre i ravne rubove s lijeve i desne strane, sl. 5.4. Na slici je vidljivo odstupanje širine spoja na početku i na kraju spoja. Kod ove tehnike spajanja dolazi do zagrijavanja površine materijala koji se spaja na način da je mlaznica iz koje izlazi vrući zrak postavljena na vrlo maloj udaljenosti od površina materijala koji se spaja. Vrući zrak koji izlazi zagrijava veće područje nego što je područje, tj. širina valjka koji djeluje na omekšani materijal pritiskom silom, te izvodi transport materijala i nastaje spoj koji je širine valjka. Na početku spoja okolno područje spoja nije još jako zagrijano, pa je širina na početku spajanja manja i iznosi 20 mm. Pri kraju spoja, širina i odstupanje od početne širine sve je veće, razlog je zagrijavanje materijala u zoni spoja, ali i okolnog područja, pa je na kraju spoja zagrijana sve veća površina. Djelovanjem valjka i položajem materijala kojeg pri kraju poslužitelj stroja ispušta iz ruku dolazi do povećanje širine spoja.



**Sl. 5.4** Prikaz spoja na uzorku materijala oznake M10 spajanog toplinskom konvekcijom i odstupanje širine spoja na početku i na kraju spoja

Ovakav efekt zagrijavanja i nejednolika širina spoja vrlo je dobro vidljiva na spojevima na uzorku materijala M10 (PU folija, transparentna). Veće odstupanja u širini se javljaju kod manjih brzina spajanja i visokih temperatura spajanja, dok kod većih brzina i većih temperatura spajanja odstupanje od širina spoja je manje, a razlog tome je kraće vrijeme

djelovanja temperature na materijal prilikom spajanja. Kod ostalih uzoraka materijala odstupanje od širine na početku i na kraju spoja je vrlo malo.

Kod uzorka spojeva nastalih spajanjem uzorka materijala oznake M11 na način LL, u x i y smjeru spajanja, utvrđeno je da pri većim brzinama spajanja izmjerena manja debljina spoja, isto tako i manje vrijednosti deformacijskog rada, te veće vrijednosti kompresibilnosti i sposobnosti oporavka. Vizualnom ocjenom, spoj spajan pri parametrima  $5 \text{ mmin}^{-1}$  i  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  nema naglašene istisnute rubove, a vrijednosti debljine  $h_m$  su samo za 25 % manje od debljine  $h_m$  izmjerene za dva sloja uzorka. Kod ovog uzorka materijala debljina spoja je značajnije manja, ali nema izrazito naglašenih istisnutih rubova. Vrijednosti deformacijskog rada WC i sposobnosti oporavka RC su za spoja spajan pri spomenutim parametrima veći nego za dva sloja materijala. Veće vrijednosti deformacijskog rada WC karakteristične su za uzorke koji su voluminozniji, a veće vrijednosti parametra RC karakteristične su za uzorke koji su puniji i mekši na opip.

Analizom rezultata mjerenja spojeva na uzorku materijala oznake M13 koji je spajan na način NN u x i y smjeru, vidljivo je da uzorci spojeva spajanih pri brzini od  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i temperaturama od  $300$  i  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ , imaju gotovo identične vrijednosti debljina, deformacijskog rada WC, kompresibilnosti C i sposobnosti oporavka RC. Vrijednosti svih kompresijskih parametara spojeva spajanih pri spomenutim parametrima su veće od vrijednosti kompresijskih parametara mjerena za dva sloja materijala, osim debljine spoja koja je manja za 30 % od debljine dva sloja materijala.

## 5.8 Čvrstoća spoja

Na temelju izmjerenih i prikazanih vrijednosti čvrstoće spojeva u poglavlju 4.5, analizirat će se rezultati za svaku tehniku spajanja zasebno. Statističkom analizom i primjenom višestruke linearne regresije utvrdit će se dali primjena različitih parametara spajanja utječe na čvrstoću spoja i koji parametar spajanja ima značajniju ulogu na vrijednost čvrstoće spoja uz statističku značajnost od 95 %.

### 5. 5. 1 Čvrstoća spoja nastalih primjenom tehnike ultrazvučnog spajanja

Analizom mjernih rezultata čvrstoće spojeva koji su nastali ultrazvučnim spajanjem uzorka materijala oznake M10 na način LL u x i y smjeru spajanja, utvrđeno je iz rezultata tab. 4.6 i prema sl. 4.57 a) i b) da veću čvrstoću spoja imaju uzorci spojeva spajani pri manjoj brzini spajanja od  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i pri većoj snazi ultrazvučnog spajanja od 252 W. Vrijednosti čvrstoće spoja pri ovim parametrima spajanja iznose u x smjeru 126,47 N, a u y smjeru spajanja 142,33 N. Povećanjem brzine spajanja dolazi do sve većeg opadanja čvrstoće spoja i pri brzini spajanja od  $7 \text{ mmin}^{-1}$  i 280 W, čvrstoća za spojeve u x smjeru spajanja je za 28 % niža, a u y smjeru spajanja za 31 %, od one maksimalne čvrstoće izmjerene za spoj spajan pri parametrima  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i 252 W. Kod uzoraka spajanih na način L1N1 čvrstoća spoja je vrlo visoka kod svih uzoraka spajanja, ali nešto veće vrijednosti čvrstoće spojeva su izmjerene kod uzoraka spojeva spajanih u x smjeru. Najveće vrijednosti čvrstoće su izmjerene pri uzorku spoja spajanog pri parametrima spajanja od  $5 \text{ mmin}^{-1}$  i 280 W gdje čvrstoća spoja iznosi  $F_{\max} = 288,07 \text{ N}$ , što je za 200 % veće vrijednost od one maksimalne čvrstoće izmjerene pri načinu spajanja LL: Iz ove usporedne podataka vidljivo je da način spajanja i raspored slojeva materijala značajno utječe na čvrstoću spoja kod uzorka materijala oznake M10. Statističkom obradom podataka upotrebom višestruke linearne regresije promatran je odnos utjecaja parametara spajanja i statistički značajniji utjecaj na čvrstoću spoja pri  $\alpha=0,05$  za uzorak materijala oznake M10 ima brzina spajanja, tab. 4.7.

Analizom rezultata mjerenja čvrstoće na uzorcima spojeva koji su nastali spajanjem uzorka materijala oznake M11 spajanog na način LL, NN, LN L1N1 u x i y smjeru najveća čvrstoća spajanja zabilježena je na uzorku spoja koji je spajan na način NN i pri parametrima spajanja  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i snazi od 372 W. Promatranjem vrijednosti izmjerenih čvrstoća spojeva spajanih na način LL, NN i LN je vidljivo da pri nižim brzinama spajanja, što odgovara duljem vremenu djelovanja ultrazvučnih titraja na materijal, i većoj snazi ultrazvučnog spajanja spojevi imaju veću čvrstoću. Usporedbom rezultata mjerenja uzoraka spojeva spajanih na način LN ( $F_{\max} = 39,53 \text{ N}$ ) i na način L1N1 ( $F_{\max} = 167,67 \text{ N}$ ) pri istim parametrima spajanja  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i 372 W. Vrijednosti čvrstoće spoja spajanih na način L1N1 su za oko 400 % veće od onih vrijednosti čvrstoće spajanih na način LN.

Statističkom analizom upotrebom višestruke linearne regresije promatran je odnos utjecaja parametara spajanja i statistički značajniji utjecaj pri  $\alpha = 0,05$  za uzorak materijala oznake M11 ima također brzina spajanja, tab. 4.7, kao i kod uzorka materijala oznake M10.

Kod uzoraka materijala oznake M12 ultrazvučnom tehnikom spajanja pozitivno je ocjenjeno samo nekoliko uzoraka spojeva i to spajanih pri istim parametrima spajanja na način NN, LN i L1N1 u x i y smjeru spajanja. Spojevi spajani na način NN i LN imaju slične vrijednosti za

čvrstoću oko  $F_{\max} = 30$  N, dok spojevi spajani na način L1N1 imaju veću čvrstoću za oko 350 %.

### 5. 5. 2 Čvrstoća spojeva nastalih primjenom tehnike visokofrekventnog spajanja

Na temelju rezultata mjerenja čvrstoće spojeva nastalih tehnikom visokofrekventnog spajanja na uzorku materijala oznaka M10 spajanog na način LL u x i y smjeru, tab. 4.8 i sl. 4.63, vidljivo je da povećanje vrijednosti čvrstoće spojeva raste s povećanjem jakosti anodne struje i to pri svim vremenima spajanja. Najveće očitane vrijednosti čvrstoće spojeva spojene su pri parametrima spajanja 7 s i 300 mA ( $F_{\max x} = 165,83$  N) i parametru 9 s i 220 mA ( $F_{\max x} = 178,33$  N). Najniže čvrstoće spojeva očitane su pri kraćem vremenu spajanja i manjoj jakosti anodne struje, 3 s i 220 mA ( $F_{\max y} = 48,68$  N). Upotrebom višestruke linearne regresije promatran je odnos utjecaja parametara spajanja na čvrstoću spoja pri  $\alpha = 0,05$  za uzorak materijala oznake M10, te je utvrđeno da oba parametra spajanja i vrijeme spajanja ( $b_1$ ) i jakost anodne struje ( $b_2$ ) imaju statistički značajan utjecaj na čvrstoću spoja, tab. 4.9.

Kod načina spajanja L1N1, istezanje je bilo preveliko i čvrstoća spojeva nije mogla biti izmjerena. Na nekim uzorcima spojeva je došlo do prekida na mjernom uzorku uz donju stezaljku, ali u spoju nije došlo do razdvajanja slojeva ili slično, što ukazuje da su vrlo veliku čvrstoću spoja.

Na uzorku materijala oznake M11 analizirane su vrijednosti čvrstoće na uzorcima spojeva spajanim na način LL i NN. Spojevi spajani na način LL imaju veće vrijednosti čvrstoće koje se kreću od 47 do 112 N, te su veće čvrstoće zabilježene su kod spojeva koji su spajani u y (uzdužnom) smjeru. Čvrstoća spojeva raste pri svim vremenima spajanja s povećanjem jakosti anodne struje. Najveće vrijednosti čvrstoće očitane su kod spajanja anodnom strujom od 300 mA. Vrijednosti čvrstoće spojeva spajanih na način NN značajno niže od onih spajanih na način LL za oko 500 %.

