

# Povećanje krutosti okvirnica za drvena vrata

---

**Gabrek, Gustav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:223027>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-01**



*Repository / Repozitorij:*

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
ŠUMARSKI FAKULTET  
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**DIPLOMSKI STUDIJ  
DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI**

**GUSTAV GABREK**

**POVEĆANJE KRUTOSTI OKVIRNICA ZA DRVENA VRATA**

**DIPLOMSKI RAD**

**ZAGREB, 27.09.2019.**

## PODACI O DIPLOMSKOM RADU

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AUTOR:</b>                  | Gustav Gabrek<br>08.06.1995, Zagreb<br>0068224700                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>NASLOV:</b>                 | Povećanje krutosti okvirnica za drvena vrata                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>PREDMET:</b>                | Tehnologija drvnih proizvoda za graditeljstvo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>MENTOR:</b>                 | doc. dr. sc. Vjekoslav Živković                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>IZRADU RADA JE POMOGAO:</b> | Andrija Novosel mag. ing. techn. lign.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>RAD JE IZRAĐEN:</b>         | Sveučilište u Zagrebu - Šumarski fakultet<br>Zavod za namještaj i drvene proizvode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>AKAD. GOD.:</b>             | 2018/2019                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>DATUM OBRANE:</b>           | 27.09.2019.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>RAD SADRŽI:</b>             | Stranica: 52<br>Slika: 47<br>Tablica: 16<br>Navoda literature: 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>SAŽETAK:</b>                | <p>Drvo je materijal koji dolazi iz prirode, iz toga razloga se drugačije ponaša u usporedbi s materijalima kao što su beton ili čelik. Drvo je higroskopan materijal tako da uslijed navlaživanja bubri, a tijekom isušivanja uteže. Osim promjene dimenzija, sklono je i promjenama oblika, tj. deformiranju. Iz toga razloga, znanstvenici pokušavaju različitim metodama smanjiti te promjene dimenzija. Neki od načina su modifikacije materijala, primjena različitih premaza, ili ojačavanje drva različitim materijalima, u različitim zonama. Neki od materijala koji se koriste su metali (čelik, aluminij, itd.) različitih profila (šipke, ploče, trake, nazubljene ploče, itd.), vlakna (staklena vlakna, karbonska vlakna, itd.) u kombinaciji s adhezivima, različite plastične mase i drugo.</p> <p>Svrha ovog eksperimenta je ispitati mogućnost smanjenja deformacija drva, tj. ukrućivanja drva pri mehaničkom opterećenju dodavanjem drugih materijala u tlačnu/vlačnu zonu. Za potrebe eksperimenta su korištene hrastove lamelirane gredice dimenzija 1000 mm x 60 mm x 60 mm u kojima je na dvije suprotne strane izrađen utor presjeka 40 mm x 6 mm predviđen za umetanje ukruta izrađenih od aluminijske, čelike, karbonskih vlakana, staklenih vlakana, epoksidne smole, poliesterske smole i plastike. Nakon uljepljivanja ukruta utori se zatvaraju drvenim hrastovim lamelama dimenzija 1000 mm x 60 mm x 5 mm. Tako izrađeni elementi, podvrgnuti su ispitivanju na savijanje u četiri točke.</p> <p>Očito je da je svaki od ovdje korištenih materijala doprinio smanjenju deformacija pri opterećenjima od 4000 N do 9000 N, dok pri 14000 N i neposredno prije loma probe to nije slučaj. Isto tako treba naglasiti da su pojedini materijali poput čelika, i jednog sloja karbonskih vlakana u poliesterskoj smoli rezultirali većom zaostalom deformacijom kod rasterećenja na 10 N u odnosu na hrastove probe bez ojačanja.</p> <p>Čelične ukrute 40 x 5 mm rezultirale su praktički najmanjim pomakom tijekom opterećenja, ali i gotovo najvećom zaostalom deformacijom nakon rasterećenja s 14000 N na 10 N. Općenito možemo zaključiti da su ojačanja od aluminijske i čelika učinkovitija od ojačanja od staklenih ili karbonskih vlakana uljepljenih epoksidnom smolom. Ukupna deformacija u trenutku loma je manja kod materijala s inače manjim pomakom (npr aluminij).</p> |

## PREDGOVOR

Opće je poznato da kod primjene drva kao materijala za izradu vrata može doći do problema tijekom upotrebe koji su posljedica deformiranja vratnih krila. Imajući u vidu da je krilo konstantno izloženo između dvije potpuno različite klime - u Hrvatskoj je primjerice ljeti vruće i sparno u eksterijeru, ali ipak bitno manje vruće u interijeru, dok je zimi kontrast još veći - temperature u kontinentalnim krajevima su ispod nule, a u interijeru se održavaju oko 20 °C uz nerijetko vrlo suh zrak. Stoga ne čudi da krila načinjena od drva mogu mijenjati svoj oblik tijekom godine, a povremeno toliko da stvaraju probleme pri otvaranju, tj. zatvaranju. Deformacije oblika vratnih krila se mogu obuzdati, ali ne uvijek i potpuno zaustaviti odgovarajućom pripremom drvne građe. Stoga se za stabilizaciju krila sve češće koriste dodatni materijali u vanjskim zonama. U okviru ovog diplomskog rada načinjen je eksperiment koristeći više različitih materijala za ukrućivanje krila kako bi odgovorili na pitanje koje i kakve ukrute koristiti kako bi postigli stabilna krila, uz minimalnu cijenu. Pri tome je važno istaknuti da ekonomski aspekt nije uzet u obzir u ovom eksperimentu.

Ovom prilikom želio bi se zahvaliti doc. dr. sc. Vjekoslavu Živkoviću koji mi je omogućio realizaciju ovog diplomskog rada, te mi je uvelike pomogao u samoj provedbi ispitivanja i omogućio mi pristup svojoj potrebnoj literaturi te korisnim savjetima i smjernicama.

Isto tako bih se htio zahvaliti i asistentu Andriji Novoselu mag. ing. techn. lign. za pomoć oko provedbe svakog djela ispitivanja, isto kao i na brzim odgovorima u svakom trenutku, i na svako pitanje.

Zahvaljujem se i svim djelatnicima Šumarskog fakulteta na savjetima i ustupljenoj opremi potrebnoj za provedbu rada.



## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

OB ŠF 05 07

Revizija: 1

Datum: 28.6.2017.

„Izjavljujem da je moj *diplomski rad* izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam *koristio* drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

---

*vlastoručni potpis*

*Gustav Gabrek*

U Zagrebu, 27.09.2019.

## SADRŽAJ

|         |                                                                                                                     |    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.      | UVOD.....                                                                                                           | 2  |
| 2.      | CILJ RADA.....                                                                                                      | 3  |
| 3.      | PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....                                                                               | 4  |
| 4.      | MATERIJAL I METODE.....                                                                                             | 10 |
| 4.1.    | Drvo i priprema.....                                                                                                | 10 |
| 4.2.    | Ukrute i smole.....                                                                                                 | 10 |
| 4.3.    | Postupak ispitivanja.....                                                                                           | 14 |
| 5.      | REZULTATI I DISKUSIJA .....                                                                                         | 17 |
| 5.1.    | Prikaz deformacija kod zadanog opterećenja.....                                                                     | 17 |
| 5.1.1.  | Rezultati za uzorak ojačan aluminijskom ukrutom presjela 40 x 5 mm .....                                            | 18 |
| 5.1.2.  | Rezultati za uzorak ojačan čeličnom ukrutom presjeka 40 x 5 mm .....                                                | 20 |
| 5.1.3.  | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm .....                                    | 22 |
| 5.1.4.  | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od polikarbonata presjeka 40 x 5 mm .....                                        | 24 |
| 5.1.5.  | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od 1/3 karbonskih vlakana i 2/3 staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm .....       | 26 |
| 5.1.6.  | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od 2/3 karbonskih vlakana i 1/3 staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm .....       | 28 |
| 5.1.7.  | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od poliesterske smole i jednog sloja karbonskih vlakana presjeka 40 x 5 mm ..... | 30 |
| 5.1.8.  | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od epoksidne smole i jednog sloja karbonskih vlakana presjeka 40 x 5 mm .....    | 32 |
| 5.1.9.  | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od poliesterske smole presjela 40 x 5 mm .....                                   | 34 |
| 5.1.10. | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od poliesterske smole i jednog sloja staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm .....  | 36 |
| 5.1.11. | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od epoksidne smole i jednog sloja staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm .....     | 38 |
| 5.1.12. | Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od epoksidne smole presjeka 40 x 5 mm .....                                      | 40 |
| 5.1.13. | Rezultati za uzorak ojačan čeličnom ukrutom presjeka 30 x 5 mm .....                                                | 42 |
| 5.1.14. | Rezultati za uzorak ojačan aluminijskom ukrutom presjeka 30 x 5 mm .....                                            | 44 |
| 5.1.15. | Rezultati za uzorak bez ojačanja presjeka 60 x 60 mm .....                                                          | 46 |
| 5.2.    | Zaostala deformacija.....                                                                                           | 50 |
| 6.      | ZAKLJUČAK .....                                                                                                     | 51 |
| 7.      | LITERATURA.....                                                                                                     | 52 |

## 1. UVOD

Drvo je materijal koji dolazi iz prirode, stoga se drugačije ponaša nego materijali kao što su beton ili čelik. Drvo je higroskopan materijal tako da uslijed navlaživanja bubri, a tijekom isušivanja uteže. Osim promjene dimenzija, sklono je i promjenama oblika, tj. deformiranju. Iz toga razloga, znanstvenici pokušavaju različitim metodama obuzdati, tj. smanjiti promjene dimenzija. Neki od načina su modifikacije materijala, primjena različitih premaza, ili ojačavanje drva različitim materijalima, u različitim zonama. Neki od materijala koji se koriste su metali (čelik, aluminij, itd.) različitih profila (šipke, ploče, trake, nazubljene ploče, itd.), vlakna (staklena vlakna, karbonska vlakna, itd.) u kombinaciji s adhezivima, različite plastične mase i drugo.

Ojačavanje se koristi iz dva razloga. Prvi je kako bi se poboljšala svojstva drva, što omogućava korištenje sirovine slabijih mehaničkih svojstava, ili se odnosi na mogućnost smanjenja presjeka drvenog nosača, što smanjuje potrebe za sirovinom. To omogućuje ne samo uštedu na sirovini sporijeg rasta i boljih mehaničkih svojstava, već i ekonomsku i ekološku korist od primjene slabije klasirane građe. Drugi razlog ojačavanja može biti potreba za sanacijom nosača, prilikom koje je moguće zadržavanje izvorne forme konstrukcije, ako je ista od povijesne ili neke druge važnosti.

Materijali korišteni za ojačavanje elemenata u ovom radu su epoksidna i poliesterska smola (u funkciji adhezivnog sredstva i kao sami element za ojačavanje), čelični i aluminijski profili, pleksiglas, staklena i karbonska vlakna (u jednom i više slojeva) te kombinacija staklenih i karbonskih vlakana.

Razvijeni su mnogi sustavi ojačavanja za proizvode namijenjene za nosive konstrukcije, te su pokazali dobre rezultate prilikom ispitivanja. Ali uglavnom ne pronalaze komercijalnu uporabu zato što cijena ojačavanja nadilazi isplativost. Ali što se tiče primjene ojačanja u okvirnicama vrata ojačanja se mogu pronaći u velikom broju proizvoda. Za primjer, firma Variotec koristi FKV tehnologiju (Fibre-plastic composite) kao nemetalna ojačanja u kritičnim zonama, isto kao i korištenje lameliranih okvirnica umjesto masivnih elemenata, i to sve s ciljem stabilizacije materijala za izradu vrata.

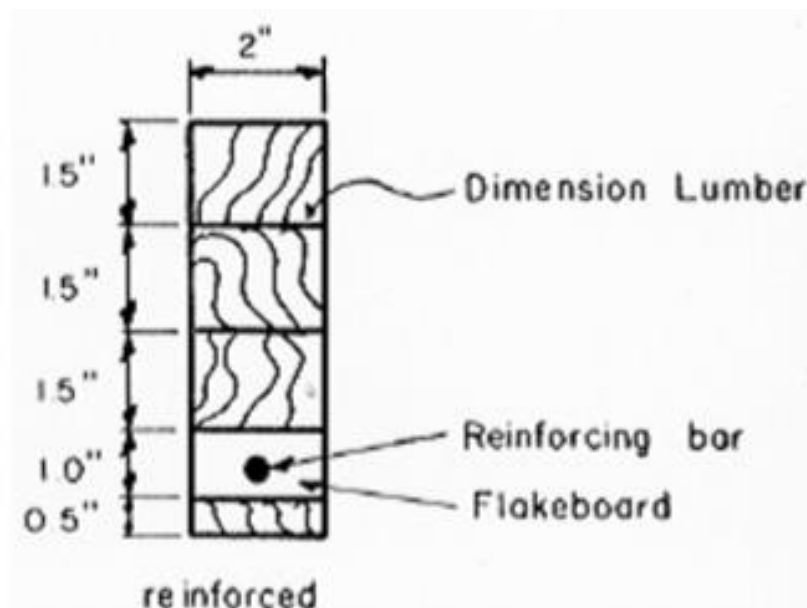
## 2. CILJ RADA

Cilj ovog rada je usporednim ispitivanjem utvrditi koja kombinacija materijala najbolje ukružuje hrastove okvirnice za potrebe izrade vratnih krila. Provedeno ispitivanje se ponešto razlikuje od većine dosadašnjih ispitivanja, zato što je cilj ojačavanja najčešće poboljšanje mehaničkih svojstava tj. čvrstoće na savijanje (npr. greda), dok je ovdje to smanjenje deformacija uslijed izlaganja panela diferencijalnoj klimi. Pa ipak, zbog učinkovitosti ispitne metode, i ovdje je umjesto stvarnog ispitivanja izlaganja uzoraka diferencijalnoj klimi, provedeno ispitivanje savijanjem ojačanih profila u četiri točke. Prilikom ojačavanja elemenata u vratima, nije toliko bitna čvrstoća na savijanje jer vrata nikada neće biti toliko opterećena da bi došlo do loma krila uslijed savijanja. Zbog toga smo proveli ciklus opterećivanja kontrolnih i ojačanih četvrtaca pri određenom opterećenju, rasterećenju te opterećenju to loma. Cilj ovakvog ispitivanja je dobiti uvid u deformacije elemenata uslijed opterećenja, deformacije nakon rasterećenja, odrediti silu loma i deformaciju kod maksimalnog opterećenja. Svjesni smo da ovakvo ispitivanje ne predstavlja onu vrstu naprezanja i s njima povezanih deformacija koje bi nastale unutar elementa uslijed izloženosti vrata diferencijalnoj klimi i promjenama sadržaja vode kroz godinu, ali očekujemo da nam rezultati odgovore na pitanje koja se od ispitivanih varijanti najmanje deformira i koja rezultira najmanjom trajnom deformacijom kako bi mogli odabrati one kombinacije materijala koje će biti najučinkovitije u povećanju krutosti i obuzdavanju deformacija vratnih krila tijekom ispitivanja, ali i tijekom kasnije uporabe proizvoda.

### 3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Većina dosadašnjih istraživanja se bazirala na ojačavanju elemenata većih presjeka, namijenjenih za primjenu u graditeljstvu, tako da su elementi ojačavani umetanjem različitih materijala (poput čeličnih profila, trakastih metala, profila izrađenih od bambusa, vlaknasto-kompozitnih materijala, i drugo). Materijali za ojačanje su postavljani u različite zone presjeka (u vlačnu zonu, u tlačnu zonu, simetrično ili asimetrično). Sami materijali su raznovrsni, od metalnih profila, preko tkanina, pa sve do drvnih materijala kao što su letvice bambusa. Dobiveni rezultati su raznovrsni, dok određeno ojačanje može biti od izrazite koristi, isto tako može biti i financijski neopravdano, ili potpuno nepotrebno u određenim primjenama. Parvez je 2004. napravio vrlo opsežan eksperiment u kome je istražio više postupaka ojačavanja građevnog drva većih dimenzija presjeka, ali i detaljan pregled dotadašnjih istraživanja. Ojačavanje nosača lijepljenjem dodatnih materijala je svrhovito ako lom započinje ili u drvu ili u materijalu za ojačanje. Drugim riječima, do loma ne smije doći uslijed razljepljivanja međusobno spojenih elemenata. I dok na tržištu postoji mnogo visoko kvalitetnih ljepila za lameliranje građevnog drva, lijepljenje čelika ili vlaknima ojačanih polimera za drvo je izazovno zbog različitog kemijskog sastava materijala i moguće različite adhezivne čvrstoće susjednih kompozitnih elemenata. Kvalitetan spoj drva i čelika mora imati čvrstoću barem jednaku čvrstoći drva, a za primjenu u eksterijeru mora biti postojan kako bi podnio višestruke cikluse sušenja i vlaženja te velike temperature promjene tijekom vijeka upotrebe (Parvez, 2004. prema Hergt and Christensen, 1986). Čelik se za drvo uspješno lijepi primjenom epoksidnih i fenolnih ljepila uz uvjet da je njegova površina potpuno čista i bez masnoće.

Parvez (2004) nadalje navodi rezultate eksperimenta Bulleita i dr. iz 1989. koji su pokušavali ostvariti ojačavanje drvenih nosača čeličnim šipkama za armiranje betonskih konstrukcija (slika 1).

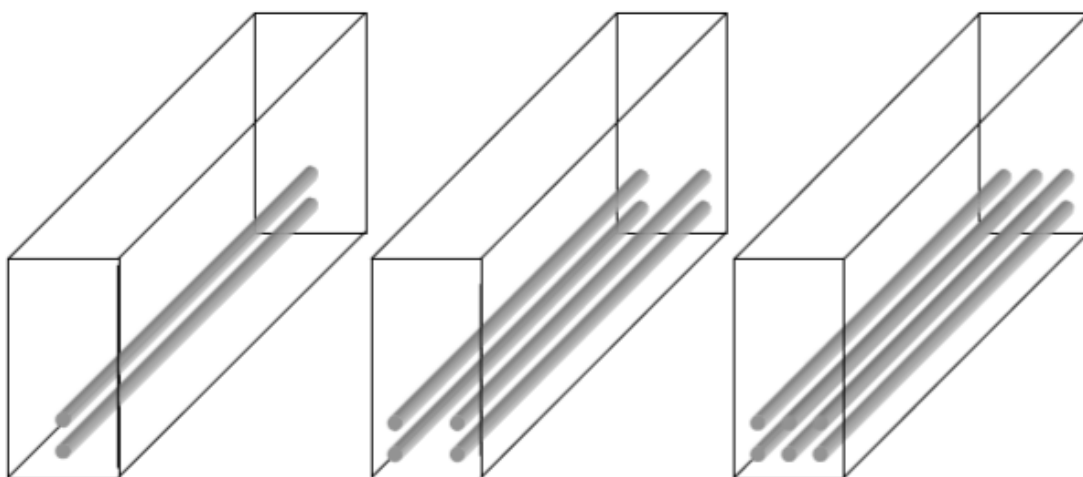


**SLIKA 1.** Presjek greda s čeličnim ojačanjima umetnutim u ploču od usitnjenog drva.

Parvez (2004)

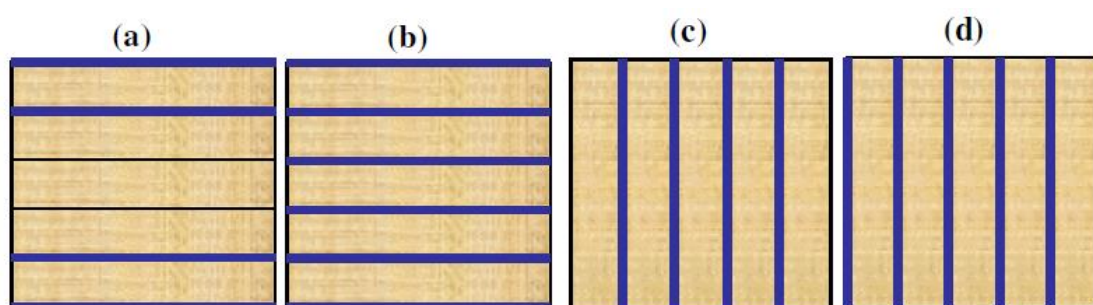
Ojačavanje je vršeno na način da je čelična šipka umetnuta u vlačnu zonu nosača i to prešanjem u profil izrađen od usitnjenog drva. Prilikom takvog ojačavanja nastao je problem nedovoljne čvrstoće same „ploče“ od usitnjenog drva. Takvi nosači opterećeni na savijanje pucali su u sloju ploče s ojačanjem na dva načina: ili vlačnim lomom u ploči ili horizontalnim raslojavanjem ploče. Autori su vjerovali da je do loma dolazilo, ne zbog razljepljivanja između čelične šipke i ploče, već zbog velikih naprezanja u ploči u smjeru šipke koja su nastala uslijed lijepljenja šipke pod visokim tlakom i temperaturom (koji su rezultirali nagnječenjem i trajnom deformacijom drvnih vlakana u zoni uz čeličnu šipku). Ovo je dovelo u pitanje svrhovitost spomenutog postupka u usporedbi s postupkom koji uključuje glodanje utora i lijepljenje materijala za ojačanje.

Drugi način ojačavanja je umetanjem čeličnih šipki u sam drveni lamelirani element (slika 2). Prilikom opterećivanja ovakvih elemenata dolazi do izvijanja i loma u tlačnoj zoni, nakon čega slijedi lom u vlačnoj zoni. Povećanjem broja šipki povećana je čvrstoća na savijanje i smanjen efekt loma u tlačnoj zoni (Parvez 2004. prema Dziuba, 1985.).



**SLIKA 2.** Geometrija Dziubovog eksperimenta. Čelična ojačanja u vlačnoj zoni. (Parvez 2004. prema Dziuba, 1985.)

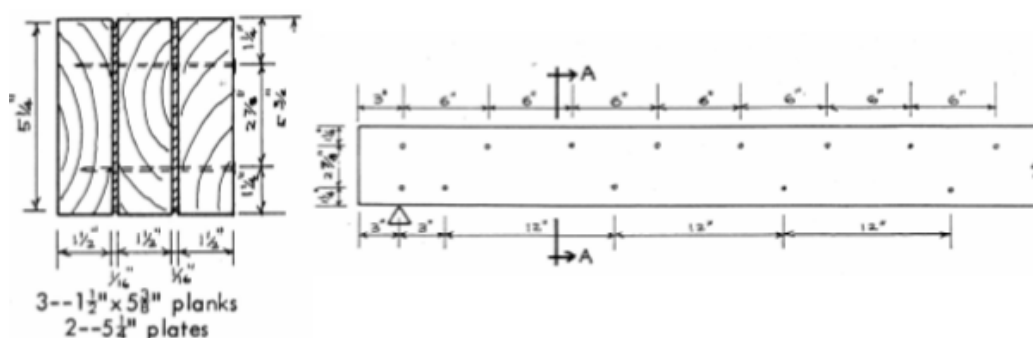
Lameliranje je učinkovit postupak nadogradnje ili popravka materijala a može koristiti materijale za ojačavanje izuzetnih svojstava. Sliker se bavio pitanjem lijepljenja aluminija za drvo pomoću epoksidne smole. Rezultati istraživanja su pokazali da je lameliranje drva vodoravno učinkovitije od vertikalnog lameliranja kada se za ukrućivanje koriste aluminijski profili istog poprečnog presjeka. Lom horizontalno lameliranih uzoraka uglavnom se pojavljivao po sljubnici, dok kod vertikalno laminiranih uzoraka, do loma dolazi u vlačnoj zoni. Sliker je promatrao naprezanje i utvrdio da su okomito lamelirani uzorci doživljavali relativno jednolična naprezanja u tlačnim i vlačnim zonama. Dok su vlakna vodoravno lameliranih uzoraka u tlačnoj zoni mnogo prije dostigla granicu proporcionalnosti nego vlakna u vlačnoj zoni (Parvez 2004. prema Sliker, 1962.).



**SLIKA 3.** Poprečni presjek horizontalno i vertikalno lameliranih aluminijskih ukruta (Parvez 2004. prema Sliker, 1962.)

Korištene su i metode iz drugih industrija, kao na primjer ojačavanje prednaprezanjem, koje se koristi kod izrade prenapregnutog betona. U tom slučaju korištene su prethodno napregnute čelične trake postavljene u vlačnu zonu grede. Ovakvo ojačanje uzrokuje silu u suprotnom smjeru u odnosu na opterećenje grede (nosača), a ona omogućuje povećanje njezine nosivosti. Ispitivanje je pokazalo izuzetne rezultate, ali sam postupak nije našao primjenu u građevinskom sektoru. Razlog tome mogao bi biti kompleksnost postupka, te postojanje jednostavnijih načina ojačavanja.

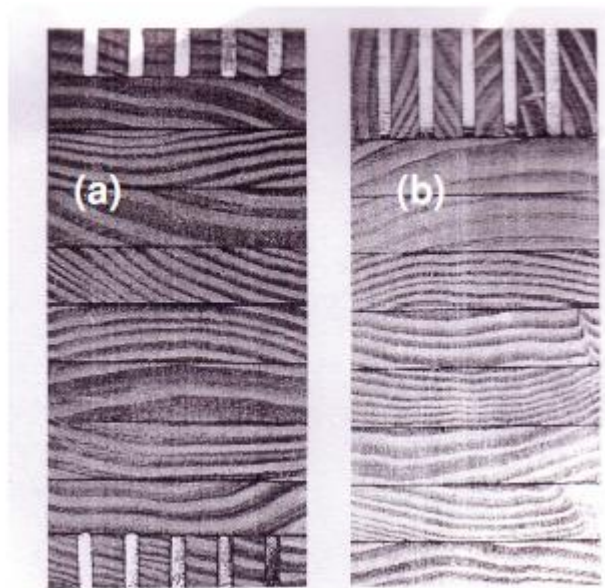
Između svih tih modernih i inovativnih načina ojačavanja drvenih elemenata, svoje mjesto je našao i nešto tradicionalniji način poboljšavanja svojstava konstrukcije. Radi se o ojačavanju čeličnim trakama koje se vezuju u konstrukciju čavlima (slika 3). Rezultati ovog ispitivanja bili su pozitivni, ojačavanje je podignulo savojnu čvrstoću i krutost. Kao zanimljivost je navedena činjenica da je drvo prethodno tretirano kreozotnim uljem pokazalo 20% slabija svojstva (Parvez, 2004. prema Stern i Kumar, 1973.).



**SLIKA 4.** Ojačavanje greda čeličnim pločama vezanim čavlima (Parvez 2004 prema Stern i Kumar, 1973.)

Borgin u svome istraživanju čelične profile za ojačavanje odmiče od neutralne linije, te ih aplicira u zone visokih normalnih naprezanja. Presjek dviju varijanti uzoraka ojačavani su čeličnim ukrutama koje su zauzimale oko 5% površine poprečnog presjeka. U prvom slučaju, ukrute su ravnomjerno raspodijeljene u vlačnu i tlačnu zonu, dok su u drugom slučaju ukrute umetnute isključivo u tlačnu zonu (slika 5). Motiv za ojačavanje samo tlačne zone je podatak da drvo ima bolja vlačna nego tlačna svojstva. Otkriveno je da grede ojačane u tlačnoj zoni daju niže vrijednosti savojne krutosti i veći odmak središnje linije u usporedbi s gredama ojačanim na obje strane, međutim, grede ojačane na gornjoj strani

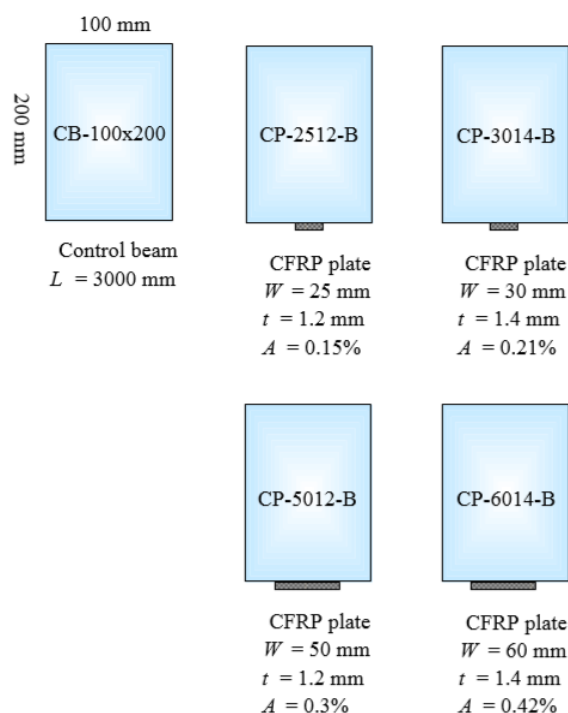
također podnose veće opterećenje do loma, te je proračunata smična čvrstoća bila signifikantno veća kod greda ojačanih samo u tlačnoj zoni (Parvez 2004 prema Borgin, 1968.).



**SLIKA 5.** Vertikalno lamelirane čelične ukrute (Parvez 2004 prema Borgin, 1968.)

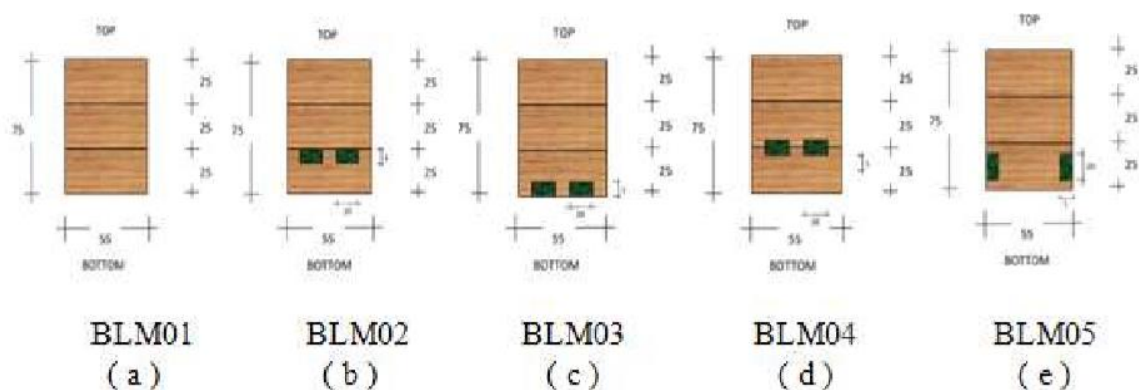
Brunner i Schnueriger izvještavaju o modernijim tehnikama prednaprezanja pomoću polimera ojačanog ugljičnim vlaknima (CFRP). Oni su ojačavali lamelirane grede u vlačnoj zoni i otkrili su da upotreba prednapregnutog CFRP-a pokazuje superiorna savojna svojstva u odnosu na grede ojačanje istom količinom adheziva i CFRP vlakana koja nisu bila prednapregnuta. Bavili su se i rješavanjem problema delaminacije u vlačnoj zoni koja je pratila ojačavanje prednapregnutim vlaknima. Pokušali su korištenjem duktilnih adheziva, ali neuspješno (Parvez, 2004. prema Brunner i Schnueriger, 2004.).

Yusuf i Rahman (2017) su također istraživali savojnu čvrstoću drvenih greda ojačanih karbonskim vlaknima (CFRP- carbon fiber reinforced polymer). Ispitano je 5 gredica, od kojih je jedna bila bez ojačanja, te je služila kao kontrola, dok su ostale grede ojačane (slika 6). Rezultati su pokazali kako postupak ojačavanja pozitivno utječe na čvrstoću na savijanje. Krajnja čvrstoća rasla je s povećanjem udjela vlakana. Konačna čvrstoća značajno je povećana kada je udio vlakana iznosio 0,15%. Ovaj postotak smatran je malim u usporedbi s presjekom grede, ali je povećanje čvrstoće bilo vrlo ohrabrujuće s obzirom da je porast krajnje čvrstoće iznosio 31,8%. Najviši porast čvrstoće iznosio je 44,5% kod uzorka s 0,42% vlakana.



**SLIKA 6.** Poprečni presjek greda ojačanih karbonskim vlaknima (Yusuf i Rahman 2017)

Malo prirodnijim materijalom za ojačavanje bave se Khadafi i suradnici (2018), i to tako da lamelirane konstruktivne elemente ojačavaju bambusovim letvicama. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje su pokazali rast i do 20% kada su uzorci bili ojačani bambusom s vlačne strane.



**SLIKA 7.** Prikaz presjeka greda ojačanih bambusom (Khadafi i suradnici 2018)

## 4. MATERIJAL I METODE

### 4.1. Drvo i priprema

U ispitivanju su korištene hrastove lamelirane gredice dimenzija 1000 mm x 60 mm x 60 mm u kojima je na dvije suprotne strane izrađen utor dimenzija 40 mm x 5 mm predviđen za umetanje ukruta. Nakon lijepljenja ukruta površine su obostrano obložene dodatnim hrastovim lamelama dimenzija 1000 mm x 40 mm x 5 mm. Svi drveni elementi obrađeni su na CNC stroju, kondicionirani u laboratorijskim uvjetima, te je izmjerena masa prije izrade uzoraka za ispitivanje.



**SLIKA 8.** Prikaz ispitne probe prije lijepljenja

### 4.2. Ukrute i smole

Korišteni su čelik, aluminij, staklena vlakna, karbonska vlakna, pleksiglas, epoksidna smola i poliesterska smola. Kao adheziv korištene su iste smole, te su navedeni materijali korišteni u različitim kombinacijama postotnih udjela. Pregled svih ojačanja korištenih u ispitivanju prikazan je u tablici 1.

**Tablica 1.** Pregled materijala korištenih u ispitivanju

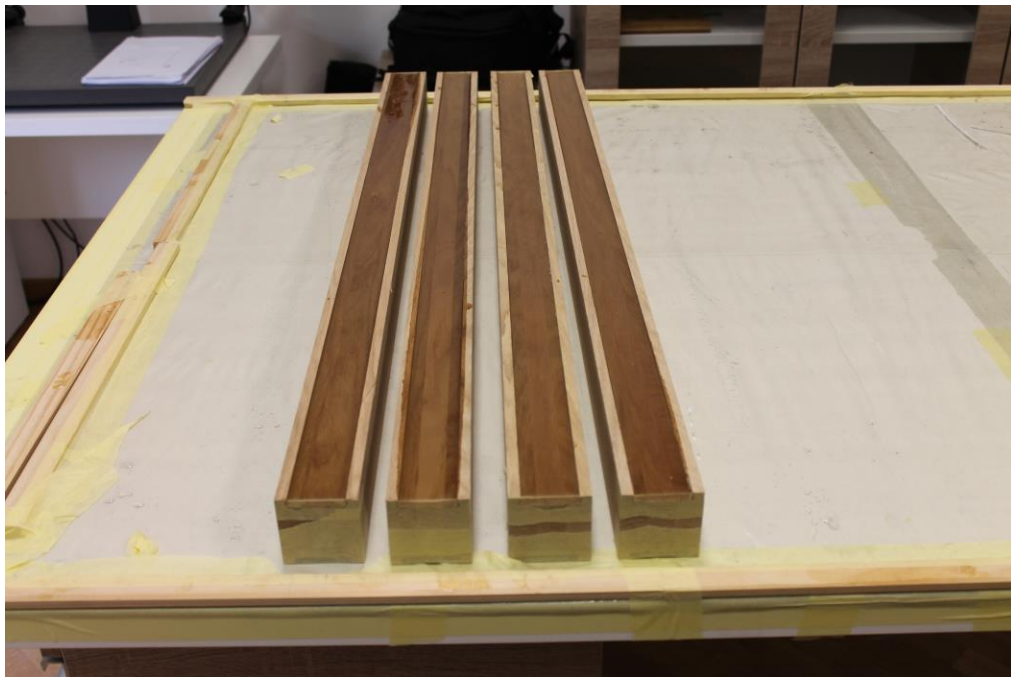
| Oznaka                    | Dimenzija d x š x v (mm) | Opis                                                                                                    |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aluminij                  | 1000 x 40 x 5            | Pločasti aluminijski element lijepljen epoksidnom smolom                                                |
| Čelik                     | 1000 x 40 x 5            | Pločasti čelični element lijepljen epoksidnom smolom                                                    |
| Staklena vlakna           | 1000 x 40 x 5            | Pločasti element izrađen od staklenih vlakana oblijepljenih epoksidnom smolom                           |
| Plastika                  | 1000 x 40 x 5            | Pločasti polikarbonatni element lijepljen epoksidnom smolom                                             |
| Karbon 1/3                | 1000 x 40 x 5            | Pločasti element izrađen od 1/3 karbonskih, i 2/3 staklenih vlakana oblijepljenih epoksidnom smolom     |
| Karbon 2/3                | 1000 x 40 x 5            | Pločasti element izrađen od 2/3 karbonskih, i 1/3 staklenih vlakana oblijepljenih epoksidnom smolom     |
| Poliester karbon          | 1000 x 40 x 5            | Poliesterska smola ulivena u utor navedenih dimenzija, s nalijepljenim jednim slojem karbonskih vlakana |
| Epoksi karbon             | 1000 x 40 x 5            | Epoksidna smola ulivena u utor navedenih dimenzija, s nalijepljenim jednim slojem karbonskih vlakana    |
| Poliester                 | 1000 x 40 x 5            | Poliesterska smola ulivena u utor navedenih dimenzija                                                   |
| Poliester staklena vlakna | 1000 x 40 x 5            | Poliesterska smola ulivena u utor navedenih dimenzija, s nalijepljenim jednim slojem staklenih vlakana  |
| Epoksi staklena vlakna    | 1000 x 40 x 5            | Epoksidna smola ulivena u utor navedenih dimenzija, s nalijepljenim jednim slojem staklenih vlakana     |
| Epoksi                    | 1000 x 40 x 5            | Epoksidna smola ulivena u utor navedenih dimenzija                                                      |
| Čelik 3cm                 | 1000 x 30 x 5            | Pločasti čelični element lijepljen epoksidnom smolom                                                    |
| Al 3cm                    | 1000 x 30 x 5            | Pločasti aluminijski element lijepljen epoksidnom smolom                                                |
| Hrast                     | 1000 x 60 x 60           | Kontrolni uzorci bez ukruta                                                                             |

Sve ukrute izrađene od vlaknastih materijala izrađivane su u laboratoriju. Na ravnoj površini stola izrađivane su kompozitne ploče različitog broja slojeva staklenih vlakana i karbonskih vlakana, kako bi se dobile ukrute debljine 5 mm, ali u varijantama 100% karbonske ukrute, 100% stakloplastične ukrute, 1/3 stakloplastike s 2/3 karbonom, i obratno. Asimetrične ukrute (1/3 ili 2/3 karbona) su tako pozicionirane da karbonska vlakna, koja su boljih vlačnih svojstava budu okrenuta prema vanjskoj strani uzorka.



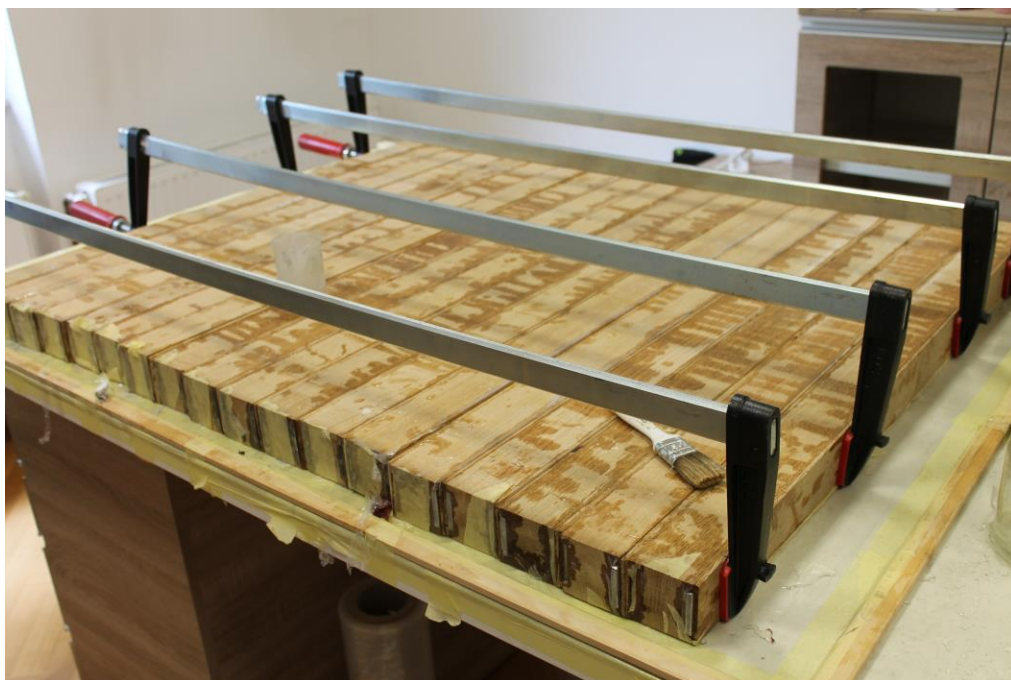
**SLIKA 9.** Karbonska ploča

Postupak pripreme samih uzoraka vršio se u nekoliko faza. Prvo su svi metalni elementi izbrušeni, kako ne bi bilo oštih rubova od postupka krojenja, nakon čega su očišćeni acetonom, kako bi se uklonile sve nečistoće. Drveni elementi su prebrisani i numerirani, nakon čega je na čelone presjeke zalijepljena samoljepiva traka, kako ne bi došlo do istjecanja smole. Postupak lijepljenja ukruta proveden je u nekoliko faze. Prvo su u utore na drvenim elementima umetnute ukrute na jednu stranu tako da je ukruta postavljena u sloj smole, te je nakon otvrdnjavanja smole postupak ponovljen s druge strane. Kod uzoraka gdje je kombiniran samo jedan sloj vlaknastog materijala sa smolom, postupak izrade je bio ulijevanje čistog sloja smole, na kojeg je naknadno nalijepljena prethodno iskrojena vlaknasta traka. Nakon lijepljenja i sušenja svih ukruta na obje strane, uzorci su izbrušeni kako bi se uklonile eventualne neravnine na površinama na koje slijedi lijepljenje hrastovih lamela.



**SLIKA 10.** Četvrtače s umetnutim ukrutama od epoksidne smole

Prije lijepljenja hrastovim lamelama izmjerene su mase i numerirane su, te su jednostrano oblijepljene samoljepivom trakom kako ne bi došlo do međusobnog sljepljivanja u trenutku lijepljenja lamela na uzorke. Lijepljenje je vršeno istom smolom koja je korištena za lijepljenje ukrute (epoksidna ili poliesterska smola), a tlak je postignut slaganjem uzoraka u stupce, te stezanjem stegama (slika 11).



**SLIKA 11.** Završno lijepljenje lamela na uzorke

Gotovi uzorci su nakon sušenja završno brušeni, kako bi se poravnale sve strane, te kako bi se uzorci pripremili za bojanje. Bojanje se vrši nanošenjem bijelog DURALUX BS alkidnog laka valjcima, i to tako da se jedna ploha uzorka oboji, nakon čega slijedi točkasto bojanje crnom bojom. Ovakav način pripreme uzoraka omogućuje praćenje deformacija prilikom savijanja u uređaju za mehanička ispitivanja u kombinaciji sa sustavom ARAMIS. Svi uzorci prije ispitivanja kondicionirani su 4 tjedna u laboratorijskim uvjetima od 23 °C i 50 % relativne vlage zraka.