Usporedbom vrijednosti čvrstoća spojeva spajanih na način LN ( $F_{\max} = 4,63$  N) i L1N1 ( $F_{\max} = 36,63$  N), je vidljivo uzorci spojeva spajani na način L1N1 imaju veće vrijednosti čvrstoća od uzoraka spojeva spajanih na način LN. Vrijednosti čvrstoća spojeva spajanih na način L1N1 su veće od onih spajanih na način LL za oko 300 %. Statističkom analizom rezultata mjerenja upotrebom višestruke linijske regresije utvrđeno je da jakost anodne struje ( $b_2$ ) ima statistički značajan utjecaj na čvrstoću spojeva pri statističkoj značajnosti od 95 %, tab. 4.9.

Analizom mjernih rezultata čvrstoće spojeva, na uzorku materijala oznake M12, spajanog na način LL u x i y smjeru spajanja, vidljivo je da je veće vrijednosti čvrstoće imaju spojevi spajani pri većim jakostima anodne struje. Najveća vrijednost čvrstoće spoja izmjerena je na

uzorcima spojeva spajanih u x smjeru pri vremenu od 7 s i 300 mA i iznosi  $F_{\max} = 45,90$  N. Također je na uzorcima spojeva spajanih na način NN u x smjeru pri istim parametrima spajanja od 7 s i 300 mA, očitana najveća vrijednost čvrstoće i ona iznosi  $F_{\max} = 57,90$  N. Usporedbom rezultata mjerenja čvrstoće spojeva za uzorke spojeva spajane na način LN i L1N1, utvrđeno je da pri većim jakostima anodne struje i duljim djelovanjem spajanja, čvrstoća spoja raste. Uzorci spojeva spajani na način L1N1 imaju veće očitane vrijednosti za oko 360 %. Statističkom analizom rezultata mjerenja upotrebom višestruke linijske regresije utvrđeno je da oba parametra spajanja (vrijeme spajanja  $b_1$  i jakost anodne struje  $b_2$ ) imaju statistički značajan utjecaj na čvrstoću spojeva pri statističkoj značajnosti od 95 %, ali samo za spojeve spajane na način LL. Za spojeve spajane na način NN; LN i L1N1 regresijskim modelom na temelju rezultata ispitivanja nije dokazana statistička značajnost i veći utjecaj pojedinog parametra na čvrstoću spoja, tab. 4.9.

### 5. 5. 3 Čvrstoća spojeva nastalih primjenom spajanja toplinskom kondukcijom

Na temelju rezultata mjerenja čvrstoće spojeva nastalih spajanjem vrućim klinom na uzorku materijala oznake M10, spajanog na način LL u x i y smjeru, tab. 4.10 i sl. 4.71, vidljivo je da spojevi spajani pri većim temperaturama spajanja (400 i 450 °C), pri svim brzinama spajanja, imaju veće čvrstoće. Najveće vrijednosti čvrstoće očitane su na spoju spajanom pri parametrima spajanja od 400 °C i 3  $\text{mm}^{-1}$  i iznosi  $F_{\max} = 106,57$  N. Kod uzoraka spajanih na način L1N1 također najveće vrijednosti čvrstoće očitane su pri najvećim temperaturama spajanja pri svi brzinama spajanja. Najveća izmjerena vrijednost čvrstoće očitana je pri parametrima spajanja od 450 °C i 3  $\text{mm}^{-1}$  i iznosi  $F_{\max} = 448,50$  N, što je oko 420 % veća vrijednost čvrstoće od one kod spojeva spajanih na način LL. Statističkom analizom rezultata mjerenja upotrebom višestruke linijske regresije utvrđeno je da vrijednosti temperature spajanja ( $b_2$ ) ima statistički značajniji utjecaj na čvrstoću spojeva.

Na uzorku materijala oznake M11, spojevi su spajani na način NN u x smjeru imaju pozitivnu ocjenu vizualnog izgleda, a analizom izmjerenih vrijednosti čvrstoće spojeva, utvrđeno je da je najveća vrijednost čvrstoće spoja postignuta pri parametrima spajanja 350 °C i 5  $\text{mm}^{-1}$  i iznosi  $F_{\max} = 46,13$  N. Na uzorku materijala oznake M13 koji je spajan na način NN u x i y smjeru spajanja, najveća vrijednost je postignuta pri spoju spajanom u y smjeru i pri parametrima spajanja od 300 °C i 3  $\text{mm}^{-1}$  i iznosi  $F_{\max} = 60,30$  N. Na temelju rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva na uzorku materijala oznake M14, najveća vrijednost čvrstoće spoja očitana je na uzorku spajanom na način LL u y smjeru spajanja i pri parametrima spajanja 300 °C i 4  $\text{mm}^{-1}$  i iznosi  $F_{\max} = 44,63$  N. Kod ove tehnike spajanja na uzorcima

materijala oznaka M11, M13 i M14 zbog malog broja pozitivno ocijenjenih uzoraka spojeva nije provedena statistička analiza upotrebom višestruke linijske regresije.

#### 5. 5. 4 Čvrstoća spojeva nastalih primjenom spajanja toplinskom konvekcijom

Na temelju analize izmjerenih vrijednosti čvrstoća spojeva, nastali spajanjem vrućim zrakom pri različitim parametrima spajanja, utvrđeno je za uzorak materijala oznake M10 koji je spajan na način LL i L1N1 u x i y smjeru spajanja, da je pri parametrima spajanja od 450 °C i 4 mm<sup>-1</sup> očitana najveća vrijednost čvrstoće spoja. Spoj spajan na način LL u x smjeru ima najveću vrijednost čvrstoće i iznosi  $F_{\max} = 100,80$  N, a za spoj spajan na način L1N1, iznosi  $F_{\max} = 386,93$  N. Pri istom parametru spajanja čvrstoća spoja za spoj spajan na način L1N1 je za oko 380 % veća od one čvrstoće očitane kod spoja spajanog na način LL.

Na uzorku materijala oznake M11 vrijednosti čvrstoće spojeva su nešto veće kod većih temperatura spajanja. Najviše vrijednosti čvrstoće spoja očitane su kod parametra spajanja 400 °C i 5 mm<sup>-1</sup> i iznosi  $F_{\max} = 61,70$  N. Mjerenja čvrstoće spojeva na uzorku oznake M13 su također veća pri većim temperaturama spajanja i najveća vrijednost čvrstoće očitana je pri parametru spajanja 350 °C i 3 mm<sup>-1</sup> i iznosi  $F_{\max} = 62,80$  N. Na uzorku materijala najveća vrijednost čvrstoće spoja očitana je pri parametrima spajanja 450 °C i 5 mm<sup>-1</sup> i iznosi  $F_{\max} = 27,57$  N.

Kod ove tehnike zbog malog broja pozitivno ocijenjenih uzoraka spojeva nije provedena statistička analiza upotrebom višestruke linijske regresije.

#### 5. 5. 5 Čvrstoća spojeva nastalih primjenom kombinacije šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom

Spojevi nastali kombinacijom konvencionalnog šivanja i spajanja adhezivne trake širine 22 mm vrućim zrakom pri istim parametrima spajanja, koji su definirani zasebno za svaki uzorak materijala, a mijenjali su se parametri kojima su šivani uzorci (duljini uboda i finoća igle), ispitani su na kidalici. Analizom mjernih rezultata utvrđeno je za uzorak materijala oznake M11 koji je spajan u x i y smjeru spajanja pri parametrima spajanja od 250 °C i 3 mm<sup>-1</sup>, da najveće vrijednosti čvrstoće imaju spojevi koji su šivani s duljinom uboda od 3 mm i iglom finoće 90 Nm, te iznosi  $F_{\max y} = 130,10$  N. Kod uzorka materijala oznake M12, koji je spajan u x i y smjeru pri parametrima spajanja od 220 °C i 3 mm<sup>-1</sup>, ispitana je čvrstoća spoja.

Analizom mjernih rezultata utvrđeno je da najveće vrijednosti čvrstoće imaju spojevi koji su šivani s duljinom uboda od 2 mm i iglom finoće 100 Nm, te iznosi  $F_{\max x} = 48,30$  N.

Kod uzorka materijala oznake M13, koji je spajan u x i y smjeru pri parametrima spajanja od 400 °C i 4 mmin<sup>-1</sup>, ispitana je čvrstoća spoja. Analizom mjernih rezultata utvrđeno je da najveće vrijednosti čvrstoće imaju spojevi koji su šivani s duljinom uboda od 3 mm i iglom finoće 90 Nm, te iznosi  $F_{\max x} = 362,00$  N.

Analizom mjernih rezultata utvrđeno je za uzorak materijala oznake M14 koji je spajan u x i y smjeru spajanja pri parametrima spajanja od 400 °C i 4 mmin<sup>-1</sup>, da najveće vrijednosti čvrstoće imaju spojevi koji su šivani s duljinom uboda od 3 mm i iglom finoće 100 Nm, te iznosi  $F_{\max x} = 91,20$  N.

Statističkom analizom upotrebom višestruke linearne regresije na temelju rezultata ispitivanja, na uzorku materijala oznake M11 statistički značajniji utjecaj na čvrstoću spojeva ima duljina uboda. Za ostale uzorke materijala oznaka M12, M13 i M14 nije dokazana statistička značajnost i veći utjecaj pojedinog parametra na čvrstoću spoja, tab. 4.14.

Vrijednosti ispitanih čvrstoća uzoraka materijala bez spoja, ispitane na isti način kao i spojevi, prikazane su u tablici 5.2.

#### 5. 5. 6 Usporedba vrijednosti čvrstoće uzoraka materijala i najviše izmjerene vrijednosti čvrstoće spojeva spajanih visokotehnološkim tehnikama spajanja

Na temelju izmjerenih vrijednosti čvrstoće uzoraka materijala oznaka M10, M11, M12, M13 i M14 i čvrstoće spojeva spajanih visokotehnološkim tehnikama spajanja.

Vrijednosti ispitanih čvrstoća uzoraka materijala bez spoja, ispitane na isti način kao i spojevi, prikazane su u tab. 5.2.

U tab. 5.3 prikaz je najveće izmjerene vrijednosti čvrstoće spoja kod svih korištenih tehnika spajanja i kombinirane tehnike šivanja i toplinskog spajanja toplinskom konvekcijom.