**SLIKA 12.** Uzorci pripremljeni za ispitivanje deformacija pri savijanju

### 4.3. Postupak ispitivanja

Izrađeni uzorci su ispitivani na savijanje u četiri točke. Savijanje je provedeno na univerzalnom uređaju za mehanička ispitivanja mehaničkih svojstava (kidalice SHIMADZU AG-X 100 kN). A ciklus kojim se vršilo ispitivanje je bio pri brzini pomaka traverze od 5 mm/min. Deformacije i naprezanja su mjerene kontinuirano kroz ciklus, a ciklus se sastoji od povećavanja sile do 4000 N, zatim do 9000 N, i zadnje do 14000 N, nakon čega slijedi rasterećenje uzorka do sile od 10 N, na svakom prethodno navedenom opterećenju, pomak

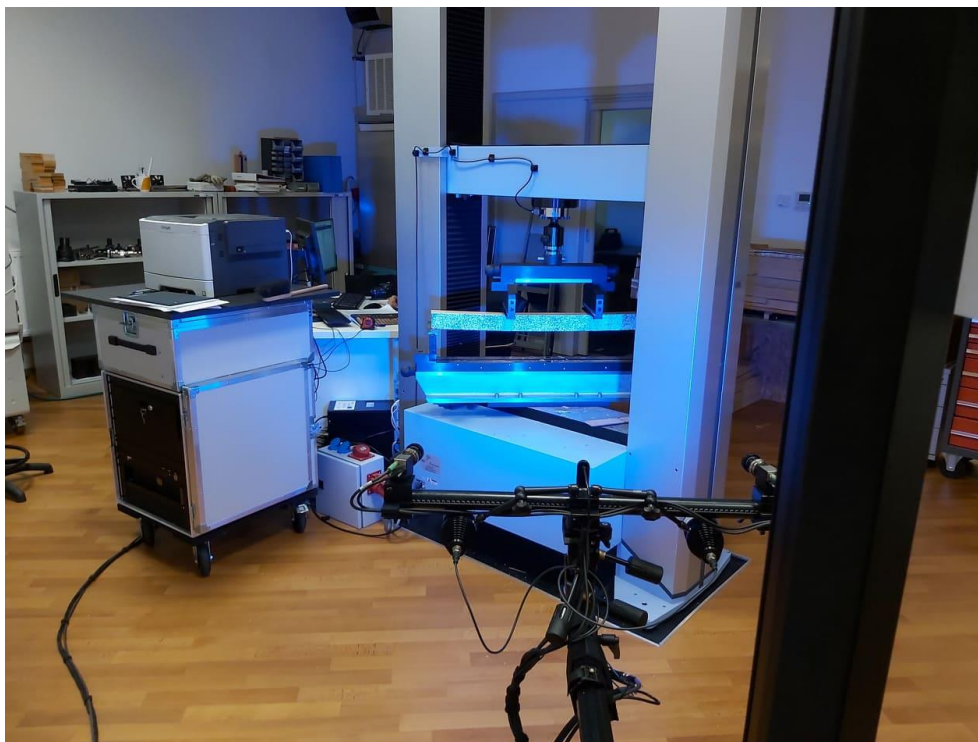
se zaustavlja na 10 sekundi, te se kratko zadržava statičko opterećenje, nakon čega slijedi opterećenje do loma uzorka.

|              | Area1                                                                             | Area2                                                                             | Area3                                                                             | Area4                                                                             | Area5                                                                             | Area6                                                                             | Area7                                                                               | Area8                                                                               | Area9                                                                               | Area10              |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Act.         |  |  |  |  |  |  |  |  |  | OFF                 |
|              | Down Stroke                                                                       | Hold Stroke                                                                       | Down Stroke                                                                       | Hold Stroke                                                                       | Down Stroke                                                                       | Hold Stroke                                                                       | Up Stroke                                                                           | Hold Stroke                                                                         | Down Stroke                                                                         |                     |
|              | 5,000                                                                             |                                                                                   | 5,000                                                                             |                                                                                   | 5,000                                                                             |                                                                                   | 10,000                                                                              |                                                                                     | 5,000                                                                               |                     |
|              | mm/min                                                                            |                                                                                   | mm/min                                                                            |                                                                                   | mm/min                                                                            |                                                                                   | mm/min                                                                              |                                                                                     | mm/min                                                                              |                     |
| Change point | Details                                                                           | Details                                                                           | Details                                                                           | Details                                                                           | Details                                                                           | Details                                                                           | Details                                                                             | Details                                                                             | Details                                                                             |                     |
|              | Channel                                                                           | Duration                                                                          | Channel                                                                           | Duration                                                                          | Channel                                                                           | Duration                                                                          | Channel                                                                             | Duration                                                                            | Channel                                                                             |                     |
|              | Force                                                                             |                                                                                   | Force                                                                             |                                                                                   | Force                                                                             |                                                                                   | Force                                                                               |                                                                                     | Force                                                                               |                     |
|              | 4000                                                                              | 10                                                                                | 9000                                                                              | 10                                                                                | 14000                                                                             | 10                                                                                | 10                                                                                  | 10                                                                                  | 50000                                                                               |                     |
|              | N                                                                                 | sec                                                                               | N                                                                                 | sec                                                                               | N                                                                                 | sec                                                                               | N                                                                                   | sec                                                                                 | N                                                                                   |                     |
|              | Set                                                                               | Set                                                                               | Set                                                                               | Set                                                                               | Set                                                                               | Set                                                                               | Set                                                                                 | Set                                                                                 | Set                                                                                 |                     |
| GetData      | oke Stroke Strain                                                                 | Droke Stroke Strain                                                               | Droke Stroke Strain                                                               | Droke Stroke Strain                                                               | Droke Stroke Strain                                                               | Droke Stroke Strain                                                               | Droke Stroke Strain                                                                 | Droke Stroke Strain                                                                 | Droke Stroke Strain                                                                 | Droke Stroke Strain |
| Samplings    | 10msec                                                                            | Same as prev. area                                                                | Same as prev. area                                                                | Same as prev. area                                                                | Same as prev. area                                                                | Same as prev. area                                                                | Same as prev. area                                                                  | Same as prev. area                                                                  | Same as prev. area                                                                  | Same as prev. area  |
| Loop         | None                                                                              | None                                                                              | None                                                                              | None                                                                              | None                                                                              | None                                                                              | None                                                                                | None                                                                                | None                                                                                | None                |

**SLIKA 13.** Grafički prikaz jednog ciklusa

ARAMIS je beskontaktni optički 3D mjerni sustav koji analizira, izračunava i dokumentira deformacije objekata, pokrete krutog tijela i dinamičko ponašanje mjerenih objekata. Sustav određuje 3D koordinate određenih točaka tijekom određenog vremenskog razdoblja. Vremenska razlučivost ovisi o frekvenciji koja se koristi za snimanje slike. Opcije frekvencija kamere ovise o upotrijebljenom senzoru ili upotrijebljenim kamerama. Prije ispitivanja uređaj je kalibriran pomoću kalibracijske ploče u 9 faza.

Slike koje su uzete kao referentne snimljene su kod opterećenja od 4000 N, 9000 N, 14000 N, 10 N, neposredno prije loma i neposredno nakon loma. Grafički su prikazana područja naprezanja prilikom savijanja kod spomenutih opterećenja. Vidljivo je da su glavna naprezanja u vlačnoj zoni što je i za očekivati te ako usporedimo prikaze kod opterećenja od 14000 N vidljivo je da se područja naprezanja znatno razlikuju u odnosu na vrstu ukrute. Naprezanja su označena bojama, plavo mala naprezanja – crveno jaka naprezanja. A raspodjela naprezanja je određena pomakom svih označenih točkica u odnosu na početni položaj.



**SLIKA 14.** Mjerenje deformacija optičkim sustavom ARAMIS

## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

### 5.1. Prikaz deformacija kod zadanog opterećenja

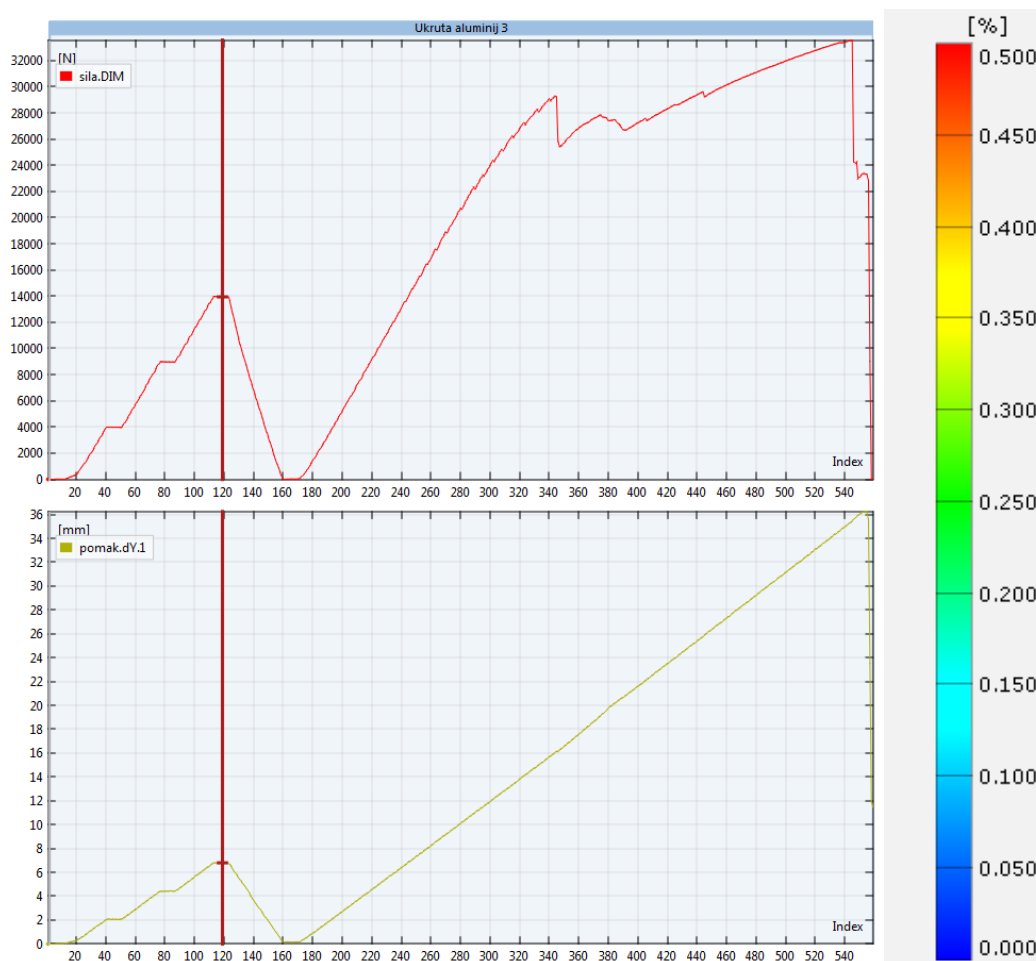
Svaki pojedini uzorak prilikom opterećenja na kidalici je kontinuirano sniman iz čega je kasnije izlučen niz fotografija koje pokazuju deformacije ispitne probe, a koja u kombinaciji s grafičkim prikazom sile i pomaka daju vrlo korisne informacije o ponašanju pri opterećenju. Za svaku izvedbu ukruta odabran je jedan reprezentativni prikaz.

Sve dalje prikazane fotografije za svaku varijantu će redom pokazivati: grafički prikaz sile, grafički prikaz pomaka, deformacija pri 4000 N, deformacija pri 9000 N, deformacija pri 14000 N, zaostale deformacije pri opterećenju of 10 N, deformacija neposredno prije loma, i deformacija neposredno nakon loma.

### 5.1.1. Rezultati za uzorak ojačan aluminijskom ukrutom presjela 40 x 5 mm

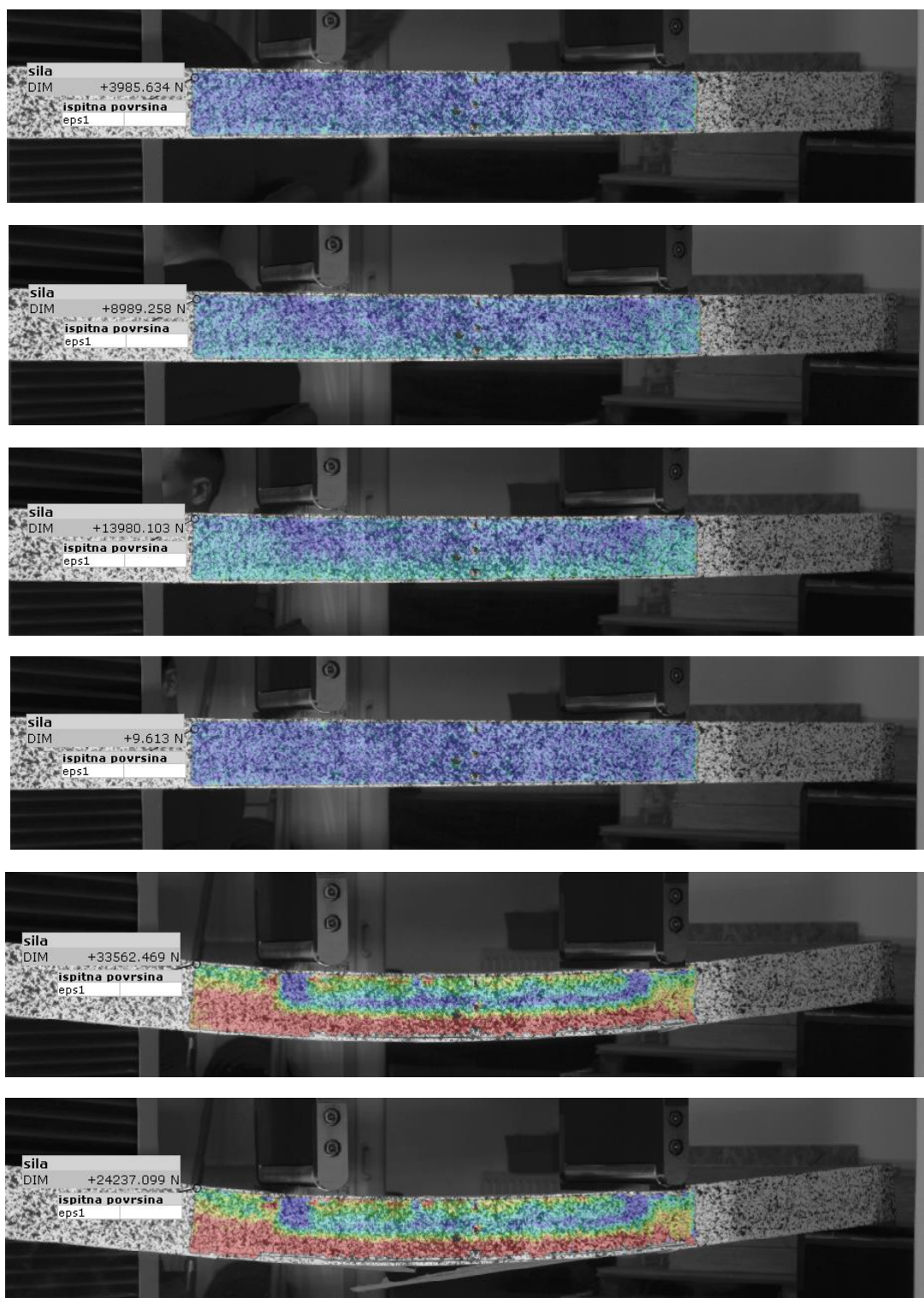
**Tablica 2.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtaca ojačanih ukrutom od aluminijske šipke poprečnog presjeka 40 x 5 mm.

| BR | Ukruta   | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|----------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |          |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 1  | Aluminij | 1      | 2,07                   | 4,49 | 6,92  | 0,05                     | 18,92     | 23353         |
| 2  | Aluminij | 2      | 2,34                   | 4,86 | 7,32  | 0,42                     | 31,96     | 29772         |
| 3  | Aluminij | 3      | 2,06                   | 4,41 | 6,8   | 0,16                     | 35,43     | 33562         |



**Slika 15.** Grafički prikazi sile i pomaka kod aluminijskih ukruta, i skala deformacija

Aluminij se pokazao kao dobar odabir, uz relativno malu gustoću, pokazuje i niske trajne deformacije, te visoku silu loma. Pomaci kod malih opterećenja su mali, zaostale deformacije nakon rasterećenja najmanjih vrijednosti od svih ispitanih uzoraka u iznosu od 0,105 mm, a prosječna sila loma iznosi 28895 N, i to je četvrta najveća vrijednost.

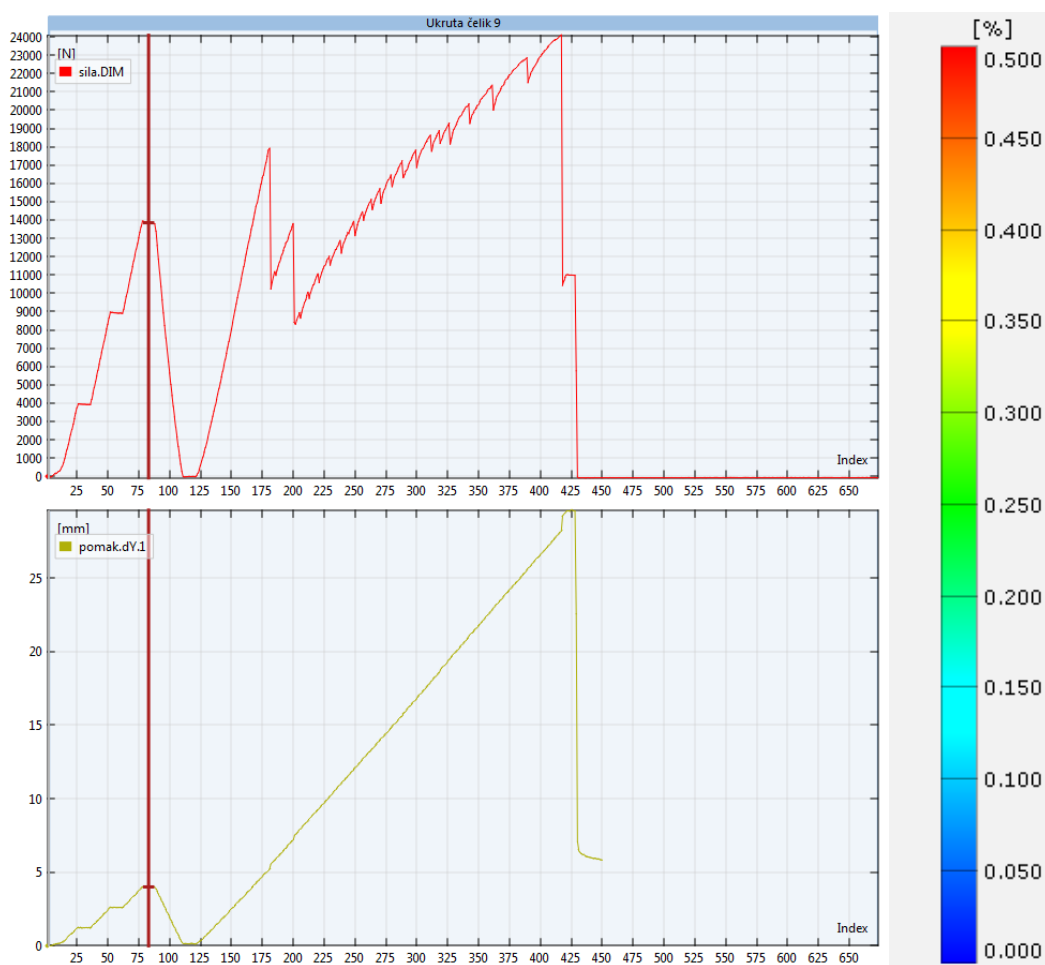


**Slika 16.** Prikaz raspodjele naprezanja kod aluminijske ukrute 40 mm

### 5.1.2. Rezultati za uzorak ojačan čeličnom ukrutom presjeka 40 x 5 mm

**Tablica 3.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtaca ojačanih ukrutom od čelične šipke poprečnog presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta | Oznaka | Pomak u mm kod sile(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|--------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |        |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 4  | Čelik  | 7      | 1,3                    | 2,96 | 15,62 | 1,8                      | 32,41     | 22050         |
| 5  | Čelik  | 8      | 1,17                   | 4,34 | 6,9   | 0,08                     | 26,77     | 25866         |
| 6  | Čelik  | 9      | 1,22                   | 2,59 | 3,99  | 0,13                     | 28,21     | 24089         |
| 7  | Čelik  | 10     | 1,27                   | 2,69 | 7,38  | 0,95                     | 30,7      | 24691         |

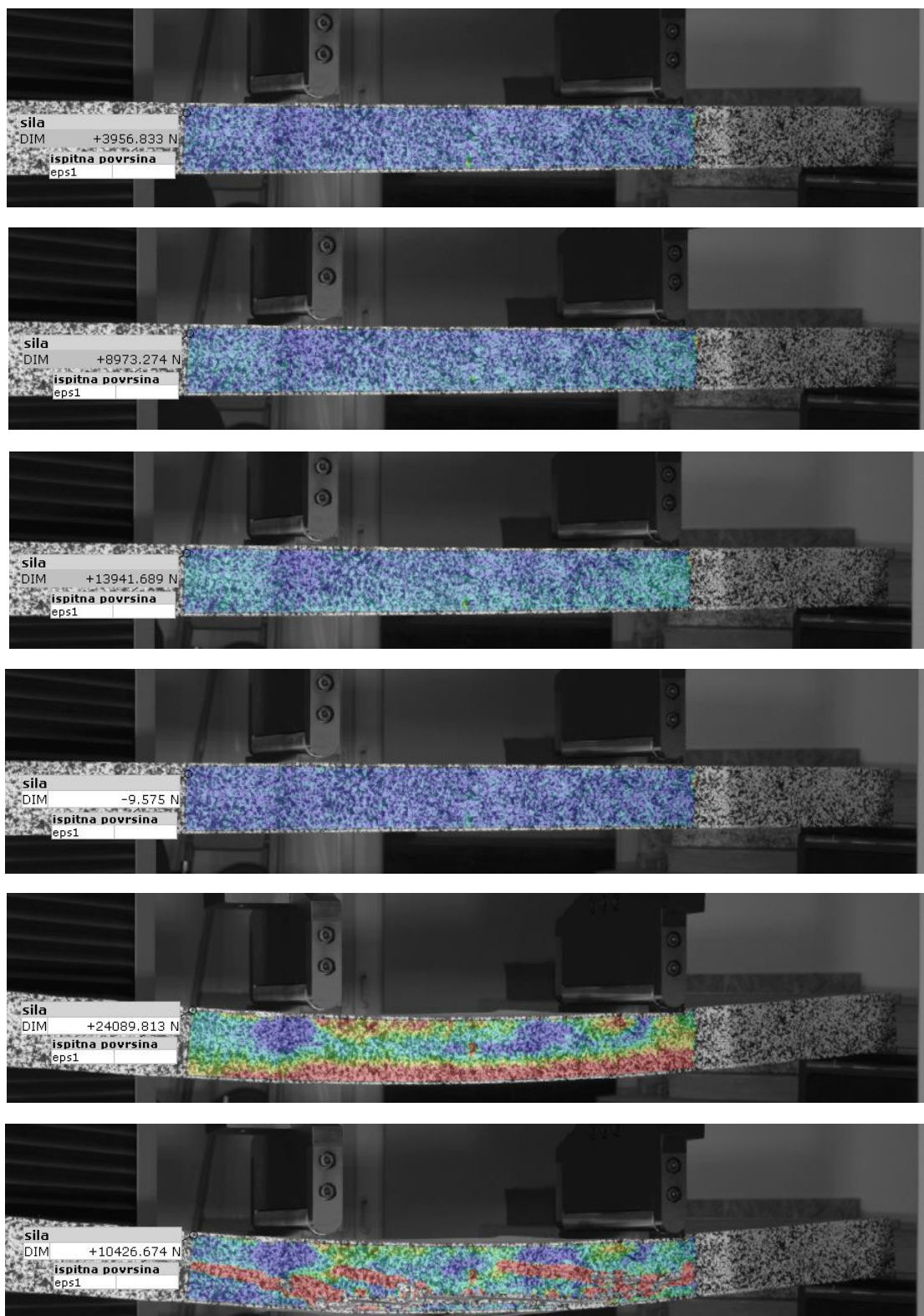


**Slika 17.** Grafički prikazi sile i pomaka kod čeličnih ukruta, i skala deformacija

Čelik je pokazao lošija svojstva u odnosu na druge materijale, uz drugu najveću trajnu deformaciju koja iznosi 0,74 mm, a negativna strana mu je i velika gustoća (7750 kg/m<sup>3</sup>). Uočeno je i loše vezanje epoksidnom smolom čelika za drvo, što je vidljivo i u gornjem grafičkom prikazu gdje dolazi do mnogo nepotpunih puknuća prije potpunog

## REZULTATI I DISKUSIJA

pucanja. Prosječna sila loma iznosi 24174 N, što je približno isto kao i hod hrastovine bez ukruta.

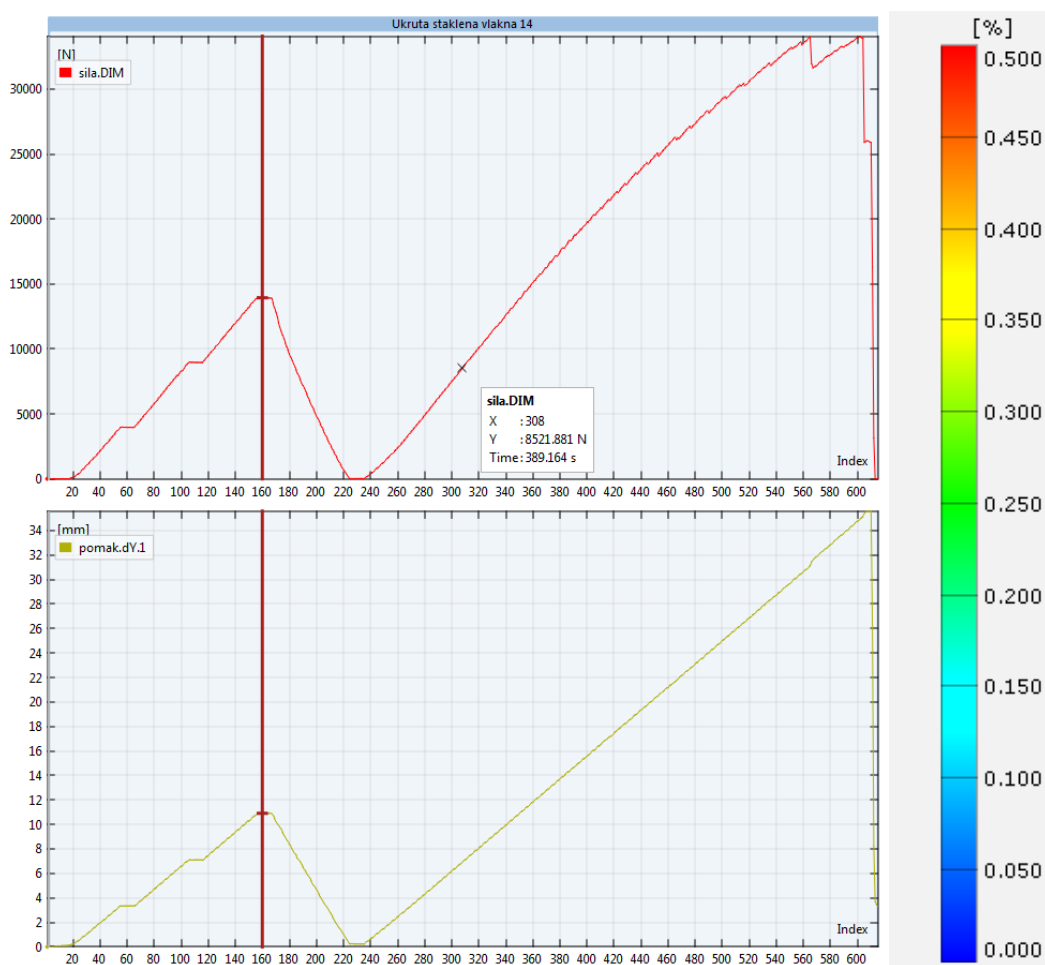


**Slika 18.** Prikaz raspodjele naprezanja kod čelične ukrute 5 cm

### 5.1.3. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm

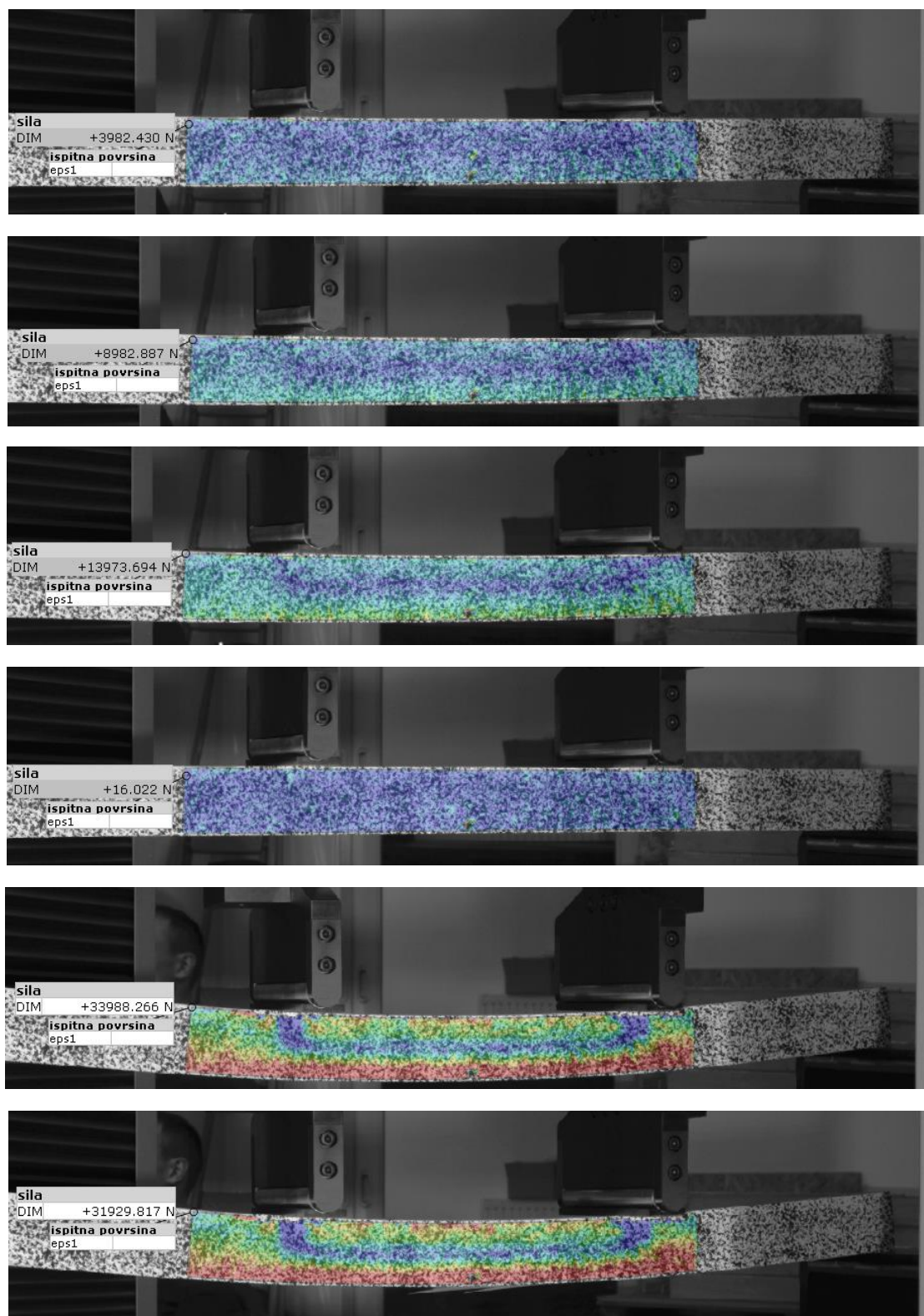
**Tablica 4.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od staklenih vlakana poprečnog presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta          | Oznaka | Pomak u mm kod sile(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|-----------------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |                 |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 8  | Staklena vlakna | 13     | 3,15                   | 6,89 | 10,76 | 0,28                     | 35,4      | 32707         |
| 9  | Staklena vlakna | 14     | 3,33                   | 7,08 | 10,89 | 0,25                     | 34,96     | 34068         |
| 10 | Staklena vlakna | 15     | 3,89                   | 8,15 | 12,63 | 0,55                     | 37,05     | 32275         |



**Slika 19.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukruta od staklenih vlakana, i skala deformacija

Uzorci s ukrutama od staklenih vlakana imaju izuzetno velik pomak prije samog loma, a on iznosi 35,8 mm, u odnosu na prosjek koji iznosi 28,9 mm. Prosječna maksimalna sila iznosi 33016 N, što je druga najveća vrijednost, a trajna deformacija pri rasterećenju do 10 N iznosi 0,36 mm.

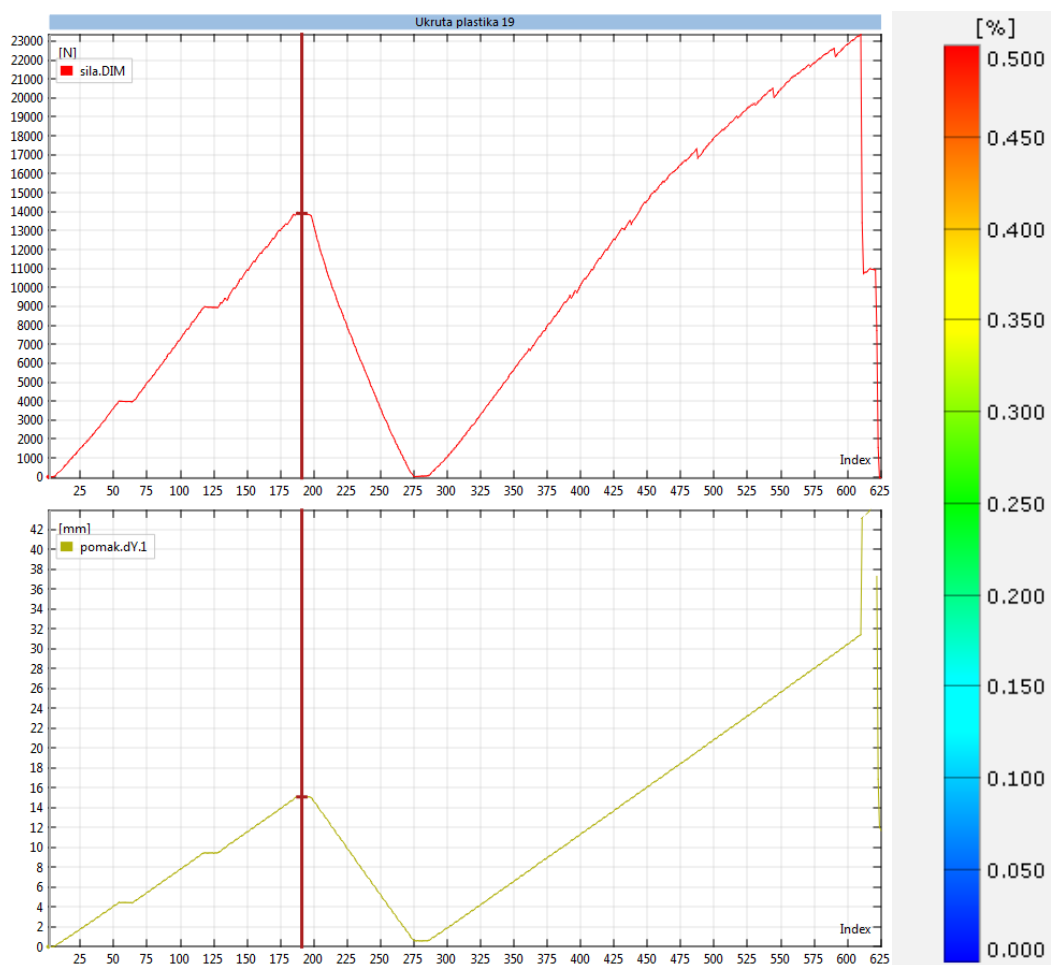


Slika 20. Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od staklenih vlakana

#### 5.1.4. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od polikarbonata presjeka 40 x 5 mm

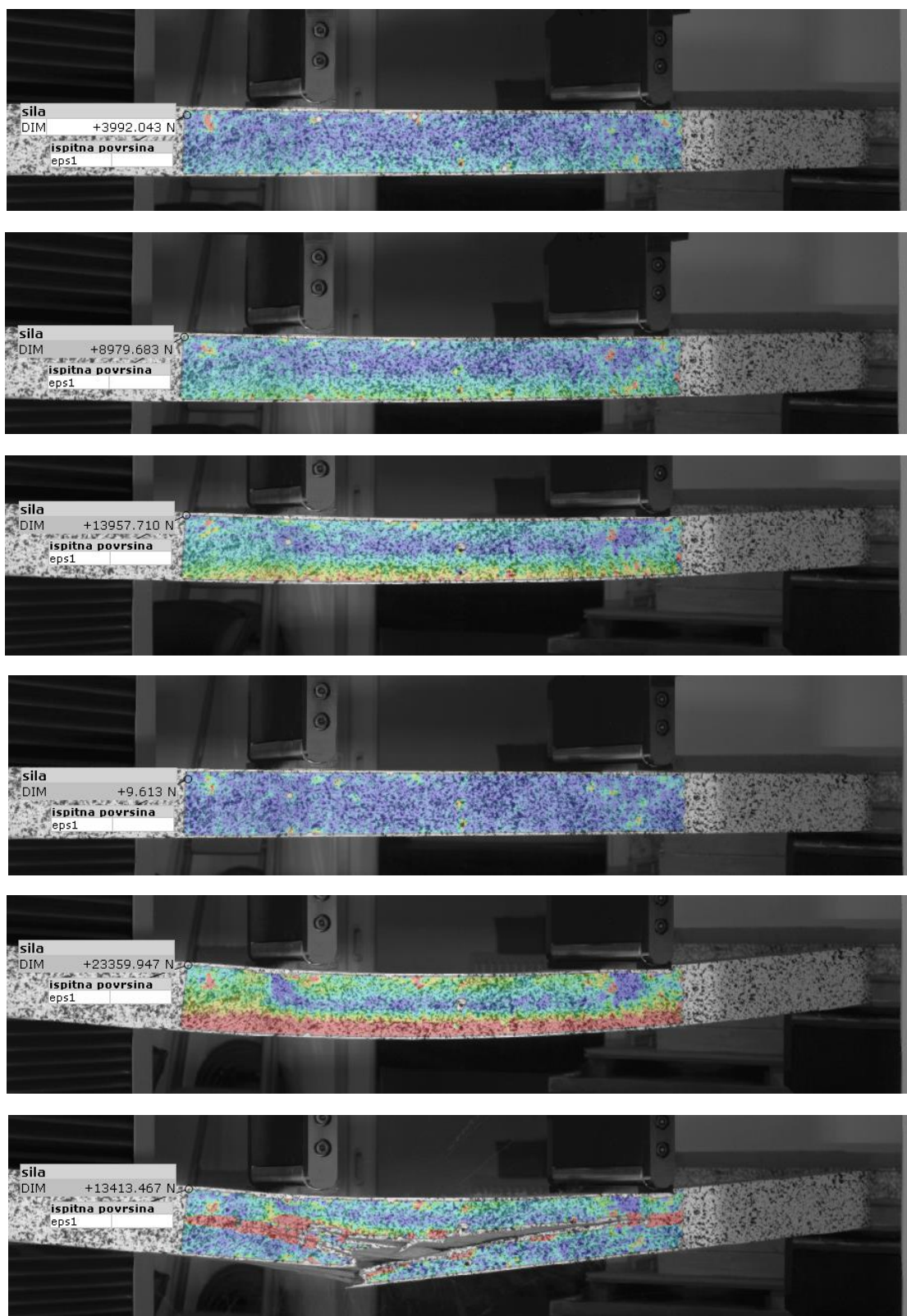
**Tablica 5.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od plastike poprečnog presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta   | Oznaka | Pomak u mm kod sile(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|----------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |          |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 11 | Plastika | 19     | 4,45                   | 9,46 | 14,88 | 0,58                     | 31,43     | 23359         |
| 12 | Plastika | 20     | 4,42                   | 9,53 | 15,12 | 0,65                     | 30,22     | 23235         |
| 13 | Plastika | 21     | 3,9                    | 8,62 | 13,66 | 0,45                     | 33,1      | 26330         |



**Slika 21.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukruta od polikarbonata, i skala deformacija

Ukrute od polikarbonata pokazuju četvrti najlošiji rezultat deformacije kod rasterećenja u iznosu od 0,56 mm, i razmjerno dobre rezultate kod sile loma od 24308 N.

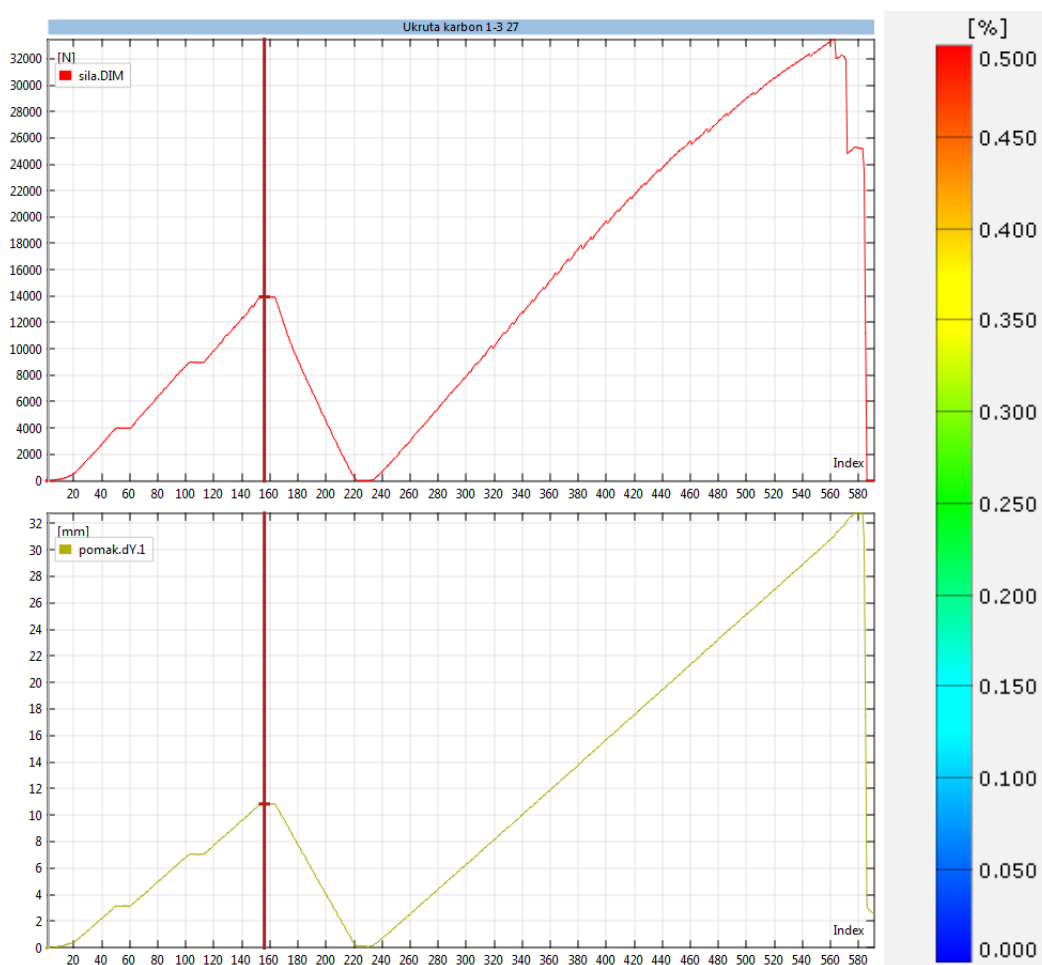


**Slika 22.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od polikarbonata

### 5.1.5. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od 1/3 karbonskih vlakana i 2/3 staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm

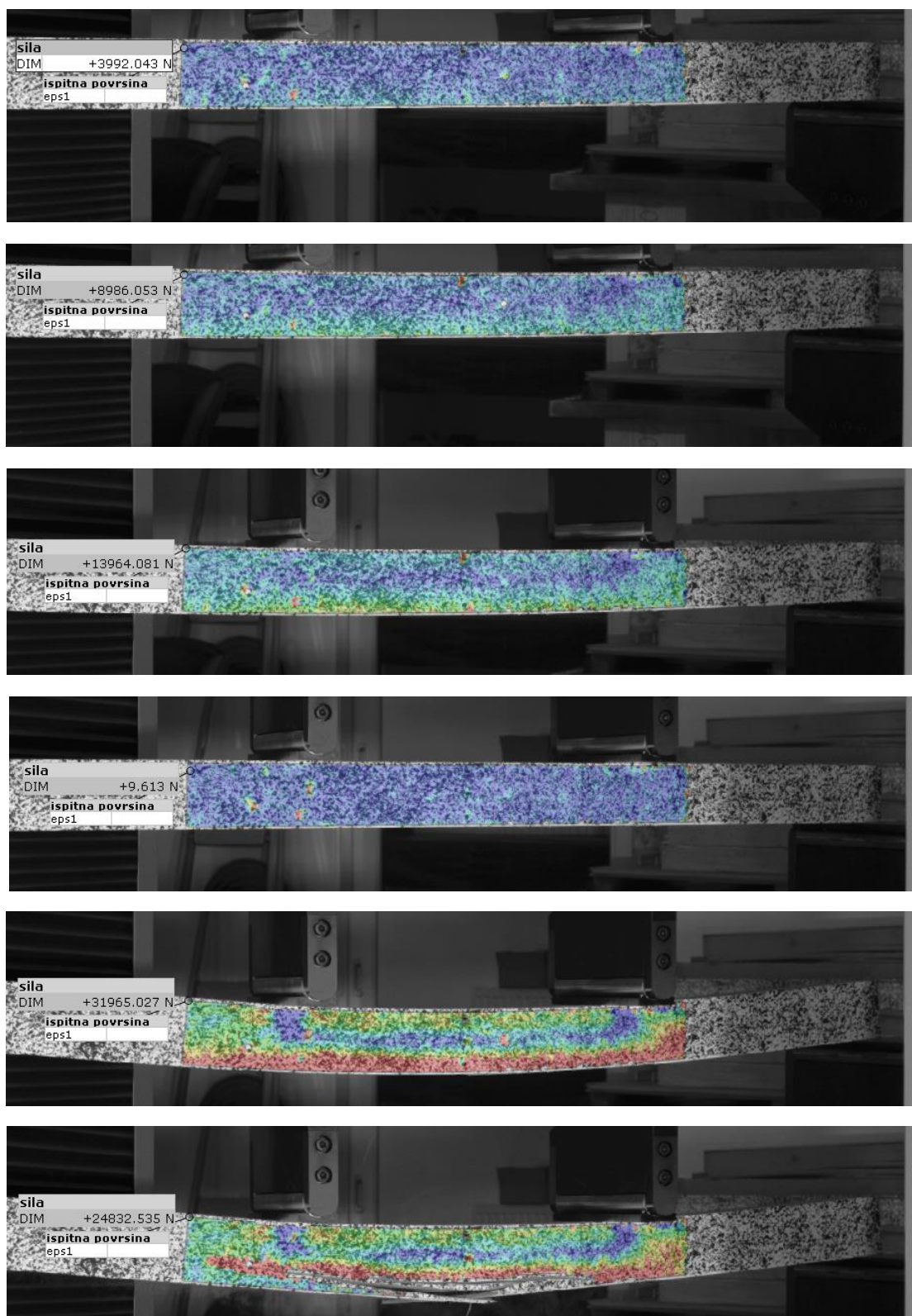
**Tablica 6.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od 1/3 karbonskih vlakana i 2/3 staklenih vlakana poprečnog presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta     | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|------------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |            |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 14 | Karbon 1/3 | 26     | 3,38                   | 7,45 | 11,4  | 0,19                     | 31,15     | 31257         |
| 15 | Karbon 1/3 | 27     | 3,14                   | 7,05 | 10,82 | 0,11                     | 31,06     | 33485         |



**Slika 23.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukruta od 1/3 karbona, i skala deformacija

Kod ukruta izrađenih s 1/3 karbonskih vlakana vidljiva je niska trajna deformacija pri rasterećenju do 10 N, a iznosi 0,15 mm. Dok je sila loma treća najveća vrijednost u iznosu od 32371 N. Usporedno s ukrutama od 2/3 karbona, trajna deformacija je vrlo slična, dok je kod 2/3 karbona sila loma osjetno veća.