Tab. 5.2 Prikaz rezultata mjerenja čvrstoće uzoraka materijala oznaka M10, M11, M12, M13 i M14

Smjer spajanja	Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije
	F <sub>max</sub> /N	σ [N]	CV [%]
Materijal oznake M10			
x	405,40	132,38	32,65
y	445,87	96,74	21,70
Materijal oznake M11			
y	239,73	11,12	4,64
x	390,80	50,91	13,03
Materijal oznake M12			
x	189,50	13,29	7,01
y	237,20	14,03	5,92
Materijal oznake M13			
y	211,00	24,16	11,45
x	318,43	39,85	12,51
Materijal oznake M14			
x	159,17	7,23	4,54
y	203,03	16,50	8,13

U tab. 5.3 prikaz je najveće izmjerene vrijednosti čvrstoće spoja kod svih korištenih tehnika spajanja i kombinirane tehnike šivanja i toplinskog spajanja toplinskom konvekcijom

Tab. 5.3 Prikaz rezultata mjerenja najveće vrijednosti čvrstoće spoja za svaku tehniku spajanja

Materijal oznake	Čvrstoća spoja F <sub>max</sub> /N				
	Ultrazvučna tehnika spajanja	Visokofrekventna tehnika spajanja	Spajanje toplinskom kondukcijom	Spajanja toplinskom konvekcijom	Kombinacija šivanja i toplinskog spajanja konvekcijom
Materijal oznake M10	288,07	178,19	448,50	386,93	-
Materijal oznake M11	167,67	112,87	46,13	61,70	130,10
Materijal oznake M12	115,17	179,47	-	-	48,30
Materijal oznake M13	-	-	60,30	62,80	362,20
Materijal oznake M14	-	-	44,63	27,57	91,20

Usporedbom podataka iz tab. 5.2 i tab. 5.3 vidljivo je da uzorak materijala oznake M10 ima vrlo visoke vrijednosti čvrstoće spoja kod svih tehnika spajanja, a najviša vrijednost je izmjerena kod spoja koji je spajan toplinskom kondukcijom i iznosi  $F_{max} = 448,50$  N, što je više nego izmjerena vrijednost uzorka materijala oznake M10. Najviša vrijednost čvrstoće spoja za uzorak materijala oznake M11 izmjerena je kod spoja spajanog tehnikom ultrazvučnog spajanja  $F_{max} = 167,67$  N. Na uzorku materijala oznake M12 najveća čvrstoća izmjerena je kod spoja koji je spajan visokofrekventnom tehnikom spajanja ( $F_{max} = 179,47$  N).

Vrijednosti spoja su niže od izmjerene vrijednosti za uzorak materijala vidljive u tab. 5.2. Najviša vrijednost čvrstoće spoja za uzorak materijala oznake M13 izmjerena je kod spoja spajanog toplinskom konvekcijom  $F_{\max} = 362,20$  N, što je više nego čvrstoća uzorka materijala oznake M13. Na uzorku materijala oznake M14 najveća čvrstoća izmjerena je kod spoja koji je spajan toplinskom konvekcijom i čvrstoća iznosi  $F_{\max} = 91,20$  N.

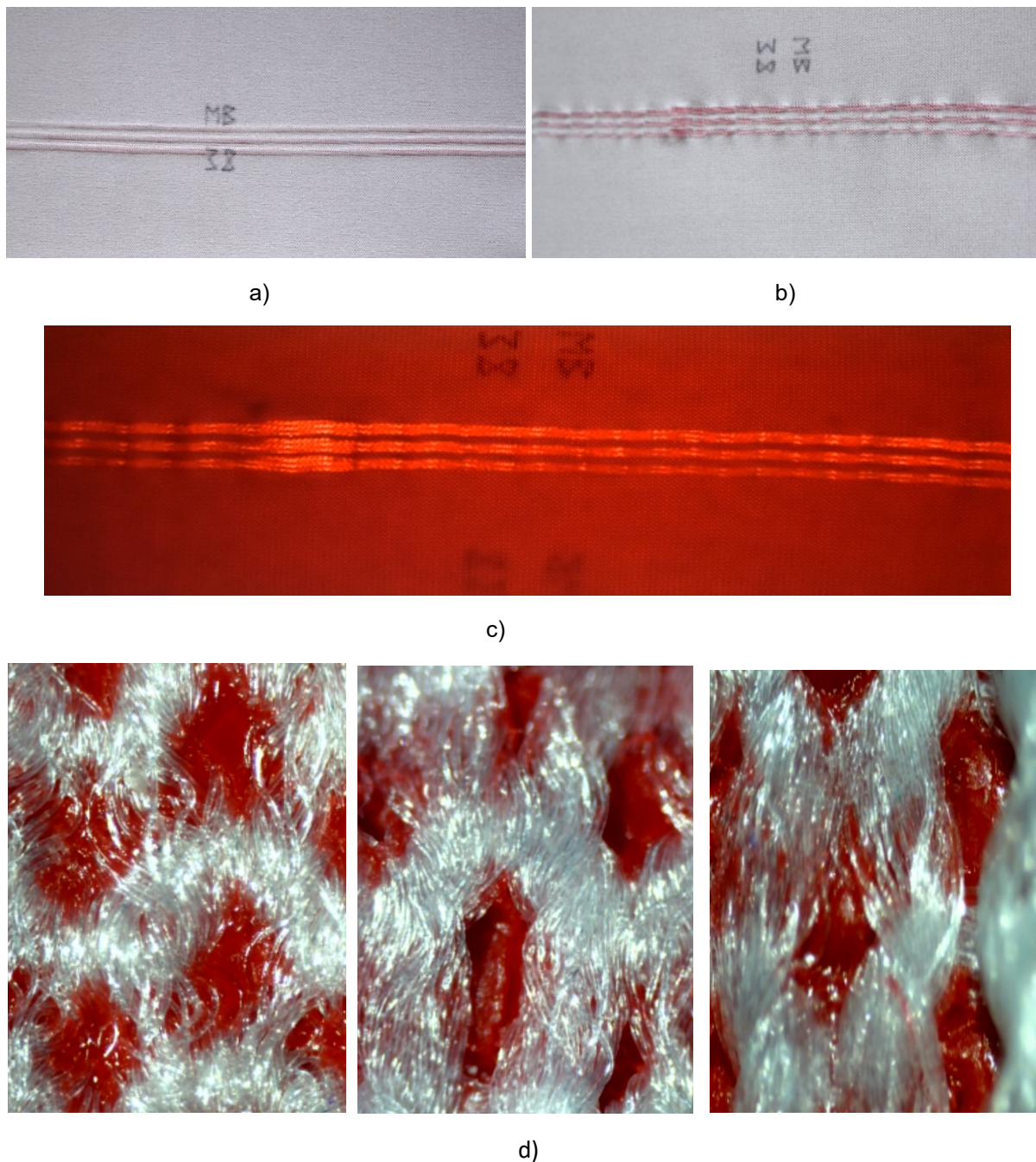
### 5.6 Zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva

Na temelju rezultata mjerenja za svaku tehniku spajanja bit će dat osvrt prema podacima u tab. od 4.15 do 4.19.

Na temelju rezultata mjerenja zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti, uzorci spojeva nastali tehnikom ultrazvučnog spajanja na uzorku materijala oznake M10, su svi zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od minimalno 0,1 bar. Kod uzoraka materijala oznake M11, uzorci spojeva spajani na način LL, LN i L1N1 pri nižim brzinama spajanja su zrakonepropusni i vodonepropusni pri tlaku od minimalno 0,1 bar. Oni uzorci spojeva koji su spajani pri većim brzinama spajanja su zrakonepropusni i vodonepropusni ali mjerenja zrakonepropusnosti su izvedena pri nižem tlaku (0,05 bara). Spojevi spajani na način NN su zrakopropusni i vodopropusni. Spojevi na uzorku materijala oznake M12 spojeni ultrazvučnom tehnikom na način LL su zrakonepropusni i vodonepropusni, spojevi spajani na način NN su zrakopropusni i vodopropusni, a spojevi spajani na način LN su zrakopropusni ali vodonepropusni, mjereno pri tlaku od 0,05 bara.

Na sl. 5.5 prikaz je spojeva na uzorku materijala oznake M11 kod kojih su vidljiva mikro oštećenja materijala u zoni spoja, koja nastaju uslijed primjene neadekvatnih parametara spajanja, a tako izravno utječu na svojstvo zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti, ali i na ostala svojstva spoja.

Analizom mjerenja na uzorcima spojeva spojenim tehnikom visokofrekventnog spajanja na uzorku materijala oznake M10 gotovo svi su zrakonepropusni i vodonepropusni, ali dva uzorka spojeva koji su spojeni pri nižim jakostima anodne struje su zrakopropusni i vodopropusni. Nadalje, na uzorku materijala oznake M11 spojevi spojeni na način LL imaju pri svim parametrima pozitivne ocijene, tj. zrakonepropusni i vodonepropusni su. Kod uzoraka spojeva spojenih na način NN, LN i L1N1, ne ostvaruju pozitivnu ocjenu, tj. oni su zrakopropusni i vodopropusni. Na uzorku materijala oznake M12, uzorci spajani na način LL, NN, LN i L1N1 imaju pozitivne vrijednosti, osim uzorka koji je spojen pri vrlo malim jakostima anodne struje.



**SI. 5.5** Prikaz spojeva na uzorku materijala oznake M11 spajanih ultrazvučnom tehnikom spajanja a) Dobar spoj; b) Loš spoj (oštećenje materijala u zoni spoja); c) Loš spoj i oštećenja; d) Mikroskopske snimke spoja, prijelaz PU omekšanog nasloja u pletiva

Uzorci spojeva spajani toplinskom kondukcijom na uzorku materijala oznake M10, analizom rezultata mjerenja vidljivo je da su svi uzorci spojeva pozitivno ocjenjeni. Kod ostalih uzoraka materijala oznaka M11 i M13 svi spojevi su zrakopropusni i vodopropusni. Uzorci spojeva na uzorku materijala oznake M14 pozitivnu su ocjenjeni uzorci spajani na način LL, a negativno oni na način LN i L1N1.

Analizom rezultata mjerenja kod spajanja toplinskom konvekcijom na uzorku materijala oznake M10, vidljivo je da su svi uzorci spojeva zrakonepropusni i vodonepropusni. Spojevi na uzorku materijala oznake M11 su zrakopropusni i vodopropusni. Na uzorku materijala oznake M13 samo spoj spajan pri parametrima  $5 \text{ mmin}^{-1}$  i  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  je zrakonepropusan, ali vodopropusan pri tlaku od 0,05 bara. Spojevi spajani na uzorku materijala oznake M14 su pozitivno ocjenjeni.

Spojevi nastali kombinacijom šivanja i spajanja vrućim zrakom kod svih uzoraka materijala imaju pozitivne vrijednosti, tj. spojevi su zrakonepropusni i vodonepropusni pri duljini uboda od 3 mm, kod manje duljine uboda od 2 mm, što bi odgovaralo većem broju proboja igle na zadanu duljinu materijala uzorci spojeva su zrakopropusni i vodopropusni.