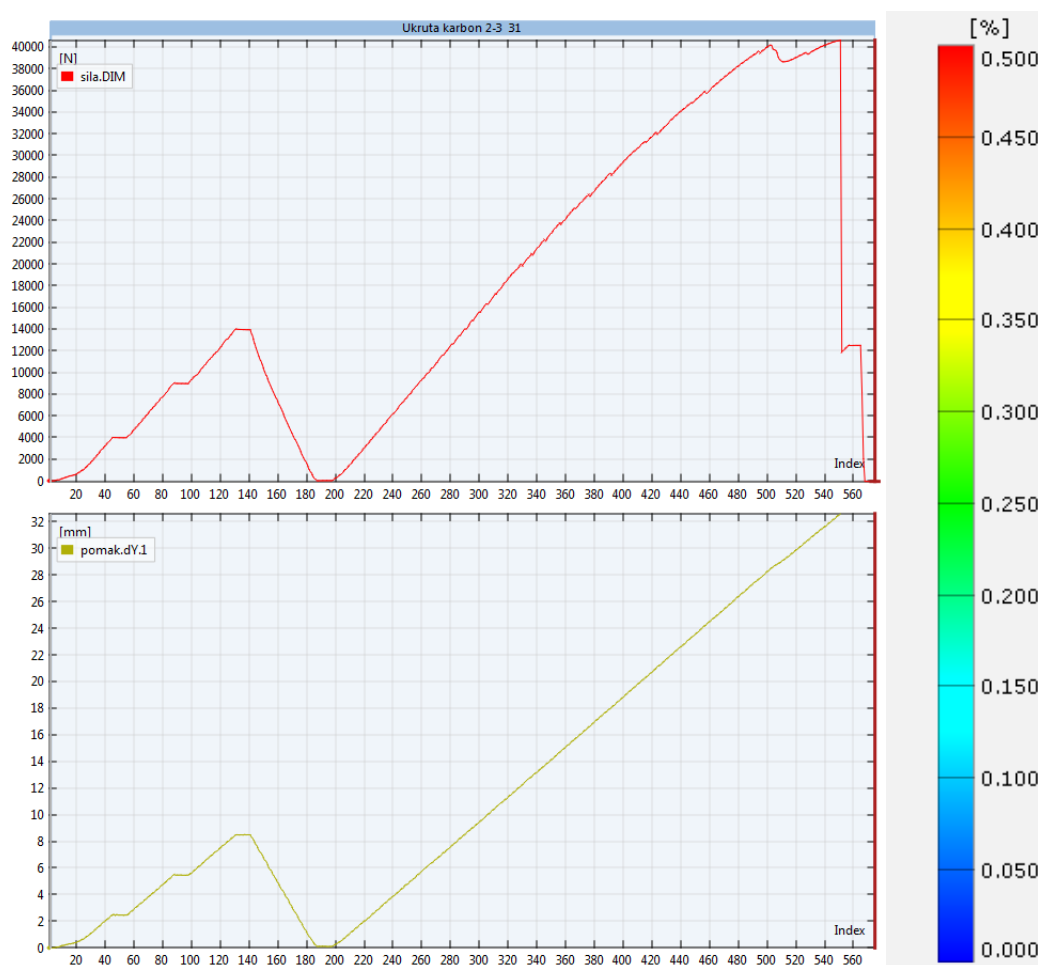


**Slika 24.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od 1/3 karbona

### 5.1.6. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od 2/3 karbonskih vlakana i 1/3 staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm

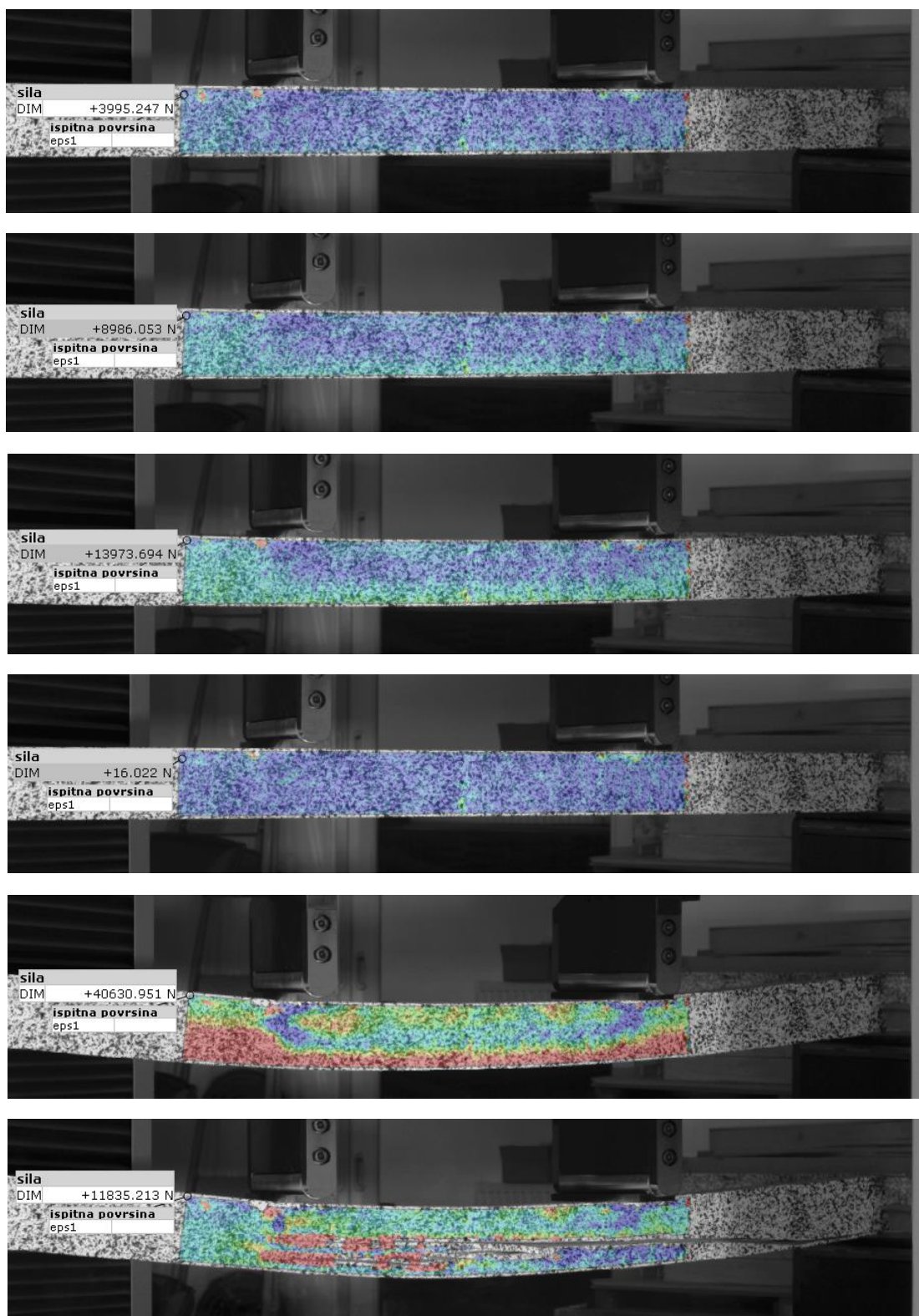
**Tablica 7.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od 2/3 karbonskih vlakana i 1/3 staklenih vlakana poprečnog presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta     | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|------------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |            |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 16 | Karbon 2/3 | 30     | 2,76                   | 5,77 | 8,8   | 0,23                     | 25,94     | 37576         |
| 17 | Karbon 2/3 | 31     | 2,45                   | 5,48 | 8,47  | 0,12                     | 32,6      | 40630         |



**Slika 25.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukruta od 2/3 karbona, i skala deformacija

Uzorci s ukrutama izrađenim od 2/3 karbonskih vlakana pokazuju visoku silu loma. Konkretno, uzorak 31 je postigao najvišu silu loma u iznosu od 40630 N. Prosjek sila je isto tako najveće vrijednosti, a iznosi 39103 N, dok je trajna deformacija pokazala treće najbolje rezultate, a iznosi 0,175 mm.

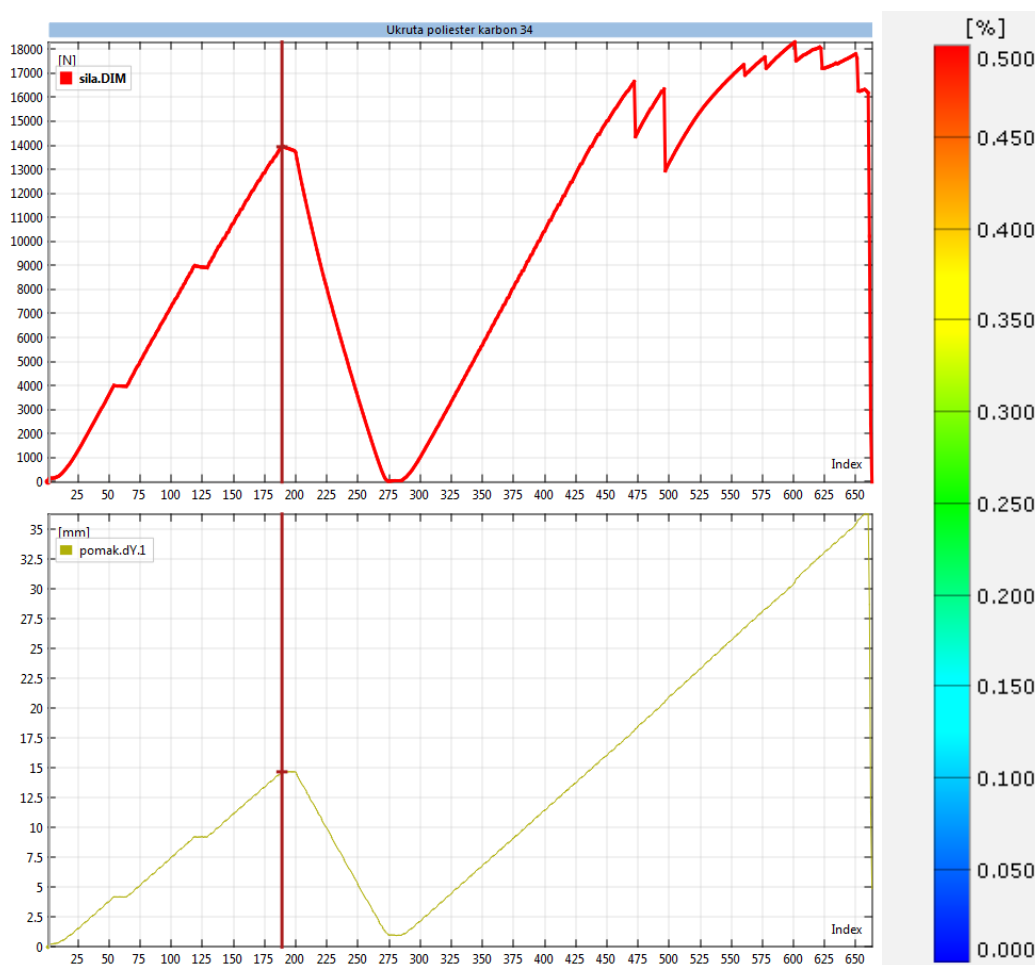


**Slika 26.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od 2/3 karbona

### 5.1.7. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od poliesterske smole i jednog sloja karbonskih vlakana presjeka 40 x 5 mm

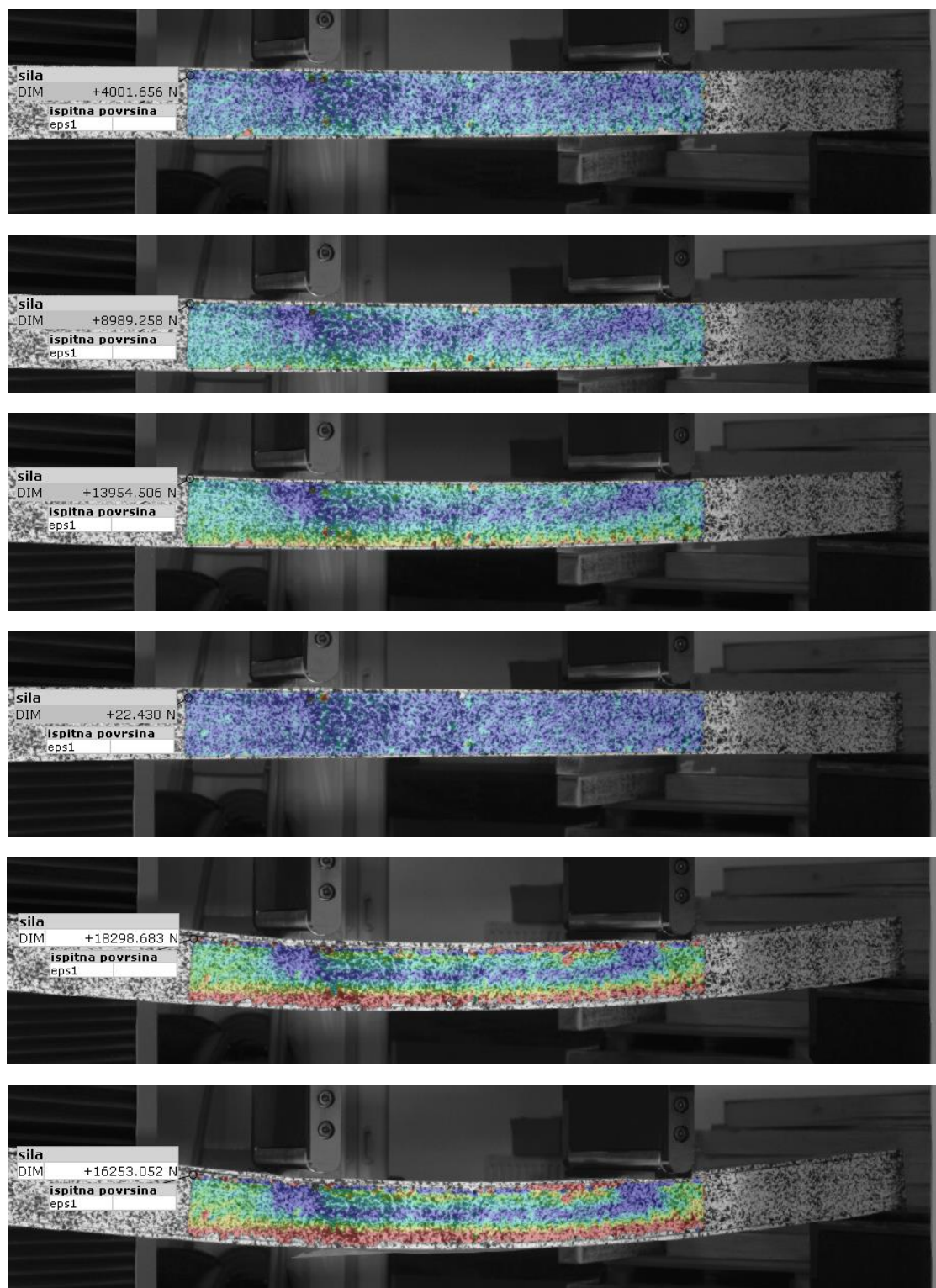
**Tablica 8.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od poliesterske smole i jednog sloja karbona presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta           | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|------------------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |                  |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 18 | Poliester karbon | 34     | 4,2                    | 9,22 | 14,7  | 1,01                     | 30,51     | 18298         |
| 19 | Poliester karbon | 35     | 4,4                    | 9,27 | 16,99 | 0,91                     | 42,91     | 18269         |



**Slika 27.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od poliesterske smole i jednog sloja karbona, i skala deformacija

U ovoj varijanti ukrucivanja hrastovih četvrtača vidljiva je velika trajna deformacija u odnosu na ostale uzorke, a iznosi 0,96 mm. Isto tako, sile loma su druge najniže zabilježene vrijednosti, a prosječno iznose 18283 N.

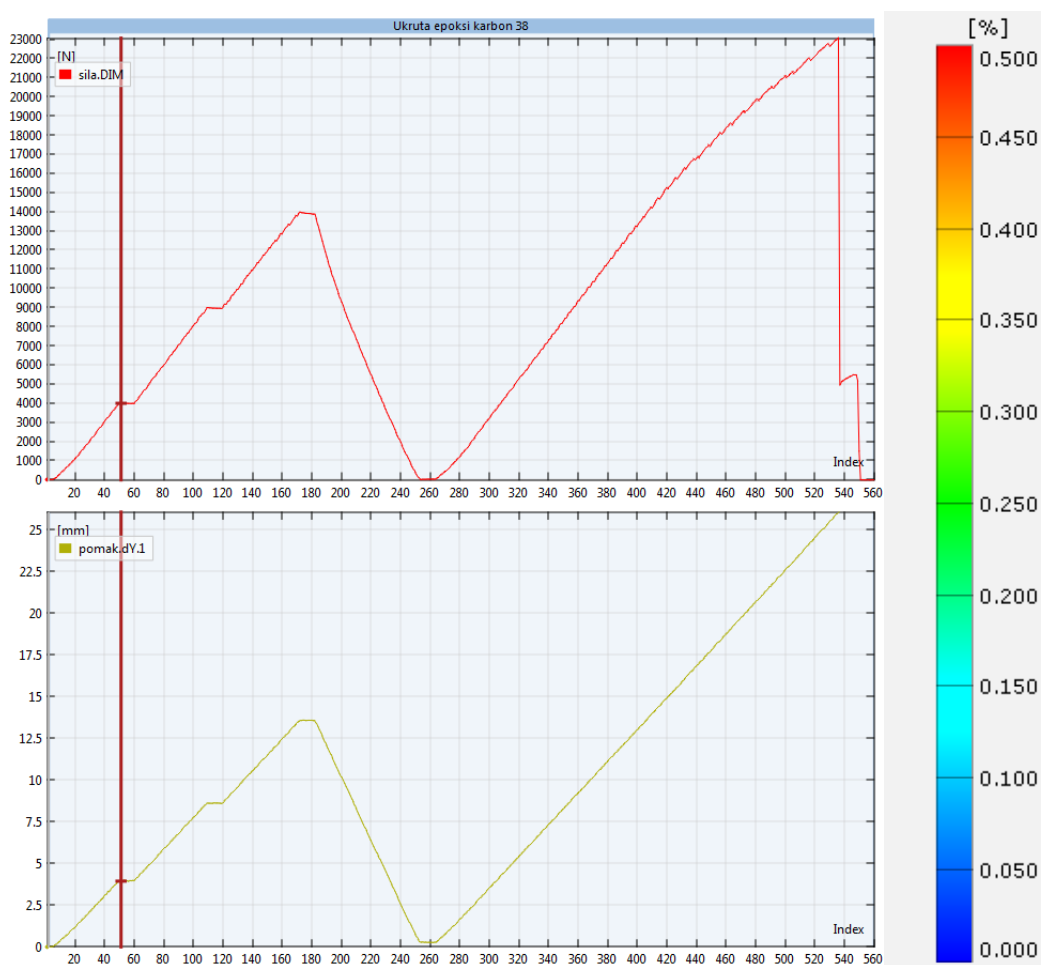


**Slika 28.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od poliesterske smole i jednog sloja karbona

### 5.1.8. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od epoksidne smole i jednog sloja karbonskih vlakana presjeka 40 x 5 mm

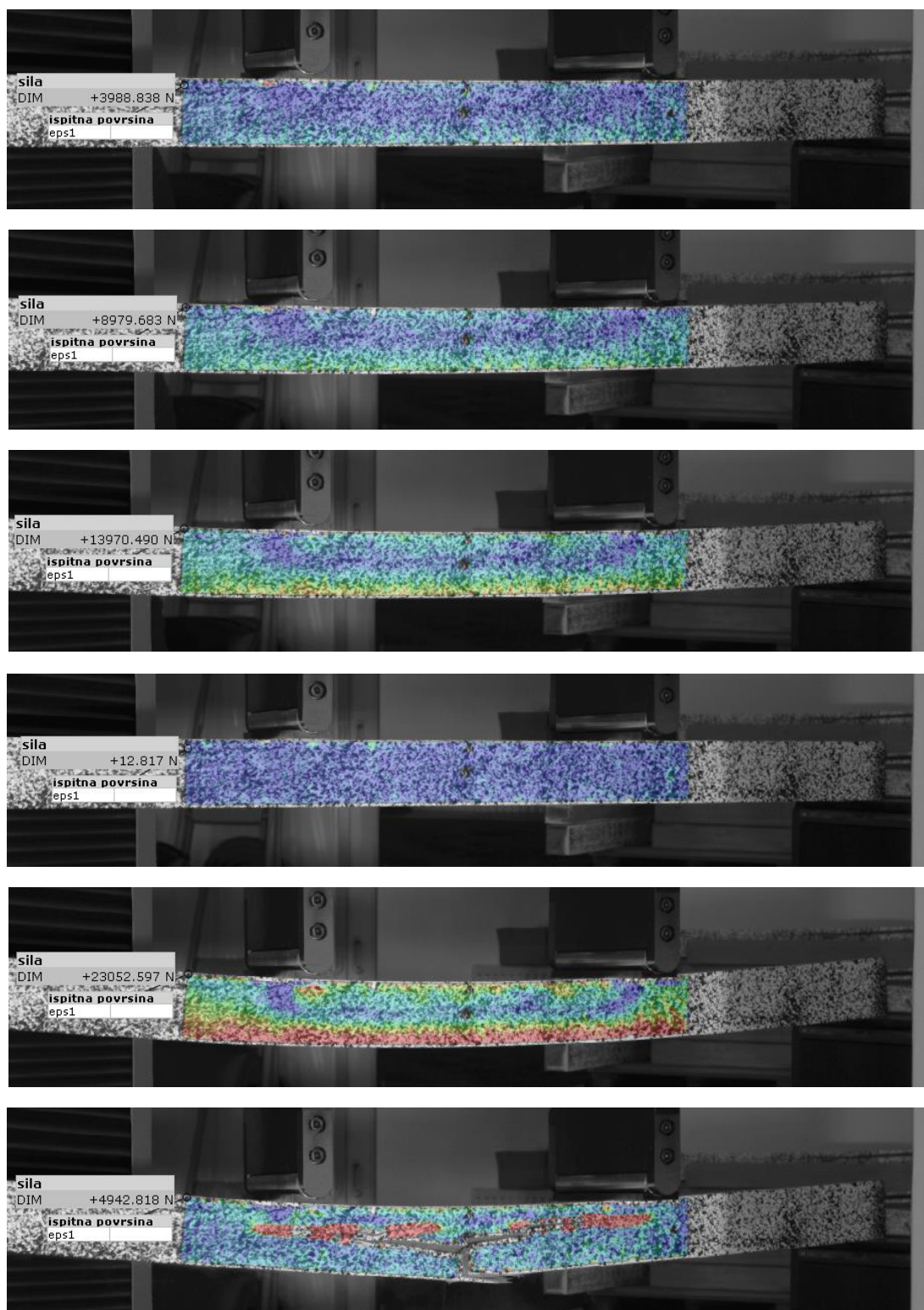
**Tablica 9.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od epoksidne smole i jednog sloja karbona presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta        | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|---------------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |               |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 20 | Epoksi karbon | 38     | 3,97                   | 8,61 | 13,51 | 0,28                     | 26,07     | 23052         |
| 21 | Epoksi karbon | 39     | 4,1                    | 8,9  | 13,86 | 0,31                     | 27,7      | 22463         |



**Slika 29.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od epoksidne smole i jednog sloja karbona, i skala deformacija

Ova vrsta ukruta se ni po čemu ne ističe niti u pozitivnom niti negativnom smislu. Vrijednosti trajne deformacije kod rasterećenja su 0,295, a sile loma 22757 N. Usporedno s poliesterskom smolom s jednim slojem karbona, sile loma su relativno niske u oba slučaja, dok je trajna deformacija puno veća kod poliesterske smole s jednim slojem karbona.

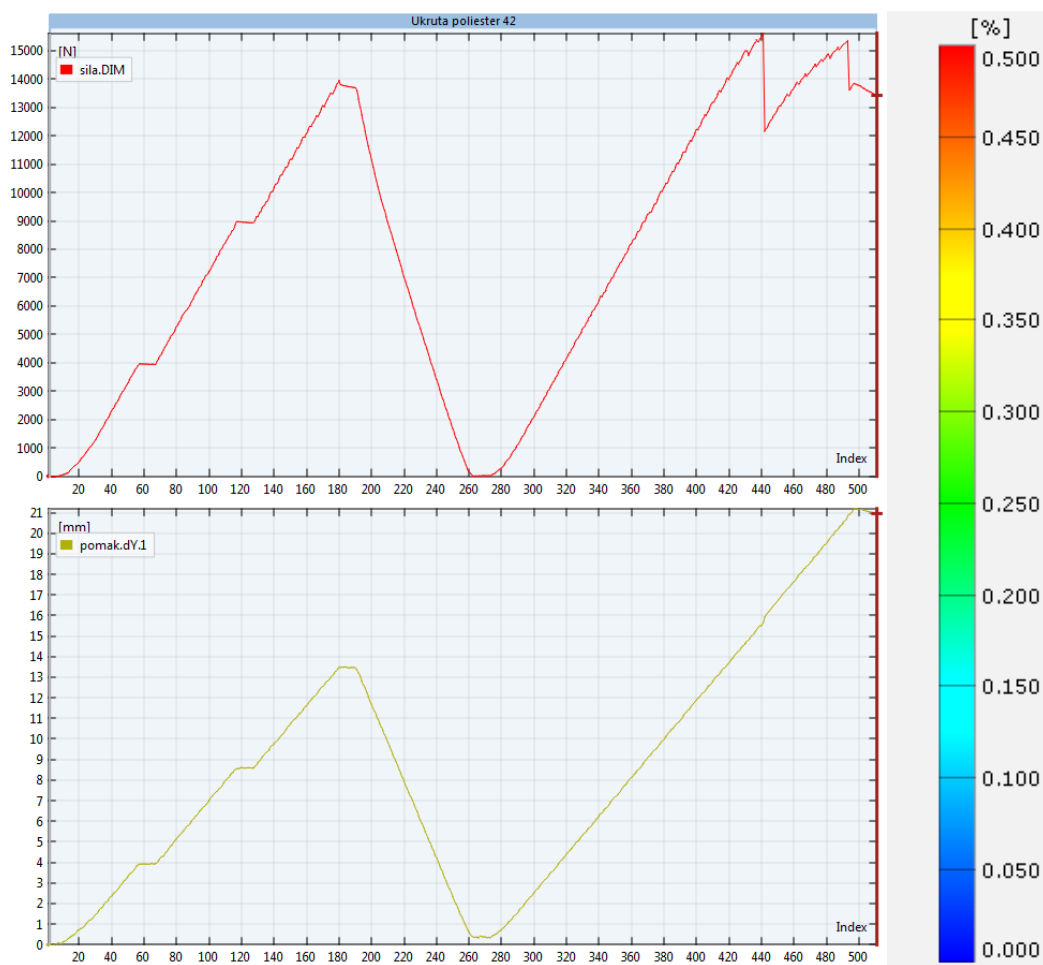


**Slika 30.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od epoksidne smole i jednog sloja karbona

### 5.1.9. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od poliesterske smole presjela 40 x 5 mm

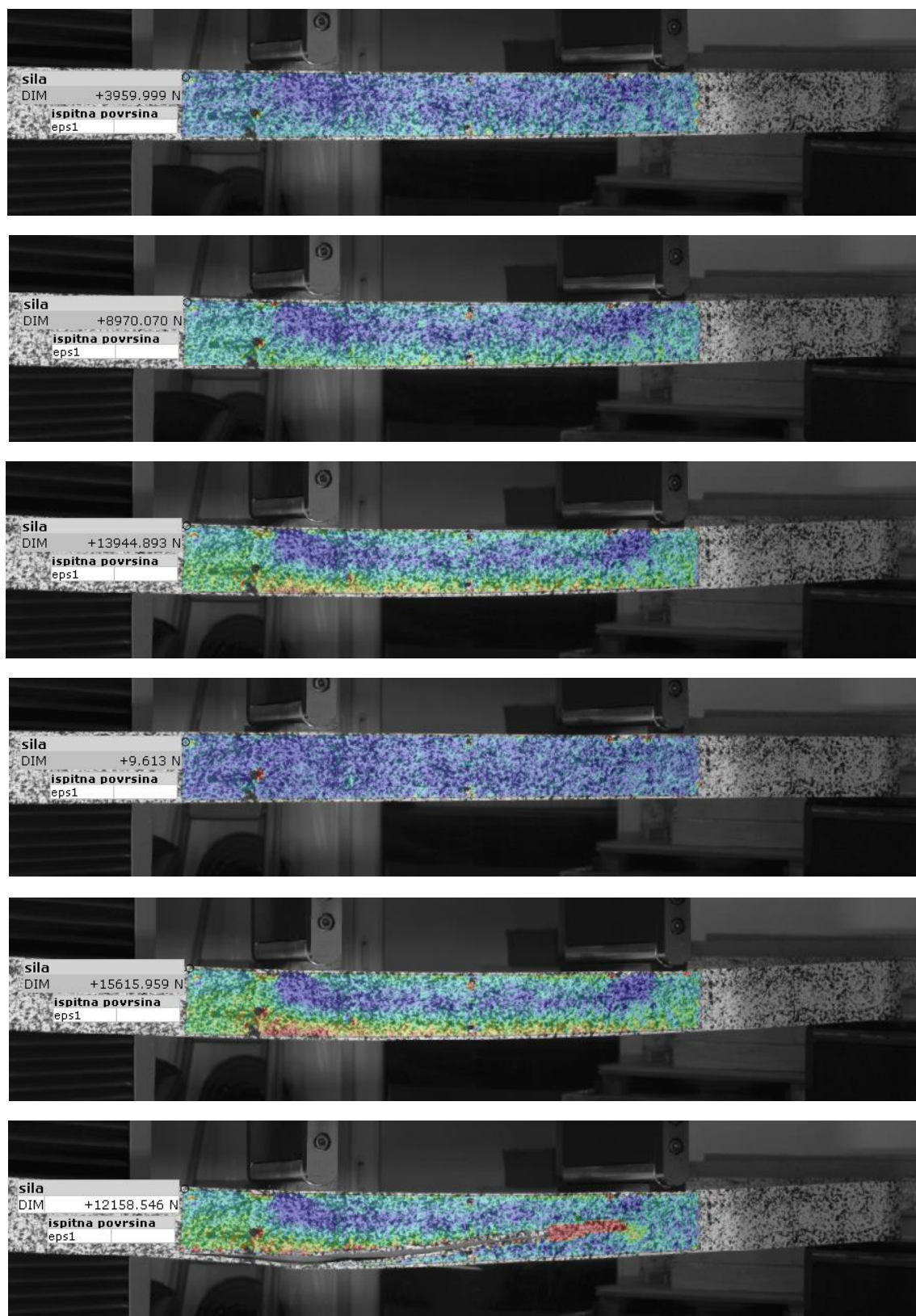
**Tablica 10.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od poliesterske smole presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta    | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|-----------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |           |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 22 | Poliester | 42     | 3,91                   | 8,55 | 13,46 | 0,4                      | 15,65     | 15615         |
| 23 | Poliester | 43     | 3,99                   | 6,66 | 13,89 | 0,36                     | 21,71     | 19527         |
| 24 | Poliester | 44     | 4,03                   | 8,65 | 13,86 | 0,52                     | 37,57     | 23030         |



**Slika 31.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od poliesterske smole, i skala deformacija

Kod uzorka 42 je najniže zabilježena sila loma u cijelom do sada provedenom ispitivanju, a iznosi 15615 N. A trajna deformacija iznosi 0,43 mm. U usporedbi s ukrutama od epoksidne smole, sila loma je nešto veća kod epoksidne smole, ali razlika u trajnoj deformaciji iznosi samo 0,026 mm.

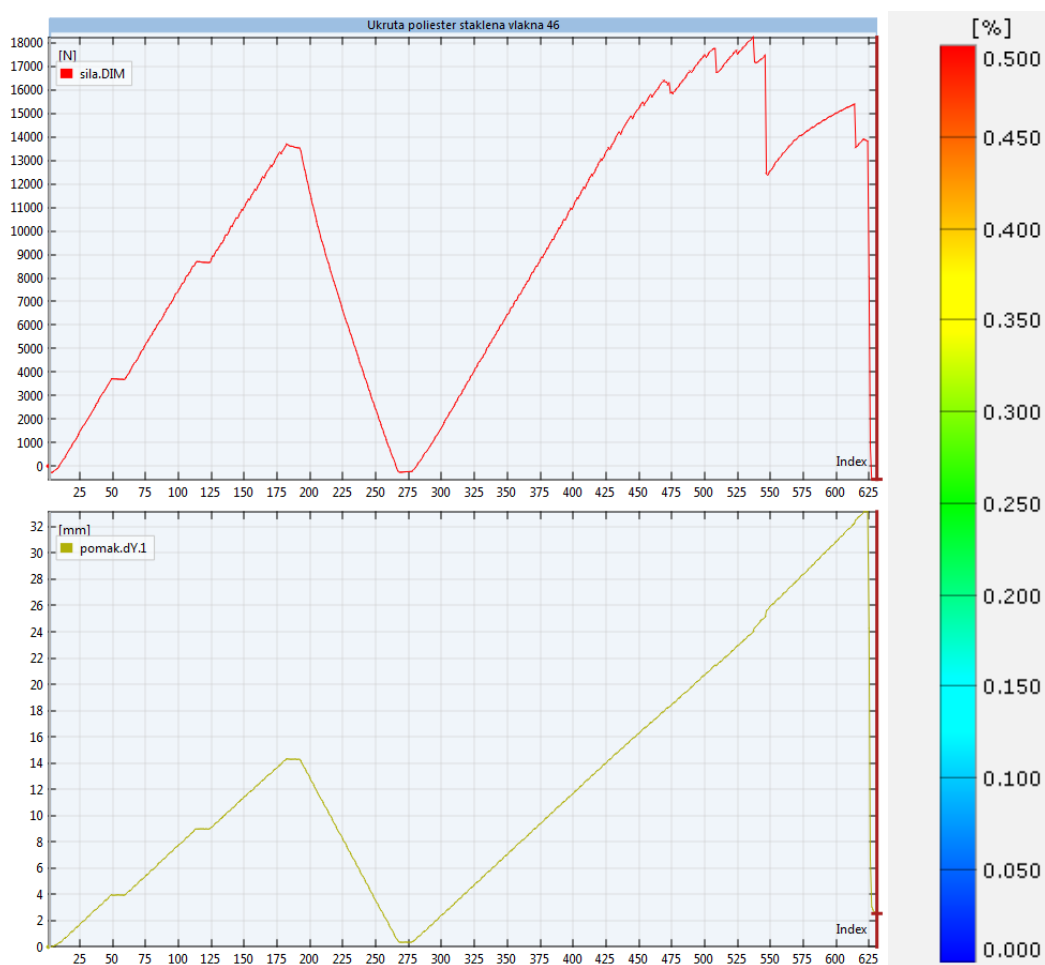


**Slika 32.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od poliesterske smole

### 5.1.10. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od poliesterske smole i jednog sloja staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm

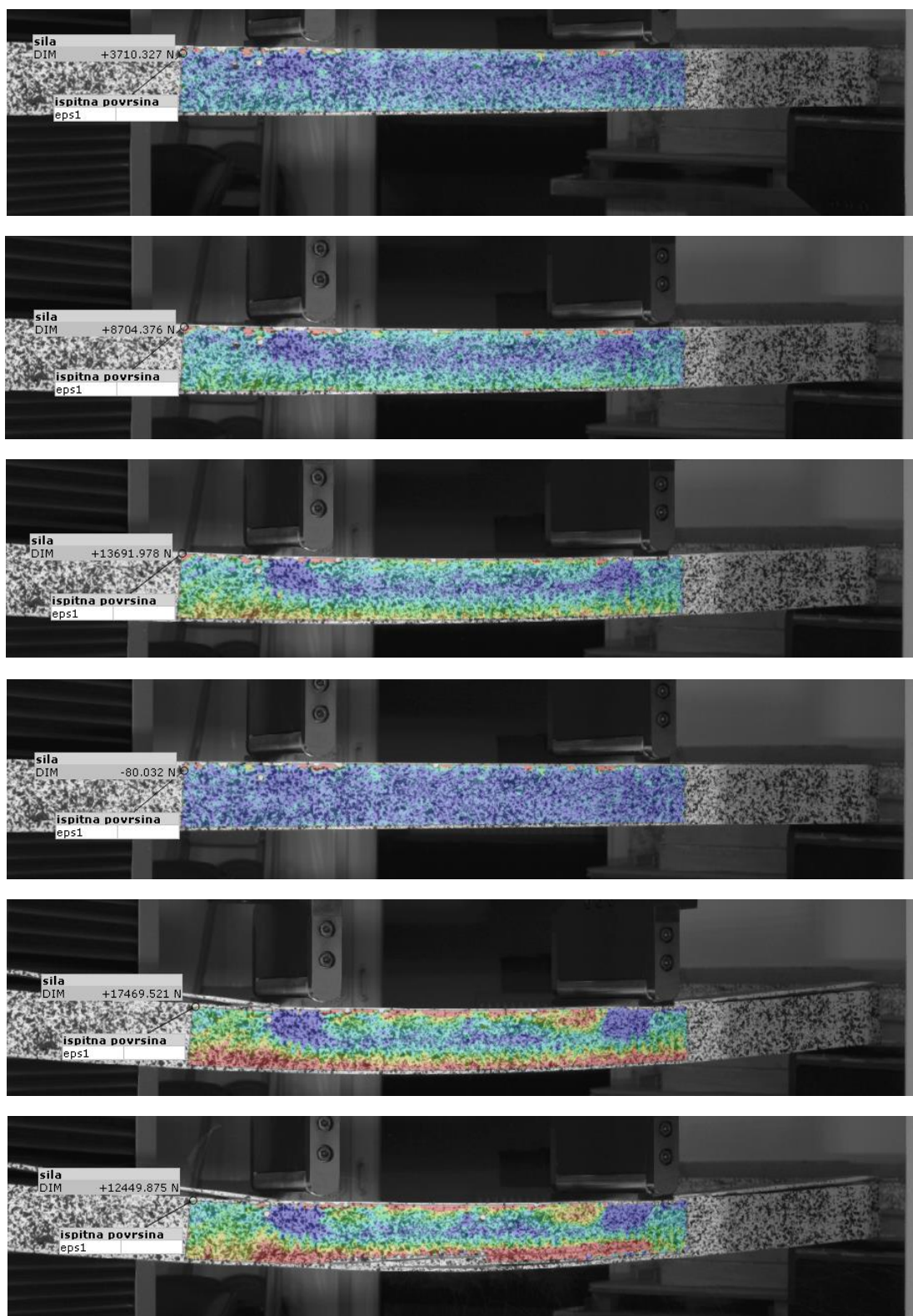
**Tablica 11.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtaca ojačanih ukrutom od poliesterske smole i jednog sloja staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta                    | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|---------------------------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |                           |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 25 | Poliester staklena vlakna | 46     | 3,95                   | 8,98 | 14,31 | 0,36                     | 24,02     | 18244         |
| 26 | Poliester staklena vlakna | 47     | 4,39                   | 9,7  | 15,44 | 0,52                     | 19,04     | 16464         |
| 27 | Poliester staklena vlakna | 48     | 3,64                   | 8,16 | 15,01 | 0,47                     | 21,07     | 18423         |



**Slika 33.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od poliesterske smole i jednog sloja staklenih vlakana, i skala deformacija

Kao i ostale varijante s poliestrom, vidljive su niske sile loma uzorka, ali i nešto niže trajne deformacije nego kod varijante sa slojem karbona. Sila loma iznosi 17710 N, što je najmanja vrijednost u ispitivanju, a trajna deformacija 0,45 mm.

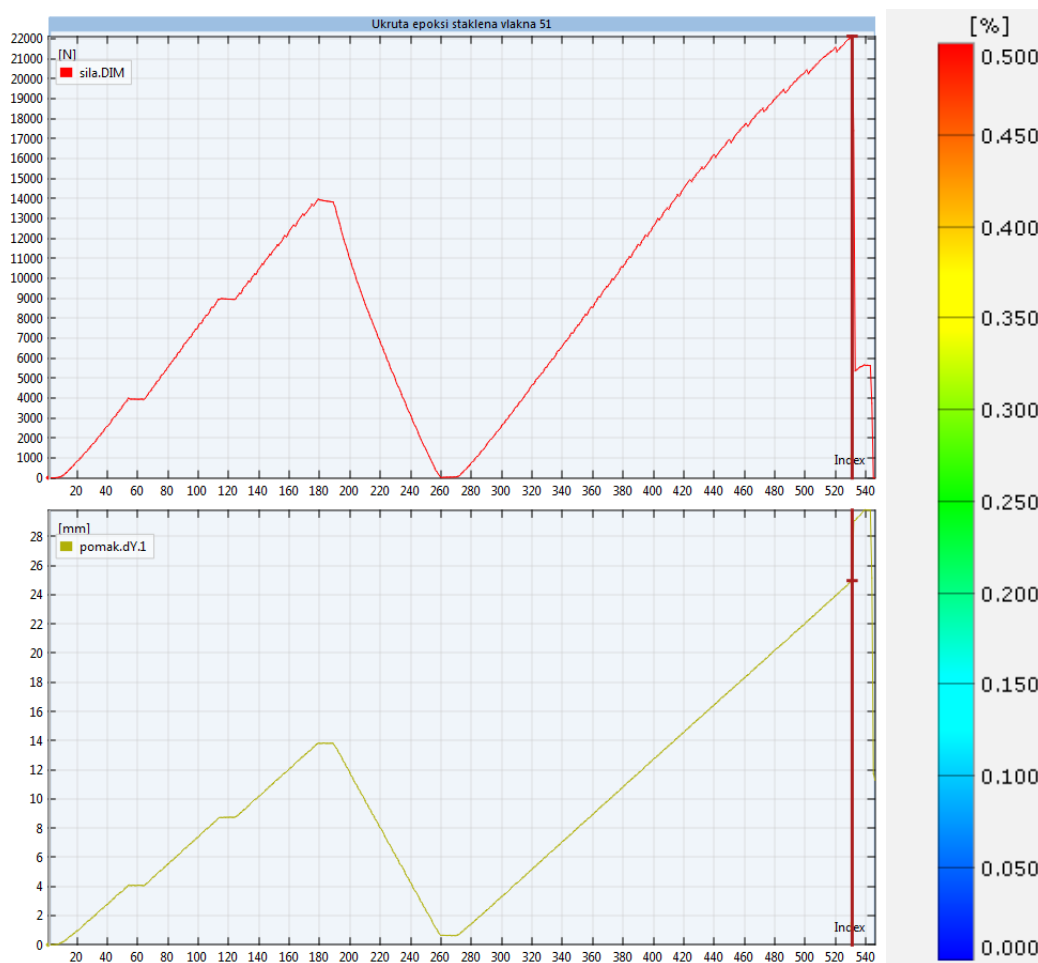


**Slika 34.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od poliesterske smole i jednog sloja staklenih vlakana

### 5.1.11. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od epoksidne smole i jednog sloja staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm

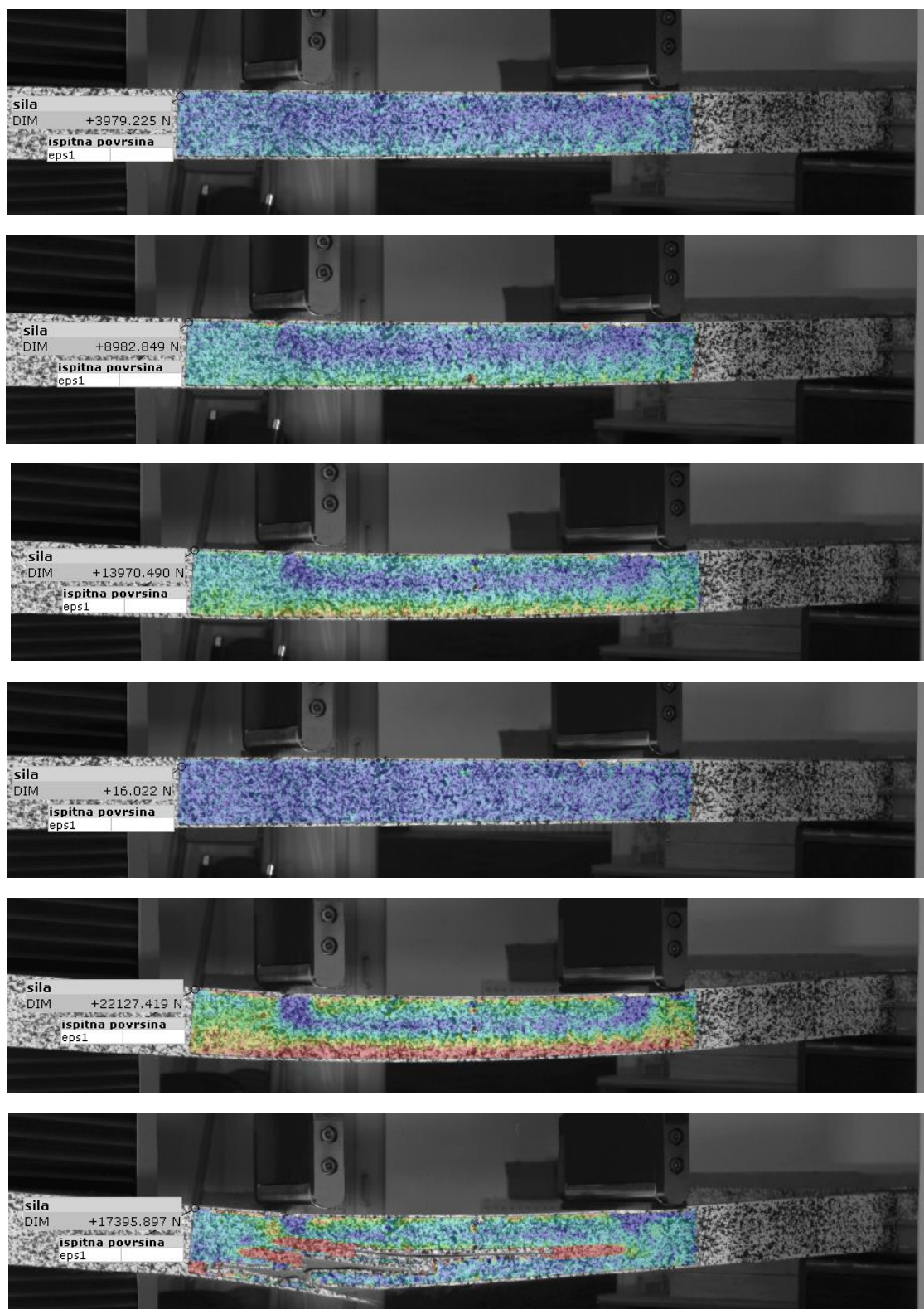
**Tablica 12.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od epoksidne smole i jednog sloja staklenih vlakana presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta                 | Oznaka | Pomak u mm kod sile(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|------------------------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |                        |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 28 | Epokis staklena vlakna | 50     | 3,72                   | 8,32 | 13,03 | 0,26                     | 29,61     | 24208         |
| 29 | Epokis staklena vlakna | 51     | 4,06                   | 8,73 | 13,83 | 0,65                     | 24,96     | 22127         |
| 30 | Epokis staklena vlakna | 52     | 4,04                   | 8,8  | 13,68 | 0,28                     | 32,54     | 26510         |



**Slika 35.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od epoksidne smole i jednog sloja staklenih vlakana, i skala deformacija

Vrijednost trajne deformacije iznosi 0,4 mm, a vrijednost sile loma 24281 N. Obje vrijednosti se kreću oko prosjeka rezultata.