## 5.7 Debljina spojeva

Na temelju mjernih rezultata izmjerenih na uzorku materijala oznake M11 koji je spajan na način NN pri navedenim parametrima spajanja, vidljivo je da debljina spoja mjereno na pozicijama  $h_{s1}$  i  $h_{s2}$  je manja od debljine mjerene za dva sloja materijala za oko 13 %, kod svih parametara spajanja. Debljine istisnutih rubovima mjerene s gornje strane spoja, najveće vrijednosti su očitane na pozicijama  $\Delta h_{3,5}$ , pri parametru spajanja  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i  $252 \text{ W}$ , i ona je oko 600 % veća od debljine mjerene za dva sloja materijala. Iz analize mjernih rezultata spajanja ultrazvučnom tehnikom spajanja, uzorka materijala oznake M12, spajan na način LN pri brzini od  $3 \text{ mmin}^{-1}$  i snagama od 252, 280 i 332 W, vidljivo je da su vrijednosti debljina spoja na pozicijama  $h_{s1}$  i  $h_{s2}$  su gotovo iste, te u tim pozicijama uzorak spoja ima manje vrijednosti debljine od debljine izmjerene za dva sloja materijala, za oko 20 %. Promatranjem vrijednosti debljine istisnutih rubova na spojevima, vidljivo je da su najveće vrijednosti očitane na poziciji mjerenja  $\Delta h_{3,5}$  mjereno s gornje strane pri snazi ultrazvučnog spajanja od 332 W.

## 5.8 Gustoća energije po volumenu kod ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja

Na temelju poznatih ulaznih parametara, izračunata je gustoća energija po volumenu za spoj duljine 20 cm kod ultrazvučnog i visokofrekventnog spajanja. Za svaki uzorak materijala i tehniku spajanja izračunata je se energija samo za pozitivno ocjenjene uzorke spojeva, ne

one koji su bili slabo spojeni ili oštećeni prilikom spajanja. Iz rezultata izračuna prikazanih u tab. 4.25 gledano za sve uzorke materijala, vidljivo je da porastom snage ultrazvučnog spajanja značajno rastu vrijednosti gustoće energije po volumenu koja je utrošena prilikom ultrazvučnog spajanja i to pri svim brzinama spajanja. Najveća gustoća energije po volumenu potrebna je za spajanje uzorka materija oznake M10 kod parametara spajanja  $3 \text{ mmin}^{-1}$  (3,6 s) i snazi spajanja 372 W, i iznosi  $1555,40 \text{ Ws cm}^{-3}$ . Najmanja vrijednost gustoće energije po volumenu iznosi  $394,89 \text{ Ws cm}^{-3}$ , i utrošena je za spajanje spoja duljine 20 cm pri parametrima spajanja  $7 \text{ mmin}^{-1}$  (1,7 s) i snazi spajanja 200 W. Razlika između dvije vrijednosti gustoće energije po volumenu je vrlo velika i iznosi oko 390 %. Kod ultrazvučnog spajanja uzorka materijala oznake M11 koji ima debljinu za dva sloja 0,110 cm, najveće vrijednosti gustoće energije po volumenu izračunate su za spoj spajan pri parametrima spajanja  $3 \text{ mmin}^{-1}$  (3,6 s) i snazi spajanja 372 W i iznosi  $579,24 \text{ Ws cm}^{-3}$ . Najmanja vrijednosti gustoće energije izračunata je kod najveće brzine spajanja  $7 \text{ mmin}^{-1}$  (1,7 s) i snazi spajanja od 372 W i iznosi  $273,53 \text{ Ws cm}^{-3}$ . Kod uzorka materijala oznake M12, najveća vrijednost gustoće energije iznosi  $812,13 \text{ Ws cm}^{-3}$  i očitana je pri parametru spajanja  $3 \text{ mmin}^{-1}$  (3,6 s) i snazi spajanja 372 W. Najmanja vrijednost gustoće energije iznosi  $483,20 \text{ Ws cm}^{-3}$  i očitana je pri parametru spajanja  $5 \text{ mmin}^{-1}$  (2,4 s) i snazi spajanja 332 W.

Kod visokofrekventne tehnike spajanja izračunavana je gustoća energije po volumenu na uzorcima spojeva oznaka M10, M11 i M12 za duljinu od 20 cm, ali samo za parametre spajanja koji su pozitivno ocjenjeni. Temeljem izračunatih podataka vidljivo je da pri dužem vremenu spajanja npr. 7 i 9 s, vrijednosti gustoće energije su najviše. Izračunato je da kod spajanja uzorka materijala M10, čija debljina dva sloja iznosi 0,041 cm, najveće vrijednosti gustoće energije po volumenu iznosi  $15582 \text{ Ws cm}^{-3}$ , pri parametrima spajanja 9 s i 180 mA. Pri parametrima spajanja 7 s i 180 mA izračunate su niže vrijednosti gustoće energije  $12119 \text{ Ws cm}^{-3}$ . Najmanja vrijednost gustoće energije po volumenu iznosi  $5188,3 \text{ Ws cm}^{-3}$  i izračunata je pri parametrima spajanja 3 s i 260 mA. Razlika između najveće i najmanje vrijednosti gustoće energije po volumenu je velika i iznosi oko 300 %. Kod spojeva nastalih na uzorku materijala oznake M11 vrijednosti gustoće energije po volumenu su niže od onih kod uzorka materijala oznake M10. Izračunate vrijednosti energije se kreću od najveće  $5796,3 \text{ Ws cm}^{-3}$ , izračunate kod parametra spajanja 9 s i 220 mA i one najniže  $1930,5 \text{ Ws cm}^{-3}$  izračunate pri kraćem vremenu spajanja 3 s i 260 mA. Na uzorku materija oznake M12, najveća vrijednost gustoće energije iznosi  $7757,9 \text{ Ws cm}^{-3}$  i očitana je pri duljem vremenu spajanja od 9 s i jakosti anodne struje od 220 mA. Najmanja vrijednost gustoće energije izračunata je za spoj spajan pri kraćem vremenu spajanja od 3 s i manjoj jakosti anodne struje 260 mA i iznosi  $2583,7 \text{ Ws cm}^{-3}$ .

Na temelju izračunatih vrijednosti vrlo lako se može izračunati i vrijednost za druge duljine spojeva, ovisno o veličini krojnog dijela, broju slojeva materijala i dr. Analizom dobivenih podataka može se izračunati i koliko je energije potrebno za izradu jednog odjevnog predmeta ili samo segmenta koji se spaja i/ili ugrađuje u odjevni predmet.

Na sl. 4.90 a) prikaz je analize utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spojeva spajanih ultrazvučnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M10. Iz grafičkog prikaza vidljivo je da pri većim vrijednostima gustoće energije po volumenu kod spajanja su izmjerene i veće čvrstoće ultrazvučnih spojeva. Kod uzorka materijal oznake M11 na sl. 4.90 b) je vidljivo da je pri većim vrijednostima gustoće energije po volumenu i čvrstoća spojeva veća. Iz oba prikaza 4.90 a) i b) je vidljivo da su veće čvrstoće spojeva izmjerene pri nižim brzinama ultrazvučnog spajanja i pri višim vrijednostima snage spajanja.

Na sl. 4.91 a) analizirani su spojevi spojeni visokofrekventnom tehnikom spajanja na uzorku materijala oznake M10. Iz grafičkog prikaza vidljivo je pri dužem vremenu spajanja i većim vrijednostima jakosti anodne struje, tj. višim vrijednostima gustoće energije po volumenu izmjerene su i najviše vrijednosti čvrstoće spojeva. Kod visokofrekventnog spajanja uzoraka materijala oznake M11 prikazanog na sl. 4.91 b) analizom je utvrđeno da pri kraćem vremenu spajanja od 3 i 5 s pri višim vrijednostima jakosti anodne struje od 300 mA, tj. nižim vrijednostima gustoće energije po volumenu su izmjerene najveće vrijednosti čvrstoća spojeva.

## 6 ZAKLJUČCI

Na temelju postavljenih hipoteza i ciljeva ovog doktorskog rada, ispitana su i analizirana svojstva spojeva načinjenih visokotehnološkim metodama spajanja, a utvrđeni rezultati izmjerenih svojstava spojeva i zaključci služe za odabir optimalnih parametara spajanja dijelova odjeće specijalnih namjena kao i spajanja ugradbenih dijelova inteligentnog odjevnog predmeta.

Istraživanja vezana uz temu doktorskog rada započeta su od početne hipoteze, da suvremenu zaštitnu i inteligentnu odjeću nije moguće realizirati samo konvencionalnim šivanjem, već je nužna upotreba visokotehnoloških metoda spajanja kojima se mogu zadovoljiti svi zahtjevi specifične odjeće s visokom dodanom vrijednosti. Na temelju ove postavke, započeta su istraživanja primjene visokotehnoloških tehnika spajanja i utjecaja parametara spajanja na kvalitetu i svojstva spojeva. Za eksperimentalni dio ovog doktorskog rada izrađeno je više od 1800 različitih uzorka spojeva koji su analizirani i ocjenjivani. Spajano je pet uzoraka tekstilija, na nekoliko načina spajanja slojeva materijala (LL, NN, LN i L1N1) u poprečnom (x) i uzdužnom (y) smjeru. Na temelju vizualne procjene kvalitete spojeva, spojevi su ocjenjivani u dvije faze, te samo spojevi s dodijeljenim ocjenama 3, 4 i 5 nakon druge faze ocjenjivanja, su ispitivani na vlačna, smična, savojna i kompresijska svojstva (KES-FB), zatim im je ispitana čvrstoća, zrakonepropusnost, vodonepropusnost spoja i debljina spoja. Na temelju ulaznih parametara izračunata je gustoća energije po volumenu na duljini od 20 cm.

Već pri ocjenjivanju vizualne kvalitete spojeva može se utvrditi koji parametri pozitivno utječu na kvalitetu spoja, ali isto tako i način rasporeda slojeva materijala (način spajanja) i smjer spajanja u x smjeru (poprečno na materijal) ili y smjeru (uzdužno na materijal) značajno utječu na kvalitetu spoja.

Rezultati provedenih istraživanja, njihova sustavna analiza, usporedba i obrada, omogućuju donošenje zaključnih postavki ovog doktorskog rada, važnog za primjenu visokotehnoloških tehnika spajanja na navedenim uzorcima materijala.

Primjena adekvatnih vrijednosti parametara spajanja i njihova kombinacija značajno utječu na svojstva spojeva, a time i na kvalitetu spoja. Upotreba jedne kombinacije parametara npr. duže vrijeme spajanja i veće vrijednosti jakosti anodne struje kod spojeva spajanih visokofrekventnom tehnikom spajanja neće pozitivno utjecati na sva svojstva, kod svih uzoraka materijala. Neka

svojstva će biti bolja, a neka lošija, pa treba prema definiranim specifičnim zahtjevima odrediti prioriteta svojstva, npr. čvrstoća spoja, a da ostala svojstva isto tako imaju pozitivan utjecaj na kvalitetu spoja. Za svako ispitivano svojstvo spoja prikazani su zaključci prema tehnikama spajanja:

### **6.1 Ultrazvučna tehnika spajanja i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva**

- Proučavanjem svojstava spojeva nastali primjenom ultrazvučnog spajanja, iz analize rezultata vlačnih svojstava spojeva, vidljiv je različit utjecaj parametara spajanja na uzorke materijala, ali i način spajanja LL, NN, LN i L1N1 utječe na vrijednosti parametara vlačnih svojstava. Pri nižim vrijednostima snage spajanja očitane su nešto više vrijednosti deformacijskog rada WT, te nešto niže vrijednosti sposobnosti oporavka RT. Vrijednosti istezanja spojeva su za 50 % veće kod uzoraka spojeva spojenih na način L1N1, od onih na način spajanja LL.
- Utjecaj parametra spajanja na smična svojstva promatran je kroz vrijednosti smičnih parametara, smične krutosti G i histereze smičnih sila 2HG i 2GH5, te njihove niže vrijednosti imaju povoljniji utjecaj na spoj. Uzorci spajani na način LL imaju više vrijednosti svih smičnih parametara, oni su kompaktniji i krući od uzoraka spajanih na NN, a najniže vrijednosti smičnih parametara imaju uzorci spajani na način L1N1.
- Analizom rezultata savojnih svojstava spojeva, vidljiv je utjecaj parametara spajanja na vrijednosti parametara savojnih svojstava. Povoljnija savojna svojstva imaju niže vrijednosti krutosti savijanja B i histereze krutosti savijanja 2HB, i karakteristične za spojeve koji imaju veću fleksibilnost tj. veću elastičnu savitljivost. Bolja savojna svojstva spojeva postižu se pri spajanju pri nižim brzinama spajanja od 3 i 5  $\text{mm}^{-1}$  te ovisno o uzorku materijala, ali većim vrijednostima snage spajanja, pri kojima su uzorci ostvarili pozitivnu ocjenu na temelju vizualne procjene kvalitete spoja. Uzorci spojeva spajani na način L1N1 kod svih uzoraka materijala imaju značajno niže vrijednosti savojnih parametara, za 30 %, a time bolja savojna svojstva i veću fleksibilnost spoja.
- Proučavanjem odnosa utjecaja parametara spajanja na vrijednosti izmjerenih parametara kompresijskih svojstava, uočeno je da vrlo bitan faktor koji utječe na vrijednosti svih



kompresijskih parametara je intenzitet istisnutih rubova, čija se debljina prikazuje kompresijskim parametrom  $h_m$ . Manje vrijednosti debljine  $h_m$  ukazuju da spoj ima blago istisnute rubove, a veće izmjerene vrijednosti  $h_m$  upućuju na jači intenzitet istisnutih rubova. Vrlo naglašeni istisnuti rubovi su deformacije koje nastaju kod dovođenja i/ili iniciranja prevelike količine topline u zoni spajanja. Omekšani materijal se iz područja zahvaćenog djelovanju topline, djelovanjem pritiskne sile, istiskuje u rubove spoja. Vrijednosti ostalih kompresijskih parametara koje su izmjerene pri većoj debljini  $h_m$  su više vrijednosti deformacijskog rada WC i manje vrijednosti sposobnosti oporavka RC.

Povoljnija kompresijska svojstva imaju spojevi koji nemaju izrazito naglašene istisnute rubove, a vrijednosti kompresijskih parametara su niže vrijednosti  $h_0$  i  $h_m$ , niže vrijednosti deformacijskog rada WC i veću sposobnost oporavka RC. Da bi se postigli spojevi s vrlo blagim istisnutim rubovima, potrebno je koristiti veću brzinu spajanja i veću snagu ultrazvučnog spajanja.

- Iz rezultata ispitivanja čvrstoće spojeva i utjecaja različitih parametara spajanja zaključeno je da na čvrstoću spojeva spojenih ultrazvučnom tehnikom spajanja značajan utjecaj imaju parametri spajanja ali i način spajanja. Najveće vrijednosti čvrstoće spojeva izmjerene su kod spojeva spajanih pri nižim brzinama spajanja (što odgovara dužem vremenu djelovanja ultrazvučnih titraja na materijal) i većim snagama ultrazvučnog spajanja. Ovi spojevi kod svih uzoraka materijala imaju naglašene istisnute rubove, ali nemaju oštećenja materijala u zoni spoja. Statističkom analizom utvrđeno je da statistički značajniji utjecaj na čvrstoću spoja ima parametar brzina spajanja. Značajan utjecaj ima i način spajanja, te su veće vrijednosti čvrstoće spojeva zabilježene kod spojeva spajanih na način LL. Razlog tome je što prilikom spajanja na način LL dolazi do omekšavanja PU nasloja koji s lica materijala unutra zone spoja prelazi u strukturu pletiva na naličje spoja. Vrijednosti čvrstoća spojeva spajanih L1N1 su za od 200 do 450 % veće u odnosu na ostale načine spajanja (LL, NN, LN).

- Utvrđeno je da na svojstva zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti materijala utječu parametri ultrazvučnog spajanja, način rasporeda slojeva materijala prilikom spajanja ali i konstrukcijske karakteristike materijala. Uzorci spajani na način LL, LN i pri većim snagama ultrazvučnog spajanja i su zrakonepropusni i vodonepropusni.

- Utvrđeno je da parametri spajanja imaju utjecaj i na debljinu spojeva i debljinu istisnutih rubova. Iz rezultata ispitivanja provedena na uzorku materijala oznake M11 (NN), utvrđeno je da pri nižim snagama spajanja i manjoj brzini spajanja postoji veća razlika između debljine spoja

(udubina na spoju) i istisnutih rubova (brjegova na spoju), nego kod većih snaga spajanja. Vrijednosti promjena debljina na uzorku spojeva spajanih na uzorku materijala oznake M12 (LN) spajani pri brzini od  $3 \text{ mm}^{-1}$  i snagama 280, 332 i 370 W pokazuju da su pri većim snagama spajanja očitane najveće vrijednosti debljina istisnutih rubova. Utvrđeno je da osim parametara spajanja i način spajanja utječe na debljinu spoja i istisnutog ruba.

- Iz analize izračuna gustoće energije po volumenu na duljinu spoja od 20 cm, zaključeno je da veći utrošak energije po volumenu je potreban za spajanje pri manjoj brzini spajanja (tj. dužem vremenu djelovanja ultrazvučnih titraja na materijal) i većim snagama spajanja. Utjecaj na gustoću energije po volumenu imaju parametri spajanja, uzorak materijala i njegove konstrukcijske karakteristike, sastav, ali i debljina materijala. Najviše gustoće energije inicirano je kod uzorka materijala oznake M10 (PU 100 %, i najmanja debljina dva sloja materijala 0,041 cm). Prosječna gustoća energije kod ultrazvučnog spajanja za uzorak materijala oznake M10 na  $1 \text{ cm}^3$  je  $52 \text{ Wscm}^{-3}$ .

- Analizom utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spoja kod ultrazvučnog spajanja utvrđeno je da pri nižim brzinama ultrazvučnog spajanja i višim snagama spajanja, tj. iz izračuna proizlazi, većim vrijednostima utrošene gustoća energije po volumenu, spojevi imaju veću čvrstoću.

Kod ultrazvučnog spajanja pri nižim brzinama spajanja i višim vrijednostima snage ultrazvučnog spajanja također su izmjerene i najviše vrijednosti za debljinu istisnutog ruba, stoga se može zaključiti da kod pozitivno ocijenjenih spojeva, bez oštećenja u zoni spoja, veće vrijednosti istisnutog ruba ne utječu na čvrstoću spoja.

## **6.2 Visokofrekventna tehnika spajanja i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva**

- Iz vrijednosti parametara vlačnih svojstava spojeva nastali primjenom visokofrekventnog spajanja vidljiv je utjecaj primijenjenih parametara spajanja, ali vrijednosti vlačnih parametara nemaju velike razlike. Pri većim vrijednostima jakosti anodne struje pri svim vremenima spajanja nešto su veće vrijednosti deformacijskog rada WT. Najviše vrijednosti deformacijskog rada WT i najniže vrijednosti sposobnosti oporavka RT imaju spojevi spajani na način L1N1.

- Utjecaj parametara spajanja na smična svojstva i njihova međusobna ovisnost, očituje se kroz vrijednosti izmjerenih smičnih parametara. Na uzorku M10 pri dužem vremenu izlaganja materijala višim vrijednostima jakosti anodne struje postižu se spojevi koji imaju visoke vrijednosti histereze smične sile 2HG5, koje se očituju kroz smanjenu fleksibilnost i krutost. Kod ostalih uzoraka materijala spajanim pri dužem vremenu, također su zabilježene veće vrijednosti smičnih parametara. Kod spojeva spajanih na način L1N1, vrijednosti smičnih parametara su niže za 50 %, što se očituje kroz veću fleksibilnost spojeva spojenih na ovaj način.

- Povoljnija savojna svojstva spojeva imaju spojevi koji su spajani pri višim vrijednostima anodne struje na način LL, dok su na spojevima spajanim na način NN pri istim parametrima spajanja vrijednosti savojnih svojstava veće. Uzorci spojeva spajani na način L1N1. kod svih uzoraka materijala, imaju najniže izmjerene vrijednosti za krutost savijanja B i histerezu momenta savijanja 2HB.

- Povoljne vrijednosti kompresijskih svojstva spojeva izmjerene su na uzorcima spojeva spojenih pri nižim vrijednostima anodne struje i dužim vremenom spajanja. Pri tim parametrima visokofrekventnog spajanja spojevi imaju vrlo blago naglašene rubove, tj niže vrijednosti debljine  $h_m$ , deformacijskog rada WC i kompresibilnosti C, te veće vrijednosti sposobnosti oporavka RC. Uzorci spojeva spojeni na način NN i LN, imaju niže izmjerene vrijednosti svih kompresijskih parametara od onih spajanih na način LL. Spajanjem pri većim vrijednostima anodne struje (260 i 300 mA) i duljim vremenom (7 i 9 s), nastaju spojevi s vrlo istisnutim rubovima, visoke vrijednosti debljine  $h_m$ , visoke vrijednosti deformacijskog rada WC i niže vrijednosti sposobnosti oporavka RC. Kod tih uzorka vidljivo je na naličju spoja prijelaz PU nanosa kroz pletivo.