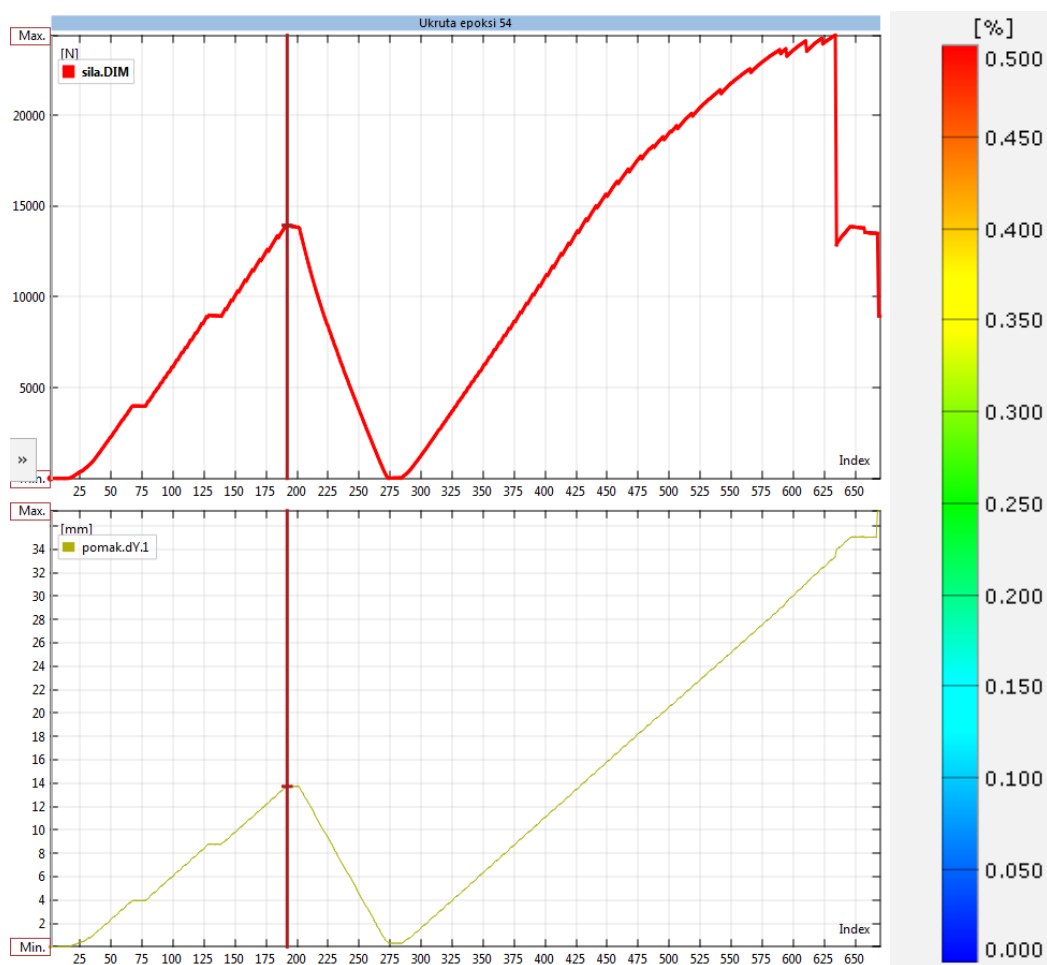


**Slika 36.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od epoksidne smole i jednog sloja staklenih vlakana

### 5.1.12. Rezultati za uzorak ojačan ukrutom od epoksidne smole presjeka 40 x 5 mm

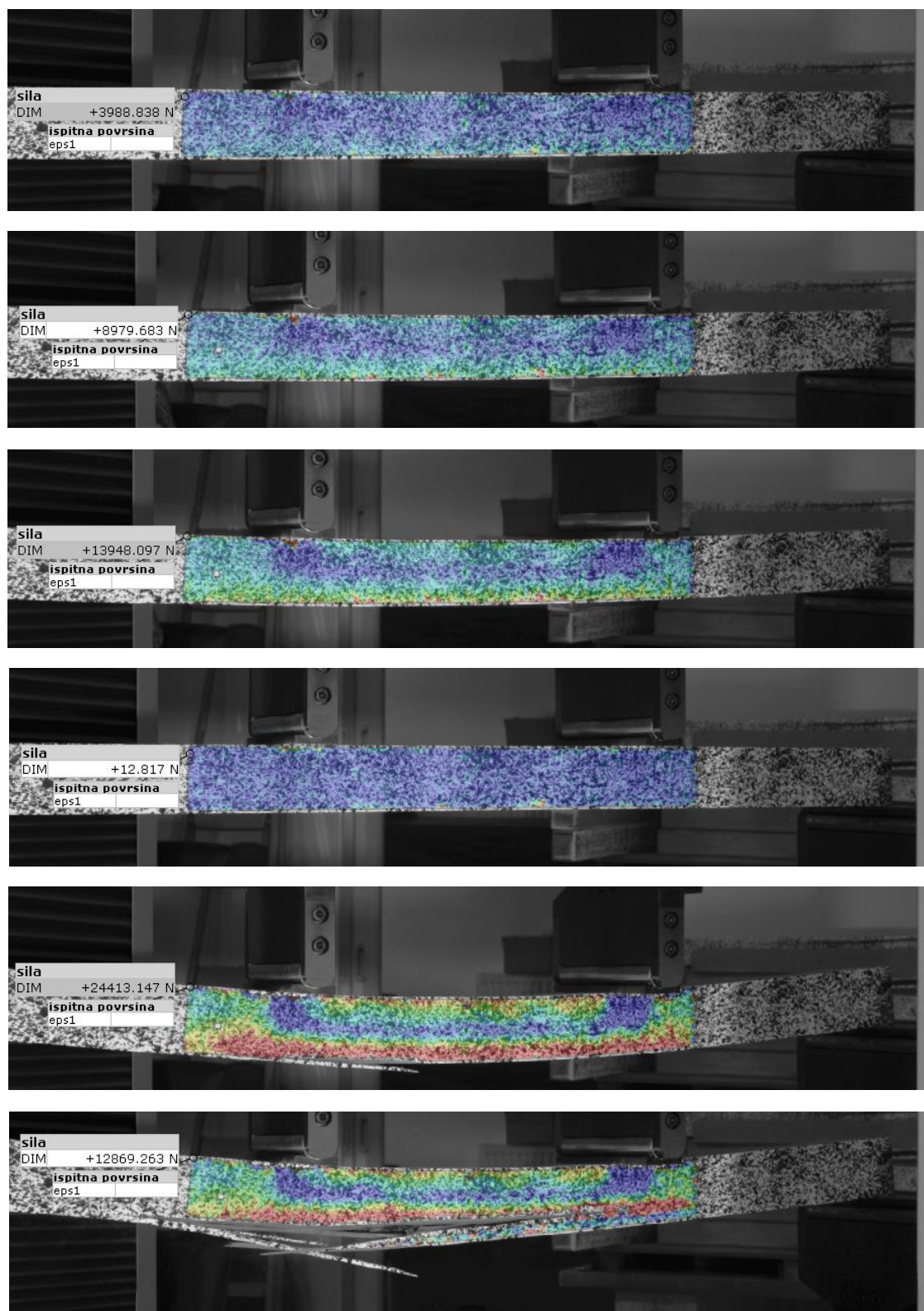
**Tablica 13.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od epoksidne smole presjeka 40 x 5 mm

| BR | Ukruta | Oznaka | Pomak u mm kod sila(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|--------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |        |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 31 | Epoksi | 54     | 3,95                   | 8,77 | 13,72 | 0,3                      | 33,38     | 24413         |
| 32 | Epoksi | 55     | 4,52                   | 9,99 | 15,93 | 0,5                      | 31,86     | 22466         |



**Slika 37.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od epoksidne smole, i skala deformacija

Vrijednosti trajne deformacije iznose 0,4 mm, a sile loma 23439 N. Obje vrijednosti se kreću oko prosjeka svih mjerenja.

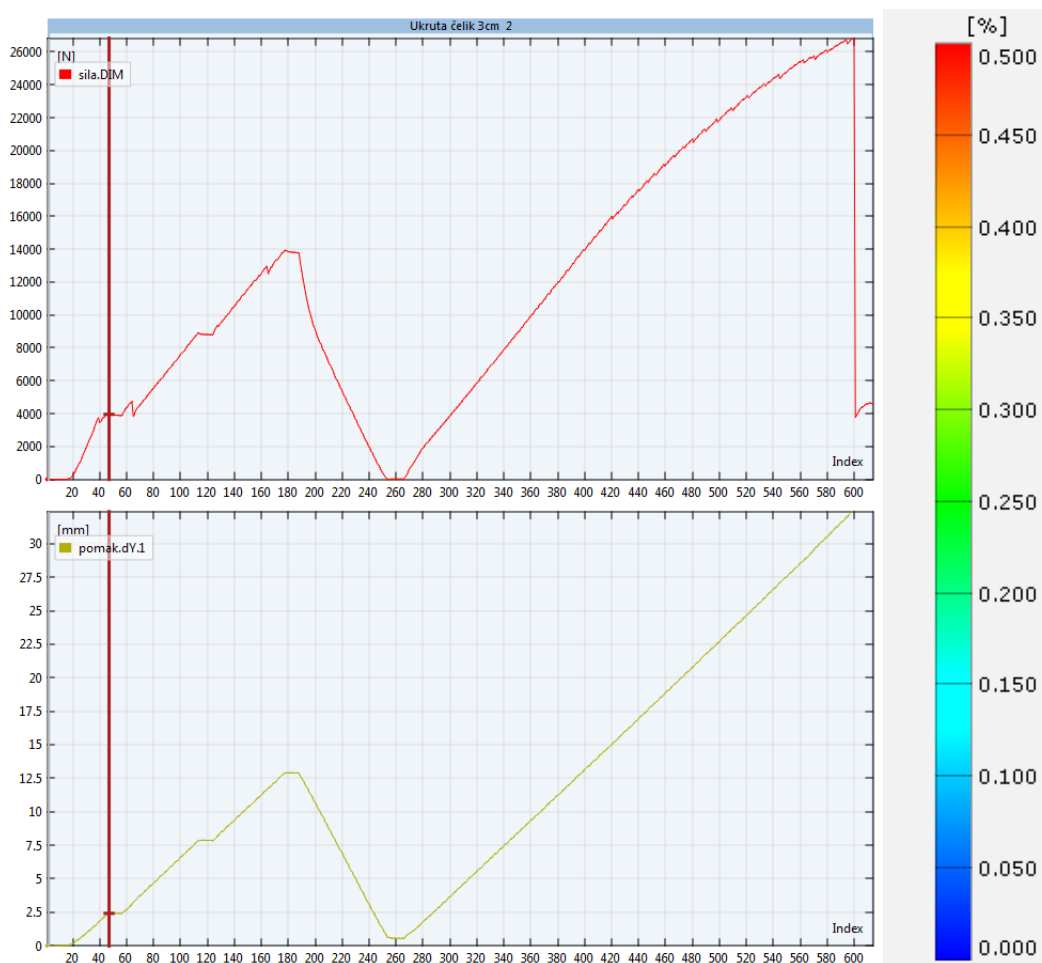


**Slika 38.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od epoksidne smole

### 5.1.13. Rezultati za uzorak ojačan čeličnom ukrutom presjeka 30 x 5 mm

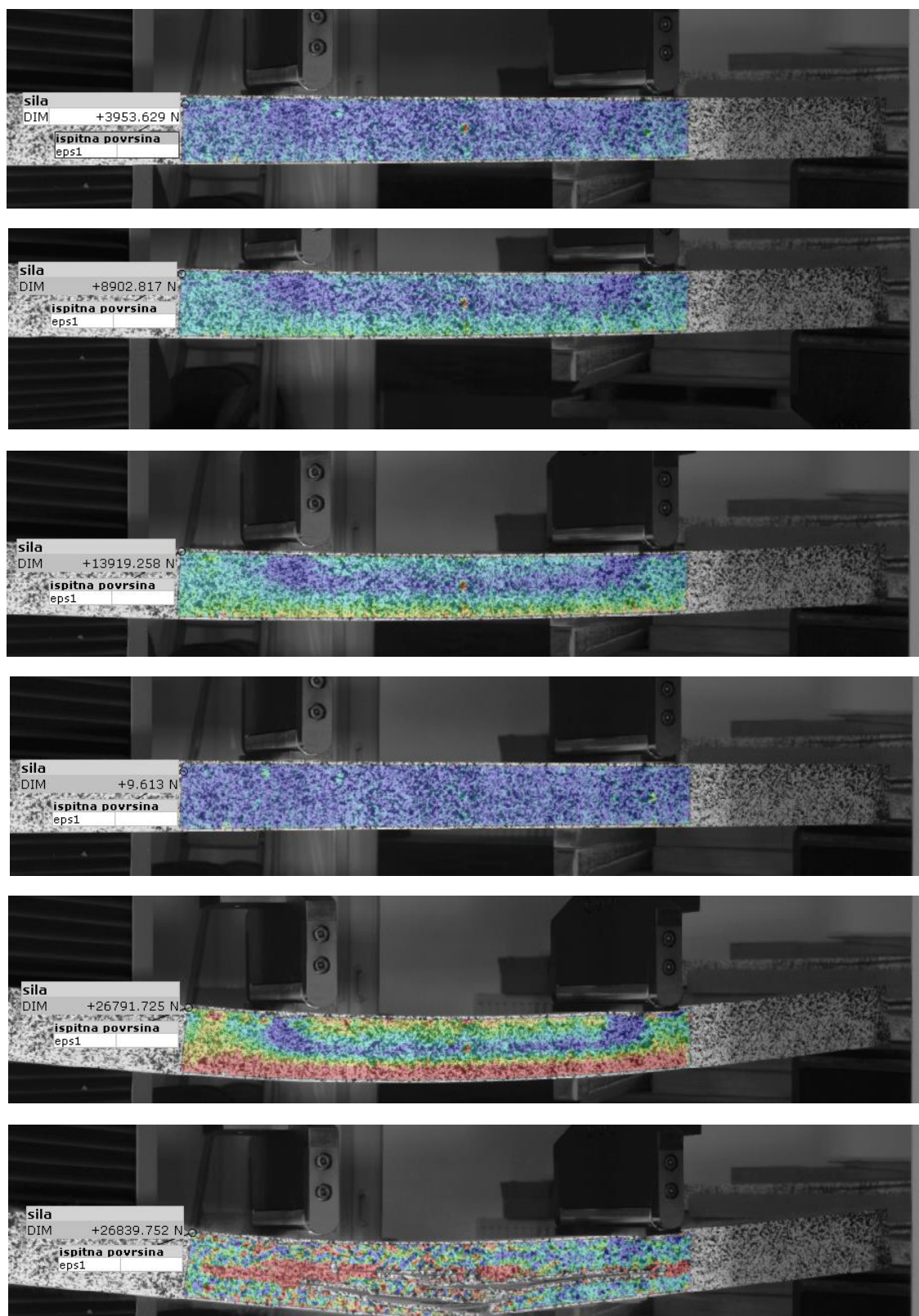
**Tablica 14.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od čelične šipke poprečnog presjeka 30 x 5 mm

| BR | Ukruta    | Oznaka | Pomak u mm kod sile(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|-----------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |           |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 33 | Čelik 3cm | 1      | 2,64                   | 7,39 | 11,89 | 0,45                     | 26,55     | 22588         |
| 34 | Čelik 3cm | 2      | 2,41                   | 7,81 | 12,9  | 0,55                     | 32,4      | 26791         |
| 35 | Čelik 3cm | 3      | 3,5                    | 8,73 | 14,11 | 0,87                     | 22,35     | 19873         |



**Slika 39.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od čelika širine 3 cm, i skala deformacija

Vidljivo je da razlika u širini ukruta izrađenih od čelika nema velikog utjecaja, vrijednosti zaostale deformacije i sile loma su slične. Sila loma iznosi 23084 N, dok trajna deformacija 0,62 mm.

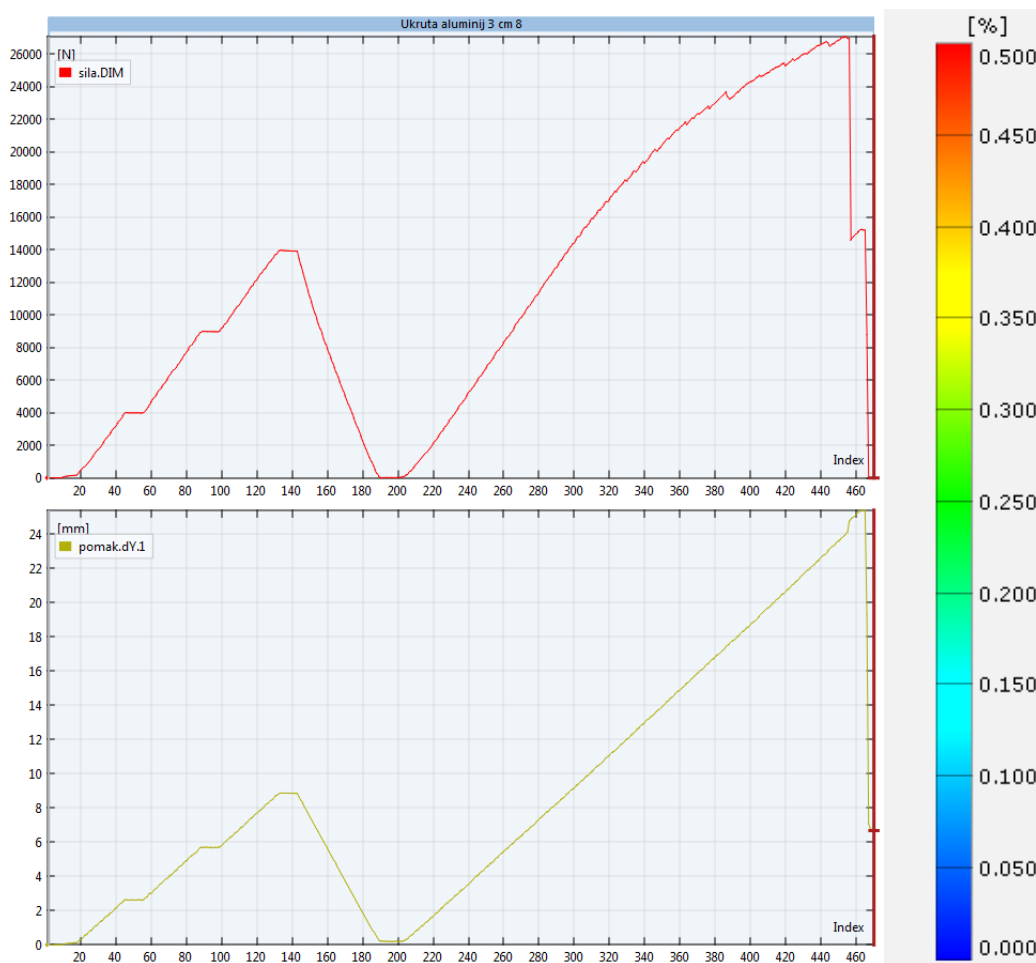


**Slika 40.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od čelika širine 3 cm

### 5.1.14. Rezultati za uzorak ojačan aluminijskom ukrutom presjeka 30 x 5 mm

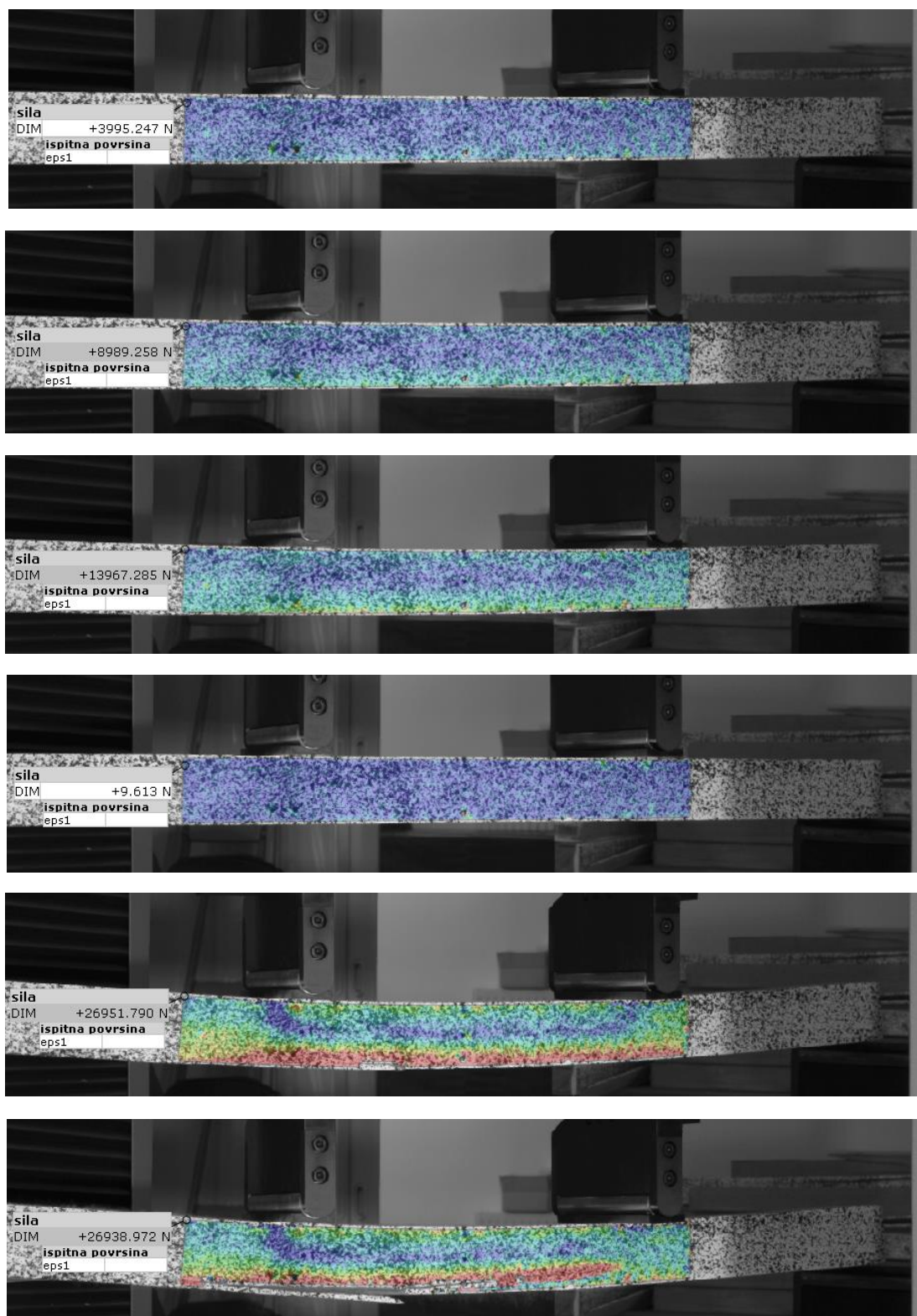
**Tablica 15.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih četvrtača ojačanih ukrutom od aluminijske šipke poprečnog presjeka 30 x 5 mm

| BR | Ukruta | Oznaka | Pomak u mm kod sile(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|--------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |        |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 36 | Al 3cm | 7      | 2,58                   | 5,6  | 8,75  | 0,26                     | 14,35     | 21016         |
| 37 | Al 3cm | 8      | 2,62                   | 5,7  | 8,87  | 0,2                      | 24        | 27089         |
| 38 | Al 3cm | 9      | 2,56                   | 5,4  | 8,21  | 0,32                     | 30,13     | 32342         |



**Slika 41.** Grafički prikazi sile i pomaka kod ukrute od aluminija širine 3 cm, i skala deformacija

Isto kao i kod čelika, promjena širine ukrute nema veliku razliku u dobivenim rezultatima. Vrijednost trajne deformacije iznosi 0,26 mm, a sile loma 26815 N. Dobiveni rezultati plasiraju ovu vrstu ukruta među bolje opcije.