- Utjecaj parametara visokofrekventnog spajanja i način rasporeda slojeva materijala i kod ovih spojeva imaju značajan utjecaj na čvrstoću spoja. Najveće vrijednosti čvrstoće spojeva izmjerene su kod uzoraka spojeva koji su spojeni pri duljem vremenu spajanja i većim vrijednostima jakosti anodne struje. Ovi spojevi imaju jače naglašene istisnute rubove, ali i veću čvrstoću spram onih spojeva koji su spajani pri nižim vrijednostima anodne struje. Provedenom statističkom analizom utvrđeno je da oba parametra spajanja imaju statistički značajan utjecaj na čvrstoću spoja. Također je zaključeno da se spajanjem na način LL povećava čvrstoća ovisno o uzorku materijala i njegovim konstrukcijskim karakteristikama. Spojevi spajani na način L1N1 imaju najveće izmjerene vrijednosti i one su 300 % veće od ostalih načina spajanja (LL, NN i LN).

- Analizom utjecaja parametara visokofrekventnog spajanja na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva, utvrđeno je da gotovo svi spojevi spajani pri većim jakostima anodne struje 260 i 300 mA su zrakonepropusni i vodonepropusni.

- Iz analize izračuna gustoće energije po volumenu na duljinu spoja od 20 cm, zaključeno je da je potrebna veća gustoća energije po volumenu pri duljem vremenu spajanja (9 s) i većim vrijednostima anodne struje visokofrekventnog spajanja. Iz rezultata je vidljiv utjecaj parametara spajanja na gustoću energije po volumenu, ali isto tako uzorak materijala, njegove konstrukcijske karakteristike, sirovinski sastav i debljina materijala. Najviše vrijednosti gustoće energije inicirano je kod uzorka materijala M10 (PU 100 % i najmanja debljina dva sloja materijala 0,041 cm) Prosječna gustoća energije kod visokofrekventnog spajanja za uzorak materijala oznaka M10 na  $1 \text{ cm}^3$  je  $525,5 \text{ Wscm}^{-3}$ .

- Analizom utjecaja gustoće energije po volumenu na čvrstoću spoja kod visokofrekventnog spajanja utvrđeno je da pri većim vrijednostima gustoće energije po volumenu su izmjerene i veće vrijednosti čvrstoće spojeva.

Kod visokofrekventnog spajanja pri nižim vremenima spajanja (3 i 5 s) i višim vrijednostima jakosti anodne struje (300 mA) su izmjerene i najniže vrijednosti za debljinu istisnutog ruba, a kod tih parametara spajanja izmjerene su u najveće vrijednosti čvrstoće spojeva.

### **6.3 Tehnika spajanja toplinskom kondukcijom i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva**

- Utjecaj parametara spajanja na savojna svojstva spojeva spojenih toplinskom kondukcijom, vidljiva su iz rezultata ispitivanja savojnih svojstava spojeva te je zaključeno da povoljnija savojna svojstva imaju spojevi na uzorku materijala oznake M10 pri nižoj brzini spajanja i nižim temperaturama vrućeg klina. Kod ostalih uzoraka materijala niže vrijednosti krutosti savijanja B i histereze momenta savijanja 2HB, imaju spojevi spajani pri većim brzinama spajanja i nižim temperaturama, te je utvrđeno da struktura materijala ali i sirovinski sastav (ili udio u sirovinskom sastavu) utječu na odabir parametara spajanja a time i na svojstva spoja.

- Kod spojeva nastalih spajanjem vrućim klinom, vrijednosti izmjerenih kompresijskih svojstva odnose se na debljinu spoja. Uzorci spojeva koji imaju vizualnom procjenom vrlo blago istisnute

rubove, ali izmjerene veće debljine spojeva  $h_m$  izmjerene su pri većim brzinama spajanja, a temperatura spajanja ovisi o uzorku materijala. Kod ovih uzoraka vrlo kratko vrijeme se djeluje određenom temperaturom, te se omekšani materijal ne istiskuje u rubove spoja i zato je pri tim spojevima debljina spoja veća nego kod spojeva koji nastaju spajanjem pri manjim brzinama spajanja.

- Utjecaj parametara spajanja vrućim klinom i način rasporeda slojeva imaju značajan utjecaj na čvrstoću spoja. Najveće vrijednosti čvrstoće spojeva izmjerene su kod uzoraka spojeva koji su spojeni pri većim vrijednostima temperature vrućeg klina, ali ovisno o uzorku materijal. Statističkom analizom utvrđeno je, da parametar temperature spajanja ima statistički značajniji utjecaj na čvrstoću spoja.

- Analizom rezultata utvrđeno je da parametri spajanja vrućim klinom utječu na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva. Ovisno o uzorku materijala, ali i načinu spajanja, najviše pozitivno ocijenjenih uzoraka je spajano na način LL, te ti spojevi ostvaruju svojstvo zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti.

#### **6.4 Tehnika spajanja toplinskom konvekcijom i utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva**

- Iz analize savojnih svojstava spojeva, utvrđen je utjecaj parametara spajanja na parametre savojnih svojstava. Povoljnija savojna svojstva imaju niže vrijednosti krutosti savijanja B i histereze krutosti savijanja 2HB, te su karakteristične za spojeve koji imaju veću fleksibilnost tj. veću elastičnu savitljivost. Kod ove tehnike spajanja omjer i vrijednosti parametara spajanja vrlo specifično utječu na svaki pojedini uzorak materijala i na način spajanja (LL, NN, LN).

- Povoljne vrijednosti kompresijskih svojstva spojeva izmjerene su na uzorcima spojeva spojenih pri većim brzinama spajanja i većim temperaturama ispuhujućeg vrućeg zraka. Ovi spojevi nemaju vizualno naglašene rubove, te je izmjerena manja debljina spoja  $h_m$ , manje vrijednosti deformacijskog rada WC, te veće vrijednosti sposobnosti oporavka RC.

- Analizom čvrstoća spojeva utvrđeno je da spojevi spajani pomoću vrućeg zraka pri većim temperaturama spajanja od 400-450 °C imaju veće čvrstoće spojeva.

- Utvrđeno je da na svojstva zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti spojeva utječu parametri spajanja, ali i način spajanja i vrsta uzorka materijala. Samo spojevi spajani na uzorku materijala M10 pri svim parametrima spajanja ostvaruju pozitivne ocjene, tj, spojevi su zrakonepropusni i vodonepropusni.

### **6.5 Kombinirana tehnika šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom, te utjecaj parametara spajanja na svojstva spojeva**

- Analizom utjecaja parametara šivanja i parametara spajanja vrućim zrakom na čvrstoću spoja, utvrđeno je da se pri šivanju uzoraka materijala pri većoj duljini uboda (3 mm) s manjom finoćom igle (90 Nm), postiže veća čvrstoća spoja. Parametri toplinskog spajanja vrućim zrakom nisu mijenjani, za svaki uzoraka materijala odabrani su optimalni parametri spajanja adhezivne trake po šavu.

- Analizom rezultata zrakoneporopusnosti i vodonepropusnosti i utjecaja parametara šivanja i spajanja vrućim zrakom na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva, utvrđeno je da svi uzorci šivani s većom duljinom uboda (3 mm) ostvaruju pozitivne ocjene na zrakonepropusnost i vodonepropusnost spojeva, bez obzira na finoću igle.

U doktorskom radu ostvaren je znanstveni doprinos koji je predviđen tijekom oblikovanja teme i istraživanja. Utvrđene su činjenice da je pri izradi suvremene zaštitne i inteligentne odjeće nužna upotreba visokotehnoloških tehnika spajanja uz konvencionalnu tehniku šivanja zbog dobre čvrstoće spoja, vodo i zrakonepropusnosti. Utvrđeni rezultati ispitivanja svojstava spojeva i karakterističnih obilježja omogućuju cjelovitu komparativnu tehnološku analizu najutjecajnijih procesnih parametara spajanja pri čemu su utvrđeni rasponi optimalnih vrijednosti procesnih parametara spajanja za svih pet primijenjenih visokotehnoloških tehnika spajanja: ultrazvučna tehnika, visokofrekventna tehnika, toplinska tehnika kondukcijom i konvekcijom te kombinirana tehnika šivanja i spajanja toplinskom konvekcijom.

Svojstva spojeva, koja su, po prvi puta cjelovito, ispitana i analizirana, su vlačna, smična, savojna i kompresijska svojstva, značajke zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti, te debljina istisnutih rubova spoja koja je mjerena na novom mjernom uređaju za mjerenje karakteristika spojeva koji je razvijen za potrebe mjerenja na doktorskom radu i koji je nagrađivan na izložbama inovacija. Za modificirani i znatno usavršeni mjerni uređaj za ispitivanje istisnutih rubova spojeva izrađenih visokotehnološkim tehnikama spajanja je u tijeku patentna zaštita mjerne opreme.

Upotrebom statističkih modela proučavan je odnos tehnika spajanja i utjecaja vrijednosti velikog raspona procesnih parametara spajanja na čvrstoću spoja. Time je uspostavljena i definirana nova istraživačka metoda utvrđivanja procesnih parametara primjerena za visokotehnološke tehnike spajanja u odjevnom inženjerstvu.

U doktorskom radu prikazan je pristup i način utvrđivanja količine različitih oblika energije koja se inicira u materijal prilikom spajanja na temelju ulaznih parametara spajanja te je određena vrijednost gustoće energije po volumenu spoja. Usporedbom vrijednosti dobiveni su podaci o količini energije koju je potrebno utrošiti za postizanje kvalitetnog spoja za svaku od tehnika spajanja i pojedini parametar spajanja.

Nove spoznaje utvrđene u doktorskom radu pomoći će pri daljnjem razvoju suvremene zaštitne i inteligentne odjeće kao vrijednih uporabnih predmeta visoke dodane vrijednosti. Rezultati ovog dokorskog rada omogućuju daljnji znanstveni, tehnički i tehnološki razvoj suvremenih visokotehnoloških spojeva na specifičnim odjevnim predmetima.

## 7. LITERATURA

Ageorges, C., Ye, L. and Hou, M.: Advances in Fusion Bonding Techniques for Joining Thermoplastic Matrix Composites: A Review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32 (2001), pp. 839-857.

Amanat, N., James, N.L. and McKenzie, D.R.: Welding Methods for Joining Thermoplastic Polymers for the Hermetic Enclosure of Medical Devices, *Medical Engineering & Physics*, 32 (2010), pp. 690-699.

Benatar, A.: Joining of Plastics and Composites, In *Plastics and Composites Welding Handbook*, Hanser Gardener, ISBN 9781569903131, (2003a), pp. 1-9.

Benatar, A.: Fundamental Steps in Plastic and Composites Welding, In *Plastics and Composites Welding Handbook*, Hanser Gardener, ISBN 9781569903131, (2003b), pp. 11-27.

Bhudolia, S. K., Gohel, G., Leong, K. F. and Islam, A.: Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review, *Materials*, 13 (6) (2020), pp. 1-26.

Carr, H. and Latham, D. J.: Alternative Methods of Joining Materials, In *Technology of Clothing Manufacturing*, Blackwell Publishing, ISBN 978140561985, (2008), pp. 221-253.

Čatić I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, ISBN 9539745047, Zagreb, (2006).

Čebular A., Stepanova A., Šorli. I. and Podrťaj P.: Weld Quality Evaluation in Radiofrequency PVC Welding Process, *Informacije MIDE M*, 41, 4 (2011), pp. 290-296.

Čubrić, G., Salopek Čubrić, I., Rogale, D. and Firšt Rogale, S.: Mechanical and Thermal Properties of Polyurethane Materials and Inflated Insulation Chambers, *Materials*, 14 (6). (2021), 1541.

Dixon J. P. and Grewell D.: Radio Frequency Welding. In *Plastics and Composites Welding Handbook*, Hanser Gardener, ISBN 9781569903131, 2003, pp. 249-270.

Firšt Rogale, S., Rogale, D., Nikolić, G.: Intelligent Clothing: First and Second Generation Clothing With Adaptive Thermal Insulation Properties, *Textile Research Journal*, 88 (19) (2018), pp. 2214-2233.



First Rogale, S., Bobovčan Marcelić, M., Rogale, D., Dragčević, Z. and Nikolić, G.: Garment Seam Strength Depending on Needle Size and Stitch Length, *Proceedings of the 23rd DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: „Power of Knowledge and Creativity"*, Katalinić, Branko (Ed.), Wien DAAAM International, (2012), ISSN 1726-9679, pp. 875-878.

Firšt Rogale, S., Rogale, D., Nikolić, G. i Dragčević, Z.: *Inteligentna odjeća*, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, ISBN 978953710552-5, Zagreb, (2014).

Geršak, J. i Marčić, M.: Složeni koncept projektiranja funkcionalne zaštitne odjeće, *Tekstil* 62 (1-2), (2013a), pp. 38-44.

Geršak, J.: Clothing Classification Systems, In *Design of clothing manufacturing processes; A systematic approach to planning, scheduling and control*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 9781782422327, Cambridge (2013b).

Geršak J. Objektivno vrednovanje plošnih tekstilija i odjeće, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, ISBN 9789537105426, Zagreb, 2014.

Grinevičiute, D., Vačasevičiute, L., Narviliene, V., Dubinskaite, K. and Abelkiene, R.: Investigation of Sealed Seams Properties of Moisture Barrier Layer in Firefighters Clothing, *Materials Science*, 20, (2014), 2, pp. 198-204.

Gries, T., Volker, L., Volker, N., Saggiomo, M. and Simonis, K.: Automation in Quality Monitoring of Fabric and Garment Seams, In: *Automation in Garment Manufacturing*, Woodhead Publishing, ISBN 9780081012116, (2018), pp. 353-376

Grewell, D., Benatar, A. and Park, J.: Ultrasonic Welding, In: *Plastics and Composites Welding Handbook*, Hanser Gardener, ISBN 9781569903131, (2003) pp. 142-188.

Grewell, D. and Benatar, A.: Welding of Plastics: Fundamentals and New Developments, *International Polymer Processing* (2007), 22, pp. 43-60.

Gupta, D.: Functional clothing-Definition and Classification, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 36, (2011a), pp. 321-326.

Gupta, D.: Design and Engineering of Functional Clothing, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 36, (2011b), pp. 327-335.

Gurarda, A.: Investigation of the Seam Performance of PET/Nylon-Elastan Woven Fabrics, *Textile Research Journal*, 78, 1, (2008), pp. 21-27.

Gutnik, V. G, Gorbach, N. V. and Dashkov, A. N.: Some Characteristics of Ultrasonic Welding of Polymers, *Fibre Chemistry*, 34, 6 (2002), pp. 426-432.

Hollande, S., Laurent, J. L. and Lebey, T.: High-frequency Welding of an Industrial Thermoplastics Polyurethane Elastomer-Coated Fabric, *Polymer*, 39; 22 (1998), pp. 5343 - 5349.

Horvat, J. i Regent, A.: *Osobna zaštitna oprema*, Veleučilište u Rijeci, ISBN 978953 6911431, Rijeka, (2009).

Hunter, L. and Fan, J.: *Waterproofing and Breathability of Fabrics and Garments*, In Engineering Apparel Fabrics and Garments, Elsevier Ltd, ISBN 9781845691349, (2009), pp. 283–308.

Hursa, A., Zavec Pavlinić, D. i Dragčević, Z.: Vatrogasni odjevni sustavi za zaštitu od topline i plamena, *Tekstil*, 62 (3-4), (2013), pp. 160-173.

ISO-5084:1996. Textiles — Determination of thickness of textiles and textile products.

ISO-3801:1977. Textiles — Woven fabrics — Determination of mass per unit length and mass per unit area.

ISO 527-3:2018. Plastics — Determination of tensile properties — Part 3: Test conditions for films and sheets.

Jana, P.: Assembling Technologies for Functional Garments- An overview, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 36 (2011), pp. 380-387.

Jakubčionienė, J., Masteikaite, V., Kleveckas, T., Jakubčionis, M. and Kelesova, U.: Investigation of the Strength of Textile Bonded Seams, *Materials Science*, 18, 2 (2012), pp. 172-176.

Jovanović, Z.: Polimerizacije i polimeri, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa Zagreb, ISBN 953960415X, (1997).

Kayar, M., Mistik, S. I. and Inan, D.: Analysing Effect of the Factors on Ultrasonic Seam Tensile Properties of Nonwoven Fabrics by Nested ANOVA Design, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 27, 6 (2015), pp. 803-817.

Khmelev, V. N., Silvin, A. N. and Abramov A. D.: Model of Process and Calculation of Energy for Heat Generation of a Welded Joint at Ultrasonic Welding Polymeric Thermoplastic Materials, *Proceeding of 8<sup>th</sup> International Siberian Workshop and Tutorials Electron Devices and Materials*, Erlagol (2007), pp. 316-322.

Khmelev, V.N.; Silvin, A.N; Abramov A.D.: Weld Strength Test of Thermoplastics Obtained by Ultrasonic Welding, *Proceeding of 9<sup>th</sup> International Workshop and Tutorials Electron Devices and Materials*, Erlagol (2008), pp. 227-230.

Knorre, K.: Laminiranje ultrazvukom, *Tekstil* 53 (12) (2004), pp. 624-644,

Kumar, J.: Ultrasonic Machining - A Comprehensive Review, *Machining Science and Technology*, 17 (2013), pp. 325-379.

Levy, A., Le Corre, S., Chevaugon, N. and Poitou, A.: A Level Set Based Approach for the Finite Element Simulation of a Forming Process Involving Multiphysics Coupling: Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 30 (4) (2011), pp. 501-509.

Li, X., Ling, S. F. and Sun, Z.: Study on Heating Mechanism in Ultrasonic Welding Thermoplastics, *International Journal for the Joining of Materials* 16 (2) (2004), pp. 1-6.

Marcelić Bobovčan, M., Geršak, J., Rogale, D. i Firšt Rogale, S.: Study of the Compression Properties of Welded Seams Formed Using Hot Wedge, Hot Air, Ultrasonic, and High-Frequency Welding Techniques, *Textile Research Journal*,. 92(23–24), (2022), pp. 4736–4752.

Marczisz, B. and Czigani, T.: Interrelationships Between Welding Parameters of Hot-Gas Welded Polypropylene, *Polymer Engineering and Science* 46 (2006), pp. 1173-1181.

Mattila, H. R.: Intelligent Textiles and Clothing - A Part of our Intelligent Ambience, In *Intelligent Textiles and Clothing*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 9781845690052, Cambridge, (2006), pp. 1-4.

McLoughlin, J. and i Hayes, S.: Types of Fabric and Their Joining Requirements, In *Joining Textiles, Principles and Application*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 978845696276, Cambridge, (2013), pp. 1-44.

Mitelea, I., Bordeasu, I., Varzaru, N. and Utu, I. D.: Research of the Thermal Gradient and Quality of Welded Joints from PVC Thermoplastics Foils at High Frequency Symmetric Welding, in *Materiale Plastice* 54 (3) (2017), pp. 461-465.

Mitelea, I., Varzaru, N., Bordeasu, I. and Popescu, M.: The High Frequency Welding Amplitude of Thermoplastic Polymers, *Materiale Plastice*, 46 (1) (2009), pp. 461-465.

Murthyguru : Novel Approach to Study Compression Properties in Textiles, *AUTEX Research Journal*, 5 (4) (2005), pp. 176-193.

Nayak, R., Padhye, R., Dhamija, S., Kumar, V.: Sewability of Air-jet Textured Sewing Threads in Denim, *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 8 (1) (2013) pp.1–11.

Nikolić, G., Rogale, D., Ujević, D. i Firšt Rogale, S.: Strojevi za spajanje i rezanje tekstilnih materijala s novim tehnologijama rada – IMB 2006, *Tekstil* 56 (5) (2007), pp.308-317.

Park, J. and Grewell, D.: Guidelines for Process Selection, In *Plastics and Composites Welding Handbook*, Hanser Gardener, ISBN 9781569903131, (2003), pp, 335-358.

Palardy, G., Shi, H., Levy, A., Le Corre, S. and Villegas, F.: A Study on Amplitude Transmission in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113 (2018), pp. 339-349.

Peirce, F.T.: The „Handle—of Cloth as a Measurable Quality, In: *Journal of the Textile Institute Transaction*, 21 (9) (1930), pp. T377-T416.

Petrie, E. M.: Alternative Fabric-Joining technologies, In *Garment Manufacturing Technology*, Woodhead Publishing Series in Textiles, ISBN 9781782422327, (2015), pp. 337-371.

Potente, H: Ultrasonic Welding-Principles and theory, *Materials & Design*, 5 (1984), pp.228-234.

Qiu, J., Zhang, G., Sakai, E., Liu, W. and Zang, L.; Thermal Welding by the Third Phase Between Polymers: A Review for Ultrasonic Weld Technology Developments, *Polymers*, 12 (4), (2020), pp. 759.

Radhakrishnan, S. and Kumari, D.: Seams For Protective Clothing - An Overview, *World Journal of Textile Engineering and Technology*, 3, (2017), pp. 16-23.