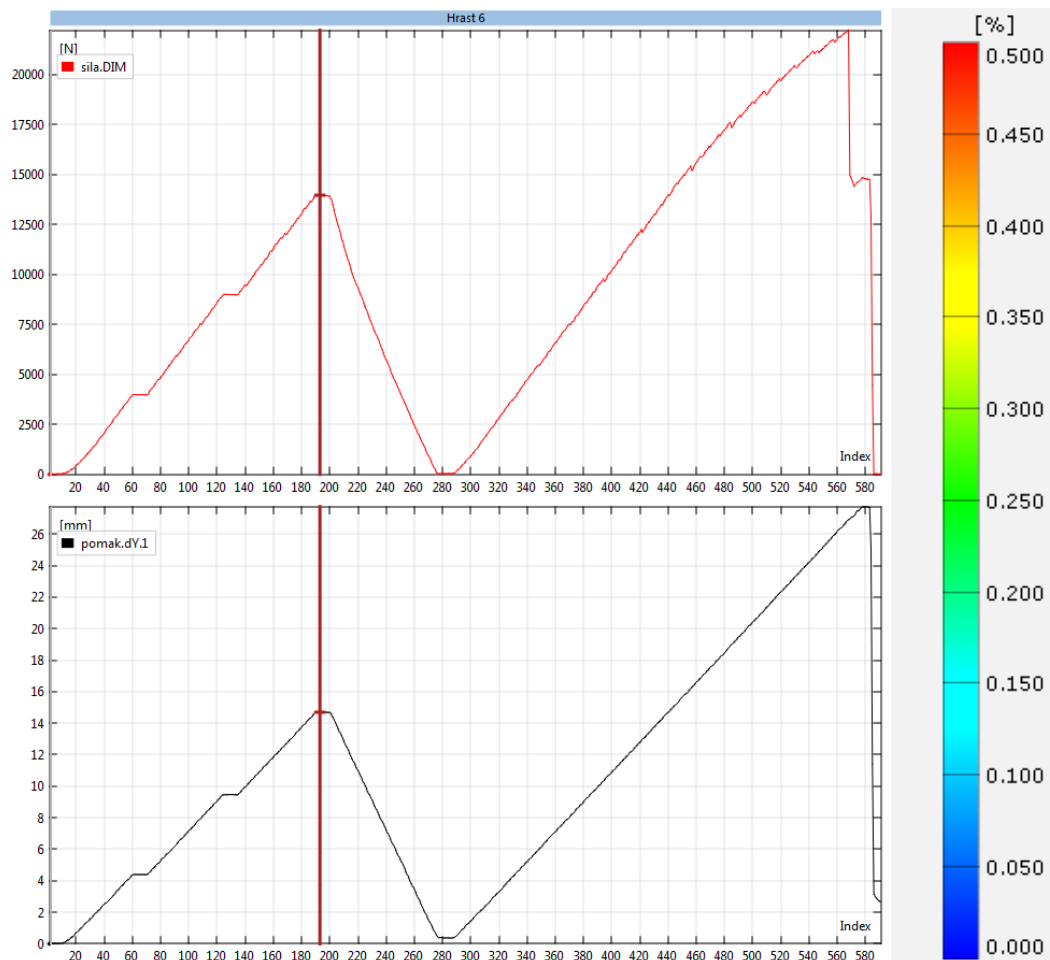


**Slika 42.** Prikaz raspodjele naprezanja kod ukrute od aluminija širine 3 cm

### 5.1.15. Rezultati za uzorak bez ojačanja presjeka 60 x 60 mm

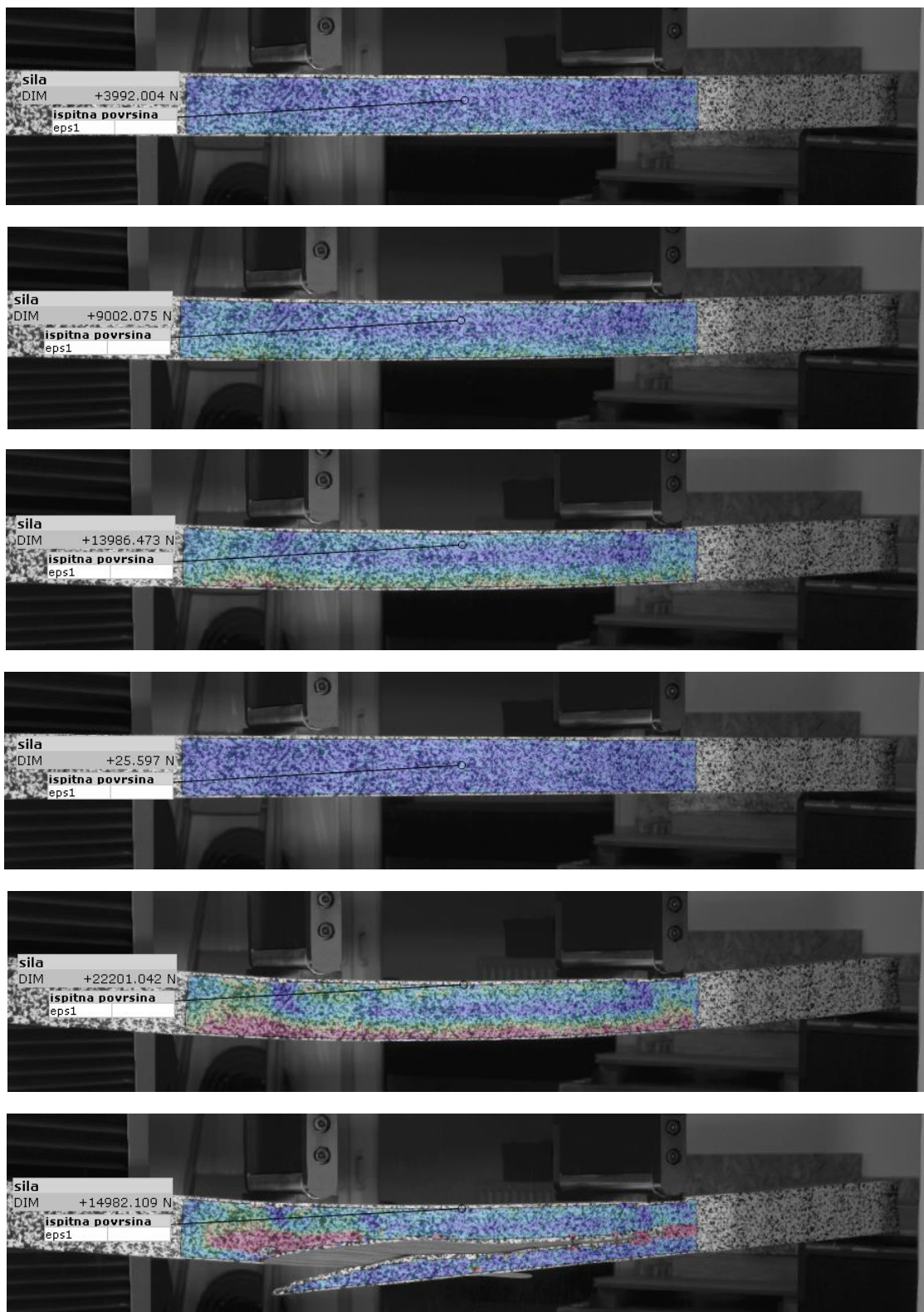
**Tablica 16.** Prikaz rezultata deformacija pojedinačnih hrastovih četvrtača bez ojačanja poprečnog presjeka 60 x 60 mm

| BR | Ukruta | Oznaka | Pomak u mm kod sile(N) |      |       | trajna def. kod 10N (mm) | max pomak | Sila loma (N) |
|----|--------|--------|------------------------|------|-------|--------------------------|-----------|---------------|
|    |        |        | 4000                   | 9000 | 14000 |                          |           |               |
| 39 | hrast  | 5      | 4,23                   | 9,19 | 14,31 | 0,31                     | 32,22     | 25379         |
| 40 | hrast  | 6      | 4,4                    | 9,46 | 14,68 | 0,38                     | 26,89     | 22201         |
| 41 | hrast  | 9      | 4,46                   | 9,86 | 15,53 | 0,39                     | 32,74     | 22844         |

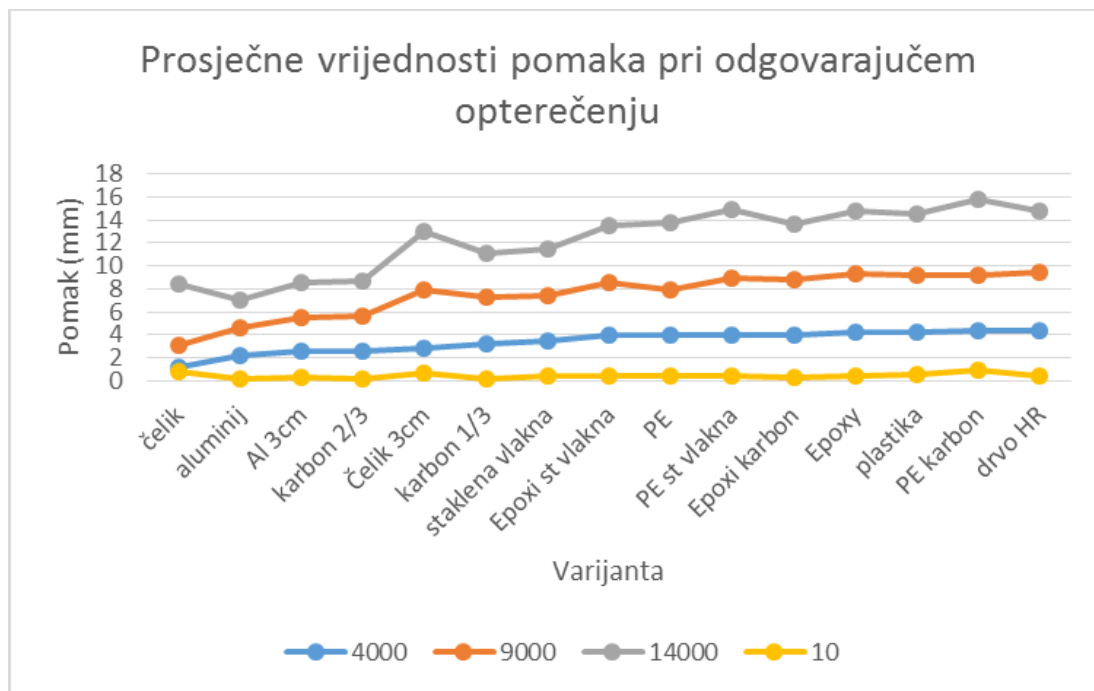


**Slika 43.** Grafički prikazi sile i pomaka kod hrastovine bez ukruta, i skala deformacija

Pokazalo se da hrastovi elementi ispitivani bez ukruta pokazuju prosječne vrijednosti u odnosu na ostale ukrute. A rezultati sile loma iznose 23474 N, a trajne deformacije 0,36 mm.

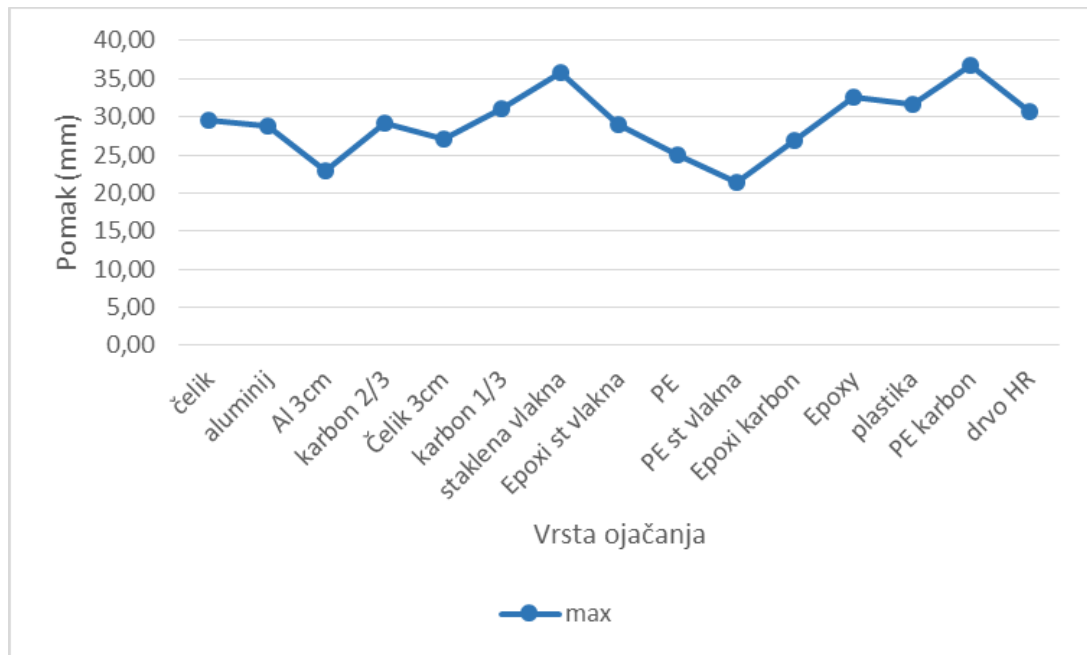


**Slika 44.** Prikaz raspodjele naprezanja kod hrastovine bez ukruta



**Slika 45.** Vrijednosti pomaka pri opterećenju od 4000 N, 9000 N, 14000 N te kod rasterećenja na 10 N

Vidljivo je da kontinuirano dobra svojstva deformacija u svim fazama imaju ukrute izrađene od aluminija, a da ukrute izrađene od poliesterske smole i jednog sloja karbonskih vlakana imaju kontinuirano loša svojstva, isto kao i ukrute izrađene od epoksidne smole. Čelik širine 40 mm pokazuje najmanje rezultate deformacija kod opterećenja od 4000 N i 9000 N, i izuzetno dobre rezultate kod 14000 N, ali mu prilikom rasterećenja ostaje druga najveća vrijednost trajne deformacije u iznosu od 0,74 mm. Ukrute u varijantama 1/3 i 2/3 karbona pokazuju isto tako dobre rezultate kod 4000 N, 9000 N i 14000 N, a prilikom rasterećenja imaju drugu i trenču najmanju trajnu deformaciju. Loše rezultate isto tako pokazuje i polikarbonat, koji je pokazao treću najveću deformaciju pri opterećenju od 4000 N.

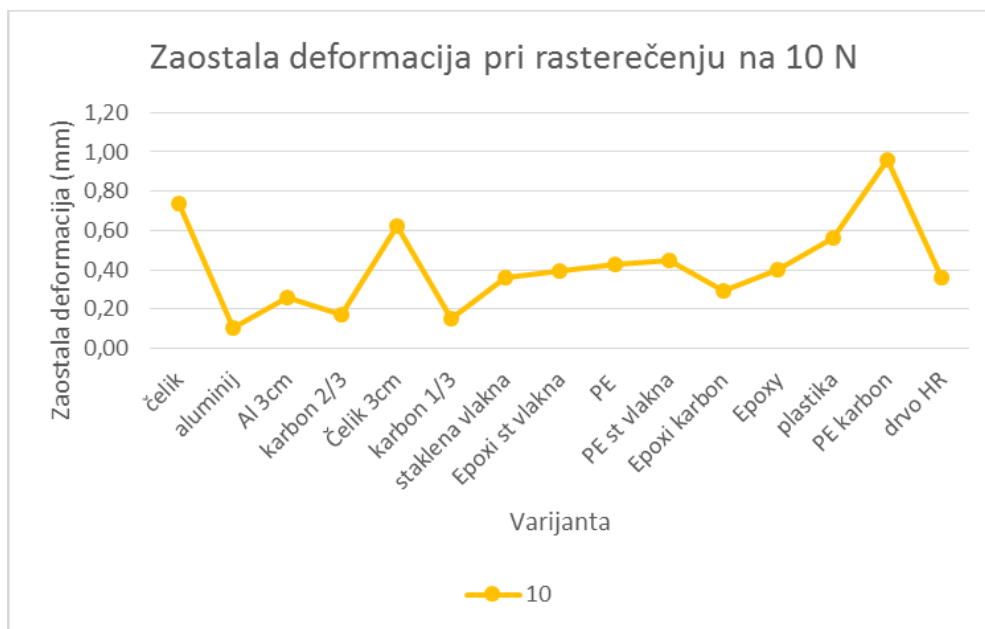


**Slika 46.** Vrijednosti pomaka pri opterećenju ojačanih četvrtača neposredno prije loma

Grafički prikaz prosječne vrijednosti pomaka pri odgovarajućim opterećenjima (silama). Eksperiment je uspio prema tome da je vidljiva razlika između različitih varijanti, a progib kod većeg opterećenja je uvijek nešto veći nego kod manjeg. Te je vidljivo da je zaostala deformacija kod rasterećenja s 14000 N na 10 N gotovo 0.

## 5.2. Zaostala deformacija

Na kraju ciklusa savijanja uzoraka pri opterećenju od 14000 N, na kratko je provedeno rasterećenje na 10 N kako bi vidjeli kolika je zaostala deformacija.



**SLIKA 47.** Grafički prikaz trajne deformacije

Iz grafičkog prikaza je jasno vidljivo da najmanju zaostalu deformaciju imaju uzorci s aluminijskim i karbonskim ukrutama, te da su kod drva bez ukruta isto tako razmjerno male zaostale deformacije (manje od 0,4 mm). Veće zaostale deformacije nalazimo kod uzoraka s čeličnim ukrutama, i kombinacijom poliesterske smole s jednim slojem karbonskih vlakana. Prema dobivenim rezultatima, najbolje su se pokazale aluminijske ukrute u širinama 40 mm i 30 mm, i karbonske ukrute s 1/3 udjela karbona, i s 2/3 udjela karbona. Zaostale deformacije ostalih varijanti se kreću slično kao i kod hrasta bez ukruta, osim čelika širine 40 mm i 30 mm, i poliesterske smole s jednim slojem karbona kod kojih zaostala deformacija iznosi do gotovo 1 mm.

## 6. ZAKLJUČAK

Vidljivo je da ojačavanje elemenata ima smisla prema tome da pojedine varijante pokazuju bolja svojstva od same neojačane hrastovine.

Čelične ukrute 40 x 5 mm rezultirale su najmanjim pomakom kod opterećenja od 4000 N i 9000 N, ali i najvećom zaostalom deformacijom nakon rasterećenja s 14000 N na 10 N. Ojačanja od aluminijske i čelika u ovom slučaju su učinkovitija od ojačanja od staklenih ili karbonskih vlakana uronjenim u epoksidnu smolu. Ukupna deformacija u trenutku loma je manja kod materijala s inače manjim pomakom (npr. čelik). Radi primijećenog lošeg vezanja čeličnih ukruta s drvom, zanimljivo bi bilo za buduća ispitivanja pokušati popraviti adhezivna svojstva eventualnim korištenjem određenih primarnih premaza, ili mehaničkom modifikacijom površine čelika.

Isto tako je vidljivo da se najmanje zaostale deformacije pojavljuju kod aluminijske i karbonske. Kod drva su također razmjerno male zaostale deformacije, dok s druge strane velike zaostale deformacije vidimo kod ukruta izrađenih od čelika, i poliesterske smole u kombinaciji s karbonom.

Vidljivo je da ciklus ispitivanja treba još prilagoditi prema tome da ovakav jednokratni ciklus ne rezultira gotovo nikakvom trajnom deformacijom, a prema tome da vrata nikada neće biti opterećena do kritične sile loma, taj podatak nam malo govori.

## 7. LITERATURA

1. Parvez, A. (2004): The reinforcement of timber for structural applications and repair
2. Yusof, A.; Rahman, A. B. (2017): Flexural Strengthening of Timber Beams Using Carbon Fibre Reinforced Polymer, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 3 str. 348-358
3. Khadif, M.; Anshari, B.; Fajrin, J. (2018): Experimental Investigation on Flexural Properties of Glulam Timber Beam Reinforced by Bamboo Stripes, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 9, Issue 5, May 2018, str. 69-76
4. Andre, A. (2011): Benefits of strengthening of timber with fiber-reinforced polymers, Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola Ny Serie 3272 ISSN 0346-718X
5. Kliger, I. R.; Haghani, R.; Brunner, M.; Harte, A. M.; Schober, K. (2016): Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems, Eur. J. Wood Prod. 74:319–330
6. Jobin, J.; Garzon Barragan, O. L. (2007): Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers, Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering Steel and Timber Structures CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden
7. Pilar de la Rosa Garcíaa; Alfonso Cobo Escamillab; M. Nieves González Garcíaa (2013): Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials, Composites Part B: Engineering, Volume 55, December 2013, str. 528-536
8. Nowak, T.; Jasenko, J.; Kotwica, W.; Krzosek, S. (2016): Strenght Enhancement of Timber Beams Using Steel Plates – Review and Experimental Tests, Drewno 2016, Vol. 59, No. 196, str. 75-90
9. URL: <http://www.variotec.de/en/home/products/doors/> (29.9.2019.)
10. Aramis User Manual – Software, GOM mbH, Njemačka 2004