Rogale, D. i Dragčević, Z.: Tehnike konfekcioniranja tehničkog tekstila, *Tekstil*, 51 (2), (2002), pp. 64-77.

Rogale, D., Firšt Rogale, S., Dragčević, Z. i Nikolić, G.: Inteligentni odjevni predmet s aktivnom termoregulacijskom zaštitom, odobren konsenzualni patent od Državnog zavoda za intelektualno vlasništvo, broj PK20030727, Zagreb, Hrvatska, (2007).

Rogale, D., Bobovčan, M. i Firšt Rogale, S.: Suvremene tehnike spajanja elemenata na inteligentnoj odjeći, 4. *Znanstveno-stručno savjetovanje Tekstilna znanost i gospodarstvo*, Zagreb (2010).

Rogale, D., Firšt Rogale, S. and Bobovčan, M.: Determination of Optimum Parameters for Welding Polymeric Foils Using the High-Frequency Technique, *Proceedings of the 22nd DAAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: „Power of Knowledge and Creativity "*, Katalinić, Branko (Ed.), Wien DAAAAM International, (2011a), ISSN 1726-9679, pp. 1627-1628.

Rogale, D, Ujević, D., Firšt Rogale, S. i Hrastinski, M.: *Procesi proizvodnje odjeće*, Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ISBN 978-953-7105-32-7, Zagreb, (2011b).

Rogale, D., Firšt Rogale, S. i Bobovčan, M.: *Određivanje optimalnih parametara spajanja termoplastičnih folija ultrazvučnom tehnikom*, 5. Znanstveno-stručno savjetovanje Tekstilna znanost i gospodarstvo, Zagreb (2012).

Rogale, D., First Rogale, S., Majstorović, G. and Čubrić, G: Thermal Properties of Thermal Insulation Chambers, *Textile Research Journal*, 91 (2020), 9-10; pp. 953-961.

Rogale, D., Fajt, S., Firšt Rogale, S. and Knezić, T.: Interdependence of Technical and Technological Parameters in Polymer Ultrasonic Welding // *Machines*, 10 (2022), 10, 845, 19

Ruiz Santiago, K. and Uc Rios, C. E.: Methodology to Develop Optimal Welding Processes of Thermoplastic Materials (EVA and EVA / EVOH) Using the High Frequency Welding System (HF), *Project, Design and Management*, 2 (1) (2020), pp. 2-50

Shi, W. and Littel, T.: Mechanisms of Ultrasonic Joining of Textile Materials, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 12 (5) (2000), pp. 331-350.

Shi, H., Zhang, L. and Wang, J.: Influence of Seam Type on Seam Quality of Outdoor Clothing, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 29 (4) (2017), pp. 553-565

Shreir L. L., Jarman J. A. and Burstein D. T.: Design in Relation to Welding and Joining in Corrosion, *Journal of Materials Processing Technology*, (2000), pp. 9:85-9:104.

Song, G., Mandal, S. and Rossi, R.: Effects of Various Factors on Performance of Thermal Protective Clothing, In *Thermal protective clothing for firefighters*, Woodhead Publishing, ISBN 9780081012857, Cambridge, (2017), pp. 163-182.

Stull, J. O.: Civilian Protection and Protection of Industrial Workers From Chemicals, In *Textiles for Protection*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 9781855739215, Cambridge, (2005), pp. 295-348.

Suner, I, Strickfaden, M., Crown, E. and Ackerman, M.: Testing Seams For Use in Apparel Designed for Protection Against Steam, In *Proceeding of International Textile and Apparel Association*, (2012), New Orleans, pp. 1-2

Suresh, K., Roopa Rani, M., Prakasan, K. and Rudramoorthy, R.: Modeling of Temperature Distribution in Ultrasonic Welding of Thermoplastics for Various Joint Design, *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (2007), pp. 138-146.

Torres, F. G. and Aragon, C. L.: Processing Methods Applicable to Thermoplastic Elastomers, In *Handbook of Thermoplastic Elastomers, 2<sup>nd</sup> Edition*, William Andrew Inc., ISBN 9786323221368, Norwich, NY (2014), pp. 33–173.

Troughton, M. J.: *Handbook of Plastics Joining*, William Andrew Inc., ISBN 978081515814 Norwich, NY, (2008)

Tolunay, M. N., Dawson, P. R. and Wang, K. K.: Heating and Bonding Mechanisms in Ultrasonic Welding of Thermoplastics, *Polymer Engineering and Science*, 23 (13) (1983), pp. 726- 733.

Van Langenhove, L., Puers, P.,and Matthys, D.: Intelligent Textiles for Protection, In *Textiles for Protection*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 9781855739215, Cambridge, (2005), pp. 176-193.

Villegas, I. F. and Bersee H. E. N.: Ultrasonic Welding of Advanced Thermoplastic Composites: An Investigation on Energy-Director Surfaces, *Advances in Polymer Technology*, 29 (2) (2010), pp. 112-121.

Villegas, I. F. and Palardy, G.: Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composite Coupons for Mechanical Characterization of Weld Joints Through Single Lap Shear Testing, *Journal of Visualized Experiments*, 108 (2016), pp. 1-9.

Vinches, L. and Halle, S.: Resistance of Type 5 Chemical Protective Clothing Against Nanometric Airborne Particles: Behavior of Seams and Zipper, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14 (12) (2017), pp. 939-946.

Vujasinović, E. and Rogale, D.: Properties and Performance of Welded or Bonded Seams; In *Joining Textiles*, Principle and Applications, Woodhead Publishing (2013), pp. 435-463

Vulkov, S.S.: Ultrasound Welding of Synthetic Fabric for Technical Purposes, *Welding International* 23 (10) (2009), pp. 789–795.

Wise, R. J.: *Thermal Welding of Polymers*, Abington Publishing, TWI, ISBN 1 85573 495 8, Cambridge, (1999).

Yong, Y., Zeng, P. and Lei, L.: High-frequency Dielectric Heating an the Stranght of Flexibile Polymer Seam, *Journal of Materials Procesing Technology*, 205 (2015), pp. 105-113.

Zhou, W., Reddy, N. and Young, Y.: Overview of Protective Clothing, In *Textiles for Protection*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 9781855739215, Cambridge, (2005), pp. 1-25,

Zhang, Z., Xiaodong W., Luo, Y., Zhang, Z. and Wang L.: Study on Heating Process of Ultrasonic Welding for Thermoplastics, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 23 (2010), pp. 647-664.

Zhang, G., Qiu, J., Sakai, E, and Zhou, Z.: Interface Investigation Between Dissimilar Materials by Ultrasonic Thermal Welding by the Third Phase, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 104 (2021), pp. 1-8.

[https://www.afmeng.com/UltrasonicWelding/Ultrasonic\\_Welding\\_Information/Boosters/Default.aspx](https://www.afmeng.com/UltrasonicWelding/Ultrasonic_Welding_Information/Boosters/Default.aspx): pristupljeno 27.11.2020.

<https://www.herrmannultrasonics.com/en-us/ultrasonic-welding-basics/laminating-of-nonwoven-materials/>: pristupljeno 02. 02. 2021.

<https://www.pfaff.com>: pristupljeno 27. 11. 2020.

PRILOG A



PRILOG B













## ŽIVOTOPIS

Martina Bobovčan Marčelić, dipl. inž. rođena je 1979. godine u Koprivnici, Hrvatska. Osnovnu i srednju školu završila je u Đurđevcu. Diplomirala je na Sveučilištu u Zagrebu, na Tekstilno-tehnološkom fakultetu 2008. godine.

Od 2006. do 2010. godine radila je kao voditeljica razvojnog tima za dizajn kožne galanterije i dio marketing tima u tvrtki Galko d.o.o. Od 2011. do 2021. godine bila je zaposlena kao asistent na Sveučilištu u Zagrebu, Tekstilno-tehnološkom fakultetu na Zavodu za odjevnu tehnologiju.

Tijekom 2013., 2014. i 2019. godine boravila je na Univerze v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, u sklopu CEEPUS programa mobilnosti studenata i proučavala rad na KES-FB i FAST mjernom sustavu.

2022. godine osnovala je vlastiti obrt koji se bavi dizajnom i izradom funkcionalne odjeće, prototipova specijalnih odjevnih predmeta, organizacijom kreativnih radionica vezanih uz tekstil itd.

Doktorsku disertaciju izradila je pod mentorstvom prof. dr. sc. Dubravko Rogalea. Primarni interesi su joj primjena tehnika spajanja pri izradi zaštitne i inteligentne odjeće s naglaskom na način primjene različitih procesnih parametara tijekom spajanja polimernih materijala i njihov učinak na kvalitetu i svojstva spojeva. Posjeduje relevantne vještine spajanja polimernih materijala pomoću tehnika spajanja, kao što su visokofrekventno, ultrazvučno, toplinsko spajanje kodukcijom i konvekcijom. Također ima relevantno iskustvo u ispitivanju kvalitete gotovih spojeva.

Popis relevantnih radova vezan uz temu doktorskog rada:

- Marčelić Bobovčan, M., Geršak, J., Rogale, D. i Firšt Rogale, S.: Study of the Compression Properties of Welded Seams Formed Using Hot Wedge, Hot Air, Ultrasonic, and High-Frequency Welding Techniques, *Textile Research Journal*,. 92(23–24), (2022), pp. 4736–4752
- First Rogale, S., Bobovčan Marčelić, M., Rogale, D., Dragčević, Z. and Nikolić, G.: Garment Seam Strength Depending on Needle Size and Stitch Length, Proceedings of the 23rd DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: „Power of Knowledge and Creativity ", Katalinić, Branko (Ed.), Wien DAAAM International, (2012), ISSN 1726-9679, pp. 875-878.

- Rogale, D., Firšt Rogale, S. i Bobovčan, M.: *Određivanje optimalnih parametara spajanja termoplastičnih folija ultrazvučnom tehnikom*, 5. Znanstveno-stručno savjetovanje Tekstilna znanost i gospodarstvo, Zagreb (2012).
- Rogale, D., Firšt Rogale, S. and Bobovčan, M.: Determination of Optimum Parameters for Welding Polymeric Foils Using the High-Frequency Technique, *Proceedings of the 22nd DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: „Power of Knowledge and Creativity "*, Katalinić, Branko (Ed.), Wien DAAAM International, (2011), ISSN 1726-9679, pp. 1627-1628.
- Rogale, D., Bobovčan, M. i Firšt Rogale, S.: Suvremene tehnike spajanja elemenata na inteligentnoj odjeći, 4. *Znanstveno-stručno savjetovanje Tekstilna znanost i gospodarstvo*, Zagreb (2010).